



Diseño e implementación de un sistema de automatización y control para cultivos acuapónicos en zonas urbanas

Karen Yissel Marín Franco
Luis Fernando Riveros Orozco

Director: Dr. Juan Manuel Nogales Viedman

Pontificia Universidad Javeriana Cali
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Ingeniería Electrónica
Proyecto de Grado

Marzo 14 de 2023

Índice general

1. Descripción del problema	2
1.1. Problema de investigación	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Justificación del problema	3
1.4. Alcances y Limitaciones	5
1.4.1. Alcances y Limitaciones	5
1.4.2. Consideraciones especiales	5
2. Marco de referencia	6
2.1. Marco de Referencia	6
2.1.1. Marco Conceptual	6
2.1.2. Marco Teórico	7
2.1.3. Antecedentes	15
3. Metodología	17
3.1. Cultivo Acuaponico	18
3.1.1. Técnica Hidropónica	18
3.1.2. Elección plantas	20
3.1.3. Elección peces	20
3.2. Montaje físico	21
3.2.1. Estructura física	21
3.2.2. Estructura eléctrica y electrónica	29
3.3. Página Web	50
3.3.1. Diseño	50
3.3.2. Construcción	52
3.3.3. Resultados	55
3.4. IoT	56
3.4.1. Arquitectura de ejecución	57
3.4.2. MQTT	58
3.5. Control	61
3.5.1. On/Off	61
3.5.2. Moderno Multivariable	62
3.5.3. Resultados de control:	71
3.6. Sistema de gestión	75
3.6.1. Diseño	75
3.6.2. Construcción	76
3.6.3. Resultados	79
3.7. Registro componentes vivos	80
3.7.1. Peces	80
3.7.2. Plantas	85

3.8. Problemas	87
4. Resultados del proyecto	89
5. Recursos	91
5.1. Costos humanos	91
5.2. Costos técnicos	91
6. Conclusiones y trabajos futuros	93
6.1. Trabajos futuros	93
6.1.1. Mejora de componentes eléctricos y electrónicos	93
6.1.2. Mejora de página web	94
6.1.3. Mejora de control	94
6.1.4. Otras mejoras	94
6.2. Conclusiones	94
Bibliografía	96
7. Anexos	102
7.1. Documentacion	102

Agradecimientos

Son muchos los docentes que han sido parte de nuestro recorrido por la vida universitaria, a todos ellos les queremos agradecer por transmitirnos los conocimientos necesarios para hoy poder estar aquí. También, agradecemos a la Facultad de Ingeniería y Ciencias y a la carrera de Ingeniería Electrónica, en cabeza de Luis Eduardo Tobón, por financiar parte de este proyecto de grado.

Agradecemos a nuestro director de proyecto ante todo por su paciencia. Gracias profesor Juan Manuel por habernos guiado, enseñado, motivado y por dejarnos profundas lecciones de vida a través de sus analogías: "¿De qué sirve un ferrari con rines de lujo, pero sin motor?" J.Nogales, 2022.

Gracias a Daniela y a Jamioy por su ayuda cuando no podíamos ir a revisar el cultivo o a comprar materiales.

Menciones especiales

- *Isabella Tello Gomez*: por facilitarnos el espacio, por su buena actitud y sus consejos respecto a las plantas y su crecimiento.
- *Viviana Andrea Almeida Osorio*: por su disposición para enseñarnos a usar las herramientas del laboratorio de mecánica y darnos ideas de diseño.
- *Bleider Johan Arizala Cobo*: por asesorarnos en el diseño de las impresiones 3d y cortes 2d, por sus ideas y por su actitud.
- *Andrés Tobar*: por regalarnos desinteresadamente los alevinos de tilapia y su alimento, habíamos preguntado en varios lugares y en ninguno nos vendían menos de 1000. También por su disposición para darnos consejos relacionados con la cría de tilapia.
- *Fernando Riveros*: Por sus ideas prácticas y sencillas, por su ayuda con la construcción de la caja de seguridad, algunos filtros y arandelas.

Personales

Luis Riveros

Quisiera agradecer a mi madre, por estar pendiente de mi, por su disposición para ayudarme con las compras de lo que necesitara y su cariño.

Agradezco a mi compañera de grado, por su compañía, comprensión y disposición.

Karen Marín

Aunque no quiero sonar cliché, empiezo dándole gracias a Dios por ser tan bueno conmigo y darme tantas oportunidades y personas valiosas que han hecho este logro posible.

No me alcanzarán nunca las palabras para agradecerle a mi mami, una mujer maravillosa, fuerte y valiente que ha creído en mí siempre y que se ha sacrificado sin medida. Gracias ma' por enseñarme que la educación era el camino y que es el arma más poderosa para salir adelante: esto es por y para ti.

Agradezco a mi compañero de proyecto de grado porque las risas no faltaron, ni los chismes, ni la buena música. Me llevo un recuerdo muy lindo de haber vivido esta experiencia junto a ti.

Por último, pero no menos importante, doy gracias a Rey y a Paulo por el amor, apoyo y guía que me han brindado. Fueron ustedes quienes sembraron en mí la semilla de la pasión por lo que se hace.

Introducción

En el presente trabajo se plantea un sistema de automatización y control para cultivos acuapónicos en entornos urbanos. Dado que el cuidado y mantenimiento de estos suele ser manual y experimental, herramientas o técnicas de automatización robustas brindan alternativas de solución para regular las complejas interacciones biológicas dentro del cultivo [1].

En este documento se presenta un detallado relato del proceso llevado a cabo para culminar el proyecto. Para lograr una exposición clara y completa, se ha estructurado en siete capítulos que abordan diferentes aspectos como métodos, técnicas, problemas y resultados alcanzados. Entre estos capítulos, los cuatro más importantes son: descripción del problema, marco de referencia, metodología y resultados del proyecto.

En el primer capítulo se aborda la problemática y se formula la pregunta de investigación, se establecen los objetivos a alcanzar, se explica el porqué y para qué de la propuesta y se limitan los alcances del proyecto.

En el segundo capítulo, se encuentra la base teórica necesaria para la comprensión de la propuesta y una revisión de trabajos similares al proyecto en un contexto local, nacional e internacional.

El sistema de automatización consta de cinco componentes: montaje físico, página web, IoT, control y sistema de gestión. Cada uno de ellos se explica detalladamente en el tercer capítulo, incluyendo un registro de los componentes vivos involucrados y los obstáculos encontrados durante el proceso de desarrollo del proyecto con su respectiva solución.

El cuarto capítulo presenta los resultados del proyecto, sintetizando porqué y cómo se cumplieron cada uno de los objetivos planteados y mencionando los logros que exceden lo esperado inicialmente.

En los capítulos siguientes se mencionan los recursos económicos empleados, se plantean las conclusiones tomando como eje central el sistema de automatización y se proponen una serie de trabajos futuros, tomando como base las oportunidades de mejora que tiene el prototipo actual.

Dada la magnitud del proyecto, se creo un repositorio en donde se encuentra el detalle de temas de arquitectura, códigos y algoritmos usados, el cual puede visitarse mediante un enlace directo desde los anexos.

CAPÍTULO 1

Descripción del problema

1.1. Problema de investigación

A lo largo de la historia, la iniciativa de cultivar en entornos urbanos ha estado ligada a suplir las necesidades alimentarias de la población en contextos de crisis económica o situaciones bélicas [2]. Hoy día, las zonas urbanas funcionan de manera más sistémica, siendo un conjunto equilibrado de procesos culturales, identitarios, sociales, económicos y políticos. En este sentido, sus habitantes también son más conscientes de esta sinergia y adaptan sus hobbies a sus necesidades para sacarles mayor provecho. El cultivo de plantas en general es una actividad que no se queda atrás en esta tendencia. Los huertos urbanos actualmente están siendo utilizados desde fines netamente estéticos, por ejemplo, con el uso de plantas ornamentales atractivas [3], hasta fines más ambientales como la mejora de la calidad del aire gracias al proceso de liberación de oxígeno [4], la absorción del ruido [5] o fines más personales como la mejora de la calidad de los productos alimentarios [6] y el acceso a diversidad de plantas como especies medicinales y aromáticas [7].

Los cultivos acuapónicos a pequeña escala son considerados una bondadosa alternativa para el cultivo de plantas en entornos reducidos resaltando la relación simbiótica entre plantas y peces. A partir de la utilización de los desechos de los peces, se producen nutrientes para las plantas mientras que, por su parte, estas últimas purifican el agua que retorna a los peces [8]. Estos sistemas ofrecen grandes ventajas en términos agrícolas permitiendo el cultivo de diversos tipos de plantas sin necesidad del uso de fertilizantes y/o pesticidas; al mismo tiempo, brindan otros beneficios como la reducción de un 90 % del consumo de agua empleada (en comparación con la agricultura tradicional) [6], el aumento del consumo de alimentos orgánicos [9] y la liberación de endorfinas causando efectos psicológicos positivos [10].

Por lo anterior, los cultivos acuapónicos resultan ser una gran opción para aportar a la solución de diferentes situaciones sociales, económicas y ambientales que se presentan actualmente, tales como la creciente migración de las personas de las zonas rurales a las zonas urbanas [11], el aprovechamiento de espacios urbanos reducidos para producir alimentos [12] y la escasez del recurso hídrico apta para el cultivo[13].

En esta misma línea, debido al creciente interés de las personas en los cultivos orgánicos [14] y al poco tiempo de supervisión que pueden destinar a los mismos en entornos urbanos, se hace necesario facilitar el cuidado y mantenimiento de cultivos acuapónicos en dichas zonas. Además, dada la complejidad que tienen los cultivos acuapónicos más pequeños donde fluctúan las variables como pH, oxígeno y temperatura, es necesaria una rápida respuesta ante dichas fluctuaciones. Es por esto, que se busca investigar acerca de ¿Cómo automatizar cultivos acuapónicos de uso personal para producción en zonas urbanas, empleando una técnica de control multivariable?

Este interrogante, requiere una búsqueda de información encaminada a identificar ¿Cuál es la relación y efecto de las variables presentes en los cultivos acuapónicos?, esto con el fin de desarrollar un sistema adaptable a diferentes condiciones ambientales y poder garantizar su estabilidad. También, a la búsqueda de información acerca de ¿Cómo facilitar la implementación y manejo de cultivos de uso personal en entornos urbanos?

1.2. Objetivos

En línea con la pregunta de investigación planteada, se establecen los siguientes objetivos para la ejecución del proyecto de grado:

1.2.1. Objetivo General

Diseñar un sistema de automatización para cultivos acuapónicos, empleando una técnica de control moderno multivariable, para uso en zonas urbanas.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Identificar una configuración de cultivo acuapónico modular y adaptable a condiciones ambientales a través de revisión bibliográfica y vigilancia tecnológica, con el fin de generar un sistema que pueda ser aplicado en zonas urbanas.
2. Diseñar los módulos del sistema acuapónico con ayuda de un software CAD, asumiendo los diferentes tamaños y espacios necesarios de los componentes electrónicos, para lograr una estructura reconfigurable.
3. Implementar un prototipo del sistema acuapónico aplicando técnicas de prototipado, para observar el comportamiento del sistema de automatización y recopilar los datos necesarios para la construcción del módulo de control.
4. Adaptar una técnica de control moderno multivariable en el cultivo identificado, evaluando el desempeño al ajustar diferentes parámetros acuapónicos, con el fin de garantizar el equilibrio de las interacciones entre peces, plantas y bacterias.
5. Evaluar el desempeño del cultivo acuapónico con y sin el sistema de automatización diseñado, para demostrar la utilidad de incluir el sistema de automatización.

1.3. Justificación del problema

Los recursos hídricos han sido uno de los aspectos importantes del desarrollo humano. Es por esto, que las investigaciones relacionadas con el consumo y distribución de los mismos han tomado cada vez más relevancia, ya que con los recursos existentes es difícil satisfacer las crecientes necesidades de la población. La agricultura representa aproximadamente el 70 % de las extracciones de agua dulce procedente de ríos, lagos y acuíferos [15] y se estima que para el 2050 sería necesario aumentar la producción de alimentos en un 70 % [16].

Por lo anterior, la acuaponia es una de las alternativas más significativas en la mejora del consumo de agua y la producción alimentaria al combinar tanto los sistemas de recirculación acuícola (RAS) con los cultivos hidropónicos. Por un lado, un cultivo hidropónico utiliza aproximadamente el 5 % del agua necesaria para producir una cantidad equivalente de productos en la agricultura tradicional [17], mientras que en los sistemas RAS, el agua de la cría de peces se recicla casi por completo después de una etapa de filtración, reduciendo el consumo de agua y evitando la descarga de desechos orgánicos (excrementos de pescado, alimentos no consumidos) en el medio ambiente [18].

En este sentido, debido al aumento en la población mundial, los costos de la energía, la reducción de recursos naturales y la demanda de alimentos, el desarrollo continuo de los cultivos acuapónicos se convierte en

una necesidad. Sin embargo, no solo basta con la implementación de estos, sino que también es necesario garantizar que los peces y las plantas crezcan de manera saludable, lo que implica mantener los niveles de pH, oxígeno, amoniaco y nitrato adecuados ya que la base de los cultivos acuapónicos son la interacción peces-plantas-bacterias. Es allí, donde se destaca la importancia de monitorear y controlar, al ser aspectos relacionados con algunos de los retos existentes actualmente, pues según [19], la investigación sobre el control colaborativo multifactorial con el medio ambiente, el control inteligente de la calidad del agua y el control preciso de los nutrientes en el complejo entorno de la acuaponía se ha quedado rezagada.

Además, si tenemos en cuenta la forma en la que interactúan las diferentes variables entre sí, aplicar técnicas de control multivariable dentro del sistema de automatización se convierte en una alternativa. Por ejemplo, los niveles de OD afectan los niveles de nitrato de dos diferentes formas: la primera, afecta la proliferación de bacterias lo cual tiene un impacto directo en la producción de nitrato, la segunda, afecta los procesos metabólicos de los peces, los cuales están directamente relacionados con la producción de amoníaco, el cual es convertido en nitrato por las bacterias. Con el ejemplo anterior, se observa cómo partiendo de una variable se evidencia la complejidad de las relaciones que existen entre las diferentes variables dentro de los cultivos acuapónicos. Sumado a esto, la automatización y el diseño de sistemas de control replicables, fomentan el desarrollo de la estandarización, un aspecto importante al momento de implementar cultivos acuapónicos en entornos urbanos, dado que la agricultura urbana es un modelo que ha tomado cada vez más relevancia debido a la reducción de la huella de carbono y la diversificación de los productos [20].

Desarrollar un sistema de automatización para cultivos acuapónicos es una aporte pertinente ante las necesidades planteadas, dado que no hay actualmente una propuesta consolidada que satisfaga los retos existentes en los cultivos acuapónicos a micro y pequeña escala. En Colombia, aún no hay muchos estudios relacionados con los beneficios de la incursión de cultivos acuapónicos como opción de adquisición tecnológica. Según una investigación realizada en Rumania [21], que pese a tener un contexto social y económico completamente diferente al de Colombia, se pueden rescatar algunos aspectos, por ejemplo en la investigación se recomienda la integración de los sistemas de producción de acuaponía en la red de adquisiciones verdes de dicho país dado que disminuiría la cantidad de pesticidas empleados y la huella generada por el transporte de alimentos. Es por esto, que la propuesta del presente trabajo brinda un desarrollo tecnológico para cultivos acuapónicos destinadas a entornos urbanos, el cual está alineado con los posibles beneficios expresados anteriormente y acorde a las tendencias mundiales que existen actualmente.

Actualmente, no muchas personas poseen conocimiento relacionado con la acuaponia y las que sí, solo poseen conocimiento general del principio de funcionamiento de los cultivos acuapónicos [1]. Esto quiere decir que al momento de implementar este tipo de cultivos, pocas están capacitadas para lograrlo exitosamente, es por esto, que el desarrollo de un sistema de automatización para cultivos acuapónicos, posibilita una implementación más adaptable y práctica para quienes deseen replicar el sistema de automatización, lo que a su vez permitiría que más personas pudiesen implementar y utilizar sistemas como este.

Por otra parte, en el contexto del estilo de vida de las personas que habitan en zonas urbanas, se presentan dos aspectos de gran relevancia: la disponibilidad de tiempo para el cuidado de un cultivo y la disposición de espacio para garantizar las condiciones necesarias para su crecimiento. Parte de la utilidad del presente trabajo, radica en que la automatización brinda comodidades relacionadas con el tiempo necesario para dedicar tanto a las plantas como a los peces (alimentación, riego, seguimiento de variables, planeación, diagnóstico, etc.).

1.4. Alcances y Limitaciones

El énfasis del presente trabajo es el diseño de un sistema de automatización para cultivos acuapónicos en zonas urbanas, sin embargo, para la prueba del sistema de automatización es necesaria la construcción de un cultivo acuapónico. Para ello, se contemplan los siguientes alcances y consideraciones especiales:

1.4.1. Alcances y Limitaciones

- El sistema de automatización y control se plantea como un diseño de acceso público aplicable a cultivos acuapónicos en zonas urbanas.
- Se pretende generar una estructura de cultivo acuapónico modular para implementar el prototipo, empleando una de las posibles configuraciones de cultivo.
- Se pretende obtener un banco de datos de las interacciones entre las variables del cultivo acuapónico, para ello las plantas y peces son secundarios al proceso.
- Se plantea un sistema adaptable a las condiciones climáticas de humedad y luminosidad de Cali, teniendo en cuenta la disponibilidad de recursos presentes en la mayoría de entornos urbanos como agua y electricidad.
- Se documentarán los diseños, procesos y condiciones necesarios para replicar tanto el sistema de automatización como el cultivo acuapónico.

1.4.2. Consideraciones especiales

- El sistema de automatización se contempla como un sistema aplicable en cultivos acuapónicos de uso personal, más no en cultivos con fines de comercialización.
- Las plantas y peces empleados serán especies comunes y comestibles respectivamente, con el fin de cumplir con la normativa colombiana de adquisición de los mismos. En este sentido, no habrán problemas éticos y/o morales asociados al uso de las plantas y peces que se elegirán.
- Se prevé que el prototipo de cultivo acuapónico, que se construirá para la prueba del sistema de automatización, estará en el nivel 6 de la escala de TRL.
- El desarrollo, prueba e instalación tanto del sistema de automatización como del cultivo acuapónico se hizo en el laboratorio de biofertilizantes.

CAPÍTULO 2

Marco de referencia

2.1. Marco de Referencia

A continuación, en esta sección se exponen los conceptos fundamentales, la base teórica necesaria para la comprensión de los subsistemas de un cultivo acuapónico y de un sistema de automatización y control. Por último, se sintetizan un conjunto de investigaciones que muestran el estado actual de la automatización y control de los cultivos acuapónicos en entornos urbanos.

2.1.1. Marco Conceptual

Aunque el eje central del proyecto es el diseño del sistema de automatización y control, es necesario precisar los términos básicos relacionados con cultivos acuapónicos y desarrollo de software que se encuentran involucrados con este trabajo. A continuación, se ordenan y se definen alfabéticamente.

- Endógeno: que se produce en el interior de un organismo.
- Plantas ornamentales: plantas que se cultivan con propósitos únicamente decorativos o estéticos.
- Simbiosis: forma en la que individuos de diferentes especies se relacionan entre sí, obteniendo el beneficio de al menos uno de los dos.
- Sistema de recirculación acuícola (RAS): conjunto de procesos y componentes que constantemente limpian el agua y la reutilizan para el cultivo de organismos acuáticos
- Solución acuosa: preparación líquida que contiene una o más sustancias químicas solubles disueltas en agua.
- Sustrato: un medio sólido e inerte que da soporte a las plantas, este puede ser de origen natural o artificial.
- Mqtt: es un protocolo de transmisión de datos usado ampliamente en IoT, se ha convertido en un estándar debido a sus beneficios en cuanto a implementación, consumo y eficiencia.
- MPC: Es una técnica de control la cual permite optimizar el control en sistemas complejos y dinámicos, mejorando la respuesta en tiempo real basados en un valor futuro, muchas veces estimado a partir de modelos con el método de identificación de planta.
- Backendless: Una arquitectura "backendless"(sin servidor) es una arquitectura de software en la que el backend (la parte del software que se encarga de procesar la lógica de la aplicación y la gestión de datos) se ejecuta en un entorno sin servidor, como en una plataforma de computación en la nube.

2.1.2. Marco Teórico

Para el desarrollo de un sistema de automatización y control de un cultivo acuapónico se hace necesario definir los subsistemas que lo componen y sus interconexiones. Por esto, el marco teórico se estructuró en apartados que incluyen agricultura en entornos urbanos, hidroponía, acuicultura y acuaponía. Luego, se identifican cuáles son las variables más importantes y sus posibles opciones de sensado y/o control. Posteriormente, se exponen las referencias teóricas asociadas a la automatización y al control moderno multivariable. Por último, se recopilan algunos trabajos y tecnologías existentes relacionadas con los cultivos acuapónicos en entornos urbanos.

Agricultura

La agricultura urbana es un conjunto de actividades y técnicas mediante las cuales se emplean pequeñas superficies dentro de las ciudades para la producción de diversos tipos de plantas. Para comprender las tendencias actuales de este campo, es necesario conocer primero el contexto en el cuál surgió esta actividad. En los inicios del Siglo XIX, en países como Gran Bretaña, Francia, Bélgica y Alemania, la aparición de los huertos urbanos se relaciona con funciones de subsistencia e higiene en zonas con altos índices de pobreza [22]. Las grandes fábricas como los gobiernos se vieron en la necesidad de mejorar las condiciones de vida de los obreros, entonces destinaron pequeños terrenos dentro de la zona urbana para ser utilizados para producir alimentos de la clase trabajadora.

Luego, en el siglo XX aparece el auge de los conflictos bélicos a nivel mundial y, con ello, el concepto de agricultura urbana se vislumbra como una alternativa para suprir necesidades alimentarias básicas y como apoyo a la economía de guerra y a los procesos de posguerra [2]. En los años 70, en un contexto donde reinaba la crisis energética, recesión económica y suburbanización en Estados Unidos, los huertos urbanos se emplean como herramienta de apoyo comunitario, en relación a la calidad ambiental, el bienestar social y la educación, impulsando desde colectivos de base ambientalista y ecologista.

Actualmente, los cultivos urbanos están siendo utilizados desde fines netamente estéticos con el uso de plantas ornamentales atractivas [3], hasta fines más ambientales como la mejora de la calidad del aire [4], la absorción del ruido [5] o fines más personales como la mejora de la calidad de los productos alimentarios [6], el acceso a diversidad de plantas como especies medicinales y aromáticas [7], la recuperación del nexo con la naturaleza y sus beneficios terapéuticos [10] [23], entre otros.

Luego de una amplia recopilación de información en fuentes como [24], [25], [26], [27] se construyó la figura 2.1 en la cual se sintetiza la información básica de las plantas más comunes y adecuadas para ser empleadas en entornos urbanos agrupadas por función.

Función	Plantas	Características de crecimiento	Imagen				
Fines estéticos (decoraciones)	Saintpaulia ionantha	Hojas de crecimiento bajo y muy compacto hasta el extremo de que prácticamente carece de tallo		Absorción de ruido	Helxine Soleirolii	Su tamaño bastante extenso a lo ancho, aunque de reducida altura. Es de rápida reproducción y adopta un crecimiento rastrore, compacto y redondeado	
	Monstera deliciosa	Posee grandes hojas, crea tallos flexibles como soportes para mantenerse erguida. También, crea gruesas raíces aéreas		Calidad de productos alimentarios (cultivos orgánicos)	Cultivos de hojas (lechugas, aceitunas)	Tiene raíces poco profundas, por lo que crece bien en casi cualquier macetero, incluso en los que tienen una profundidad de tan sólo 15-20 centímetros.	
	Epipremnum aureum	Tiene tallos fuertes aunque quebradizos, desarrolla raíces adventicias que le proporcionan muy buena sujeción y sus hojas son acorazonadas de gran tamaño			Cultivos de frutas (fresas, grosellas, arándanos)	La mayoría de hortalizas necesitan maceteros bastante grandes para crecer bien. Los mejores contenedores para hortalizas son de 30-45 centímetros de ancho y 45-60 centímetros de profundidad. En general, cuanto mayor sea el tamaño final de la planta, mayor será la maceta a emplear	
	Anthurium	Especie con hojas cardiformes de unas 12 pulg. de longitud y 6 u 8 pulg. de ancho			Cultivos de vegetales (tomates, pepinos, cebollas, esparragos)		
Filtración de aire	Zantedeschia aethiopica	Puede alcanzar una altura sobre los 80 cm. Produce de dos a tres flores por planta, que realmente son inflorescencias erectas en espádice de 4 a 7 cm de largo		Diversidad de plantas	Aromáticas (lavanda, menta, laurel)	Son plantas que se caracterizan por crecer adecuadamente en un amplio rango de adaptación frente a variables como temperatura y luminosidad. En interiores, el tipo de maceta suele ser más bien pequeña situándose entre los 9 y 12 centímetros de diámetro (dado que las plantas no son de gran tamaño).	
	Dracaena trifasciata	Tiene una tasa de crecimiento lenta. Dependiendo del cultivar y las condiciones de crecimiento, esta planta crece entre 1 pie y 3 pies de altura en interiores			Medicinales (albahaca, cidrón, manzanilla, caléndula)		
	Dypsis lutescens	Es considerada una palmera de pequeño tamaño en comparación con las grandes especies. Al ser de crecimiento lento, un tamaño normal es de 1 metro de altura, cultivada en maceta.			Especias (tomillo, ajo, orégano, romero)		
	Ficus elastica	Tiene tallo erecto, hojas grandes, gruesas y flexibles. Esta especie es de crecimiento rápido, pero, si se cultiva en maceta, suele desarrollarse de forma más lenta		Beneficios terapéuticos	Hypericum perforatum	Es un arbusto con estolones que alcanza una altura de 25 a 60 cm. El tallo es aristado y su parte superior está ramificada. Las hojas son opuestas, elípticas y su tamaño oscila entre 1,5 cm y 3 cm	
Absorción de ruido	Mesembryanthemum cordifolium	Planta de rápido crecimiento, de hojas carnosas, planas y ovadas. Es ideal para cubrir muros. Sus hojas miden de 1 a 3 cm de largo y sus flores miden 1 a 2 cm de diámetro			Melissa officinalis	Su tamaño normal de crecimiento es hasta los 80 cm de altura y sus hojas se caracterizan por tener bordes dentados	
					Passiflora caerulea	Es una planta trepadora vigorosa y leñosa, de rápido crecimiento y crece hasta 20 metros de largo en su tallo	

(a) Parte1

(b) Parte2

Figura 2.1: Tipos de plantas más utilizadas en interiores

El desarrollo del proyecto incluye la elección de una de las especies mencionadas anteriormente de acuerdo a las sugerencias que nos pueda proporcionar un profesional con conocimientos en temas agrícolas.

Hidroponía

Los cultivos hidropónicos carecen de la necesidad de suelo, suministrando los minerales y nutrientes necesarios a través de una solución acuosa nutritiva. La hidroponía posee muchas ventajas en contraste con el cultivo tradicional, puesto que no necesita pesticidas, permite producir de manera estable a lo largo del año, tiene menores demandas espaciales, altos rendimientos por unidad de cultivo, ahorro de agua hasta en un 95% [17], entre otros.

El estudio de los cultivos hidropónicos proviene desde el antiguo Egipto. Sin embargo, los cultivos en las terrazas de la cultura Inca, los antiguos jardines flotantes chinos, las labores agrícolas aztecas, entre otros, muestran que siempre han estado presentes en las civilizaciones humanas. El estudio de las soluciones nutritivas para la hidroponía se desarrolló en el siglo XIX cuando Von Sachs probó que diluyendo abonos químicos en proporciones específicas y bajo ciertas condiciones se podían cultivar plantas en agua [28]. Las recetas para dichos cultivos eran un estricto secreto debido a la complejidad y la cantidad de experimentos necesarios

para encontrarlas, pero actualmente se pueden estimar de forma mucho más sencilla mediante técnicas de análisis y control modernas.

Tipos de suministros de nutrientes: Los cultivos hidropónicos tienen como principio de proveer nutrientes a las raíces de las plantas a través de una solución acuosa, lo que varía es la forma en la que se suministran. A continuación, se presentan las tres formas de entregar nutrientes en cultivos hidropónicos y algunas de las técnicas usadas en ellas [29, 30].

- **Raíces en sólido:** las plantas se encuentran sembradas en un sustrato y el método consiste en humedecerlo o sumergirlo. Este sustrato suele ser químicamente inerte y puede ser natural como la arena, grava, tierra volcánica, pasando a fibras vegetales como la corteza de pino, fibra de coco u otros de origen artificial como la perlita, lana de roca, arcilla expandida o el poliestireno expandido. Este método suele ser más adecuado para plantas medianas y grandes con ciclos de crecimiento muy variados.
- **Raíces en líquido:** consiste en sumergir las raíces de las plantas ya sea de forma parcial o total en la solución nutritiva. Dentro de esta categoría existen diferentes técnicas de circulación de los nutrientes, las cuales se ampliarán más adelante en el presente trabajo. Este método suele ser orientado a plantas pequeñas y medianas, puesto que las plantas suelen estar suspendidas en el agua o sostenidas por pequeñas mallas.
- **Raíces en gaseoso (más conocida como aeroponía):** en este método, se suspenden las raíces en el aire o sobre un sólido, mientras que se suministra la solución acuosa empleando un spray o mediante un pulverizador directamente en las raíces. En general, las plantas que se pueden cultivar por medio de raíces en líquido también se pueden cultivar en esta categoría.

