

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**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*)**

Luis Felipe Hernández Zambrano

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá DC, Colombia
2017

- II 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 crespada (*Lactuca Sativa*)
-

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*)

Luis Felipe Hernández Zambrano

Tesis presentada como requisito para optar al título de:
Magíster en Ingeniería Automatización Industrial

Director:

Msc. Oscar Leonardo García Navarrete

Línea de Investigación: Automatización y control de sistemas biológicos

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Eléctrica y Electrónica
Bogotá DC, Colombia
2017

IV 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 cresspa (*Lactuca Sativa*)

*Dedicado a mi Madre y hermanas por su
apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.*

VI 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 cresspa (*Lactuca Sativa*)

Agradecimientos

Al Ingeniero Oscar Leonardo García Navarrete, director de esta investigación por su colaboración en el transcurso de este proyecto.

A la Ingeniera Mily Rocio González Aldana, por la colaboración prestada para la gestión del espacio físico necesario para el montaje de los prototipos acuapónicos construidos (Laboratorio de Ensayos Hidráulicos) del Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola.

A la operaria del laboratorio de Ictiología y Peces Ornamentales Amanda Reyes Muñoz de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia, por el aporte en la evaluación del montaje del sistema acuapónico, asesoría en manejo, alimentación y venta de los alevines de Tilapia Roja para el proyecto.

Al Centro de Bio-sistemas Alberto Lozano Simonelli de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, por la venta de las plántulas de Lechuga Crespita y la información suministrada para el cultivo en condiciones de hidroponía.

Al Ingeniero David Leonardo Galindo Huertas, por su colaboración y asesoría en la instrumentación y control del sistema acuapónico automatizado.

¡Muchas gracias a todos!

Resumen

Este proyecto de investigación presenta las temáticas de sistemas acuapónicos y control de bio-sistemas, mediante la construcción y evaluación de dos prototipos acuapónicos, un sistema tradicional con recirculación simple de agua y un sistema de doble recirculación y recuperación de agua. Se planteó la solución a dos inconvenientes principales de los sistemas acuapónicos convencionales “Rendimiento de cultivo y cantidad de agua utilizada”. Se implementó el diseño de una estrategia de control de parámetros fisicoquímicos del agua, midiendo valores de pH, oxígeno disuelto, temperatura del agua, conductividad eléctrica, humedad relativa ambiente, nivel de agua en biofiltro y luminosidad. Identificando los valores adecuados para cada una de las variables medidas se logró mantener el sistema acuapónico en valores óptimos.

Respecto al rendimiento del cultivo de peces y plantas se observó un comportamiento esperado respecto a curvas de crecimiento para peces y plantas. El diseño propuesto de doble recirculación y recuperación de agua permitió mejorar el rendimiento en el cultivo de lechuga debido a la posibilidad de adicionar los nutrientes faltantes en la solución sin afectar la calidad de agua de los peces. Se evidenció una reducción de la cantidad de agua utilizada en un sistema acuapónico tradicional, pasando de un 6% a un 2% con la incorporación del sistema de doble recirculación en condiciones de invernadero y la implementación de un método de recuperación de agua basado en la obtención por condensación del agua perdida por evapotranspiración de las plantas. Se cumplió con los objetivos planteados y se presentó una solución viable para nuevos proyectos acuapónicos a desarrollar en nuestro país.

Palabras clave: acuapónico, biofiltro, control, lechuga, recirculación de agua, tilapia.

Abstract

This research project presents the subjects of aquaponic systems and control of bio-systems, through the construction and evaluation of two aquaponic prototypes, a traditional system with simple recirculation of water and a system of double recirculation and water recovery. The solution was addressed to two main drawbacks of conventional aquaponic systems "Crop yield and quantity of water used". It was implemented the design of a strategy for the control of physical chemical parameters of water, measuring values of pH, Dissolved Oxygen, Temperature, Electrical Conductivity, relative humidity, water level in biofilter and luminosity. Identifying the appropriate values for each of the measured variables was able to maintain the aquaponic system at optimal values.

Regarding fish and plant yield, an expected behavior was observed for growth curves for fish and plants. The proposed double recirculation and water recovery design allowed improved yield in lettuce cultivation due to the possibility of adding the missing nutrients to the solution without affecting the water quality of the fish. There was evidence of a reduction in the amount of water used in a traditional aquaponic system, from 6% to 2% with the incorporation of the double recirculation system under greenhouse conditions and the implementation of a water recovery method based on the obtaining by condensation of the water lost by evapotranspiration of the plants. The stated objectives were met and a viable solution was presented for new aquaponic projects to be developed in our country.

Keywords: aquaponic, biofilter, control, lettuce, water recirculation, tilapia

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*)

X

Contenido

Pág.

Resumen	VIII
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas	XV
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	XVI
Introducción	1
1. Artículo de revisión sistemas acuapónicos	5
1.1 Resumen	5
1.2 Introducción	6
1.3 Sistemas NFT y raíz flotante.....	9
1.4 Recirculación y uso de agua.....	12
1.5 Rendimiento de cultivo en sistemas acuapónicos.....	14
1.6 Automatización de sistemas acuapónicos.....	17
1.7 Acuaponía en Colombia.....	19
1.8 Conclusiones	21
2. Construcción prototipo sistema acuapónico tradicional y de doble recirculación	29
2.1 Resumen	29
2.2 Introducción	30
2.3 Materiales y métodos.....	31
2.3.1 Materiales	31
2.3.2 Métodos	32
2.4 Resultados y discusión	33
2.5 Conclusiones	38
2.6 Bibliografía	39
3. Estrategia de control para sistema acuapónico tradicional y de doble recirculación con recuperación de agua.	45
3.1 Resumen	45
3.2 Introducción	46
3.3 Materiales y métodos.....	48
3.3.1 Materiales	48
3.3.2 Métodos	53
3.4 Resultados y discusión	57
3.5 Conclusiones	77

3.6	Bibliografía	78
4.	Evaluación de sistema acuapónico tradicional y de doble recirculación para cultivo de tilapia-lechuga	82
4.1	Resumen.....	82
4.2	Introducción.....	83
4.3	Materiales y métodos	84
4.4	Resultados y discusión.....	89
4.5	Conclusiones.....	106
4.6	Bibliografía	107
5.	Conclusiones generales.....	109

Lista de figuras

Pág.

Figura 1-1:	Sistema acuapónico tradicional de tipo vertical.....	7
Figura 1-2:	Sistema de cultivo NFT.....	9
Figura 1-3:	Sistema de cultivo con raíz flotante.	10
Figura 2-1:	Diseño sistema acuapónico tradicional.	33
Figura 2-2:	Diseño sistema acuapónico de doble recirculación.....	34
Figura 2-3:	Filtro mecánico	35
Figura 2-4:	Difusor Flujo de agua filtro mecánico	35
Figura 2-5:	Filtro biológico	36
Figura 2-6:	Cultivo de bacterias nitrificantes	37
Figura 2-7:	Construcción final prototipos.....	38
Figura 3-1:	Promedio Temperatura ambiente	58
Figura 3-2:	Comportamiento Temperatura con 180° de apertura Triac	59
Figura 3-3:	Correlación función de transferencia y datos Temperatura	59
Figura 3-4:	Controlador Proporcional Temperatura.....	60
Figura 3-5:	Controlador Proporcional-Integral Temperatura.....	60
Figura 3-6:	Controlador Proporcional-Integral-Derivativo Temperatura	61
Figura 3-7:	Diagrama bloques control PID temperatura	61
Figura 3-8:	Comportamiento Oxígeno Disuelto con 180° de apertura Triac	62
Figura 3-9:	Correlación función de transferencia y datos OD.....	63
Figura 3-10:	Control PI Oxígeno Disuelto	63
Figura 3-11:	Control PID Oxígeno Disuelto	64
Figura 3-12:	Diagrama bloques control PID oxígeno disuelto	64
Figura 3-13:	pH sistema acuapónico	65
Figura 3-14:	Diagrama bloques control todo o nada pH.....	65
Figura 3-15:	CE en sistema acuapónico tradicional y de doble recirculación	66
Figura 3-16:	Diagrama bloques control todo o nada CE tanque mezcla.....	67
Figura 3-17:	Diagrama bloques control todo o nada CE tanque plantas	67
Figura 3-18:	Diagrama bloques control todo o nada iluminación.....	68
Figura 3-19:	Curva llenado filtro biológico.....	69
Figura 3-20:	Correlación función de transferencia y datos nivel biofiltro.....	70
Figura 3-21:	Control PI nivel biofiltro	70
Figura 3-22:	Diagrama bloques control PI nivel biofiltro	71
Figura 3-23:	Promedio humedad relativa ambiente.....	71
Figura 3-24:	Humedad relativa sistema acuapónico doble recirculación	72

Figura 3-25:	Diagramad e bloques control humedad relativa.....	73
Figura 3-26:	Diagrama de bloques control alimentación.	73
Figura 3-27:	Circuito de identificación de cruce por cero.	74
Figura 3-28:	Circuito de amplificación señal sensor presión diferencial	74
Figura 3-29:	Circuito adquisición de datos con microcontrolador PIC18F4550	75
Figura 3-30:	Circuito de potencia.....	76
Figura 3-31:	Placa electrónica circuito adquisición de datos.....	77
Figura 3-32:	Placa electrónica circuito potencia	77
Figura 4-1:	Curva crecimiento en peso de Tilapia Roja cultivo 1.	90
Figura 4-2:	Curva crecimiento en peso de Tilapia Roja cultivo 2.	91
Figura 4-3:	Crecimiento en peso para Tilapia Roja propuesta por SIPSA.....	91
Figura 4-4:	Curva crecimiento en longitud de Tilapia Roja cultivo 2.....	92
Figura 4-5:	Curva crecimiento en longitud de Tilapia Roja cultivo 2.....	93
Figura 4-6:	Curva de crecimiento en longitud tilapia roja (Ramírez, 2011).....	94
Figura 4-7:	Curva crecimiento en peso fresco lechuga crespa cultivo 1.	97
Figura 4-8:	Curva crecimiento en peso fresco de lechuga crespa cultivo 2.....	98
Figura 4-9:	Curva de crecimiento en altura plantas de lechuga crespa cultivo 1	99
Figura 4-10:	Curva de crecimiento en altura plantas de lechuga crespa cultivo 2.....	100
Figura 4-11:	Angulo HUB medición colorimetría.....	103

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1-1:	Características sustratos usados en hidroponía.....	11
Tabla 1-2:	Principales estudios en sistemas acuapónicos.....	13
Tabla 1-3:	Generación promedio de nutrientes en tanque de peces	14
Tabla 1-4:	Requerimientos nutricionales para cultivos hidropónicos	15
Tabla 1-5:	Parámetros sistema acuapónico	15
Tabla 3-1:	Sensores sistema acuapónico.....	49
Tabla 3-2:	Actuadores Sistema acuapónico	51
Tabla 3-3 :	Variables de control.....	57
Tabla 4-1:	Pesos promedio para cultivo 1 de tilapia roja.	89
Tabla 4-2:	Pesos promedio para cultivo 2 de tilapia roja.	90
Tabla 4-3:	Longitud total promedio para cultivo 1 de tilapia roja.....	92
Tabla 4-4:	Longitud total promedio para cultivo 2 de tilapia roja.....	93
Tabla 4-5:	Resultados crecimiento tilapia roja.....	94
Tabla 4-6:	Alimentación tilapia (ITALCOL)	95
Tabla 4-7:	Biomasa peces sistema acuapónico	95
Tabla 4-8:	Peso fresco promedio para cultivo 1 de lechuga crespa.....	97
Tabla 4-9:	Peso fresco promedio para cultivo 2 de lechuga crespa.....	98
Tabla 4-10:	Altura promedio para cultivo 1 de lechuga crespa.....	99
Tabla 4-11:	Altura promedio para cultivo 2 de lechuga crespa.....	100
Tabla 4-12:	Numero de hojas plantas sistema acuapónico tradicional.....	101
Tabla 4-13:	Numero de hojas plantas sistema acuapónico doble recirculación	101
Tabla 4-14:	Rendimiento plantas sustrato poliestireno expandido	102
Tabla 4-15:	Rendimiento plantas sustrato arlita.....	102
Tabla 4-16:	Medidas color hojas de lechuga.....	103
Tabla 4-17:	Maduración filtro biológico sistema acuapónico tradicional	104
Tabla 4-18:	Maduración filtro biológico sistema acuapónico doble recirculación.....	105
Tabla 4-19:	Consumo agua sistema acuapónico	105

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
<i>A</i>	Área	m ²
<i>V_c</i>	Volumen cilindro	m ³
<i>P</i>	Peso	g
<i>L</i>	Litros	l
<i>r</i>	Radio	m
<i>w</i>	Ancho	m
<i>d</i>	Largo	m
<i>h</i>	Altura	m

Símbolos químicos

Símbolo	Término
<i>Ca</i>	Calcio
<i>Mg</i>	Magnesio
<i>Na</i>	Sodio
<i>K</i>	Potasio
<i>Cl</i>	Cloro
<i>SO₄</i>	Sulfato
<i>HCO₃</i>	Bicarbonato
<i>CO₃</i>	Carbonato
<i>NO₃</i>	Nitrato
<i>NH₄</i>	Amonio
<i>PO₄</i>	Fosfato
<i>Fe</i>	Hierro

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>CAD</i>	Diseño asistido por computador
<i>SIMO</i>	Unica Entrada Unica Salida
<i>MIMO</i>	Multiples Entradas Multiples Salidas
<i>RAS</i>	Sistema de Recirculación de Agua
<i>DRAS</i>	Sistema de Doble Recirculación de Agua
<i>OD</i>	Oxígeno Disuelto
<i>PH</i>	Potencial de Hidrogeno

Abreviatura	Término
<i>CE</i>	Conductividad Eléctrica
<i>PID</i>	Control Proporcional Integral Derivativo
<i>PI</i>	Control Proporcional Integral
<i>PCB</i>	Placa de Circuito Impreso
<i>ISIS</i>	Sistema de Enrutado de Esquemas Inteligente
<i>ARES</i>	Software de Edición y Ruteo Avanzado
<i>HR</i>	Humedad Relativa
<i>FAO</i>	Organización de las Naciones Unidas para la alimentación
<i>IC</i>	Índice de Color
<i>NFT</i>	Técnica de Película de Nutrientes
<i>PVC</i>	Policloruro de Vinilo

Introducción

La generación constante de alimento debido al incremento poblacional mundial (FAO, 2015) presenta a la acuicultura como la fuente de alimento con mayor incremento en los últimos años, sin embargo a medida que pasa el tiempo son cada vez más escasos los recursos físicos como agua, tierra y energía para la producción de alimento, por tal razón los sistemas de producción de alimentos sostenibles están tomando cada vez más importancia a nivel mundial.

Uno de los sistemas que cumplen estas premisas son los sistemas acuapónicos, los cuales son la integración multitrófica de tres biosistemas “peces, plantas y bacterias” que se encuentran en beneficio mutuo a través de un sistema de recirculación de agua (Diver y Rinehart, 2010).

