

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA ACUAPÓNICO
AUTOMATIZADO PARA PLANTAS DE LECHUGA CRESPA ADICIONANDO
TILAPIA ROJA**



DUVAN CAMILO CUETOCUE PEÑA

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA – UNICOMFACAUCA

FACULTAD DE INGENIERIAS

INGENIERÍA MECATRÓNICA

POPAYÁN – CAUCA

2021

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA ACUAPÓNICO
AUTOMATIZADO PARA PLANTAS DE LECHUGA CRESPA ADICIONANDO
TILAPIA ROJA**

DUVAN CAMILO CUETOCUE PEÑA

**Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero Mecatrónico**

Director:

Ing. Saúl Eduardo Ruiz Sarzosa

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA – UNICOMFACAUCA

FACULTAD DE INGENIERIAS

INGENIERÍA MECATRÓNICA

POPAYÁN – CAUCA

2021

Página de aceptación

El M.Sc. Saúl Eduardo Ruiz Sarzosa, con cédula de ciudadanía número 1061721572 de Popayán, siendo docente adscrito al programa de Ingeniería Mecatrónica de la Corporación Universitaria Comfacauca y Director del presente trabajo de grado, da fe de la culminación, validez y veracidad de los resultados obtenidos en el proyecto denominado: DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA ACUAPÓNICO AUTOMATIZADO PARA PLANTAS DE LECHUGA CRESPA ADICIONANDO TILAPIA ROJA, autoría del estudiante Duvan Camilo Cuetocue Peña. El proyecto de grado está listo para ser entregado y publicado.

Página de dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a Dios que me dio la fortaleza e inspiración para sacar adelante este proyecto tan importante en mi vida sin desfallecer, de igual manera a mi hermano que desde el cielo siempre me ilumino.

A mis padres por estar siempre presente en cada momento, a mi novia por su apoyo incondicional porque con sus consejos y sus palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompaña en todos mis sueños y metas.

Página de agradecimientos

Mi profundo agradecimiento a mi tutor Saúl Eduardo Ruiz Sarzosa y al profesor David Armando Revelo por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de este proyecto, por su paciencia, su sabiduría y apoyo que me motivó en los momentos más difíciles.

A mis padres y abuelos quienes son mi motor y mi mayor inspiración, que, a través de su amor, paciencia, buenos valores, ayudan a trazar mi camino

A mi novia por ser el apoyo incondicional en mi vida, que, con su amor y respaldo, me ayuda alcanzar mis objetivos.

CONTENIDO

RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	16
JUSTIFICACIÓN	18
OBJETIVOS	19
Objetivo general.....	19
Objetivos específicos.....	19
CAPÍTULO I	20
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	20
1.1 AGRICULTURA VERTICAL.....	20
1.1.1 Acuaponía	21
1.1.2 Sistema acuapónico	21
1.1.3 Uso del agua	24
1.1.4 Crecimiento de plantas mediante luz led.....	25
1.1.5 Acuaponía en Colombia	26
1.2 LECHUGA (LACTUCA SATIVA VAR. ACEPHALA DILL).....	26
1.2.1 Características	27
1.2.2 Composición nutricional	27
1.3 TILAPIA ROJA (OREOCHROMIS MOSSAMBICUS)	28
1.3.1 Características	28
1.3.2 Composición Nutricional.....	29
1.4 SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICOS	29
1.5 CONCEPTUALIZACIÓN.....	30
1.6 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA.....	30

1.6.1 Control de temperatura en las plantas	31
1.6.2 Control de temperatura en los peces	31
1.6.3 Control de nivel de agua	32
CAPÍTULO II	34
DISEÑO DEL SISTEMA	34
2.1 DISEÑO CAD 3D	34
2.1.1 Boceto inicial del proyecto.....	35
2.1.2 Diseño estructural	36
2.2 DISEÑO MECÁNICO.....	38
2.2.1 Análisis de tensión	38
2.2.2 Análisis de desplazamiento.....	39
2.2.3 Factor de seguridad	39
2.3 DISEÑO ELECTRÓNICO	40
2.3.1 Detector de cruce por cero.....	40
2.3.2 Circuito para detección de cruce por cero.....	42
2.3.3 Consignas de variables a controlar	43
2.4 MODELO MATEMÁTICO	43
2.4.1 Modelo matemático planta de Temperatura en el cultivo de plantas	44
2.4.2 Modelo matemático planta de Temperatura en el tanque de peces.....	46
2.4.3 Modelo matemático planta de nivel de agua	48
2.5 DISEÑO DE SOFTWARE.....	49
CAPÍTULO III	51
3.1 IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO.....	51
3.1.1 Fabricación del prototipo	52
3.2 CONTROL DEL SISTEMA.....	53

3.2.1 Planta de temperatura en el cultivo de plantas	54
3.2.2 Planta de temperatura del agua en tanque de peces.....	66
3.2.3 Planta de control de nivel de agua	77
CAPÍTULO IV	88
RESULTADOS ALCANZADOS Y DISCUSIÓN	88
4.1 FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO	88
4.2 VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO	91
4.2.1 Crecimiento de las lechugas	92
4.2.2 Crecimiento de las tilapias	93
4.2.3 Contraste de medidas	94
4.2.4 Ciclo de recirculación de desechos/nutrientes	95
4.3 APLICACIÓN MÓVIL	98
CONCLUSIONES.....	103
TRABAJOS FUTUROS	104
REFERENCIAS.....	105
ANEXOS	112

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1. Racks de verduras en un diseño de invernadero con hidroponía. (Benke & Tomkins, 2017).....	21
Ilustración 2. The biological components in the aquaponic process: fish, plants and bacteria. Tomado y recuperado de (Ambrosio et al., 2019).	22
Ilustración 3. Nutrient film technique (NFT) (Pattillo, 2017).	23
Ilustración 4. Consumo de agua bajo diferentes sistemas de cultivo. (Majid et al., 2020).	25
Ilustración 5. Boceto del proyecto. (autor).....	35
Ilustración 6. Diseño de estructura. (autor).....	36
Ilustración 7. Diseño del sistema acuapónico. (autor).	37
Ilustración 8. Análisis de tensión. (autor).....	38
Ilustración 9. Análisis de desplazamiento. (autor).	39
Ilustración 10. Factor de seguridad. (autor).....	39
Ilustración 11. Circuito de prueba para detector de cruce por cero. (autor).	41
Ilustración 12. Grafica cruce por cero. (autor).	41
Ilustración 13. Variación de frecuencia AC. (autor).	42
Ilustración 14. Esquema de circuito eléctrico. (autor).....	42
Ilustración 15. Diagrama para control de variables. (autor).....	43
Ilustración 16. Construcción del prototipo. (autor).	52
Ilustración 17. Caja de control. (autor).	53
Ilustración 18. Comparación de controladores, temperatura en cultivo de plantas. (autor).....	58
Ilustración 19. Respuesta del actuador, temperatura en el cultivo de plantas. (autor).	58
Ilustración 20. Comparación Método de Ziegler Nichols, temperatura en el cultivo de plantas. (autor).	59
Ilustración 21. Respuesta del actuador Método de Ziegler Nichols, temperatura en el cultivo de plantas. (autor).	60
Ilustración 22. Función de transferencia, temperatura en el cultivo de plantas. (autor).....	61

Ilustración 23. Controlador RST, temperatura en el cultivo de plantas. (autor).	64
Ilustración 24. Respuesta del actuador con control RST, temperatura en el cultivo de plantas. (autor).	64
Ilustración 25. Comparación digital analógica. Temperatura en el cultivo de plantas. (autor).....	66
Ilustración 26. Comparación de controladores, temperatura del agua en tanque de peces. (autor).	71
Ilustración 27. Respuesta del actuador, temperatura de agua en el tanque de peces. (autor).....	71
Ilustración 28. Comparación Método de Ziegler Nichols, temperatura del agua en el tanque de peces. (autor).	72
Ilustración 29. Respuesta del actuador, método de Ziegler Nichols, temperatura del agua en el tanque de peces. (autor).....	72
Ilustración 30. Función de transferencia, temperatura del agua en el tanque de peces.....	73
Ilustración 31. Controlador RST, temperatura del agua en el tanque de peces. (autor).....	75
Ilustración 32. Respuesta del actuador con control RST, temperatura de agua en el tanque de peces. (autor).	75
Ilustración 33. Comparación digital analógica. Temperatura del agua en el tanque de peces. (autor).	77
Ilustración 34. Comparación de controladores, nivel de agua. (autor).	81
Ilustración 35. Respuesta del actuador, control de nivel. (autor).....	81
Ilustración 36. Comparación Método de Ziegler Nichols, nivel de agua. (autor)....	82
Ilustración 37. Respuesta del actuador, método de Ziegler Nichols, control de nivel. (autor).....	82
Ilustración 38. Función de transferencia, nivel de agua. (autor).	83
Ilustración 39. Controlador RST, nivel de agua. (autor).	85
Ilustración 40. Respuesta del actuador con control RST, nivel de agua. (autor)...	85
Ilustración 41. Comparación digital analógica. Nivel de agua. (autor).....	87
Ilustración 42. Generador de bacterias. (autor).	88

Ilustración 43. Plantas retiradas del semillero. (autor).....	89
Ilustración 44. Tilapias al interior del tanque. Dia 1. (autor).	89
Ilustración 45. Monitorio de variables. App. (autor).	90
Ilustración 46. Funcionamiento del sistema. Dia 15. (autor).....	91
Ilustración 47. Crecimiento. Longitud de lechugas. (Tapia, 2018).....	94
Ilustración 48. Crecimiento. Peso de lechugas. (Tapia, 2018).	94
Ilustración 49. Desechos metabólicos de las tilapias rojas. (autor).	96
Ilustración 50. Filtro mecánico. (autor).	96
Ilustración 51. Filtro biológico. (autor).	97
Ilustración 52. Sistema de nivel. (autor).	97
Ilustración 53. Limpieza del agua por medio de las plantas. (autor).....	98
Ilustración 54. Visualización de datos a través de la app. (autor).....	99

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valor nutricional de la lechuga. (Yucra, 2019).....	28
Tabla 2. Contenido mineral del musculo de pescado. (Arteaga & Díaz, 2018).	29
Tabla 3. Sensor y actuador para control de temperatura en plantas. [Elaboración propia].	31
Tabla 4. Sensor y actuador para control de temperatura en peces. [Elaboración propia].	32
Tabla 5. Sensor y actuador para recirculación de agua. [Elaboración propia].	32
Tabla 6. Evaluación del crecimiento de lechugas. [Elaboración propia].	92
Tabla 7. Crecimiento de una de las lechugas. [Elaboración propia].	92
Tabla 8. Evaluación del crecimiento de las tilapias rojas. [Elaboración propia].	93
Tabla 9. Crecimiento de una tilapia. [Elaboración propia].	93
Tabla 10. Manejo de la app. [Elaboración propia].	99

RESUMEN

La agricultura es fundamental en el desarrollo del ser humano, los sistemas autosostenibles para fines alimenticios permiten dar un mejor uso del medio ambiente, enfrentar los cambios climáticos, prevenir plagas y enfermedades. Los sistemas acuapónicos, particularmente, se destacan por ahorrar gran cantidad de agua, permiten la producción de peces y hortalizas en un espacio reducido donde las plantas crecen mediante abono orgánico creado por las heces de los peces y estas plantas a su vez sirven como filtros, limpiando el agua que recircula al sistema. Se emplea una metodología de diseño mecatrónico centrada en la contextualización, el diseño, fabricación y funcionamiento partiendo de una idea hasta terminar en una evaluación. El prototipo planteado permite el control de temperatura en el cultivo de plantas, control de temperatura del agua en el tanque de peces, control de nivel de agua, control de alimentación, control de iluminación y lectura de pH, los datos son visualizados en una app disponible para Android. El prototipo es diseñado primeramente en SolidWorks, cuenta con un sistema basado en la técnica de la película de nutriente (NFT, por sus siglas en inglés) para 6 plantas, un tanque para 6 peces y un filtro tipo cascada. El diseño electrónico se simuló en Proteus y se realiza en Eagle. Para realizar y simular el control se hace uso de MatLab, finalmente, la app se desarrolla en App Inventor. Para el control de las variables de temperatura y nivel se realiza una comparación de controladores obtenidos bajo método de Ziegler Nichols, RST y variación del sobre impulso y tiempo de estabilización. Finalmente se realiza una evaluación del sistema en un periodo de 15 días donde las Lechugas alcanzaron una longitud promedio de 16 cm sin contar con la raíz con un peso 11 gr y un numero de hojas máximo de 6 bajo una intensidad de luz led en color rojo y azul de 12 horas, las Tilapias lograron una longitud de 9 cm con un peso de 11 gr bajo un horario de alimentación de 5 veces al día.

INTRODUCCIÓN

La población mundial alcanzará los 9600 millones de habitantes para el año 2050, lo cual implica que la producción agrícola deberá aumentar para poder garantizar la seguridad alimentaria. De no realizar un cambio en la forma de cultivar a tiempo, los recursos para la agricultura serán escasos (Navas et al., 2017).

La acuaponía es un tema que está en crecimiento actualmente y se define como la unión de la hidroponía (cultivo de plantas sin suelo) por medio de acuicultura (cultivo de peces). La contaminación ambiental, la disminución del agua y de los suelos aptos para cultivar, junto con el crecimiento del costo de los fertilizantes, son problemas que la acuaponía podrá solucionar. Dentro de las plantas y peces a cultivar, las verduras de hoja oscura y la tilapia son las especies con mayor acogida (Yep & Zheng, 2019).

Entre las técnicas de producción hidropónicas se encuentran los cultivos en sustrato, raíz flotante, sistema NGS y sistema NFT. El sistema NFT es construido con tubos de PVC, que actúan como canales que permiten la recirculación del agua con soluciones nutritivas, favoreciendo el crecimiento de las plantas. Estos sistemas permiten la automatización, facilitan la limpieza del sistema, mejor control sobre la nutrición de la planta y maximizan la producción (Cajo, 2016).

Colombia presenta un clima bastante favorable y personal capacitado, para producir casi todo tipo de alimentos. Los sistemas acuapónicos cada vez son más comunes en el país. Dentro de los sistemas acuapónicos automatizados se destaca un trabajo de la universidad Nacional de Colombia en donde Hernández, (2017) diseña, construye y evalúa dos sistemas considerando diferentes variables como temperatura, pH del agua, nivel del agua, entre otras.

La población cada vez es mayor, lo cual implica producir mayor cantidad de alimentos y la reducción de espacio para cultivar. Los malos climas afectan los cultivos generando grandes pérdidas. Crear sistemas acuapónicos automatizados permite tener mayor control en el cultivo de plantas y peces, en este caso: lechuga crespa y tilapia roja. Estos sistemas permiten ahorrar agua, dado que esta solo se

cambia cuando hay suficiente pérdida por evaporización, absorción de las plantas o extracción de la biomasa del sistema.

El sistema desarrollado permite controlar variables de temperatura en las plantas, temperatura del agua en el tanque de peces, control de recirculación del agua y dosificación de alimento. El proyecto se realiza a pequeña escala con el fin de que pueda servir como guía para proyectos más grandes y también como fuente de estudio sobre el tema.

El contenido está formado por cuatro capítulos, en el primer capítulo se encuentra la parte teórica junto con los materiales para la realización del sistema. En el segundo capítulo se encuentra la parte del diseño estructural y eléctrico del sistema acuapónico. En el tercer capítulo está todo lo relacionado con la construcción y el control del sistema. En el cuarto y último capítulo se encuentra el desarrollo de la aplicación móvil y la evaluación del sistema acuapónico automatizado.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El agua para fines agrícolas seguirá cumpliendo una función primordial en la seguridad alimentaria mundial. Las proyecciones indican que para el año 2050 la población del planeta superará los 9100 millones de habitantes, con una alta competencia por el agua y suelo, ya sea en zonas rurales o urbanas, será necesario satisfacer las necesidades básicas de alimentos de estas personas (Pérez, Leyva, & Gómez, 2018).

Las consecuencias al medio ambiente y a la agricultura, a causa del mal uso de un recurso vital y socioeconómico como el agua, cada vez están en aumento. Los países en desarrollo presentan escasez de agua potable; más de dos millones de personas mueren por no tener agua de calidad. Con el pasar del tiempo aumentan los sistemas de riego utilizados en la agricultura, los cuales utilizan el 70% aproximadamente de agua dulce disponible, en donde el 60% de agua se pierde por el mal funcionamiento de estos sistemas. Otra consecuencia es la pérdida de humedales del planeta, lo que causa la pérdida del 20% de las 10.000 especies de agua dulce. El mal uso del suelo para fines agrícolas causa degradación del suelo, lo cual representa un grave problema para mantener la producción de alimentos y preservación del agua (Gabriel, 2017).

Por otro lado, la producción de hortalizas en Colombia se ha caracterizado por el mal manejo de los suelos, alta incidencia de plagas y la degradación del medio ambiente, que a través del tiempo han venido influyendo negativamente en el rendimiento y calidad de la producción. Adicionalmente, en muchos casos el agua disponible para el riego de los cultivos de hortalizas se ha visto expuesta esporádicamente a contaminación por diferentes fuentes como alcantarillas o arrastre superficial de residuos, llegando a contaminar los cultivos en algunos casos con elementos pesados y organismos patógenos, afectando su inocuidad. El consumo de hortalizas por persona, según la Organización Mundial de la Salud, debe ser mínimo de 140 kg por persona/año, pero en Colombia el consumo de

hortalizas por persona es de 38 kg por persona/año, con base en esto se observa un bajo consumo en hortalizas a nivel nacional (DANE, 2014).

Como se puede evidenciar, el agua es un recurso de gran importancia para el ser humano, pero poco a poco el recurso se va agotando por malas acciones que el ser humano ejecuta al no realizar un buen manejo para beneficio propio, en este caso para agricultura. Junto a esto se suma el mal uso del suelo y la contaminación al medio ambiente. Con esta problemática surge una pregunta de investigación: ¿Cómo crear un prototipo de sistema recirculante acuapónico, eficiente, que permita ahorrar agua, cultivar lechuga y tilapia dentro de un mismo espacio controlado?

JUSTIFICACIÓN

La agricultura es fundamental en la economía de un país, permite la sostenibilidad ambiental, genera reducción de pobreza y del hambre, es quien proporciona alimento al ser humano. Un proyecto de agricultura acuapónico automatizado logra un aumento de producción en un mismo espacio ayudando a reducir el uso del agua, beneficiando diferentes regiones de Colombia con escasez de este recurso. También, logra la preservación del medio ambiente, y los cultivos se logran proteger de malos climas y problemas relacionados. Un sistema de agricultura vertical usando acuaponía, no solo permite cultivar hortalizas, también permite criar peces, lo cual hace que el sistema sea multifuncional. Los desechos metabólicos de los peces son aprovechados como nutrientes por las plantas que, a su vez, limpian el agua y eliminan compuestos tóxicos permitiendo que el agua logre la recirculación. El presente proyecto de un prototipo de sistema de recirculación acuapónico automatizado, el cual une la acuacultura (cultivo de peces) con la hidroponía (cultivo de plantas sin suelo) genera un aporte en el campo de la automatización y control para la recolección y procesamiento de datos en agricultura.

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar un prototipo de sistema acuapónico automatizado para plantas de lechuga crespa adicionando tilapia roja.

Objetivos específicos

1. Diseñar el prototipo de sistema acuapónico automatizado mediante un software de diseño CAD (Diseño Asistido por Computador).
2. Construir el prototipo de sistema acuapónico automatizado de manera eficiente, estética y de bajo costo.
3. Validar el prototipo de sistema acuapónico automatizado midiendo el crecimiento en las plantas de lechuga crespa y tilapia roja.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Este capítulo presenta información que brinda un mejor entendimiento de los términos y actividades que comúnmente se realizan en campo y algunas técnicas que se implementan para la concepción de sistemas de agricultura autosostenibles. Del mismo modo se presentan definiciones de las diferentes técnicas y herramientas que tradicionalmente se usan para la implementación de sistemas acuapónicos y posteriormente se encuentra información de la incursión de tecnología en el campo para la realización de dicha labor.

1.1 AGRICULTURA VERTICAL

La agricultura vertical o agricultura urbana está relacionada con estrategias de sostenibilidad urbana y ambiental que apoyan la creación de ciudades más verdes y ambientalmente amigables, esto gracias a que pueden complacer múltiples demandas de alimentos (Nadal et al., 2016). En un futuro, para satisfacer esta demanda de alimentos y mejorar su producción, la agricultura vertical, se presenta como solución, en la cual se requiere el uso de tecnología y automatización con el fin de poder producir más, en un mismo espacio de suelo dentro de un ambiente controlado, logrando reducir el impacto ambiental (Benke & Tomkins, 2017). Para dar una mejor idea de agricultura vertical, ver ilustración 1.



Ilustración 1. Racks de verduras en un diseño de invernadero con hidroponía. (Benke & Tomkins, 2017).

1.1.1 Acuaponía

El término “acuaponía” procede de la combinación de las palabras "acuicultura" (producción de organismos acuáticos) e "hidroponía" (producción de plantas sin suelo). Se presenta como una buena solución al problema alimentario y medioambiental. Se considera una tecnología verde y sostenible dado que permite ahorrar agua e impedir el uso de fertilizantes. En este sistema las bacterias transforman los desechos de los peces, en nutrientes para las plantas, logrando un sistema de recirculación y permitiendo optimizar recursos e insumos (Yanes, Martínez, & Ahmad, 2020).

1.1.2 Sistema acuapónico

El sistema acuapónico es una técnica basada en combinar la producción de peces (acuicultura) junto con la de hortalizas producidas hidropónicamente empleando el sistema de agua recirculante. Para cumplir su función, el sistema cuenta con partes fundamentales como: tanque de peces, filtros mecánicos y biológicos, sistemas de bombeo de agua y sistemas de aireación. Estas partes se conectan entre sí, para formar el sistema acuapónico (Ramírez, Sabogal, Jiménez, & Hurtado, 2017). En el sistema acuapónico los desechos de los peces son degradados por bacterias convirtiendo a estos en nitratos, que después de pasar por un filtro biológico y un sistema de bombeo serán consumidos por las plantas como alimento, limpiando el agua que luego volverá al tanque de peces, de tal forma que se cree un sistema recirculante y autosustentable (Caldas et al., 2019).

El diagrama de un sistema acuapónico se muestra en la ilustración 2.

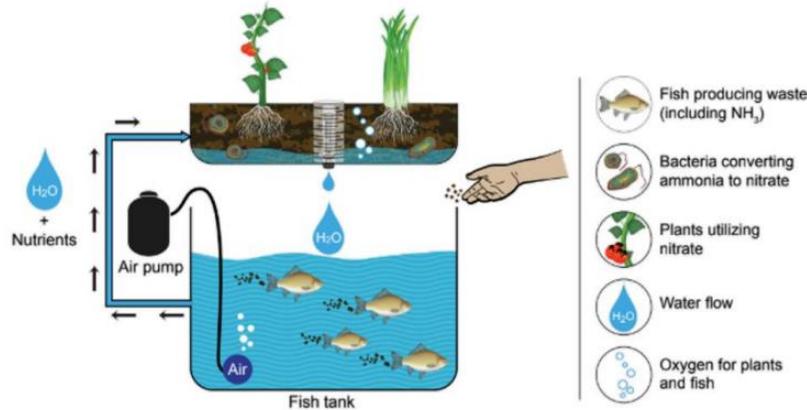


Ilustración 2. The biological components in the aquaponic process: fish, plants and bacteria. Tomado y recuperado de (Ambrosio et al., 2019).

El diagrama de bloques de un sistema acuapónico automatizado tiene un valor deseado, el cual se compara con la lectura del sensor a través del punto de suma. El controlador es el encargado de recibir información de error entre las dos lecturas y salir con una instrucción en términos de respuesta hacia el actuador del sistema acuapónico. La acción ejecutada por el actuador dependerá del dato recibido. Una vez realizada la acción, el sensor volverá a realizar la lectura y el procedimiento se repetirá creando un sistema de control de circuito cerrado (Ambrosio et al., 2019).

Como se mencionó anteriormente el sistema acuapónico cuenta con unas partes fundamentales como son:

Tanque de peces: Es el lugar donde permanece los peces del sistema acuapónico. Para mantener un buen monitoreo de los peces y observar posibles comportamientos, el tanque debe ser claro, la longitud del tanque o contenedor debe ser mayor a la altura para evitar que los peces sufran estrés (Ballina Escobar, 2019).

En sistemas acuapónicos, para cultivar lechuga, albaca y pepino, se destaca la tilapia Roja (*Oreochromis sp*) por su adaptabilidad a diferentes ambientes y rendimiento en su crecimiento. Tras una prueba tomada durante 35 días se obtiene resultados para la tilapia con una temperatura mínima de 20.7°C y máxima de 29.8°C con un pH mínimo de 6.45 y máximo de 7.92 (Pinho et al., 2017).

Valiente et al, (2018) crean un sistema acuapónico automatizado utilizando Tilapia Nilo y Lechuga Romana en donde controlan pH y temperatura de los peces. Las condiciones ideales para este pez varían en un pH de 6.5 a 9 y en temperatura son de 27°C a 30°C.

Sistema NFT (Nutrient film technique): El Dr A.J Cooper fue quien desarrolló por primera vez este sistema a finales de 1960 en el Glasshouse Crops Research Institute ubicado en Littlehampton, Inglaterra. El sistema fue sacado comercialmente en 1970 (Isiwanto, Megantoro, & Ma'arif, 2020).