Técnicas hidropónicas: existen muchos tipos de técnicas y variaciones, las cuales tienen distintas necesidades energéticas o de implementación. En la figura 2.2 se muestran las principales técnicas hidropónicas, con imágenes tomadas de [8, 31, 32], a las cuales se les pueden adicionar métodos como caída artificial del agua para potenciar la oxigenación o encendido periódico del sistema para reducir el consumo de energía.

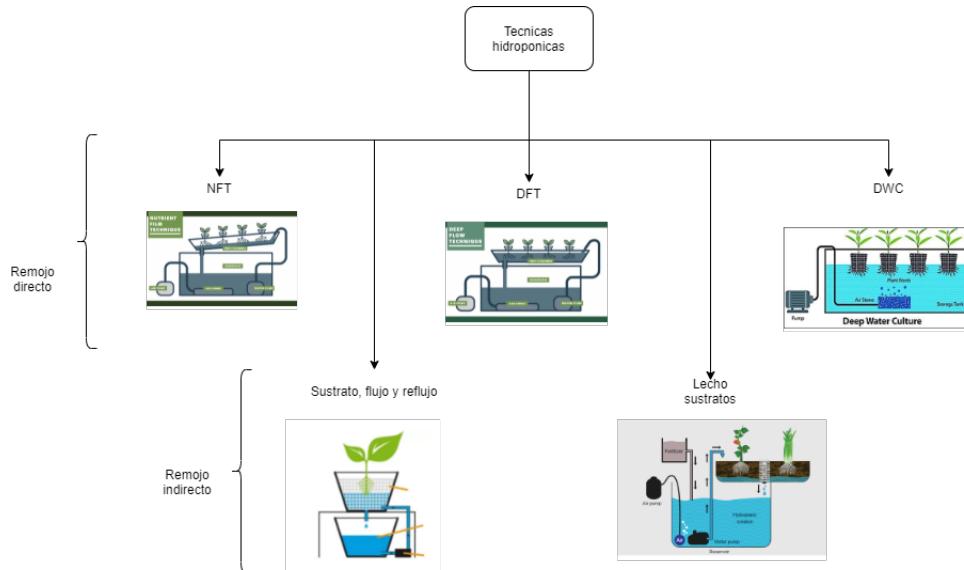


Figura 2.2: Técnicas hidróponicas.[8, 31, 32]

- **NFT (Nutrient Film Technique):** como su nombre lo indica, consiste en sumergir las raíces en una película de nutrientes. Es necesario que el canal posea una inclinación para hacer que el agua circule a través de todas las plantas, también se hace necesaria una circulación constante de agua a lo largo del día para que las raíces no se sequen.
- **DFT (Deep Flow Technique):** es una adaptación del NFT que posee mejoras en cuanto a seguridad, ya que cuando el sistema de circulación se corta, las plantas no se quedan sin suministro de nutrientes. Además, las variables como la temperatura, el pH o el oxígeno son mucho más estables que en el NFT.
- **DWC (Deep water culture):** consiste en sumergir las raíces de las plantas por completo dentro del agua. Entre sus ventajas se encuentra que no necesita bomba para la circulación del agua. Sin embargo, tiene una demanda mucho mayor de sistemas de oxigenación artificiales comparada con las técnicas anteriores.
- **Lecho de sustratos:** esta técnica se ubica en la categoría de raíces en sólido y es mucho más adaptable ya que se puede implementar junto a métodos de goteo, circulación de flujo y reflujo (llenar la maceta y dejar que se escurre el agua de forma periódica), métodos de circulación continua del agua o riego por capilaridad.

Otros factores: en la hidroponía, además de los métodos de suministro de nutrientes y las técnicas de riego, hay factores que influyen significativamente en el funcionamiento del sistema. Entre ellos cabe destacar:

- **Nutrientes:** dependiendo de la cantidad en la que se consumen pueden ser principales como el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre, o secundarios de menor cantidad llamados micronutrientes, requeridos en cantidades desde 0,01 % hasta 0,0001 %. Este grupo de nutrientes está compuesto por: hierro, cobre, manganeso, boro, zinc, molibdeno y cloro.
- **Variables:** hay dos tipos de variables, endógenas al sistema como el nivel de pH (afecta la disponibilidad de nutrientes de las plantas), el oxígeno disuelto en el agua (proporciona la aireación necesaria a las plantas previniendo la anoxia y el ahogamiento) y la temperatura (regula el nivel de oxígeno, la disponibilidad nutritiva y al bienestar de las raíces). Mientras que las exógenas incluyen la luz (proporciona energía a las plantas) y la humedad en las hojas (un aspecto importante para que la fotosíntesis sea posible).

Acuicultura

La acuicultura consiste en la cría de organismos acuáticos en entornos controlados por el hombre, los cuales pueden ser naturales o artificiales. La cría de peces y la ganadería han acompañado al hombre desde tiempos remotos, incluyendo en específico la acuicultura, actividad de la cual hay registros que datan desde 4580 a.C [33]. El paisaje cultural de Budj Bim, Patrimonio de la Humanidad, se cree que es uno de los sitios de acuicultura más antiguos del mundo [34], la evidencia muestra que la comunidad indígena establecida en esa región, desarrolló un complejo sistema de canales y cría empleado para garantizar un suministro de anguilas durante todo el año.

Los métodos modernos de acuicultura, poseen una alta densidad de peces por espacio de agua. Sin embargo, este tipo de producción suele tener un significativo componente de contaminación y consumo de agua, además del estricto control de variables dañinas para los peces (como el amoniaco u oxígeno disuelto). Es por esto que se introducen como solución los sistemas RAS [35], los cuales parten del principio de recirculación de agua y se aplican a sistemas de producción cerrados donde los peces son criados en estanques totalmente controlados, luego el agua dentro del sistema se filtra y finalmente recircula constantemente usando diferentes métodos.

Factores importantes:

- **Variables:** las condiciones específicas de las diferentes variables que influyen en el sistema varían con cada especie y con las condiciones del acuífero. Sin embargo, las variables sobre las cuales debe hacerse mayor hincapié[36] son:

- Ph: en la mayoría de los casos un rango entre 6.5 y 8.2 suele ser adecuado para mantener la calidad del agua.
- OD: el oxígeno disuelto es una variable muy importante para los peces, ya que es la encargada de regular su metabolismo.
- Temperatura: varía dependiendo de la especie a cultivar, sin embargo, en general va de 15-30°C para los peces en el Valle del Cauca. La temperatura es importante ya que impacta en acciones como la eliminación de bacterias y parásitos.
- Alimentación: la cantidad de alimento varía dependiendo de la especie y de la etapa de crecimiento, usualmente se encuentra en el rango del 1% al 4% (al día) de su biomasa.

Dependiendo de las condiciones específicas, puede ser necesario prestar atención a los niveles de amoníaco, nitrito, dióxido de carbono, entre otros, ya que pueden llegar a ser muy tóxicos para los peces cuando sobrepasan los niveles adecuados.

- **Desechos:** los procesos metabólicos de los organismos acuáticos generan diferentes compuestos, de los cuales su concentración depende mucho del tipo de pez y su dieta. La composición de los desechos metabólicos en un acuífero [37] contiene bicarbonatos, sulfatos, potasio, nitrito, iones de magnesio y amonio. En los sistemas de circulación con filtros físicos o biofiltros, se usan bacterias que descomponen estos desechos en compuestos no tóxicos u otros que pueden ser consumidos por las mismas, por las plantas o por otro tipo de organismos.

Acuaponía

La acuaponía es una técnica de cultivo que mediante la combinación de cultivos hidropónicos y acuícolas posibilita el crecimiento de plantas y peces mediante la recirculación de agua. La acuaponía permite solucionar inconvenientes tanto de la hidroponía como de la acuicultura aprovechando la relación simbiótica entre plantas, peces y bacterias. Los desechos producidos por los peces y los restos de alimentos que estos dejan son convertidos en nutrientes para el crecimiento de las plantas por medio de procesos bacterianos [6].

La acuaponía surge principalmente como un sistema alimentario y es considerada una técnica tan antigua que no se puede decir con exactitud cuál fue su inicio. Sin embargo, hay dos principales puntos de partida que valen la pena mencionar. El primero, es en China donde se empleó la acuaponía por parte de agricultores en arrozales. El segundo, con los aztecas, quienes empleando pantanos y pequeños lagos separados por canales de navegación, cultivaron peces y plantas alimentarias como maíz y zapallo.

El adecuado funcionamiento del sistema es consecuencia de la interacción conjunta de factores bióticos y abióticos. El principio biológico bajo el cual interactúan estos factores puede apreciarse en la Figura 2.3.

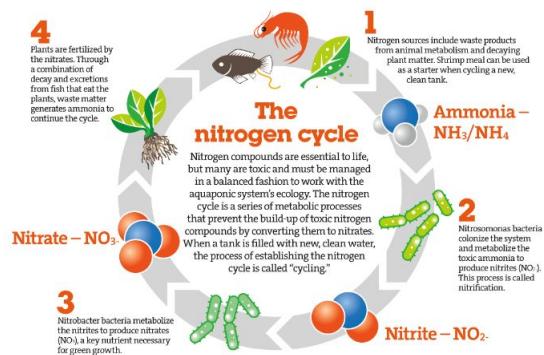


Figura 2.3: Proceso de nitrificación[38].

Como se mencionaba anteriormente, este ciclo biológico se basa principalmente en la obtención de nutrientes para el crecimiento y desarrollo de las plantas a partir de los desechos de los peces, gracias a dos bacterias quimiolitotróficas: Nitrosomonas y Nitrobacter [39].

Los desechos de los peces (y en general de los organismos acuáticos) contienen amoníaco, el cual al entrar en contacto con el agua se convierte en amonio; por otra parte, el alimento no consumido por los peces al degradarse en el agua también genera amonio. Es allí, donde los microorganismos empiezan a realizar el proceso conocido como nitrificación, mediante el cual las bacterias Nitrosomonas transforman el amonio presente en el agua en nitritos y estos a su vez, son convertidos en nitratos por la acción de las bacterias Nitrobacter. Finalmente, las plantas absorben estos nitratos y actuando como filtro limpian el agua que regresará a los peces [8].

Partes de un sistema acuapónico:

Como se puede apreciar en la Figura 2.4, desde el punto de vista de la implementación física, un sistema acuapónico debe contar con:

- **Tanque de peces:** su función es contener los peces a producir, su tamaño depende de la especie y cantidad de animales que se deseen cultivar.
- **Filtro físico:** se encarga de recolectar la mayor cantidad posible de partículas suspendidas en el agua, como desechos biológicos y alimento no consumido. Generalmente, se aplica el método de decantación o sedimentación.
- **Filtro Biológico:** su función es alojar a las bacterias aerobias benéficas que hacen posible el proceso de nitrificación explicado anteriormente.
- **Unidad hidropónica:** se encarga de contener las plantas a producir y se considera la última parte del filtro biológico, ya que las plantas se encargan de absorber los nitratos haciendo que estos desaparezcan finalmente del agua.
- **Colector de agua:** es una unidad en la que generalmente se añaden nutrientes u otra solución al agua para regular el funcionamiento del sistema ante la alteración de alguna variable y donde se lleva a cabo la incorporación de nueva agua cada que se hace necesario. Estos procesos de dosificación se suelen llevar a cabo manualmente, lo que convierte al colector de agua en un componente de interés para aplicar automatización.

- **Unidad de bombeo y líneas de conducción de agua:** su función es hacer circular el agua continuamente a las diferentes partes del sistema acuaponico. Esta unidad no puede ser construida en cobre o algún material oxidable, idealmente se busca emplear materiales químicamente inertes.

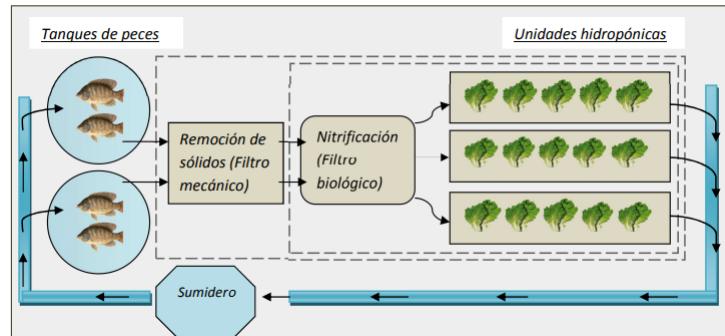


Figura 2.4: Partes de un sistema acuapónico [39].

Para la implementación exitosa de un cultivo acuapónico, cobra vital importancia contar con un sistema de circulación que permita que el agua se oxigene y circule continuamente, garantizando el contacto entre los peces y las plantas, lo que sugiere una oportunidad para la implementación de control automatizado. Se estima que por medio de la reutilización del agua previamente tratada (en el caso de un cultivo acuapónico con filtros físicos y biológicos), el sistema de circulación hace que se utilice menos del 10 % del agua requerida en una producción convencional y ofrece facilidad de operación con respecto al control del sistema [40].

En la acuaponía, especialmente dentro de la unidad hidropónica, suele emplearse la circulación de agua por flujo y reflujo, la cual consiste en bombear la solución nutritiva de un recipiente a otro y así, con ayuda del movimiento generado por la bomba se garantiza que el agua tenga altos niveles de oxígeno disuelto para que los peces, bacterias y plantas se mantengan sanos. En este mismo sentido, los costos de electricidad se vuelven un reto importante y, en consecuencia, elegir las bombas y la fuente de energía demandan una atención especial[41].

Variables importantes

A partir de la información sintetizada hasta el momento y las tendencias existentes en las diferentes tecnologías, mencionadas en el siguiente apartado, se identifican las interacciones y variables más importantes que actúan sobre el sistema, y aquellas que según la literatura han sido las más utilizadas en el área de control para determinar cuáles son las candidatas para ser medidas y/o controladas directamente.

En la figura 2.5 se muestran las variables e interacciones más importantes dentro de los sistemas acuapónicos. Para la elaboración del diagrama, se empleó un código de colores y figuras geométricas con el fin de representar los entes que componen el sistema, las variables que los afectan, su relación y sus efectos.

Colores:

- **Verde:** Representa aquellas variables que posiblemente se podrían controlar.
- **Azul:** Representa las variables que son medibles.
- **Rosa:** Representa a los actores principales dentro del sistema acuapónico (peces, plantas, bacterias y el agua).

- **Blanco:** Definiciones y/o descripciones.

Figuras:

- **Círculos:** Representan variables, entes y componentes.
- **Rectángulos:** Describen el tipo de interacción, relación o efectos.

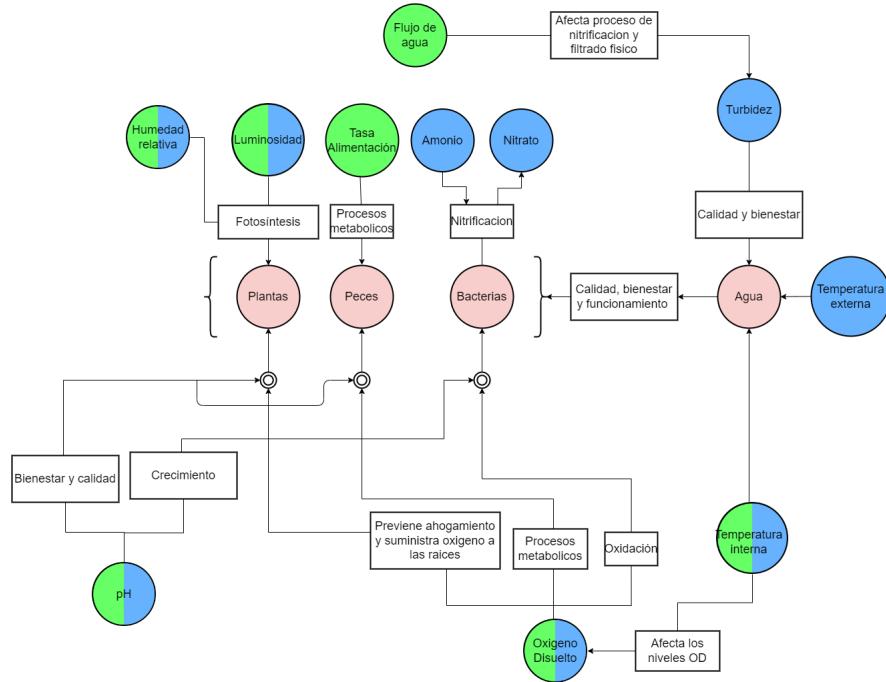


Figura 2.5: Árbol de interacciones entre variables del sistema acuapónico

Automatización

La automatización es un campo de la ingeniería que se encarga de diseñar y desarrollar sistemas que sean capaces de realizar tareas de manera autónoma, sin la intervención humana directa [42]. La automatización se ha convertido en una disciplina fundamental en la industria moderna, permitiendo la creación de sistemas altamente eficientes y precisos que pueden llevar a cabo procesos complejos de manera repetitiva y consistente.

La historia de la automatización se remonta al siglo XVIII con la invención de la máquina de hilar de James Hargreaves, que fue el primer ejemplo de una máquina que realizaba una tarea manual de manera automática [43]. A partir de entonces, la automatización ha evolucionado rápidamente, impulsada por la revolución industrial y los avances tecnológicos en áreas como la electrónica, la computación y la robótica.

Control

El control es una técnica utilizada en la automatización de sistemas con el objetivo de regular y estabilizar variables importantes del proceso, asegurando que se mantengan dentro de ciertos límites o valores deseados [44]. El control puede ser realizado mediante la aplicación de diferentes técnicas y estrategias que varían según la complejidad del sistema, las variables a controlar y los objetivos específicos de la aplicación.

La automatización y el control se utilizan en una gran variedad de áreas. En la agricultura, la automatización y el control se emplean generalmente para aumentar la eficiencia, mejorar la calidad de los productos y reducir los costos [45]. Los sistemas de automatización y control, integrados a un cultivo, permiten generar acciones de control sobre procesos claves para su bienestar tales como el riego, la fertilización, la iluminación, la ventilación y la gestión de las condiciones climáticas.

Control multivariable

El control multivariable se refiere al control simultáneo de múltiples variables de proceso que están relacionadas entre sí. Estas variables pueden estar relacionadas de manera lineal o no lineal, y su control puede ser más difícil que el de una sola variable debido a la complejidad del sistema. En este tipo de control, se utilizan técnicas de modelado matemático, diseño de controladores y estrategias de control avanzadas [46].

Técnicas de control moderno

El control moderno se refiere a un conjunto de técnicas de control avanzadas que se han desarrollado en las últimas décadas. Estas técnicas se basan en modelos matemáticos del sistema que se está controlando y en la utilización de algoritmos de control avanzados como el control predictivo, el control fuzzy y el control adaptativo. Estos algoritmos permiten un control más preciso y rápido del sistema, lo que hace que el sistema sea más eficiente y menos propenso a errores y problemas [47].

2.1.3. Antecedentes

Actualmente, se han propuesto diferentes métodos de predicción, automatización y control de cultivos acuapónicos en entornos urbanos. Estos desarrollos se encuentran en el contexto local, nacional e internacional. Después de una intensa búsqueda de información, puede afirmarse que el desarrollo futuro de este campo, apunta hacia la aplicación de técnicas de control moderno, modelos predictivos e Internet de las cosas combinados con propuestas sustentables energéticamente y tecnologías emergentes como ChatBots.

En [48] los autores implementaron un sistema acuapónico automatizado destinado a su uso en zonas urbanas, específicamente condominios. Como resultado final, automatizaron la iluminación y humedad relativa de las plantas, la alimentación de los peces y el flujo de agua a partir del monitoreo de la temperatura externa e interna, la humedad relativa, el pH y el nivel del agua usando un sistema de bucle cerrado con control On/Off.

Por otra parte, en [49] diseñaron e implementaron un sistema de gestión de la calidad del agua en estanques de Bagre mediante la aplicación de control difuso para controlar los niveles de amoniaco y temperatura. Además, construyeron una interfaz de usuario en un servidor web y un sistema ChatBot en Telegram para informar el estado del sistema al usuario.

En el contexto nacional, podemos tomar como referente a [50] quien diseñó, construyó y evaluó el rendimiento de dos cultivos acuapónicos con diferente tipo de recirculación de agua. Para ello, empleó control multivariable descentralizado, usando control PID para temperatura, oxígeno disuelto, nivel del agua y On/Off: para pH, conductividad eléctrica, iluminación, humedad relativa, Control temporal: alimentación.

En cuanto a trabajos recientes con técnicas poco exploradas en este campo, los autores de [51] propusieron desarrollar un sistema hidropónico inteligente basado en IoT mediante Deep Neural Networks. El sistema fue lo suficientemente inteligente para proporcionar la acción de control adecuada en el entorno hidropónico en función de los múltiples parámetros de entrada recopilados (pH, temperatura, humedad, nivel, iluminación), junto a tres parámetros de salida (bomba de agua, iluminación y ventilación).

En la región del Valle del Cauca, en [52] diseñaron e implementaron un sistema acuapónico automatizado manejado a través de una página web. Este diseño, además de permitir al usuario cambiar las condiciones del sistema, ejecuta medición y control on/off para las variables pH y temperatura interna y externa. Es de destacar, que realizaron un montaje completamente funcional del sistema propuesto, logrando comprobar el diseño planteado.

Cabe mencionar que el diseño propuesto en este proyecto involucra aspectos claves de estos trabajos. Se incluye un sitio web donde el usuario puede controlar a distancia su sistema acuapónico y supervisar los cambios en los elementos activos del sistema así como la evolución de variables como temperatura, TDS y luminosidad. Además, se incorporó una técnica de Inteligencia Artificial para predecir la evolución de algunas de las variables que se van a controlar. El montaje fue implementado en la Universidad y queda a disposición para trabajos futuros, pues la cantidad de opciones para automatizar y evaluar desempeño de diferentes controladores es amplia.

CAPÍTULO 3

Metodología

Para cumplir con el objetivo general planteado “diseñar un sistema de automatización para cultivos acuapónicos, empleando una técnica de control moderno multivariable, para uso en zonas urbanas”, se realizaron varios desarrollos que fueron surgiendo como necesidad a medida que se avanzaba en el proyecto. Dichos desarrollos aportan funcionalidades que no estaban planteadas inicialmente e hicieron que el alcance del prototipo fuese mayor que el planteado en un principio.

A modo de contexto, en este apartado se describen las seis funcionalidades con las que cuenta el prototipo final:

- **Varias modalidades de control remoto:** el sistema permite la elección entre las opciones de control establecidas: manual, automático o parada de emergencia. El modo manual hace que sea posible controlar el estado (on/off) de los actuadores del sistema de automatización sin necesidad de estar en el lugar donde se encuentra el cultivo. A excepción del dosificador de alimento que es el único elemento que requiere estar conectado a la misma red que el cultivo para controlarlo de forma remota. Con un mayor presupuesto se hubiera logrado superar esto.

La funcionalidad de control manual surge ante la necesidad de garantizar el accionamiento de los actuadores 24/7 de forma que bajo la voluntad del usuario sea posible resolver escenarios problemáticos que el funcionamiento automático no sea capaz de resolver sin comprometer el funcionamiento habitual del sistema. Además, funcionó como interfaz para realizar pruebas de funcionamiento de cada uno de los actuadores por separado.

El control automático implementa la rutina de control generada a través de datos obtenidos a través de la IA que predice cómo se comportarán los niveles de temperatura y TDS para poder ejecutar acciones que garanticen un comportamiento dentro de los rangos permitidos de estas variables.

- **Parada de emergencia:** se implementa la funcionalidad parada de emergencia debido a que en algunos casos es necesario desactivar todos los elementos inmediatamente, por cuestiones de facilidad y tiempo de respuesta. Además, el estado de parada de emergencia permite que se implementen fácilmente protocolos que acciones el estado de parada de emergencia dentro del sistema.
- **Visualización remota:** mediante la visualización de fotografías con una frecuencia de cambio cada tres segundos, se puede observar la zona del componente acuícola del cultivo y parte del dosificador de alimento.

Durante la primera etapa de adaptación y crecimiento de los peces al cultivo fue necesario saber si continuaban con vida. Con esta funcionalidad fue posible supervisarlos a distancia por motivos de costos y tiempos de desplazamiento. Por lo tanto, se espera que los usuarios puedan tener información visual de sus cultivos acuapónicos desde cualquier lugar. Adicionalmente, dado el rango visual de la cámara, es posible verificar el adecuado funcionamiento del dosificador de alimento y los niveles del mismo para que pueda definirse cuando es necesario recargarlo.

- **Monitoreo remoto:** esta funcionalidad permite visualizar en un tablero virtual y de manera gráfica el comportamiento de las variables sensadas en diferentes rangos de tiempo (día/ semana/mes), al igual que el estado (on/off) en tiempo real de los elementos de acción que hacen parte del sistema de automatización. Surgió de la necesidad de visualizar un rango de los datos recopilados por cada variable medida, facilitando la toma de decisiones y proveyendo información actualizada del estado de los elementos de acción. Este monitoreo permite verificar constantemente el funcionamiento y estado de los componentes del sistema.
- **Control Programado:** por medio de esta funcionalidad es posible configurar la forma en la que se comporta cada actuador a lo largo del día de manera pre-establecida. Esta funcionalidad surge de la necesidad de tomar datos que permitieran conocer el comportamiento de la planta, para ello era necesario programar diferentes entradas durante el día en determinados rangos de tiempo y poder obtener la información necesaria para entrenar el modelo de IA.
- **Control Automático:** esta funcionalidad emplea una técnica de control moderno, pues apoyado en control predictivo y control Fuzzy se pudo establecer de forma automática como modificar los diferentes actuadores. Una vez se identificó que actuador debía accionarse para modificar una variable y el tiempo que toma para cambiar, se pudo llevar su valor a un rango deseado para cada variable controlada. Este control es el eje central de la propuesta del proyecto.

Para cumplir con estas funcionalidades el prototipo cuenta con cinco componentes fundamentales: montaje físico, página web, IoT, control y sistema de gestión. Este documento se estructura en siete partes las cuales describen la metodología seguida durante el desarrollo de dichos componentes principales, pero también de otros que fueron transversales como el cultivo acuaponico y el registro del comportamiento de los componentes vivos del sistema (plantas y peces) para entrenar el modelo de control basado en redes neuronales.

Inicialmente se describe el cultivo acuapónico elegido (técnica hidropónica, peces, plantas y sustrato). Seguidamente, se describen cada uno de los cinco componentes fundamentales mencionados anteriormente, durante tres etapas: diseño, construcción y resultados. Cada etapa tiene la finalidad de exponer a detalle el trabajo necesario para llegar a contar con las funcionalidades especificadas. Luego, se presenta el registro fotográfico y evolución de los componentes vivos del sistema y, por último, se enumeran los problemas que surgieron y que no están relacionados en los apartados anteriores.

3.1. Cultivo Acuapónico

Como se mencionó anteriormente, la acuaponía es una técnica de cultivo donde la simbiosis de cultivos hidropónicos y acuícolas posibilita el crecimiento de plantas y peces mediante la recirculación de agua. En este sentido, para la implementación del prototipo fue necesario en primera instancia idear el cultivo que se emplearía. Para ello, se eligió una técnica hidropónica para suministrar los nutrientes a las plantas, al igual que las plantas y los peces que conformarían el cultivo. Se tuvo especial consideración de que el proyecto es para uso en zonas urbanas (Campus Pontificia Universidad Javeriana Cali) en la elección de los peces y plantas.

3.1.1. Técnica Hidropónica

De las técnicas hidropónicas consultadas y expuestas en el apartado 2.2 de este documento, la técnica elegida fue lecho de sustrato. Una de las principales ventajas que ofrece esta técnica es que el uso de sustrato y la recirculación de agua favorecen la microvida, es decir, facilitan la proliferación de las bacterias necesarias para que el proceso de nitrificación sea exitoso sin necesidad de un filtro biológico en un recipiente extra [53].

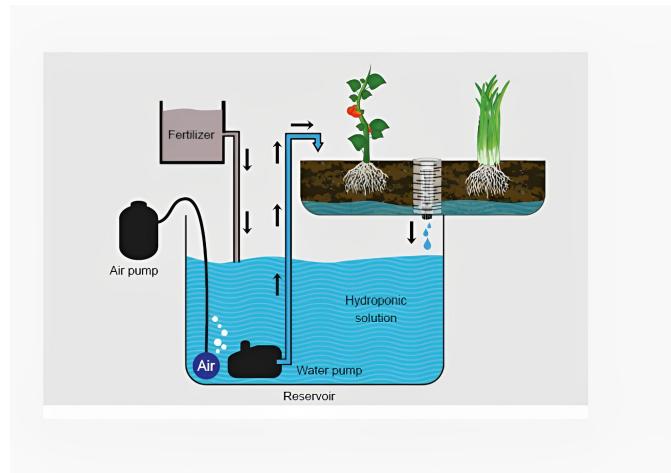


Figura 3.1: Técnica lecho de sustrato

Esta técnica funciona bajo el principio de inundación-drenaje y requiere que las plantas se encuentren sembradas en un recipiente con sustrato inerte u orgánico. Mediante la recirculación de agua, el recipiente se inunda y de esta forma el sustrato absorbe los nutrientes y filtra el agua que por drenaje regresa al componente acuícola. A continuación, se profundiza un poco sobre el sustrato escogido.

Elección de sustrato

El sustrato es un entorno adecuado para que la colonia de bacterias habite al ser un material poroso y húmedo. Por lo tanto, el sustrato debe ser un material sólido que permita el crecimiento del cultivo brindándole sostén e interviniendo en la nutrición de la planta al facilitar la absorción de nutrientes. Luego de consultar en fuentes de información como [54, 55, 56, 57] acerca de distintos tipos de sustrato, el elegido fue Arlita o Arcilla Expandida dado que:

- Por su forma y tamaño facilita el drenaje
- Es ideal para ambientes cálidos ya que tiene buena retención de humedad y aireación
- Garantiza alto control sobre la alimentación de la planta
- Evita que las raíces de las plantas se pudran
- Es un sustrato de alta disponibilidad, ya que se encuentra fácilmente en tiendas de construcción, jardinería, viveros y portales de compras en línea.
- Es de bajo costo (comparado con otros sustratos)
- Cuenta con una vida útil de 3-5 años
- Favorece la proliferación de las bacterias necesarias para convertir en nutrientes los desechos provenientes del componente acuícola.