En la actualidad las prácticas de acuicultura son desarrolladas en jaulas flotantes en mar, lagos, lagunas, estanques en tierra y canales en ríos, estas prácticas de acuicultura representan una contaminación a los cuerpos hídricos generados en la salida de los vertimientos de agua debido a que esta se encuentra cargada de compuestos como amonio, nitritos, nitratos, fosfatos, metales los cuales no son tratados debido a la falta de controles en la descarga de agua al medio ambiente repercutiendo en problemas de eutrofización al cuerpo hídrico.

La importancia de esta investigación se centra en el desarrollo de un sistema automatizado que permita mejorar el rendimiento de los sistemas acuapónicos tradicionales así como desarrollar una metodología de recuperación de agua que garantice la disminución del agua perdida por evapotranspiración de las plantas. El prototipo diseñado y desarrollado en esta investigación es escalable y sirve como guía para que sea implementado a nivel productivo.

Este trabajo permite abordar una problemática que involucra diversas áreas del conocimiento como la electrónica, control, agricultura, biología, zootecnia enfocadas a un proceso acuapónico aportando a una solución desde el campo de la ingeniería. Se reitera la importancia del desarrollo de sistemas multidisciplinarios que permitan fortalecer pilares de la economía colombiana como lo es el sector agropecuario.

Los sistemas acuapónicos tradicionales no presentan un buen rendimiento y calidad comparados con sistemas independientes de hidroponía y acuicultura debido a que los macronutrientes y micronutrientes producto de los desechos de los peces no satisfacen completamente los requerimientos nutricionales de las plantas (Graber, 2009).

Estudios previos de sistemas acuapónicos con doble recirculación como el propuesto en esta investigación fueron desarrollados a partir del año 2015 por (Kloas y Baganz, 2015). Estos métodos de recirculación y recuperación de agua son muy recientes y por tal motivo hace falta profundizar más en los desarrollos de estos sistemas buscando que no solamente se trabajen para la investigación sino que puedan ser transferibles a la práctica “ámbito productivo para los agricultores colombianos”.

A partir de esta contextualización y considerando la importancia del desarrollo de nuevos sistemas productivos como los sistemas acuapónicos se plantean las siguientes preguntas:

¿Realizando un sistema de control de parámetros físico químicos del agua en un sistema acuapónico es posible mejorar el rendimiento del cultivo?

¿Es posible recuperar el agua perdida por evapotranspiración en un sistema acuapónico, y esta presenta condiciones para ingreso al tanque de peces?

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar un sistema acuapónico automatizado de tipo tradicional y doble recirculación en cultivo de Tilapia Roja (*Oreochromis mossambicus*) y Lechuga Crespa (*Lactuca sativa*).

Objetivos específicos

- Construir un prototipo del sistema acuapónico tradicional y doble recirculación para la identificación paramétrica de la estrategia de control.
- Implementar una estrategia de control para el sistema acuapónico tradicional y de doble recirculación con recuperación de agua.
- Evaluar el sistema acuapónico automatizado tradicional y de doble recirculación respecto al rendimiento de los cultivos y utilización de agua.

1. Artículo de revisión sistemas acuapónicos

Estudio de rendimiento, consumo de agua y automatización en sistemas acuapónicos.

1.1 Resumen

Los sistemas acuapónicos representan la integración multitrófica de tres biosistemas peces, plantas y bacterias, los cuales se benefician mutuamente a través de un sistema cerrado de circulación de agua (Abdallah y Elmessery, 2014). Investigaciones indexadas en bases de datos sobre estos sistemas datan desde el año 1950. Este artículo de revisión analizó cuales han sido los principales desarrollos en acuaponía a nivel mundial y un enfoque a los sistemas propuestos en Colombia, estudios sobre sistemas de Técnica de Película de Nutrientes (NFT) y raíz flotante con y sin sustrato, rendimientos de cultivos acuapónicos y estudios de automatización aplicados a acuaponía. Se revisaron artículos científicos obtenidos de fuentes primarias como son las bases de datos. Se encontró que los cultivos más utilizados en sistemas acuapónicos son Tilapia- Lechuga y Tilapia-Tomate debido a las tolerancias que proporcionan ambos cultivos. Los países que mayor investigación aportan a este campo son Alemania y España, en Colombia se tienen algunos estudios realizados por la Universidad Militar Nueva Granada y la Universidad San Buenaventura. Respecto al rendimiento de un sistema acuapónico comparado con un cultivo tradicional en hidroponía se encontró que la mayoría de estudios concluyen en un déficit de rendimiento generado por falta de micronutrientes aportados desde la acuaponía.

PALABRAS CLAVE: acuaponía, automatización, biosistema, recirculación.

1.2 Introducción

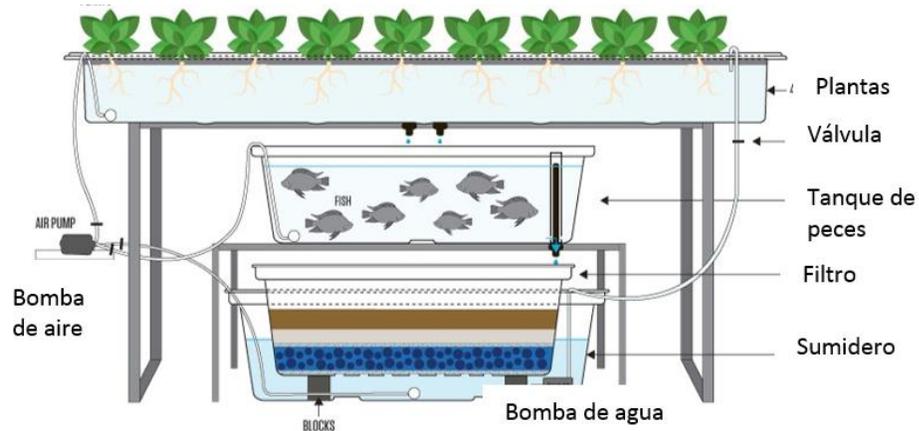
Los sistemas acuapónicos pueden definirse como la unión de un sistema hidropónico y un sistema acuícola. El sistema hidropónico es un método usado para cultivar plantas usando disoluciones minerales en vez de suelo agrícola (Merino, Bonilla y Bages, 2013), el sistema acuapónico es el cultivo de peces para posterior consumo humano.

En los sistemas hidropónicos los nutrientes requeridos por las plantas son suministrados mediante la adición de una solución nutritiva con macronutrientes y micronutrientes acordes al cultivo. Los sistemas hidropónicos se pueden clasificar de dos tipos, los sistemas NFT y los sistemas de raíz flotante con o sin sustrato (Nichols y Savidov, 2010).

Los sistemas NFT basan su funcionamiento en canales de cultivo generalmente de PVC por los cuales circula un reducido caudal de agua con los nutrientes suministrados a la planta (Trang y Dennis, 2017). Este sistema permite suministrar eficientemente los nutrientes requeridos y garantiza una correcta oxigenación de la solución evitando pudrición en las raíces.

Los sistemas de raíz flotante consisten en la inmersión completa de la raíz en el agua, el soporte de la misma puede ser por medio de una lámina de Poliestireno expandido "ICOPOR" o por el uso de sustratos como arlita, perlita, fibra de coco, grava, entre otros (Pantanella y Cardarelli, 2012). De acuerdo al tipo de planta a cultivar se selecciona el sustrato más adecuado en parámetros de aireación, retención de nutrientes, retención de humedad, entre otros.

Según Goddek y Delaide (2015) los sistemas acuapónicos tradicionales constan principalmente de cinco componentes, los cuales son tanque de cultivo de plantas, tanque de cultivo de peces, filtro mecánico, filtro biológico y sumidero. Este autor propone un novedoso diseño de sistema acuapónico vertical en el cual gran parte del flujo de agua recircula por medio de la gravedad como se ilustra en la Figura 1-1.

Figura 1-1: Sistema acuapónico tradicional de tipo vertical

Fuente: Goddek, 2015. Challenges of sustainable and commercial aquaponics.

Estos componentes se encuentran conectados por medio de un sistema de circulación de agua en el cual se benefician mutuamente peces, plantas y bacterias. Los compuestos generados por la descomposición del alimento no consumido por los peces y las heces de los mismos, se encuentran disueltos en el agua que circula inicialmente del tanque de peces hacia el filtro mecánico para la eliminación de las partículas de mayor tamaño, seguidamente el agua circula al filtro biológico que se encarga de la oxidación del amonio a nitritos y posteriormente a nitratos por medio de bacterias del tipo *Nitrosomonas* y *Nitrobacter* que se encuentran adheridas al filtro biológico (Wongkiew et al, 2017).

Las bacterias *nitrosomonas* oxidan el amonio para convertirlo en nitrito, compuesto que sigue siendo tóxico para los peces. Continuando el ciclo de nitrificación las bacterias *nitrobacter* convierten los nitritos en nitratos, siendo este compuesto menos tóxico para los peces en concentraciones bajas, además de ser asimilable como nutriente para las plantas (Shnel et al, 2002). El flujo de agua circula posteriormente del filtro biológico al sumidero donde se separan los sedimentos restantes del agua para finalmente ser conducida al tanque de plantas donde los nutrientes generados son absorbidos.

Algunos factores fisicoquímicos del agua como la temperatura, pH, oxígeno disuelto, turbidez, conductividad eléctrica, alcalinidad total, nitrógeno, fósforo y niveles de minerales deben ser periódicamente monitoreados para garantizar los niveles adecuados de confort para los tres organismos vivos (Pérez, Bejarano y Barragán, 2013).

El objetivo de este artículo es presentar una revisión descriptiva de los sistemas acuapónicos, identificando cuales han sido los avances a través del tiempo a nivel mundial y un énfasis a los desarrollos realizados en Colombia, identificando cuáles cultivos presentan mejores rendimientos, la cantidad de agua utilizada para un sistema acuapónico tradicional y un sistema acuapónico de doble recirculación, sistemas de fijación de plantas y avances en el campo de la automatización de los sistemas acuapónicos.

Se identificaron cuáles son los campos de los sistemas acuapónicos que presentan poco o ningún tipo de investigación y finalmente se menciona la favorabilidad que presentan estos sistemas para llevarlos a una escala productiva, logrando remplazar la acuicultura, hidroponía y agricultura tradicional en tierra.

Para evaluar cuales han sido los principales desarrollos en acuaponía a nivel mundial y un enfoque a los sistemas propuestos en Colombia, se realizó una búsqueda bibliográfica en mayo de 2017 en las bases de datos Science Direct, Scielo, IEEE xplora, Scopus, Springer y libros referentes a sistemas acuapónicos de plataformas como Proquest y e-libro.

Se utilizaron los descriptores: acuaponico y aquaponics, obteniendo un promedio de 90% de los resultados en idioma inglés, siendo este el más usado en la difusión del conocimiento. La base de datos que más artículos presentó con los descriptores usados fue Science Direct con un total de 200 resultados.

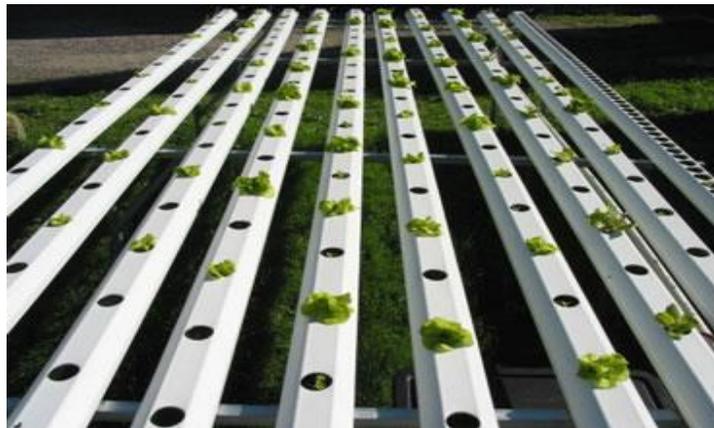
Se realizó una búsqueda en Google Scholar para encontrar aquellos artículos que no han sido indexados pero que poseen información relevante de la temática revisada. Los criterios de selección se sesgaron a aquellos artículos relacionados a rendimientos de cultivos en estudios de sistemas NFT y de raíz flotante, estudios de recirculación de agua, estudios de factibilidad de sistemas acuapónicos respecto a acuicultura y agricultura tradicional e investigaciones de tecnologías usadas en la automatización de los sistemas acuapónicos.

No se tomaron en cuenta artículos relacionados a análisis de enfermedades producidas en sistemas acuapónicos, estudios de generación de nitrógeno, fosforo, metales y su influencia en la calidad del agua.

1.3 Sistemas NFT y raíz flotante

Los tanques para hidroponía que forman parte de los sistemas acuapónicos pueden ser clasificados en dos tipos principales, los sistemas de cultivo NFT y los sistemas de raíz flotante con sustrato y sin sustrato. Los sistemas NFT presentan la característica de que puede controlarse el flujo de agua que circula por las tuberías y el cual está directamente en contacto con las raíces, este flujo puede ser configurado para circular continuamente o implementando un temporizador para garantizar una mayor oxigenación a la raíz de la planta. Generalmente se construyen en canales PVC con perforación para la incorporación de la planta (Pattillo, 2017) como se ilustra en la Figura 1-2.

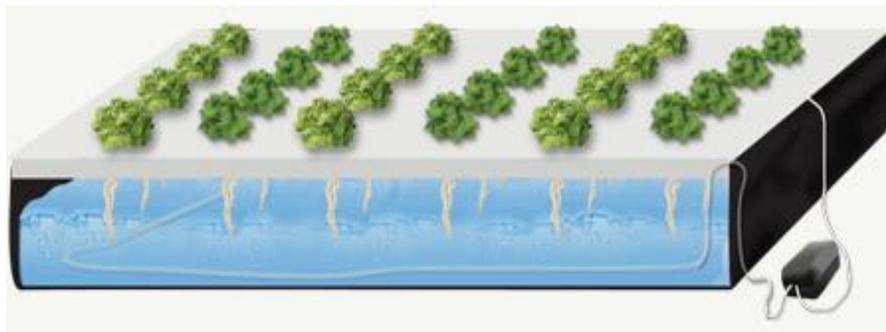
Figura 1-2: Sistema de cultivo NFT.



Fuente: Pattillo, 2017. An Overview of Aquaponic Systems

Los sistemas de raíz flotante pueden ser desarrollados sin sustrato de soporte, cultivando sobre láminas de poliestireno expandido “ICOPOR” o con un medio de sustrato que puede ser de tipo orgánico, inorgánico o sintético. Dentro de los materiales usados se encuentran sustratos minerales naturales como la grava, arena, roca volcánica como zeolitas, puzolanas, tezontle (Lobillo et al, 2014). También se encuentran sustratos minerales tratados como vermiculita, perlita, pumita, arlita, lana de roca, residuos industriales, sustratos orgánicos sintéticos como la espuma de poliuretano, sustratos orgánicos naturales como la turba y el aserrín (Enzo et al, 2001). En la Figura 1-3 se representa un cultivo de lechuga sobre lámina de poliestireno expandido.