Este sistema permite que la planta entre en contacto con el aire y el agua simultáneamente. Permite el contacto de la raíz de la planta con una delgada capa de agua (entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ pulgada) la cual fluye dentro de un canal de PVC blanco. Dependiendo de la planta a cultivar varía el tamaño del canal. La lechuga se puede cultivar en canales pequeños (ancho de 4 pulgadas y profundidad de 1.5 pulgadas). Al ser un sistema liviano, se puede instalar de forma vertical (Pattillo, 2017). Ver ilustración 3.

El sistema NFT es uno de los más populares, permite un mutualismo simbiótico en el sistema acuapónico. Dentro de este sistema las plantas actúan como un biofiltro, logrando disminuir los compuestos tóxicos en el agua, permitiendo que el cultivo de peces no se vea afectado (Zaini, Kurniawan, & Herdhiyanto, 2018).



Ilustración 3. Nutrient film technique (NFT) (Pattillo, 2017).

Sistema de filtrado: El sistema de filtración está compuesto por dos filtros, filtro mecánico y filtro biológico. Después del tanque de peces se encuentra el filtro mecánico, el cual debe separar las partículas sólidas en suspensión. El filtro biológico tiene como función transformar las heces de los peces empleando bacterias Nitrobacter y Nitrosomonas las cuales requieren una superficie donde alojarse dentro del filtro. Las bacterias oxidan el nitrito y el amonio, dejando solo el nitrato como fuente de alimento para las plantas (Mallo et al., 2018).

El biofiltro necesita un periodo de adecuación, en el cual el sistema de recirculación funciona sin plantas ni peces para que las bacterias se adecuen al sistema y cumplan su función. Durante este periodo se puede suministrar productos con bacterias facultivas, aerobias y anaerobias para acelerar la cantidad de bacterias en el filtro evitando así el síndrome de acuario nuevo (Tapia, 2018).

Sistema de bombeo: Las bombas según el método, permite el desplazamiento de líquidos de un lugar a otro dentro de un sistema acuapónico. En este caso permite bombear agua hacia las plantas (Mamatha & Namratha, 2017).

Iluminación LED: En el cultivo de plantas, la iluminación LED permite mayor control y automatización en el crecimiento de la planta, reduce los costos de energía dentro del sistema, ayuda en el proceso de fotosíntesis el cual es realizado dentro de un rango de 440nm y 620nm aproximadamente (Mashkov et al., 2017).

1.1.3 Uso del agua

Sistemas de recirculación de agua como el NFT permiten cultivar en zonas infértiles sin necesidad de suelo gracias a la recirculación de agua con nutrientes para las plantas. El flujo del agua puede ser constante o periódicamente, esto se ve reflejado en el ahorro energético del sistema (Ramos et al., 2019).

Los sistemas hidropónicos permiten ahorrar mayor cantidad de agua en comparación con el cultivo de lechuga tradicional en suelo. Entre, sistema de cultivo en aguas profundas (DWC), sistema de técnica de película de nutrientes (NFT) y

Sistema de cultivo protegido en suelo (CN), se destaca el sistema NFT al tener mayor eficiencia en el uso del agua (Majid et al., 2020). Ver ilustración 4.

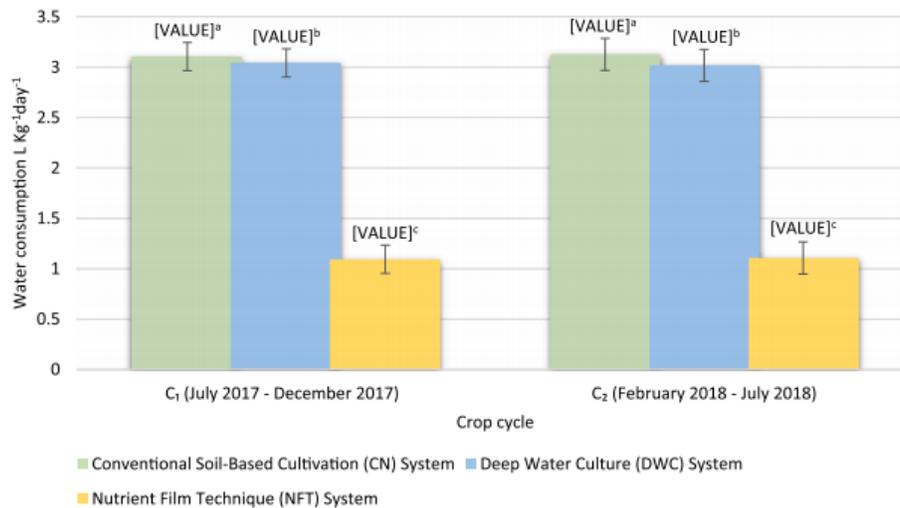


Ilustración 4. Consumo de agua bajo diferentes sistemas de cultivo. (Majid et al., 2020).

1.1.4 Crecimiento de plantas mediante luz led

La iluminación led suplementaria en el cultivo hidropónico de lechugas afecta positivamente en su crecimiento y morfología, producen un mayor número de hojas por planta, las plantas parecen más saludables y con un área foliar superior, en comparación con las plantas cultivadas solo con luz natural (Namgyel et al., 2018). La iluminación Led en color rojo y azul para las plantas, logran un mayor rendimiento fotosintético (Shailesh, 2019).

La luz azul en el cultivo puede desarrollar una floración más rápida. Los leds Growlights son luces utilizadas para cultivo interno de plantas, disponibles en color azul, rojo y azul/rojo creando así un entorno eficiente para que las plantas crezcan saludablemente (Vernandhes et al., 2017).

Bian et al, (2018) estudiaron el efecto de la luz verde en el cultivo de lechuga bajo luz roja y azul, obteniendo como resultado altas tasas fotosintéticas y máxima eficiencia fotoquímica promoviendo así mayores valores nutricionales.

Con un rango entre 16 a 18 horas utilizando leds rojos y azules, junto con una temperatura del aire entre 22 a 25°C es óptima para aumentar la absorción de CO₂ logrando así un mejor crecimiento de la planta (Ahmed, Yu-Xin, & Qi-Chang, 2019).

1.1.5 Acuaponía en Colombia

Hernández, (2017) construyó y evaluó dos prototipos acuapónicos, uno de ellos con recirculación simple y el otro con doble recirculación. En él, se realizó un control de parámetros fisicoquímicos del agua, midiendo valores de pH, temperatura del agua, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, luminosidad y nivel de agua en biofiltro. En el proyecto se identifican valores adecuados de las variables mencionadas, con el propósito de lograr un sistema acuapónico óptimo. El rendimiento en el cultivo de lechuga mejoró en el sistema de doble recirculación, con este mismo sistema en condiciones de invernadero y usando un método de recuperación de agua, se observó que necesitaba menos cantidad de agua, comparado al sistema tradicional. En este proyecto la evaluación del sistema acuapónico, se realiza tomando datos de las plantas de lechuga, tales como peso, ganancia de peso, altura de la lechuga, ganancia de altura, número de hojas, color y textura, y en el cultivo de tilapia, tomando datos como peso, ganancia de peso y longitud total.

Rodriguez, (2016) plantea como problema, que los sistemas de recirculación de agua, al realizar la recirculación, la velocidad es constante y de manera temporizada, en este proceso no se tiene en cuenta factores que afectan el cultivo como lo son turbulencia, la cual provoca que partículas se vuelvan mucho más pequeñas y pasen a través del filtro, afectando el cultivo de las plantas. Por lo tanto, en el proyecto se automatiza dicho proceso, creando un prototipo a escala de laboratorio.

1.2 LECHUGA (LACTUCA SATIVA VAR. ACEPHALA DILL)

Según Vavilov su origen es el cercano oriente. Romanos y griegos cultivaban diferentes variedades. Las inmigraciones Europeas incorporaron este cultivo en

América Latina. Su nombre Sativa es por ser cultivada y Lactuca deriva de la raíz Lac, que significa leche dado a la presencia de látex (Pino, 2020).

1.2.1 Características

La lechuga lactuca sativa var. Acephala dill es de hojas sueltas, no envolventes con diferentes formas en sus bordes. Sus hojas pueden ir siendo cosechadas individualmente. Se cultivan en suelo y son comunes en cultivos hidropónicos (Saavedra et al., 2017).

El desarrollo óptimo para su producción está entre los 1350 a 2100 msnm. Esta planta es susceptible a heladas. Las hojas pueden ser anchas o alargadas, redondas, color verde, superficie lisa o rugosa, la raíz cuenta con diferentes ramificaciones y puede alcanzar los 25 cm. Su temperatura óptima se encuentra entre los 15°C a 18°C y su temperatura máxima entre 21°C a 24°C (Colque, 2018).

1.2.2 Composición nutricional

La lechuga es baja en calorías, presenta gran cantidad de vitamina A y vitamina C dentro de las hojas exteriores, en 100 gr de hojas verdes. Consumirla en crudo para contener su mayor cantidad de nutrientes representados en la siguiente tabla (Yucra, 2019). Ver tabla 1.

Tabla 1. Valor nutricional de la lechuga. (Yucra, 2019).

Valor nutricional de la lechuga en 100 gr de sustancia	
Carbohidratos (gr)	20.1
Proteínas (gr)	8.4
Grasas (gr)	1.3
Calcio (gr)	0.4
Fósforo (mg)	138.9
Vitamina C (mg)	125.7
Hierro (mg)	7.5
Niacina (mg)	1.3
Riboflavina (mg)	0.6
Tiamina (mg)	0.3
Vitamina A (U.I.)	1155
Calorías (cal)	18

1.3 TILAPIA ROJA (OREOCHROMIS MOSSAMBICUS)

La tilapia es un pez correspondiente a la familia Cichlidae, teleosteo del orden peciforme, originario de Africa. La tilapia roja se considera especie ovípara, que se reproduce naturalmente. Según investigaciones fue creada en Taiwán en 1968 a partir de un cruce entre *Oreochromis mossambicus* con *Oreochromis nilótica* (Méndez et al., 2018).

De cruces entre diferentes tipos de tilapia como *Oreochromis hornorum*, *Oreochromis niloticus*, *Oreochromis aureus* y *Oreochromis mossambicus*, se obtiene la Tilapia roja con su coloración característica. En la actualidad 10 especies de tilapia son empleadas para el consumo humano de las 60 especies diferentes (Camero & Calderón 2018).

1.3.1 Características

La tilapia roja cuenta con una boca pequeña, cuerpo angosto y alargado. La longitud de su cuerpo es de 2.4 a 2.5 veces la altura y de 3.0 a 3.1 veces el ancho de la cabeza. Su temperatura óptima es mayor a 24°C. Las hembras alcanzan su

madurez sexual entre los 3 a 5 meses y los machos entre los 4 a 6 meses. Su incubación es bucal (Hernández, 2020).

Las tilapias rojas presentan adaptabilidad al ambiente, alto crecimiento, resistencia a enfermedades, buena coloración de carne y textura, alto porcentaje de masa muscular y ausencia de espinas intramusculares. Tienen un rango de pH entre 5.0 a 9.0 siendo 7.5 el nivel óptimo. Los machos son más grandes, con mayor brillo y color (Palacio & Rico, 2019).

1.3.2 Composición Nutricional

El musculo de la tilapia posee gran cantidad de Omega 3, proteínas y vitaminas D y E, calcio, fosforo y complejo vitamínico B. Dentro de su composición química contiene 71% de agua, 4.1% de lípidos, 18.5% de proteínas y 581 Kcal/100g de energía (Arteaga & Díaz, 2018). En la tabla 2 se muestran varios minerales del musculo de pescado en general.

Tabla 2. Contenido mineral del musculo de pescado. (Arteaga & Díaz, 2018).

Elemento	Valor promedio (mg/100g)	Rango (mg/100g)
Fosforo	190	68-550
Magnesio	38	4.5-452
Calcio	79	19-881
Potasio	278	19-502
Sodio	72	30-134

1.4 SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICOS

Un sistema de control puede tener varios componentes los cuales son mostrados mediante diagramas de bloques en donde se representa las funciones de cada componente y flujo de señales. El diagrama puede ser cerrado en donde se realiza retroalimentación o abierto en donde la señal de salida no afecta el funcionamiento. Un controlador automático compara la salida de una planta con la entrada de referencia, obtiene la desviación y genera una señal de control (Ogata, 2013).

1.5 CONCEPTUALIZACIÓN

A continuación, se brinda información de conceptos relevantes que ayudará a comprender de mejor manera el proyecto planteado. Dichos conceptos están enmarcados en el proceso de recirculación para acuaponía.

Amonio: (NH_4^+) Uno de los componentes más tóxicos. Ingresa al sistema en forma de alimento como N_{org} (Nitrógeno orgánico). El (NH_4^+) se mineraliza del alimento no consumido, de las excretas de los peces y la biomasa (Schmautz et al., 2021).

Fotosíntesis: es un proceso químico en donde la energía de la luz se convierte en energía química. Este proceso permite que la planta crezca. Por lo tanto, en un sistema con luz Led, se intensifica este proceso (He et al., 2019).

Nitratos: (NO_3^-) es fuente de nitrógeno para las plantas, se forma por medio de bacterias nitrificantes que transforman el amonio en nitrato. Por lo tanto, en un sistema acuapónico es importante tener en cuenta estas bacterias (Ajijah et al., 2020).

Nitritos: (NO_2^-) compuesto de nitrógeno oxidado resultante del nitrógeno amoniacal total (TAN). Se oxida por bacterias como Nitrosomonas, Nitrosospira, Nitrosococcus entre otras (Adhikari et al., 2020).

PH: (Potencial de hidrogeno) es una medida de acidez dentro de una disolución. En un sistema acuapónico el nivel de pH bajo permite que las plantas crezcan mejor y en un nivel de pH alto el crecimiento de los peces es más eficiente y las bacterias nitrificantes tienen mejor rendimiento. Para un nivel de pH alto se puede agregar ácido fosfórico y para un nivel de pH bajo se puede agregar hidróxido de potasio o hidróxido de calcio (Mandap et al., 2018).

1.6 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Teniendo en cuenta las variables a controlar en este caso temperatura en el cultivo de plantas, temperatura del agua en el tanque de peces y control de nivel de agua

se plantean los sensores y actuadores que serán utilizados en cada uno de los procesos a controlar nombrando sus características, así como los demás actuadores que serán utilizados en la alimentación e iluminación.

1.6.1 Control de temperatura en las plantas

Se plantea el control utilizando un sensor de temperatura y como actuador un ventilador, la información correspondiente se encuentra en la tabla 3.

Tabla 3. Sensor y actuador para control de temperatura en plantas. [Elaboración propia].

	Nombre	Características	Imagen
Sensor	DS18B20	Precisión de 9 a 10 bits Temperatura desde -55°C hasta 125°C Margen de error de 0.5°	
Actuador	Ventilador 12V	Voltaje 12V Dimensiones de 80 x 80 x 25 mm Velocidad de 1000 a 3500 rpm	

1.6.2 Control de temperatura en los peces

El control se realiza utilizando -como sensor de temperatura sumergible y como actuador- una resistencia tubular sumergible, sus características se especifican en la tabla 4.

Tabla 4. Sensor y actuador para control de temperatura en peces. [Elaboración propia].

	Nombre	Características	Imagen
Sensor	DS18B20 sumergible	Rango de temperatura: -55 a 125°C. Resolución: de 9 a 12 bits Interfaz 1-Wire Identificador interno único de 64 bits. Alimentación: 3.0V a 5.5V	
Actuador	Resistencia tubular sumergible	Voltaje: 110 Vac Potencia: 1500 W Longitud tubo: 175 mm	

1.6.3 Control de nivel de agua

Este control se realiza con un sensor ultrasónico para medir el nivel, y como actuador una motobomba y una electroválvula, sus características se pueden observar en la tabla 5.

Tabla 5. Sensor y actuador para recirculación de agua. [Elaboración propia].

	Nombre	Características	Imagen
Sensor	HC-SR04	Tensión de alimentación: 5 Vcc Frecuencia de trabajo: 40 KHz Rango máximo: 4.5 m Rango mínimo: 1.7 cm	
Actuador	Motobomba	Voltaje de Operación: 120 VAC Frecuencia de Trabajo: 60 Hz Caudal Máximo: 220 L/H	

Además de los componentes mencionados, se incluye una lámpara led de cultivo para las plantas con leds rojos y azules, un servomotor de 360° para el alimentador y un sensor de pH.

La estructura se fabrica en tubería cuadrada de acero, la pecera junto con el filtro biológico es en vidrio y las conexiones de tubería del sistema es en PVC de diferentes diámetros.

Como productos consumibles se usa pegante PVC, pegante para madera, pintura, cinta teflón, montaje pu y electrodos.

El proyecto se realiza bajo una metodología de diseño mecatrónico centrada en la contextualización, diseño, fabricación y funcionamiento del sistema. En el diseño se realiza toda la parte correspondiente al análisis de la estructura, diseño del sistema y sus componentes de igual manera el diseño electrónico, software, junto con el modelado matemático de cada planta. Con base al diseño se construye el sistema. Los controladores de cada planta son simulados y comparados. Posteriormente se realiza una evaluación del sistema en un periodo de tiempo.

CAPÍTULO II

DISEÑO DEL SISTEMA

En este capítulo se presenta el diseño 3D del sistema acuapónico automatizado que se desarrolló mediante SOLIDWORKS, el cual es un software de diseño CAD (diseño asistido por computadora) que permite modelar piezas y ensamblajes en 3D y planos en 2D. Mediante dicho software se llevó a cabo el proceso de diseño de cada pieza y ensamble de las mismas para obtener el producto final del sistema. Este capítulo se encuentra dividido en cinco partes: en primer lugar, el diseño estructural donde se plantea la forma que tendrá el prototipo y la conformación de cada uno de los niveles, posteriormente se encuentra el diseño mecánico en donde se presenta el análisis de fuerzas en condiciones estáticas, asimismo, el estudio del factor de seguridad con base en el peso máximo al que estará sometida la estructura en cada uno de sus niveles. Luego, se presenta el diseño electrónico que permitirá realizar el control de las variables planteadas, también el modelo matemático que llevó a la concepción del control y, finalmente, el diseño software evidenciando la aplicación móvil donde se visualizan las variables controladas (temperatura en el cultivo de plantas, temperatura del agua en el tanque de peces y nivel de agua) y además el valor de pH.

2.1 DISEÑO CAD 3D

El diseño parte de un boceto dividido en tres niveles, el superior para el sistema NFT, el intermedio para el tanque de peces e inferior para el biofiltro. Se realiza el diseño estructural teniendo en cuenta cada uno de los niveles y partes, de igual manera se realiza el análisis de fuerzas en condiciones estáticas con base en las fuerzas máximas que tendrá que soportar la estructura en cada uno de sus niveles, en el nivel intermedio se tiene una masa de 60 kg equivalentes a 60 l teniendo en cuenta la densidad del agua, en el nivel inferior tendrá una masa de 40 kg equivalentes a 40 litros contenidos al interior del filtro del sistema y en el nivel

superior una masa de 5 kg como máximo dentro del sistema NFT, por lo tanto en relación a estas masas, serán las fuerzas que tendrá que soportar la estructura. También dentro del diseño se encuentra el ensamble final del prototipo en donde se visualiza la posición de los sensores y actuadores.

2.1.1 Boceto inicial del proyecto

El prototipo del sistema acuapónico se plantea de forma vertical, en donde las plantas están en el nivel superior dentro del sistema NFT, el tanque de peces (tilapia roja) está en el nivel intermedio y el filtro en el nivel inferior. Se tiene dos opciones las cuales se muestran en la ilustración 5.

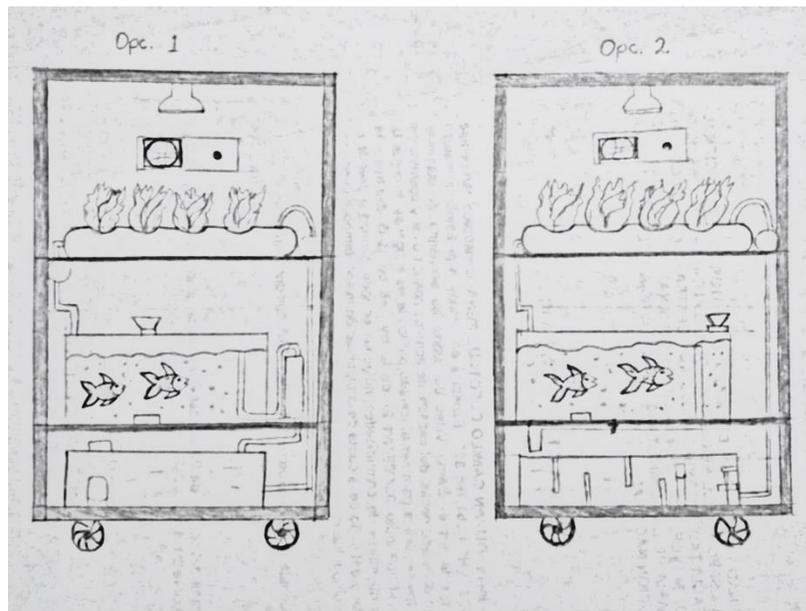


Ilustración 5. Boceto del proyecto. (autor).

La opción 1 tiene separado el filtro mecánico del filtro biológico, mientras que la opción 2 tiene unidos estos dos filtros en un sistema tipo cascada. Finalmente se escoge la opción dos, dado que se puede emplear el espacio libre del filtro mecánico para ubicar los circuitos donde estarán las conexiones necesarias dentro del sistema.

2.1.2 Diseño estructural

Para la estructura del sistema se utiliza tubería cuadrada de acero. La estructura del sistema cuenta con tres niveles, en el superior se ubica el sistema NFT, en el nivel intermedio se ubica la pecera y en el nivel inferior el filtro mecánico y biológico. Ver ilustración 6.

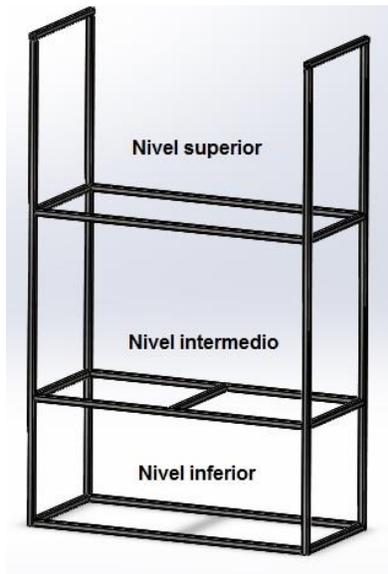


Ilustración 6. Diseño de estructura. (autor).

Sistema de filtrado: se diseña un filtro tipo cascada, dentro del cual está los componentes de un filtro mecánico como espuma, sabrá y guata, un filtro biológico con canutillos y tapas plásticas. Las dimensiones del filtro son de 60cm x 30cm x 25cm con 5 divisiones al interior del filtro con una capacidad para 30 litros de agua. Este tipo de filtro permite un fácil mantenimiento y montaje.

Pecera: el tanque de peces o pecera se diseña en vidrio para mantener claridad en los peces durante el día, con capacidad para 6 tilapias rojas, con medidas de 50cm x 40cm x 40cm dentro de las cuales el agua estará contenida en las siguientes medidas 50cm x 40cm x 30cm. Por lo tanto, la pecera contendrá 60 litros de agua.

Sistema NFT: se realiza en tubería PVC blanco de 3 pulgadas, con una longitud de 80 cm. Las perforaciones para las plantas de lechuga son de 5 cm de diámetro,

separadas 25 cm una de la otra. El sistema es para 6 plantas, por lo tanto, lleva dos tubos, cada uno con 3 perforaciones para las platas de lechuga.

Sistema de recirculación: pasa por el sistema NFT donde se encuentran las plantas de lechuga, siguiendo por el tanque de peces (Tilapia roja), posteriormente pasa por el sistema de filtrado, donde se encuentra espuma, sabrá, guata, canutillos tapas plásticas y una motobomba, que permite llevar el agua nuevamente al sistema NFT.

El software usado para el diseño es SolidWorks el cual permite modelar piezas 3D, realizar ensamble de las mismas, obtención de planos 2D, simulación y análisis.

Finalmente, se ensamblan cada una de las partes diseñadas a la estructura planteada. Ver ilustración 7.



Ilustración 7. Diseño del sistema acuapónico. (autor).

2.2 DISEÑO MECÁNICO

Se realiza un análisis de fuerzas en condiciones estáticas a la estructura del sistema acuapónico, con base en las fuerzas que actúan sobre ella. De esta manera se obtiene el análisis de tensiones, de desplazamiento y factor de seguridad.

La estructura se analiza con una carga de 105 kg (1029 N aprox.) resultante del peso máximo al que se ve sometido cada uno de los niveles, en este caso, en el nivel intermedio se encuentra el tanque de peces con una capacidad de 60000 cm³ equivalentes a 60 litros obtenido del volumen de 50cm x 30cm x 40cm del agua que será contenida al interior del tanque, el nivel intermedio contendrá 40000 cm³ de agua equivalentes a 40 litros. La densidad del agua es de 1kg/l, es decir un litro de agua tiene una masa de un kilogramo, por tal razón entre el nivel intermedio e inferior se tiene una masa de 100 kg. El nivel superior se expone a una carga máxima de 5 kg teniendo en cuenta el peso del sistema NFT y la madera empleada. Los análisis se muestran a continuación.