Figura 3.2: Arlita

3.1.2. Elección plantas

Teniendo en cuenta las condiciones climáticas promedio en la ciudad de Cali y la técnica hidropónica elegida, se llegó a la conclusión que la albahaca era la mejor opción. Luego de analizar la información recolectada y sintetizada en la figura 2.1, la especie de Albahaca elegida para sembrar en el cultivo fue *Ocimum Basilicum*, que es una hierba aromática empleada en té y que tiene fines medicinales.



Figura 3.3: Albahaca

La albahaca es considerada una gran reproductora con capacidad anti-plaguicida y de cultivo sencillo. Es ideal para cultivarse en climas cálidos con alta exposición solar, requiere riego frecuente y suelo húmedo con buen drenaje [58, 59, 60], es decir, se podrían satisfacer todas sus necesidades con el prototipo en la región de cultivo.

3.1.3. Elección peces

Según diversas fuentes [61, 62, 63] un sistema acuapónico es capaz de acoger todo tipo de peces de agua dulce, sin embargo, la especie que se utiliza generalmente es *Oreochromis niloticus*, conocida comúnmente como **tilapia**.



Figura 3.4: Tilapias

Esta especie se caracteriza por su rápido crecimiento, fácil reproducción, gran capacidad de resistir condiciones ambientales adversas. Es de fácil manejo, pues soporta bajas concentraciones de oxígeno y un amplio rango de variación de temperatura.

3.2. Montaje físico

3.2.1. Estructura física

Diseño

Antes de iniciar con el diseño de la estructura física se solicitó un espacio en la Universidad en el que se pudiese implementar el cultivo. La ingeniera ambiental Isabela Tello facilitó un espacio en el laboratorio de biofertilizantes de la Universidad, ofreció apoyo técnico para resolver dudas durante el proyecto. Una vez que el lugar fue asignado, obtuvimos las dimensiones de la estructura para ubicarla en un espacio de $1m^2$.

Dado que la necesidad planteada específica que es para uso en zonas urbanas, se diseñó una estructura física de manera vertical para lograr optimizar el uso del espacio [64].

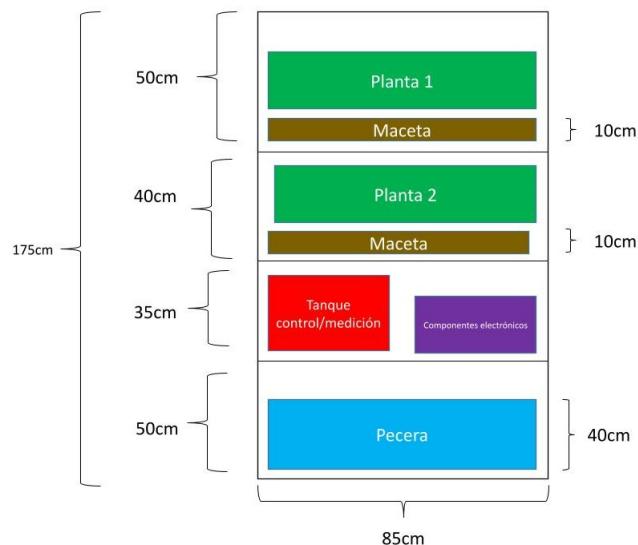


Figura 3.5: Vista frontal 2D de la estructura física con medidas estimadas

Como puede observarse en la figura 3.5, se plantea una estructura de cuatro niveles con la siguiente distribución. Los niveles se enumeran de abajo hacia arriba y las medidas totales definidas son $0.8 \times 0.4 \times 1.75$ metros.

- El primer nivel está previsto para el componente acuícola, para ello se planteó usar una pecera de vidrio que ofrece un material liso y fácil de limpiar.
- El segundo nivel se diseñó para ubicar los componentes eléctricos y electrónicos (los cuales se especifican en [Componentes](#)) a modo de caja negra. También, se instaló en este nivel un tanque para realizar las mediciones y las acciones de control con dosificación de sustancias.
- El tercer y cuarto nivel se propuso como niveles de componente hidropónico, es decir, donde se ubican las macetas con el sustrato y las plantas.

Una vez se realizó el planteamiento de la distribución del prototipo, empleando el software FreeCAD, se modelaron cada uno de los niveles previstos para evitar posibles conflictos de los componentes y sus dimensiones.

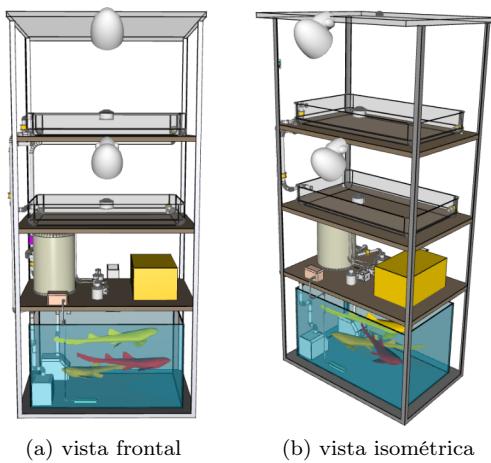


Figura 3.6: Diseño de la estructura en software CAD

Además de la estructura física, en el software CAD se modelaron algunos de los componentes eléctricos y electrónicos (los cuales se especifican en: [Componentes](#)) que no hacen parte de la caja negra del prototipo. A continuación se detalla la ideación de los 3 componentes fundamentales de la estructura física: estructura de soporte, tubería y filtros.

Estructura de soporte: como puede observarse en las figuras 3.5 y 3.6, se plantea un prototipo cuyo eje principal esté compuesto por una estructura metálica que emplee como soporte para los componentes de cada nivel una lámina de madera.

Tubería: parte importante para el funcionamiento del prototipo fue el diseño de la tubería, pues debía garantizarse la recirculación de agua entre la pecera y ambos niveles de plantas. Para ello se diseñó una tubería con el siguiente flujo:

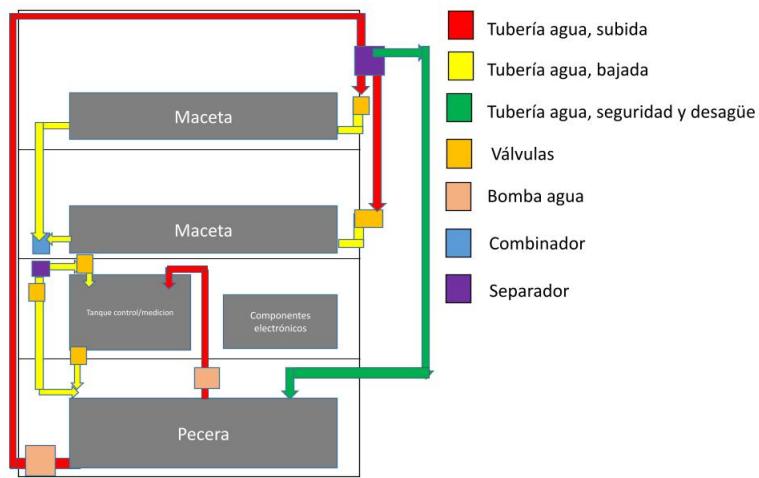


Figura 3.7: Vista frontal 2D de la estructura física con el flujo de agua

Adicionalmente, se plantea la posibilidad de integrar agua al sistema mediante una válvula y una manguera conectada a una llave de paso de agua que se encuentra en el lugar asignado.

Filtros: como se mencionó en [Marco de Referencia](#), los filtros físicos permiten recolectar la mayor cantidad posible de partículas suspendidas en el agua, como desechos biológicos y alimento no consumido. Para ello, se plantean dos filtros:

- Arcilla expandida: la técnica hidropónica elegida hace necesario el uso de sustratos rígidos y el elegido fue la arcilla expandida (más información en [Cultivo acuapónico](#)). El sustrato por sí solo se comporta como un filtro físico, pues retiene las partículas sólidas provenientes del agua del componente acuícola.
- Filtro de desagüe: según el flujo de agua planteado, en la parte lateral inferior de cada maceta habrá un desagüe, por lo tanto se propone emplear una malla delgada que cubra el área destinada para el desagüe. De esta manera, se puede evitar que el sustrato se vaya hacia la tubería y provoque taponamientos.



Figura 3.8: Imagen de inspiración para filtros de desagüe

Construcción

Para construir lo que se planteó en el diseño, los materiales no biológicos adquiridos (sin incluir sensores y actuadores) fueron:

- Estructura de soporte: se adquirieron ángulos de hierro de 6 metros de largo, tornillos y láminas de madera 80 x 40 x 1 centímetros.



Figura 3.9: Estructura de soporte en proceso de construcción con los materiales indicados anteriormente

- Macetas: se adquirieron macetas plásticas idénticas para cada nivel con medidas 69.5 x 21 x 11 centímetros y una capacidad aproximada de 3 kilos de sustrato.



Figura 3.10: Maceta adquirida

- Pecera de vidrio: la pecera adquirida mide 0.75 x 0.38 x 0.4 metros y tiene una capacidad de 114 litros de agua.



Figura 3.11: Pecera adquirida

- Tanque de medición: se emplea un tanque plástico cilíndrico de 30 centímetros de altura y 5.5 centímetros de radio, con una capacidad de almacenar aproximadamente 3 litros de agua.



Figura 3.12: Tanque de mediciones

- Tubería: tubo de presión, adaptadores, codos, tees, uniones



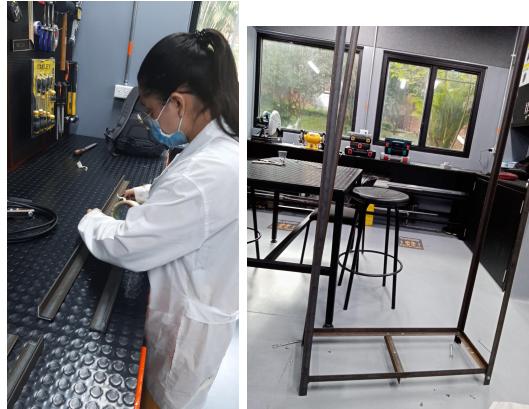
Figura 3.13: Fotografía tomada durante la compra de la tubería

- Teja translúcida
- Manguera
- Amarras

En el siguiente enlace: [Material tubería](#) podrá encontrar a detalle la referencia y cantidad de los materiales de tubería adquiridos.

Estructura de soporte:

La construcción del prototipo fue hecha completamente por nosotros. La estructura de soporte se construyó en el laboratorio de materiales de la Universidad. Gracias al apoyo de la laboratorista Viviana Osorio quien brindó las orientaciones de cómo utilizar las máquinas del laboratorio para realizar los cortes y perforaciones de los ángulos de hierro.



(a) Mediciones para cortes (b) Prueba de ensamblaje

Figura 3.14: Proceso de construcción de la estructura de soporte del prototipo

La estructura de soporte se construyó de tal forma que fuese modular (por nivel) para poder transportarla con mayor facilidad al laboratorio de biofertilizantes, donde se ensamblaron para obtener el prototipo final. Una vez la estructura fue instalada en el laboratorio de fertilizantes, se encajó la madera y sobre ella se instalaron las macetas, el tanque de medición y la pecera. Seguidamente se inició la construcción de la tubería de circulación según lo planificado en el diseño.

Tubería:

Es importante mencionar que durante la compra de los materiales no fue posible encontrar los accesorios de tubería en forma de Y (planteados como separadores en la figura 3.7), los cuales estaban pensados para llevar el agua a cada tanque. Por tal motivo, decidimos construirlos aplicando calor a una T para deformarla. Aunque la solución al problema era funcional, la salida de agua no era uniforme y se presentaron problemas de presión. Como consecuencia, se optó por rediseñar la distribución de agua en forma de cascada así:

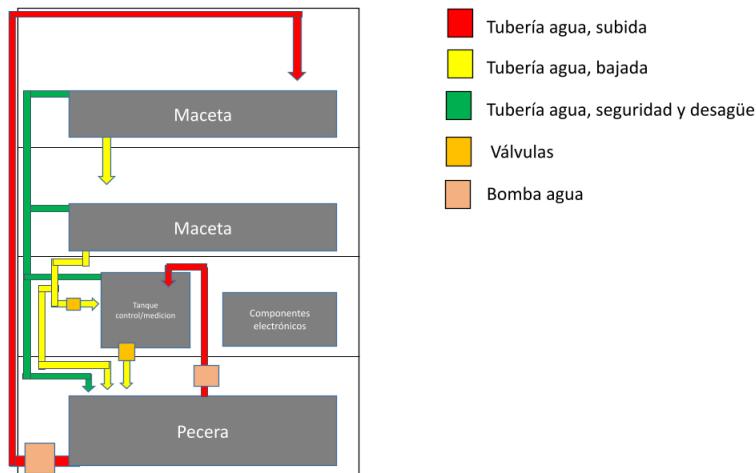


Figura 3.15: Vista frontal 2D de la estructura física con el rediseño del flujo de agua

Con el rediseño de la tubería se solucionó el problema de presión y uniformidad de la distribución de agua. Fue necesario realizar varias pruebas de funcionamiento de la tubería, pues en el desagüe de las macetas empezó a ocurrir una filtración. Ante este problema, la solución fue usar arandelas metálicas para sellar con fuerza uniforme los empaques. Con las modificaciones realizadas en el rediseño de tubería se logró disminuir el número de válvulas, mayor uniformidad en el flujo de agua y el problema de presión fue atendido.

Filtros:

El cambio en la forma de la tubería para la distribución de agua hizo que pudiese implementarse un filtro extra por decantación y que fuese necesario rediseñar el filtro de desagüe.

- Filtro por decantación: este filtro permite separar un sólido de un líquido, su funcionamiento se basa en esperar que se sedimente el sólido para poder vaciar el líquido en otro recipiente, adicionalmente estimula la proliferación de las bacterias necesarias para el funcionamiento del cultivo. Se implementó un filtro por decantación en cada maceta, el cual se compone de dos tarros plásticos, uno más grande que contiene al otro y, mediante perforaciones en ambos tarros, se garantiza el flujo de agua.



Figura 3.16: Filtro por decantación

- Filtro de desagüe: con el rediseño de la tubería ahora el desagüe estaba en la parte inferior de las macetas. En vista de este cambio y con la finalidad de poder limpiar el filtro constantemente, se insertó un tubo de presión en el desagüe, el cual cuenta con 10 cm de altura, huecos en los laterales para garantizar el flujo de agua y en su interior se ubicó una malla que puede extraerse fácilmente para ser lavada.



Figura 3.17: Filtro de desagüe versión 1

Sin embargo, al realizar pruebas de circulación, nos dimos cuenta que el filtro construido impedía el paso del agua y causaba inundaciones en las macetas. Por lo tanto, surgió una nueva versión de filtro, con un enrejado más amplio e igualmente removible. Este filtro se construyó a partir de tubería sanitaria, una capa de malla y un material absorbente. Finalmente, se instaló en el desagüe de cada maceta.



Figura 3.18: Recuadro naranja: filtro de desagüe versión 2

Esta fue la versión final del filtro físico ya que funcionó de acuerdo a lo deseado tanto en facilidad de flujo como retención de sólidos. En una etapa posterior a la implementación de la estructura física, la tubería se taponó pues cinco hormigas de gran tamaño cayeron allí. Para evitar otro inconveniente de este tipo, se construyó una tapa para el filtro la cual puede observarse en la figura 3.18

Resultados

Finalmente, aunque se requirió un rediseño de tubería, se obtuvo una estructura física con la firmeza esperada, que satisface todas las necesidades planteadas en el diseño, y con las condiciones necesarias para el funcionamiento básico del cultivo.



Figura 3.19: Estructura física final implementada

3.2.2. Estructura eléctrica y electrónica

Debido a la configuración de cultivo acuapónico elegida y al tamaño de la estructura física construida, surgieron las siguientes necesidades para el adecuado funcionamiento del sistema:

- Alimentación automática para los peces
- Circulación de agua en el circuito principal
- Circulación de agua en el tanque de medición
- Integración de agua nueva al sistema
- Aireación de la pecera
- Oxigenación de la pecera

- Iluminación artificial en los 2 niveles de cultivo
- Medición de diferentes variables
- Medición de parámetros de seguridad
- Control de diferentes variables

Para cumplir con dichos requisitos fue necesario identificar los componentes electrónicos que mejor se ajustaran a las necesidades. Posteriormente, se diseñó y construyó una estructura eléctrica que permitiera la adaptación de los distintos componentes electrónicos identificados y su correspondiente alimentación.

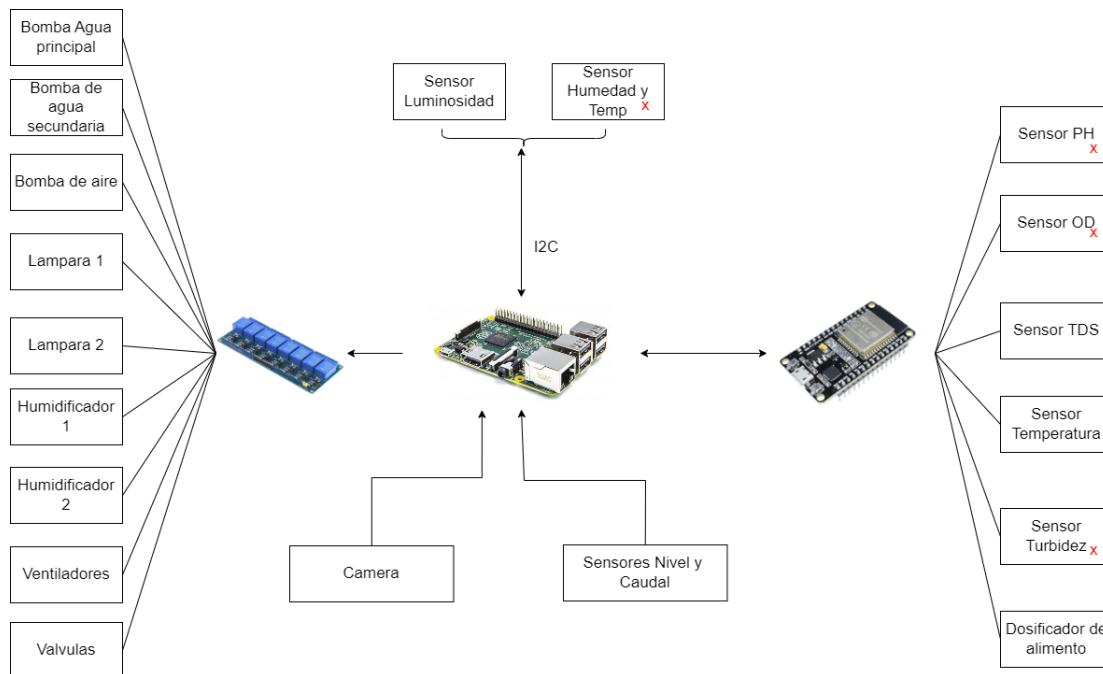


Figura 3.20: Diagrama de conexiones principales

En la figura 3.20 se encuentra el diagrama de conexiones entre los principales elementos a emplear según lo definido en el proceso de diseño. La x en algunos elementos, indica que no fueron empleados en el prototipo final, los motivos se justifican en este apartado.

Hardware electrónico

Diseño

A nivel de hardware electrónico se identificaron distintos sensores, circuitos y micros cuyo diseño se describe en este apartado. También, fue necesario construir componentes adicionales para el correcto funcionamiento del sistema, el motivo y el funcionamiento de estos se detallan a continuación:

- Fuente switcheada: usada para generar voltaje de 12VDC para la alimentación de los sensores, válvulas y otros componentes DC.

Imagen	Nombre	Características
	Fuente switcheada	<ul style="list-style-type: none"> . Voltaje de entrada: 110-220V . Voltaje de salida: 12V . Corriente de salida: 30A . Potencia: 3600W . Dimensiones: 21.4cm x11.4cm x 4.8cm . Refrigeración por ventilador

Figura 3.21: Características fuente switcheada

- Módulo de relés optoacoplado: usado para realizar el control de los elementos de acción a partir de señales DC de 3.3V provenientes de la Raspberry.

Imagen	Nombre	Características
	Modulo relés optoacoplado	<ul style="list-style-type: none"> . Rele de 10A 250VAC . Voltaje de funcionamiento: 5V . Luz indicadora por cada canal . El optoacoplador brinda seguridad contra ruido electrico . Se puede seleccionar una tierra común por medio de un Jumper . Tamaño de la tarjeta: 140x55mm

Figura 3.22: Características módulo de relés optoacoplados

- Conversores DC-DC: Conversores XL4005 usados para obtener un voltaje de 3.3V a partir de los 12V suministrados por la fuente switcheada.
- Elementos genéricos: diodos, resistencias, pines, borneras y jumpers.

Sensores

Teniendo en cuenta las variables e interacciones más importantes de un sistema acuaponico (planteadas en la figura 2.5) y aquellas variables que según la literatura han sido utilizadas en el área de control de estos sistemas, se determinó que los sensores de las variables a incluir en el cultivo acuaponico serían:

- Variables externas:

- Luminosidad

Imagen	Nombre	Referencia	Rango de medición	Protocolo de comunicación	Precisión
	Módulo sensor de luz con encapsulado plástico	BH1750FVI	1 ~ 65535 lx.	I2C	± 20% F.S.

Figura 3.23: Características sensor de luminosidad

- Temperatura y humedad

Imagen	Nombre	Referencia	Rango de medición	Protocolo de comunicación	Precisión
	Sensor de Humedad y Temperatura	AM2305B	-40~80 °C 0~100%HR	I2C	± 0.3 °C 0.024% HR

Figura 3.24: Características sensor de temperatura y humedad

- Variables externas:

- pH

Imagen	Nombre	Referencia	Rango de medición	Protocolo de comunicación	Precisión
	Kit Medidor Pro Analógico de pH	SEN0169	0 ~ 14 PH	Análogo	± 0.1PH

Figura 3.25: Características sensor de pH

- Oxígeno disuelto

Imagen	Nombre	Referencia	Rango de medición	Protocolo de comunicación	Precisión
	Sensor de oxígeno disuelto. Kit para Arduino	SEN0237-A	0 ~ 20 mg / L	Análogo	Depende de la calibración

Figura 3.26: Características sensor de oxígeno disuelto

- Total sólidos disueltos

Imagen	Nombre	Referencia	Rango de medición	Protocolo de comunicación	Precisión
	Sensor TDS (Total sólidos disueltos)	SEN0244	0 ~ 1000ppm	Análogo	± 10% F.S.

Figura 3.27: Características sensor de total sólidos disueltos

- Temperatura del agua

Imagen	Nombre	Referencia	Rango de medición	Protocolo de comunicación	Precisión
	Sensor de temperatura a prueba de agua	DS18B20	-55 ~ 125 °C	1wire	± 0.5°C

Figura 3.28: Características sensor de temperatura del agua

- Turbidez

Imagen	Nombre	Referencia	Rango de medición	Protocolo de comunicación	Precisión
	Sensor de turbidez	SEN0189	0~100% Turbidez	Analógico	± 30% F.S

Figura 3.29: Características sensor de turbidez

■ Variables de seguridad:

- Nivel de agua: se propuso un sensor de nivel flotante para identificar cuándo es necesaria la integración de agua nueva basándose en el nivel de agua de la pecera. También, un sensor de nivel capacitivo para controlar el llenado y vaciado del tanque de mediciones.

Imagen	Nombre	Referencia	Rango de medición	Protocolo de comunicación	Precisión
	Sensor de nivel tipo flotador	ZP4510	No aplica	Digital	No aplica

Figura 3.30: Características sensor de nivel flotante

Imagen	Nombre	Referencia	Rango de medición	Protocolo de comunicación	Precisión
	Sensor de nivel sin contacto	XKCY25-RS485	No aplica	NPN	No aplica

Figura 3.31: Características sensor de nivel capacitivo

- Caudal: se consideró un sensor de caudal para registrar el flujo de agua por la tubería de seguridad con el fin de informar al usuario que este se activó.

Imagen	Nombre	Referencia	Rango de medición	Protocolo de comunicación	Precisión
	Sensor de Caudal	YF-S201	No aplica	Digital	No aplica

Figura 3.32: Características sensor de caudal

- Cámara: se plantea emplear este dispositivo para cumplir con la funcionalidad de supervisión remota del componente acuícola del cultivo.

Imagen	Nombre	Referencia	Rango de medición	Protocolo de comunicación	Precisión
	Cámara genérica Raspberry Pi	v 1.3	2592 x 1944 píxeles	Digital	5 MP

Figura 3.33: Características cámara

Microprocesadores

Teniendo en cuenta las necesidades planteadas para el sistema, se plantea el uso de dos tarjetas:

- Un microprocesador: Raspberry pi 3+

Imagen	Nombre	Características
	Raspberry	<ul style="list-style-type: none"> . Chip: Raspberry pi b+ . Voltaje de funcionamiento: 5V . Frecuencia: 1.4Ghz . Alimentación vía USB o por pines (3.3V-5V) (Use solo una de las opciones) . Ram: 1Gb 4 nucleos

Figura 3.34: Características Raspberry pi 3+

Se propone como eje central del sistema de automatización y control para administrar conexión a la base de datos, conexión remota, modificación de los actuadores a través de pines digitales, comunicación con la ESP32 y el registro del sensor cámara.

- Un microcontrolador: ESP32

Imagen	Nombre	Características
	ESP32	<ul style="list-style-type: none"> . Chip: ESP32-WROOM-32U . Voltaje de funcionamiento: 5V . Con chip usa UART . Puerto microUSB . Con conector U.FL . Alimentación vía USB o por pines (3.3V-5V) (Use solo una de las opciones) . Dimensiones: 26x40mm

Figura 3.35: Características ESP32

Microcontrolador propuesto para sensar diferentes variables, aplicar filtros digitales y controlar los pasos del driver para el movimiento del Nema 17 que dosifica alimento.

Filtros Digitales: Median filtering algorithm

Usado para las variables de turbidez, sólidos disueltos (TDS) y pH. Para mayor detalle la documentación de los filtros se encuentra en: [codigo esp32 con filtros incluidos](#).

Circuitos

De acuerdo a los actuadores, sensores y tarjetas que se prevé compongan el sistema el sistema, se diseñaron cinco PCB utilizando la herramienta de diseño proteus.

- *Power _Module* : Módulo para facilitar la conexión entre los dos conversores DC-DC xl4005. Componentes electrónicos: Conversores DC-DC xl4005.

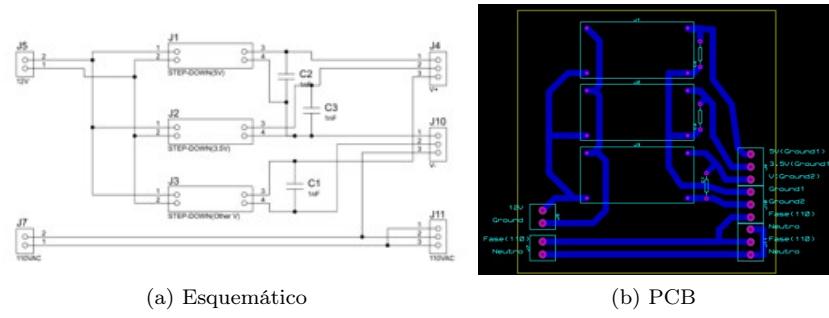


Figura 3.36: Esquemático y PCB - Módulo para conversores

- Sensor Module: Módulo diseñado para efectuar la conexión entre la alimentación DC, los sensores y la salida de los pines de los sensores y los pines de sensores I2C. Componentes electrónicos: ninguno.

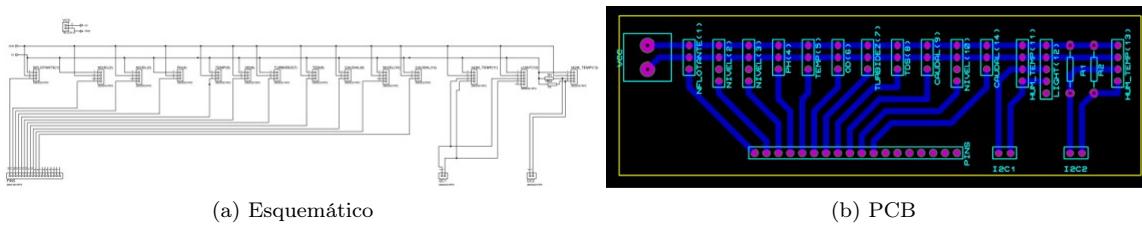


Figura 3.37: Esquemático y PCB - Módulo para sensores

- Control_Module*: Es un módulo que permite la conexión entre los dos módulos de relevo, la fuente de 110VAC, 12VDC y los diodos correspondientes a la alimentación DC. Componentes electrónicos: Modulo de reles optoacoplado, Diodos 1N4001

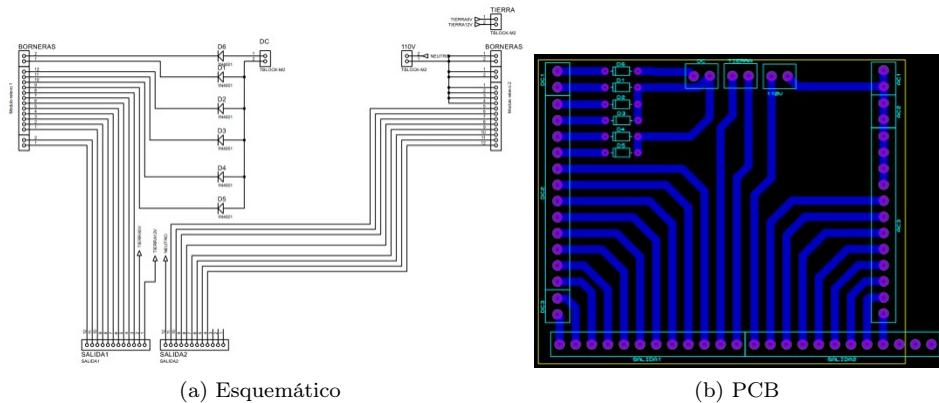


Figura 3.38: Esquemático y PCB - Módulo para relevos

- Para la ESP32 y el driver TCM2209, se decidió emplear baquela universal.