Figura 1-3: Sistema de cultivo con raíz flotante.



Fuente: Pattillo, 2017. An Overview of Aquaponic Systems

La selección de un sistema u otro depende de varios factores como son el tipo de planta, nivel de oxigenación requerido del agua, diseño de filtro biológico externo. Algunos sustratos sirven como medio superficial de soporte para el crecimiento de las bacterias nitrificantes, cumpliendo la misma tarea de un filtro biológico. Un inconveniente de los sistemas NFT es que no proveen una superficie de adhesión para el crecimiento de las bacterias nitrificantes, requiriéndose la instalación de un filtro biológico externo (Nelson y Pade, 2008).

Existen diversos estudios que evalúan el rendimiento en los cultivos de acuerdo al sistema hidropónico implementado. (Lennard, 2005) evaluó un cultivo de bacalao Murray - lechuga en sustrato de grava, raíz flotante y NFT, encontrando mayor rendimiento en el cultivo en grava. Este resultado puede asociarse a la mayor disponibilidad de los nutrientes en los cultivos con sustratos debido a la adherencia de los compuestos a los sustratos.

Moldovan y Bala (2015) realizaron estudios con carpa dorada- lechuga, en los cuales compararon un cultivo de raíz flotante y un cultivo en sustrato, encontrando rendimientos similares, sin embargo mencionan que el sistema de raíz flotante es más económico en construcción y mantenimiento, sin embargo para cierto tipo de plantas las láminas de poliestireno pueden no soportar el peso del cultivo.

Los sustratos utilizados en hidroponía presentan características de densidad, porosidad, retención de agua, estabilidad los cuales son analizados para la correcta selección en cultivo, estos sustratos tienen características de disponibilidad de nutrientes y oxígeno en la raíz de la planta. Maucieri y Carmelo (2017) en su investigación sobre sustratos, manejo

de clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo, presentan las características para selección de los sustratos más utilizados en hidroponía y que se representan en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1: Características sustratos usados en hidroponía.

Material	Densidad Aparente	Porosidad	Aireación	Retención de agua	PH	Estabilidad
Turba rubia	0,09	alta	buena	buena	5	limitada
Turba negra	0,2 -0,5	alta	baja	buena	4 – 7	limitada
Corteza de pino	0,2 -0,4	alta	alta	baja	4 – 5	limitada
Fibra de coco	0,3 - 0,9	alta	alta	alta	5-6,1	alta
Cascarilla arroz	0,09	alta	alta	baja	5,2	alta
Arena	1,5 – 1,8	alta	alta	baja	-	alta
Puzolanas	0,8 – 1,3	alta	alta	baja	6,5	alta
Roca volcánica	0,7 – 1,3	buena	buena	buena	7	alta
Perlita	0,08-0,12	alta	alta	buena	7-7,5	baja
Lana de roca	0,07-0,09	alta	buena	alta	7	alta
Arcilla expandida	0,75	alta	alta	buena	5-7	alta
Vermiculita	0,09-0,14	alta	buena	buena	7	baja
Poliuretano	0,07	alta	alta	baja	-	alta

Roosta y Mohsenian (2012), evaluaron el efecto de dos sustratos perlita y fibra de coco con diferentes concentraciones sobre el crecimiento de un cultivo de fresa-carpa, encontrando mejores resultados en el sistema de solo perlita debido a una mayor disponibilidad de nutrientes. Cultivos con poliuretano flexible presentaron mayor rendimiento en parámetro de cantidad de hojas “20%” comparado con sustrato de piedra triturada, este resultado puede atribuirse a la reducción del estrés post trasplante, por otra parte las raíces pueden crecer más fácilmente en comparación al sustrato de piedra triturada (Geisenhoff et al, 2016).

Estudios con el sustrato mineral zeolita y cultivo de lechuga y tilapia roja presentaron resultados en la reducción de nitrógeno y fosforo “-36.6% y -17.9%” respectivamente (Rafiee y Saad, 2006), lo anterior debido a la capacidad de la zeolita para el intercambio de cationes. Este estudio permite identificar sustratos que presentan intercambios iónicos

lo cual representa inconvenientes con las soluciones nutritivas, modificaciones en el parámetro de PH y disminución de nitrógeno disponible para la acción del filtro biológico.

1.4 Recirculación y uso de agua

Los estudios de tasas de flujo de agua en sistemas acuapónicos son importantes debido a que se relaciona directamente con la disponibilidad de nutrientes para las plantas, un mayor flujo de agua evidencia mayor disponibilidad de nutrientes en las raíces de las plantas, mejorando la absorción directa de los nutrientes y las transformaciones producidas por las bacterias (Effendi et al, 2015). El flujo de agua en los sistemas acuapónicos puede ser intermitente o continuo, el primero controlado mediante un sistema de temporización y el segundo de acuerdo al control de velocidad y capacidad de la bomba.

Ciclos intermitentes de circulación y drenaje permiten suministrar nutrientes en la primera fase y oxigenar en la segunda (McMurtry et al, 1997). Por otra parte en los sistemas de flujo continuo el tiempo de contacto del agua con la raíz es constante incrementando la posibilidad de absorción de compuestos, sin embargo repercute en niveles más bajos de oxígeno. El flujo de agua depende físicamente de la capacidad de la bomba y su diseño se relaciona directamente con la capacidad de funcionamiento del filtro mecánico y filtro biológico.

Campos et al, (2013), evaluó un sistema acuapónico bajo condiciones de flujo intermitente “10 minutos de circulación y 70 minutos de drenaje” y flujo continuo obteniendo mejores resultados con el sistema de circulación continua en el cual se identificó una mayor asimilación de nitrato, fosfato y una mejor regulación de PH. Sreejariya et al, (2016) realizó estudios con tres regímenes de recirculación sobre un cultivo de tilapia y lechuga, los tiempo estudiados fueron de 24, 18 y 11 horas encontrando rendimientos de cultivo similares, sin embargo estos resultados distan de los encontrados en la mayoría de artículos donde se identifica mayores rendimientos en los sistemas que presentan mayor flujo de circulación como el estudiado por Shete et al, (2013), quien investigó cuatro periodos de recirculación “4, 8, 12, 24 horas” sobre un sistema de pez dorado y espinaca, encontrando diferencias en los niveles de concentración de nitritos y nitratos, mayor

crecimiento de peces en el sistema de 24 horas, disminución de la clorofila en la hoja en el sistema de 4 horas causado por la disminución en la disponibilidad de nutrientes.

Respecto al consumo de agua en sistemas acuapónicos los rangos de valores oscilan entre un dos y un cinco por ciento de gasto diario para sistemas con condiciones de temperatura promedio de quince grados Celsius y cuatro a seis por ciento para los sistemas que trabajan a temperatura promedio de 27 grados Celsius (Masser, 2006). La pérdida de agua está influenciada por otras condiciones como la construcción del biofiltro, temperatura, condiciones de invernadero, área superficial de los tanques de cultivos de plantas y peces. En la tabla 1-2 puede observarse las especies de peces, plantas, tipo de sistema hidropónico, temperatura de agua, consumo de agua y referencia de diferentes investigaciones realizadas con sistemas acuapónicos.

Tabla 1-2: Principales estudios en sistemas acuapónicos.

Tipo de hidroponía	Especie de pez	Especie de planta	Temperatura de agua (°C)	Consumo de agua (%)	Referencia
Raíz flotante sin sustrato	Tilapia Nilotica	Ipomea acuática	27.5	4.0	Delaide et al, 2017
	Bagre	Ipomea acuática	29	5.2	Biertnazki y Meinecke, 2014
	Tilapia Nilotica	Tomate	26	3.9	Helfrich et al, 1990
	Bacalao	Lechuga	21	2.15	Kepenyes, 2001
	Tilapia Roja	Albahaca	26.5	6.9	Reza , 2013
Hidroponía en sustrato	Carpa	Remolacha	26.3	4.0	Johanna y Dennis, 2016
	Carpa	Repollo chino	26.9	4.2	Zhang et al, 2016
	Tilapia Nilotica	Berenjena	25.0	7.0	Tyson y Treadwell, 2011
	Tilapia Roja	Lechuga	>25.0	3.5	McMurtry et al, 1997
NFT	Tilapia Nilotica	Tomate	25	3.83	Kloas et al, 2015
	Tilapia Roja	Lechuga	29.1	5.0	Castillo et al, 2016
	Tilapia Roja	Lechuga	28	4.0	Al-Hafedh et al, 2008

Rakocy y Bailey (2004), identificaron que los contaminantes presentes en el agua se deben principalmente a los desechos orgánicos generados por los peces y al alimento no consumido por los mismos, propuso modelos matemáticos de contaminantes generados y su relación a la biomasa presente y tipo de alimentación suministrada.

Savidov y Hutchings (2005), desarrollaron un sistema de recirculación de agua en un sistema acuapónico en Canadá con el cual determino los niveles de PH recomendados para los cultivos de plantas siendo el rango de 5.5 a 6.5 los valores óptimos de este parámetro. Respecto al entorno industrial los sistemas NFT son los más utilizados por disponibilidad de espacio y por su facilidad en manejo, sin embargo son los sistemas en sustrato los que mayores rendimientos presentan evaluando los estudios realizados.

1.5 Rendimiento de cultivo en sistemas acuapónicos

Graber (2009), encontró que ciertos nutrientes como el potasio, hierro, calcio y fosforo no son generados en los porcentajes adecuados para las plantas en los sistemas acuapónicos generando un déficit en su crecimiento. En la tabla 1-3 y tabla 1-4 puede observarse la generación promedio de macronutrientes y micronutrientes producidos en un tanque de peces y los requerimientos necesarios para un correcto crecimiento de las plantas.

Tabla 1-3: Generación promedio de nutrientes en tanque de peces

Macronutrientes	Concentración (mg/L)	Micronutrientes	Concentración (mg/L)
$N - NO_3$	127	Fe	0.08
$N - NO_2$	0.39	Mo	0.016
$N - NH_4$	1.33	Cu	0.015
$P - PO_4$	6.89	Cl	82.63
K	6.12	Na	62.40
$S - SO_4$	165.37		
Ca	212.90		
Mg	32.33		

Tabla 1-4: Requerimientos nutricionales para cultivos hidropónicos

Macronutrientes	Concentración (mg/L)	Micronutrientes	Concentración (mg/L)
$N - NO_3$	185.17	Fe	0.30
$N - NO_2$	0.08	Mo	0.70
$N - NH_4$	0.19	Cu	0.03
$P - PO_4$	6.62	Cl	202.43
K	39.92	Na	155.40
$S - SO_4$	344.83		
Ca	416.97		
Mg	164.92		

Reza (2013), realizó un estudio del crecimiento de carpa y albahaca donde encontró buen crecimiento de peces con 100% de supervivencia, en el análisis de la albahaca encontró deficiencia de hierro generando hojas con insuficiencia de clorofila, se identificó altas concentraciones de zinc en el sistema acuapónico reduciendo el transporte de manganeso de la raíz a la hoja.

En la tabla 1.5 se expresan los parámetros básicos en los cuales se deben encontrar los cultivos de peces, plantas y bacterias para obtener los rendimientos más altos, de acuerdo al tipo de pez y planta del sistema acuapónico se realiza un promedio de estos valores para garantizar niveles adecuados en todo el sistema.

Tabla 1-5: Parámetros sistema acuapónico

Parámetro	Peces	Plantas	Bacterias
PH (pH)	6 -8	6-7	5.5 - 7
Oxígeno disuelto (mg/L)	3-9	3-5	4-7
Temperatura (°C)	15-30	17-25	15-25

Cervantes, Hernández, Pérez (2015), realizaron un estudio comparativo de crecimiento de hongos setas, forraje verde y cucurbitáceas utilizando un sistema de riego tradicional “agua potable sin nutrientes” y un sistema acuapónico obteniendo en setas un incremento de

16% en sistema acuapónico y en forraje verde “trigo” el incremento fue de un 6%, encontraron una reducción del 50% en la reducción en el tiempo de cultivo de pepino y sandía asociado a la permanencia de flujo en las raíces

Campos et al, (2013), desarrollaron un estudio de crecimiento de tres plantas “perejil, orégano y menta” con cultivo de tilapia. El perejil no soportó las condiciones de cultivo en acuaponía, el orégano presento menor altura comparado con la siembra tradicional, la menta presento rendimientos similares al cultivo tradicional, el autor encontró valores elevados de bicarbonatos repercutiendo en la disponibilidad de calcio, magnesio, manganeso, hierro para las plantas. Ramirez (2009), realizó un estudio con orégano y menta a nivel comercial con una producción anual en tilapia de 4.37 toneladas y de 2 kg/m² para menta, encontró deficiencia de nutrientes al finalizar los ciclos de cultivo, respecto al crecimiento de tilapia la sobrevivencia fue del 91,10% y conversión alimenticia del 1,40.

Geisenhoff et al, (2016), evaluó el efecto de diferentes sustratos en la producción de lechuga – tilapia, los sustratos fueron grava y espuma de poliuretano encontrando rendimientos en plantas de 86,20g y 95,48g respectivamente asociados a un menor estrés en el trasplante para el sustrato de espuma de poliuretano, se comparan estos resultados con el rendimiento de un sistema hidropónico encontrando menor producción para el sistema acuapónico.

Los sistemas de doble recirculación de agua para sistemas acuapónicos desarrollados por Kloas y Baganz (2015) permitieron aumentar los rendimientos en estos sistemas eliminando las desventajas presentadas por deficiencia en macronutrientes y micronutrientes adicionando los componentes faltantes con una solución comercial para sistemas hidropónicos, el agua perdida por evapotranspiración es recuperada por condensación para así realizar un ciclo cerrado de agua.

Dennis (2016), evaluó el rendimiento de una producción intensiva de tomate y tilapia implementando una réplica del método propuesto por Kloas y Baganz (2015), respecto a un sistema hidropónico convencional, en esta investigación no se encontraron los mismos resultados de Kloas y Baganz (2015), quien obtuvo rendimientos similares en acuaponía e hidroponía.

El rendimiento del cultivo en un sistema acuapónico está relacionado a las tasas de flujo de recirculación, Simbeye y Yang (2014), estudiaron las tasas de flujo de 50, 200 y 400% encontrando mayor ganancia de peso en la de mayor recirculación debido a la disponibilidad continua de nutrientes para la planta, la tasa de conversión de alimento también se reduce incrementando la recirculación.

Muñoz (2012) investigó sobre el rendimiento del sistema acuapónico a pequeña escala de tipo comercial "PAFF Box" encontrando que para el crecimiento de un kg de vegetal se consumen 244 litros de agua y 84.5 kwh de electricidad, para el incremento de 1 kg de tilapia consume 278 litros y 96.2kwh. Dennis et al, (2016) desarrollo un sistema acuapónico en el cual logro cultivar plantas autóctonas de Guatemala junto a tilapia nilotica, en el estudio evaluó 8 tipos de plantas de las cuales 7 obtuvieron buenos rendimientos encontrando una supervivencia en plantas del 90% y una ganancia de peso de 150g, la supervivencia de peces tuvo una media de 70.3% y una ganancia de peso de 30g.