2.2.1 Análisis de tensión

La tensión máxima a la cual es sometida la estructura es de 2.525e+07 N/m² equivalente a 25.25 Mega Pascales. Ver ilustración 8.

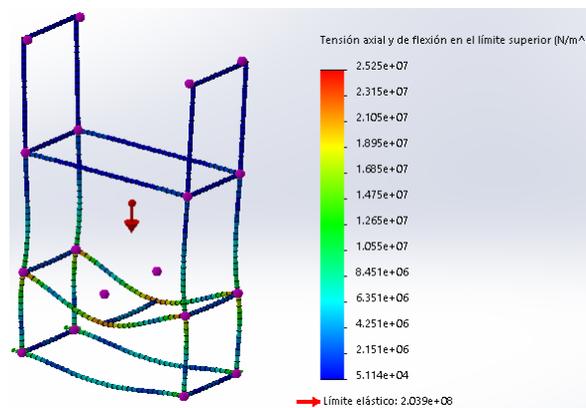


Ilustración 8. Análisis de tensión. (autor).

2.2.2 Análisis de desplazamiento

El desplazamiento máximo en la estructura del sistema es de 0.6 mm, este desplazamiento se realiza en el nivel medio de la estructura. Ver ilustración 9.

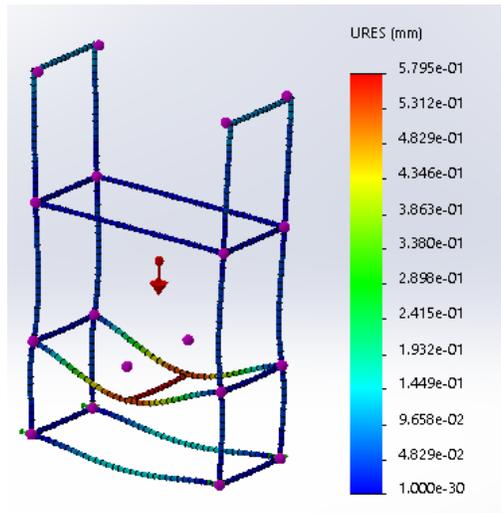


Ilustración 9. Análisis de desplazamiento. (autor).

2.2.3 Factor de seguridad

El factor de seguridad internacional recomendado debe ser mayor a 1.25. El factor de seguridad de la estructura es de 8.076, lo cual indica que la estructura del sistema es apta y puede soportar aún más. Ver ilustración 10.

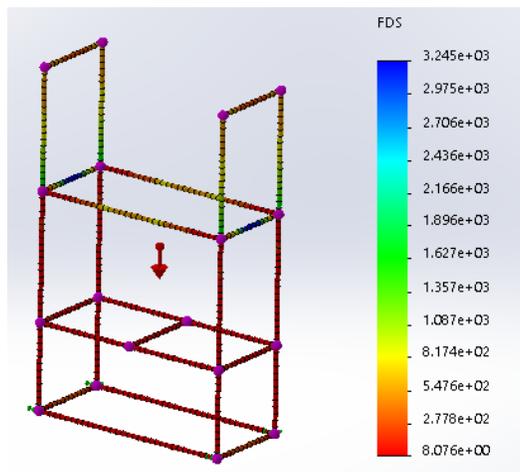


Ilustración 10. Factor de seguridad. (autor).

2.3 DISEÑO ELECTRÓNICO

Para el diseño electrónico se plantea un circuito basado en un detector de cruce por cero, con dos salidas de potencia para controlar actuadores AC, en este caso la bomba de agua y la resistencia eléctrica. También la salida para el control del ventilador, salidas de 5V DC y 12V DC, así como lectura para los sensores de temperatura. Finalmente, se establece los valores a controlar para cada una de las variables.

2.3.1 Detector de cruce por cero

Permite controlar la señal AC, dado que la corriente alterna es una onda senoidal que cambia su sentido bajo una frecuencia de 60 Hz en Colombia. Por esta razón, para poder controlar y variar la frecuencia es importante detectar cada vez que dicha señal pase por cero. El Triac se dispara después de una pausa en donde está apagado, cuando pasa por cero nuevamente se apaga. De esta manera se logra sincronizar la onda Ac con la señal que sale del controlador.

Al tener una frecuencia de 60Hz se obtiene el periodo ($1/\text{frecuencia}$) de 0.016666 segundos, equivalentes a 16.666 milisegundos. Por lo tanto, el cruce por cero será cada 8.333 milisegundos.

Se realiza un circuito en donde se encuentra el detector de cruce por cero, el controlador (Arduino uno), el circuito de potencia y en este caso, para realizar la prueba de variación, se conecta un potenciómetro. El circuito se evidencia en la ilustración 11.

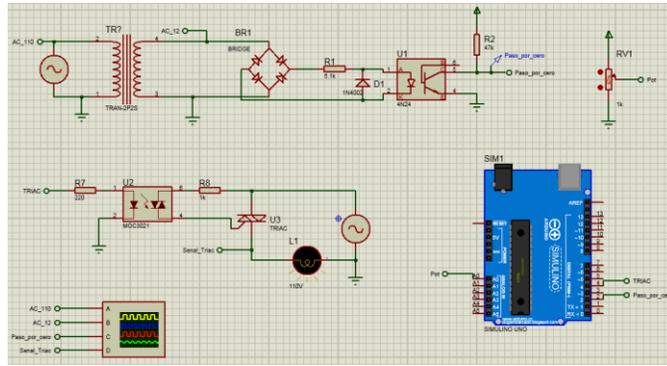


Ilustración 11. Circuito de prueba para detector de cruce por cero. (autor).

La variación en el potenciómetro se refleja en la apertura del Triac, variando la onda de la señal Ac. Por medio del osciloscopio se observa las diferentes ondas. En las ilustraciones 12 y 13 se observa de color amarillo la entrada de 110 V AC, de azul la señal de 12 V AC, de rojo la de cruce por cero y de verde la variación de la señal.

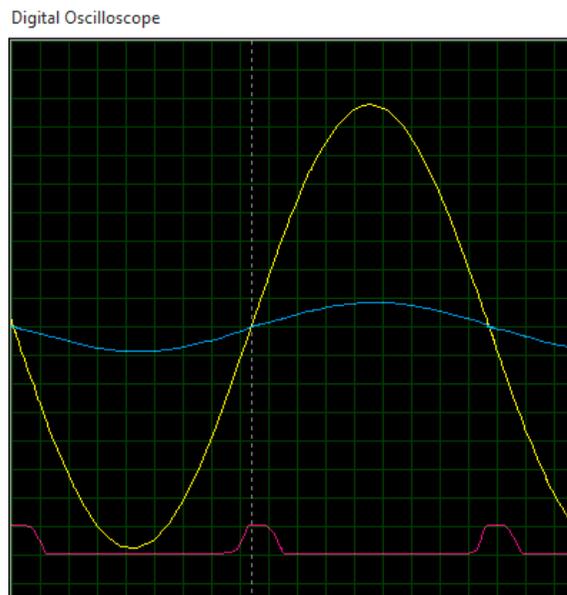


Ilustración 12. Grafica cruce por cero. (autor).

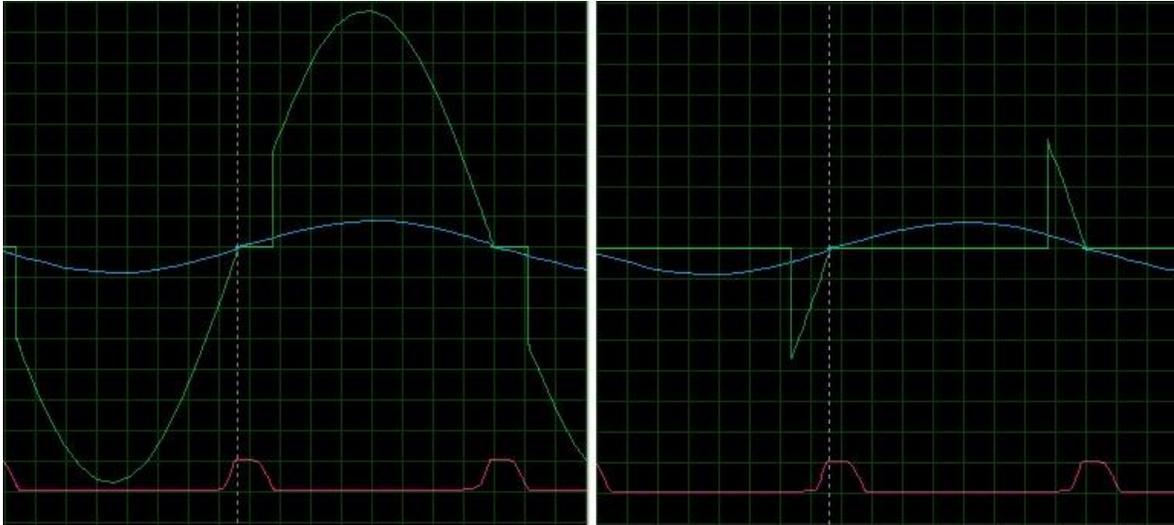


Ilustración 13. Variación de frecuencia AC. (autor).

2.3.2 Circuito para detección de cruce por cero

Se realiza el circuito de detector de cruce por cero con dos salidas de potencia correspondientes a la motobomba y el calentador de agua. El circuito también cuenta con entrada para sensores de temperatura, salidas de voltaje 5V DC y 12 V DC. El circuito se realiza en Eagle. Ver la Ilustración 14.

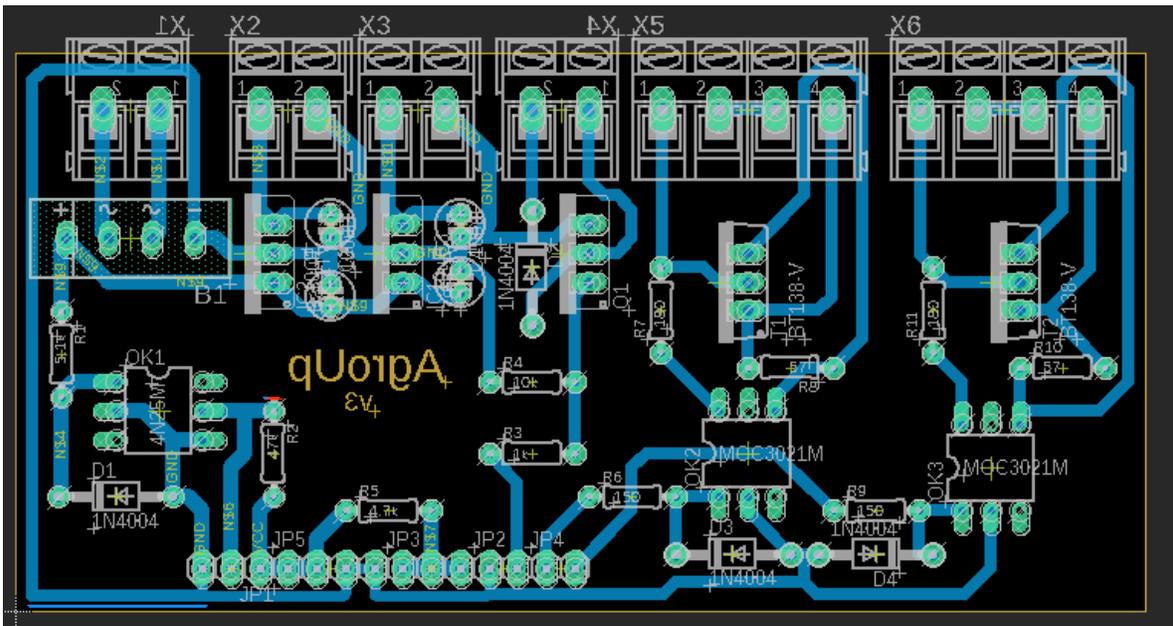


Ilustración 14. Esquema de circuito eléctrico. (autor).

2.3.3 Consignas de variables a controlar

Se tiene 3 variables a controlar las cuales son nivel de agua, temperatura en el cultivo de plantas y temperatura del agua en el tanque de peces. El control de nivel estará en un valor de 150 mm como consigna al sistema de control, el de temperatura en el cultivo de plantas en 23°C y el de temperatura en el tanque de peces en 27°C. Ver ilustración 15.

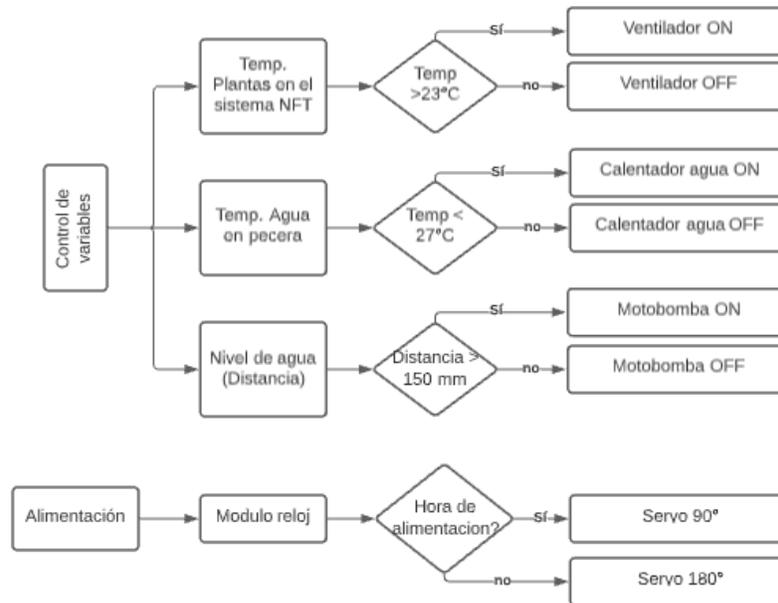


Ilustración 15. Diagrama para control de variables. (autor).

2.4 MODELO MATEMÁTICO

Se plantea el modelo matemático para cada una de las variables a controlar. Para las plantas de temperatura se tiene en cuenta la capacidad térmica definida mediante el cambio de calor almacenado (Kcal) bajo el cambio de temperatura en grados centígrados (°C). Por lo tanto, la capacidad térmica vendría dada por la masa en kg y el calor específico de la sustancia en Kcal/kg°C. Para la planta de temperatura en el cultivo de plantas la masa se calcula conociendo la densidad, en este caso del aire y el volumen en donde estará contenido. Para obtener el caudal másico del aire se calcula la velocidad del aire y el área transversal de ingreso. Para

la planta de temperatura del agua en el tanque de peces, la masa depende de la cantidad de agua contenida de igual forma partiendo de la densidad, en este caso del agua, el caudal másico se calcula observando la cantidad de agua en litros que ingresa cada segundo. (Tener en cuenta que 1 litro equivale a 1 kg solo para el agua). Para la planta de nivel se tiene en cuenta el cambio en la diferencia de nivel en metros, bajo el cambio en la velocidad de flujo en m³/s. De forma experimental se calcula el caudal en m³/s, con base a la altura o nivel a controlar se calcula la resistencia hidráulica bajo el criterio de la pendiente, caudal vs altura. (Ogata, 2013).

2.4.1 Modelo matemático planta de Temperatura en el cultivo de plantas

A continuación, se plantea el modelo matemático de la planta de temperatura en el cultivo de la lechuga. La ecuación diferencial (1) relaciona el cambio en el flujo de calor del proceso en un instante de tiempo, en función de la capacitancia térmica adicional.

$$C \frac{d\theta}{dt} = h_i - h_o \quad (1)$$

Donde C : Capacitancia

$$C = mc \quad (2)$$

$$C = \frac{\text{cambio en el calor almacenado, [kcal]}}{\text{cambio en la temperatura, [°C]}}$$

Con,

$$c: \text{Calor específico, } \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$$

$$m: \text{masa, [kg]}$$

Se tiene,

$$C \frac{d\theta}{dt} = Gc\theta_i - Gc\theta_o \quad (3)$$

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (4)$$

Donde m : masa, v : volumen

$$m = 1.225 \frac{kg}{m^3} * 0.1752 m^3 \quad (5)$$

$$m = 0.215 kg$$

$$C = mc \quad (6)$$

$$\text{donde } c = 0.24 \frac{Kcal}{Kg * ^\circ C} \rightarrow C = mc \rightarrow C = 0.0516$$

Velocidad del aire

$$V = rpm * c \quad (7)$$

$$\text{donde } c = \text{circuferencia} = \pi * D = 0.63m$$

$$rpm = 76 \rightarrow V = 0.8 \frac{m}{s}$$

Caudal másico

$$Qv = s * v \quad (8)$$

$$\text{donde } s = \text{superficie}, \quad v = \text{velocidad}$$

$$Qv = 0.041 m^2 * 0.8 \frac{m}{s}$$

$$Qv = 0.0328 \frac{m^3}{s}$$

$$Qm = Qv * \rho(\text{aire}) \quad (9)$$

$$Qm = 0.040 \frac{kg}{s}$$

$$Gc = 0.04 \frac{kg}{s} * 0.24 \frac{Kcal}{Kg * ^\circ C} = 0.0096 \frac{Kcal}{s * ^\circ C}$$

Aplicando Laplace (L [f'(t)]) = sL [f(t)] - f (0)

$$Cs\theta_o(s) = Gc\theta_i(s) - Gc\theta_o(s)$$

$$Cs\theta_o(s) + Gc\theta_o(s) = Gc\theta_i(s)$$

$$[Cs + Gc]\theta_o(s) = Gc\theta_i(s)$$

$$\frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{Gc}{Cs + Gc}$$

$$\frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{1}{\frac{C}{Gc}s + 1}$$

$$\frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{1}{5.38s + 1} \quad (10)$$

La función de transferencia obtenida en la ecuación (10) tiene ganancia K=1; $Tao(\tau) = 5.38$; cantidad de ceros = 0; cantidad de polos = 1 en $-1/5.38$; por lo tanto, es sistema estable en lazo abierto.

2.4.2 Modelo matemático planta de Temperatura en el tanque de peces

Ahora, se plantea el modelo matemático de la planta de temperatura en el tanque de peces. La ecuación diferencial (11) relaciona el cambio en el flujo de calor del proceso en un instante de tiempo, en función de la capacitancia térmica adicional.

$$C \frac{d\theta}{dt} = h_i - h_o \quad (11)$$

Donde

C: Capacitancia

$$C = mc \quad (12)$$

Con,

c: Calor específico, $\left[\frac{Kcal}{Kg * ^\circ C} \right]$

m: masa, [kg]

Se tiene,

$$C \frac{d\theta}{dt} = Gc\theta_i - Gc\theta_o$$

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (13)$$

Donde m : masa, v : volumen

$$m = 997 \frac{kg}{m^3} * (0.39m * 0.49m * 0.3) \quad (14)$$

$$m = 56.829kg$$

$$C = mc \quad (15)$$

$$\text{donde } c = 0.93 \frac{Kcal}{Kg * ^\circ C} \rightarrow C = 52.85$$

Se calcula los ml que pasan en 10s.

$$10s \text{ pasan } 1200ml \rightarrow 1s \text{ pasan } 120ml = 0.12L \rightarrow 0.12 \frac{Kg}{s}$$

$$Gc = 0.12 \frac{kg}{s} * 0.93 \frac{Kcal}{Kg * ^\circ C} = 0.11 \frac{Kcal}{s * ^\circ C}$$

Aplicando Laplace (L [f'(t)]) = sL [f(t)] - f (0)

$$Cs\theta_o(s) = Gc\theta_i(s) - Gc\theta_o(s)$$

$$Cs\theta_o(s) + Gc\theta_o(s) = Gc\theta_i(s)$$

$$[Cs + Gc]\theta_o(s) = Gc\theta_i(s)$$

$$\frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{Gc}{Cs + Gc}$$

$$\frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{1}{\frac{C}{Gc}s + 1}$$

$$\frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{1}{480.45s + 1} \quad (16)$$

La función de transferencia obtenida en la ecuación(16) tiene ganancia $K=1$; $Tao(\tau) = 480.45$; cantidad de ceros = 0; cantidad de polos = 1 en $-1/480.45$; por lo tanto, es estable en lazo abierto.

2.4.3 Modelo matemático planta de nivel de agua

A continuación, se plantea el modelo matemático de la planta de nivel de agua. La ecuación diferencial (17) proporciona la diferencia del caudal de entrada menos el caudal de salida en un instante de tiempo, en función de la cantidad adicional almacenada en el tanque.

$$Cdh = (q_i - q_o)dt \quad (17)$$

Donde C : capacidad o área transversal, q_i : Caudal de entrada en $\frac{m^3}{s}$

$$q_o = \frac{h}{Rl} \quad (18)$$

donde Rl : Resistencia hidraulica

Criterio de la pendiente Caudal vs Altura

$$Pendiente = \frac{H - (-H)}{Q - 0} = \frac{2H}{Q} = Rl \quad (19)$$

$$Q = 0.00012 \frac{m^3}{s}$$

$$H = 0.14m$$

$$Rl = \frac{2 * 0.14}{0.00012} = 2333.4$$

$$C \frac{dh}{dt} = qi - \frac{h}{Rl}$$

$$Rl * C \frac{dh}{dt} = Rl * qi - h$$

Aplicando Laplace (L [f'(t)]) = sL [f(t)] - f(0)

$$RlCH(s) = RlQi(s) - H(s)$$

$$\frac{H(s)}{Qi(s)} = \frac{Rl}{RlC + 1}$$

$$\frac{H(s)}{Qi(s)} = \frac{2333.4}{142.104s + 1} \quad (20)$$

La función de transferencia obtenida en la ecuación (20) tiene ganancia K=2333.4; Tao (τ) = 142.104; cantidad de ceros = 0; cantidad de polos = 1 en -1/142.104; por lo tanto, es estable en lazo abierto.

2.5 DISEÑO DE SOFTWARE

La realización de la app móvil se centra en cuatro etapas fundamentales las cuales son análisis, diseño, desarrollo y pruebas. Dentro de la etapa de análisis se define, clasifica y ordena qué variables dentro del sistema acuapónico aportan información útil al usuario. En la etapa de diseño se plantea el entorno de la aplicación el cual tiene que ser agradable y atractivo para el usuario, fácil de entender y visualizar los datos. En desarrollo se crea la app empezando por la parte de comunicación, para ello, se crea una app base que permita conectar el módulo bluetooth con el celular, una vez establecida la comunicación se programa la app para visualizar los datos de igual manera se programa el controlador para enviar la información. En la etapa de pruebas se inspecciona el manejo de la app y se realizan ajustes necesarios.

Para el desarrollo de la app móvil se usa App inventor el cual es un entorno de desarrollo de software, permite crear aplicaciones destinadas al sistema operativo de Android, su acceso es gratuito a través de la web.

Los datos a visualizar dentro de la app son temperatura del agua en el tanque de peces, temperatura en el cultivo de plantas, nivel del agua y pH del agua (ver ilustración 54).

CAPÍTULO III

CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA

Para la elaboración del prototipo se parte de los diseños establecidos, con las medidas reales de cada componente, se realizan los cortes correspondientes, así como las perforaciones y adecuaciones necesarias para sujetar las piezas mediante tornillos. Una vez elaboradas todas las piezas físicas se pasa a verificar que las medidas reales correspondan con las indicadas en el diseño CAD esto con el fin de lograr un óptimo trabajo de ensamble además de optimizar el uso del material necesario sin necesidad de desperdiciarlo.

3.1 IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

El tanque para los peces se realiza en vidrio con unas medidas de 50cm de largo por 40 cm de ancho y 40 cm de alto en el cual el agua subirá hasta 30 cm de alto, su equivalente en volumen es 60 litros de agua. El sistema de filtrado tipo cascada se realizó en vidrio con unas medidas de 60 cm de largo por 30 cm de ancho y 25 cm de alto, en su interior presenta variación en el nivel de agua, su volumen es de 30 litros de agua aproximadamente. La estructura se soldó con electrodo y la distancia vertical en el nivel inferior fue de 35 cm, nivel medio de 53 cm y 50 cm en el nivel superior. La división vertical de cada nivel se realizó en madera con las medidas de 90 cm de largo por 40 cm de ancho, las esquinas fueron recortadas a la medida del tubo de la estructura para poderla colocar en cada nivel. En tubería de 3" se usó 4 tapones, dos tubos de 80 cm de largo los cuales fueron perforados con una copa de 5 cm y se unieron a la tubería de 1/2". Para la conexión de 1/2" se usó 13 codos, 2 tees, 1 llave y 2 uniones rosca macho. En tubería de 1 1/2" se usó un tubo de 30 cm y dos tapones con 3 perforaciones en el tubo para manguera de 1/2".

3.1.1 Fabricación del prototipo

Teniendo presente el diseño, se empieza por realizar los cortes de la estructura, con ayuda de una pulidora se retiran rebabas en el lugar del corte con el fin de generar una unión adecuada al momento de soldar. Con ayuda de escuadras y prensas se suelda el marco base junto con los cuatro laterales. Con ayuda de un metro se marca el nivel medio y superior para posteriormente nivelar, prensar y soldar.

Una vez soldada la estructura, con la ayuda de pulidora se realiza el proceso de limpieza para aplicar pintura. Posteriormente se corta la madera de cada uno de los niveles, se pega con montaje Pu, el cual es un adhesivo a base de poliuretano para pegues de alta exigencia y durabilidad. Se corta y pega la tubería PVC. Para el caso de las peceras se recibe el vidrio cortado para poder ensamblar y pegar conforme el diseño.