Construcción

Sensores

Una vez se efectuó la compra de los sensores mencionados en la etapa de diseño, se realizó su calibración (de ser necesaria) y su conexión a la red eléctrica de acuerdo a sus necesidades de alimentación.

Variables externas:

- Luminosidad: no requirió calibración y su conexión fue exitosa.

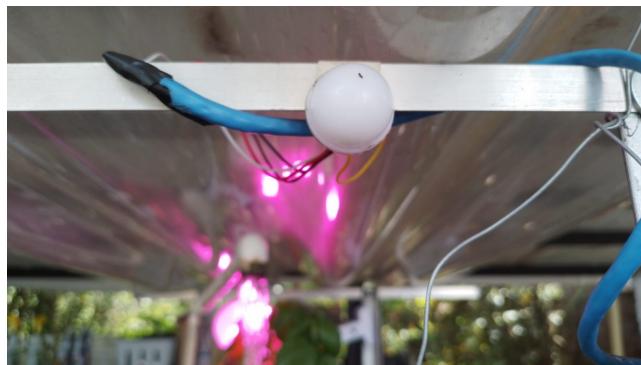


Figura 3.39: Sensor de luminosidad instalado

- Temperatura y humedad: Después de intentar realizar varias pruebas con los sensores adquiridos, siguiendo el datasheet suministrado por el proveedor, los sensores no funcionaron ni con las librerías de ESP32, ni con las librerías de Raspberry, ni con las resistencias pull-up. Por lo tanto no fueron empleados en el sistema.



Figura 3.40: Ubicación esperada del sensor de temperatura y humedad para cada nive

Variables internas:

- pH: este sensor requería calibración, para ello se compraron sobres de solución de calibración de pH y agua destilada para preparar la solución. Luego de muchos intentos, no fue posible calibrar el sensor en todo su rango de medición, pues solo fue posible calibrar ácidos y calibrar alcalinos razón principal por

la cual se decidió no usarlo dentro del sistema. Adicionalmente, en una etapa posterior de crecimiento del cultivo se evidenció (mediante pruebas de colorimetría que se mencionan en [Calidad de agua](#)) que el pH no variaba significativamente por lo que se llega a la conclusión de que la ausencia de este sensor no causa gran impacto a la implementación.



Figura 3.41: Sensor de pH

- Oxígeno disuelto: El sensor estima OD mediante una película de carbono que deja pasar partículas de dióxido de carbono, dicha película es altamente delicada y como requerimiento de funcionamiento, se debe llenar la parte superior del electrodo del sensor con soda cáustica. Una vez se realizó este paso, el sensor fue instalado y funcionó bien durante tres días, sin embargo, las condiciones ambientales del cultivo (con exposición a varios factores biológicos no controlados), hizo que la película se llenara de moho, deteriorándose y dejando de funcionar. Aunque una solución ante este problema pudo haber sido limpiar la película y reemplazar la soda cáustica cada tres días, se decidió retirar el sensor del sistema ya que si se dejaba su tiempo de autonomía sería muy corto y posiblemente no alcanzaría a ser funcional hasta el final de la implementación.



Figura 3.42: Sensor de oxígeno disuelto

- Total sólidos disueltos: no requirió calibración y su conexión fue exitosa.
- Temperatura del agua: no requirió calibración y su conexión fue exitosa.
- Turbidez: Al instalar el sensor los estudiantes se dieron cuenta que en realidad la precisión era muy baja y con los datos obtenidos no se podrían tomar decisiones adecuadamente. Sin embargo, dado

que el sensor estaba pensado para mantener dentro de la pecera, fue necesario adecuar un recipiente plástico para cubrir la parte del sensor que se extiende de la sonda.



Figura 3.43: Sensor de turbidez con adecuación

En este punto de la implementación las variables externas e internas sensadas finalmente fueron: luminosidad, total sólidos disueltos y temperatura del agua. Dado que los únicos sensores sumergibles que finalmente quedaron instalados fueron el de TDS y temperatura del agua se optó por no utilizar el tanque de mediciones evitando un gasto innecesario de energía.

Por otra parte, sin medición o control de la variable pH, ya no era necesaria la dosificación de sustancias elevadoras o reductoras de pH, lo cual estaba entre las funcionalidades del tanque de mediciones. Dada la ausencia del funcionamiento del tanque de mediciones, los sensores sumergibles se instalaron en la pecera y para evitar su deterioro se construyó una base flotante con malla de protección esférica para aislar.

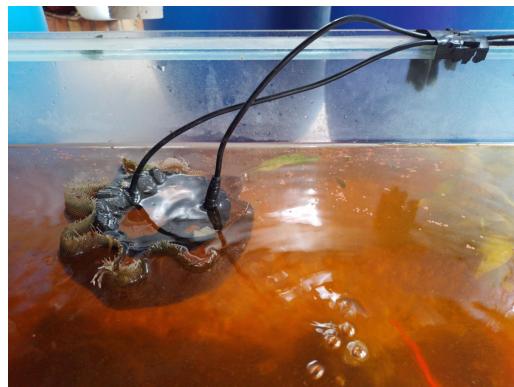


Figura 3.44: Instalación final de los sensores con malla de protección.

Variables de seguridad:

- Nivel de agua: como se mencionó anteriormente, el sensor de nivel flotante se había planteado para identificar la necesidad de integración de agua nueva basándose en el nivel de agua de la pecera, sin

embargo, dado que el agua requiere un proceso manual de descloración antes de ingresar al sistema, este sensor no fue empleado.



Figura 3.45: Sensores nivel

El sensor de nivel capacitivo pensado para controlar el llenado y vaciado del tanque de mediciones y dosificación de sustancias tampoco se empleó.

- Caudal: al instalar y probar el sensor, los estudiantes identificaron que debido al ruido presente por la conexión del resto de componentes se generaban activaciones de voltaje en la Raspberry en todo momento. A pesar que para mitigar esta situación se empleó un filtro de media y diodos, no fue posible lograr una integración exitosa del sensor en el sistema.



Figura 3.46: Sensor de caudal

Para resolver este problema, se requiere reestructurar la arquitectura electrónica planteada para que el sensor se comunique directamente con la ESP32 y que se mida el valor del impulso analógico y haga un filtro por amplitud.

- Cámara: al realizar las pruebas con un cable de dos metros (distancia entre la cámara y la Raspberry) no se pudo obtener una señal de imagen estable, puesto que la cámara de Raspberry no está diseñada

para transmitir a tanta distancia. Por lo que se optó por emplear una cámara usb cuya instalación fue exitosa y funcional sin problemas.



Figura 3.47: Cámara usb que finalmente fue instalada

Microprocesadores:

Se realizaron todas las conexiones necesarias de acuerdo a los requisitos planteados inicialmente, sin embargo durante la construcción se tuvieron problemas por el uso de dos sensores I2C en la ESP32 a pesar de intentar configurar la lectura doble haciendo uso de su multinúcleo. Debido a lo anterior, fue necesario agregar a la Raspberry pi una conexión I2C correspondiente al sensor de luminosidad.



Figura 3.48: Raspberry instalada

En la figura 3.48 puede apreciarse la conexión desde la Raspberry hacia los módulos de relés, la alimentación a la esp 32 y los pines I2C de entrada. La Raspberry tiene tres elementos conectados a ella: cable ethernet, ESP32, cámara.

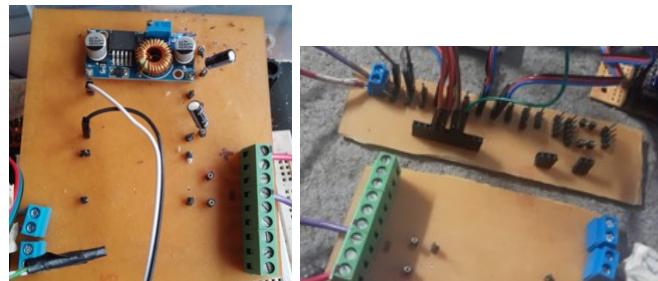
Circuitos:

Para la etapa de construcción de las pcb, se imprimieron los circuitos diseñados mediante la técnica planchado ya que era la más eficiente en términos de tiempo y costos. Para ello se emplearon baquelas, papel termotransferible, plancha, alcohol y ácido.



Figura 3.49: placas impresas

Luego de imprimir cada una de las placas, se soldaron las borneras necesarias y se sellaron con silicona las conexiones salientes de los pines de las borneras para evitar cortocircuitos.



(a) Power Module (b) Sensor y control module

Figura 3.50: módulos conexión

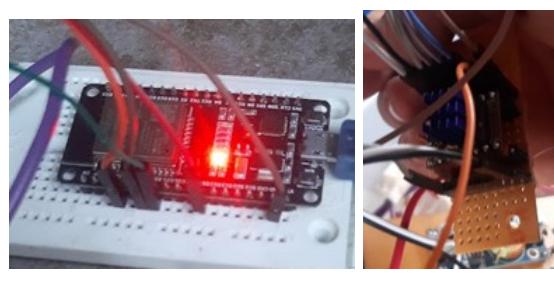


Figura 3.31: módulos de expansión

Como se puede ver en las imágenes anteriores, se lograron imprimir de forma artesanal los diferentes módulos que hacen parte del hardware electrónico.

Resultados:

Sensores:

Los sensores con los que finalmente cuenta el sistema permiten medir: luminosidad, total de sólidos disueltos (TDS) y temperatura del agua. Desde su instalación hasta el momento han funcionado sin problema aunque requieren limpieza aproximadamente cada mes.

Micros:

Desde la fecha de instalación (finales de agosto de 2022) hasta el momento, ha funcionado sin presentar fallo alguno.

Circuitos:

No se han generado cambios y aunque algunos sensores se dejaron de usar, por las razones explicadas anteriormente, esto no generó cambios en los circuitos pues desde el inicio se concibieron como una construcción modular y en paralelo. Desde su instalación siguen funcionando correctamente todas las conexiones.

Hardware eléctrico

Diseño

Elementos de acción

En línea con las necesidades planteadas al inicio de este apartado y con las variables seleccionadas a sensar (en la etapa de diseño de sensores explicada anteriormente) los elementos de acción que se plantean emplear son:

- Bombas de agua: se plantea utilizar dos bombas de agua, una de mayor capacidad para poder implementar la circulación de agua por la tubería principal y una de menor capacidad para garantizar el flujo de agua entre la pecera y el tanque de medición planteado en la figura 3.7.

Imagen	Nombre	Referencia	Potencia
A black submersible pump with a flexible white hose attached.	Bomba de agua	Pulaco	25W 400GPH

Figura 3.52: Características bombas de agua

- Bomba de aire: se hace necesario el uso de una bomba de aire para garantizar y controlar la oxigenación del agua.

Imagen	Nombre	Referencia	Potencia
A small white rectangular air pump unit with red and black cables.	Bomba de aire	Pulaco	3W 32GPH

Figura 3.53: Características bombas de aire

- lámparas de cultivo: se plantea utilizar lámparas especiales para el crecimiento de cultivo con el fin de controlar la luminosidad que llega a las plantas del cultivo.

Imagen	Nombre	Referencia	Potencia
A green parabolic reflector light fixture.	Lámpara de crecimiento de cultivo	Homecenter	13W

Figura 3.54: Características lámpara de cultivo

- humidificadores: Se plantea el uso de un humidificador para cada maceta ubicado en el punto de caída del agua para garantizar el llenado de la reserva de agua para su funcionamiento, con el fin de ejercer una acción de control sobre la humedad.

Imagen	Nombre	Referencia	Potencia
	Humidificador	AGPtek	13W

Figura 3.55: Características humidificadores

- Bombas peristálticas: se propone el uso de dos bombas peristálticas con la finalidad de ejercer una acción de control sobre la variable pH. Se necesitan dos bombas peristálticas, pues las sustancias de control son dos: elevador y reductor de pH y para cada una se requiere una dosificación aislada.

Imagen	Nombre	Referencia
	Bomba peristática	SEN0169

Figura 3.56: Características bombas peristálticas

- Ventilador: se prevé el uso de un ventilador para ubicarlo cerca de la superficie del agua de la pecera y de esta manera ejercer una acción de control sobre la temperatura del agua.

Imagen	Nombre	Referencia	Potencia
	Ventilador	DaToo	10W

Figura 3.57: Características ventilador

Cableado

Para el diseño del cableado se realizó el siguiente diagrama:



Figura 3.58: Vista frontal 2D del cableado de la estructura física

En las figuras 3.59 puede observarse la distribución por nivel de los componentes electrónicos y los elementos de acción con sus respectivas necesidades de alimentación. De acuerdo a esta distribución se calcularon las necesidades de cableado así:

Nivel Estructura física	Tipo de corriente	Objeto	Alimentación (m)	Tierra (m)	Corriente (A)
2	AC	Bomba agua	0.5	0.5	0.3
	AC	Bomba agua	0.5	0.5	0.3
	AC	Bomba aire	0.5	0.5	0.03
	AC	Ventilador	0.5	0.5	0.05
3	AC	Humidificador	1.2	0.5	0.15
	AC	Lampara	1.5	0.5	0.12
4	AC	Humidificador	1.6	0.5	0.15
	AC	Lampara	1.9	0.5	0.12
TOTAL (Metros - Calibre 20)			12.2		
Tierra COMUN AC (Metros - Calibre 18)			1.3		

Figura 3.59: Necesidades de cableado componentes eléctricos AC

Nivel Estructura física	Tipo de corriente	Objeto	Alimentación (m)	Tierra (m)	Corriente (A)
2	DC	Feeder	0.5	0.5	1.5
	DC	Bomba peristáltica	0.8	0.8	1.4
	DC	Bomba peristáltica	0.8	0.8	1.4
	DC	Válvula	0.5	0.5	0.03
	DC	Válvula	0.5	0.5	0.05
TOTAL (Metros - Calibre 18)			6.2		
Tierra COMUN DC (Metros - Calibre 18)			1.3		

(a) Calculo cableado eléctricos DC

Nivel Estructura física	Tipo de corriente	Objeto	Alimentación (m)	Tierra (m)
3	DC	Humedad y temperatura	0.8	0.8
	DC	Luminosidad	1.3	1.3
4	DC	Humedad y temperatura	2.0	2.0
	TOTAL (Metros - Calibre 16)			8.2
Tierra COMUN DC (Metros - Calibre 16)				1.3

(b) Calculo cableado sensores

Figura 3.60: Necesidades de cableado componentes eléctricos y electrónicos DC

Dosificación de alimento

Debido al costo y a la capacidad de control que se necesita para modificar la cantidad de dosis diarias desde el sistema de automatización, los estudiantes decidieron diseñar su propio dosificador de alimentos.

- Primera versión:

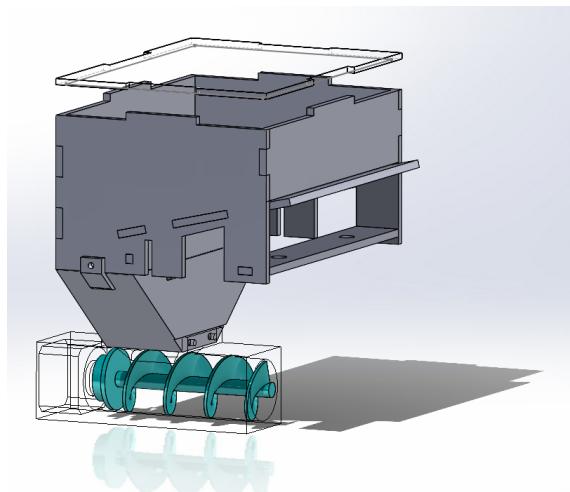


Figura 3.61: Diseño de tolva dosificadora con tornillo sin fin accionada por nema 17

El diseño consiste en un dosificador con tolva y tornillo sin fin. La dosificación se genera con un nema 17 que acciona el tornillo sin fin para dejar caer el alimento. El diseño cuenta con cuatro componentes que se muestran a continuación:

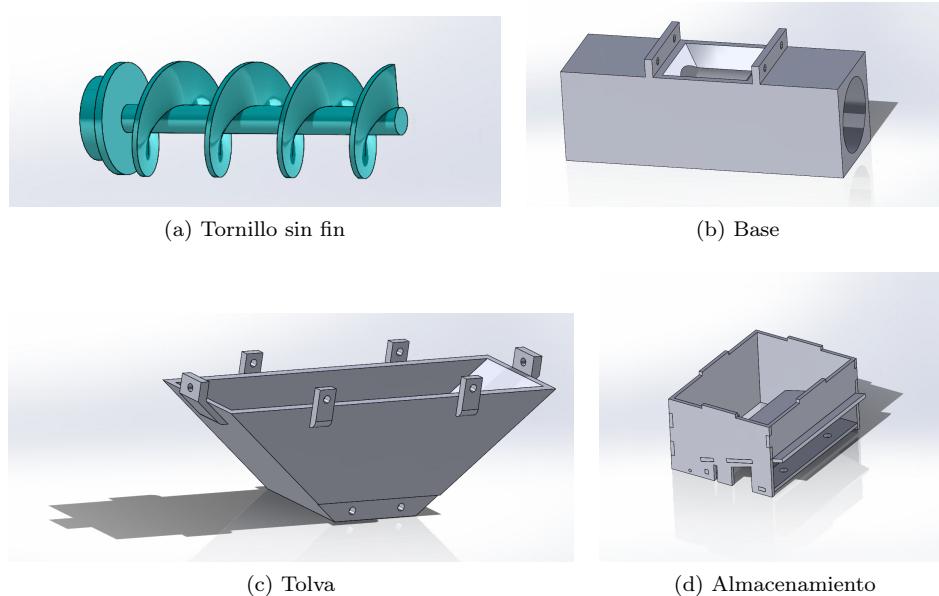


Figura 3.62: Fedder V1.

■ Segunda versión:

Debido a problemas que se abordarán más adelante en construcción, fue necesario diseñar una segunda versión del dosificador el cual es inspirado en un dosificador volumétrico industrial. Este dosificador posee 30 celdas de almacenamiento rotativas accionadas con una cinta dentada y el nema17 encajado fuera del cuerpo principal.

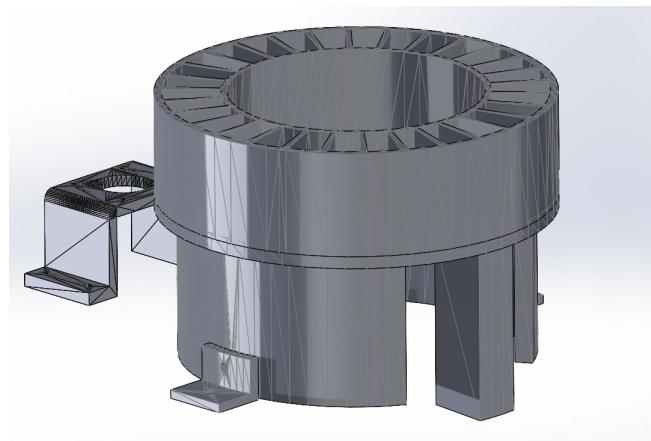


Figura 3.63: Diseño de dosificador volumétrico

El diseño cuenta con cuatro componentes que se muestran a continuación:

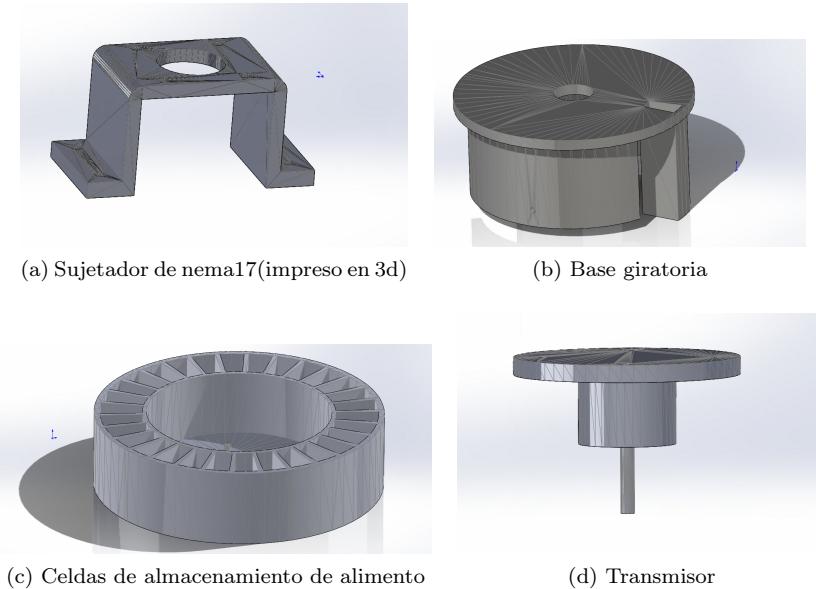


Figura 3.64: Fedder V2.

Construcción

Elementos de acción

- Bombas de agua: se instalaron las dos bombas de agua planteadas en el diseño. Sin embargo, la bomba de agua que garantiza el flujo entre la pecera y el tanque de medición no fue empleada.
- Bomba de aire: la bomba de aire fue instalada sin contratiempo alguno.



Figura 3.65: Bomba de aire

- Lámparas de cultivo: se instaló una lámpara de cultivo en cada nivel que contiene plantas.



Figura 3.66: Lámparas de cultivo

- Humidificadores: se instalaron los humidificadores en cada maceta, para ello se necesitó también crear una base recolectora de agua para garantizar su funcionamiento, la cual se construyó con dos recipientes plásticos. Aunque los humidificadores no fueron empleados, dado que no se pudo medir la humedad, los recipientes empleados como base recolectora de agua se dejaron en el prototipo pues actuaron como filtro físico que beneficia la proliferación de bacterias benéficas.



Figura 3.67: Bases de humidificadores

- Bombas peristálticas: no se instalaron por las razones mencionadas anteriormente.
- Ventilador: se instaló sin contratiempo alguno.

Cableado

Se realizó la instalación del cableado satisfaciendo todas las necesidades de alimentación planteadas en el diseño de la figura 3.58.

Dosificación

Cada uno de los diseños fue impreso en el Centro de Automatización de Procesos (CAP de la Universidad), seguidamente se ensamblaron todas sus partes como se muestra a continuación



Figura 3.68: Construcción de la primera versión de dosificador

Después de realizar las pruebas pertinentes este modelo tuvo varios inconvenientes, entre ellos que se atascaba mucho y que la comida de los alevinos, con la humedad del ambiente se volvía muy pegajosa y grumosa haciendo que el tornillo se atascara aún más. Debido a lo anterior, se construyó la segunda versión de dosificador



Figura 3.69: Segunda versión del dosificador ya instalado.

Este modelo ha funcionado bien tanto con la harina de pescado como con los pellets (comida para peces en etapa de crecimiento), solo posee problemas cuando se llenan más de 25 celdas, debido a la superficie de contacto.

Con la relación entre dientes del nema y la cantidad de pasos del drivers se calcularon la siguiente cantidad de micropasos para el movimiento de una celda.

Relación entre poleas: 5/9 estando la polea pequeña en el nema.

Driver microsteps: 8 micropasos

Pasos por vuelta del nema: 200 pasos

Cantidad de celdas: 30 celdas

Cantidad de impulsos por celda:

$$\frac{(PasosPorVuelta) \cdot (microsteps)}{(CantidadDeCeldas) \cdot (RelacionEntrePoleas)} = \frac{(200) \cdot (8)}{(30) \cdot (5/9)} = 96$$

Con esto, se necesitan 96 impulsos de voltaje en el driver para mover el dosificador 1 celda.

Resultados

Elementos de acción

Finalmente, los elementos de acción en funcionamiento son: bomba de agua, bomba de aire, lámparas y ventilador. Desde su instalación hasta el momento han funcionado sin problema alguno y permiten ejercer las acciones de control correctamente.

Cableado

El diseño fue planteado adecuadamente y durante la etapa de construcción no se cometieron errores de implementación. Actualmente el cableado alimenta adecuadamente tanto los elementos de acción como los sensores.

Dosificación

La primera versión del dosificador no funcionó correctamente y fue desmantelado, actualmente está instalada la segunda versión. En cuanto a los resultados, el dosificador funciona de manera correcta desde octubre de 2022, es recargado cada 4-5 días y dosifica alimento 5 veces al día, la cantidad de alimento depende de la etapa de crecimiento de las tilapias.

3.3. Página Web

3.3.1. Diseño

De acuerdo a la necesidad de poder acceder a las variables del cultivo y poder controlarlo de forma sencilla, se propuso la construcción de una página web. Su diseño está basado en las heurísticas de diseño y los requerimientos del sistema. La página consta de 4 vistas:

- Login: se plantea como página de inicio en la cual se pueda ingresar usuario y contraseña

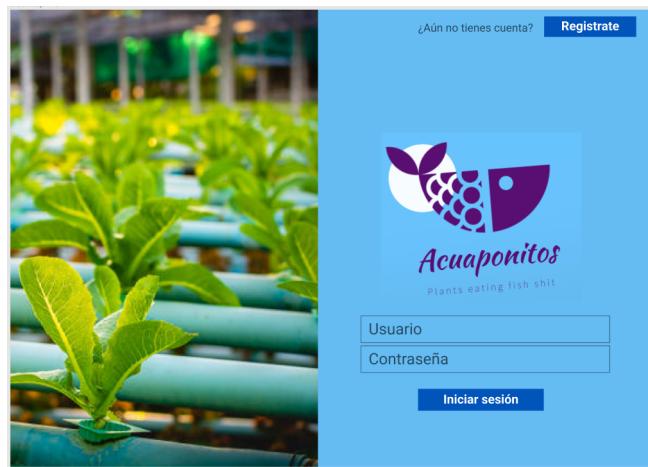


Figura 3.70: Diseño de vista de login

- Pagina principal: se propone como vista introductoria en la cual se muestre un diagrama del proyecto y una pequeña descripción del mismo



Figura 3.71: Diseño de vista principal

- Monitoreo: vista en la cual se podrá observar el registro de las variables en determinado periodo de tiempo



Figura 3.72: Diseño de vista monitoreo

- Control: vista en la cual se podrá ver y controlar el estado de los elementos activos.

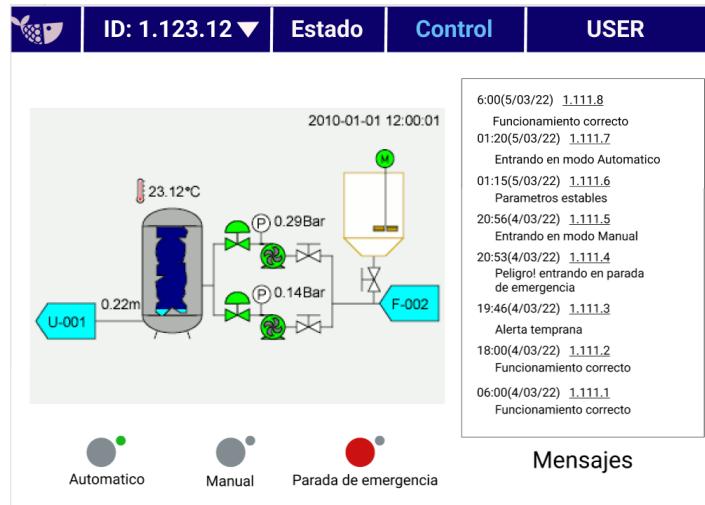


Figura 3.73: Diseño de vista control

Luego de realizar el diseño, se validaron las interfaces propuestas con cuatro personas de diferentes carreras y un equipo de compañeros. De los resultados de la validación, se identifica la violación de las heurísticas de diseño 4, 6 y 8 (más información en: [Diseño de pagina web](#)). Los comentarios y valoraciones de los usuarios de prueba se tuvieron en cuenta para refinar la página. Se realizaron cambios teniendo en cuenta principalmente los aspectos de usabilidad y diseño.

3.3.2. Construcción

Descripción técnica de la página web:

- Servidor: hospedada en firebase bajo el paradigma backendless.
- Tecnología: node.js con el framework react.
- Base de datos: firebase real-time.
- Arquitectura: por componentes, vistas reusables, POO.

Para más información acerca del funcionamiento, construcción y código de la página web puede ingresar al enlace: [Diseño de pagina web](#). Luego de aplicar los cambios necesarios al diseño propuesto, las vistas construidas que conforman la página son:

- Login: permite el inicio de sesión con un usuario y contraseña y como fondo se muestra una imagen del cultivo implementado

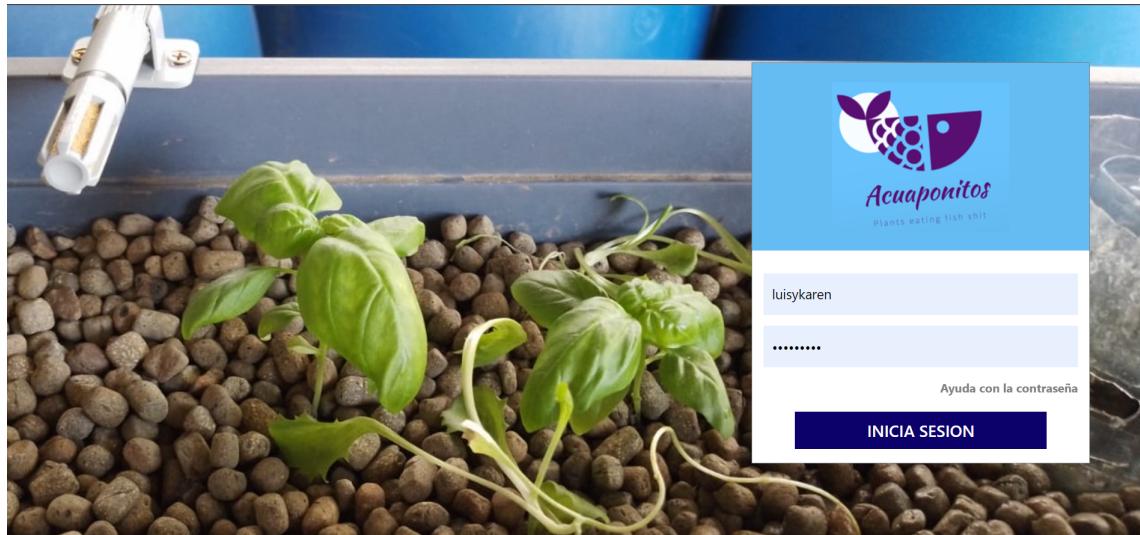


Figura 3.74: Vista final de login

- Página principal: muestra el diagrama construido en el software CAD, la ubicación final del cultivo, las variables sensadas y los actuadores funcionales.