Aguilar y Trelles (2014), evaluaron el crecimiento de carpa dorada y lechuga bajo condiciones de invernadero con sistema de raíz flotante con sustrato durante 178 días encontrando una tasa de crecimiento absoluto y relativo para la carpa de 4,95g y 6,54cm y para la lechuga 100g.

1.6 Automatización de sistemas acuapónicos

Existen pocos estudios sobre automatización en sistemas acuapónicos, generalmente es un sistema desarrollado de forma tradicional donde la mayoría de actividades de control y seguimiento de la producción se realizan de forma manual, los parámetros son medidos con kits de muestreo o análisis en laboratorio repercutiendo en la imposibilidad de tomar una decisión en tiempo real del comportamiento del sistema acuapónico.

Estos sistemas requieren de dispositivos mecánicos y eléctricos como aireadores, bombas, calefactores, dosificadores, alimentadores. La fuente de energía utilizada en las investigaciones consultadas es de un 95% energía convencional y un 5% energía renovable "celdas fotovoltaicas" (Goddek y Delaide, 2015).

Para garantizar el crecimiento y supervivencia de los organismos en acuaponía es necesario medir los parámetros de calidad del agua temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, salinidad, solidos disueltos totales, nitrógeno amoniacal total, turbidez y parámetros ambientales como temperatura, humedad relativa, dióxido de carbono y luminosidad (Kumar, 2016).

Silva (2016), planteó un monitoreo de la calidad del agua basado en redes de sensores inalámbricos, controlando temperatura, contenido de oxígeno disuelto y PH, información que es enviada a un computador y procesada en el software LabVIEW. También se han desarrollado investigaciones en actuadores usados en piscicultura, como lo son alimentadores automáticos propuestos por Abdallah y Elmessery (2014) y sistemas de aireadores propuestos por Pérez et al, (2013).

Un estudio de automatización de sistema acuapónico con implementación de energía solar se realizó en Oman Asia, el sistema de control y monitoreo se realizó con la placa arduino, software Labview y comunicación GSM para envió de información a teléfono móvil. Las variables ambientales controladas fueron temperatura, humedad relativa, dióxido de carbono y luminosidad, todas las anteriores usando control discreto. Las variables medidas en calidad de agua fueron temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, el control de las variables anteriores se realiza por intercambio de agua al 25% (Nagayo et al, 2017), sin embargo contradice el principio de la acuaponía basado en que no se requiere de recambios de agua.

Un sistema acuapónico autónomo realizó la medición de tres variables “temperatura, ph, nitrato”, análisis de imagen por medio de un pez robótico para identificación de comportamientos anormales que relacione una posible enfermedad en el pez y el sistema de internet de las cosas para envió de alertas al usuario sobre un sistema acuapónico de tomate y carpa dorada (Kumar, 2016).

Una investigación realizada en la universidad Teknologi en Malasia, Saaid (2013), desarrollo un sistema acuapónico con lechuga y carpa dorada donde desarrollaron una técnica de cultivo automatizado sobre las variables nivel de agua, y temperatura en tanque de peces y plantas utilizando un Arduino Mega como controlador, no se presentaron resultados de crecimiento de cultivo.

El concepto TES “Almacenamiento de energía térmica” fue aplicado a un sistema acuapónico en invernadero cerrado mediante el método NFT, el uso de calor proveniente de una mina subterránea permitió realizar transferencia térmica para controlar la temperatura de un invernadero sin utilizar energía convencional (Biernatzki y Meinecke, 2014).

Silva (2016), realizó un estudio comparativo entre un control PID y un control basado en lógica difusa para el proceso de nitrificación en un sistema acuapónico, selecciono el control difuso debido a que es adecuado para técnicas de control adaptativo, el autor utilizo el internet de las cosas y sensores de amonio.

Mahesh y Shyba (2016), relacionaron los conceptos de biotecnología para la mejora genética de cultivos con la automatización de un sistema acuapónico NFT, el sistema midió parámetros de calidad del agua como el pH, conductividad eléctrica y temperatura. Symbeye (2014), diseño una red de sensores inalámbricos para monitoreo y control de temperatura, oxígeno disuelto, pH y nivel de agua en tiempo real, implemento módulos ZigBee y el software LabView, evaluó el rendimiento de las baterías para cada nodo de sensores sin embargo presento perdida de datos y colisión de los mismos.

Un sistema acuapónico comercial conocido como VEGILAB desarrollado por una compañía Japonesa ofrece un diseño acuapónico para interiores con un control de iluminación, temperatura y pH, el valor del sistema es de 2000 dólares siendo un poco inasequible para un cliente promedio.

1.7 Acuaponía en Colombia

En Colombia se han desarrollado investigaciones tanto en acuaponía tradicional como en acuaponía con automatización, se destacan trabajos en la Universidad Militar Nueva Granada, la Universidad del Quindío, la Universidad Surcolombiana, sin embargo en el ámbito comercial la acuaponía en nuestro país no ha tenido un avance significativo debido a que las regulaciones medioambientales no son cumplidas por los acuicultores actuales, quienes vierten agua cargada producto de la salida de sus actividades piscícolas sin

realizar ningún tipo de tratamiento debido a que les generaría costos económicos adicionales.

El instituto de ictiología de la Universidad Militar Nueva Granada ha realizado diversas investigaciones con sistemas acuapónicos, dentro de los que se destacan la evaluación del crecimiento de goldfish, carpa común y orégano en un sistema acuapónico donde encontró la necesidad de suministrar quelatos de hierro e hidróxido de potasio debido a la ausencia en la generación del sistema acuapónico, evaluación de sistema goldfish – lechuga. Ramirez (2009), quien realizó un estudio comparativo entre un sistema hidropónico y un sistema acuapónico encontrando deficiencias en el segundo por falta de nutrientes, Efecto de la biomasa de *Carassius auratus* - *Cyprinus carpio* sobre el crecimiento de *Origanum vulgare* en sistemas acuapónicos (Hurtado, 2014), Evaluación preliminar de sistemas acuapónicos e hidropónicos en cama flotante para el cultivo de orégano (Gómez et al, 2011), Montaje y evaluación de sistemas de cultivo acuapónicos carpa roja "*Cyprinus carpio*"-orégano "*Origanum vulgare* " (Hurtado, 2010).

Lozano (2015), realizó un estudio de factibilidad para el montaje de sistemas acuapónicos en la isla de providencia y santa catalina. Respecto al ámbito empresarial, en el municipio de Tenjo "Cundinamarca" se encuentra la empresa Acuapónicos La Mariana con producción de lechuga y trucha arcoíris, en Itagüí la empresa Acuaponía Colombiana quienes realizan investigación y fabrican sistemas acuapónicos para hogar e industria, en Casanare la empresa AquaponiCas trabajan con tomate y tilapia.

Investigación en acuaponía relacionada a automatización se presentó en la Universidad del Quindío donde se realizó la construcción de un sistema de instrumentación para la medición de temperatura, pH y oxígeno disuelto (Pérez et al, 2013), sin embargo este estudio se realizó solamente en estanque simulado sin peces ni plantas, por tal razón serviría como mecanismo de adquisición de datos pero no de control.

1.8 Conclusiones

Los sistemas acuapónicos sirven como alternativa a los cultivos tradicionales de peces y plantas, aprovechando los beneficios de ambos sistemas. Existen diversas investigaciones en estos sistemas sin embargo continuamente se desarrollan nuevos estudios que buscan mejorar los rendimientos y reducir la cantidad de agua utilizada. Se encontraron los mejores resultados de producción en los sistemas de raíz flotante con sustrato y en aquellos que presentaban el mayor flujo de agua asociado al incremento en la disponibilidad de los nutrientes para las plantas.

Se encontró que los sistemas más investigados en acuaponía son el sistema Tilapia – tomate y Tilapia- lechuga. Respecto a la automatización de estos sistemas se encuentran varios trabajos que permiten manejar el sistema con poca intervención humana sin embargo la mayoría de estos utiliza el recambio de agua como control de las variables, con lo anterior contradiciendo el principio acuapónico de cero recambio de agua. Con el sistema propuesto por Kloas y Baganz (2015), se lograron obtener resultados de rendimientos similares a un sistema hidropónico tradicional, sin embargo hace falta más investigación en este campo. En Colombia se presentan trabajos centralizados como los desarrollados en la Universidad Militar Nueva Granada, sin embargo hace falta el desarrollo de estos sistemas de forma multidisciplinaria para obtener mejores resultados.

1.9 Bibliografía

- Abdallah, S., Elmessery, W., (2014). An Automatic Feeder with Two Different Control Systems for Intensive Mirror Carp Production. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2,18–32.
- Aguilar, A., Trelles, A. (2014). Crecimiento de goldish, *Carassius auratus*, y lechuga, *Lactuca sativa*, en sistema acuapónico en condiciones de invernadero. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Trujillo, *Revista Ciencias Biológicas* 12, 54-72.

- Biernatzki, R., Meinecke, D. (2014). Close Greenhouse Concept Integrating Thermal Energy Storage (TES) applied to Aquaponics Systems.
- Campos, R., López, A., Avalos, D., Hoyos, A., Mendiola, J. (2013). Caracterización fisicoquímica de un efluente salobre de tilapia en acuaponía, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15, 939-950.
- Cervantes, S., Hernández, V., Pérez, C. (2015) Aprovechamiento de metabolitos nitrogenados del cultivo de tilapia en un sistema acuapónico, *Ecosistemas y recursos agropecuarios*.
- Delaide, B., Ragnheidur, A., Haissam, J. (2017). Plant and Fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF Box, a small-scale aquaponic system, *Aquacultural Engineering Journal*, 78, 130-139.
- Dennis, C., Sandoval, C., Sagastume, E., Díaz, M., Ríos, L. (2016) Adaptación y rendimiento de plantas autóctonas de Guatemala en un sistema acuapónico, *Revista Electrónica de Veterinaria*, vol 17.
- Diver, S. Rinehart, L. (2010). Integration of Hydroponics with Aquaculture, ATTRA National sustainable agriculture information service butte, Montana. . Elsevier, 1, 30–37.
- Effendi, H., Utomo, B.A., Darmawangsa, G.M., Sulaeman, N. (2015). Combination of water spinach (*Ipomea aquatica*) and bacteria for freshwater crayfish red claw (*Cherax quadricarinatus*) culture wastewater treatment in aquaponic system. *Biological Advances Journal*, 6, 30-42.
- Enzo, M., Gianquinto, G., Lazzarin, R., Pimpini, F., Sambo, P. (2001). Principi técnico agronomici della fertirrigazione e del fuori suolo. Tipografia-Garbin, Padova, Italy.
- FAO. (2015). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. ISSN 0251-1371
- Geisenhoff, L.O., Jordan, R.A., Santos, R.C., Oliveira, F.C., Gomez, E.P. (2016). Effect of different substrates in aquaponic lettuce production associated with intensive tilapia farming with water recirculation systems. *Eng Agr*, 36, 291-299.

- Goddek, S. Delaide, B. (2015). Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability*, 7, 4199–4224.
- Gomez, E., Hurtado, H., Pérez, M. (2011). Evaluación preliminar de sistemas acuapónicos e hidropónicos en cama flotante para el cultivo de orégano (*Origanum vulgare*). *Revista Facultad De Ciencias Básicas*, 7, 102 – 119.
- Graber, A.J. (2009). Aquaponics systems: nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Aquaculture Innovations*, 246,147–156.
- Helfrich, L.A., Libey, G., Tech, V. (1990). *Fish Farming in Recirculating Aquaculture Systems (Ras)*. Department of Fisheries and wildlife Sciences.
- Hurtado, H., Ramirez, L., Gómez, E. (2010) Montaje y evaluación de sistemas de cultivo acuapónicos carpa roja “*Ciprinus carpio*”-orégano “*Origanum vulgare*. *Revista Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Militar Nueva Granada*, 7, 12-27.
- Johanna, S., Dennis, D. (2016). Advanced aquaponics: Evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs conventional hydroponics. *Agricultural Water Management*, 178, 335–344.
- Kepenyes, J. (2001). *Aeration and oxygenation in aquaculture*. Inland Aquaculture Engineering, Rome.
- Kloas, W. Baganz, D. (2015). A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity and to reduce environmental impact. *Aquac Environ Interact*, 7, 179–192.
- Kumar, H. (2016). An autonomus Aquaponics System using 6LoWPAN based WSN. 4th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops.
- Lennard, W., Leonard, B.V. (2005). A comparison of reciprocating flow versus constant flow in an integrated, gravel bed, aquaponic test system. *Aquacult. Int*, 6, 539-553.
- Lobillo, J., Fernández, V., Carmona, E., Candón, L. (2014) Manejo básico y resultados preliminares de crecimiento y supervivencia de tencas (*Tinca tinca* L.) y

- lechugas (*Lactuca sativa* L.) en un prototipo acuapónico. Universidad de Sevilla. ITEA, 110, 142-159.
- Lozano, C., Israel, A., (2015). Estudio de factibilidad para el montaje de un sistema de cultivos acuapónicos en la isla de Providencia y Sta. Catalina – San Andrés Colombia. Universidad de Cartagena.
- Mahesh, P., Shyba, S. (2016). New Aspect for Organic Farming Practices: Controlled Crop Nutrition and Soils Agriculture. IEEE Global Humanitarian Technology Conference.
- Masser, M. (2006). Recirculating Aquaculture Production Systems: Aquaponics Integrating Fish and Plant Culture. Aquaculture Center, Stoneville, Mississippi, 1, 1–16.
- Massimiliano, F. (2000). Robust multivariable PID control for linear parameter varying systems. Dipartimento di Informatica Matematica, Elettronica e Trasporti, Università Mediterranea degli Studi di Reggio Calabria.
- Maucieri, T., Carmelo, H. (2017). Hydroponic systems and water management in aquaponics: a review. Italian Journal of Agronomy. University of Padova. doi: 10.4081/ija.
- McMurtry, M.R., Sanders, D.C., Cure, J.D., Hodson, R.G., Haning, B.C., Amand, E.C. (1997). Efficiency of water use of an integrated fish/vegetable co-culture system. J. World Aquacult, 28, 420-428.
- Merino, M. C., Bonilla, S. P., Bages, F. (2013). Diagnóstico del estado de la Acuicultura en Colombia. AUNAP.
- Moldovan, I.A., Bala, M. (2015). Analysis of aquaponic organic hydroponics from the perspective of setting costs and of maintenance on substratum and floating shelves systems. Horticulture Forest Biotechnology, 19, 73-76.
- Muñoz, M. (2012). Sistemas de recirculación acuapónicos. Informador Técnico Colombia, 60, 123–129.