Se realiza perforación para el ventilador, luz infrarroja y paso de la tubería PVC al filtro. Finalmente se ensamblan las partes, la pecera y el filtro se colocan sobre una base de icopor para evitar posibles fisuras. Se ubican los sensores y actuadores, su cableado se realiza por la parte de atrás del sistema acuapónico. Ver la ilustración 16.



Ilustración 16. Construcción del prototipo. (autor).

Se procede con la conexión de cada uno de los componentes que serán ubicados en la caja de control realizada en madera con medidas de 32cm x 25cm x 13cm con una perforación para un ventilador pequeño de 12 Vdc, destapada en la parte de atrás para la conexión de sensores y actuadores con una puerta unida a dos bisagras en la parte superior. Dentro se encuentra los componentes que permiten el funcionamiento del sistema acuapónico automatizado. Ver ilustración 17.



Ilustración 17. Caja de control. (autor).

3.2 CONTROL DEL SISTEMA

Para cada una de las plantas propuestas se realiza tres controladores variando el sobre impulso y el tiempo de establecimiento con el fin de exigir una respuesta mucho más rápida y controlada, se ponen a prueba y se escoge el que tenga mejor respuesta. Con el método de Ziegler Nichols se obtiene control P, PI y PID, de igual manera se comparan los tres obtenidos. También se realiza un controlador RST mediante la obtención de datos ante una entrada escalón o variación de la misma para el caso de la planta de nivel. Por último, se realiza una comparación con los tres controladores escogidos con el fin de implementar aquel que obtuvo mejor

respuesta ante una variación de set point y perturbación tanto física como en simulación.

3.2.1 Planta de temperatura en el cultivo de plantas

Se propone un tiempo de establecimiento en lazo cerrado de n veces τ y un sobre paso dado en porcentaje en lazo cerrado. La idea es variar estos valores y observar el comportamiento de los controladores obtenidos.

$$G(s) = \frac{1}{5.38s + 1} \quad (21)$$

Se opera matemáticamente el lazo cerrado entre la función de transferencia estándar de un controlador PI con la función de transferencia de la planta de temperatura, con realimentación unitaria. La ecuación (22) representa la función de transferencia de lazo cerrado.

$$G_c(s) = \frac{K_p(1 + \frac{1}{T_i s})(\frac{K}{T_s + 1})}{1 + K_p(1 + \frac{1}{T_i s})(\frac{K}{T_s + 1})} \quad (22)$$

Ordenando términos se tiene,

$$G_c(s) = \frac{\frac{K_p * K}{T_i T} (T_i s + 1)}{s^2 + \frac{1}{T} (1 + K_p * K) s + \frac{K_p * K}{T_i T}} \quad (23)$$

Ahora, se iguala el denominador de la función de transferencia en lazo cerrado con el de la función de transferencia estándar de 2° orden:

$$s^2 + \frac{1}{T} (1 + k_p k) s + \frac{K_p K}{T_i T} \leftrightarrow s^2 + 2\epsilon \omega_n s + \omega_n^2 \quad (24)$$

Las ecuaciones (25) y (26) determinan la igualación de los términos de primer orden y los términos independientes, respectivamente.

$$\frac{1}{T} (1 + k_p k) s = 2\epsilon \omega_n s \quad (25)$$

$$\frac{KpK}{TiT} = \omega n^2 \quad (26)$$

Se inicia con un tiempo de establecimiento (tst) del 3τ , teniendo en cuenta que se va a controlar una variable de temperatura, lo que da tiempo suficiente al controlador para permitir la estabilidad requerida con un sobre impulso máximo (Mpd) de 15%.

Cálculo para sobrepaso máximo de 15% y tiempo de establecimiento de 3τ

$tst = 3(5.38) = 16.14s$; $Mpd = 15\% = 0.15$. Las ecuaciones (27) y (28) expresan el factor de amortiguamiento deseado y la frecuencia natural no amortiguada deseada del sistema, respectivamente.

$$\varepsilon d = \sqrt{\frac{(\ln(Mpd))^2}{\pi^2 + (\ln(Mpd))^2}} = 0.517 \quad (27)$$

$$\omega nd = \frac{4.6}{tst * \varepsilon d} = 0.551 \frac{rad}{s} \quad (28)$$

Los valores hallados en las ecuaciones (27) y (28) se reemplazan en las ecuaciones (25) y (26) para obtener Kp y Ti .

$$\frac{1}{5.38}(1 + kp(1))s = 0.57 \rightarrow Kp = 2.066 \quad (29)$$

$$Ti = \frac{KpK}{\omega n^2 * T} \rightarrow Ti = 1.26 \quad (30)$$

Con los valores de las ecuaciones (29) y (30) se procede a la construcción del controlador PI:

$$Gc(s) = PI(s) = Kp(1 + \frac{1}{Tis})$$

$$PI(s) = 2.066 + \frac{2.066}{1.26s} = \frac{2.06316s + 2.066}{1.26s} \quad (31)$$

La ecuación (31) expresa la función de transferencia del controlador PI con las condiciones de diseño propuestas (sobrepaso máximo de 15% y tiempo de establecimiento de 3τ).

Cancelación de cero directa

El efecto del cero real es principalmente aumentar el sobrepaso, la cancelación de cero permite eliminar ruidos y acelerar la respuesta. La ecuación (33) expresa la función de cancelación de cero, en donde:

Numerador: Término independiente del denominador de la función de transferencia de lazo cerrado (ver ecuación 23).

Denominador: Zero de la función de transferencia de lazo cerrado (ver ecuación 23).

$$Czd = \frac{\frac{KpK}{TiT}}{\frac{K}{TiT}(KpTis + Kp)} = \frac{Kp}{KpTis + Kp} \quad (32)$$

$$Czd = \frac{2.066}{2.60316s + 2.066}$$

$$Czd = \frac{1}{1.26s + 1} \quad (33)$$

Se realiza una modificación en donde se exige al controlador tener menor sobrepaso manteniendo el mismo tiempo de establecimiento.

Cálculo para sobrepaso máximo de 10% y tiempo de establecimiento de 3τ .

$$tst = 3(5.38) = 16.14s; Mpd = 10\% = 0.1$$

$$Kp = 2.065$$

$$Ti = 1.65$$

$$PI(s) = \frac{3.4072s + 2.065}{1.65s}$$

$$Czd = \frac{1}{1.65s + 1}$$

Se exige al controlador tener menor sobrepaso, pero en este caso el tiempo de establecimiento es incrementado.

Cálculo para sobrepaso máximo de 5% y tiempo de establecimiento de 4τ

$$tst = 4(5.38) = 21.52s; \quad Mpd = 5\% = 0.05$$

$$Kp = 1.297$$

$$Ti = 2.511$$

$$PI(s) = \frac{3.256s + 1.297}{2.511s}$$

$$Czd = \frac{1}{2.51s + 1}$$

En la ilustración 18 se realiza una comparación de cada uno de estos controladores (15% 3τ , 10% 3τ , 5% 4τ). Se ponen a prueba ante una variación de set point y ante una perturbación. El controlador con las condiciones de 10% 3τ , logra un buen control de temperatura y respuesta rápida al probarlo físicamente en comparación a los otros controladores. Ver ilustración 19.

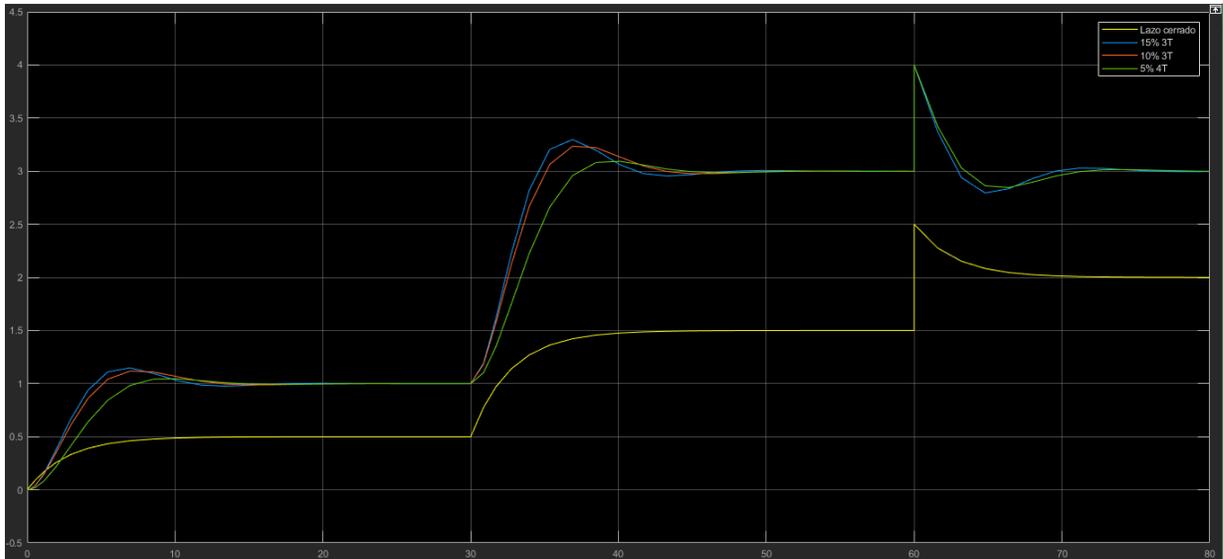


Ilustración 18. Comparación de controladores, temperatura en cultivo de plantas. (autor).

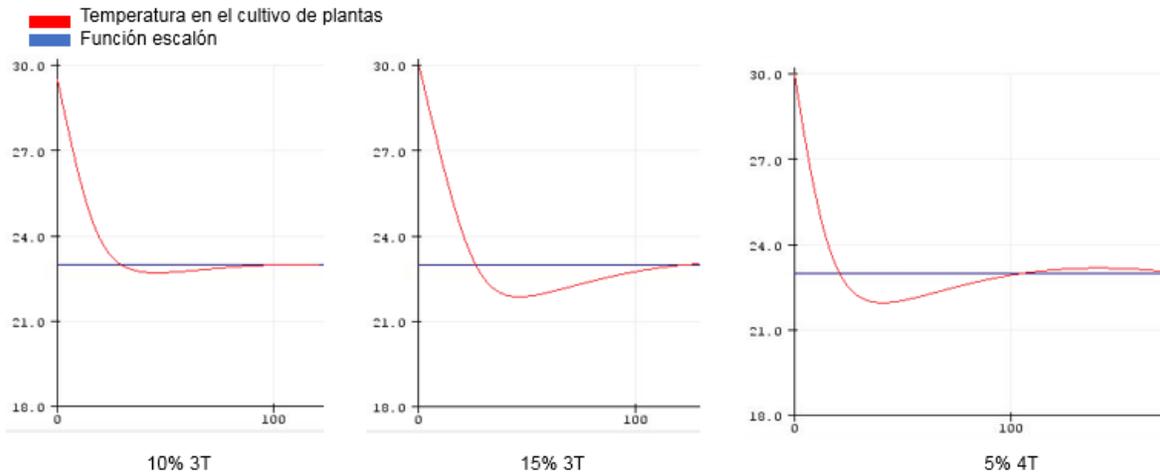


Ilustración 19. Respuesta del actuador, temperatura en el cultivo de plantas. (autor).

Método de Ziegler Nichols

Este método permite sintonizar un controlador PID de forma empírica, donde a través de datos ante una entrada escalón o a partir de la función de transferencia de modelo matemático se obtiene los datos para el controlador.

Control P $\rightarrow K_p = 6$

Control PI $\rightarrow K_p = 5.4 \quad T_i = 3.33$

Control PID $\rightarrow K_p = 7.2 \quad T_i = 2 \quad T_d = 0.5$

La ilustración 20, muestra la comparación de los tres controladores obtenidos con el método de Ziegler Nichols ante una variación de set point y una perturbación. Se escoge el controlador PI dado que realiza un buen control al estabilizar en menor tiempo que los otros controladores, además, presenta un sobreimpulso aceptable, tanto en simulación como físicamente. Ver ilustración 21.

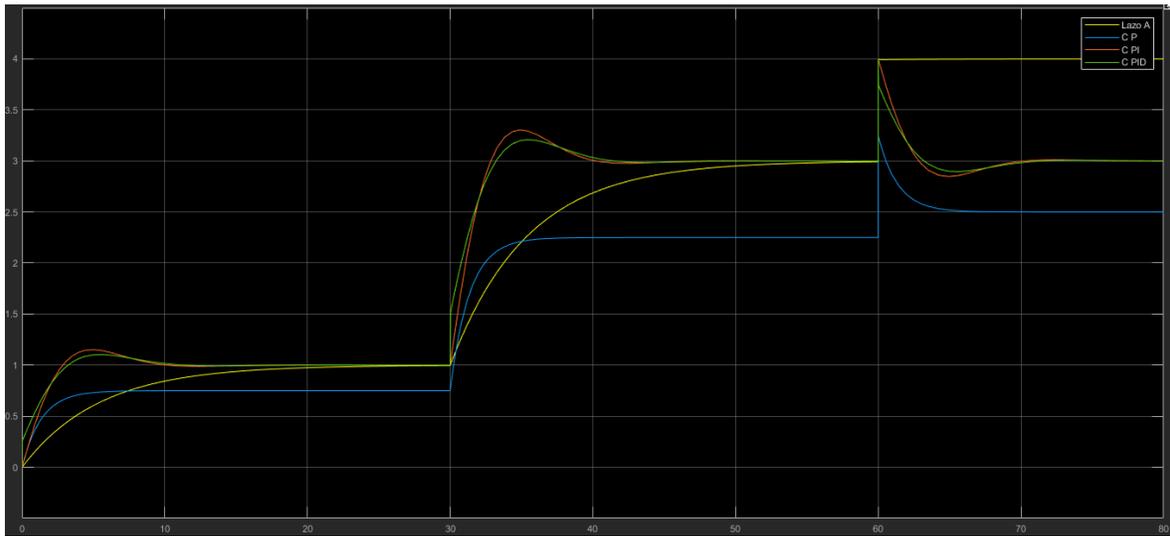


Ilustración 20. Comparación Método de Ziegler Nichols, temperatura en el cultivo de plantas. (autor).

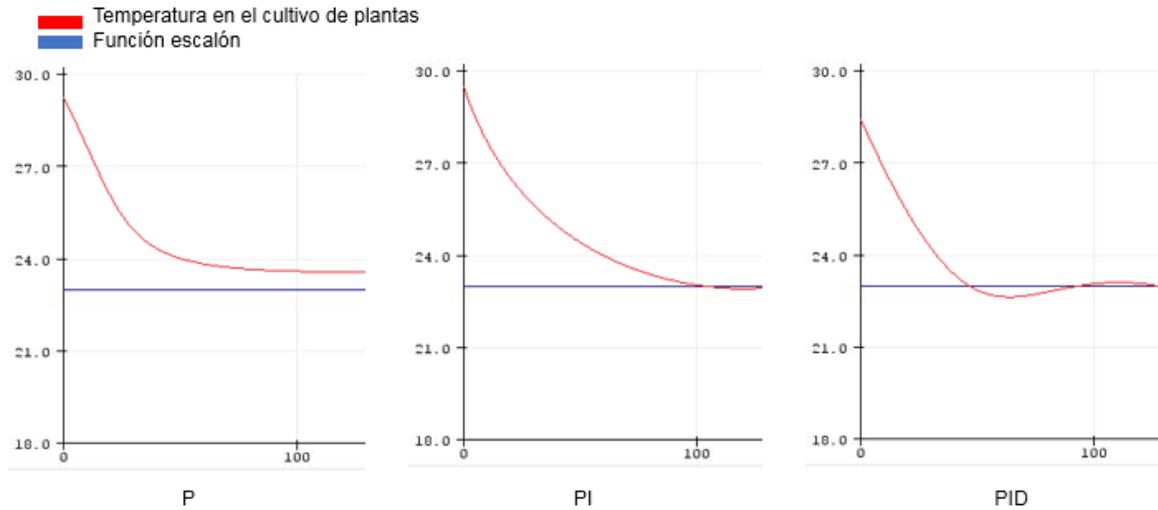


Ilustración 21. Respuesta del actuador Método de Ziegler Nichols, temperatura en el cultivo de plantas. (autor).

Control RST

Se recolectan datos de la variación del sensor de temperatura en el cultivo de plantas con base en una entrada escalón. Usando la función 'systemIdentification' en Matlab, se obtiene la función de transferencia de la ecuación (34) la cual se relaciona en un 93.78%. Ver ilustración 22.

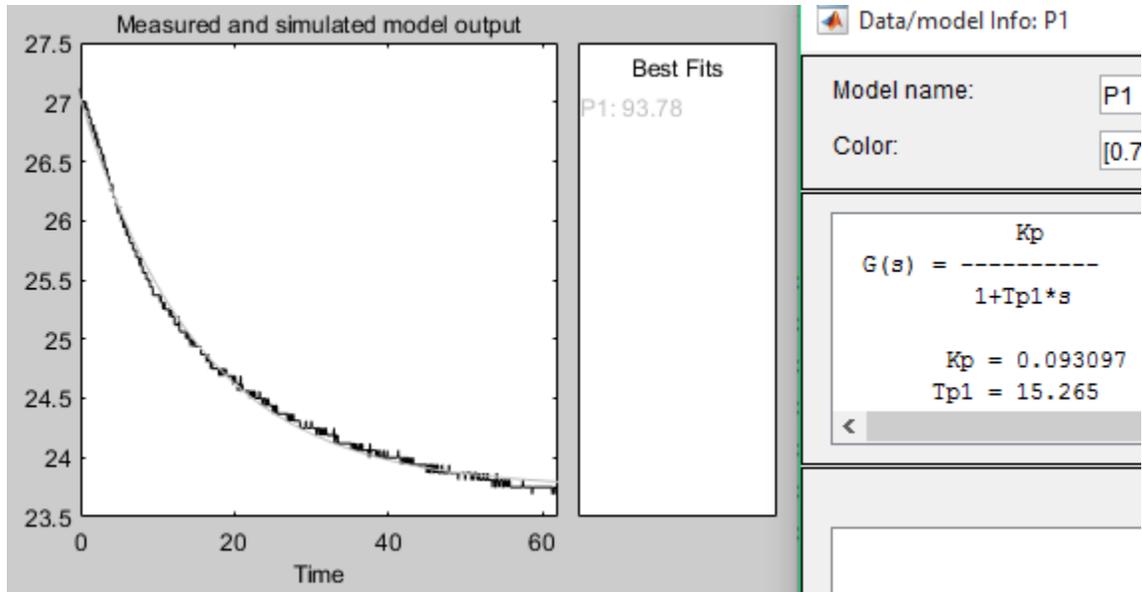


Ilustración 22. Función de transferencia, temperatura en el cultivo de plantas. (autor).

$$Planta = \frac{0.093}{15.265s + 1} \quad (34)$$

Se proponen los siguientes criterios de diseño:

$$tss = 45.6 \quad tssd = 52$$

$$\varepsilon = 0.8 \quad Teq = T = 15.265$$

$$0.2(Teq) < Ts < 0.6(Teq) \rightarrow 3.053 < Ts < 9.159 \quad (35)$$

$$Ts = 4 \quad \omega = 0.072$$

$$Planta discretizada = \frac{0.02144}{z - 0.7695} \leftrightarrow \frac{0.02144q^{-1}}{1 - 0.7695q^{-1}} = \frac{B}{A}$$

Obtención del Polinomio deseado:

$$P = \frac{0.0052}{s^2 + 0.1152s + 0.0052} \rightarrow \frac{0.03564q^{-1} + 0.03056q^{-2}}{1 - 1.565q^{-1} + 0.6308q^{-2}}$$

$$P^T = [1 \quad -1.565 \quad 0.6308 \quad 0]$$

Para que la ecuación diofántica tenga solución debe cumplir las siguientes condiciones:

A y B no deben tener factores comunes

$$N_p \leq N_a + N_b + d - 1$$

$$N_s = N_b + d - 1$$

$$N_r = N_a - 1$$

Donde N_a es el orden del polinomio A, N_b orden del polinomio B, N_p orden del polinomio deseado y d el valor del retardo. N_r y N_s orden de los polinomios R y S.

$$Glc(q^{-1}) = \frac{q^{-d}T(q^{-1})B(q^{-1})}{A(q^{-1})S(q^{-1}) + q^{-d}B(q^{-1})R(q^{-1})} = \frac{q^{-d}T(q^{-1})B(q^{-1})}{P(q^{-1})} \quad (36)$$

Polinomio característico

$$P(q^{-1}) = A(q^{-1})S(q^{-1}) + q^{-d}T(q^{-1})R(q^{-1}) \quad (37)$$

Para que las condiciones se cumplan, r y s deberán ser de orden 1, $N_a \geq 2$, $N_b \geq 2$

$$(1 + a_1q^{-1})(1 + s_1q^{-1} + s_2q^{-2}) + (b_1q^{-1} + b_2q^{-2})(r_0 + r_1q^{-1})$$

Se consideran entonces, los siguientes cambios de variable, de donde se obtiene la ecuación 38:

$$s_1 = s'_1 - 1 \quad s_2 = -s'_1$$

$$(1 + a_1q^{-1})(1 + (s'_1 - 1)q^{-1} - s'_1q^{-2}) + (b_1q^{-1} + b_2q^{-2})(r_0 + r_1q^{-1})$$

$$1 + (s'_1 - 1)q^{-1} - s'_1q^{-2} = (1 - q^{-1}) + s'_1q^{-1}(1 - q^{-1}) = (1 - q^{-1})(1 + s'_1q^{-1})$$

$$(1 + a_1q^{-1})(1 - q^{-1})(1 + s'_1q^{-1}) + (b_1q^{-1} + b_2q^{-2})(r_0 + r_1q^{-1})$$

$$A'(q^{-1}) = (1 + a_1q^{-1})(1 - q^{-1}) = 1 + a'_1q^{-1} + a'_2q^{-2} + a'_3q^{-3}$$

$$a'_1 = a_1 - 1 = -1.7695 \quad a'_2 = -a_1 = 0.7695$$

$$X = M^{-1} * P \quad (38)$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ s'1 \\ ro \\ r1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1.7695 & 1 & 0.02144 & 0 \\ 0.7695 & -1.7695 & 0 & 0.02144 \\ 0 & 0.7695 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} 1 \\ -1.565 \\ 0.6308 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ s'1 \\ ro \\ r1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 9.5382 \\ -6.4995 \end{bmatrix}$$

$$ro = 9.5382 \quad r1 = -6.4995$$

$$s1 = s'1 - 1 \quad s1 = -1$$

$$R(q^{-1}) = 9.5836 - 6.4995q^{-1} \quad S(q^{-1}) = 1 - q^{-1}$$

Finalmente, en la ecuación (40) se obtiene $T(q^{-1})$

$$P(q^{-1}) = 1 - 1.565q^{-1} + 0.6305q^{-2}$$

$$B(q^{-1}) = 0.0214q^{-1} \quad B(1) = 0.0214$$

$$\text{Si } B(1) \neq 0 \rightarrow T(q^{-1}) = \frac{P(q^{-1})}{B(1)} \quad (39)$$

$$T(q^{-1}) = 46.726 - 73.116q^{-1} + 29.4738q^{-2} \quad (40)$$

Ahora, se realiza la simulación de la planta en lazo abierto, lazo cerrado, del controlador RST y RST con seguimiento y regulación, para observar el comportamiento ante una variación de set point y una perturbación. Ver ilustración 23. Respuesta del actuador con control RST ver ilustración 24.

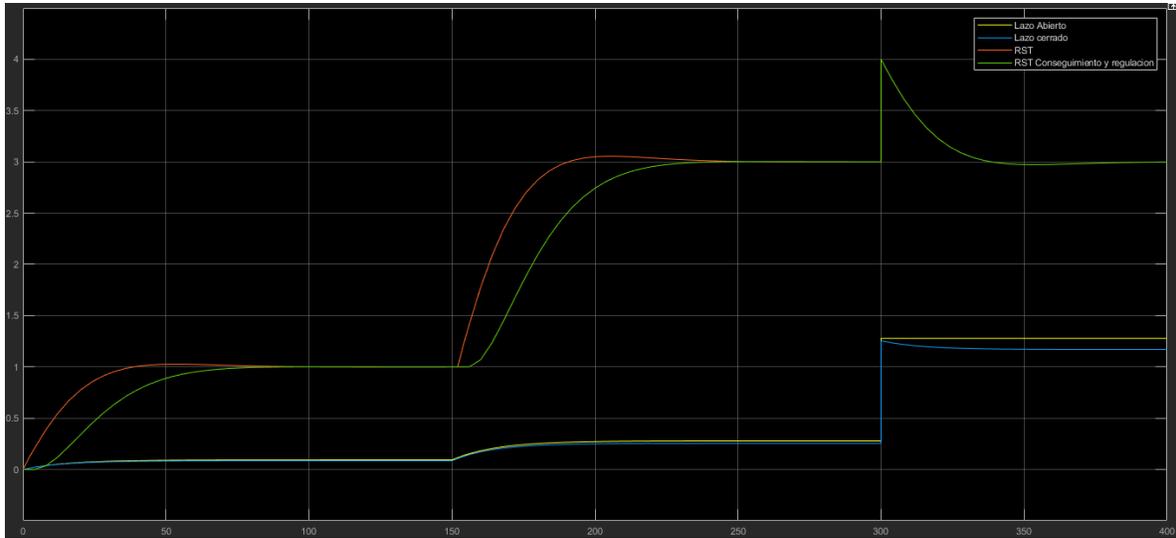


Ilustración 23. Controlador RST, temperatura en el cultivo de plantas. (autor).