Figura 3.75: Vista final página principal

- Monitoreo: permite observar numérica y gráficamente el comportamiento de las variables medidas en determinados rangos de tiempo (día, semana, mes, dos meses) facilitando la toma rápida de decisiones para el usuario.

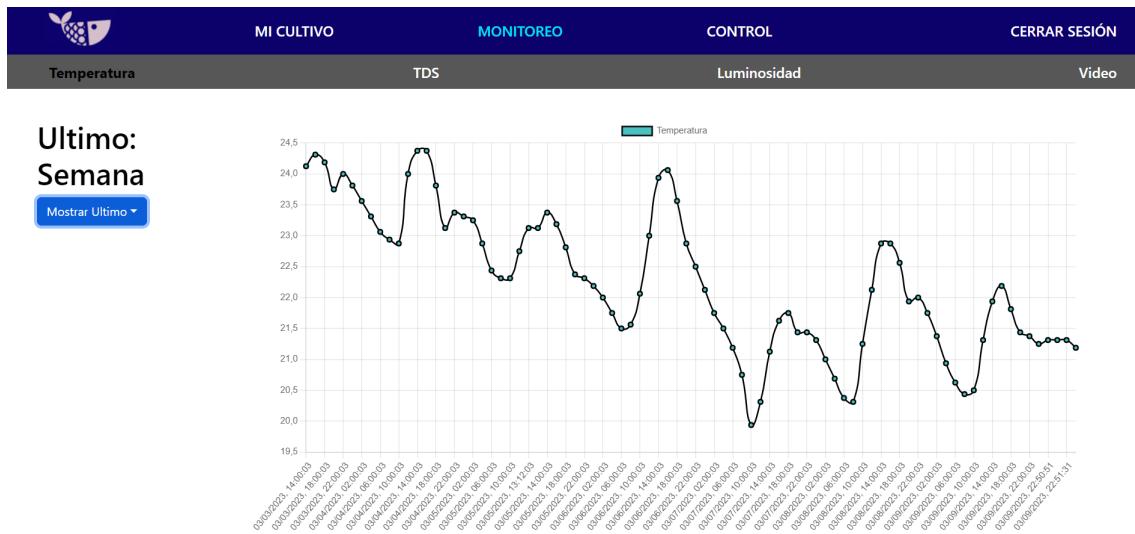


Figura 3.76: Vista final monitoreo

- Supervisión: esta vista permite ver la imagen capturada a través de la cámara que se encuentra en la pecera, permite ver la activación de la bomba de agua y la dosificación del alimento.



Figura 3.77: Vista final video

- Control: esta vista permite la elección entre las opciones de control establecidas: manual, automático o parada de emergencia. Además, muestra al usuario mensajes que informan cambios relevantes como el modo de funcionamiento o el tipo de técnica de control empleada.

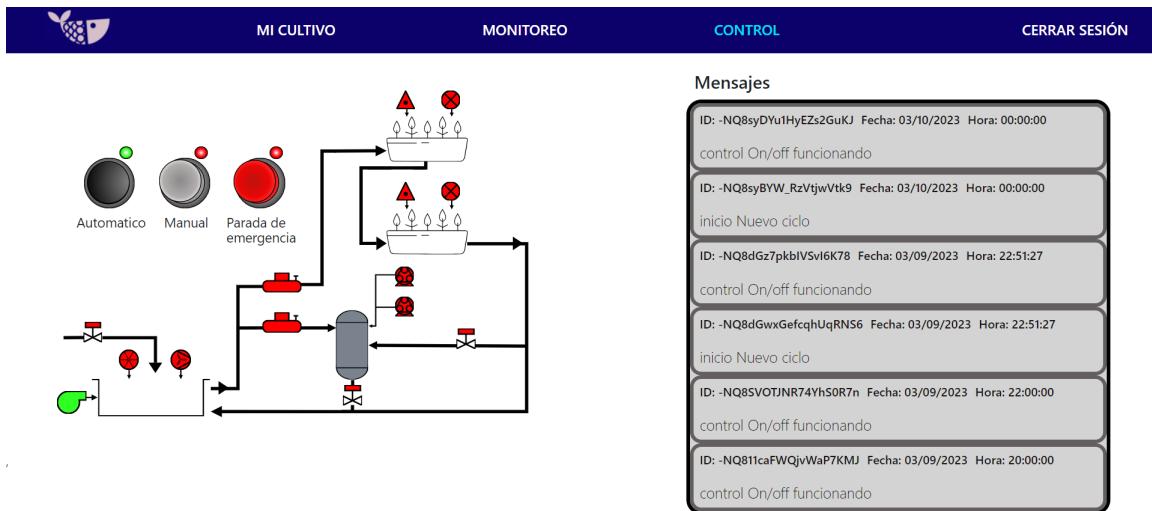


Figura 3.78: Vista final control

Como puede observarse en la figura 3.78, existen 3 estados de control:

- **Automático:** ejecuta la técnica de control que tenga por defecto el sistema ya sea on /off o predictivo. Para el caso del control predictivo, implementa la rutina de control generada a través de la IA que predice cómo se comportarán los niveles de temperatura y TDS para poder ejecutar acciones que garanticen un comportamiento dentro de los rangos permitidos.
- **Manual:** permite modificar, a través de la página web, el estado de cada uno de los elementos de acción que hacen parte del sistema.
- **Parada de emergencia:** Deshabilita todos los elementos de acción exceptuando la oxigenación, pues es una acción necesaria para la supervivencia de los peces. Además, no genera riesgo o problema alguno, pues este modo se puede activar directamente a través de la página o modificando directamente en la base de datos realtime la variable correspondiente al estado de control (Pemergencia)

3.3.3. Resultados

Se obtuvo una página funcional y pertinente ante las necesidades que surgieron durante el desarrollo del proyecto. La página web ha facilitado todas las etapas del proyecto, pues ha permitido validar el funcionamiento de los diferentes controles, modificar fácilmente los elementos del sistema sin la necesidad de acceder a la Raspberry directamente y conocer rápidamente el estado de las variables más importantes del sistema.

Resumen funcionalidades de la página:

- *Supervisión remota:* la página permite ver las últimas imágenes capturadas por la cámara.
- *Control remoto:* hace posible controlar cualquier elemento de acción dentro del sistema al igual que elegir un modo de funcionamiento.
- *Monitoreo remoto:* a través de la página se puede ver el estado de las variables y su registro.

3.4. IoT

Debido a las razones explicadas en [Estructura Eléctrica y Electrónica](#), para generar un sistema de automatización completo, surgió la necesidad de conectar los componentes a la red. Por lo tanto, se planteó la siguiente conexión a nivel de red.

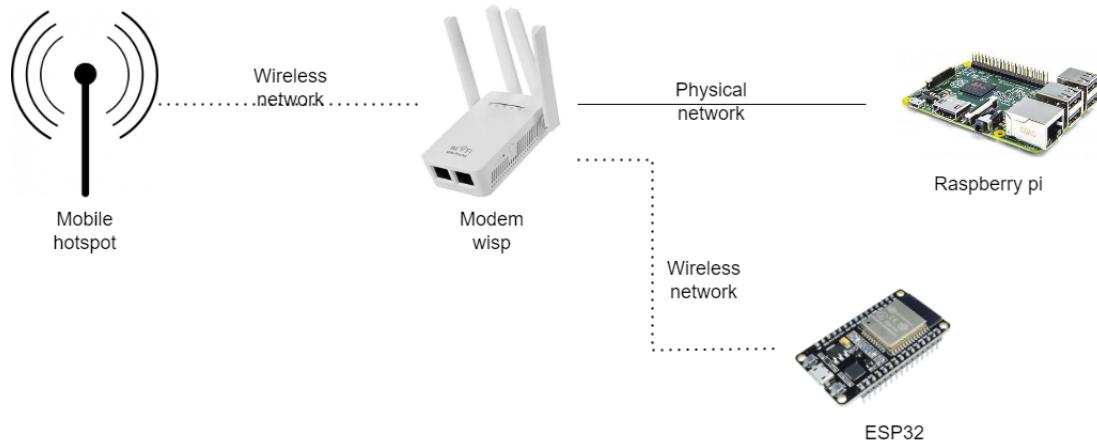


Figura 3.79: Conexiones de red

El hotspot fue necesario debido a que la red de la universidad cuenta con protección de acceso a diferentes dominios de acceso remoto. Actualmente, un celular está haciendo las veces de hotspot al compartir Wifi, el cual se encuentra dentro de una caja de seguridad debido a razones explicadas en [problemas](#).

La solución completa para el componente de IoT se efectúa a través del protocolo de comunicación MQTT la cual se detalla más adelante.

3.4.1. Arquitectura de ejecución

A nivel de componentes de red, se construyó la siguiente arquitectura de despliegue que abarca la solución completa.

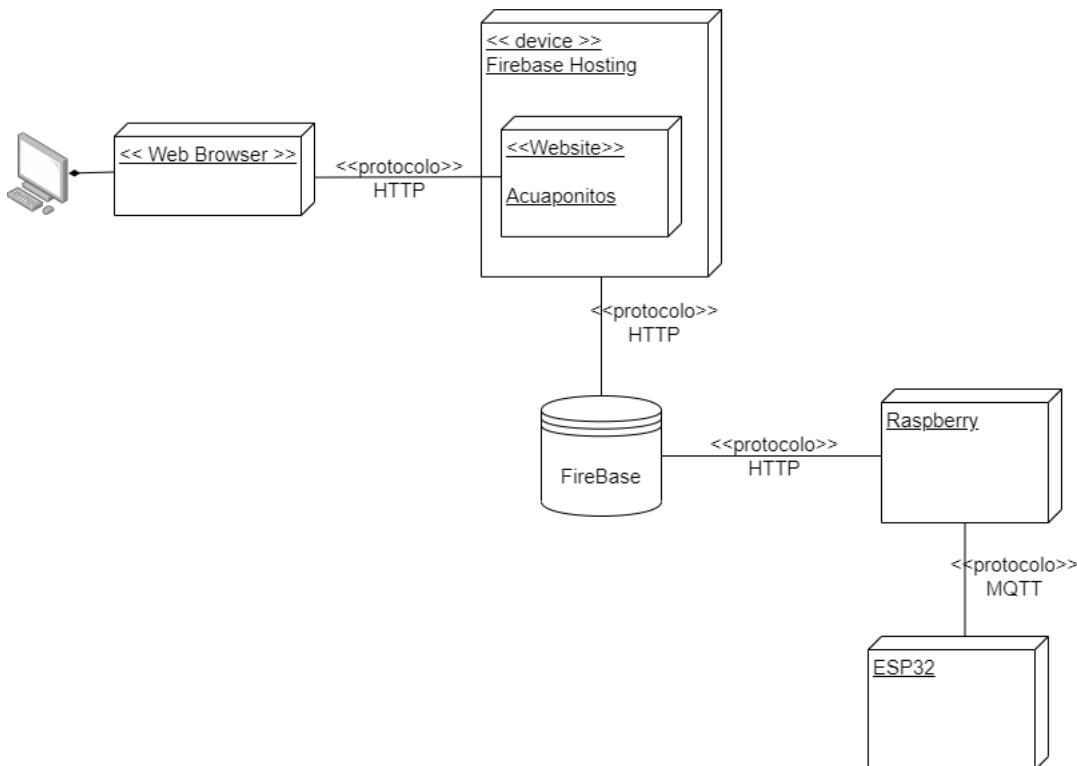


Figura 3.80: Arquitectura de ejecución

La arquitectura está compuesta por los siguientes componentes:

- *Firebase Hosting*: servidor backendless para páginas web estáticas de uso personal.
- *Firebase(BD)*: se usó la base de datos realtime proporcionada por Firebase, la cual tiene como ventaja el intercambio de información a alta velocidad orientado a información de bajo peso. Es una base de datos orientada a documentos, muy similar a Mongo.
- *Web browser*: cualquier gestor web que use el usuario para acceder a internet.
- *Raspberry*: elemento central de la solución que administra la conexión del sistema con Internet.
- *Esp32*: elemento complementario para la recolección de datos y dosificación de alimentos.
- *MQTT*: protocolo de mensajería de bajo peso usado para la comunicación entre la raspberry y la esp32.

Como se puede ver en la imagen, la página está alojada en el dominio de Firebase hosting, pero por cuestiones de seguridad no se expone en este documento. Además Firebase también aloja la base de datos realtime que se usó para almacenar los datos recogidos a lo largo del proyecto.

3.4.2. MQTT

Para iniciar, se plantea una breve descripción del funcionamiento de MQTT, un protocolo de red ligero que tiene 6 componentes principales:

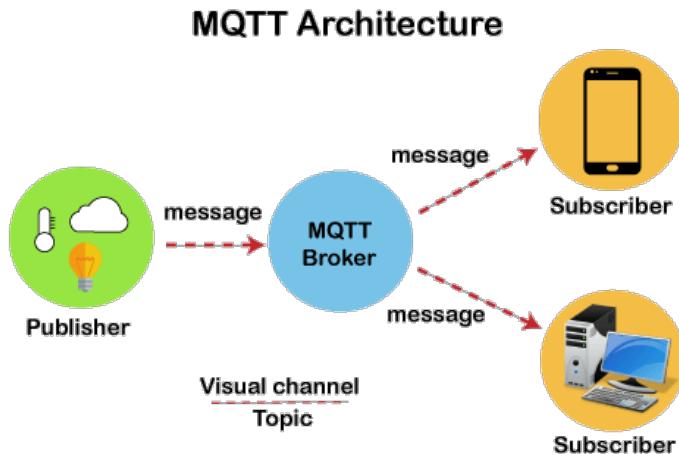


Figura 3.81: Arquitectura general MQTT [65]

De acuerdo a este diagrama, se definen los siguientes conceptos:

- *Broker*: centro de administración de MQTT al cual llegan todos los mensajes y los redirecciona hacia los suscriptores de acuerdo al tópico.
- *Cliente*: todo elemento que hace parte de la red y se conecta al broker. Puede ser Publisher o Subscriber o ambas.
- *Topics*: cada mensaje debe tener un identificador llamado “topic” que es el tema del cual trata el mensaje y al cual los suscriptores se vinculan para recibir todos los mensajes que lleguen con ese “topic”.
- *Messages*: son los que contienen la información.
- *Publisher*: componente que publica un mensaje en un tópico
- *Subscriber*: componente que se suscribe a un tópico y recibe todos los mensajes que se publiquen en el mismo.

En la figura 3.82, puede apreciarse la arquitectura MQTT usada en el prototipo construido por los estudiantes

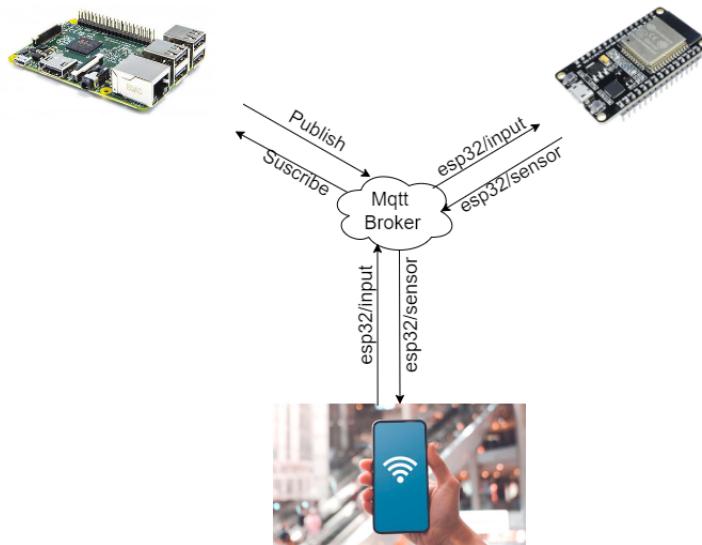


Figura 3.82: Arquitectura de red MQTT empleada en el proyecto de grado

En este caso, el Broker es la misma raspberry, en otras palabras, funciona tanto como broker como cliente.

Como se ve en el diagrama de la Figura 3.79, tanto la raspberry como la esp32 están conectados a la misma red, lo que permite una implementación directa del MQTT, solo basta con asignar una IP fija al broker dentro de la red local. Este subsistema de red que se basa en el protocolo MQTT, cumple las siguientes funciones:

- Administrar la comunicación de la Raspberry y la esp32.
- Permitir la comunicación de los resultados de los sensores desde la esp32 a la Raspberry pi de forma transparente para que posteriormente se manden a la base de datos.
- Permite la comunicación entre subprocessos de la Raspberry (mayores detalles en: [Sistema de gestión](#))
- Permite conectarse desde el celular a la red de MQTT para verificar el funcionamiento de cualquier componente y a los procesos en la Raspberry y en la esp32, como la dosificación o el sensor.

A continuación se encuentra una descripción con los tópicos principales de la solución.

MQTT interno

En primer lugar están los tópicos internos los cuales sirven para comunicar los elementos de la arquitectura que corren independientemente (más información en: [Sistema de gestión](#)). En otras palabras, son tópicos y mensajes desde la Raspberry para la Raspberry. La razón por la cual se realizó de esta manera es porque cuando se usó un sistema de mensajería por puertos, se generó complejidad accidental, pues al tener MQTT, este funciona bien tanto para sistema de mensajería hacia elementos externos como hacia internos.

Raspberry publisher and suscriptor

- *Control/stateControl*: tópico el cual su mensaje es el estado de control en la página web (Manual, Automático, Pemergencia)
- *Control/Actuadores*: tópico el cual su mensaje es el estado(On/Off) de cada elemento activo del sistema (Bombas, Lámparas, Ventiladores, etc) desde la página web en formato JSON.
- *Main/actuadores*: tópico el cual su mensaje es el estado(On/Off) de cada elemento activo del sistema el cual se va a ejecutar en los pines digitales de la raspberry.
- *Main/sensorExr/#*: tópico de sensores externos al sistema en donde “#” puede ser temperatura o luminosidad, y cuyo mensaje contiene el valor sensado de cada uno de esos sensores.
- *Main/mensajes*: tópico de mensajería.

MQTT externo

En cuanto al MQTT externo, es simplemente la comunicación entre elementos externos, raspberry pi, ESP32 o cualquier elemento conectado a la red local.

Raspberry suscriptor

- esp32/sensor: los resultados de sensado de la esp32.

Raspberry publisher

- esp32/input: tópico de mensajería dirigido a la esp32 que puede contener el mensaje "Sensar" o "Doficar".

ESP32 suscriptor

- esp32/input: tópico de mensajería dirigido a la esp32 que puede contener el mensaje "Sensar" o "Doficar".

ESP32 Publisher

- esp32/sensor: los resultados de sensado de la esp32.

3.5. Control

En este apartado se detallan todas las definiciones de diseño planteadas para la técnica de control moderno y su implementación en el prototipo construido. Como primer paso, se recopilaron datos y se modificaron los parámetros de acción en función de análisis cualitativos y cuantitativos realizados por los estudiantes. Para lograrlo, se implementó un sistema de control on/off programado por ventanas de tiempo.

Como eje principal del apartado, se definió un controlador predictivo para ajustar las acciones de control de oxigenación, aireación y circulación, y un controlador difuso para ajustar la acción de control de luminosidad. Finalmente, se empleó un modelo de control híbrido que, combinando ambas técnicas, logra controlar la luminosidad que llega a las plantas y la temperatura del agua, logrando adaptarse a las condiciones cambiantes del cultivo y manejar la incertidumbre y perturbaciones del sistema.

Para evaluar el control propuesto, se realiza un análisis de factor de determinación R², consumo de energía y calidad de agua.

3.5.1. On/Off

Para lograr el desarrollo de una técnica de control moderno, se requirió una toma de datos y una modificación de los parámetros de acción en función de los análisis cualitativos (comportamiento de los componentes biológicos) y cuantitativos (con el kit de mediciones) realizados por los estudiantes. Con el fin de facilitar este proceso, se propuso una alternativa que permite simplificar y automatizar la toma de datos y ajuste de parámetros del sistema con base en las siguientes premisas:

- Las 24 horas del día se dividen en 12 ciclos de 2 horas cada uno
- Cada ciclo tiene una representación de 0 % a 100 % en términos de funcionamiento de cada acción de control que puede aplicarse: luminosidad (lámparas), aireación (ventilador), circulación (bomba de agua), oxigenación (bomba de aire). Este porcentaje representa el tiempo que estará activado el elemento de acción durante el ciclo.

A continuación un ejemplo de cómo se almacenan los porcentajes correspondientes a 1 ciclo.

`"porc_luminacion" : 0, "porc_humectacion" : 0, "porc_circulacion" : 0,99, "porc_oxigenacion" : 0,99, "porc_aireacion" : 0`

Para garantizar que el conjunto de datos recolectados fuese lo suficientemente amplio y detallado para permitir la identificación precisa de la planta, se planificó una toma de datos con diferentes combinaciones de estímulos. En total, se generaron 11 posibles combinaciones diarias, de las cuales la primera se mantuvo constante durante aproximadamente un mes y se consideró como una combinación base, mientras que las otras 10 combinaciones se iteraron durante un mes. De esta manera, en total se recolectaron 600 datos para su posterior análisis. Para conocer con mayor nivel de detalle las combinaciones empleadas puede consultar **Control** en la sección OnOff.

MEJOR COMBINACIÓN CONTROL ON/OFF PARA EL SISTEMA

Luego de consultar la literatura especializada y realizar pruebas experimentales para determinar los valores mínimos de funcionamiento de los diferentes actuadores, se llegó a las siguientes conclusiones:

- En el caso de la oxigenación, no es necesaria una acción completa durante las 24 horas del día debido a que hay circulación por caída y esto favorece la oxigenación del agua. Por lo tanto, se encontró

empíricamente que utilizar un 20 % de la capacidad en la noche y un 100 % durante el día es suficiente para garantizar los procesos biológicos necesarios para la subsistencia de los peces y las plantas.

- Con respecto a la circulación, se determinó que mientras funcione alrededor del 30-50 % de la capacidad, se garantiza la estabilidad de los niveles de amoníaco y nitrito en un valor cercano a cero para ambas variables. Cualquier porcentaje de funcionamiento por debajo de ese rango podría desestabilizar significativamente estos parámetros.
- Con respecto a la circulación, se determinó que mientras funcione alrededor del 30-50 % de la capacidad, se garantiza la estabilidad de los niveles de amoníaco y nitrito en un valor cercano a cero para ambas variables. Cualquier porcentaje de funcionamiento por debajo de ese rango podría desestabilizar significativamente estos parámetros.

3.5.2. Moderno Multivariable

Se optó por implementar un control moderno multivariable utilizando una técnica híbrida de control predictivo con fuzzy para el cultivo acuapónico elegido dado que:

- Un controlador predictivo se basa en modelos matemáticos del sistema que se está controlando, lo que permite predecir el comportamiento del sistema y tomar decisiones óptimas de control de forma preventiva en tiempo real. Esto significa que el controlador puede adaptarse a las condiciones cambiantes del cultivo y ajustar las acciones de control en consecuencia[66]. Por tal motivo, esta técnica fue considerada ideal para determinar los porcentajes de ciclo de trabajo de oxigenación, aireación y circulación..
- El control difuso o fuzzy puede manejar la incertidumbre y la variabilidad inherentes a los sistemas relacionados con cualquier actividad agrícola, que son causadas por factores como las variaciones en el clima. El controlador fuzzy utiliza reglas lingüísticas y variables lingüísticas para modelar la incertidumbre y ajustar las entradas de control [67, 68]. Es por esto, que fue considerada la técnica más pertinente para obtener el porcentaje de ciclo de trabajo de luminosidad.
- Finalmente, se definió el modelo de control híbrido que combina el control predictivo y el control difuso con el fin de aprovechar las ventajas que cada técnica puede ofrecer, permitiendo que el controlador se adapte a las condiciones cambiantes del cultivo mientras maneja la incertidumbre y las perturbaciones.

Tomando como referencia [69, 70], se ha diseñado una arquitectura de control predictivo basado en modelos (MPC) que incorpora una estrategia de control, un módulo de restricciones, una gestión de acciones y un componente predictivo. Además, se ha considerado una estrategia de generación de posibilidades aleatorias para mejorar la capacidad de adaptación del sistema.

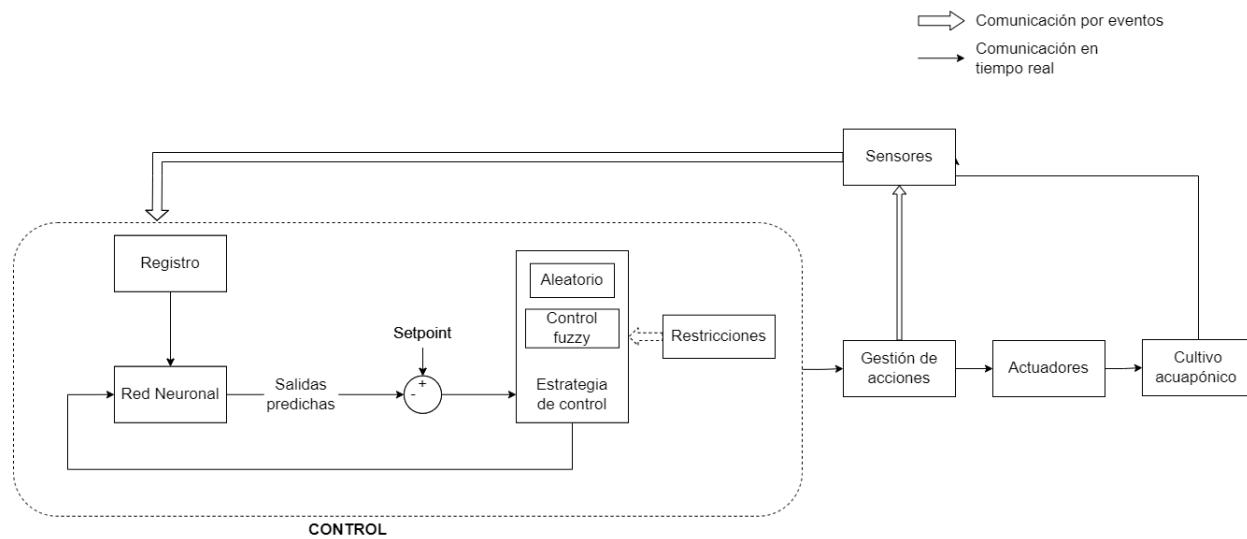


Figura 3.83: Arquitectura de control

Como se puede ver en la figura c1, la arquitectura de control se divide en varios componentes, de los cuales se hace necesario precisar:

- **Fuzzy:** permite calcular cuál debe ser el porcentaje de funcionamiento de las lámparas durante el ciclo siguiente, con el fin de que la luminosidad se establezca en un valor ideal (en lux). Esto, teniendo en cuenta el registro de luminosidad en el intervalo actual.
- **Red Neuronal:** componente encargado de modelar el comportamiento de las variables temperatura del agua y TDS de acuerdo a determinados parámetros de entrada mediante una Red Neuronal Artificial por series de tiempo (ANN).
- **Aleatorio:** la estrategia de generación aleatoria de estímulos es una técnica empleada para determinar la mejor combinación del porcentaje de funcionamiento de circulación, oxigenación y aireación para el siguiente ciclo. Esta técnica genera alrededor de 1000 combinaciones de estímulos para encontrar la combinación óptima. Es importante aclarar que el ciclo de luminosidad, por su parte, es determinado por el controlador fuzzy como se mencionó anteriormente.
- **Restricciones:** Puesto que el sistema necesita unos mínimos vitales en cuanto a oxigenación y circulación, este módulo de restricciones las tiene en cuenta para descartar las combinaciones (dadas por el generador aleatorio) que no cumplen estas condiciones.
- **Estrategia de control:** estrategia empleada para definir los valores de acciones de control sobre el sistema (Aleatorio + Fuzzy)
- **Control:** servicio principal que integra el generador aleatorio, el control fuzzy y la lógica de control mediante una adecuación de datos garantizando el acople del sistema de control.

Además, se plantearon dos formas de comunicación:

- **Por eventos:** comunicación que ocurre en un instante determinado establecido con anticipación y de forma estratégica

- En tiempo real: comunicación en tiempo real que genera una consecuencia inmediata

Los componentes anteriormente descritos y las formas de comunicación planteadas permiten el funcionamiento del ciclo que se observa en la arquitectura de control de la figura 3.83.