- Nagayo, A., Mendoza, C., Vega, E. (2017). An Automated Solar- Powered Aquaponics Systems towards Agricultural Sustainability in the Sultanate of Oman. IEEE International Conference on Smart Grid and Smart Cities.
- Nelson, R., Pade, J. (2008). Aquaponic Equipment The Bio Filter. *Aquaponics Journal*, 47, 30-31.
- Nichols, M., Savidov, N. (2010). Aquaponics: a nutrient and water efficient production system. Second symposium on soilless culture and hydroponics, 947, 129–132.
- Pantanella, E., Cardarelli, M. (2012). Aquaponics vs hydroponics: production and quality of lettuce crop. *Acta Horti*, 927, 887–893.
- Pattillo, D. (2017). An Overview of Aquaponic Systems: Hydroponic Components. *NCRAC Technical Bulletins*, 1, 23-32.
- Pérez, A., Bejarano, J., Barragán, J. (2013). Sistema de Instrumentación para la Medición de la Temperatura, pH y Oxígeno Disuelto presentes en la Piscicultura bajo Condiciones de Estanque Artificial. *Scientia Et Technica*, 18, 401–408.
- Rafiee, G., Saad, C.R. (2006). The effect of natural zeolite (clinoptilolite) on aquaponic production of red tilapia (*Oreochromis sp.*) and lettuce (*Lactuca sativa var. longifolia*), and improvement of water quality. *J. Agric Sci Technol*, 8, 313-322.
- Rakocy, J., Bailey, D. (2004). Update on Tilapia and vegetable production in the UVI aquaponic system, *New Dimensions on farmed Tilapia. Sixth international symposium on Tilapia in aquaculture*, 1, 2–16.
- Ramirez, D. (2009). Montaje y evaluación preliminar de un sistema acuapónico goldfish-lechuga. *Revista Facultad de ciencias. Universidad Militar Nueva Granada*, 5, 154–170.
- Reza, H. (2013). Comparison of the vegetative growth, ecophysiological characteristics and mineral nutrient content of basil. *Jorunal of plant nutrition, University of Rafsanjan*.

- Roosta, H.R., Mohsenian, Y. (2012). Effects of foliar spray of different sources on pepper (*Capsicum annum* L.) plants in aquaponic system. *Sci. Hortic*, 146, 182-191
- Saaid, M. (2013). Automated Indoor Aquaponic Cultivation Technique. IEEE 3th International Conference on System Engineering and Technology, Malaysia.
- Savidov, N., Hutchings, E. R. (2005). Fish and plant production in a recirculating aquaponic system: a new approach to sustainable agriculture in Canada. International Conference and Exhibition on Soiless Culture, 742, 209–221.
- Shete, A.P., Verma, A.K., Tandel, R.S., Prakash, C., Tiwari, V.K., Hussain, T. (2013). Optimization of water circulation period for the culture of goldfish with spinach in aquaponic system. *J Agric Sci*, 5, 26-30
- Shnel, N., Barak, Y., Ezer, T., Dafni, Z. Rijn, J. (2002). Design and performance of a zero-discharge tilapia recirculating system. *Aquaculture Engineering*, 26(3): 191 - 203.
- Silva, P. (2016). An Industry 4.0 based Architecture for Distributed Soil-less Food Production Systems. Proceedings of the first Industrial Engineering Symposium.
- Simbeye, D. S., Yang, S. F. (2014). Water quality monitoring and control for aquaculture based on wireless sensor networks. *Journal of Networks*, 9, 840–849.
- Sreejariya, P., Raynaud, T., Dabbadie, L., Yakupitiyage, A. (2016). Effect of water recirculation duration and shading on lettuce (*Lactuca sativa*) growth and leaf nitrate content in a commercial aquaponic system. *Turk J Fish Aquat*, 16, 311-319.
- Trang, N., Dennis, K. (2017) Effects of recirculation rates on water quality and *oreochromis niloticus* growth in aquaponic systems, *Aquacultural Engineering Jorunal*, 78 edition 95-104.
- Tyson, R., Treadwell, D.S. (2011). Opportunities and challengers to sustainability in aquaponic systems. *HortTechnology*, 21, 6–13.
- Wongkiew, S., Hu, Z., Chandran, K., Lee, J., Khanal, S. (2017). Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review. *Aquacultural Engineering Journal*, 76 , 9–19.

Zhang, S., Li, M., Cheng, J., Xu, Z., Chen, J. (2016). Response and environmental assessment of two Chinese conventional carps to water quality regulation in recirculating aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 74, 180 – 185

2. Construcción prototipo sistema acuapónico tradicional y de doble recirculación

Prototipo acuapónico tradicional y de doble recirculación para control de parámetros físico químicos del agua.

2.1 Resumen

El constante incremento poblacional repercute en la necesidad de generación de mayor cantidad de alimento (FAO, 2015), los sistemas acuapónicos ofrecen la posibilidad de generación de alimento de peces y plantas que puede ser desarrollado tanto en sectores urbanos como rurales ofreciendo la disponibilidad de alimento orgánico. Esta investigación se centró en el diseño y construcción de un sistema acuapónico tradicional y un sistema acuapónico de doble recirculación con recuperación de agua para la evaluación de un sistema de control de variables físico químicas del agua como pH, Oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, temperatura y variables medioambientales como humedad relativa y temperatura. El montaje fue desarrollado en el laboratorio de ensayos hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia durante un periodo de 10 meses, el prototipo de sistema acuapónico tradicional fue diseñado y construido para servir como testigo en el crecimiento y rendimiento del cultivo respecto a los resultados obtenidos en el prototipo de sistema acuapónico con doble recirculación, las dimensiones de ambos sistemas respecto a tamaño de tanques, cantidad de peces y plantas, actuadores como bomba de agua y aire fueron los mismos con el objetivo de replicar al máximo las condiciones en ambos sistemas. La cantidad de agua en cada uno de los sistemas fue de 105 litros, cantidad de peces cultivados 10 y de plantas 9 por sistema, con área superficial de 3,5m². Se construyeron dos sistemas acuapónicos que permitieron realizar pruebas para el sistema de control.

PALABRAS CLAVE: Acuapónico, CAD, físico-químico, biofiltro, hidropónico.

2.2 Introducción

Un sistema acuapónico es un mecanismo de cultivo de peces y plantas el cual combina la hidroponía y la acuicultura por medio de un sistema de recirculación de agua, su funcionamiento consiste en que el alimento no consumido y los residuos producidos por los peces son convertidos por acción bacteriana en compuestos asimilables como nutrientes para las plantas (Goddek y Delaide, 2015).

Un sistema acuapónico tradicional consta de los siguientes elementos: tanque o tubería para crecimiento de plantas, tanque para crecimiento de peces, clarificador o filtro mecánico, filtro biológico, mecanismo de aireación y de circulación de agua (Rakocy y Bailey, 2004). Según (Aguilar y Trelles, 2014) el filtro biológico puede no ser necesario si el sistema acuapónico es de tipo raíz flotante debido a que las bacterias pueden adherirse al sustrato utilizado.

Debido al déficit de algunos nutrientes como hierro y potasio que no son generados en las suficientes cantidades en un sistema acuapónico tradicional repercutiendo en el rendimiento del mismo, (Kloas y Baganz, 2015) desarrollaron un nuevo mecanismo para suplir este déficit nutricional diseñando un sistema de doble recirculación en el cual se tenía la posibilidad de suministrar nutrientes a las plantas por medio de un tanque de mezcla combinando el agua proveniente del tanque de peces junto a la adición de una solución nutritiva. Respecto al sistema de recirculación de agua, (Kloas y Baganz, 2015) propusieron un sistema de captación del agua evapotranspirada por las plantas para ser recuperada por medio de condensación y posteriormente retornada al sistema acuapónico.

Los sistemas acuapónicos pueden desarrollarse tanto en interiores como en exteriores, en interiores se garantiza la reducción en la depredación de aves hacia los peces y reducción de algunas enfermedades que atacan a las plantas, por otra parte la acuaponía en exteriores garantiza mayor disponibilidad de luz para que las plantas realicen su proceso de fotosíntesis (Diver y Rinehart, 2010). Para solucionar el inconveniente de la iluminación de cultivos en interiores se han desarrollado diferentes técnicas como el uso de lámparas de vapor de sodio, lámparas de halógeno, lámparas fluorescentes y lámparas led las

cuales son las que mejores prestaciones tienen respecto a iluminación y consumo de energía. (Maucieri y Carmelo, 2017) propusieron un sistema de compensación de iluminación para sistemas en interiores basados en iluminación led, en este sistema caracterizaron las longitudes de onda necesarias para la fase vegetativa y fase de floración.

Los filtros mecánicos, químicos y biológicos son parte indispensable en un sistema acuapónico, los primeros captan los materiales de mayor tamaño como alimento no consumido y heces de los peces, los segundos retienen partículas que se encuentran disueltas en el agua y los terceros se encargan por medio de microorganismos bacterianos en degradar por medio de oxidación el Amonio a Nitritos y posteriormente a Nitratos (Moldovan y Bala, 2015). Algunos de los materiales utilizados en los filtros mecánicos son esponja, perlón, grava, arena de río, en los filtros químicos se encuentran materiales como carbón activado, turbas, resinas descalcificantes, y en los filtros biológicos se encuentran materiales como biobolas, tapas plásticas, canutillos cerámicos y trozos de manguera eléctrica corrugada (Nichols y Savidov, 2010). El sistema acuapónico puede ser modelado para evaluar los diseños propuestos, una herramienta funcional es el diseño asistido por computador **CAD**, el cual permite la utilización de sistemas informáticos para la representación gráfica de objetos físicos en dos o tres dimensiones identificando desde el diseño aspectos como materiales, distribución de componentes, tamaño, entre otros (Rojas, 2006). En la actualidad existen diversos software para el diseño CAD dentro de los que se encuentran Solid Edge, Autocad, Sketchup, SolidWorks.

2.3 Materiales y métodos

2.3.1 Materiales

- **Software Sketchup**

Para el diseño en tres dimensiones del sistema acuapónico tradicional y sistema acuapónico de doble recirculación se utilizó el software Sketchup 2015 con herramienta de render Vray. Se utilizaron las librerías 3D warehouse compatibles con este programa.

- **Tanques**

Se utilizaron tanques plásticos para el cultivo de peces, cultivo de plantas, filtro mecánico, filtro biológico, tanque de mezcla y tanque de suministro de agua. Las dimensiones del tanque de peces fue de [w=39 , d=52 , h=29] cm con un volumen de agua de 41L, tanque de plantas [w=50 , d=65 , h=15] cm con un volumen de agua de 38L, tanque de mezcla [w=25 , d=34 , h=21] cm con un volumen de agua de 15L, filtro biológico [w=29 , d=42 , h=20] cm con un volumen de agua de 22L, filtro mecánico [r=12.5, h=55]cm con un volumen de agua de 4L y tanque de suministro de agua [r=19, h=55]cm con un volumen de agua de 62L.

- **Estructura**

Cada prototipo contó con tres estructuras metálicas siguiendo un diseño de sistema acuapónico vertical como el propuesto por Goddek y Delaide (2015). Estas estructuras sirvieron de soporte para los tanques y componentes del sistema, fueron construidas con ángulo metálico de 3/4 x 1/8 de pulgada. La estructura de soporte para el filtro mecánico fue de [w=50 , d=50 , h=38] cm con un total de 12.88 m de material, la estructura para el tanque de peces [w=80 , d=60 , h=122] cm con un total de 6.52 m de material y la estructura para el tanque de plantas [w=100 , d=70 , h=163] cm con un total de 15.32 m de material.

2.3.2 Métodos

A continuación se presenta la descripción de la metodología utilizada para el diseño y construcción del prototipo de sistema acuapónico tradicional y sistema acuapónico de doble recirculación.

- **Diseño**

La identificación de los componentes principales para el prototipo de sistema acuapónico tradicional se realizó siguiendo el trabajo realizado por Savidov y Hutchings (2005) y los componentes para el prototipo de sistema acuapónico de doble recirculación siguiendo el trabajo realizado por Kloas y Baganz (2015). Identificados los componentes del sistema acuapónico tradicional y de doble recirculación se realizó un diseño en tres dimensiones en el software Sketchup para la evaluación de las medidas propuestas en tanques y estructuras, diseño de tubería y representación final del prototipo.

- **Construcción**

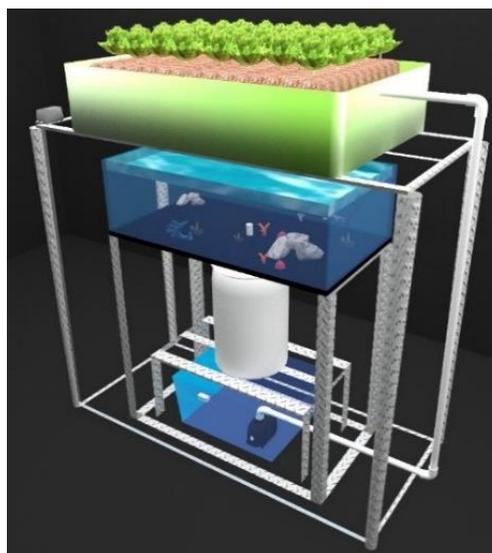
La construcción de los prototipos se llevó a cabo en el laboratorio de ensayos hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia, para este proyecto se construyeron dos prototipos de sistemas acuapónicos con las mismas dimensiones en tanques, estructuras y materiales con el objeto de replicar las mismas condiciones en ambos sistemas. Partiendo del diseño final en tres dimensiones, se construyeron las bases metálicas de soporte para los tanques, los filtros mecánico y biológico con los materiales encontrados en la literatura, se ubicaron cada uno de los sensores y actuadores de las variables a medir y se realizó las respectivas conexiones de tuberías.

2.4 Resultados y discusión

- **Diseño 3D**

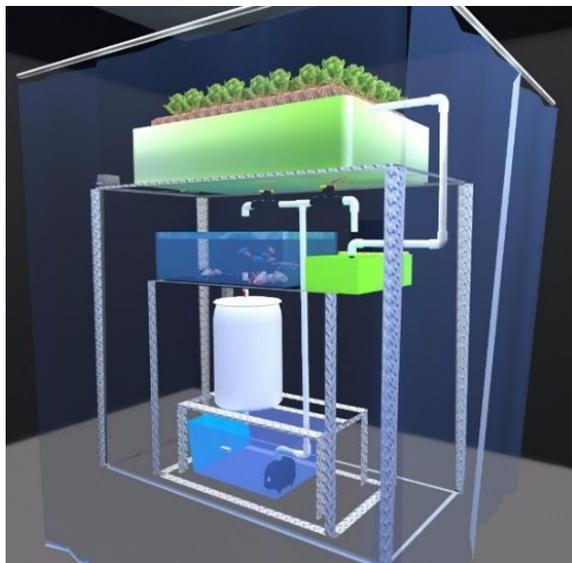
Se obtuvo un diseño final para el prototipo de sistema acuapónico tradicional y uno para el sistema acuapónico con doble recirculación. Cada sistema se diseñó para contener una cantidad en biomasa de 10 peces y 9 plantas con un total de 105 litros de agua. En la Figura 2-1 y Figura 2-2 pueden observarse los diseños finales para el sistema tradicional y de doble recirculación.

Figura 2-1: Diseño sistema acuapónico tradicional.