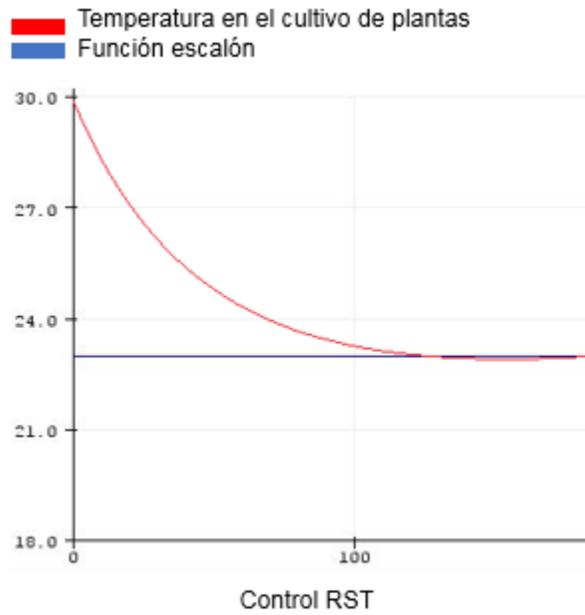


Ilustración 24. Respuesta del actuador con control RST, temperatura en el cultivo de plantas. (autor).

Realización canónica RST

Suponiendo $R=T$

$$\frac{R(q^{-1})}{S(q^{-1})} = \frac{9.5836 - 6.4995q^{-1}}{1 - q^{-1}} = \frac{9.5836 - 6.4995}{q - 1} \quad (41)$$

Volver la ecuación (41) estrictamente propia,

$$9.5836 + \frac{3.0831}{q - 1} = \frac{\mu k}{e(kh)}$$

$$\mu k = 9.5836e(kh) + \frac{3.0831e(kh)}{q - 1} \quad (42)$$

Se toma la variable auxiliar de la ecuación (42),

$$X(kh) = \frac{e(kh)}{q - 1} \rightarrow e(kh) = x(kh)(q - 1)$$

$$e(kh) = x(kh + h) - x(kh) \quad (43)$$

Se despeja para el estado más desplazado de la ecuación (43),

$$x(kh + h) = e(kh) + x(kh) \quad (44)$$

Se seleccionan los estados,

$$x1(kh) = x(kh) \quad (45)$$

Se desplazan los estados,

$$x1(kh + h) = x(kh + h) = e(kh) + x(kh) \quad (46)$$

Se obtiene la salida del controlador,

$$\mu k = 9.5836e(kh) + 3.0831x(kh) \quad (47)$$

En términos de estados, se obtiene la ecuación (48):

$$x1(kh + h) = e(kh) + x1(kh)$$

$$\mu k = 9.5836e(kh) + 3.0831x1(kh) \quad (48)$$

Finalmente se escogen los controladores que mejor resultado han dado, tanto en simulación como físicamente. En este caso, el controlador digital RST se demora mucho en establecer el valor a controlar, mientras que los demás lo establecen mucho más rápido teniendo un sobreimpulso. Ver ilustración 25. Físicamente el controlador con las condiciones de 10% y 3τ da un buen resultado comparado a los otros. Por lo tanto, para el control de temperatura en el cultivo de plantas se escoge el controlador con las condiciones 10% y 3τ .

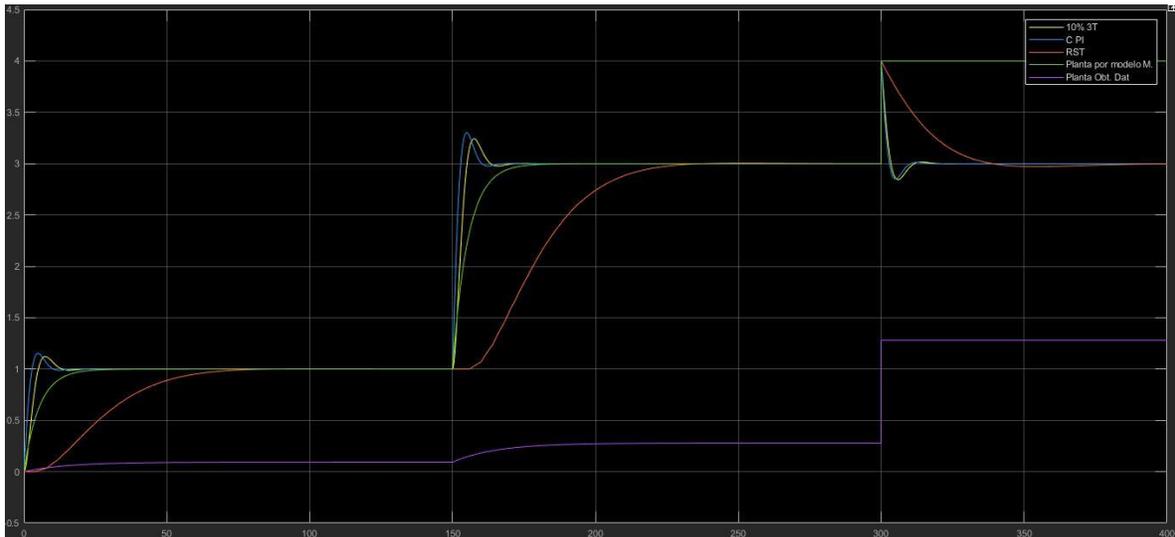


Ilustración 25. Comparación digital analógica. Temperatura en el cultivo de plantas. (autor).

3.2.2 Planta de temperatura del agua en tanque de peces

Para esta planta se exige un tiempo de establecimiento de 2τ como máximo dado que la resistencia que calienta el agua puede alcanzar temperaturas altas rápidamente, por lo tanto, se podría tratar de controlar de forma más rápida. De igual manera, se inicia con la condición de 15% y 3τ .

Cálculo para sobrepaso máximo de 15% y tiempo de establecimiento de 3τ .

$$tst = 3(480.45) = 1441.35s; \quad Mpd = 15\% = 0.15$$

$$\varepsilon d = \sqrt{\frac{(\ln(Mpd))^2}{\pi^2 + (\ln(Mpd))^2}} = 0.517 \quad (49)$$

$$\omega nd = \frac{4.6}{tsd * \varepsilon d} = 0.00617 \frac{rad}{s} \quad (50)$$

En las ecuaciones (51) y (52) se obtienen Kp y Ti, respectivamente,

$$\frac{1}{480.45} (1 + kp(1))s = 0.00638 \rightarrow Kp = 2.065 \quad (51)$$

$$Ti = \frac{KpK}{\omega n^2 * T} \rightarrow Ti = 112.9 \quad (52)$$

En la ecuación (53) se presenta el controlador PI

$$Gc(s) = PI(s) = Kp(1 + \frac{1}{Tis})$$

$$PI(s) = 2.065 + \frac{2.065}{112.9s} = \frac{233.1385s + 2.065}{112.9s} \quad (53)$$

En la ecuación (55) se obtiene la función de transferencia para la cancelación de cero directa:

$$Czd = \frac{\frac{KpK}{TiT}}{\frac{K}{TiT}(KpTis + Kp)} = \frac{Kp}{KpTis + Kp} \quad (54)$$

$$Czd = \frac{2.065}{233.1385 + 2.065}$$

$$Czd = \frac{1}{112.9s + 1} \quad (55)$$

Se exige al controlador un tiempo de establecimiento de 2τ manteniendo el mismo sobre impulso de 15%.

Cálculo para sobrepaso máximo de 15% y tiempo de establecimiento de 2τ

$$t_{st} = 2(480.45) = 960.9s; \quad M_{pd} = 15\% = 0.15$$

$$\varepsilon_d = \frac{(\ln(M_{pd}))^2}{\sqrt{\pi^2 + (\ln(M_{pd}))^2}} = 0.517 \quad (56)$$

$$\omega_{nd} = \frac{4.6}{t_{sd} * \varepsilon_d} = 0.00926 \frac{rad}{s} \quad (57)$$

En las ecuaciones (58) y (59) se obtienen K_p y T_i , respectivamente:

$$\frac{1}{480.45} (1 + k_p(1))s = 0.00957 \rightarrow K_p = 3.6 \quad (58)$$

$$T_i = \frac{K_p K}{\omega_n^2 * T} \rightarrow T_i = 87.384 \quad (59)$$

En la ecuación (60) se presenta el controlador PI,

$$G_c(s) = PI(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$$

$$PI(s) = 3.6 + \frac{3.6}{87.384s} = \frac{314.5824s + 3.6}{87.384s} \quad (60)$$

En la ecuación (61) se obtiene la función de transferencia para la cancelación de cero directa:

$$Czd = \frac{\frac{KpK}{TiT}}{\frac{K}{TiT}(KpTis + Kp)} = \frac{Kp}{KpTis + Kp} \quad (60)$$

$$Czd = \frac{3.6}{314.5824s + 3.6}$$

$$Czd = \frac{1}{87.384s + 1} \quad (61)$$

Se mantiene el tiempo de establecimiento, pero se disminuye el porcentaje de sobre impulso para observar la variación que se puede generar tanto física como en simulación.

Cálculo para sobrepaso máximo de 8% y tiempo de establecimiento de 2τ

$$tst = 2(480.45) = 960.9s; \quad Mpd = 8\% = 0.08$$

$$\varepsilon d = \frac{\sqrt{(\ln(Mpd))^2}}{\sqrt{\pi^2 + (\ln(Mpd))^2}} = 0.626 \quad (62)$$

$$\omega nd = \frac{4.6}{tsd * \varepsilon d} = 0.00764 \frac{rad}{s} \quad (63)$$

En las ecuaciones (64) y (65) se obtienen Kp y Ti, respectivamente:

$$\frac{1}{480.45}(1 + kp(1))s = 0.00764 \rightarrow Kp = 3.57 \quad (64)$$

$$Ti = \frac{KpK}{\omega n^2 * T} \rightarrow Ti = 128.014 \quad (65)$$

En la ecuación (66) se presenta el controlador PI,

$$Gc(s) = PI(s) = Kp(1 + \frac{1}{Tis})$$

$$PI(s) = 3.57 + \frac{3.57}{128.014s} = \frac{459.5702s + 3.57}{128.014s} \quad (66)$$

En la ecuación (68) se obtiene la función de transferencia para la cancelación de cero directa:

$$Czd = \frac{\frac{KpK}{TiT}}{\frac{K}{TiT} (KpTis + Kp)} = \frac{Kp}{KpTis + Kp} \quad (67)$$

$$Czd = \frac{3.57}{459.5702s + 3.57}$$

$$Czd = \frac{1}{128.014s + 1} \quad (68)$$

Se realiza una comparación de las tres condiciones planteadas, se ponen a prueba ante una variación de set point y una perturbación. Ver ilustración 26. El controlador con las condiciones de 8% y 2τ brinda una respuesta rápida al sistema, aunque en ciertas ocasiones el sobre impulso aumenta mucho y dado que la planta solo depende de la resistencia eléctrica y el agua que ingresa, el establecer el control tiende a demorarse mucho más. Ver ilustración 27.

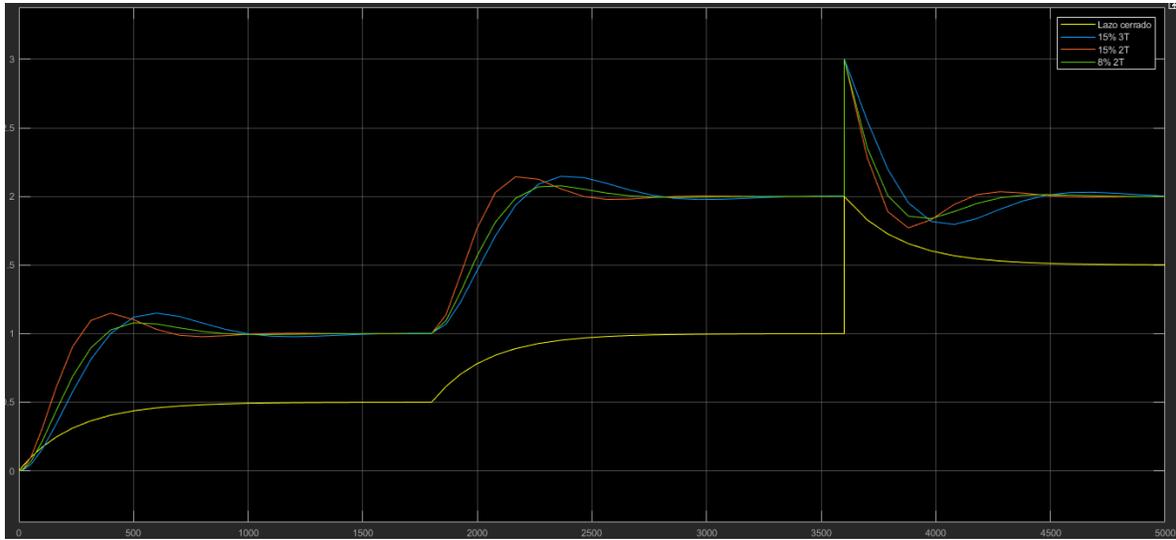


Ilustración 26. Comparación de controladores, temperatura del agua en tanque de peces. (autor).

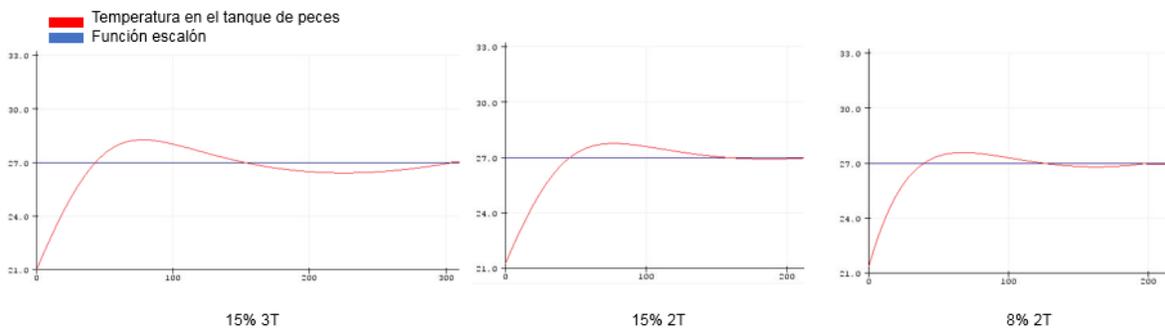


Ilustración 27. Respuesta del actuador, temperatura de agua en el tanque de peces. (autor).

Método de Ziegler Nichols

Con base en la planta obtenida con el modelo matemático, se realiza la obtención empírica de los valores para el controlador PID.

Control P $\rightarrow K_p = 3.18$

Control PI $\rightarrow K_p = 2.862 \quad T_i = 366.7$

Control PID $\rightarrow K_p = 3.816 \quad T_i = 220 \quad T_d = 55$

Se ponen a prueba los controladores diseñados ante una variación de set point y una perturbación. Ver ilustración 28. Se escoge el controlador PI dado presenta la

mejor respuesta en función del tiempo de estabilización y sobreimpulso. Ver ilustración 29.

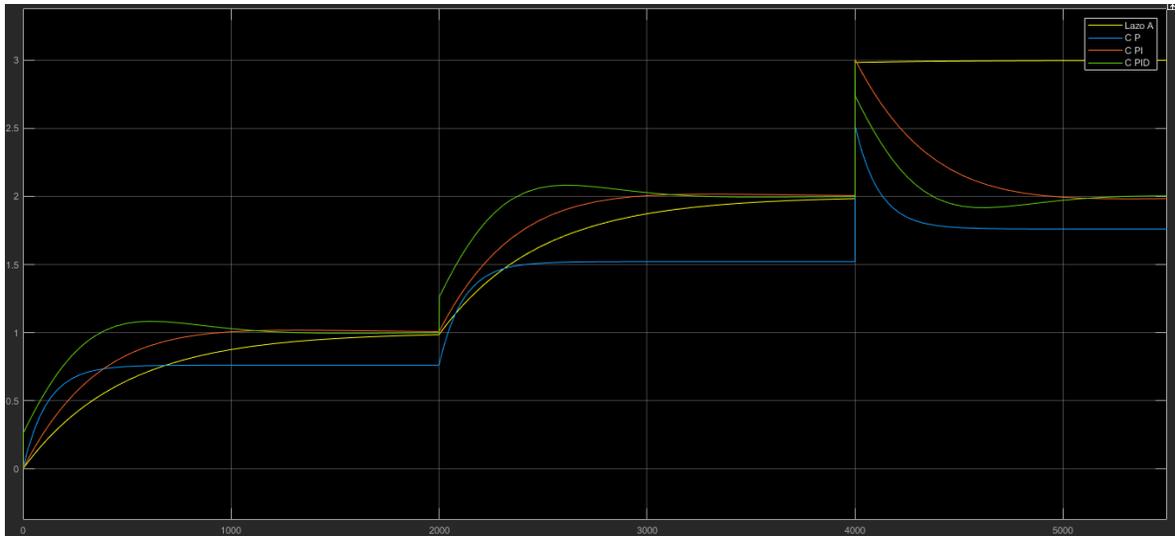


Ilustración 28. Comparación Método de Ziegler Nichols, temperatura del agua en el tanque de peces. (autor).

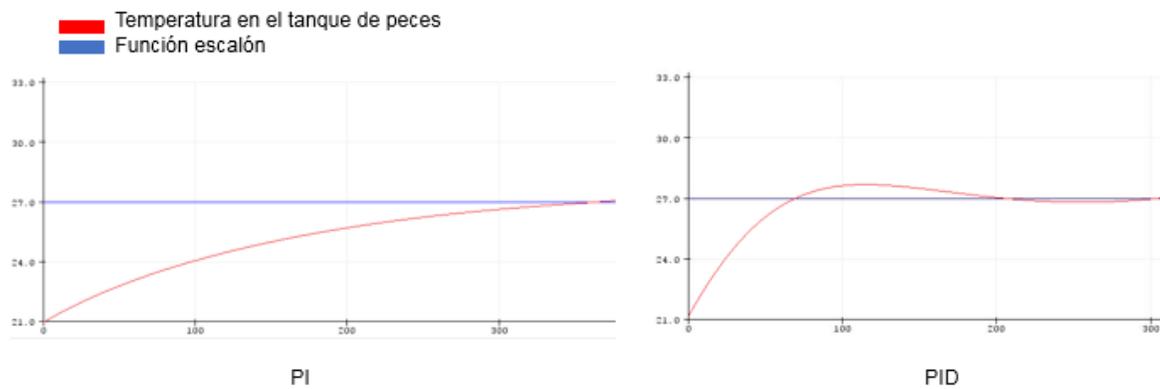


Ilustración 29. Respuesta del actuador, método de Ziegler Nichols, temperatura del agua en el tanque de peces. (autor).

Control RST

Se recolectan datos de la variación del sensor de temperatura sumergido en el tanque de peces con base en una entrada escalón. Usando la función *systemIdentification* de MatLab se obtiene la función de transferencia presentada en la ecuación (69), la cual se relaciona en un 93.78%. Ver ilustración 30.

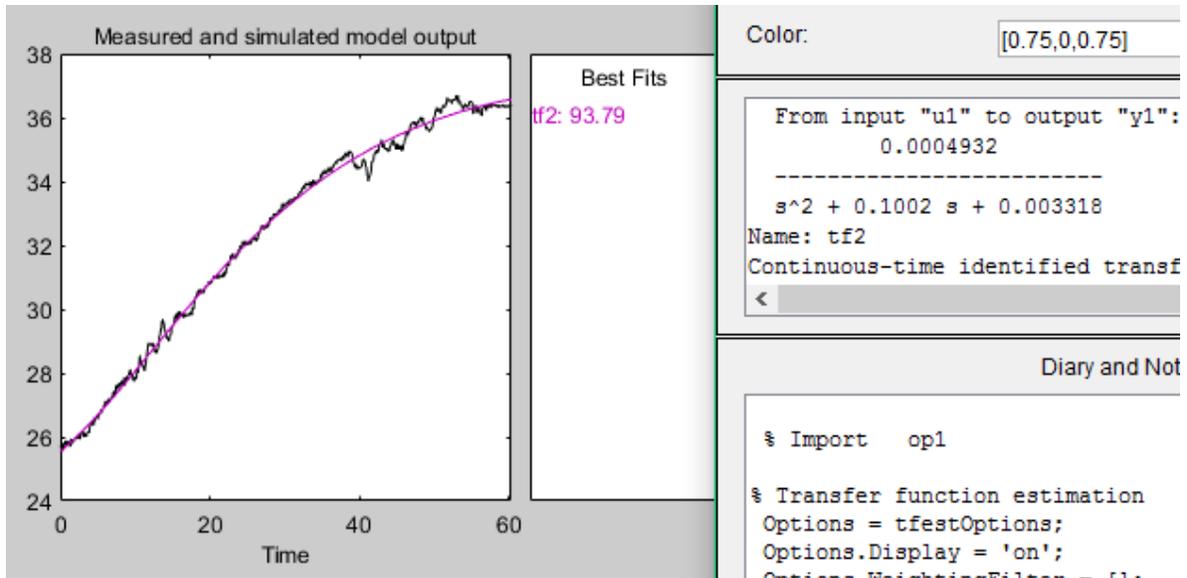


Ilustración 30. Función de transferencia, temperatura del agua en el tanque de peces

$$Planta = \frac{0.0004932}{s^2 + 0.1002s + 0.003318} \quad (69)$$

Criterios de diseño

$$t_{ss} = 65.2 \quad t_{ssd} = 75$$

$$\varepsilon = 0.8$$

$$\omega n = \sqrt{0.003318} = 0.057 \quad 2\varepsilon\omega n = 0.1002 \rightarrow \varepsilon = 0.8698$$

$$T_{eq} = \frac{1}{\varepsilon\omega n} = 21.7$$

$$0.2(T_{eq}) < T_s < 0.6(T_{eq}) \rightarrow 4.34 < T_s < 13.02 \quad (70)$$

$$T_s = 9 \quad \omega = 0.05$$

$$Planta \text{ discretizada} = \frac{0.0148z + 0.01095}{z^2 - 1.233z - 0.4058} \leftrightarrow \frac{0.0148q^{-1} + 0.01095q^{-2}}{1 - 1.233q^{-1} + 0.4058q^{-2}} = \frac{B}{A}$$

Obtención del Polinomio deseado

$$P = \frac{0.0025}{s^2 + 0.08s + 0.0025} \rightarrow \frac{0.07948q^{-1} + 0.06248q^{-2}}{1 - 1.345q^{-1} + 0.4868q^{-2}}$$

$$P^T = [1 \quad -1.345 \quad 0.4868 \quad 0 \quad 0]$$

$$a'1 = a1 - 1 = -2.233 \quad a'2 = a2 - a1 = 1.6388 \quad a'3 = -a2 = -0.4058$$

$$X = M^{-1} * P \quad (71)$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ s'1 \\ ro \\ r1 \\ r2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2.233 & 1 & 0.0148 & 0 & 0 \\ 1.6388 & -2.233 & 0.01095 & 0.0148 & 0 \\ -0.4058 & 1.6388 & 0 & 0.01095 & 0.0148 \\ 0 & -0.4058 & 0 & 0 & 0.01095 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} 1 \\ -1.345 \\ 0.4068 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ s'1 \\ ro \\ r1 \\ r2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.3976 \\ 33.1347 \\ -42.363 \\ 14.735 \end{bmatrix}$$

$$ro = 33.1347 \quad r1 = -42.363 \quad r2 = 14.735$$

$$s1 = s'1 - 1 = -0.6024 \quad s2 = -s'1 = -0.3976$$

$$R(q^{-1}) = 33.1347 - 42,363q^{-1} + 14.735q^{-2}$$

$$S(q^{-1}) = 1 - 0.6024q^{-1} - 0.3979q^{-2}$$

En la ecuación (73) se presenta $T(q^{-1})$

$$P(q^{-1}) = 1 - 1.345q^{-1} + 0.4868q^{-2}$$

$$B(q^{-1}) = 0.0148q^{-1} + 0.01095q^{-2} \quad B(1) = 0.02575$$

$$Si B(1) \neq 0 \rightarrow T(q^{-1}) = \frac{P(q^{-1})}{B(1)} \quad (72)$$

$$T(q^{-1}) = 38.84 - 52.23q^{-1} + 18.905q^{-2} \quad (73)$$

Se realiza la simulación de la planta en lazo abierto y cerrado, controlador RST y controlador RST con seguimiento y regulación. Se ponen a prueba ante una variación de set point y una perturbación. Ver ilustración 31. Respuesta del actuador en la ilustración 32.