La estrategia de control utiliza una estrategia de generación aleatoria de estímulos y una red neuronal para determinar la mejor combinación de acciones de control para aplicar durante el ciclo siguiente de funcionamiento (porcentajes de funcionamiento de circulación, oxigenación y aireación), esto teniendo en cuenta el historial de datos tomados por los sensores. Además, utiliza (para determinar el porcentaje de funcionamiento de la iluminación) un control fuzzy que permite manejar la incertidumbre y variabilidad inherentes a condiciones ambientales como el clima. De esta manera, se prevé alcanzar el setpoint de cada variable y mantener un control del sistema de cultivo acuaponico tal y como se puede ver en la figura 3.83.

A continuación se detalla el proceso de diseño e implementación del control.

CONTROL FUZZY: LUMINOSIDAD

Para el caso del control de luminosidad se planteó el uso de un control fuzzy. El control fuzzy es una técnica de control moderna que utiliza la lógica difusa para tomar decisiones, basadas en la incertidumbre y en la imprecisión de los datos, que permitan realizar ajustes en un sistema.

A diferencia de los sistemas de control tradicionales, que requieren una programación precisa y ajustes manuales constantes, el control fuzzy puede adaptarse a las variaciones en las condiciones ambientales y los cambios en la demanda de temperatura de manera más eficiente y efectiva, por lo que fue la mejor opción para el control de esta variable.

Como primer paso, se planteó el universo de discurso así:

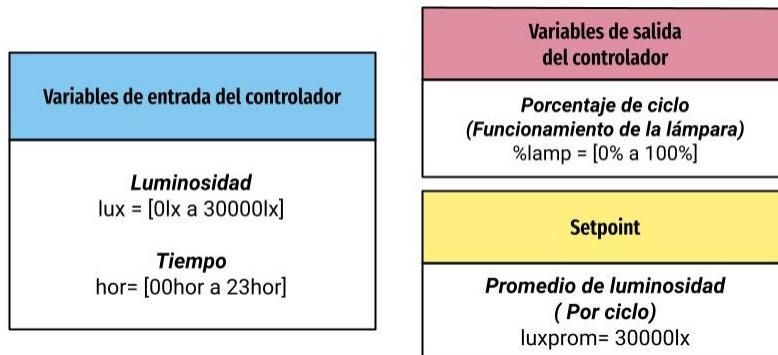


Figura 3.84: Universo de discurso

El valor de entrada de luminosidad es el valor medido por el sensor escalado en un factor de 30 debido a que se busca establecer que la máxima luminosidad registrada por el sensor sea igual a la luminosidad que puede suministrar la lámpara. La luminosidad proporcionada por la lámpara se calculó así:

Usando una pagina para calcular la luminosidad de una lámpara de acuerdo a la potencia, tipo y área superficial iluminada. se encontró que la lámpara suministra 29250Lx.

- **Potencia:** 13W(de acuerdo al datasheet)

- **Tipo:** LED
- **Área de contacto:** 0.04m² (Calculada usando el angulo de apertura de la lampara y la distancia a la que ilumina las plantas 15cm)

Enter power in watts:
13 W

Select light source:
LED lamp

Or enter luminous efficacy in lumens per watt:
90 lm/W

Enter surface area:
0.04 m²

Or enter spherical radius:
0.056418958355 m

Calculate **Reset**

Illuminance result in lux:
29250 lx

Figura 3.85: Calculo luminosidad

Con base en el universo de discurso definido se plantearon las funciones de pertenencia para cada variable:

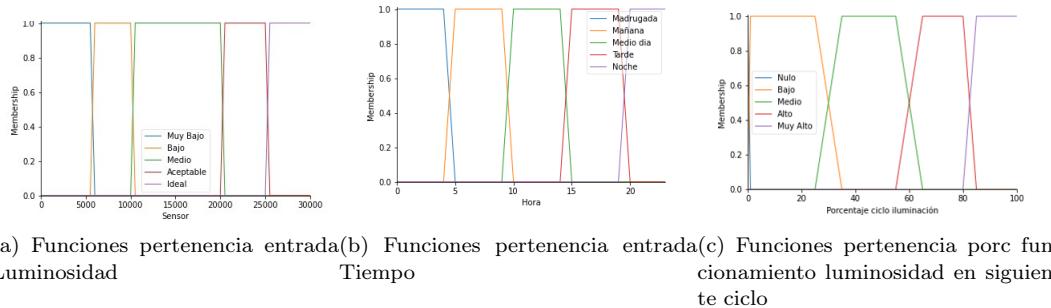


Figura 3.86: Funciones de pertenencia

Por último se definieron siete reglas de control:

- Si es de noche o de madrugada, sin importar cual sea el valor de la variable luminosidad, el porcentaje de funcionamiento de la iluminación debe ser nulo. Finalidad de la regla: garantizar las ocho horas mínimas de oscuridad que necesitan las plantas [71].
- Sin importar la hora (excepto madrugada y noche), si el valor de la variable luminosidad es ideal, el porcentaje de funcionamiento de la iluminación debe ser nulo. Finalidad: cuando por las condiciones climáticas el nivel de luminosidad ya es el deseado no suministrar más luz por cuestiones de eficiencia energética y bienestar de las plantas.

- Sin importar la hora (excepto madrugada y noche), cuando el valor de la variable luminosidad es muy bajo, el porcentaje de funcionamiento de la iluminación debe ser muy alto. Finalidad: buscar que la variable luminosidad suba al valor ideal.
- Sin importar la hora (excepto madrugada y noche), cuando el valor de la variable luminosidad es bajo, el porcentaje de funcionamiento de la iluminación debe ser alto. Finalidad: buscar que la variable luminosidad suba al valor ideal.
- Sin importar la hora (excepto madrugada y noche), cuando el valor de la variable luminosidad es medio, el porcentaje de funcionamiento de la iluminación debe ser medio. Finalidad: buscar que la variable luminosidad suba al valor ideal.
- Si es medio día y el valor de la variable luminosidad es aceptable, el porcentaje de funcionamiento de la iluminación debe ser nulo. Finalidad: según los registros climáticos de la ciudad de implementación del cultivo (Cali-Colombia) revisados por los estudiantes, el clima en el periodo de tiempo etiquetado como medio día suele ser soleado. Desde el punto de vista energético, si hay una fuente lumínica natural, se hace innecesario e irrelevante el uso de una fuente lumínica artificial en este lapso.
- En la mañana y en la tarde, cuando el valor de la variable luminosidad es aceptable, el porcentaje de funcionamiento de la iluminación debe ser bajo. Finalidad: buscar que la variable luminosidad suba al valor ideal.

En Fuzzy se encuentra el código empleado para el funcionamiento del control fuzzy.

RELACIÓN ENTRE VARIABLES Y ACCIONES DE CONTROL: TEMPERATURA DEL AGUA Y TDS

Con el objetivo de validar la relación entre las variables, se llevó a cabo un análisis de correlación entre la variación de la temperatura y el total de sólidos disueltos (TDS), en relación con los valores de los ciclos de trabajo a aplicar (luminosidad, aireación, circulación, oxigenación). En otras palabras, se evaluó si existe una relación significativa entre los cambios en los porcentajes de los ciclos de trabajo y las variaciones de TDS y temperatura. El primer paso para la realización de esta validación fue obtener un dataset inicial con los siguientes datos:

- Porcentaje ciclo luminosidad
- Porcentaje ciclo aireación
- Porcentaje ciclo circulación
- Porcentaje ciclo oxigenación
- Registro TDS en los últimos 5 intervalos
- Registro Temperatura en los últimos 5 intervalos
- Hora
- Temperatura en el siguiente intervalo después de aplicar los porcentajes de ciclo
- TDS en el siguiente intervalo después de aplicar los porcentajes de ciclo

Para la construcción del dataset, se llevaron a cabo varias iteraciones con diferentes estímulos, lo que generó una gran cantidad de datos que luego se procesaron y filtraron a través de una limpieza de datos. Una vez

se aplicó el filtro, se obtuvieron un total de 864 datos que representan aproximadamente 3 meses de funcionamiento del sistema, durante los cuales se implementaron diversas combinaciones de estímulos (porcentajes de ciclos de trabajo) y se llevaron a cabo múltiples pruebas de control. La matriz a continuación corresponde al análisis de un intervalo de tiempo representativo dentro del dataset obtenido:

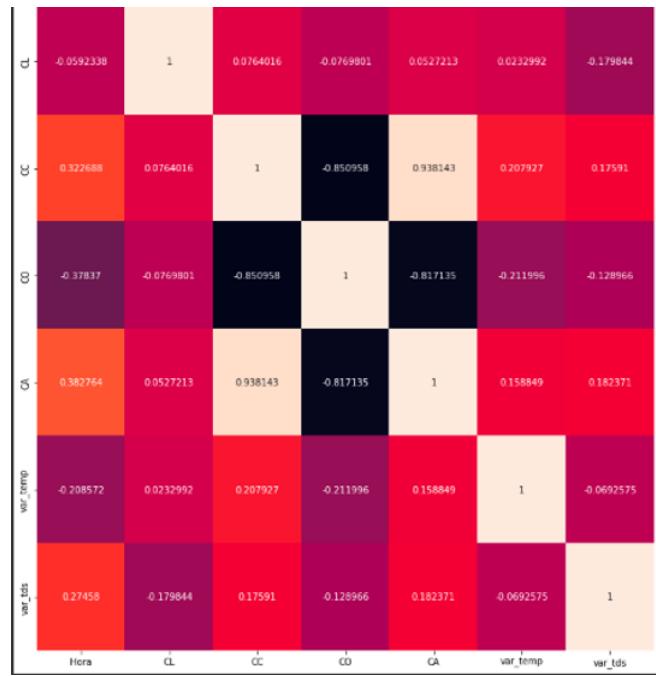


Figura 3.87: Matriz de Correlacion

Luego de un análisis de resultados, los estudiantes determinaron que es posible alterar el sistema a partir de los actuadores ya que hay correlación entre las variables y los ciclos de trabajo. A continuación se sintetizan los principales hallazgos: *Temperatura*

- Correlación (en %) con ciclo luminosidad: 2 %
- Correlación (en %) con ciclo circulación: 20 %
- Correlación (en %) con ciclo oxigenación: -21 %
- Correlación (en %) con ciclo aireación: 15 %

TDS:

- Correlación (en %) con ciclo luminosidad: -17 %
- Correlación (en %) con ciclo circulación: 17 %
- Correlación (en %) con ciclo oxigenación: -17 %
- Correlación (en %) con ciclo aireación: 18 %

Aunque no hay un valor específico de correlación que determine si una variable es controlable, ya que esto varía según el tipo de sistema, los objetivos de control y los requisitos de precisión, para los estudiantes los

valores obtenidos fueron significativos y suficientes para llegar a la conclusión de que ambas variables son candidatas a regular el sistema.

Con base en los resultados obtenidos se decidió implementar un control de temperatura a partir de parámetros indirectos. Esto se debe a que las acciones de control que pueden implementarse (oxigenación, circulación y aireación) afectan realmente la temperatura del agua al intervenir en la transferencia de calor entre el agua y el aire.

Aunque el TDS es considerada una posible candidata a controlar en el sistema, se concluyó que no es viable controlarlo indirectamente debido a que su influencia en el sistema es compleja y multifactorial. La cantidad de TDS en el agua puede ser influenciada mayormente por una variedad de factores sobre los cuales no se puede garantizar una acción de control relevante con el prototipo actual, como la defecación de los peces, la tasa de crecimiento de las plantas o la cantidad de nutrientes en el agua. Por lo tanto, controlar indirectamente el TDS mediante el ajuste de parámetros como la circulación del agua sería ineficaz y no lograría el resultado deseado.

ENTRENAMIENTO DE LA RED NEURONAL: PREDICCIONES DE TEMPERATURA Y TDS

Se optó por desarrollar e integrar una Red Neuronal basada en series de tiempo (ANN). Este tipo de red neuronal es capaz de modelar relaciones no lineales y es adecuada para controlar sistemas con variables complejas e interdependientes. Además, su capacidad de adaptación permite ajustar el control en respuesta a cambios en el sistema. Por lo tanto, la ANN de series de tiempo es una herramienta útil en el control de cultivos acuaponicos debido a la complejidad de las relaciones entre las variables [72, 73].

La ANN se definió con las siguientes entradas y salidas:

Entradas: $X = [\text{TDS}[6], \text{Tmp}[6], \text{Lum}[1], \text{Hora}, \text{CL}, \text{CO}, \text{CC}, \text{CA}]$

- Lum: Luminosidad[n].
- TDS: sólidos disueltos totales[n-1:n-6].
- Temp:TEMPERATURA[n-1:n-56].
- Hora: Hora del dia.
- CL: ciclo de trabajo en luminosidad a aplicar.
- CO: ciclo de trabajo en oxígeno a aplicar.
- CC: ciclo de trabajo en circulación.
- CA: ciclo de trabajo en aireación.

Salidas [TDS_p,Tmp_p]:

- TDS_p:TDS siguiente
- Temp_p:TEMPERATURA siguiente

Para la red neuronal se obtuvo un dataset inicial de N datos correspondientes a las fechas:

Para el entrenamiento de la red neuronal fue necesario realizar limpieza y normalización de datos, análisis de dimensionalidad, creación y entrenamiento del modelo y una evaluación de resultados que se describen brevemente a continuación:

Limpieza de datos:

Se realizó un algoritmo para la limpieza para datos atípicos a partir de un filtro por desviación estándar con una ventana de 2,5 veces desviación.

Normalización: Se empleó un normalizador con la función standar scaler de sklearn

Análisis de dimensionalidad:

Se realizó un análisis de dimensionalidad con [main component analysis] PCA y se logró reducir la dimensionalidad del dataset de entrada de 17 a 11 dimensiones, manteniendo el 99.8% de los pesos. Esto permitió reducir la complejidad de la red y reducir los tiempos de entrenamiento y respuesta.

Creación y entrenamiento del modelo

Se definieron los parámetros y porcentajes así: entrenamiento: 85 %, validación: 15 % y test por validación cruzada con 5 capas usando grid search para la combinación de diferentes hiperparametros.

Descripción del proceso:

En primer lugar se iteraron funciones de activación, donde de acuerdo a lo esperado las que obtuvieron mejores resultados fueron Identity y Relu, pues se trata de una regresión. Se usó como solver LBFGS y luego se iteraron coeficientes de regularización L2, en donde se encontró que el mejor fue 1e-05.

Respecto a capas de neuronas se iteraron las siguientes:

- (20,20): 2 capas de 20 neuronas c/u
- (5,5,5): 3 capas de 5 neuronas c/u
- (20,20,20): 3 capas de 20 neuronas c/u
- (30,30,30): 3 capas de 30 neuronas c/u
- (20,20,20,20): 4 capas de 20 neuronas c/u
- (30,30,30,30): 4 capas de 30 neuronas c/u
- (50,50,50,50): 4 capas de 50 neuronas c/u.

De estas iteraciones se encontró que los 3 mejores resultados fueron:

- (20,20)
- (5,5,5)
- (20,20,20)

Se decidió escoger la red neuronal (5,5,5) pues presentó un buen equilibrio entre capas y operaciones totales. Esta red se volvió a entrenar usando el total de 85 % del dataset y se obtuvo un R2 de 93 %, lo que demostró que la red neuronal logra identificar un patrón para la predicción de los valores futuros. Evaluación Por último, se realizó una evaluación de la red usando el último 15 % del dataset, obteniendo los siguientes resultados:

TDS R2: 98,5 Temperatura R2: 89,9

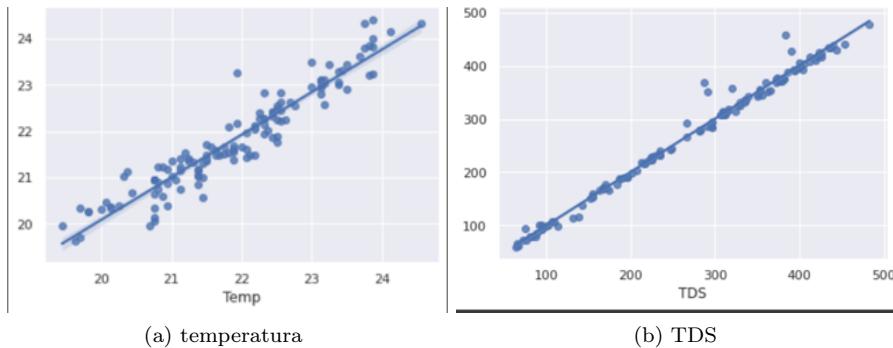


Figura 3.88: Resultados de evaluación mediante coeficiente de determinación

Para mas detalle acerca del proceso de entrenamiento de la red, consulte la documentacion en el apartado **Control**.

CONTROL ALEATORIO: TEMPERATURA DEL AGUA

Después de completar el entrenamiento de la red neuronal y el desarrollo de los códigos de control que forman parte del sistema de gestión (ver enlace del sistema de gestión), se procedió a evaluar la precisión del proceso de generación de combinaciones aleatorias en comparación con la variación de la mejor predicción, lo que implica determinar cuántas combinaciones aleatorias son necesarias para encontrar la mejor combinación posible que se acerque más al setpoint. Para lograr esto, se llevó a cabo un análisis iterativo que varió desde 10 hasta 100000 combinaciones aleatorias con distribución uniforme. Luego de realizar las pruebas, se concluyó que 1000 combinaciones aleatorias eran suficientes para generar una cantidad adecuada de combinaciones para oxigenación, circulación y aireación.

ANÁLISIS DE DIVERGENCIA RNN

Con el fin de evaluar la respuesta de la red ante diferentes porcentajes de funcionamiento de ciclo, se realizaron 16 combinaciones posibles en las que dichos porcentajes de funcionamiento pueden estar al 100 % durante un ciclo determinado. Esto permitió evaluar el desempeño de la red en una amplia gama de condiciones y determinar su capacidad de respuesta frente a cambios en los ciclos de trabajo.

LUMINOSIDAD	CIRCULACION	OXIGENACION	AIREACION
0	0	0	0
0	0	0	1
0	0	1	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	0	1
0	1	1	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	0	1
1	1	1	0
1	1	1	1

Figura 3.89: Combinaciones de los porcentajes de funcionamiento de ciclo al 100%

Se planteó analizar la respuesta de 10 redes neuronales diferentes ante las 16 combinaciones anteriores para 30 conjuntos de datos aleatorios del dataset. Se encontró que las redes neuronales responden consistentemente, independientemente de los datos. Haciendo un análisis de los signos en las variaciones que genera cada una de las 16 combinaciones en comparación con ejercer un valor 0 de control se encontró que:

- Luminosidad: Relación directa con TDS y temperatura
- Circulación: Relación directa con en TDS y temperatura
- Oxigenación: Relación inversa con en TDS y temperatura
- Aireación: Relación directa con en TDS y temperatura

Es importante destacar que estos hallazgos difieren de los resultados obtenidos a partir de la matriz de correlación, donde se encontró que la luminosidad tenía una relación inversa con el TDS. Sin embargo, puede concluirse que los resultados mostraron una alta consistencia en la relación entre los ciclos y el TDS, con todas las redes respondiendo con aumentos positivos o negativos iguales. En cuanto a la temperatura, se observó una porción representativa de aciertos (97,3 %) en cuanto a la relación directa o inversa identificada en cada red neuronal.

3.5.3. Resultados de control:

ANÁLISIS DE R² PARA PREDICCIÓN DE TEMPERATURA

Durante el proceso de análisis del desempeño de la red, se llevó a cabo una evaluación de la precisión de la predicción de la temperatura una semana después del último dato utilizado para el entrenamiento de la red. El análisis arrojó un valor de $R^2=84$ lo que indica una buena capacidad de la red para predecir la temperatura con una precisión aceptable.

La red neuronal utilizada en la última prueba de control moderno fue entrenada el 15 de enero. Las pruebas finales del control moderno se llevaron a cabo entre el 12 y el 20 de febrero y se encontraron los siguientes resultados a nivel predictivo para la predicción de temperatura entre dicho intervalo de tiempo:

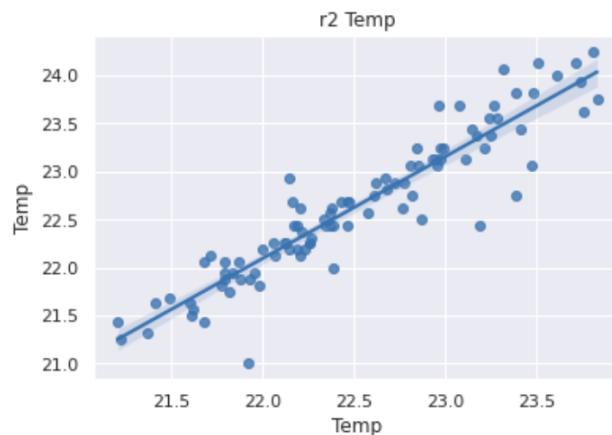


Figura 3.90: Resultados de evaluación de predicción de temperatura empleando control moderno

El calculado fue de 78.9 %. Esto demuestra que, incluso un mes después de haber entrenado la red, todavía

puede predecir la temperatura a un nivel aceptable. Es importante tener en cuenta que a medida que pase el tiempo, la exactitud de la red disminuirá, ya que la temporada y los elementos dentro del sistema cambian. Debido a que esta es una red neuronal estática, no tiene la capacidad de adaptarse en tiempo real a los cambios en el sistema. Por su parte, el control Fuzzy cumplió con las reglas de funciones dadas, garantizando las necesidades de luminosidad planteadas.

ANÁLISIS DE CONTROL

A continuación se sintetizan los datos del 1 al 28 de febrero obtenidos para el análisis de control de la temperatura:

	Media	Desviación estandar
Control fallas	23,29197761	1,078060525
On/off	23,38257576	0,724362713
set point 23	22,89484127	0,696497701
set point 22	22,225	0,587124411

Figura 3.91: Análisis control de temperatura

A continuación se detalla la información contenida en la tabla:

- Control con fallas: durante este periodo se implementó el control predictivo planteado, sin embargo, posteriormente los estudiantes se dieron cuenta que habían fallas en código (entradas de parámetros inyectadas en la Red neuronal invertidas) y se presentaron problemas de conectividad a la red wifi. Para este caso se había establecido un set point de 21°C pero por los problemas mencionados, la implementación del control se consideró fallida, muestra de ello son los resultados que muestran la media lejana al setpoint y con una desviación estándar de 1°C.
- Control On/off: se pusieron las combinaciones de ciclos más adecuadas para el funcionamiento básico del sistema las cuales fueron calculadas de forma experimental. De los resultados obtenidos se concluye que la media de temperatura con el control on/off se mantuvo cercana a la media cuando no hubo una acción de control exitosa y que la disminución en la desviación estándar, muestra que el sistema es más estable que en el caso anterior.
- Control moderno - Set point 23: luego de corregir los problemas con los códigos y los de conectividad, se implementó nuevamente el control predictivo y se encontró que la media disminuyó a 22,89 grados un valor considerablemente más cercano al set point establecido (23) que los dos casos anteriores.
- Control moderno - Set point 22: se decidió probar con un set point más bajo (22°C) en donde los resultados obtenidos son notablemente mejores, pues se nota una diferencia drástica en cuanto a la temperatura que estaba registrando el sistema en los valores anteriores. Pero es aún más destacable la diferencia en cuanto a desviación estándar, puesto que demuestra que el sistema es más estable y las acciones de control indirectas tienen un efecto controlado en la estabilidad.

Se consideró que la métrica más diciente para este análisis es la desviación estándar, ya que a diferencia de la media, la cual se ve muy influenciada por la temperatura ambiente, la desviación estándar demuestra una evidente disminución al compararlo con los datos completos en donde siempre ha rondado 1°C-1,5°C.

ANÁLISIS ENERGÉTICO

Se decidió hacer un análisis energético empleando un medidor de potencia, el cual es un dispositivo que se utiliza para medir la cantidad de energía eléctrica que se consume en un sistema durante determinado periodo de tiempo. Este análisis permitió obtener información detallada sobre el uso de energía del sistema frente a tres posibles estados de control, cada uno de ellos implementado en el prototipo con una duración de una semana.

- Sin control: todos los elementos de acción encendidos todo el tiempo durante toda la semana.
- Consumo promedio diario: 923,7 Wh
- Control On/off: se emplearon porcentajes de funcionamiento de ciclo fijos que permiten garantizar los parámetros necesarios para el funcionamiento básico del sistema. Estos ciclos se han establecido con base en pruebas experimentales realizadas por los estudiantes, que incluyen ensayos, análisis de calidad de agua y evaluaciones de errores.
- Consumo promedio diario: 885,6 Wh
- Control híbrido (predictivo/fuzzy): se empleó la técnica de control propia tomando diferentes set points (entre 21-23°C para temperatura y rango ideal para iluminación) Consumo promedio diario: 714,1 Wh



Figura 3.92: Medidor de potencia implementado

De acuerdo a los resultados obtenidos, se analizó el consumo energético teniendo como foco la comparación entre la técnica de control moderna implementada respecto a las otras dos opciones de control analizadas (sin control y control on/off). Los resultados obtenidos fueron:

- A nivel energético el control moderno consume un 33 % menos de energía en contraste con no aplicar control.
- El control moderno, en comparación con el control on/off, consume un 20 % menos de energía. El control on/off es un tipo de control que se basa en encender o apagar un dispositivo cuando se alcanza un cierto umbral de referencia y requiere experiencia, análisis, ensayo y error. Por su parte, el control moderno consume menos energía debido a que ajusta continuamente los parámetros en lugar de apagar y encender los dispositivos para mantener los valores deseados.

ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA

Durante todo el proyecto, se validaron todos los procesos aplicados al sistema desde un punto de vista de calidad de agua, utilizando un kit de mediciones para realizar las pruebas experimentales necesarias.

Durante el primer mes, se midieron regularmente el pH, el amoníaco, el nitrito y el nitrato. Después de este tiempo, se dejó de medir el pH con regularidad, ya que se validó que no variaba mucho y que una vez que el sistema estaba estabilizado (en términos de procesos bacterianos y adaptación de los peces), su valor no cambiaba. Esta situación con el pH, como se mencionó anteriormente en el apartado 3.2, justifica la ausencia del sensado y control de pH para este sistema.



Figura 3.93: Ejemplo de resultado obtenido con el kit medidor de variables de calidad de agua

Según la literatura, los valores deseables de amoniaco y nitrito deben ser cercanos a 0 ppm para garantizar el bienestar de los peces, mientras que el nitrato no debe sobrepasar los 80 ppm. Teniendo en cuenta lo anterior y las mediciones realizadas, se pudo concluir que:

- Cuando no se ejerció control en el sistema, al tener los elementos encendidos todo el tiempo, se generó el ambiente óptimo para que las bacterias desarrollaran su colonia en la arcilla expandida presente en las macetas, lo que llevó a que el amoníaco y el nitrito se estabilizaran en valores cercanos a 0 después del primer mes.
- Durante el funcionamiento del sistema con el control on/off, se experimentó con diferentes combinaciones y se encontraron los parámetros mínimos necesarios para que el sistema fuera estable en cuanto al amoníaco y al nitrato. Por ejemplo, cuando se utilizó una circulación del 10 % todo el día, el nitrito aumentaba significativamente.
- Durante el funcionamiento del sistema con el control moderno, siempre se logró mantener el nitrito y el amoníaco en valores cercanos a 0, ya que la técnica de control incluye un componente de restricciones en donde se tienen en cuenta los parámetros mínimos a los que deben llegar los porcentajes. Estos mínimos fueron hallados de forma experimental y se incorporaron en el diseño del control. En comparación con los otros sistemas, el control moderno permitió ahorrar un 33 % de energía y mantener la calidad del agua en valores óptimos de forma más eficiente.

3.6. Sistema de gestión

3.6.1. Diseño

Para administrar los recursos físicos, tomar datos y permitir la implementación de diferentes estrategias de control surgió la necesidad de usar una Raspberry.

En un primer momento se desarrolló un monolito que cumplía las siguientes funciones:

- Dirigir la toma de datos a través de mensajes en MQTT hacia la ESP32 y el envío de los mismos a la base de datos.
- Controlar la activación de los diferentes elementos de control (bomba de aire, bomba de agua, lámparas, ventiladores) de acuerdo a los ciclos de trabajo preprogramados
- Leer el estado de control en la base de datos
- Leer el estado de los actuadores en la base de datos
- Controlar la dosificación de alimentos

El código tenía 447 líneas y su depuración era difícil de mantener. En especial, si ocurría un error, no había un buen registro de logs que permitiera encontrarlo fácilmente. Al pensar en los componentes que faltaban por agregar (sensores de emergencia, control predictivo, red neuronal, cámara, etc) se llegó a la conclusión que seguir el desarrollo en monolito no era viable. Al consultar a un profesor de sistemas embebidos de maestría de la Universidad con el fin de encontrar una mejor alternativa, él sugirió emplear servicios en systemd e implementar una arquitectura modular para el sistema de gestión de todo lo necesario para el funcionamiento del sistema. Luego de pasar por varias etapas de diseño se plantearon las siguientes funciones que debería cumplir el sistema de gestión:

- Gestionar la toma de datos
- Gestionar el envío de datos a la BD
- Gestionar la lectura de datos para el control Manual en la BD
- Gestionar la lectura de datos recogidos
- Gestionar los diferentes tipos de control: On/off, Predictivo
- Gestionar las alarmas: Sensor de desagüe
- Gestionar el streaming de la imagen de la cámara a la BD
- Gestionar la comunicación con la esp32 vía MQTT
- Gestionar la modificación de los GPIO
- Gestionar el Registro de la mensajería en la BD

Descripción Tecnológica

Para implementar los requisitos anteriores se usaron las siguientes tecnologías:

- Servicios usando Systemd
- Gestión de componentes cronometrados con Crontab

- Scripts en Python
 - Scripts en Bash

3.6.2. Construcción

Se planteó la siguiente arquitectura de servicios basados en los principios de modularidad y unicidad:

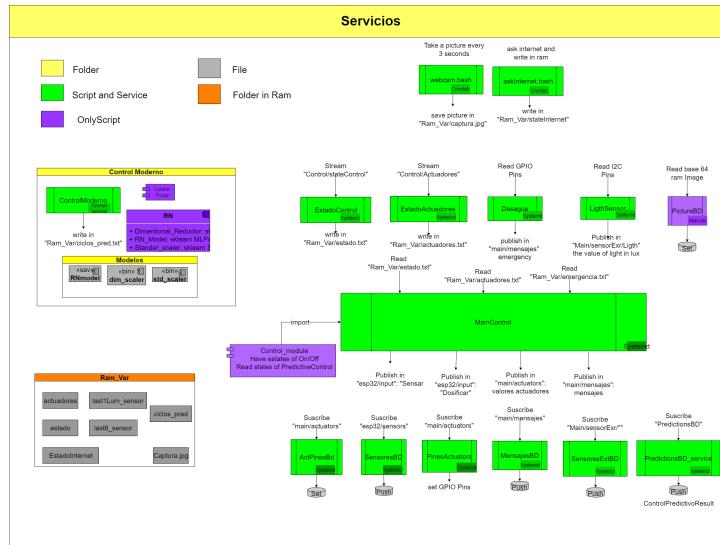


Figura 3.94: Diagrama de servicios construidos

En el diagrama de la figura 3.95 se emplearon cinco colores, cada uno hace referencia a la ubicación y tipo de los componentes de la solución así:

- Folder: carpetas que alojan archivos, scripts u otras carpetas.
 - Script and services: los scripts que se usan como servicios estan de color verde.
 - Only Scripts: son scripts que son ejecutados por los servicios o manualmente
 - File: son archivos ya sea de variables almacenadas en ram o de modelos binarios para el control predictivo
 - Folder in ram: es una carpeta que está alojada en Ram y está destinada a almacenar variables que cambian constantemente para que no vayan a dañar la tarjeta sd debido a la continua escritura.