Fuente: autor

Figura 2-2: Diseño sistema acuapónico de doble recirculación.



Fuente: autor

El diseño CAD previo a la construcción permitió identificar errores en las medidas de las bases y distribución de los componentes. Adicionalmente se incorporó un tanque de almacenamiento - suministro de agua para la eliminación del cloro por medio de evaporación.

- **Filtro Mecánico**

Filtro de tipo exterior con funcionamiento por gravedad para retención de partículas como residuos de comida y excrementos de peces, construido en caneca plástica de 15 galones con los materiales filtrantes en el siguiente orden: espuma de baja densidad, perlón, espuma de baja densidad, perlón y carbón activado siguiendo el modelo propuesto por Lozano e Israel (2015), obteniendo la composición final del filtro representada en la Figura 2-3. Con los materiales descritos anteriormente se logró una buena retención de partículas y se garantizó un flujo continuo de agua.

Figura 2-3: Filtro mecánico



Fuente: autor

Se encontró el inconveniente que la tubería de circulación de agua que ingresa al filtro mecánico proveniente del tanque de peces solamente aprovecha una pequeña área superficial del filtro mecánico debido a la tasa de flujo de agua recirculado. Lo cual, para solventar este inconveniente se construyó una regadera en tubo PVC la cual garantizo que el flujo de agua circulara por toda el área superficial del filtro aprovechando la totalidad del material filtrante. Esta construcción se ilustra en la Figura 2-4.

Figura 2-4: Difusor Flujo de agua filtro mecánico



Fuente: Autor

Se realizaron pruebas iniciales con filtro mecánico construido con grava y arena de río, sin embargo se encontraron inconvenientes debido a que la tasa de filtración era muy lenta y no garantizaba un flujo continuo de agua en el prototipo de sistema acuapónico. De acuerdo con Sreejariya et al, (2016) los rendimientos en los cultivos de sistemas acuapónicos se ven beneficiados con el incremento en la tasa de flujo de agua, por tal motivo fue necesario sustituir estos materiales filtrantes “grava y arena” por espuma, perlón y carbón activado.

▪ Filtro biológico

Filtro de tipo exterior para proveer un medio de crecimiento a las bacterias nitrificantes del tipo Nitrosomona y Nitrobacter, las cuales permiten la degradación de Amonio a Nitritos y luego Nitratos. Este filtro biológico fue dimensionado de acuerdo a los trabajos desarrollados por Ramirez (2009). El filtro se construyó con un tanque plástico transparente con capacidad para 24 litros con los siguientes materiales: tapas plásticas de PoliPropileno, biobolas, trozos de manguera corrugada de tipo eléctrico y trozos de cerámica “materiales de bajo costo en el mercado”. El filtro biológico construido para este proyecto se ilustra en la Figura 2-5. En las pruebas iniciales realizadas a la maduración del filtro biológico “medición de nitritos, nitratos y amonio con kits de colorimetría” se identificó una escasa o nula conversión bacteriana asociada al ingreso de luz ambiente al filtro biológico, repercutiendo en la proliferación bacteriana en el mismo. Para solventar este inconveniente se realizó un cubrimiento externo del filtro con plástico negro. En este filtro se ubicó la bomba sumergible para realizar la recirculación de agua para el sistema acuapónico.

Figura 2-5: Filtro biológico



Fuente: autor

De acuerdo a lo sugerido por Masser (2006) se debe realizar una maduración inicial del filtro biológico suministrando un producto que contenga bacterias aerobias, anaerobias y facultativas para incrementar rápidamente la cantidad de bacterias presentes en el filtro y así evitar el síndrome de acuario nuevo, el cual consiste en el aumento de Amonio y Nitritos sin que existan aún la cantidad suficiente de bacterias para degradarlo generando muerte por toxicidad en peces. Se utilizó un cultivo de bacterias de la marca Seachem (Figura 2-6) el cual estabilizó el filtro biológico en un tiempo de 7 días.

Figura 2-6: Cultivo de bacterias nitrificantes



Fuente: Autor

▪ **Prototipos**

Se construyó un prototipo de sistema acuapónico tradicional y un prototipo de sistema acuapónico de doble recirculación, ambos con las mismas dimensiones en tanques, estructuras y selección de actuadores. El sistema acuapónico de doble recirculación se construyó dentro de un invernadero para recuperar por medio de condensación el agua evapotranspirada por parte de las plantas.

Para la construcción del invernadero se utilizó plástico con protección uv calibre 7, las dimensiones del invernadero fueron 1.10m x 0.72m x 2.25m. En la figura 2.7 puede observarse la construcción final de los dos prototipos que sirvieron para la posterior evaluación de una estrategia de control. La capacidad de los prototipos permitió la incorporación de 9 plantas y 10 peces por cultivo.

Figura 2-7: Construcción final prototipos



Fuente: autor

El principal inconveniente presentado en la construcción se encontró en los diferentes acoples de los tanques y tuberías, siendo necesario el uso de soldadura especial en cada una de las conexiones. Este inconveniente se asoció a que el grosor de los tanques era muy pequeño generando que los acoples no cerraran completamente generando escapes de agua. Se utilizaron acoples rápidos como uniones universales para retirar los tanques con facilidad cuando se requirió hacerles limpieza después de finalizar cada ciclo de cultivo.

2.5 Conclusiones

Se realizó la construcción de dos prototipos, uno del sistema acuapónico tradicional y el otro de sistema acuapónico con doble recirculación de agua. Estos prototipos sirvieron como planta para la evaluación de una estrategia de control.

El sistema acuapónico tradicional, adicional a servir como planta en el diseño y evaluación de la estrategia de control, nos sirve como testigo para la evaluación del rendimiento del sistema tanto en peces como en plantas, igualmente el sistema acuapónico con doble

recirculación nos sirve como tratamiento principal, el cual se podrá comparar con el tradicional.

Pese a los inconvenientes que se presentaron durante la construcción de los dos sistemas, se llegó a que ambos se comportaron de manera estable y funcional, es decir sin fugas de agua, ni problemas en el funcionamiento, por lo cual se pudo establecer una metodología para la construcción de prototipos de sistemas acuapónicos tradicionales y de doble recirculación.

Con la metodología de diseño encontrada, estos sistemas se pueden construir en diversos lugares como terrazas de casas y edificios para promover los cultivos orgánicos y contrarrestar los problemas de seguridad alimentaria que se presentan en el país. Además el diseño propuesto para estos prototipos, “tipo vertical”, permite un mayor aprovechamiento del espacio, lo que lleva a una optimización de la superficie de producción a comparación de los sistemas hidropónicos y acuícola que existen actualmente, lo que lleva a tener mayor rentabilidad por metro cuadro.

2.6 Bibliografía

Aguilar, A., Trelles, A. (2014). Crecimiento de goldish, *Carassius auratus*, y lechuga, *Lactuca sativa*, en sistema acuapónico en condiciones de invernadero. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Trujillo, Revista Ciencias Biológicas 12, 54-72.

Diver, S. Rinehart, L. (2010). Integration of Hydroponics with Aquaculture, ATTRA National sustainable agriculture information service butte, Montana. . Elsaiver, 1,30–37.

FAO. (2015). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. ISSN 0251-1371

Goddek, S. Delaide, B. (2015). Challenges of sustainable and commercial aquaponics. Sustainability, 7, 4199–4224.

- Johanna, S., Dennis, D. (2016). Advanced aquaponics: Evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs conventional hydroponics. *Agricultural Water Management*, 178, 335–344.
- Kloas, W. Baganz, D. (2015). A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity and to reduce environmental impact. *Aquac Environ Interact*, 7, 179–192.
- Lozano, C., Israel, A., (2015). Estudio de factibilidad para el montaje de un sistema de cultivos acuapónicos en la isla de providencia y sta. Catalina – san Andrés Colombia. Universidad de Cartagena.
- Masser, M. (2006). *Recirculating Aquaculture Production Systemns: AquaponicsIntegrating Fish and Plant Culture*. Aquaculture Center, Stoneville, Mississippi, 1, 1–16.
- Maucieri, T., Carmelo, H. (2017).Hydroponic systems and water management in aquaponics: a review. *Italian Journal of Agronomy*. University of Padova. doi: 10.4081/ija.
- Moldovan, I.A., Bala, M. (2015). Analysis of aquaponic organic hydroponics from the perspective of setting costs and of maintenance on substratum and floating shelves systems. *Hortic Forest Biotechnol*, 19, 73-76.
- Nichols, M., Savidov, N. (2010). Aquaponics: a nutrient and water efficient production system. *Second symposium on soilles culture and hydroponics*, 947, 129–132.
- Rakocy, J., Bailey, D. (2004). Update on Tilapia and vegetable production in the UVI aquaponic system, *New Dimensions on farmed Tilapia*. Sixth international symposium on Tilapia in aquaculture, 1, 2–16.
- Ramirez, D. (2009). Montaje y evaluación preliminar de un sistema acuapónico goldfish-lechuga. *Revista Facultad de ciencias*. Universidad Militar Nueva Granada, 5, 154–170.

Rojas, O.L. (2006). Diseño asistido por computador. *Revista Diseño y Tecnología*, 23, 7-15.

Savidov, N., Hutchings, E. R. (2005). Fish and plant production in a recirculating aquaponic system: a new approach to sustainable agriculture in Canada. *International Conference and Exhibition on Soiless Culture*, 742, 209–221.

Sreejariya, P., Raynaud, T., Dabbadie, L., Yakupitiyage, A. (2016). Effect of water recirculation duration and shading on lettuce (*Lactuca sativa*) growth and leaf nitrate content in a commercial aquaponic system. *Turk J Fish Aquat*, 16, 311-319.

3. Estrategia de control para sistema acuapónico tradicional y de doble recirculación con recuperación de agua.

Control de parámetros físico-químicos del agua para desarrollo de sistema acuapónico automatizado de tipo tradicional y doble recirculación.

3.1 Resumen

Los sistemas acuapónicos tradicionales presentan inconvenientes en rendimientos de cultivos asociados a condiciones ambientales no apropiadas, mala calidad del agua en parámetros como disponibilidad de oxígeno y valores de pH, falta de generación de nutrientes para el cultivo de plantas. En este trabajo se desarrolló una estrategia de control que permitiera solucionar la problemática descrita anteriormente mediante el control de los parámetros físico-químicos del agua como temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, nivel de agua en tanque de biofiltro en el sistema acuapónico tradicional y sistema acuapónico de doble recirculación, y control de humedad relativa en sistema acuapónico de doble recirculación. Se aplicaron técnicas de control continuo y control on-off de acuerdo a la identificación de importancia en la estabilidad de las variables de sistema, encontrando que la temperatura y la humedad relativa requerían de un control de tipo PID y las demás variables un control de tipo on –off. Se utilizaron circuitos de instrumentación, adquisición de datos y potencia para el manejo de actuadores como bombas de aire, bomba de agua, calefactores, alimentadores, lámparas led y dosificadores. Se utilizó el PIC18f4550 como microcontrolador de adquisición de datos con interfaz serial al computador para visualización gráfica en software Labview y sistema de control por software en Matlab con la herramienta Simulink. Se realizaron pruebas de cultivo para evaluación del sistema acuapónico con el controlador propuesto encontrando condiciones de crecimiento en peces y plantas acordes a las curvas de crecimiento

presentes en la literatura logrando reducir a cero la intervención humana en el proceso y garantizando las condiciones propicias para el sistema acuapónico.

PALABRAS CLAVE: actuadores, estrategia de control, instrumentación, Labview, Matlab, sensores.

3.2 Introducción

Los sistemas acuapónicos representan una combinación multitrófica de peces, plantas y bacterias que se benefician mutuamente en un sistema de recirculación de agua. Los principales parámetros a medir y controlar en un sistema acuapónico para garantizar valores óptimos de crecimiento y supervivencia de los organismos en acuaponía son parámetros de calidad del agua como temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, salinidad, sólidos disueltos totales, nitrógeno amoniacal total, turbidez y parámetros ambientales como temperatura, humedad relativa, dióxido de carbono y luminosidad (Geisenhoff et al, 2016).

Dentro de las investigaciones en control y automatización de sistemas acuapónicos se encuentra el trabajo de Simbeye y Yang (2014), quienes plantearon un monitoreo de la calidad del agua basado en redes de sensores inalámbricos, controlando temperatura, contenido de oxígeno disuelto y PH. Estudios más recientes como el de Nagayo, Mendoza y Vega (2017), presentan la medición y control de 8 variables medioambientales y de calidad de agua como son temperatura, humedad relativa, dióxido de carbono, luminosidad, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, las variables medioambientales fueron controladas usando una estrategia de control todo o nada y las variables de calidad del agua fueron mantenidas realizando recambios diarios de agua en el sistema acuapónico, sin embargo esto contradice al principio de cero intercambio de agua en la acuaponía.

Kumar en el 2016, desarrolló un sistema acuapónico implementando la medición de tres variables temperatura, pH y nitrato junto a un análisis de imagen para identificación de

comportamientos anormales atribuibles a enfermedades en el pez. Silva en el 2016 realizó un estudio comparativo entre un control PID y un control basado en lógica difusa para el proceso de nitrificación en un sistema acuapónico encontrando ventajas en el segundo tipo de controlador debido a la posibilidad de aplicación de técnicas de control adaptativo.

Se han incorporado energías alternativas de tipo solar fotovoltaica y eólica para proveer de energía a los sistemas acuapónicos automatizados como en el caso del trabajo propuesto por Rafiee y Saad (2006). Mahesh y shyba (2016) incorporaron conceptos de biotecnología para la mejora genética de los cultivos junto a la automatización de un sistema acuapónico NFT en el cual se midió parámetros de calidad del agua de pH, conductividad eléctrica y temperatura. El estado del arte mencionado anteriormente evidencia que los controladores más utilizados en los sistemas acuapónicos son del tipo PID, todo o nada y de lógica difusa.

Una estrategia de control se encarga de aplicar una entrada para causar que las variables del sistema se ajusten a valores deseados que son denominados valores setpoint o valores de referencia (Ogata, 2010). Un Sistema de control está compuesto por diferentes componentes o subsistemas como el controlador, la planta o proceso, compensador, actuador, transductor, sensor, entre otros, los cuales se conectan para que la salida del proceso sea controlada (Kuo, 1996).

Los procesos a controlar pueden tener una o múltiples entradas y salidas denominadas "SISO" y "MIMO" respectivamente. Los sistemas de control pueden ser de lazo abierto o lazo cerrado, los primeros no registran la variable y por ende el controlador no conoce si su control se ajusta a la respectiva programación, en el control de lazo cerrado se dispone de un sensor o transductor que se encarga de registrar la variable para retroalimentar al sistema de nuevo. Aparte de las estrategias de control clásico existen estrategias de control inteligente como el difuso, redes neuronales, control predictivo, entre otros (Saaid, 2013).