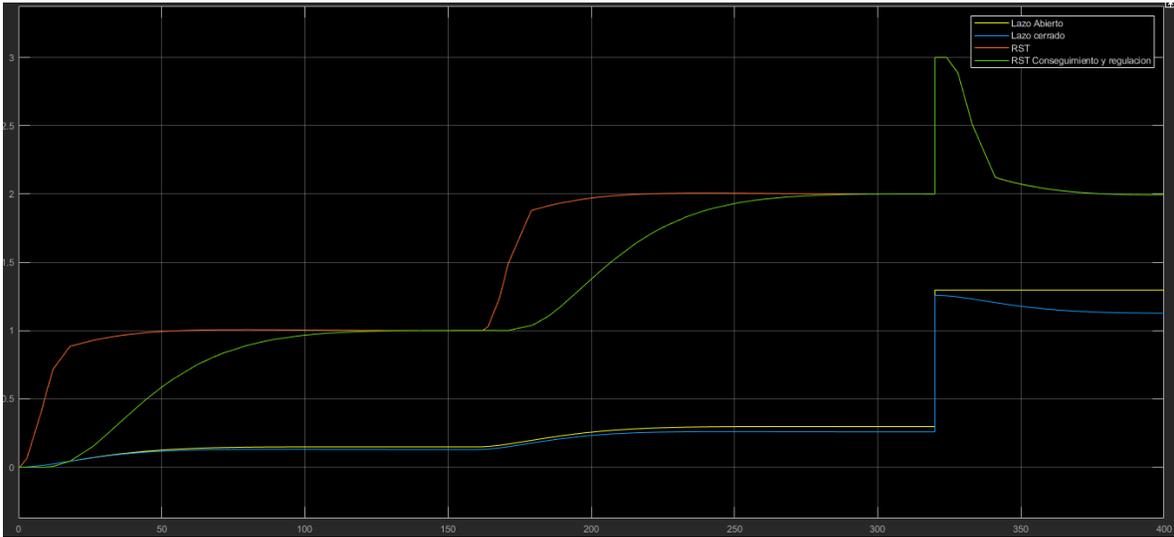


Ilustración 31. Controlador RST, temperatura del agua en el tanque de peces. (autor).

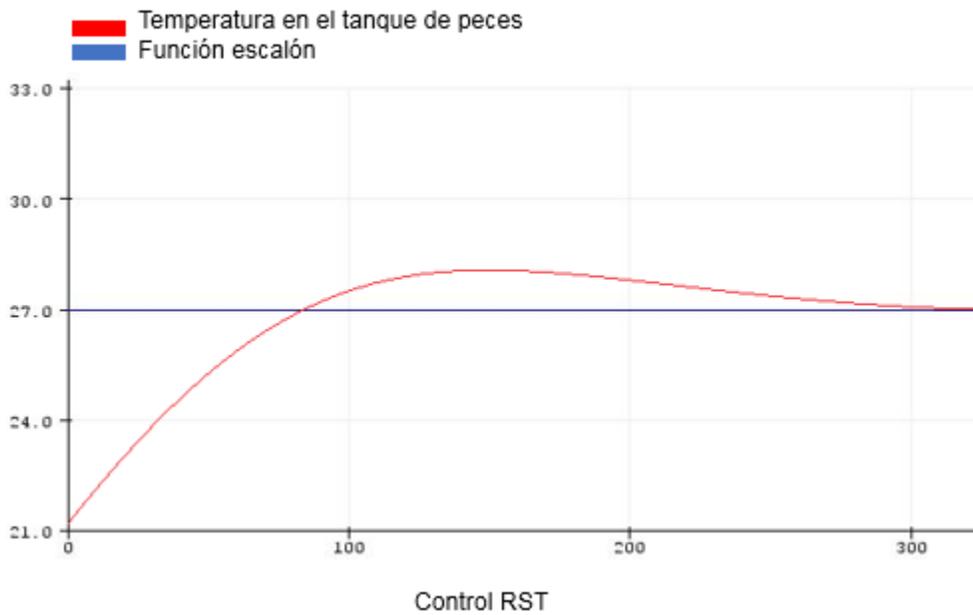


Ilustración 32. Respuesta del actuador con control RST, temperatura de agua en el tanque de peces. (autor).

Realización canónica RST

Suponiendo $R=T$

$$\frac{R(q^{-1})}{S(q^{-1})} = \frac{33.1347 - 42.363q^{-1} + 14.735q^{-2}}{1 - 0.6024q^{-1} - 0.3979q^{-2}} = \frac{33.1347q^2 - 42.363q + 14.363}{q^2 - 0.6024q - 0.3979}$$

Volver la ecuación (41) estrictamente propia,

$$33.1347 - \frac{22.4027q + 27.9193}{q^2 - 0.6024q + 27.9193} = \frac{\mu k}{e(kh)}$$

$$\mu k = 33.1347e(kh) - \frac{22.4027q + 27.9193e(kh)}{q^2 - 0.6024q - 0.3979}$$

Se toma la variable auxiliar

$$X(kh) = \frac{e(kh)}{q^2 - 0.6024q - 0.3979} \rightarrow e(kh) = x(kh)(q^2 - 0.6024q - 0.3979)$$

$$e(kh) = x(kh + 2h) - 0.6024x(kh + h) - 0.3979x(kh)$$

Se despeja para el estado más desplazado

$$x(kh + 2h) = e(kh) + 0.6024x(kh + h) - 0.3979x(kh)$$

Se seleccionan los estados

$$x1(kh) = x(kh)$$

$$x2(kh) = x(kh + h)$$

Se desplazan los estados

$$x1(kh + h) = x(kh + h) = x2(kh)$$

$$x2(kh + 2h) = x(kh + 2h) = e(kh) + 0.6024x2(kh) + 0.3979x1(kh)$$

Se obtiene la salida del controlador

$$\mu_k = 33.1347e(kh) - 22.4027x(kh + h) + 27.9193x(kh)$$

En términos de estados

$$x1(kh + h) = x(kh + h) = x2(kh)$$

$$x2(kh + 2h) = e(kh) + 0.6024x(kh + h) + 0.3979x(kh)$$

$$\mu_k = 33.1347e(kh) - 22.4027x2(kh) + 27.9193x1(kh)$$

Se realiza una comparacion de los controladores que han presentado mejor resultado. Ver iustracion 33. Se escoge el controlador PI dado que no presenta sobre impulso lo cual facilita mucho mas el control de temperatura. El control RST fisicamente presento problemas ante una perturbacion.

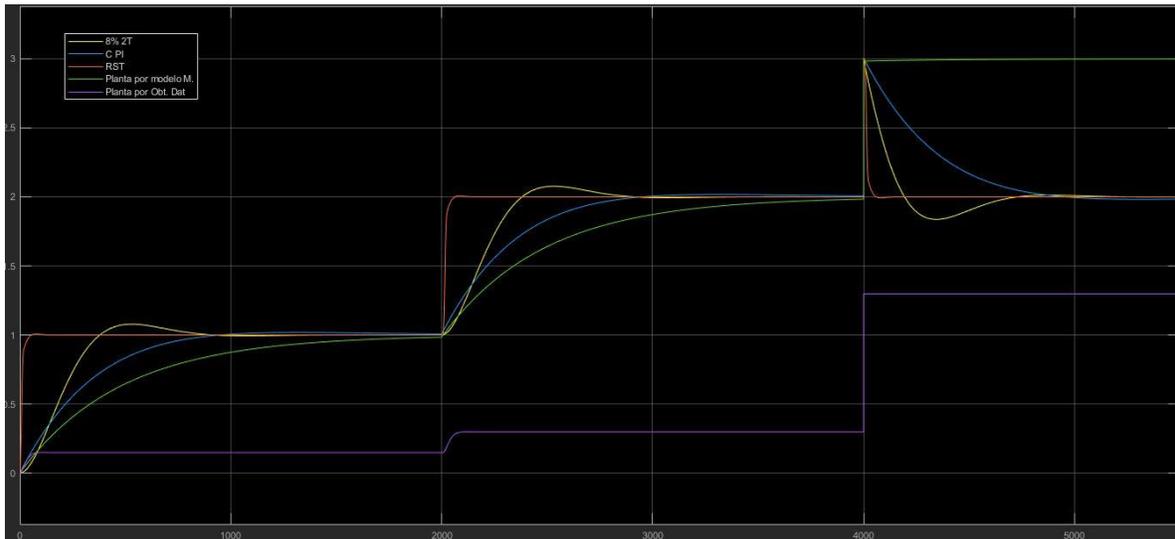


Ilustración 33. Comparación digital analógica. Temperatura del agua en el tanque de peces. (autor).

3.2.3 Planta de control de nivel de agua

Para esta planta se escoge un tiempo de establecimiento de 3τ y se varía el porcentaje de sobre impulso. La idea es esforzar al máximo el actuador para ver hasta qué punto puede ejercer un control eficientemente.

Cálculo para sobrepaso máximo de 15% y tiempo de establecimiento de 3τ

$$t_{st} = 3(142.104) = 426.312s; \quad Mpd = 15\% = 0.15$$

$$\varepsilon d = \sqrt{\frac{(\ln(Mpd))^2}{\pi^2 + (\ln(Mpd))^2}} = 0.517 \quad (74)$$

$$\omega_{nd} = \frac{4.6}{t_{sd} * \varepsilon d} = 0.0209 \frac{rad}{s} \quad (75)$$

Se obtiene K_p y T_i

$$\frac{1}{142.104} (1 + k_p(2333.4))s = 0.0216 \rightarrow K_p = 0.00089 \quad (76)$$

$$T_i = \frac{K_p K}{\omega_n^2 * T} \rightarrow T_i = 33.46 \quad (77)$$

Construcción del controlador PI

$$G_c(s) = PI(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$$

$$PI(s) = 0.00089 + \frac{0.00089}{33.46s} = \frac{0.0298s + 0.00089}{33.46s}$$

Cancelación de cero directa:

$$C_{zd} = \frac{\frac{K_p K}{T_i T}}{\frac{K}{T_i T} (K_p T_i s + K_p)} = \frac{K_p}{K_p T_i s + K_p} \quad (78)$$

$$C_{zd} = \frac{0.00089}{0.029s + 0.00089}$$

$$C_{zd} = \frac{1}{33.46s + 1}$$

Se disminuye el porcentaje de sobre impulso y se mantiene el mismo tiempo de establecimiento.

Cálculo para sobrepaso máximo de 10% y tiempo de establecimiento de 3T

$$tst = 3(142.104) = 426.312s; \quad Mpd = 10\% = 0.1$$

$$\varepsilon d = \frac{\sqrt{(\ln(Mpd))^2}}{\sqrt{\pi^2 + (\ln(Mpd))^2}} = 0.5911 \quad (79)$$

$$\omega nd = \frac{4.6}{tsd * \varepsilon d} = 0.018 \frac{rad}{s} \quad (80)$$

Se obtiene Kp y Ti

$$\frac{1}{142.104} (1 + kp(2333.4))s = 0.0216 \rightarrow Kp = 0.00086 \quad (81)$$

$$Ti = \frac{KpK}{\omega n^2 * T} \rightarrow Ti = 43.58 \quad (82)$$

Construcción del controlador PI

$$Gc(s) = PI(s) = Kp(1 + \frac{1}{Tis})$$

$$PI(s) = 0.00086 + \frac{0.00086}{43.58s} = \frac{0.0374s + 0.00086}{43.58s}$$

Cancelación de cero directa:

$$Czd = \frac{\frac{KpK}{TiT}}{\frac{K}{TiT} (KpTis + Kp)} = \frac{Kp}{KpTis + Kp} \quad (83)$$

$$Czd = \frac{0.00086}{0.0374s + 0.00086}$$

$$Czd = \frac{1}{43.58s + 1}$$

Se exige aún más con un tiempo de establecimiento de 2τ y disminuyendo el porcentaje de sobre impulso con el fin de comprobar si es posible ejercer control con estas condiciones.

Cálculo para sobrepaso máximo de 5% y tiempo de establecimiento de 2τ

$$tst = 2(142.104) = 284.208s; \quad Mpd = 5\% = 0.05$$

$$\varepsilon d = \frac{(\ln(Mpd))^2}{\sqrt{\pi^2 + (\ln(Mpd))^2}} = 0.69 \quad (84)$$

$$\omega nd = \frac{4.6}{tsd * \varepsilon d} = 0.0234 \frac{rad}{s} \quad (85)$$

Se obtiene Kp y Ti

$$\frac{1}{142.104} (1 + kp(2333.4))s = 0.0323 \rightarrow Kp = 0.00152 \quad (86)$$

$$Ti = \frac{KpK}{\omega n^2 * T} \rightarrow Ti = 45.58 \quad (87)$$

Construcción del controlador PI

$$Gc(s) = PI(s) = Kp(1 + \frac{1}{Tis})$$

$$PI(s) = 0.00152 + \frac{0.00152}{45.58s} = \frac{0.069s + 0.00152}{45.58s}$$

Cancelación de cero directa:

$$Czd = \frac{\frac{KpK}{TiT}}{\frac{K}{TiT}(KpTis + Kp)} = \frac{Kp}{KpTis + Kp} \quad (88)$$

$$Czd = \frac{0.00152}{0.069s + 0.00152}$$

$$Czd = \frac{1}{45.58s + 1}$$

Se realiza una comparación de los controladores planteados con las condiciones anteriormente mencionadas. Ver ilustración 34. De forma física el controlador que mejor ejerce control de manera rápida es aquel con las condiciones de 10% 3τ . Ver ilustración 35.

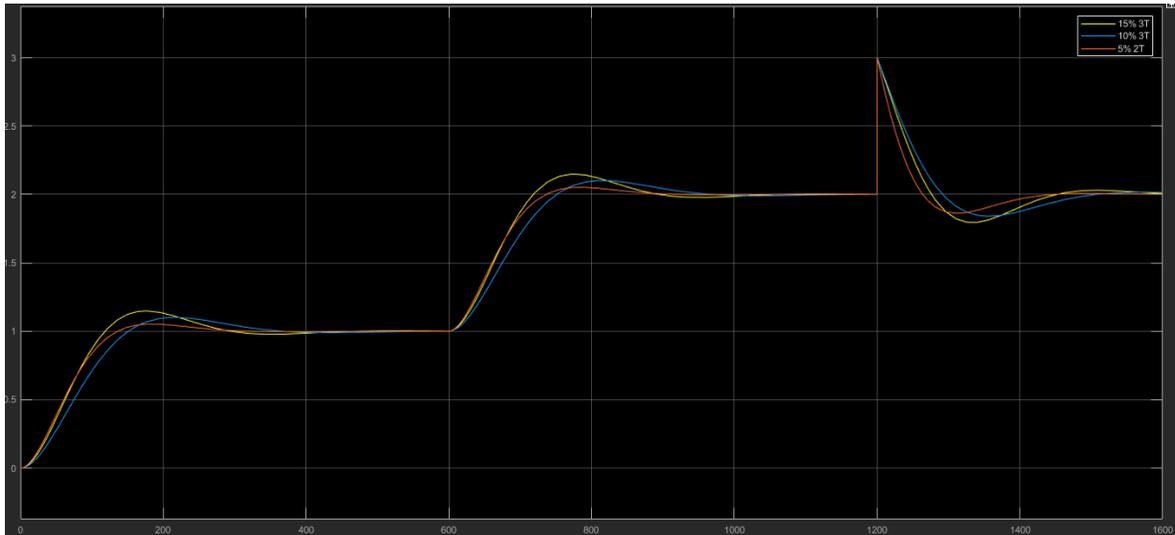


Ilustración 34. Comparación de controladores, nivel de agua. (autor).

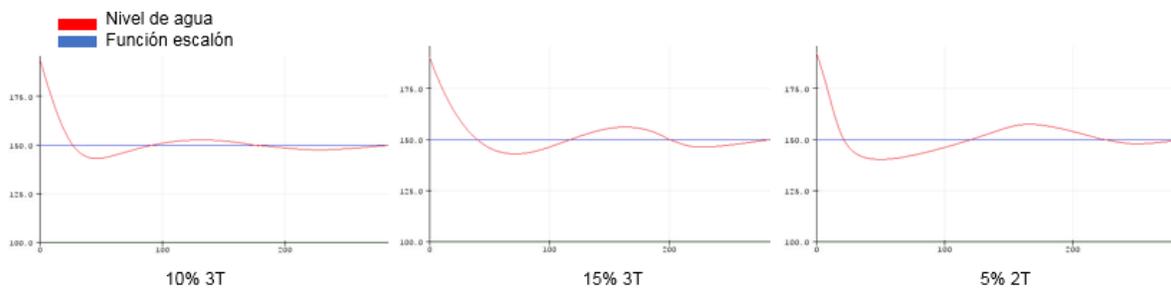


Ilustración 35. Respuesta del actuador, control de nivel. (autor).

Método de Ziegler Nichols

Se obtienen los siguientes valores de forma empírica para cada uno de los controladores.

Control P $\rightarrow K_p = 0.000169$

Control PI $\rightarrow K_p = 0.0001521 \quad T_i = 43.34$

Control PID $\rightarrow K_p = 0.00203 \quad T_i = 26 \quad T_d = 6.5$

Se realiza una comparacion de cada uno de ellos. Ver ilustracion 36. Se escoge el controlador PI dado que ejerce mejor control aunque demora mucho mas en establecer el valor. Ver ilustración 37.

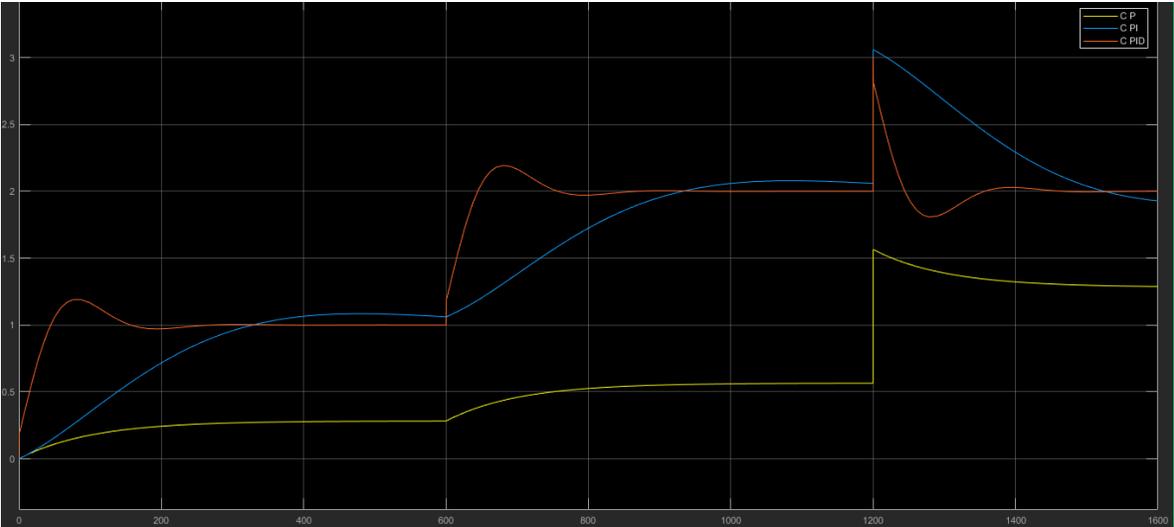


Ilustración 36. Comparación Método de Ziegler Nichols, nivel de agua. (autor).

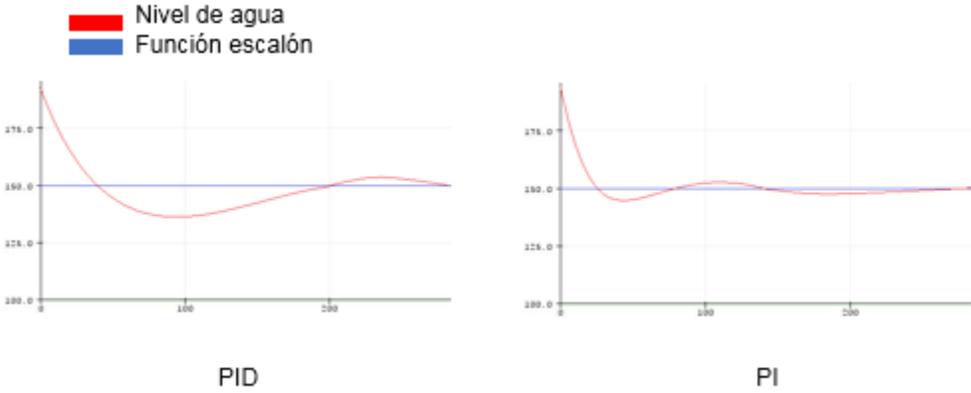


Ilustración 37. Respuesta del actuador, método de Ziegler Nichols, control de nivel. (autor).

Control RST

Se recolectan datos de la variacion del sensor de nivel en el tanque biologico, tanto de llenado como vaciado. En este caso la bomba realiza la funcion de vaciar el tanque el cual es llenado por gravedad. Usando systemIdentification de MatLab se

obtiene la función de transferencia la cual se relaciona 48.14% siendo esta la que mayor relación presenta. Ver ilustración 38.

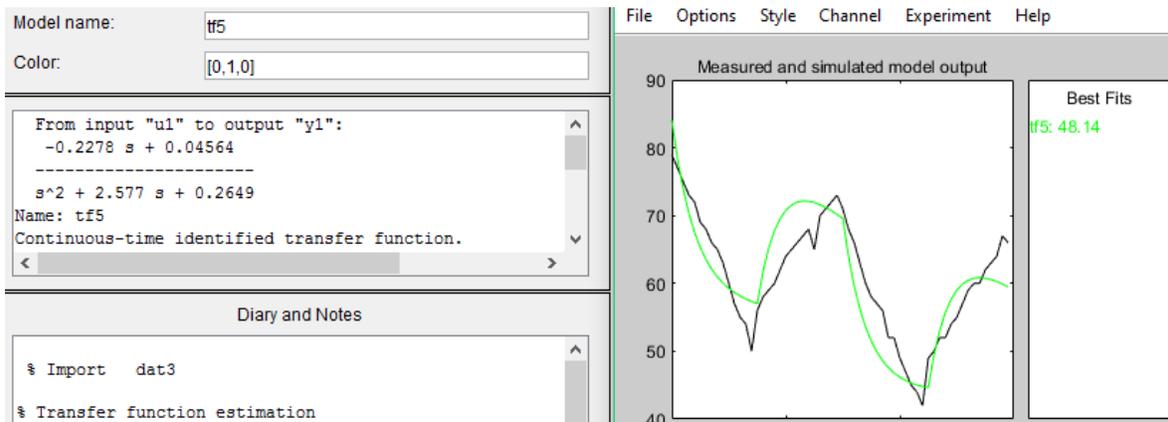


Ilustración 38. Función de transferencia, nivel de agua. (autor).

$$Planta = \frac{-0.2278s + 0.04564}{s^2 + 2.577s + 0.2649} \quad (89)$$

Criterios de diseño

$$tss = 35 \quad tssd = 40$$

$$\varepsilon = 0.8$$

$$\omega n = \sqrt{0.2649} = 0.515 \quad 2\varepsilon\omega n = 2.577 \rightarrow \varepsilon = 2.502$$

$$Teq = \frac{2}{\varepsilon\omega n} = 4.85$$

$$0.2(Teq) < Ts < 0.6(Teq) \rightarrow 0.97 < Ts < 2.91 \quad (90)$$

$$Ts = 1 \quad \omega = 0.094$$

$$Planta discretizada = \frac{-0.0673z + 0.08334}{z^2 - 0.9829z + 0.076} \leftrightarrow \frac{-0.0673q^{-1} + 0.08334q^{-2}}{1 - 0.9829q^{-1} + 0.076q^{-2}} = \frac{B}{A}$$

Obtencion del Polinomio deseado

$$P = \frac{0.008836}{s^2 + 0.1504s + 0.008836} \rightarrow \frac{0.004202q^{-1} + 0.003996q^{-2}}{1 - 1.852q^{-1} + 0.8604q^{-2}}$$

$$P^T = [1 \quad -1.852 \quad 0.8604 \quad 0 \quad 0]$$

$$a'1 = a1 - 1 = -1.9829 \quad a'2 = a2 - a1 = 1.0589 \quad a'3 = -a2 = -0.076$$

$$X = M^{-1} * P \quad (91)$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ s'1 \\ r0 \\ r1 \\ r2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.9829 & 1 & -0.0673 & 0 & 0 \\ 1.0589 & -1.9829 & 0.08334 & -0.0673 & 0 \\ -0.076 & 1.0589 & 0 & 0.08334 & -0.0673 \\ 0 & -0.076 & 0 & 0 & 0.08334 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} 1 \\ -1.852 \\ 0.8604 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ s'1 \\ r0 \\ r1 \\ r2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.4095 \\ 4.1401 \\ -3.9899 \\ 0.3735 \end{bmatrix}$$

$$r0 = 4.1401 \quad r1 = -3.9899 \quad r2 = 0.3735$$

$$s1 = s'1 - 1 = -0.59 \quad s2 = -s'1 = -0.4095$$

$$R(q^{-1}) = 4.1401 - 3.9899q^{-1} + 0.3737q^{-2}$$

$$S(q^{-1}) = 1 - 0.59q^{-1} - 0.4095q^{-2}$$

Obtencion de $T(q^{-1})$

$$P(q^{-1}) = 1 - 1.852q^{-1} + 0.8604q^{-2}$$

$$B(q^{-1}) = -0.0673q^{-1} + 0.08334q^{-2} \quad B(1) = 0.01604$$

$$\text{Si } B(1) \neq 0 \rightarrow T(q^{-1}) = \frac{P(q^{-1})}{B(1)} \quad (92)$$

$$T(q^{-1}) = 62.34 - 115.46q^{-1} + 53.64q^{-2}$$

A continuacion se ilustra la planta en lazo cerrado y abierto junto con el control RST y control RST con seguimiento y regulacion. Ver ilustracion 39. Respuesta del actuador ver ilustración 40.