Descripción de cada componente

Servicios en crontab:

- Bash:
 - *Webcam*: toma veinte fotos, una foto cada tres segundos, y la almacena en ram (Gestionado por crontab, lo ejecuta cada minuto).

- *AskInternet*: hace ping a google y si es efectivo, almacena en ram (*statusInternet*) el valor ‘ON’ que representa la conectividad a internet.

Servicios Python con Systemd:

■ Lectura en BD:

- *EstadoControl*: es un listener del estado de control en que se encuentra la BD en la ubicación Control/stateControlcorrespondiente a el estado del control(Manual, Automático, Emergencia) y lo escribe en un archivo de ram ubicado en “Ram-Var/estado.txt”.
- *EstadoActuadores*: es un listener del estado de los actuadores que se encuentra en Control/Actuadores cuando ocurre un cambio, lo escribe en un archivo en ram “Ram-Var/actuadores.txt”.

■ Escritura en BD:

- *ActPinesBd*: está suscrito al tópico “main/actuadores”, gestiona un JSON que contiene el estado que debe tener cada actuador y cuando recibe un mensaje, actualiza (set) el estado que le mandaron en la BD en la ubicación “Control/Actuadores”.
- *SensoresBd*: Esta suscrito al tópico “esp32/sensor”, gestiona un JSON que contiene la medición de los sensores de la esp32 y cuando recibe un mensaje, agrega (push) el estado que le mandaron en BD en la ubicación “DatosSensoresInterno”.
- *MensajesBD*: está suscrito al tópico “main/mensajes” y cuando recibe un mensaje, lo envía (push) a BD en la ubicación “Mensajes”.
- *SensoresExtBD*: está suscrito al tópico “Main/sensorExr/#“ y cuando recibe un resultado de medición, lo envía (push) a BD en la ubicacion “DatosSensoresExterno”.
- *PredictionsBD*: está suscrito al tópico “PredictionsBD“ y cuando recibe un resultado de los ciclos de trabajo, los envía(push) a BD en la ubicación “ControlPredictivoResult”.

■ Publishers en mqtt:

- *Desague_service*: lee el estado de un puerto GPIO de la raspberry (sensor de desagüe que se encuentra en el módulo de desagüe del montaje físico) y publica en el tópico “main/mensajes” un mensaje del tipo emergencia en caso de activarse.
- *LightSensor*: lee el resultado de un sensor I2C de luminosidad cada minuto y publica el promedio de la medición cada dos horas en el tópico “Main/sensorExr/Lighth”.
- *ControlModerno*: es un servicio del tipo ejecución con timmer el cuál se ejecuta automáticamente cada dos horas y hace la predicción de la mejor combinación de estímulos para el siguiente intervalo, la cual escribe en Ram “ciclos_pred.txt“ y envía un mensaje al tópico “PredictionsBD”.

■ Principal:

- *MainControl*: es el servicio principal que lee variables almacenadas en RAM y publica en MQTT usando comandos con la librería subsystem. Gestiona el encendido de los actuadores dependiendo de la hora del día y además, gestiona la medición y la dosificación de alimento. Este servicio implementa dos hilos, uno para la circulación de agua y otro para el sensado. Adicionalmente, dependiendo de la conectividad a internet activa el control ON/OFF como sistema de emergencia, pues el predictivo necesita información de internet.

■ Otros:

- *PinesActuators*: está suscrito al tópico “main/actuadores”, gestiona un JSON que contiene el estado que debe tener cada actuador y cuando recibe un mensaje, actualiza el estado que le mandaron en los puertos GPIO.

Scripts Python:

- Control_Module: contiene dos funciones
 - *Porcentajes*: retorna que estado deberían tener los diferentes actuadores dependiendo de la hora del día de acuerdo a un archivo Json predefinido.
 - *get_Porcentajes_predictivo*: retorna los porcentajes de trabajo para los actuadores de acuerdo al estado actual del control predictivo.
- PictureBD: lee una imagen alojada en la BD cada tres segundos, la convierte en base64 y la envía a la BD.
- RN: script que carga los modelos(ML model, scaler dimensional model, standard scaler) y contiene una función que ejecuta la predicción al pasar por los tres modelos.
- FUZZY: script que genera el valor que se debe aplicar de acuerdo al promedio de luminosidad anterior.

Archivos:

- Modelos: contiene dos funciones
 - *RNmodel*: modelo correspondiente a la red neuronal(sklearn MLPregresor).
 - *dim_scaler*: modelo de reducción dimensional(sklearn PCA decomposition).
 - *std_scaler*: modelo de normalización(sklearn StandardScaler).
- Variables en ram:
 - *actuadores*: archivo JSON con el estado que tiene cada actuador en la base de datos.
 - *estado*: valor del estado de control(manual, automático, emergencia) que se encuentre en la base de datos.
 - *last1Lum_sensor*: el último promedio de luminosidad medido.
 - *last6_sensor*: archivo JSON con el registro de los últimos 6 valores medidos en la pecera.
 - *ciclos_pred*: archivo JSON correspondientes a los porcentajes de trabajo calculados por el control predictivo.
 - *Captura.jpg*: imagen correspondiente a la foto capturada por la cámara.
 - *statusInternet*: valor correspondiente al estado del internet

Para mayor detalle en cuanto a código y archivos de configuración para servicios, consultar la documentación del sistema de gestión 7.1

3.6.3. Resultados

Después de implementar el sistema de gestión bajo la arquitectura de servicios, se obtuvieron los siguientes resultados.

Uso de la CPU: 6 %							Memoria: 321 MB de 870 MB usados		
Orden	Usuario	% CPU	RSS	Memoria virtual	PID	Estado	Prioridad		
python3	acuaponito	0%	8,3 MB	32,9 MB	571	R			
python3	acuaponito	0%	28,6 MB	47,1 MB	28725	S			
python3	acuaponito	0%	28,7 MB	47,1 MB	28724	S			
python3	acuaponito	0%	29,6 MB	47,1 MB	28723	S			
python3	acuaponito	0%	30,1 MB	48,2 MB	28722	S			
python3	acuaponito	0%	29,8 MB	47,6 MB	28721	S			
python3	acuaponito	0%	29,8 MB	47,7 MB	575	S			
python3	acuaponito	0%	12,6 MB	30,0 MB	573	S			
python3	acuaponito	0%	28,5 MB	47,1 MB	572	S			
python3	acuaponito	0%	8,0 MB	14,9 MB	570	S			

Figura 3.95: Resultados de consumo del sistema de gestión

Cuantitativo:

- Bajo consumo de CPU pues los códigos se ejecutan cuando se necesitan y los listener funcionan con una frecuencia de 1hz.
- Resident Set Size(RSS): 234 MB.
- Virtual Memory Size(VMZ): 416.7 MB.

Cualitativo:

- La arquitectura de servicios, demostró la facilidad para detectar problemas, como se puede ver en el apartado de problemas ([hyperlink](#)).
- Demostró facilidad para agregar nuevas funcionalidades cuando fue necesario (especificar cuales).
- La arquitectura de servicios es resiliente a fallos, pues el módulo principal solo lee variables en ram y pública en mqtt bajo comandos de linux lo que permite que independientemente de si algún servicio falla, este seguirá funcionando con normalidad.

Para concluir en comparación con el monolito, se detectaron menos fallos a la hora de almacenar en la base de datos, en el funcionamiento continuo se logró identificar algunos errores y su motivo. Es decir, con la arquitectura de servicios la solución de estos fue fácil, pues de manera sencilla se puede identificar cuál servicio está fallando tanto por inferencia como consultando el estado de cada uno. Otra ventaja, es que los servicios se reinician automáticamente en caso de que el script levante un error.

3.7. Registro componentes vivos

Dado que el desarrollo del proyecto gira entorno a la automatización y control de un cultivo acuapónico, se hace relevante sintetizar tanto los hallazgos como los inconvenientes que se tuvieron con los componentes vivos involucrados (plantas y peces)

3.7.1. Peces

En este apartado se hablará acerca de los componentes acuáticos del componente acuícola.

Crecimiento:

A continuación el registro del crecimiento de los peces. Inicialmente se trajeron 23 alevinos, los cuales fueron facilitados por Andrés Tobar, vendedor de alevinos de tilapia a gran escala.

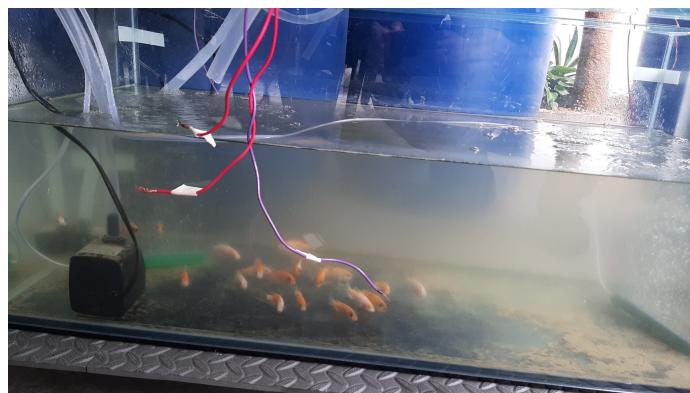


Figura 3.96: Peces iniciales

Etapa juvenil:

En la etapa juvenil, se les dio 4 veces menos alimento que el necesario para engorde máximo. Por lo tanto la tasa de crecimiento no es la misma que en un cultivo acuícola comercial o de producción masiva.



Figura 3.97: Muestreo tilapias etapa juvenil

Fecha: 20 septiembre. Peso estimado: 5-20gr. Tipo de comida: harina de palma.

Etapa adulta:

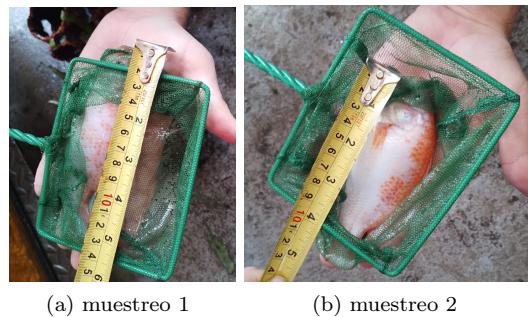


Figura 3.98: Muestreo tilapia etapa adulta

Fecha: 23 enero. Peso estimado: 50-70gr. Tipo de comida: Proteína granulada.

Tasa de mortalidad tilapia

En este apartado se hace el registro de las tilapia muertas y sus posibles causas.

Peces totales: 23 Peces actuales: 9 Peces muertos: 14

Fechas de muerte: agosto hasta finales de septiembre

Razones: los peces empezaron como alevinos, los cuales son muy susceptibles a los parámetros del agua y del entorno, en este caso la cepa de bacterias que permite la estabilidad del sistema tardó alrededor de 1 mes en estabilizarse. Además de las bacterias y hongos que pudieron obtener.

Las razones de muerte se obtuvieron en base a [74] y la consulta con un experto de acuicultura.

Especimen 1 y 2



Figura 3.99: Fallecidos 1 y 2

- *Fecha del descenso:* 21 septiembre.
- *Razón:* se estima que por estrés, puesto que llevaban apenas 2 días en el acuario, investigando las razones, es muy común que en esta etapa mueran si no tienen lugares donde esconderse, puesto que esto los estresa. Se fundamenta también en el comportamiento errático que se notó en algunos de ellos, lo cual son síntomas de estrés.
- *Solución:* se generó un entorno más adecuado para ellos, con lugares donde esconderse y plantas.

Especimen 3

Figura 3.100: Fallecido 3

- *Fecha del descenso:* 28 septiembre
- *Razón:* Hongos, puesto que se notaba a un costado una mancha algodonosa.
- *Solución:* Antifúngico para acuario y cambio de 50

Especimen 4

Figura 3.101: Fallecido 4

- *Fecha del descenso:* 1 octubre.
- *Razón:* desconocido, se encontró 2 días después de su fallecimiento, no se puede estimar causa de muerte.

Especimen 5

Figura 3.102: Fallecido 5

- *Fecha del descenso:* 4 octubre
- *Razón:* causa desconocida, sin elementos identificables. se estima por problemas de parámetros acuáticos.

Especimen 6

Figura 3.103: Fallecido 6

- *Fecha del descenso:* 6 octubre
- *Razón:* intoxicación por amoniaco pues se había evidenciado nado errático y convulsiones en varios peces.
- *Solución:* cambio parcial del agua.

Especimen 7

Figura 3.104: Fallecido 7

- *Fecha del descenso:* 7 octubre
- *Razón:* intoxicación por amoniaco pues se había evidenciado nado errático y convulsiones en varios peces.
- *Solución:* cambio parcial del agua.

Especimen 8

Figura 3.105: Fallecido 8

- *Fecha del descenso:* 8 octubre
- *Razón:* intoxicación por amoniaco pues se había evidenciado nado errático y convulsiones en varios peces.
- *Solución:* cambio parcial del agua.

Especimen 9

Figura 3.106: Fallecido 9

- *Fecha del descenso:* 10 octubre
- *Razón:* intoxicación por nitrito, pues se evidencio comportamiento letárgico y convulsiones.
- *Solución:* cambio parcial del agua.

Especimen 10,11,12 y 13

No se tienen registros visuales

- *Fecha del descenso:* 13-15 de octubre
- *Razón:* intoxicación por nitrito, pues se evidenció comportamiento letárgico y convulsiones.
- *Solución:* Se siguió el consejo de un experto y se empezó a agregar sal al acuario, logrando así que el exceso de nitrito no fuera mortal, mientras se estabilizan los filtros biológicos.

Especimen 14

Figura 3.107: Fallecido 14

- *Fecha del descenso:* Desconocida
- *Fecha de levantamiento:* 20 noviembre
- *Razón:* desconocida, puesto que fue encontrado en un estado cadavérico, con lo cual había ya pasado más de 3 semanas de su descenso como mínimo. No se identificó ninguna variación anormal en la calidad del agua, debido a que para estas fechas el filtro biológico ya estaba establecido y era más que suficiente para manejar la descomposición de un alevín sin perjudicar de forma nociva la calidad del agua.

Peces adicionales

En el acuario contribuyeron al equilibrio del sistema, pues debido a que existía un exceso de nitrato, crecían muchas algas, por eso se insertaron peces limpiadores de 2 tipos.

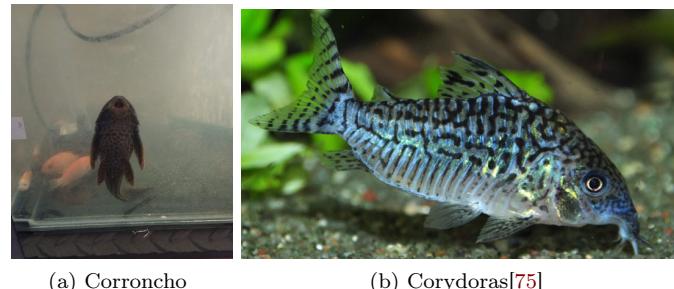


Figura 3.108: Peces adicionales

Corroncho

- *Cantidad:* 1
- *Función principal:* limpiar algas en paredes del acuario.

Corydoras

- *Cantidad:* 6
- *Función principal:* limpiar el fondo del acuario y elementos dentro de él, entre su dieta se encuentra comida sedimentada y algas.

3.7.2. Plantas

Aunque durante la elección de plantas a emplear (mas información en: [Elección de plantas](#)) se eligió la albahaca como especie a cultivar, los estudiantes compraron también semillas de lechuga con el fin de tener un cultivo más diverso. Una vez se adquirieron las semillas, se realizó una germinación de las mismas en el lugar de residencia de uno de los estudiantes. Una vez las plantas de ambas especies desarrollaron las raíces suficientes para ser trasplantadas, se realizó la siembra en el prototipo.

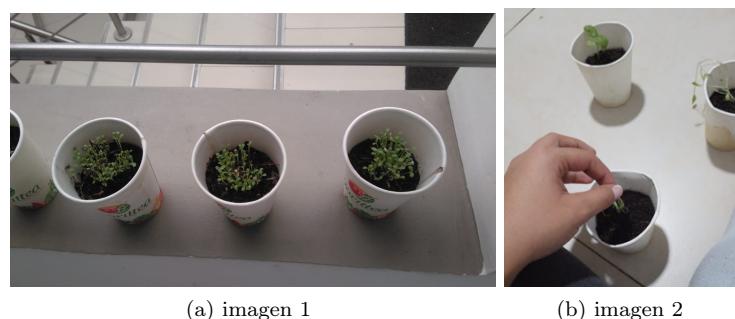


Figura 3.109: Proceso de germinado

Durante la primera etapa de crecimiento de las plantas ya en el prototipo, la albahaca se adaptó sin problemas sin embargo, la lechuga se marchitó. Consultando con la ingeniera agronoma de la universidad, los estudiantes se dieron cuenta que esto sucedio porque el tipo de lechuga no era el convencional y requería un mayor tiempo antes de ser trasplantada.



Figura 3.110: Plantas en el cultivo

3.8. Problemas

Mal diseño de tubería: La primera versión de la tubería usaba un adaptador de tubo en “Y” para llevar el agua a cada tanque, sin embargo, la salida de agua no era uniforme y se presentaron problemas de presión. Como solución se optó por rediseñar la distribución de agua en forma de cascada.

Electroválvulas equivocadas(presión de las electrovalvulas): al momento de comprar las electroválvulas no se tuvo en cuenta la presión mínima necesaria para su funcionamiento dentro de los criterios de selección, y aunque en realidad era muy baja, la presión del agua circulada por el cultivo no fue la suficiente para superar ese umbral. La solución al inconveniente fue reemplazar las electroválvulas por unas con presión mínima 0.

Código de automatización: debido a que el código se diseñó en forma monolítica, se presentaron varios problemas a la hora de garantizar la confiabilidad y añadir cosas nuevas, por eso se optó por desacoplar el sistema de automatización en 8 servicios independientes que se comunican vía MQTT o archivos en ram.

Feeder incorrecto para la comida en polvo: se diseñó un dosificador de alimento inapropiado para el tipo de comida dosificada durante la primera etapa de vida de los peces. El alimento adecuado es en polvo y con el diseño inicial realizado, el alimento se quedaba atascado. La solución fue diseñar un nuevo dosificador el cual funcionara por caída. El primer diseño tenía una capacidad mayor para almacenar alimento y se diseñó así con el fin de garantizar mayor autonomía, es decir, menos supervisión e intervención humana para su funcionamiento básico. El diseño actual garantiza 30 dosis de alimento.

Mala conexión a la red Wifi: la red wi fi de la Universidad tiene cobertura hasta el sitio en el cual se implementó el cultivo, sin embargo, la potencia de la señal no era la suficiente, ni tampoco era estable como para garantizar el funcionamiento correcto de las peticiones de la Raspberry a la Base de datos. Como solución se empleó un repetidor Wifi.

Cintas de prueba de colorimetría para variables pH, amoniaco, nitrito y nitrato no funcionaron: aunque con los sensores empleados se obtienen los valores de varias variables importantes para el cultivo, hay variables críticas durante el ciclo de nitrato que no estaban allí contempladas ya que se miden por prueba química. Dichas variables son la base del bienestar del cultivo (tanto para los peces como para las plantas) y necesitaban ser medidas para comprobar su estabilidad, especialmente en la primera etapa de implementación en la que las plantas y peces se encontraban en crecimiento y adaptación. Para medirlas se compraron unas cintas de prueba de colorimetría, sin embargo, estas no funcionaron y aunque se realizaron muchas pruebas no arrojaron resultado alguno. La solución fue comprar un kit de medición más avanzado el cual incluía sustancias químicas de prueba con las cuales se obtuvieron resultados más precisos que permitieron tomar decisiones importantes para reducir el número de peces muertos durante el proceso de adaptación.

Filtración en macetas: en los flancos de las macetas empezó a ocurrir una filtración, la solución fue usar arandelas metálicas para presionar con fuerza uniforme los empaques.

Los peces se murieron de estrés al inicio : dada la falta de experiencia por parte de los estudiantes respecto al cuidado y necesidades de los peces al ser ingresados en una pecera, durante la etapa de adaptación se murieron 2 peces “sin razón aparente”. Al consultar con el proveedor de peces y consultar en Internet, se llegó a la conclusión de que los peces necesitaban espacios en los cuales esconderse como respuesta ante situaciones de alerta (tales como la presencia y movimiento de personas muy cerca), al igual que se necesitaba la presencia de plantas acuáticas. Como solución se compraron implementos decorativos que cumplieron la función de refugio para los peces y se adquirieron plantas especiales para pecera.

Muerte de peces por parásitos, bacterias, calidad del agua: durante la etapa de adaptación de los

peces, murieron 13 por diferentes enfermedades ocasionadas por la falta de regulación de parásitos, bacterias y el control de la calidad del agua. Nuevamente por desconocimiento de los estudiantes, se estaba realizando cambio de agua con mayor frecuencia de la ideal. Como solución nos contactamos con el proveedor el cual nos dio indicaciones para evitar ese tipo de enfermedades. Las variables empezaron a estabilizarse

Filtros físicos no funcionaron: al inicio se diseñaron unos filtros físicos con mallas de acero con el fin de retener las heces y otros posibles residuos sólidos que estuviesen en el agua. A pesar que se pensó en un filtro con dos capas de malla (una más delgada que la otra para garantizar retención total de sólidos) no fue suficiente y el ancho de los agujeros de la malla no permitía la retención de sólidos, además, se afectó la velocidad del flujo de agua en el cultivo. Como solución se optó por utilizar espuma para filtros en el desague de cada maceta, un material delgado que retiene los sólidos y no afecta el flujo del agua.

Comunicación Raspberry-ESP32: en un principio se diseñó el sistema para que se comunicaran vía UART, pero ya instalado, no fue muy confiable debido al ruido y la longitud de los cables, por lo cual se optó por usar MQTT con la Raspberry como Broker.

Robo de celular: en el periodo de vacaciones de diciembre ocurrió un incidente en donde el celular que usábamos como hotspot para transmitir datos fue hurtado, después de llamar atención con seguridad el celular apareció de nuevo pero golpeado y con la pantalla rota, debido a esto nos tocó comprar otro celular de nuestro bolsillo, mandar a construir una caja de seguridad e instalarla.



Figura 3.111: caja de seguridad

Técnica de control moderna con fallas de conectividad: debido a que la técnica de control predictiva necesita de datos traídos de la base de datos, cuando no hay internet el sistema deja de funcionar, por eso se implementó un servicio encargado de testear la conexión a internet y en caso de no tenerla activar el control de respaldo, osea el on/off.

CAPÍTULO 4

Resultados del proyecto

En este capítulo se busca sintetizar los resultados obtenidos teniendo en cuenta los objetivos planteados inicialmente.

Cumplimiento del objetivo general

Se ha logrado diseñar un sistema de automatización y control completo para un cultivo acuaponico en entornos urbanos. Alcanzando un nivel de la escala de maduración tecnológica TRL 7 [76], dado que es un prototipo el cual se validó en un entorno operativo relevante, tiene documentación, es claro el proceso de construcción, diseño y procesos de mejora. El prototipo completa casi 6 meses de funcionamiento, periodo en el cual se han validado y mejorado las funcionalidades descritas durante todo el documento: control, visualización y monitoreo remoto, control programado y control automático.

Es importante resaltar la importancia de todos los desarrollos que hacen posible dichas funcionalidades y que hicieron que el alcance del prototipo construido fuese mayor que el planteado en un principio. Por ejemplo, la página web construida permitió el acceso a las funcionalidades remotas, por su parte el sistema de gestión basado en servicios comunicados vía MQTT ha demostrado ser una solución robusta, mantenible y escalable, permitiendo la fácil integración de módulos externos como una esp32 o un celular.

A su vez, el sistema de automatización utiliza una red local permitiendo la comunicación entre los diferentes componentes del sistema y siendo capaz de detectar el estado de la conectividad a la red. Si la conectividad es exitosa, aplica la técnica de control predictiva para controlar las variables temperatura del agua y luminosidad en el sistema mediante acciones de control de circulación, oxigenación, aireación e iluminación. En caso de falla, ejecuta de forma obligatoria las combinaciones de control on/off definidas en el archivo de reserva.

Finalmente, se pudo validar la efectividad de la implementación de un control moderno híbrido que combina el control predictivo y el control difuso con el fin de aprovechar las ventajas que cada técnica puede ofrecer, permitiendo que el controlador se adapte a las condiciones cambiantes del cultivo mientras maneja la incertidumbre y las perturbaciones.

Cumplimiento del objetivo específico 1

Se logró obtener una configuración de cultivo acuapónico adecuada para entornos urbanos, estable y eficaz. Esta configuración utiliza suelo de sustratos, una técnica que ha demostrado ser altamente beneficiosa para el crecimiento y desarrollo de las raíces de las plantas, lo que se traduce en un aumento en la calidad de los cultivos. Además, el suelo de sustratos funciona como un filtro complementario en el sistema acuapónico, reduciendo los niveles de amoníaco, nitrato y nitrito en el agua, y mejorando la calidad del agua para los peces. Estos beneficios del suelo de sustratos en cultivos acuapónicos se han documentado en [Elección de sustrato](#).

Cumplimiento del objetivo específico 2

Se diseñó una estructura modular la cual fue modelada en 3D con ayuda de un software CAD. La estructura modular por niveles contiene el cultivo acuaponico y los demás componentes del sistema de automatización, y aunque se hicieron algunos ajustes, se conservó la mayor parte del diseño original, demostrando que fue una definición funcional que se adaptó a diferentes contratiempos a lo largo del proyecto.

Cabe destacar que la estructura física fue diseñada y construida completamente por los estudiantes, quienes conscientes de las limitaciones de conocimientos y materiales disponibles, lograron no solo un diseño sino también una implementación exitosa.

Cumplimiento del objetivo específico 3

Se logró cumplir con el objetivo de implementar un prototipo del sistema acuapónico utilizando técnicas de prototipado. Se generó un sistema de automatización completo para el cultivo, el cual permitió tomar datos, supervisar el estado del sistema, configurar el estado de los elementos activos y graduar el comportamiento del cultivo de acuerdo con las observaciones experimentales. Gracias a esto, se obtuvieron los datos necesarios para implementar una técnica de control predictiva basados en redes neuronales.

Cumplimiento del objetivo específico 4

Se logró implementar con éxito un sistema de control predictivo híbrido MPC (Model Predictive Control) con Fuzzy, que permitió controlar de forma indirecta la luminosidad y la temperatura del sistema acuapónico. Los resultados obtenidos fueron muy positivos, demostrando la validez de esta técnica para ajustar los parámetros del sistema. Además, la red neuronal utilizada para hacer predicciones mostró un buen nivel de precisión, con un R² del 79 %. Se verificó que la calidad del agua se mantuvo en niveles óptimos y que el bienestar de los peces fue adecuado, lo que evidencia la eficacia de la técnica de control implementada en el equilibrio de las interacciones entre peces, plantas y bacterias en el cultivo acuapónico.

Cumplimiento del objetivo específico 5

Se demostró la utilidad del sistema de automatización diseñado para el cultivo acuapónico, ya que su ausencia habría limitado significativamente el desarrollo del proyecto pues los estudiantes, por cuestiones laborales, solo tenían la posibilidad de ir dos veces a la semana a supervisar el cultivo de forma presencial. La capacidad de supervisión, control y monitoreo remoto lograda, así como la dosificación automática de alimento y la configuración on/off de los elementos de acción según su ciclo, fueron fundamentales para llevar a cabo el proyecto con éxito.

Desde la perspectiva de control, se logró una reducción del consumo energético del 33 % con la implementación de la técnica de control moderna y además una reducción del consumo energético del 17 % con la implementación de un control on/off que, de acuerdo a un análisis empírico, garantiza las condiciones básicas para el bienestar del cultivo. Se mantuvo siempre la calidad del agua y el bienestar de los componentes biológicos durante las evaluaciones del desempeño del cultivo con y sin el sistema de automatización.