3.3 Materiales y métodos

3.3.1 Materiales

Software Matlab®

Para realizar el control digital de los parámetros de temperatura, oxígeno disuelto y nivel de agua en biofiltro se utilizó el software Matlab® 2015b de Mathworks con su herramienta Simulink®. Se realizó una comunicación serial con el microcontrolador para la recepción de los datos, simulación de las estrategias de control y ejecución del controlador seleccionado.

Software Labview

Para almacenar la información proveniente de los prototipos en bases de datos en el computador y para su visualización en el computador, se realizó una interfaz de usuario en el software Labview 2015 de National Instruments™, se utilizaron las herramientas NI VISA para establecer comunicación serial hacia el microcontrolador.

Software Proteus Design Suite

Para el diseño y simulación de los circuitos electrónicos de adquisición de datos, instrumentación y potencia, se utilizó el software Proteus de Labcenter Electronics con la herramienta ISIS para diseño de circuitos y simulación y ARES para creación de las placas impresas PCB.

Sensores

Se implementaron sensores de pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, temperatura, presión diferencial, flujo de agua, humedad relativa y luminosidad. En la tabla 3-1 se encuentran las referencias y principales características de medición de los sensores utilizados.

Tabla 3-1: Sensores sistema acuapónico

Sensor	Características	Ilustración
<p style="text-align: center;">PH ATLAS SCIENTIFIC</p>	<p>Tiempo de respuesta: 95% en 1 segundo. Rango: [0.001-14.000] pH Resolución: 0.01 PH Temperatura operación: [1°C - 99°C]</p>	
<p style="text-align: center;">OD ATLAS SCIENTIFIC</p>	<p>Tiempo de respuesta: 95% en 1 segundo. Rango: [0-20] mg/L Resolución: 0.06 mg/L Temperatura operación: [1°C - 50°C]</p>	
<p style="text-align: center;">CE ATLAS SCIENTIFIC</p>	<p>Tiempo de respuesta: 90% en 1 segundo. Rango: [5 - 200,000] uS/cm Exactitud: +/- 2% Temperatura operación: [1°C a 110°C]</p>	
<p style="text-align: center;">Temperatura DS18B20</p>	<p>Tiempo de respuesta: 750 ms Rango: [-55 a 125] °C Resolución: 0.05 °C</p>	

<p>Presión diferencial MPX2010DP</p>	<p>Tiempo de respuesta: 1ms Rango: [0 - 10] KPa Exactitud: +/- 0.1% Temperatura operación: [-40°C a 125°C]</p>	
<p>Flujo</p>	<p>Tiempo de respuesta: 1ms Rango: [1 - 30] L/min Precisión: 2% Temperatura operación: [-25°C a 80°C]</p>	
<p>Humedad Relativa HONEYWELL HIH 4000</p>	<p>Tiempo de respuesta: 70ms Rango: [0 - 100] %RH Precisión: 3% Temperatura operación: [-40°C a 85°C]</p>	
<p>Iluminación SI1145 SILICON LABS</p>	<p>Tiempo de respuesta: 25ms Rango: [1-128.000] lux Resolución: 100 mlx Temperatura operación: [-40°C a 85°C]</p>	

Fuente: Autor

Actuadores

Se utilizaron actuadores eléctricos como bombas de agua, bombas de aire “aireadores”, resistencia calefactora, dosificadores, lámparas de iluminación, deshumidificador, electroválvulas, los cuales permitieron por medio de la estrategia de control mantener las variables en las condiciones establecidas.

Tabla 3-2: Actuadores Sistema acuapónico

Actuador	Característica	Ilustración
<p>Bomba de recirculación de agua</p> <p>Resun SP3800</p>	<p>Potencia: 25W</p> <p>Altura máxima de bombeo: 1.8 m</p> <p>Capacidad de bombeo: 2000L/h</p>	
<p>Bomba de aire filtro biológico</p> <p>RESUN AC-9904</p>	<p>Potencia: 5W</p> <p>Flujo de aire: 540 L/H – 140 GPH</p> <p>Salidas: 4</p>	
<p>Bomba de aire tanque peces</p> <p>RESUN AC-9902</p>	<p>Potencia: 4.5W</p> <p>Flujo de aire: 240 L/H – 93 GPH</p> <p>Salidas: 2</p>	
<p>Lámpara led</p>	<p>Potencia: 28W</p> <p>Iluminación: 2000 lumens</p> <p>Leds: 14 rojos, 7 azules, 4 blancos, 1 IR, 1 UV</p>	
<p>Resistencia calefactora</p>	<p>Potencia: 300W</p>	

<p>Electroválvula ingreso agua E14-01B</p>	<p>Presión funcionamiento: 0.02MPa – 0.8 MPa Tensión de funcionamiento: 110v Normalmente cerrada</p>	
<p>Electroválvula flujo peces 2W-160-30</p>	<p>Presión funcionamiento: 0MPa – 0.7 MPa Tensión de funcionamiento: 110v Normalmente abierta</p>	
<p>Electroválvula flujo tanque mezcla 2W-160-15</p>	<p>Presión funcionamiento: 0MPa – 0.7 MPa Tensión de funcionamiento: 110v Normalmente cerrada</p>	
<p>Dosificador carbonato de calcio</p>	<p>capacidad: 2 galones Dosificación: 0.10 L/min</p>	
<p>Alimentador AF-2009D</p>	<p>Capacidad: 70g Ciclos: 4 Tensión de funcionamiento: 3V DC</p>	
<p>Bomba suministro nutrientes plantas Resun SP800</p>	<p>Potencia: 5.8W Altura máxima de bombeo: 0.8 m Capacidad de bombeo: 250L/h</p>	

<p>Dosificador solución nutrientes</p>	<p>Capacidad: 1 galón Dosificación: 0.10 L/min</p>	
<p>Deshumidificador Bionaire BMD100 – LA013</p>	<p>Potencia: 60W Capacidad: 1.5L</p>	

Fuente: Autor

3.3.2 Métodos

A continuación se presenta una descripción de la metodología implementada para realizar el control de los parámetros fisicoquímicos del agua pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, temperatura de agua, nivel de agua en biofiltro, y ambientales de luminosidad y humedad relativa.

Inicialmente se realizó la identificación de los peces y plantas a incorporar en los prototipos “tradicional y de doble recirculación”, seguidamente se investigó cuáles son los parámetros óptimos de cultivo para las especies logrando identificar los valores de referencia para el controlador, se identificaron cuales variables son críticas en el sistema acuapónico para la implementación de técnicas de control continuo y cuales no para la implementación de un control todo o nada con histéresis.

Seguidamente se realizó un estudio técnico de selección de los sensores y actuadores a utilizar, se diseñaron los circuitos de adquisición de datos e instrumentación, circuito de potencia y las respectivas conexiones eléctricas de sensores, transductores y actuadores del sistema.

Se inició el funcionamiento de ambos sistemas y por medio de la placa de adquisición de datos se realizó la identificación paramétrica para la obtención de las funciones de transferencia de las variables, seguidamente se utilizó el software Matlab Simulink para el diseño y sintonización del controlador. Adicionalmente se diseñó una interfaz de visualización en el software Labview para conocer el estado actual del proceso y para él envió de alarmas por medio de internet.

Para la activación de los actuadores, inicialmente se tomó un circuito de identificación de cruce por cero para realizar una interrupción en el microcontrolador obteniendo un sincronismo con la red. Conociendo el periodo de la señal de la red, se generó en el microcontrolador una señal de ángulo de conducción para el manejo del triac asignando un tiempo de 7ms para un ángulo de 180° de apertura del triac.

- **Temperatura del agua**

Se realizó la medición de la temperatura con el sensor DS18B20, la calibración de esta medida se realizó con el termómetro HALTCHEN KT-300. Se activó el triac correspondiente a la resistencia calefactora con 180° de apertura, logrando obtener la curva de comportamiento de la variable. Para la variable de temperatura se utilizó un tiempo de muestreo de 1 minuto. Se realizaron seis mediciones a diferentes horas del día en cada uno de los prototipos para obtener un promedio de la curva de comportamiento de la variable. Con los datos promediados se generó la función de transferencia para la simulación del controlador en la herramienta Simulink del software Matlab. Identificado el controlador a implementar se realizó una comunicación serial de Matlab con el microcontrolador.

- **Oxígeno Disuelto**

Se realizó la medición del oxígeno disuelto con el sensor de Atlas Scientific. Se activó el triac correspondiente a la bomba de aire con 180° de apertura del triac obteniendo la curva de comportamiento de la variable, estas mediciones se tomaron a una temperatura estable de 27°C. Para la variable de oxígeno disuelto se utilizó un tiempo de muestreo de 1 minuto. Con los datos experimentales obtenidos de la planta se generó la función de transferencia para la simulación del controlador en la herramienta Simulink del software Matlab.

Identificado el controlador a implementar se realizó una comunicación serial de Matlab con el microcontrolador.

- **pH**

Se realizó la medición de pH con el sensor de Atlas Scientific. Se propuso un control de tipo todo o nada debido a que los peces, plantas y bacterias pueden soportar valores comprendidos en el rango de pH de 5.5 a 7.5. El tiempo de muestreo para esta variable fue de 1 minuto. Inicialmente se realizó una toma de datos del comportamiento de pH y de acuerdo a estos datos se realizó una dosificación de carbonato de calcio para actuar sobre la variable de pH y dureza.

- **Conductividad eléctrica**

Se realizó la medición de conductividad eléctrica con el sensor atlas Scientific en dos puntos del prototipo de sistema acuapónico de doble recirculación. Se utilizaron dos sensores de CE para medir en el tanque de plantas y en el tanque de mezcla. En el tanque de plantas el valor de CE permitió conocer los niveles de las sales disueltas en el agua “nutrientes” y en el tanque de mezcla permitió realizar la mezcla adecuada de agua proveniente del tanque de peces y de una solución dosificada con nutrientes para cultivos hidropónicos. Esta mezcla complementó los nutrientes no producidos en el sistema acuapónico tradicional. El tiempo de muestreo para esta variable fue de 1 hora. Se encontró en la literatura el rango de 1.5 – 2.5 mS/cm propicio para el crecimiento de la lechuga. Para el crecimiento adecuado de los peces la conductividad eléctrica no debe superar 1.0 mS/cm.

- **Iluminación**

Los experimentos realizados en el sistema acuapónico se realizaron en condiciones de interior, por tal razón fue necesario la incorporación de lámparas led para cultivos hidropónicos, las cuales suplieron la iluminación necesaria para que las plantas realizaran su proceso fotosintético. Se utilizó el sensor Si1145, el cual mide luz visible, uv e infrarroja junto con un reloj en tiempo real DS3231. De acuerdo a Pantanella, (2012), la iluminación requerida para el cultivo de lechuga se encuentra en el rango de 10.000 – 40.000 lx. Con

el sensor Si1145 y el reloj en tiempo real se registró el nivel de iluminación y se programó el controlador para suministrar un ciclo de iluminación de 12 horas por día con una intensidad de 20.000 lux.

- **Nivel de agua en biofiltro**

El Diseño de los prototipos de sistema acuapónico permitió mantener constantes los niveles de agua en el tanque de plantas y tanque de peces debido a la incorporación de un sifón para el flujo de agua. En el biofiltro “tanque ubicado en el piso” fue necesario la medición y control de nivel de agua, debido a que es el tanque en el cual se repone el agua perdida del sistema, es donde se encuentran la mayor cantidad de bacterias y el tanque donde se encuentra la bomba sumergible que recircula el agua por el sistema.

Se realizó una restricción al funcionamiento de la bomba si el nivel del biofiltro descendía de 10 cm. Se utilizó el sensor ultrasónico HC-SRO4 y el sensor de presión diferencial MPX2010DP para la medición del nivel de agua. El suministro de agua lo realizó una bomba sumergible SP-3800 desde la caneca de agua de clorificada. Se utilizó un tiempo de muestreo de 1 segundo.

- **Humedad Relativa**

El sistema acuapónico de doble recirculación permitió realizar un control sobre la variable humedad relativa del aire por encontrarse bajo condiciones de invernadero. Se utilizó el sensor HIH-4000 de Honeywell el cual mide el rango completo de 0 a 100% de HR. De acuerdo a Rafiee, (2006), el cultivo de lechuga debe encontrarse en el rango de 60 al 80% de HR. Inicialmente se realizó mediciones de la humedad relativa ambiente, posteriormente se tomaron medidas de HR con el invernadero sellado.

El actuador para reducir la humedad relativa generada por la evapotranspiración en las plantas y evaporación en tanque de peces y biofiltro fue un deshumidificador bionaire. El tiempo de muestreo de esta variable fue de 15 segundos. La calibración de las mediciones de HR se realizaron con el termohigrometro extech instrumens RHT10. Se aplicó un filtro virtual de tamaño 15 para estabilizar las medidas.

▪ **Alimentación**

Se investigó de acuerdo al tamaño y peso de los peces, la cantidad de alimento a suministrar. Se utilizó el alimentador comercial para acuario “AF-2009D”, el cual dosificó la cantidad de alimento. El microcontrolador envió la señal de suministro de alimento en cuatro raciones al día, lo anterior con la lectura del reloj en tiempo real.

▪ **Flujo**

Se realizó la medición de la cantidad de agua que se repone en cada uno de los sistemas acuapónicos, Para está medición se utilizó un sensor de flujo con operación efecto hall, el cual genera un tren de pulsos con frecuencia proporcional al flujo que lo atraviesa. Se realizó un contador en el microcontrolador para conocer el flujo total de cada sistema.

3.4 Resultados y discusión

Identificados los parámetros fisicoquímicos y ambientales que van a ser controlados en los prototipos de sistemas acuapónicos, se establecieron los valores de consigna para las variables, esta información obtenida de las referencias bibliográficas se consigna en la tabla 3-3.

Tabla 3-3 : Variables de control

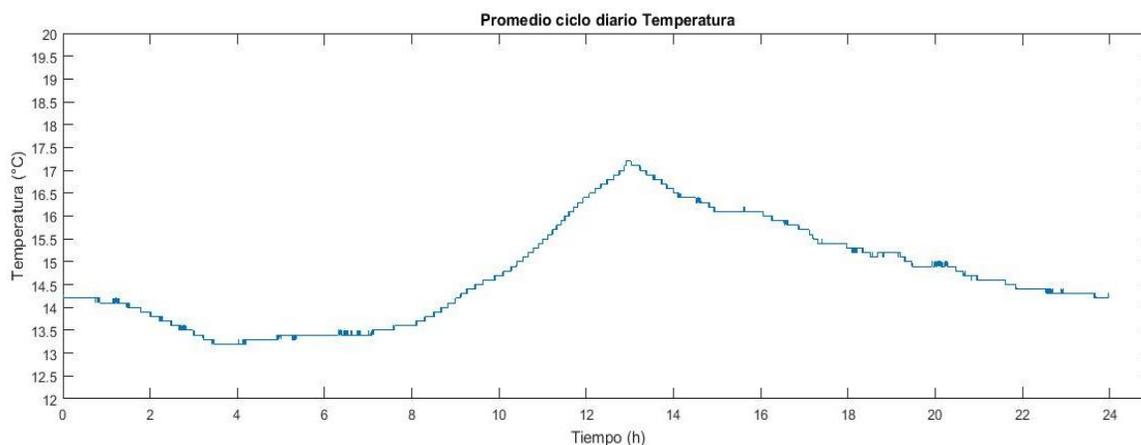
VARIABLE	VALOR DE CONSIGNA	FUENTE
Temperatura	27.0 °C	Johanna, 2016
Oxígeno Disuelto	5 mg/L	Kloas, 2015
Potencial de Hidrogeno	5.5 – 7.5 pH	Goddek, 2015
Conductividad Eléctrica	1.5 – 2.0 mS / cm	Johanna, 2016
Horas luz plantas	12 h	Pantanella, 2012
Iluminación	10.000 – 40.000 lx	Pantanella, 2012
Nivel agua biofiltro	18 cm	---
Cantidad alimento peces	4.3% y 3.6 % biomasa total	Pantanella, 2012
Humedad relativa plantas	60 – 80%	Rafiee, 2006

- **Temperatura del agua**

La temperatura del agua se determinó como parámetro crítico para el sistema acuapónico, debido a que los peces son animales ectotérmicos, los cuales regulan su temperatura a partir del medioambiente en el que se encuentran (Hurtado et al, 2010). De acuerdo a Graber, (2009), los peces adquieren una conducta de estrés cuando se presentan cambios de temperatura en el agua, esto se evidencia en no consumir alimento y muerte de los mismos.