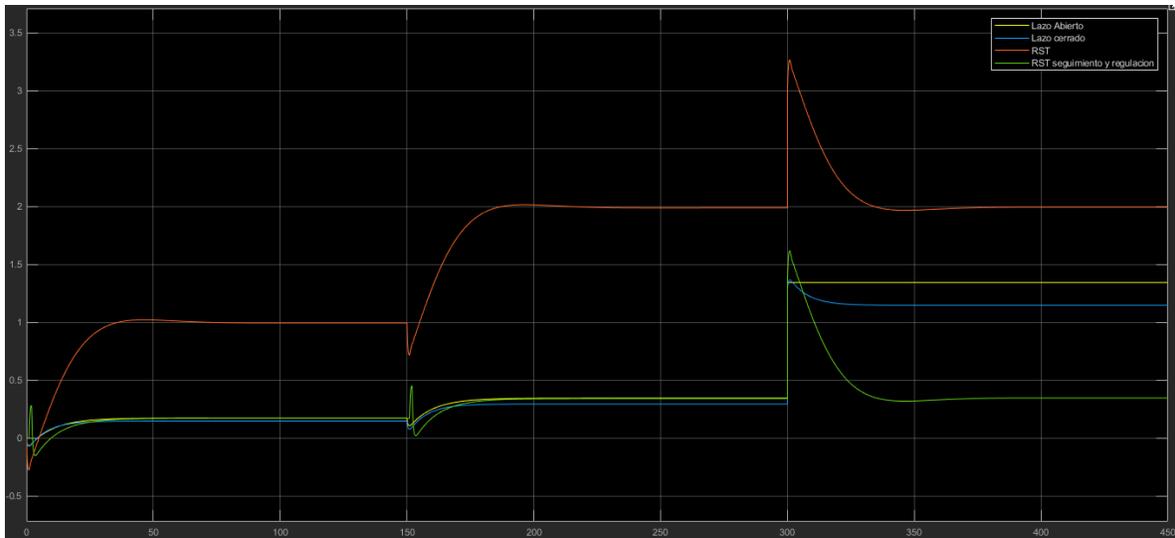


Ilustración 39. Controlador RST, nivel de agua. (autor).

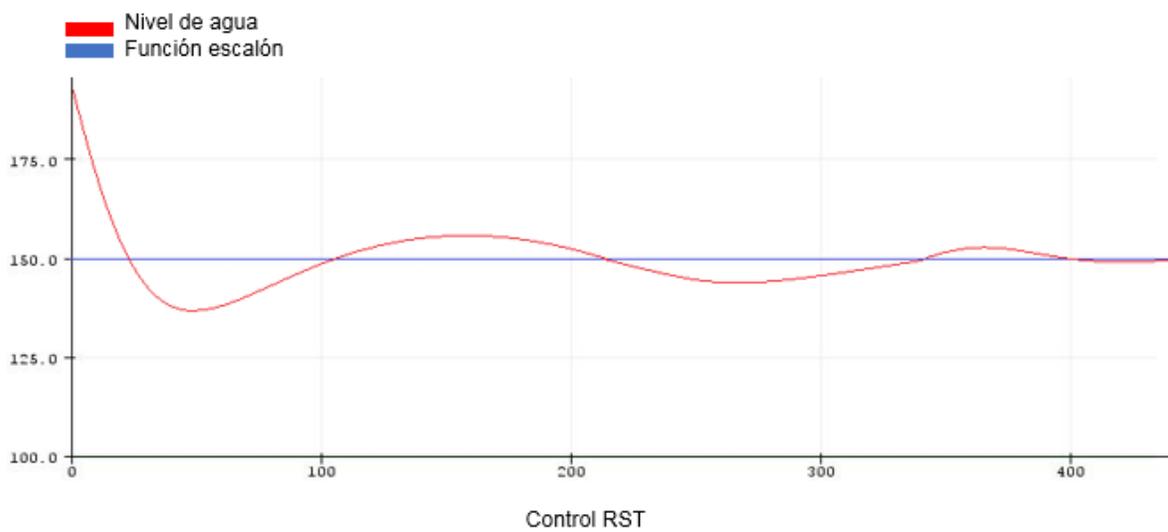


Ilustración 40. Respuesta del actuador con control RST, nivel de agua. (autor).

Realización canónica RST

Suponiendo $R=T$

$$\frac{R(q^{-1})}{S(q^{-1})} = \frac{4.1401q^2 - 3.9899q + 0.3735}{q^2 - 0.59q - 0.4095} \quad (93)$$

Volver la ecuación (72) estrictamente propia,

$$4.1401 - \frac{1.5473q + 2.0688}{q^2 - 0.59q - 0.4095} = \frac{\mu k}{e(kh)}$$

$$\mu k = 4.1401e(kh) - \frac{1.5473q + 2.0688e(kh)}{q^2 - 0.59q - 0.4095} \quad (94)$$

Se toma la variable auxiliar de la ecuación (73),

$$X(kh) = \frac{e(kh)}{q^2 - 0.59q - 0.4095} \rightarrow e(kh) = x(kh)(q^2 - 0.59q - 0.4095)$$

$$e(kh) = x(kh + 2h) - 0.59x(kh + h) - 0.4095x(kh) \quad (95)$$

Se despeja para el estado más desplazado de la ecuación (74),

$$x(kh + 2h) = e(kh) + 0.59x(kh + h) + 0.4095x(kh)$$

Se seleccionan los estados

$$x1(kh) = x(kh)$$

$$x2(kh) = x(kh + h)$$

Se desplazan los estados

$$x1(kh + h) = x(kh + h) = x2(kh)$$

$$x2(kh + 2h) = x(kh + 2h) = e(kh) + 0.59x2(kh) + 0.4095x1(kh)$$

Se obtiene la salida del controlador

$$\mu k = 4.1401e(kh) - 1.5473x(kh + h) + 2.0688x(kh)$$

En términos de estados, se obtiene la ecuación (75):

$$x1(kh + h) = x(kh + h) = x2(kh)$$

$$x2(kh + 2h) = e(kh) + 0.59x(kh + h) + 0.4095x(kh)$$

$$\mu k = 4.1401e(kh) - 1.5473x2(kh) + 2.0688x1(kh) \quad (96)$$

Se realiza una comparación de los controladores anteriormente escogidos (10% y 3τ , controlador PI, control RST). Ver ilustración 41. Se escoge el controlador con las condiciones de 10% y 3τ , aunque presenta mayor sobre impulso que el RST, este se estabiliza más rápido en comparación con el controlador PI. En la práctica, el controlador RST presentó problemas de funcionamiento dado que al tener una perturbación el controlador no reacciona rápidamente.

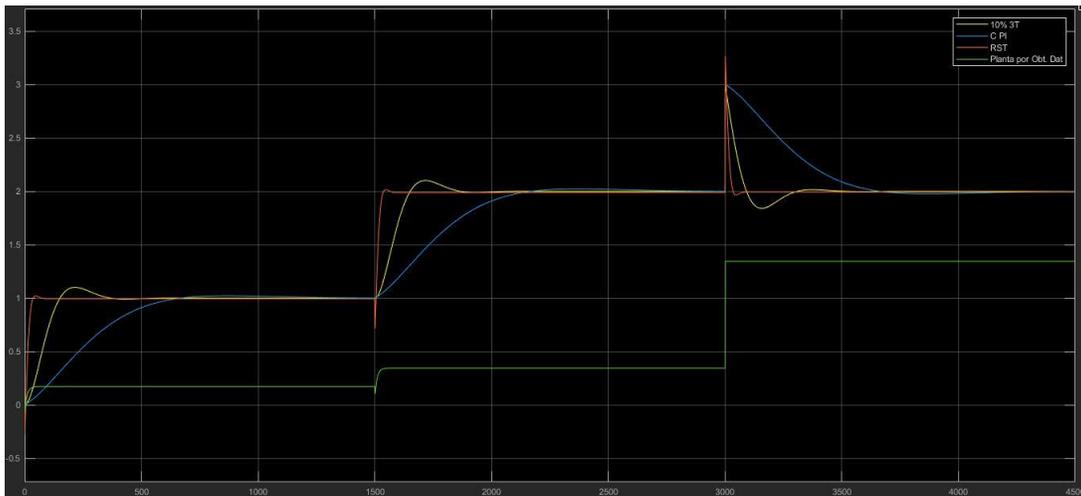


Ilustración 41. Comparación digital analógica. Nivel de agua. (autor).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS ALCANZADOS Y DISCUSIÓN

Con base en los objetivos planteados, en este capítulo se presenta los resultados obtenidos durante el proceso investigativo del proyecto. Se da a conocer las pruebas y validaciones ejecutadas después de 15 días de funcionamiento del prototipo de sistema acuapónico desarrollado, se evalúa el crecimiento de las tilapias bajo los parámetros de longitud y peso, las plantas de lechuga son evaluadas en longitud, peso y número de hojas alcanzado. Esto con el fin de presentar datos reales y contrastarlos con los teóricos de acuerdo a los diferentes elementos que componen un sistema acuapónico.

4.1 FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

Trascurridos 5 días de funcionamiento del sistema sin plantas y peces, se agrega el generador de bacterias Cycle dentro del filtro biológico con el propósito de aumentar la generación de bacterias nitrificantes (10 gotas por galón de agua). Ver ilustración 42.



Ilustración 42. Generador de bacterias. (autor).

Pasados 6 días, se procede a retirar las plantas del semillero, la tierra es retirada con la misma agua del tanque del sistema. Una vez limpias se colocan en los recipientes que servirán como base y posteriormente al sistema. Ver ilustración 43.



Ilustración 43. Plantas retiradas del semillero. (autor).

Las tilapias llegan en una bolsa con oxígeno, la cual es ingresada al tanque para que el agua se estabilice en una misma temperatura. Una vez estabilizada la temperatura, son ingresadas una a una al interior del tanque sin agregar el agua de la bolsa. Ver imagen 44. Para aumentar el nivel de oxígeno en el tanque se agrega un oxigenador de dos salidas con piedras difusoras al interior.



Ilustración 44. Tilapias al interior del tanque. Día 1. (autor).

Una vez funcionando el sistema con los peces y plantas, se realiza análisis de funcionamiento del sistema. Las variables principales son monitoreadas mediante la app. Ver ilustración 45.



Ilustración 45. Monitorio de variables. App. (autor).

Día a día se verifican los datos de cada uno de los sensores, las variables controladas, el estado de los peces y las plantas. Al finalizar el día, cuando las luces están desactivadas, con ayuda de una linterna se verifica las plantas con el fin de evitar alguna plaga. Cada dos días se verifica si hay exceso de alimento al interior del tanque, si es así se procese a realizar limpieza con un colador.

Transcurridos los 15 días se toma evidencia de cada una de las plantas de lechuga crespa y de las tilapias rojas. Ver ilustración 46.



Ilustración 46. Funcionamiento del sistema. Día 15. (autor).

4.2 VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO

Una vez esté listo el sistema y hayan pasado al menos 8 días para que el cloro contenido en el agua sea retirado, se toma evidencia de las medidas a evaluar en longitud, peso y número de hojas, en este caso solo para las plantas. Las tilapias rojas llegan en una bolsa con oxígeno, la cual es ingresada al tanque sin abrirla para que se estabilice en la misma temperatura, transcurrido unos minutos se deja salir los peces uno a uno para que ingresen a su nuevo tanque, las plantas son colocadas con una espuma alrededor de la raíz y es ingresada a una canastilla de tal forma que las raíces sobresalgan en la parte inferior. Pasados los 15 días se vuelve a tomar registro de los datos a evaluar en las tilapias y lechugas.

4.2.1 Crecimiento de las lechugas

Se evalúa el crecimiento de las lechugas en un periodo de 15 días dentro del sistema NFT planteado para el prototipo de sistema acuapónico automatizado, tomando los datos correspondientes de cada planta, iniciando con una longitud promedio de 7.2 cm y finalizando con una longitud promedio de 14.6 cm. El peso inicial promedio es de 2.46 g y finaliza con un peso promedio de 11.28 g. Las plantas inician con un número de hojas mínimo de 2 y máximo de 3, finalizando con 6 hojas como máximo en las plantas. Los datos se observan en la tabla 6.

Tabla 6. Evaluación del crecimiento de lechugas. [Elaboración propia].

Planta #	Longitud inicial (cm)	Longitud final (cm)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	# Hojas inicial	# Hojas final
1	7.5	14.5	2	11	3	6
2	7.2	14	3	11.2	3	6
3	7	15	2	11.5	2	4
4	6	14	2	10	2	5
5	8.4	16	3.3	13	3	5
6	7	14.5	2.5	11	3	6

La lechuga crece de manera sana sin presentar ningún problema. En la tabla 7, se observa la longitud inicial y final de una de las plantas, se evidencia el peso inicial y final obtenido.

Tabla 7. Crecimiento de una de las lechugas. [Elaboración propia].

Crecimiento en una lechuga			
Longitud inicial	Longitud final	Peso inicial	Peso final
8.4 cm	16 cm	2 gr	11 gr
			

Las plantas logran un crecimiento sano bajo las luces led en colores rojos y azules. Dentro de los 15 días a evaluar, en donde día a día se revisó planta por planta para prevenir alguna plaga, las luces permitieron el crecimiento sin necesidad de luz solar.

4.2.2 Crecimiento de las tilapias

Se evalúa el crecimiento de las tilapias de forma individual en un periodo de 15 días dentro del prototipo del sistema acuapónico automatizado. Inician con una longitud promedio de 5.6 cm y finalizan con una longitud promedio de 8.8 cm. El peso promedio inicial es de 2.66 g y finalizan con un peso promedio de 11.95 g. Los datos se observan en la tabla 8.

Tabla 8. Evaluación del crecimiento de las tilapias rojas. [Elaboración propia].

Tilapia #	Longitud inicial (cm)	Longitud final (cm)	Peso inicial (g)	Peso final (g)
1	6	8.5	3	12
2	5	9	2	11.5
3	5	9	3	12.2
4	6	9	3	11
5	6.5	9.5	2	13.5
6	5	8	3	11.5

Los peces crecen sin presentar ningún problema o enfermedad. En la tabla 9 se evidencia la longitud inicial y final junto con el peso inicial y final de uno de los peces.

Tabla 9. Crecimiento de una tilapia. [Elaboración propia].

Crecimiento en una tilapia			
Longitud inicial	Longitud final	Peso inicial	Peso final
6 cm	9 cm	3 gr	11 gr
			

4.2.3 Contraste de medidas

Tapia, (2018) en su trabajo, evidencia que las plantas de lechuga inician con una longitud de 4.7 cm, trascurridos los 15 días su longitud es de 10.9 cm. El peso inicial de las plantas es de 2.05 gr y finaliza en 5.61 gr. las tilapias mantuvieron un crecimiento de 0,14 cm/día iniciando con una longitud de 2.56 cm. El peso mantuvo un crecimiento constante de 1,23 gr/día iniciando con 1,72 gr. Ver ilustraciones 47 y 48.

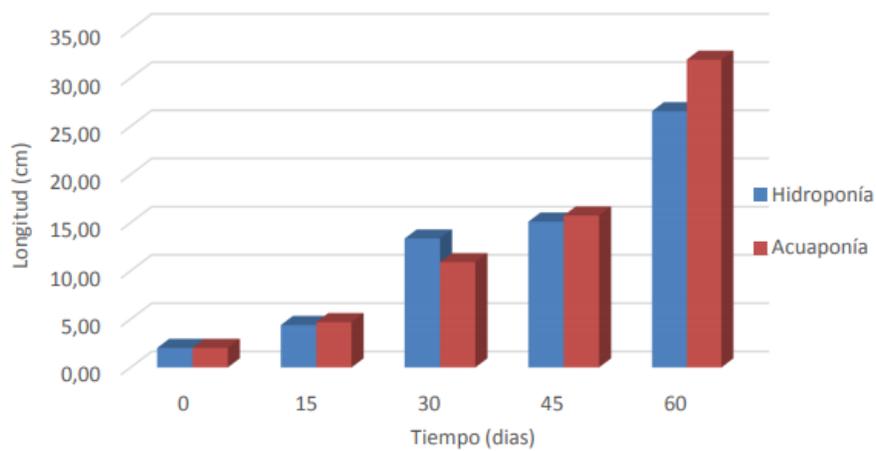


Ilustración 47. Crecimiento. Longitud de lechugas. (Tapia, 2018).

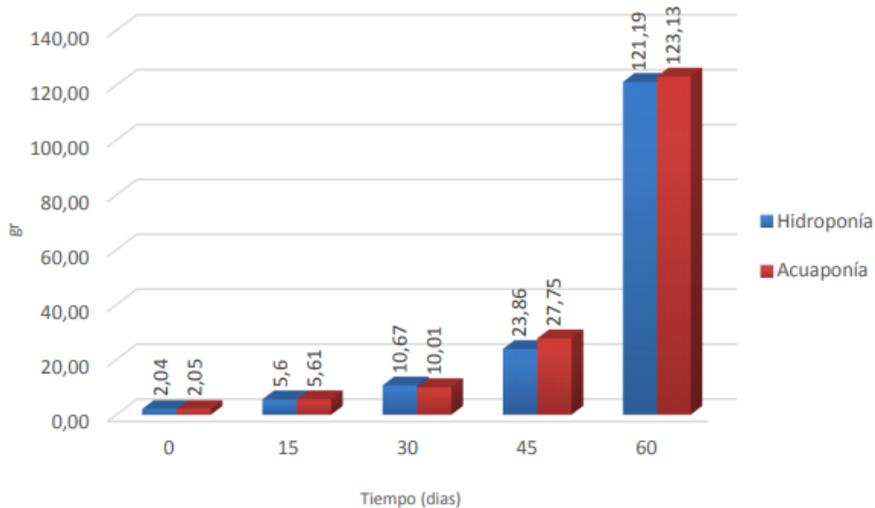


Ilustración 48. Crecimiento. Peso de lechugas. (Tapia, 2018).

Se calcula la tanto la ganancia en longitud y peso en las Tilapias rojas y las plantas de Lechuga crespa. Ver ecuaciones 97.

$$G(cm) = lf - li \qquad G(gr) = pf - pi \qquad (97)$$

En el proyecto de Tapia (2018) las plantas presentan una ganancia en longitud de 6.1 cm y peso de 3.56 gr. El prototipo planteado presenta ganancia en longitud de 7.4 cm y en peso 8.82 gr. Se evidencia mayor crecimiento en el prototipo planteado. Con respecto a las Tilapias, Tapia presenta una ganancia en longitud de 2.1 cm y en peso de 18.45 gr mientras que en el prototipo se obtiene una ganancia en longitud de 3.2 cm y en peso 9.29 gr, por lo tanto, se evidencia mayor longitud en el prototipo planteado, pero mayor ganancia de peso en el proyecto presentado por Tapia.

Si se comparan estos valores con los obtenidos en este estudio, el crecimiento más eficiente de lechugas se presenta en el prototipo de sistema acuapónico automatizado para plantas de lechuga crespa adicionando tilapia roja, a diferencia del crecimiento de las tilapias donde tuvo mejor resultado el proyecto de Tapia referente al peso.

Ramírez et al., (2018) Realiza una comparación entre un cultivo de lechuga crespa hidropónico con uno de lechuga en suelo. El sistema de siembra hidropónico es mucho más rápido comparado con uno de suelo. Las lechugas sembradas en suelo presentaron menor tamaño de planta, pero mayor número de hojas que las lechugas sembradas en el sistema hidropónico. Se presento mayor rendimiento (kg x m²) en el sistema hidropónico.

4.2.4 Ciclo de recirculación de desechos/nutrientes

El ciclo inicia en el tanque de peces donde se producen los desechos metabólicos. Ver ilustración 49.



Ilustración 49. Desechos metabólicos de las tilapias rojas. (autor).

El agua mezclada pasa al filtro del sistema, pasando por un filtro mecánico el cual retiene las partículas más grandes. Ver ilustración 50.



Ilustración 50. Filtro mecánico. (autor).

Posteriormente, pasa por el filtro biológico donde están alojadas las bacterias. Ver ilustración 51.



Ilustración 51. Filtro biológico. (autor).

La bomba es quien permite subir el agua al sistema NFT. Ver ilustración 52.



Ilustración 52. Sistema de nivel. (autor).

Las plantas limpian el agua aprovechando los nutrientes necesarios para crecer. Ver ilustración 53.



Ilustración 53. Limpieza del agua por medio de las plantas. (autor).

De esta manera se realiza el ciclo que estará funcionando constantemente para permitir el crecimiento de las tilapias y lechugas en un mismo lugar.

Finalmente, el diseño del prototipo de forma vertical con tres niveles permite ahorrar espacio para poder producir tanto las plantas como los peces. Si fuera de un solo nivel se estaría usando alrededor de 1.08 m² comparado con un espacio de 0.36 m² que ocupa el prototipo planteado.

4.3 APLICACIÓN MÓVIL

Se realiza una aplicación móvil disponible para Android haciendo uso del software *App Inventor* con el fin de facilitar la lectura de las variables controladas, brindando al usuario fácil acceso. La aplicación cuenta con cuatro indicadores, en este caso: temperatura del agua en el tanque de peces, temperatura en el cultivo de plantas, nivel de agua y visualización del valor de pH. La comunicación de la App se da por

medio de Bluetooth, en este caso solo recibe información del controlador. Ver ilustración 54.

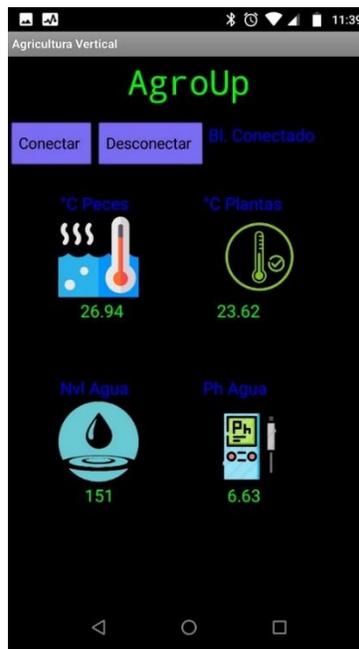


Ilustración 54. Visualización de datos a través de la app. (autor).

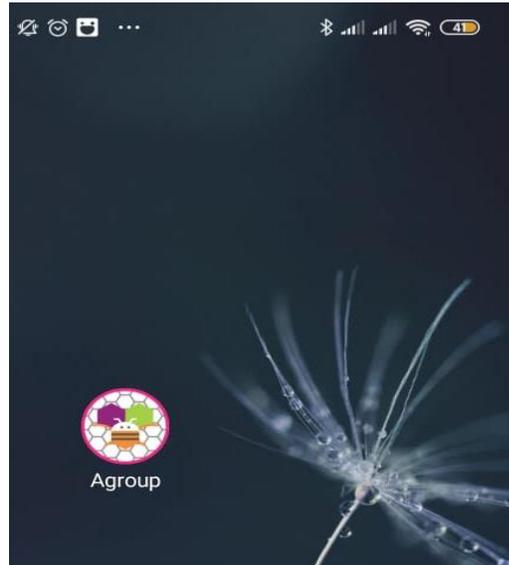
A continuación, se realiza el manejo de la app para la visualización de datos de las variables controladas en el sistema acuapónico automatizado. Ver tabla 10.

Tabla 10. Manejo de la app. [Elaboración propia].

<p>Activar bluetooth</p>	
--------------------------	--

Continuación Tabla 10. Manejo de la app

Ingresar a la app

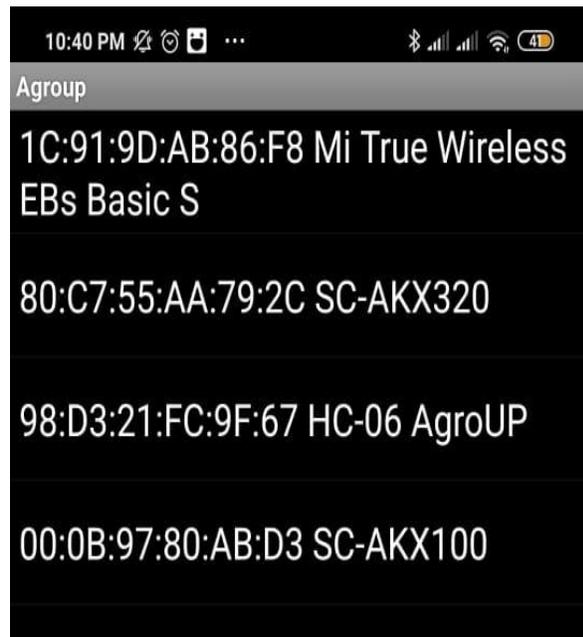


Dentro de la app se selecciona conectar

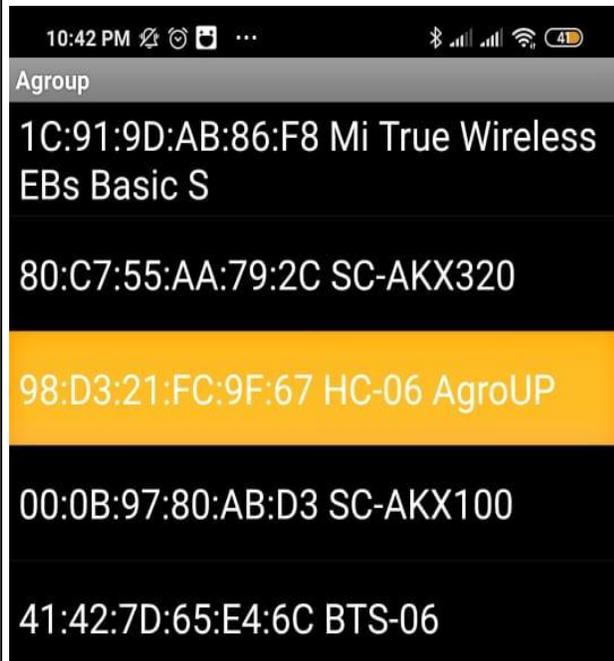


Continuación Tabla 10. Manejo de la app

Se busca el Bluetooth de la app Agroup.