Logros adicionales: Además de alcanzar los objetivos previstos, también se logró desarrollar funcionalidades adicionales que no habían sido contempladas al principio. Los desafíos que afrontaron durante el proyecto llevaron a los autores a crear un sistema que integra componentes web, IoT, sistemas de gestión en Linux, Evaluacion de modelos con redes neuronales, electrónica y control. Desde una perspectiva de autonomía, se logró alcanzar un nivel muy alto gracias a funcionalidades como la supervisión remota, el monitoreo remoto y el control remoto, que no habían sido planteadas directamente como parte de los objetivos. En cuanto a la dosificación, se diseñó un dispositivo que contiene hasta 30 dosis de comida, lo que permite alimentar a los peces entre 5-10 días, dependiendo de la frecuencia de dosificación diaria. La principal razón por la que es necesaria la supervisión es por el lavado de los filtros, ya que estos no soportan más de 5 días sin limpieza.

CAPÍTULO 5

Recursos

En este capítulo se detallarán los costos técnicos y humanos asociados con el desarrollo del trabajo de grado. Los costos humanos hacen referencia al tiempo invertido por el docente que dirigió el proyecto y por los estudiantes que lo desarrollaron, mientras que los costos técnicos se dividen en dos partes:

- Materiales financiados por la universidad: el desarrollo de este trabajo de grado se realizó con el apoyo financiero de la facultad de Ingeniería y Ciencias de la Pontificia Universidad Javeriana Cali. Por acuerdo entre la facultad y los estudiantes, el prototipo construido se quedará en la Universidad en el lugar implementado y será puesto a disposición de grupos de investigación del área de ciencias naturales y ciencias de la computación para futuros desarrollos y/o mejoras.
- Materiales financiados por los estudiantes: según el acuerdo realizado con la Universidad, los estudiantes igualaron el monto aportado por la misma en la adquisición de los materiales restantes. Dentro de los recursos técnicos que se detallarán, están incluidos los materiales empleados para la construcción y funcionamiento del prototipo en todas sus etapas y componentes básicos: estructura física, componentes eléctricos y electrónicos, gastos de red, componentes biológicos y químicos.

5.1. Costos humanos

A continuación se presentarán los costos humanos asociados con el desarrollo del trabajo de grado. El tiempo invertido por el docente y los estudiantes se medirá en horas y se calculará a partir del salario/hora del docente y del valor del tiempo de los estudiantes. Se considerará el tiempo empleado para reuniones, revisión y corrección del trabajo, investigación, diseño, experimentación e implementación.

Persona	Cargo	Cantidad de horas	Costo por hora	Costo total
Juan Manuel Nogales Viedman	Director del proyecto	52	\$ 50,000	\$ 2,600,000
Karen Yissel Marín Franco	Estudiante de Ingeniería Electrónica	500	\$ 10,000	\$ 5,000,000
Luis Fernando Riveros Orozco	Estudiante de Ingeniería Electrónica	500	\$ 10,000	\$ 5,000,000
Total				\$ 12,600,000

Figura 5.1: Tabla resumen de costos humanos

5.2. Costos técnicos

A continuación se presentarán los costos técnicos asociados con el desarrollo del trabajo de grado.

Costos técnicos financiados u ofrecidos por la Universidad

Concepto	Detalle	Costo total
Estructura eléctrica y electrónica	Sensores	\$ 1,196,000.0
	Actuadores	\$ 290,000.0
	Microcontroladores	\$ 52,400.0
	Componentes adicionales	\$ 142,000.0
Total		\$ 1,680,400.0

Figura 5.2: Tabla resumen de elementos del prototipo financiados por la universidad

Además de el apoyo económico brindado por la Universidad para los elementos en la figura 5.2, se usaron otros recursos los cuales estan en la siguiente tabla.

Responsable	Laboratorio y recursos
Isabella Tello	Laboratorio de Biofertilizantes - Espacio de implementación, agua, electricidad
Viviana Almeida	Laboratorio de materiales - Maquinaria de corte y perforación de hierro
Bleider Arizala	Centro de Automatización de procesos - Impresión 3D, cable

Figura 5.3: Tabla de otros recursos facilitados por la Universidad

Costos técnicos financiados u ofrecidos por los estudiantes

Concepto	Detalle	Costo total
Estructura física	Hierro, tornillos, madera, amarras	\$ 460,000
	Macetas, pecera, accesorios para acuario	\$ 340,000
	Tubería, filtros	\$ 140,000
Estructura eléctrica y electrónica	Sensores	\$ 280,000
	Cámaras	\$ 163,500
	Actuadores	\$ 553,000
	Circuitos y otros	\$ 90,000
Red	Pago de plan de datos (desde diciembre hasta marzo)	\$ 75,000
	Repetidor de Wi-fi	\$ 70,000
	Celular (robado)	\$ 250,000
Componentes biológicos	Peces (comida)	\$ 120,000
	Bacterias	\$ 30,000
	Sustrato	\$ 88,000
	Plantas	\$ 10,000
Químicos	Elevadores y reductores de pH, anticloro, antiparasitario, soda cáustica	\$ 135,000
	Kit de medición de pH, amoniaco, nitrógeno y nitrato API	\$ 170,000
Total		\$ 2,974,500

Figura 5.4: Tabla resumen de elementos del prototipo financiados por los estudiantes

En el prototipo también hay elementos que, si bien no son financiados por ninguna de las partes, son utilizados en calidad de préstamo

Elemento	Propietario
Celular (respuesta de robo)	Estudiantes autores - Luis Riveros y Karen Marín
Raspberry Pi 3	Director del proyecto de grado - Juan Manuel Nogales
Protoboard	Laboratorio de electrónica - Javeriana Cali

Figura 5.5: Tabla de elementos empleados en el prototipo que son prestados

Conclusiones y trabajos futuros

6.1. Trabajos futuros

Aunque el proyecto arrojó resultados importantes, es posible mejorarlo desde sus distintos componentes. A continuación, se listan algunas mejoras que los estudiantes consideran viables para potenciar el prototipo actual:

6.1.1. Mejora de componentes eléctricos y electrónicos

Como mejora principal, se podría mejorar la caja negra, reemplazandola por una menos artesanal y garantizando un mejor manejo del cableado de los componentes que están allí dentro, de esta manera se tendría mayor orden y facilidad para continuar escalando el prototipo.

Otra mejora significativa sería perfeccionar el diseño circuital y la técnica de impresión, pues si se rediseñaran las placas y los módulos de expansión, estos se podrían integrar de manera más compacta. Por su parte, cambiar la técnica de impresión por una más profesional (por ejemplo mandarlos a imprimir en una fábrica de circuitos impresos bajo pedido) evitaría posibles incidentes por contacto entre componentes.

Con la configuración actual del prototipo, es posible agregar más lámparas sin necesidad de realizar cableado extra, pues el cableado que se realizó para los humidificadores (los cuales no se emplean actualmente) es completamente funcional. Se proponen que sean lámparas pues el control implementado permitiría que estas fuesen reguladas para fortalecer la fotosíntesis.

De igual forma, teniendo en cuenta los elementos que tiene el proyecto es posible adecuar un componente de reingreso de agua usando el tanque de mediciones, los sensores de nivel, las bombas peristálticas para dosificar el anticloro y antiparasitario al agua nueva, puesto que el sistema de válvulas para el tanque de mediciones está instalado y es funcional. Además la arquitectura de la solución tiene previsto el uso de hasta 4 componentes DC adicionales y 2 AC.

También, se podrían incorporar más sensores con el fin de obtener más información del sistema y adicionar funcionalidades, como por ejemplo, sensores de humedad, temperatura externa o sensores de nivel que son componentes con los que ya se cuenta pero por los problemas mencionados en este documento no fue completamente exitosa su implementación.

Por último, si se mejorara la arquitectura eléctrica y electrónica, sería posible solucionar los inconvenientes con el sistema de seguridad en cuanto a la medición de los sensores de caudal ya instalados los cuales, junto a los sensores de nivel, podrían permitir una solución más robusta desde el punto de vista de la toma de acciones de seguridad del sistema.

6.1.2. Mejora de página web

De forma inmediata, se podrían ampliar las soluciones o acciones que actualmente ofrece la página. Por ejemplo, podrían añadirse funcionalidades bastante útiles como la dosificación de alimento para los peces o accionar el sensado inmediato de las variables desde la página. Aunque esto es posible gracias al sistema de gestión implementado, no es una facilidad a la que se pueda acceder desde la página web.

Yendo más allá, sería posible mejorar la arquitectura web de la solución puesto que actualmente funciona en un paradigma backendless y se podría migrar a uno en donde se use un servidor backend para una comunicación más directa con el montaje físico. Esto permitiría que fácilmente se pueda hacer una implementación de protocolos de transmisión de imagen e implementar más cámaras, al igual que aplicar técnicas de autenticación para el inicio de sesión en la página y el control del cultivo.

Si se mejorara la arquitectura, sería posible también la comunicación directa con la shell de la raspberry desde la página, pues actualmente existe un componente de port forwarding validado ante una VM de azure la cual se podría usar como base para ejecutar la shell remota desde la página a través del backend. Lo anterior también permitiría que en la página se incluya una nueva pestaña en donde se pueda hacer una administración y supervisión de la mensajería de mqtt.

6.1.3. Mejora de control

Desde el punto de vista de control se podrían realizar mejoras o trabajos futuros que relacionan al sensado y a la técnica de control empleada.

Si se realizara el sensado de más variables, sería posible considerar la implementación de un control indirecto para variables críticas para el sistema como amoniaco, nitrito o nitrato, en donde los elementos de acción podrían incluir acciones como la modificación de la tasa de dosificación diaria o la cantidad de alimento de acuerdo al comportamiento del sistema. Esto sería bastante valioso pues en la literatura no se encontraron avances relacionados a este tema.

Adicionalmente, se podría incorporar una técnica de control predictiva más avanzada usando una red neuronal de aprendizaje por refuerzo que aprenda en tiempo real o alguna otra arquitectura de redes neuronales. De esta manera, el controlador aprendería de manera autónoma o mejor a través de la retroalimentación que reciba del entorno.

6.1.4. Otras mejoras

Desde un punto de vista biológico sería valioso realizar un análisis más detallado del comportamiento y evolución de los componentes vivos tales como bacterias, peces y plantas, concluyendo respecto a su bienestar y el impacto de la técnica de control moderna sobre las interacciones de las variables y los componentes vivos del cultivo. Además, desde el punto de vista de la electrónica, se podrían usar placas de control o un microprocesador mas cercano a lo usado en la industria, con mayor resistencia a fallos y a condiciones ambientales.

6.2. Conclusiones

Después de llevar a cabo este proyecto, se pueden sacar varias conclusiones relevantes relacionadas con el eje principal del trabajo de grado: el diseño e implementación de un sistema de automatización y control.

- En primer lugar, la implementación de un sistema de control híbrido (predictivo/difuso) permitió obtener resultados positivos en términos de control de la luminosidad y la temperatura. Esto indica que el planteamiento del modelado y funcionamiento del sistema a partir de ciclos fue un aspecto clave para lograr una mejor gestión del cultivo acuapónico.
- Se demostró que se puede hacer un control indirecto de la variable temperatura del agua mediante el entrenamiento de una red neuronal en una arquitectura de control predictivo tipo MPC híbrido con Fuzzy.
- El desarrollo de un sistema de gestión robusto y escalable garantizó el correcto funcionamiento del sistema de automatización y control, permitiendo responder de manera efectiva ante posibles inconvenientes, logrando generar funciones que se integran fácilmente de forma paralela a la arquitectura de servicios.
- Se demostró que las redes neuronales con el nivel de abstracción pertinente y la cantidad de datos adecuada, son una herramienta eficaz a la hora de generar modelos de predicción para sistemas dinámicos y con relaciones entre variables tan complejas.
- El diseño de una arquitectura web simple pero escalable permitió la integración de diferentes componentes del sistema aumentando la autonomía del mismo y facilitando acciones de control remotas, lo que redujo la frecuencia de visitas presenciales obligatorias al cultivo y además permitió obtener y administrar los datos usados para entrenar la red neuronal.
- La implementación del sistema de automatización y control ha demostrado ser altamente eficiente en términos energéticos. En comparación con la técnica de control moderna, se ha logrado reducir el consumo energético en un 33 %, y con la funcionalidad de configuración acorde a la experticia, se ha obtenido una reducción del 17 %. Estos resultados demuestran la importancia de implementar soluciones tecnológicas en la agricultura para mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental.
- En un contexto urbano donde el tiempo, el espacio y la eficiencia energética son recursos escasos, el sistema de automatización y control para un cultivo acuapónico desarrollado en este proyecto demuestra ser una alternativa real que aborda estos problemas de manera integral.

Bibliografía

- [1] G. P. S. Cáceres, V. M. F. Cabanás, J. L. Eguíbar, and L. Pérez-Urrestarazu, "Attitudes and willingness to pay for aquaponic products in spain and latin america," *International Journal of Gastronomy and Food Science*, vol. 24, no. 100350, July 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100350>
- [2] A. Aja and N. Morán. (2011) Historia de los huertos urbanos. de los huertos para pobres a los programas de agricultura urbana ecológica", universidad politécnica de madrid (upm). [Online]. Available: http://oa.upm.es/12201/1/INVE_MEM_2011_96634.pdf
- [3] D. S. P. M. Hernández Hernández and A. M. Gil, "Auge y caída de nuevas naturalezas urbanas: plantas ornamentales y expansión turístico-residencial en alicante," *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, no. 68, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.21138/bage.1856>
- [4] L. Pedraza, "La biodepuración del aire con plantas purificantes y ornamentales, como alternativa ambiental en el siglo xxi," *Monografía descriptiva, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá*, 2015. [Online]. Available: <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/3767>
- [5] Y. Y. C. Loayza, "Eficiencia de las plantas ornamentales aptenia cordifolia y helxine soleirolii como barrera para la reducción de ruido 2018," Trabajo de grado, Universidad Cesar Vallejo, Lima, 2018. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/36358>
- [6] R. Martínez, "La acuaponía como alternativa de producción agropecuaria sostenible ¿una posibilidad para tener en casa?" *Revista de divulgación científica de nutrición ambiental y seguridad alimentaria de la Universidad de Guanajuato*, vol. 2, no. 15, October 2019. [Online]. Available: <https://www.ugto.mx/redicinaysa/images/Revistas2013/redicinaysa-sept-oct-2013-universidad-guanajuato.pdf>
- [7] L. L. A. de la Luz, "Agricultura urbana y suburbana: Vía para cultivar plantas medicinales," *Agrotecnia de Cuba*, vol. 41, no. 2, pp. 1–12, 2017. [Online]. Available: <https://www.grupoagricoladecuba.gag.cu/media/Agrotecnia/pdf/2017/2/1.pdf>
- [8] C. Somerville, M. Cohen, E. P. A. Stankus, and A. Lovatelli, "Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming," *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*, no. 589, p. 262, 2014. [Online]. Available: <https://www.fao.org/3/i4021e/i4021e.pdf>
- [9] A. M. et al, "Human health implications of organic food and organic agriculture: a comprehensive review," *Environmental Health*, vol. 16, no. 1, October 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0315-4>
- [10] M. s. Lee, J. Lee, B.-J. Park, and Y. Miyazaki, "Interaction with indoor plants may reduce psychological and physiological stress by suppressing autonomic nervous system activity in young adults: a randomized crossover study," *Journal of Physiological Anthropology*, vol. 34, no. 1, April 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s40101-015-0060-8>
- [11] S. M. C. Ramírez, A. F. Barbieri, and J. I. R. Rigotti, "La migración interna en colombia en la transición al siglo xxi. una aproximación multiescalar," *Revista Latinoamericana de Población*, vol. 12, no. 22, July 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.31406/n22a4>
- [12] F. Toledo, "Agricultura urbana, periurbana y rural del siglo xxi," Extended abstract of doctoral thesis, UCU, UFLO, UAI, Uruguay, 2018.

- [13] C. Lladó and F. Izquierdo, "La escasez de agua como amenaza global," *UAB*, 2019. [Online]. Available: https://1library.co/document/yer0x5rq-la-escasez-de-agua-como-amenaza-global.html?utm_source=seo_title_list
- [14] C. Hitaj, B. Cooke, A. Carlson, G. Ferreira, and C. Greene, "Usda ers - growing organic demand provides high-value opportunities for many types of producers," *USDA ERS - Home*, 2017. [Online]. Available: <https://www.ers.usda.gov/amber-waves/2017/januaryfebruary/growing-organic-demand-provides-high-value-opportunities-for-many-types-of-producers>
- [15] I. C. y. l. C. Organización de las Naciones Unidas para la Educación. Hecho 2: La agricultura es, con diferencia, el mayor consumidor de agua dulce. [Online]. Available: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact2-agricultural-use/>
- [16] "La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050," in *Como alimentar al mundo 2050*, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Roma: Foro de expertos de alto nivel, October 2019. [Online]. Available: https://www.fao.org/fileadmin/templates/wfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf
- [17] A. AlShrouf, "Hydroponics, aeroponic and aquaponic as compared with conventional farming," *ASRJETS*, vol. 27, no. 1, pp. 247–265, January 2017. [Online]. Available: https://asrjestsjournal.org/index.php/American_Scientific_Journal/article/view/2543
- [18] F. I. Hai, C. Visvanathan, and R. Boopathy, Eds., *Sustainable Aquaculture*, 1st ed., ser. Applied Environmental Science and Engineering for a Sustainable Future. Springer, Cham, 2018, vol. 7, no. 327. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-73257-2>
- [19] Y. Wei, W. Li, D. An, D. Li, Y. Jiao, and Q. Wei, "Equipment and intelligent control system in aquaponics: A review," *IEEE*, vol. 7, pp. 169 306 – 169 326, November 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2953491.
- [20] A. R. Chaudhry and V. P. Mishra, "A comparative analysis of vertical agriculture systems in residential apartments," in *2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, 2019, pp. 1–5.
- [21] M. Costache, D. Sebastian Cristea, S.-M. Petrea, M. Neculita, M. M. T. Rahoveanu, I.-A. Simionov, A. Mogodan, D. Sarpe, and A. T. Rahoveanu, "Integrating aquaponics production systems into the romanian green procurement network," *Land Use Policy*, vol. 108, p. 105531, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837721002544>
- [22] L. V. Molleand and Y. Segers, "Micro-farming on other men's land allotments from the 19th to the 21st century: Belgian history in a global perspective," Hogeschool-Universiteit Brussel, Faculteit Economie en Management, Working Papers 2008/23, 2008. [Online]. Available: <https://EconPapers.repec.org/RePEc:hub:wpecon:200823>
- [23] K. H. Brown and A. L. Jameton, "Public health implications of urban agriculture," *Journal of Public Health Policy*, vol. 21, no. 1, pp. 20–39, 2000. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/3343472>
- [24] "Las 10 mejores plantas de interior resistentes, duraderas y fáciles de cuidar," https://elpais.com/elpais/2021/01/05/escaparate/1609843620_351125.html.
- [25] A. M. Santoña, "Plantas, aislantes de ruido y contaminación," <https://blogs.hoy.es/ciencia-facil/2015/08/23/plantas-aislantes-de-ruido-y-contaminacion/>, Aug. 2015.

- [26] C. D. R. Moreira, “¿que plantas son buenas para tener dentro de la casa?” <https://www.eluniverso.com/larevista/cuerpo-alma/que-plantas-son-buenas-para-tener-dentro-de-la-casa-nota/>, Jun. 2021.
- [27] I. Lavín, “Plantas de interior: 35 especies resistentes y fáciles de mantener,” https://www.elmueble.com/ideas/decoterapia/10-plantas-interior-resistentes-y-faciles-mantener_42392, Feb. 2021.
- [28] J. Bj, *Hidroponía: una guía práctica para el cultivador sin suelo*. Grupo Taylor & Francis, 2016.
- [29] J. Beltrano and D. O. Giménez, Eds., *Cultivo en Hidroponia*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP), 2015, ISBN:978-950-34-1258-9. [Online]. Available: <https://doi.org/10.35537/10915/46752>
- [30] ¿Qué es la hidroponía?, Hidroponia FIL. [Online]. Available: <https://hidroponiafil.com.ar/que-es-la-hidroponia/>
- [31] "hydroponic shipping container farms, gardens, & greenhouses". pure greens: Custom container farms. [Online]. Available: <https://puregreensaz.com>
- [32] "fig 2: Deep water culture system of hydroponics". researchgate. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Deep-water-culture-system-of-hydroponics_fig1_348003824
- [33] "National Heritage Places". Water and the Environment. [Online]. Available: <https://www.awe.gov.au/parks-heritage/heritage/places/national/budj-bim>
- [34] M. Neal, “A decade of lobbying sees indigenous site older than the pyramids get world heritage listing,” ABC. [Online]. Available: <https://www.abc.net.au/news/2019-07-06/indigenous-site-joins-pyramids-stonehenge-world-heritage-list/11271804>
- [35] C. H. Velandia, “Monitoreo y control de estanque para la producción piscícola,” Trabajo de grado, Universidad autónoma de occidente, Santiago de cali, September 2021. [Online]. Available: <https://red.uao.edu.co/handle/10614/11594>
- [36] “Parámetros clave de la calidad del agua para piscicultura,” BERNARDO LABORATORIOS. [Online]. Available: <https://bernardolabs.com/parametros-clave-de-la-calidad-del-agua-para-piscicultura/>
- [37] L. E. V. Gamboa, “Sistemas de recirculación de agua (ras) en piscicultura,” *Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira*, vol. 7, no. 7, 2013. [Online]. Available: <https://revistas.udesar.edu.co/index.php/reipa/article/view/1483>
- [38] “A complete guide to aquaponics for beginners,” GreenKit. [Online]. Available: <https://www.greenkit.net/aquaponics-for-beginners/>
- [39] P. Cendarle, “Técnicas de acuaponia,” Centro Nacional de Desarrollo Acuícola (CENADAC), Tech. Rep., 2015.
- [40] “Ras - sistemas de recirculación acuícola,” International Aquafeed. [Online]. Available: <https://aquafeed.co/entrada/ras---sistemas-de-recirculacion-acu-cola-20211/>
- [41] A. J. J. Sáenz, “Sistemas de recirculación en acuicultura: una visión y retos diversos para latinoamérica,” Sistemas de recirculación Perú, Investigación. [Online]. Available: http://www.industriaacuicola.com/PDFs/Sistemas_de_recirculacion.pdf
- [42] J. M. Martin-Sánchez and S. L. Shah, “Multivariable adaptive predictive control of a binary distillation column,” *Automatica*, vol. 20, no. 5, pp. 607–620, 1984. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0005109884900116>

- [43] “Evolución histórica de la ingeniería de control,” <http://automata.cps.unizar.es/regulacionautomatica/historia.PDF>.
- [44] K. Ogata, *Modern Control Engineering: Pearson New International Edition*, 5th ed. London, England: Pearson Education, Aug. 2013.
- [45] C. A. Ramírez Gómez, “Aplicación del machine learning en agricultura de precisión,” *Cintex*, vol. 25, no. 2, pp. 14–27, Dec. 2020.
- [46] “Process dynamics,” in *Process Control*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, May 2016, pp. 3–34.
- [47] M. M. Eissa, “A new digital relaying scheme for EHV three terminal transmission lines,” *Electric Power Syst. Res.*, vol. 73, no. 2, pp. 107–112, Feb. 2005.
- [48] A. Z. Mae H. Ambrosio, L. H. M. Jacob, L. A. R. Rulloda, J. A. C. Jose, A. A. Bandala, A. Sy, R. R. Vicerra, and E. P. Dadios, “Implementation of a closed loop control system for the automation of an aquaponic system for urban setting,” in *2019 IEEE 11th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM)*, 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/HNICEM48295.2019.9072729.
- [49] F. Rozie, I. Syarif, and M. U. H. Al Rasyid, “Design and implementation of intelligent aquaponics monitoring system based on iot,” in *2020 International Electronics Symposium (IES)*, 2020, pp. 534–540, doi: 10.1109/IES50839.2020.9231928.
- [50] L. F. H. Zambrano, “Diseño, construcción y evaluación de un sistema acuapónico automatizado de tipo tradicional y doble recirculación en el cultivo de tilapia roja (*oreochromis mossambicus*) y lechuga crespa (*lactuca sativa*),” Trabajo de grado - Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2017. [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/62954>
- [51] M. Mehra, S. Saxena, S. Sankaranarayanan, R. J. Tom, and M. Veeramanikandan, “Iot based hydroponics system using deep neural networks,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 155, pp. 473–486, 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169918311839>
- [52] J. Fernández, M. A. Pinto, and J. Ignacio, “Diseño e implementación de un sistema acuapónico automatizado,” Trabajo de grado - Pregrado, Universidad Autónoma de Occidente, Via Cali-Jamundi, Julio 2020. [Online]. Available: <http://red.uao.edu.co//handle/10614/12790>
- [53] “Microorganismos en el sustrato,” https://www.canna.es/microorganismos_en_el_sustrato.
- [54] “Sustratos para hidroponía – tipos, mezclas, características,” <https://agrotendencia.tv/agropedia/cultivos/hidroponia/tipos-de-sustratos-usados-en-hidroponia/>, Jun. 2021.
- [55] J. R. de Angulo, “Tipos de sustratos,” <https://www.agromatica.es/tipos-de-sustratos/>, Jan. 2013.
- [56] <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/la-hidroponia-cultivos-sin-suelo>.
- [57] “.: Hydro environment .: Hidroponia en mexico,” https://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=32.
- [58] “Cómo cultivar albahaca: Secretos para plantar albahaca,” https://www.planetahuerto.es/revista/como-cultivar-albahaca_00330.
- [59] C. Crespo, “Albahaca: Guía básica para su cultivo,” <https://www.portalfruticola.com/noticias/2020/04/16/el-cultivo-de-la-albahaca-guia-basica-para-su-cultivo/>, Apr. 2020.

- [60] M. Rosique, “Asociaciones beneficiosas para el huerto: la albahaca,” <https://www.planteaenverde.es/blog/asociaciones-beneficiosas-para-el-huerto-la-albahaca/>, Apr. 2014.
- [61] N. Palou, “Acuaponía: cultivar plantas aprovechando la cría de peces,” <https://www.lavanguardia.com/natural/tu-huella/20180919/451906450465/acuaponia-cultivo-agricola-peces-hortalizas-simbiosis-agua-ahorro-ecologico.html>, Sep. 2018.
- [62] “Cultivo de tilapia: tipos, beneficios, propiedades y su cultivo,” <https://agrotendencia.tv/agropedia/agropedia/acuicultura/cultivo-de-la-tilapia/>, Mar. 2020.
- [63] <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/acuaponia-produccion-de-plantas-y-peces>.
- [64] K. Al-Kodmany, “The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city,” *Buildings*, vol. 8, no. 2, p. 24, Feb. 2018.
- [65] N. Najeeb and S. Joseph, “IoT service search using MQTT protocol,” *Int. J. Comput. Sci. Eng.*, vol. 7, no. 7, pp. 292–297, Jul. 2019.
- [66] A. Pedraza, J. J. Barbosa, F. J. Ornelas Rodríguez, I. Ángel, A. García Moreno, and E. A. Garibay, “Detección de automóviles en escenarios urbanos escaneados por un lidar»,” *Rev. iberoam. autom. inform. ind.*, vol. 12, pp. 189–198, 2015.
- [67] C.-Y. Su and Y. Stepanenko, “Adaptive control of a class of nonlinear systems with fuzzy logic,” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 2, no. 4, pp. 285–294, 1994.
- [68] A. P. Kurniawan, A. N. Jati, and F. Azmi, “Weather prediction based on fuzzy logic algorithm for supporting general farming automation system,” in *2017 5th International Conference on Instrumentation, Control, and Automation (ICA)*, 2017, pp. 152–157.
- [69] S. Lucia, P. Rumschinski, A. J. Krener, and R. Findeisen, “Improved design of nonlinear model predictive controllers,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 23, pp. 254–259, 2015, 5th IFAC Conference on Nonlinear Model Predictive Control NMPC 2015. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315025768>
- [70] S. Adhisaputra, “Model-based control using neural network: A case study,” <https://medium.com/swlh/model-based-rl-for-nonlinear-dynamics-control-a-case-study-70c31810f255>, Dec. 2020.
- [71] D. F. C. Endoza, “Diseño DE CON TROLADOR ES PR EDICTI VOS CON RED ES NEURONALES,” <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/22300/u263249.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [72] M.-C. Chiu, W.-M. Yan, S. A. Bhat, and N.-F. Huang, “Development of smart aquaculture farm management system using iot and ai-based surrogate models,” *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 9, p. 100357, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666154322000904>
- [73] O. J. Alajas, R. Concepcion, R. R. Vicerra, A. Bandala, E. Sybingco, E. Dadios, J. Cuello, and V. Fonseca, “Indirect prediction of aquaponic water nitrate concentration using hybrid genetic algorithm and recurrent neural network,” in *2021 IEEE 13th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM)*, 2021, pp. 1–6.
- [74] “Enfermedades más comunes en el CULTIVO DE TILAPIA,” <https://agroregion.com/articulo?id=202>.

-
- [75] “Corydoras reticulatus, corydora reticulada,” <https://laguiadelacuario.es/peces-aguadulce/calictidos/corydoras-reticulatus/>., Oct. 2019.
 - [76] https://investigacionesyposgrados.ucaldas.edu.co/wp-content/uploads/Anexo-1_TRL.pdf.

CAPÍTULO 7

Anexos

7.1. Documentacion

La documentación del trabajo de grado se encuentra alojada en el siguiente repositorio:

- https://github.com/lefros22/Proyecto_de_Grado-CultivoAcuaponico-

Este repositorio esta estructurado en:

- Control: Control OnOff , Moderno y entrenamiento
- Live components: componentes vivos
- Management: sistema de gestion system
- Physic structure: estructura fisica
- Web page: pagina web

Ademas, en la siguiente carpeta de google fotos, puede encontrar las fotos de todo el proyecto:

- <https://photos.app.goo.gl/17TKQxqVfbyk1X739>