Se selecciona y se conecta al Bluetooth



Continuación Tabla 10. Manejo de la app

Dentro de la app se observa la información arrojada por los sensores y se puede identificar la temperatura en el taque de los peces, la temperatura en el cultivo de las plantas, nivel de agua y Ph del agua.



CONCLUSIONES

El prototipo se desarrolló de forma vertical logrando controlar las variables establecidas, creando un ciclo de recirculación donde los desechos metabólicos de las tilapias rojas son aprovechados como nutrientes para las lechugas cresas, quienes limpian y eliminan compuestos tóxicos.

La estructura planteada para el prototipo de sistema acuapónico automatizado presentado soporta adecuadamente las fuerzas que actúan sobre ella, provocadas por la masa situada en cada uno de sus niveles, dando garantía al factor de seguridad de la estructura obtenido en el estudio el cual fue de 8, lo cual indicaba previamente que la estructura del sistema es apta y puede soportar aún más.

El control PI presentó la mejor respuesta en la práctica para la mayoría de plantas a controlar. El control RST fue el que presentó mejor respuesta en simulación, pero en la práctica no responde de la mejor manera ante perturbaciones.

Contrastando los datos de longitud y peso de tilapias rojas y lechuga cresa encontrados en la literatura, con los obtenidos en el presente estudio, se evidenció el crecimiento sano y eficiente en ambos casos. Las plantas crecieron bajo luz artificial en colores de led rojos y azules sin presentar ninguna plaga o enfermedad que les afectara.

Este prototipo se presenta como una alternativa para aumentar la producción de hortalizas y peces en un mismo espacio, fortaleciendo su producción en regiones de Colombia donde cuentan con poca agua, permitiendo mejorar el abastecimiento de dichos alimentos e incluso adaptarse a las cambiantes condiciones del clima que provocará el calentamiento global. Proyectos como el presentado pueden crear conciencia para seguir desarrollando tecnologías amigables con el medio ambiente que ayuden a garantizar el bienestar del ser humano y del planeta.

TRABAJOS FUTUROS

Como continuación de este proyecto investigativo, algunos de los trabajos futuros o posibles mejoras que se podrían implementar en el sistema acuapónico automatizado, son:

Realizar estudio con luz artificial en colores rojo, azul, verde y demás que puedan aportar en el crecimiento de las plantas, con base en esto obtener la cantidad de luz requerida por la planta según sea su tamaño, brindando un óptimo rendimiento.

Realizar el sistema acuapónico con tecnología IOT para brindar al usuario acceso al control del sistema mediante internet.

Realizar un sistema de energía renovable que permita al sistema funcionar eficientemente.

Permitir que la app genere alertas para limitar los niveles de las variables controladas, de igual manera agregar el control de alimentación desde la app móvil.

REFERENCIAS

- Adhikari, R., Rauniyar, S., Pokhrel, N., Wagle, A., Komai, T., & Paudel, S. R. (2020). Nitrogen recovery via aquaponics in Nepal: current status, prospects, and challenges. *SN Applied Sciences*, 2(7). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2996-5>
- Ahmed, H. A., Yu-Xin, T., & Qi-Chang, Y. (2019). Optimal control of environmental conditions affecting lettuce plant growth in a controlled environment with artificial lighting: A review. *South African Journal of Botany*, 130, 75–89. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.12.018>
- Ajjah, N., Apriyana, A. Y., Sriwuryandari, L., Priantoro, E. A., Janetasari, S. A., Raga, T. Y., ... Sembiring, T. (2020). Beneficiary of nitrifying bacteria for enhancing lettuce (*Lactuca sativa*) and vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides* L.) growths align with carp (*Cyprinus carpio*) cultivation in an aquaponic system. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(1), 880–889. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10468-x>
- Ambrosio, M. H., Jacob, L. H. M., Rulloda, L. A. R., Jose, J. A. C., Bandala, A. A., Sy, A., ... Dadios, E. P. (2019). Implementation of a Closed Loop Control System for the Automation of an Aquaponic System for Urban Setting. *IEEE 11th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/HNICEM48295.2019.9072729>
- Arteaga, L., & Díaz, R. (2018). *Estudio de la Tilapia Roja (Oreochromis sp) y su aplicación en la gastronomía*. Retrieved from <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/35664>
- Ballina Escobar, M. G. (2019). *Diseño y prototipo de una red de sensores inalámbrica para automatización de un sistema acuapónico* (Universidad de San Carlos de Guatemala). Retrieved from <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/13912>

- Benke, K., & Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: Vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice, and Policy*, 13(1), 13–26. <https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054>
- Bian, Z., Cheng, R., Wang, Y., Yang, Q., & Lu, C. (2018). Effect of green light on nitrate reduction and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) under short-term continuous light from red and blue light-emitting diodes. *Environmental and Experimental Botany*, 153(December 2017), 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.05.010>
- Cajo, A. M. (2016). *PRODUCCIÓN HIDROPÓNICA DE TRES VARIETADES DE LECHUGA (Lactuca sativa L), BAJO EL SISTEMA NFT, CON TRES SOLUCIONES NUTRITIVAS*. 102. Retrieved from <https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/23421>
- Caldas, A., Castillo, I., Prado, S., Rosales, L., & Vargas, L. (2019). *Diseño y construcción de sistemas acuapónicos a pequeña escala para familias de la región Piura*. Retrieved from https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/4285/PYT_Informe_Final_Proyecto_Sistemas_acuaponicos.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Camero-Escobar, G., & Calderón-Calderón, H. (2018). Vigilancia tecnológica e inteligencia competitiva para la producción de tilapia roja (*Oreochromis mossambicus*) en el departamento del Huila, Colombia. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 9(1), 19–31. <https://doi.org/10.19053/20278306.v9.n1.2018.8504>
- Colque, V. (2018). *Universidad Mayor De San Andrés Facultad De Agronomía Carrera De Ingeniería Agronómica Tesis De Grado*. Retrieved from <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/20235>
- DANE. (2014). Producción limpia de hortalizas, una mejor salud y bienestar. *Dane*, pp. 1–3. Retrieved from https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/insumos_factores_de_produccion_feb_2014.pdf

- Gabriel, J. (2017). El agua y las consecuencias que esta genera en la agricultura y el medio ambiente. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 5(1), 1–3. Retrieved from http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2308-38592017000100001&lng=es&tlng=es.
- He, D., Kozai, T., Niu, G., & Zhang, X. (2019). Light-Emitting Diodes for Horticulture. *Solid State Lighting Technology and Application Series*, 4, 513–515. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99211-2_14
- Hernández, L. F. (2017). *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)*. 127. Retrieved from <http://bdigital.unal.edu.co/62310/1/1057592154.2018.pdf>
- Hernández, N. (2020). *Vigilancia tecnológica e inteligencia competitiva de un cultivo de alevinos de tilapia roja (Oreocromis sp) en sistema de biofloc*. Retrieved from <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/35213>
- Iswanto, Megantoro, P., & Ma'arif, A. (2020). Nutrient Film Technique for Automatic Hydroponic System Based on Arduino. *2020 2nd International Conference on Industrial Electrical and Electronics (ICIEE)*, 84–86. <https://doi.org/10.1109/ICIEE49813.2020.9276920>
- Majid, M., Khan, J., Ahmad, Q., Masoodi, K., Afroza, B., & Parvaze, S. (2020). Evaluation of hydroponic systems for the cultivation of Lettuce (*Lactuca sativa* L . , var . Longifolia) and comparison with protected soil-based cultivation. *Agricultural Water Management*, (November 2019), 106572. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106572>
- Mallo, J., Gorosito, A., Zanazzi, A., Cecchi, F., Prario, M., Asiain, A., ... Imeroni, J. (2018). Producción innovadora y sustentable en un sistema acuapónico en la provincia de buenos aires. *Encuentro de Centros Propios y Asociados de La CIC*.
- Mamatha, M. N., & Namratha, S. N. (2017). *Design & Implementation of Indoor*

- Farming using Automated Aquaponics System*. 2(August), 396–401. <https://doi.org/10.1109/ICSTM.2017.8089192>
- Mandap, J. P., Sze, D., Reyes, G. N., Dumlao, S. M., Reyes, R., & Chung, W. (2018). Oxygen Monitoring and Control System Using Raspberry Pi as Network Backbone. *TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference*, (October), 1381–1386. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2018.8650469>
- Mashkov, P. H., Beloev, H. I., Gyoch, B. S., Kandilarov, R. Y., & Pencheva, T. G. (2017). LED equipment for light influence on photosynthesis investigations. *2017 26th International Scientific Conference Electronics, ET 2017 - Proceedings, 2017-Janua*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ET.2017.8124352>
- Méndez, Y., Pérez, Y., Torres, Y., & Reyes, J. (2018). Estado Del Arte Del Cultivo De Tilapia Roja En La Mayor De Las Antillas. *Biotecnia*, 20(2), 15–24. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v20i2.593>
- Nadal, A., Cuerva, E., Cerón, L., Josa, A., & Rieradevall, J. (2016). Agricultura en edificios urbanos : Metodología para la implementación de invernaderos en. *Congreso Internacional Towards Green Cities.*, 429–438.
- Namgyel, T., Khunarak, C., Siyang, S., Pobkrut, T., Norbu, J., & Kerdcharoen, T. (2018). Effects of supplementary LED light on the growth of lettuce in a smart hydroponic system. *2018 10th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST)*, 216–220.
- Navas, Á., Cabrera, J. D., Vélez, F., Aparicio, D., Carrillo, C., Pinzón, E., ... Públicos, A. (2017). El cambio climático y la agricultura: un desafío para Colombia y el mundo. In *instname:Universidad de los Andes*. Retrieved from <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/7549>
- Ogata, K. (2013). *Ingeniería de Control Moderna* (Quinta edi; Pearson, Ed.).
- Palacio, S., & Rico, G. (2019). *DISEÑO Y EVALUACIÓN DE TRES PROTOTIPOS DE INCUBADORAS ARTESANALES PARA LA INCUBACION DE HUEVOS EMBRIONADOS DE TILAPIA ROJA (Oreochromis sp.)*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/20.500.12558/1824>

- Pattillo, D. (2017). An Overview of Aquaponic Systems: Hydroponic Components. *NCRAC Technical Bulletins*, 1, 23–32. Retrieved from http://lib.dr.iastate.edu/ncrac_techbulletins/19
- Pérez, A. P., Leyva, D. A., & Gómez, F. C. (2018). *Desafíos y propuestas para lograr la seguridad alimentaria hacia el año 2050*. 9, 175–189. <https://doi.org/https://doi.org/10.29312/remexca.v9i1.857>
- Pinho, S. M., de Mello, G. L., Fitzsimmons, K. M., & Emerenciano, M. G. C. (2017). Integrated production of fish (pacu *Piaractus mesopotamicus* and red tilapia *Oreochromis* sp.) with two varieties of garnish (scallion and parsley) in aquaponics system. *Aquaculture International*, 26(1), 99–112. <https://doi.org/10.1007/s10499-017-0198-y>
- Pino, M. (2020). Curso de horticultura y floricultura año 2020. Guía didáctica: cultivo y producción de lechuga. *Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales*, 1–23. Retrieved from [http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/41414/mod_resource/content/1/Guía de Pimiento 2017 %281%29.pdf](http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/41414/mod_resource/content/1/Guía%20de%20Pimiento%202017%20%281%29.pdf)
- Ramirez, D., Sabogal, D., Jiménez, P., & Hurtado, H. (2017). La acuaponía : una alternativa orientada al desarrollo sostenible. *Facultad de Ciencias Básicas*, 4(1), 32–52. <https://doi.org/10.1109/HNICEM48295.2019.9072729>
- Ramírez, G. A. V., Valencia, B. G., Cardona, M. L. O., López, L. M. D., Álvarez, B. E. J., & Hinestroza, H. E. G. (2018). Evaluación comparativa de lechuga (*Lactuca sativa* L.) "Verónica" bajo condiciones controladas en dos métodos de producción. *Encuentro Sennova Del Oriente Antioqueño*, 4, 36–46. Retrieved from <http://revistas.sena.edu.co/index.php/Encuentro/article/view/2055>
- Ramos, C., Nobrega, L., Baras, K., & Gomes, L. (2019). Experimental NFT hydroponics system with lower energy consumption. *Proceedings of the 2019 5th Experiment at International Conference, Exp.at 2019*, 500, 102–106. <https://doi.org/10.1109/EXPAT.2019.8876479>
- Rodríguez, O. I. (2016). *Diseño e implementación de un microsistema de cultivo*

- acuapónico automatizado* (Universidad de los Llanos). Retrieved from <https://repositorio.unillanos.edu.co/handle/001/1188>
- Saavedra, G., Corradini, F., Antúnez, A., Felmer, S., Estay, P., & Sepúlveda, P. (2017). Manual de producción de Lechuga. *Boletín INIA*, 374, 24-25. Retrieved from <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR40978.pdf>
- Schmautz, Z., Espinal, C., Smits, T., Frossard, E., & Junge, R. (2021). Nitrogen transformations across compartments of an aquaponic system. *Aquacultural Engineering*, 92. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2021.102145>.
- Shailesh, R. K. (2019). Energy efficient LED lighting design for horticulture. *1st International Conference on Advanced Technologies in Intelligent Control, Environment, Computing and Communication Engineering, ICATIECE 2019*, 339–342. <https://doi.org/10.1109/ICATIECE45860.2019.9063621>
- Tapia, C. G. (2018). *Rediseño de reactores acuapónicos unifamiliares para el autoconsumo* (Universidad Internacional SEK). Retrieved from <http://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/3090>
- Valiente, F. L., Garcia, R. G., Domingo, E. J. A., Estante, S. M. T., Ochaves, E. J. L., Villanueva, C. C., & Balbin, J. R. (2018). Internet of Things (IOT) -Based Mobile Application for Monitoring of Automated Aquaponics System. *2018 IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/HNICEM.2018.8666439>
- Vernandhes, W., Salahuddin, N. S., Kowanda, A., & Sari, S. P. (2017). Smart aquaponic with monitoring and control system based on IoT. *Proceedings of the 2nd International Conference on Informatics and Computing, ICIC, 2017-Janua*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IAC.2017.8280590>
- Yanes, A. R., Martinez, P., & Ahmad, R. (2020). Towards automated aquaponics: A review on monitoring, IoT, and smart systems. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 263, p. 121571. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121571>
- Yep, B., & Zheng, Y. (2019). Aquaponic trends and challenges – A review. *Journal*

of Cleaner Production, Vol. 228, pp. 1586–1599.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.290>

Yucra, C. M. (2019). *LA CARBONATITA EN EL RENDIMIENTO Y CALIDAD DE LECHUGA (Lactuca sativa) cv. PATAGONIA*. Retrieved from <http://repositorio.lamolina.edu.pe>

Zaini, A., Kurniawan, A., & Herdhiyanto, A. D. (2018). Internet of Things for Monitoring and Controlling Nutrient Film Technique (NFT) Aquaponic. *International Conference on Computer Engineering, Network and Intelligent Multimedia, CENIM*, 167–171. <https://doi.org/10.1109/CENIM.2018.8711304>

ANEXOS

Anexo 1: Código empleado

Librerías, declaración de pines y variables

```
#include <Wire.h>

#include <RTClib.h>

#include <LiquidCrystal_I2C.h>

#include <Servo.h>

#include <DFRobot_PH.h>

#include <EEPROM.h>

#include <OneWire.h>

#include <DallasTemperature.h>

OneWire ourWire1(10); //Pin Temp. Peces
OneWire ourWire2(12); //Pin Temp. Plantas
DallasTemperature temp_peces(&ourWire1);
DallasTemperature temp_plantas(&ourWire2);

//VARIABLES SENSOR HC-SR04
int Trig = 8, Echo = 7;
int volatile dur, dist1, dist2;

//PANTALLA
LiquidCrystal_I2C lcd(0x3f,16,2);
RTC_DS1307 RTC;
```

```
//VARIABLES LAMPARA 12DC, ULTRAV. Y SERVO
```

```
int lamp12 = 4;
```

```
int lampUlt = 11;
```

```
Servo alimentador;
```

```
//SENSOR PH
```

```
#define PH_PIN A0
```

```
float voltage,phValue,temperature = 25;
```

```
DFRobot_PH ph;
```

```
//VENTILADOR Y TEMP
```

```
int ventilador = 9;
```

```
volatile double temp2;
```

```
volatile double temp1;
```

```
volatile unsigned long tiempo1;
```

```
volatile unsigned long tiempo2;
```

```
volatile unsigned long tiempo3;
```

```
volatile unsigned long tiempo4;
```

```
int pcero = 2;
```

```
//TEMP. EN CULTIVO PLANTAS
```

```
volatile double dT_V;
```

```
double kp_V = 2.065;
double ki_V = 1.65;
double kd_V = 0;
double ref_V = 23;
double error_V = 0;
double errorAnt_V = 0;
double errorSuma_V = 0;
double errorDer_V = 0;

//TEMP. EN EL AGUA DE PECES
volatile double dT_R;
double kp_R = 2.862;
double ki_R = 366.7;
double kd_R = 0;
double ref_R = 27;
double error_R = 0;
double errorAnt_R = 0;
double errorSuma_R = 0;
double errorDer_R = 0;
int res = 6;
volatile long pwm_R;
long delaytime_R = 0;

//NIVEL DE AGUA
```

```

volatile double dT_MB;

double kp_MB = 0.00086;

double ki_MB = 43.58;

double kd_MB = 0;

double ref_MB = 150;

double error_MB = 0;

double errorAnt_MB = 0;

double errorSuma_MB = 0;

double errorDer_MB = 0;

int bomba = 5;

volatile long pwm_MB;

long delaytime_MB = 0;

```

Configuración inicial y bucles

```

//%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%

void setup() {

  Serial.begin(115200);

  //Temp.....

  temp_peces.begin();

  temp_plantas.begin();

  //Nivel.....

  pinMode(Trig, OUTPUT);

```

```
pinMode(Echo, INPUT);
//Lamp 12dc y ultraV.
pinMode(lamp12, OUTPUT);
pinMode(lampUlt, OUTPUT);
//Alimentador
alimentador.attach(3);
alimentador.write(90);
//Reloj
Wire.begin(); //inicia puerto 12c
RTC.begin(); //inicia comunicacion con RTC
//RTC.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__));
lcd.init();
lcd.backlight();
lcd.clear();
digitalWrite(lamp12, HIGH);
digitalWrite(lampUlt, HIGH);
//Sensor Ph
ph.begin();
//Bomba, ventilador y resistencia
pinMode(bomba,OUTPUT);
pinMode(ventilador,OUTPUT);
pinMode(res, OUTPUT);

pinMode(pcerro, INPUT);
```

```

tiempo1 = 0;
tiempo2 = 0;
tiempo3 = 0;
tiempo4 = 0;
}

//%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
void loop() {
  unsigned long TiempoActual = millis();

  long delaytime_R=map(pwm_R, 255,0, 0,8.33);
  if(pulseIn(pzero, HIGH));
  {
    delay(delaytime_R);
    digitalWrite(res, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(res, LOW);
  }

  long delaytime_MB=map(pwm_MB, 255,0, 0,8.33);
  if(pulseIn(pzero, HIGH));
  {

```

```
delay(delaytime_MB);  
digitalWrite(bomba, HIGH);  
delayMicroseconds(10);  
digitalWrite(bomba, LOW);  
}
```

Control de temperatura del cultivo de plantas

```
//-----CONTROL DE TEMP. CULTIVO DE PLANTAS-----  
dT_V=(double)(TiempoActual - tiempo1);  
if(dT_V>=50)  
{  
temp_plantas.requestTemperatures();  
temp2= temp_plantas.getTempCByIndex(0);  
error_V = (ref_V - temp2)*(-1);  
  
errorDer_V = error_V - errorAnt_V;  
errorSuma_V += (ki_V*error_V);  
double U_V = kp_V*error_V + (errorSuma_V)+ kd_V*errorDer_V;  
  
if(U_V>255){  
U_V=255;}  
if(U_V<0){
```

```

        U_V=0;}

    analogWrite(ventilador,floor(U_V));

    errorAnt_V=error_V;

    tiempo1=TiempoActual;

}

```

Control de temperatura de agua

```

//-----CONTROL DE TEMP. EN EL AGUA DE PECES-----

dT_R=(double)(TiempoActual - tiempo2);

    if(dT_R>=3000)

    {

        temp_peces.requestTemperatures();

        temp1=temp_peces.getTempCByIndex(0);

        error_R = ref_R - temp1;

        errorDer_R = error_R - errorAnt_R;

        errorSuma_R += (ki_R*error_R);

        volatile double U_R = kp_R*error_R + (errorSuma_R) +
kd_R*(errorDer_R);

        if(U_R>250){

            U_R = 250;}

        if(U_R<10){

```

```

    U_R = 10;}

    pwm_R=U_R;
    errorAnt_R=error_R;
    tiempo2=TiempoActual;
}

```

Control de nivel de agua

```

//-----CONTROL DE NIVEL DE AGUA-----
dT_MB=(double)(TiempoActual - tiempo3);
    if(dT_MB>=500)
    {
        digitalWrite(Trig, HIGH);
        delay(1);
        digitalWrite(Trig, LOW);
        dur = pulseIn(Echo, HIGH);
        dist1 = dur / 5.84; //DISTANCIA NORMAL
        dist2 = 220 - dist1; //DIST. INVERTIDA
        error_MB = ref_MB - dist2;

        errorDer_MB = error_MB - errorAnt_MB;
        errorSuma_MB += (ki_MB*error_MB);
    }

```

```

    volatile double U_MB = kp_MB*error_MB + (errorSuma_MB) +
kd_MB*(errorDer_MB);

    if(U_MB>250){
    U_MB = 250;}

    if(U_MB<10){
    U_MB = 10;}

    pwm_MB=U_MB;
    errorAnt_MB=error_MB;
    tiempo3=TiempoActual;
}

```

Mensajes y periféricos

```

//*****IMPRIMIR MENSAJE*****
if(TiempoActual-tiempo4>=1000){
    Serial.print(temp1);
    Serial.print(" | ");
    Serial.print(temp2);
    Serial.print(" | ");
    Serial.print(dist2);
    Serial.print(" | ");
    Serial.println(phValue,2);
}

```

```

    lcd.setCursor(0,0);

    lcd.print("      ");

    lcd.setCursor(0,1);

    lcd.print("      ");

    tiempo4=TiempoActual;
}

//*****SENSOR PH*****

voltage = analogRead(PH_PIN)/1024.0*5000;
phValue = ph.readPH(voltage,temperature);
ph.calibration(voltage,temperature);

//*****RELOJ*****

DateTime now = RTC.now(); // Obtiene la fecha y hora del RTC
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("DATE: ");
lcd.print(now.year(), DEC);
lcd.print("/");
lcd.print(now.month(), DEC);
lcd.print("/");
lcd.print(now.day(), DEC);
lcd.print(" ");
lcd.setCursor(0,1);

```

```

lcd.print("TIME: ");
lcd.print(now.hour(), DEC);
lcd.print(":");
lcd.print(now.minute(), DEC);
lcd.print(":");
lcd.print(now.second(), DEC);

//*****ALIMETACION Y LUCES*****

int hora = now.hour();
int minuto = now.minute();
int segundo = now.second();

//Luz ultravioleta
if (hora >= 7 && hora < 19)
{ digitalWrite(lampUlt, LOW);}
else{digitalWrite(lampUlt, HIGH);}

//Alimentacion
if (hora == 7 && minuto == 00 && segundo >= 0)
{ alimentador.write(180);
  digitalWrite(lamp12, LOW);}
if (hora == 7 && minuto == 00 && segundo > 8)
{ alimentador.write(90);}
if (hora == 7 && minuto == 8 && segundo > 0)

```

```
{digitalWrite(lamp12, HIGH);}

if (hora == 9 && minuto == 30 && segundo >= 0)
{ alimentador.write(180);
  digitalWrite(lamp12, LOW);}

if (hora == 9 && minuto == 30 && segundo > 8)
{ alimentador.write(90);}

if (hora == 9 && minuto == 38 && segundo > 0)
{digitalWrite(lamp12, HIGH);}

if (hora == 12 && minuto == 00 && segundo >= 0)
{ alimentador.write(180);
  digitalWrite(lamp12, LOW);}

if (hora == 12 && minuto == 00 && segundo > 8)
{ alimentador.write(90);}

if (hora == 12 && minuto == 8 && segundo > 0)
{digitalWrite(lamp12, HIGH);}

if (hora == 14 && minuto == 30 && segundo >= 0)
{ alimentador.write(180);
  digitalWrite(lamp12, LOW);}

if (hora == 14 && minuto == 30 && segundo > 8)
{ alimentador.write(90);}

if (hora == 14 && minuto == 38 && segundo > 0)
```

```
{digitalWrite(lamp12, HIGH);}

if (hora == 17 && minuto == 00 && segundo >= 0)
{ alimentador.write(180);
  digitalWrite(lamp12, LOW);}
if (hora == 17 && minuto == 00 && segundo > 8)
{ alimentador.write(90);}
if (hora == 17 && minuto == 8 && segundo > 0)
{digitalWrite(lamp12, HIGH);}

}
```