Para la Tilapia se estableció un valor de consigna de 27°C. Inicialmente se realizaron mediciones continuas en el transcurso del día para identificar el comportamiento de la temperatura en el lugar del experimento, encontrando una temperatura mínima a las 4 am y máxima a la 1 pm como se evidencia en la Figura 3-1.

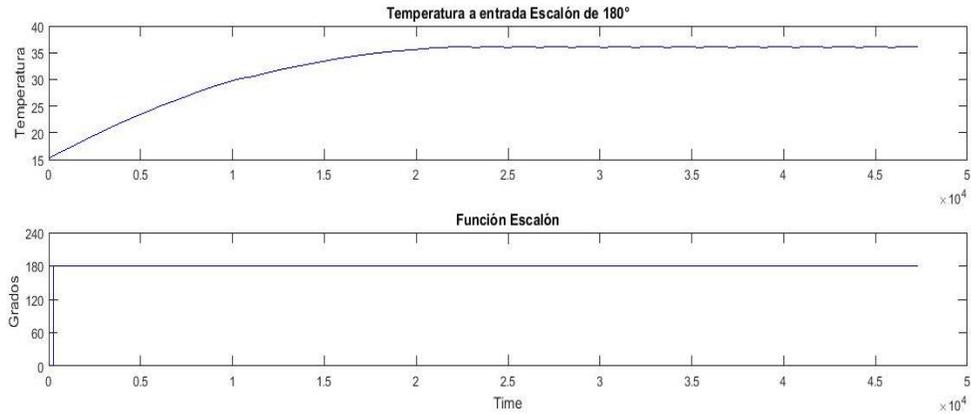
Figura 3-1: Promedio Temperatura ambiente



Fuente: Autor

Para la identificación paramétrica de la variable temperatura se aplicó un escalón de 180° de apertura al triac que controla la resistencia calefactora. Se obtuvo una temperatura de estabilización de 36.18 °C en un tiempo de 8.33 horas como puede observarse en la Figura 3-2. Esta variable presento una velocidad de reacción lenta.

Figura 3-2: Comportamiento Temperatura con 180° de apertura Triac



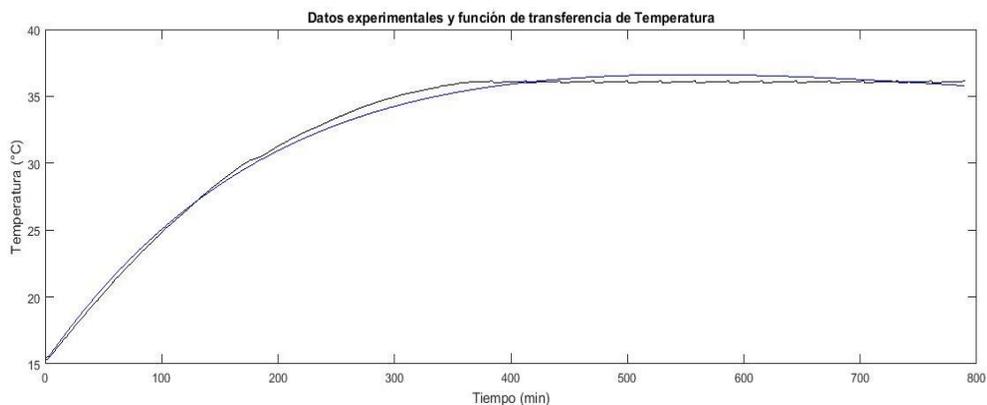
Fuente: Autor

La temperatura sigue un comportamiento de primer orden con lo cual se generó la función de transferencia expresada en la ecuación 1.

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad G(s) = \frac{0.16235}{649.26s + 1} \quad (1)$$

Donde K es la ganancia y τ es el tiempo en el cual la variable alcanza el 63%. Se evaluó la función de transferencia graficándola respecto a los datos experimentales obtenidos, encontrando una covarianza del 93%, como puede observarse en la Figura 3-3.

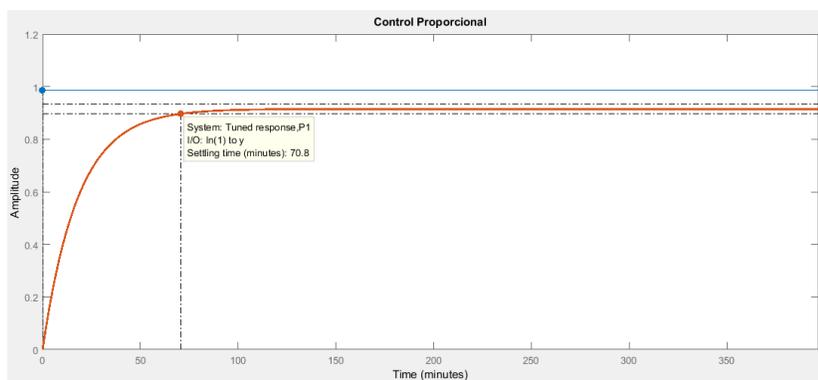
Figura 3-3: Correlación función de transferencia y datos Temperatura



Fuente: Autor

Se realizó la evaluación de los controladores P, PI y PID. La sintonización de los controladores se realizó con la herramienta PID TUNE de Matlab. Para el controlador Proporcional se sintonizó con $k_p=64.50$ obteniendo un tiempo de estabilización de 70.8 minutos en una banda de error del 2%, este controlador presentó un error en estado estacionario como puede observarse en la figura 3-4.

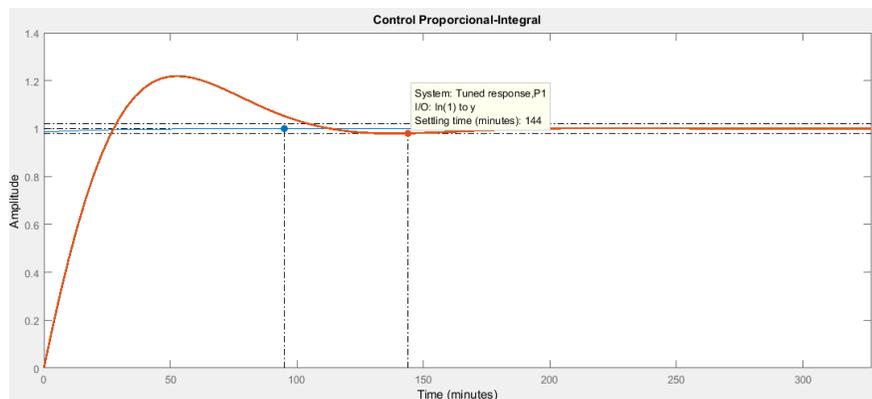
Figura 3-4: Controlador Proporcional Temperatura



Fuente: Autor

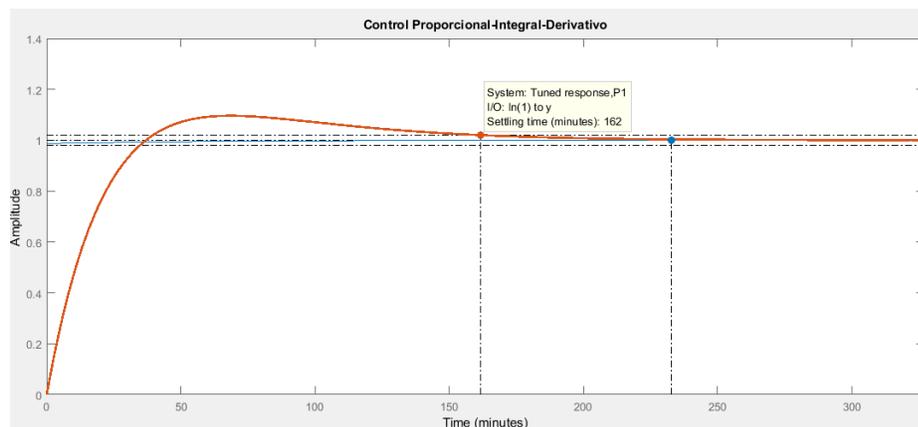
El controlador de tipo PI se sintonizó con $k_p=64.50$ y $k_i=0.04499$, este controlador eliminó el error en estado estacionario sin embargo generó un sobre impulso de 21.9%. El tiempo de estabilización fue de 144 minutos como puede observarse en la figura 3.5.

Figura 3-5: Controlador Proporcional-Integral Temperatura



El controlador de tipo PID se sintonizó con $k_p=75.29$, $k_i=0.02137$, $k_d=0.012$ Este controlador genero un sobre impulso de 9.6% con un tiempo de estabilización de 162 minutos como puede observarse en la figura 3.6.

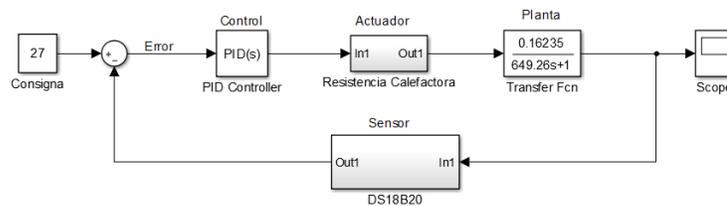
Figura 3-6: Controlador Proporcional-Integral-Derivativo Temperatura



Fuente: Autor

Se seleccionó el control PID para actuar sobre la variable de temperatura en el sistema acuapónico debido a que presentó un error en estado estable de cero comparado con el controlador P y un sobre impulso menor al controlador PI. Este controlador mantuvo la temperatura en el valor de consigna de 27°C.

Figura 3-7: Diagrama bloques control PID temperatura



Fuente: Autor

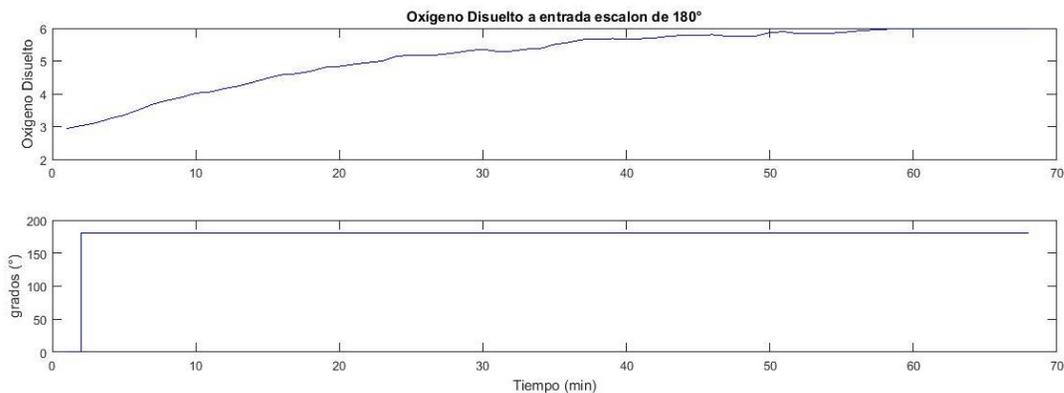
▪ **Oxígeno Disuelto**

Se encontró una relación inversamente proporcional de la temperatura respecto al oxígeno disuelto en el agua de acuerdo a la ley de los gases. Se realizó inicialmente compensación

de temperatura y salinidad para el sensor de oxígeno disuelto. Para el cultivo de Tilapia se estableció un valor de consigna de 5 mg/L representando el 62.5% de saturación a la temperatura de 27°C. Los factores que regulan la cantidad de oxígeno disuelto en el agua son temperatura, salinidad, actividad biológica y procesos de mezcla como difusión de aire. Para este controlador se actuara sobre la temperatura y la difusión de aire en el agua.

Para la identificación paramétrica de la variable oxígeno disuelto se aplicó un escalón de 180° de apertura del triac que controla la bomba de aire para su difusión en el agua, se obtuvo una estabilización de la variable en 6 mg/L como puede observarse en la Figura 3-8. De acuerdo al montaje físico del sistema acuapónico la caída libre de agua proveniente del tanque de plantas oxigena el agua de los peces manteniendo niveles de oxígeno disuelto de 2.9 mg/L. Sin embargo este valor es insuficiente para el cultivo de tilapia siendo necesario la difusión de aire por medio de una bomba.

Figura 3-8: Comportamiento Oxígeno Disuelto con 180° de apertura Triac



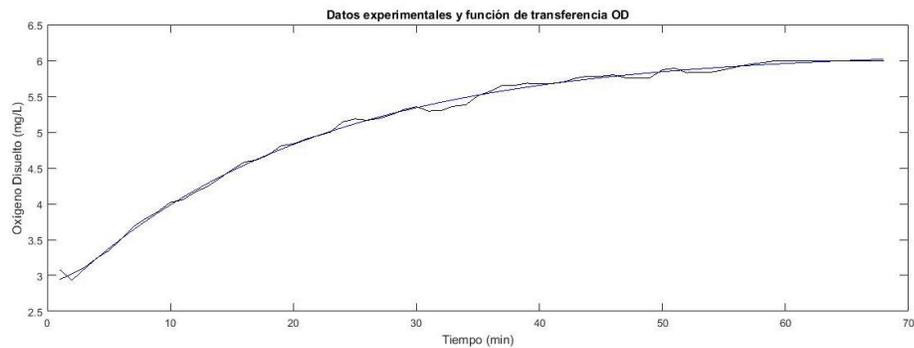
Fuente: Autor

El oxígeno disuelto presentó un comportamiento de primer orden con lo cual se generó la función de transferencia expresada en la ecuación 2.

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad G(s) = \frac{0.034102}{20.1189s + 1} \quad (2)$$

Donde K es la ganancia y τ es el tiempo en el cual la variable alcanza el 63%. Se evaluó la función de transferencia graficándola respecto a los datos experimentales obtenidos, encontrando una covarianza del 94%, como puede observarse en la Figura 3-9.

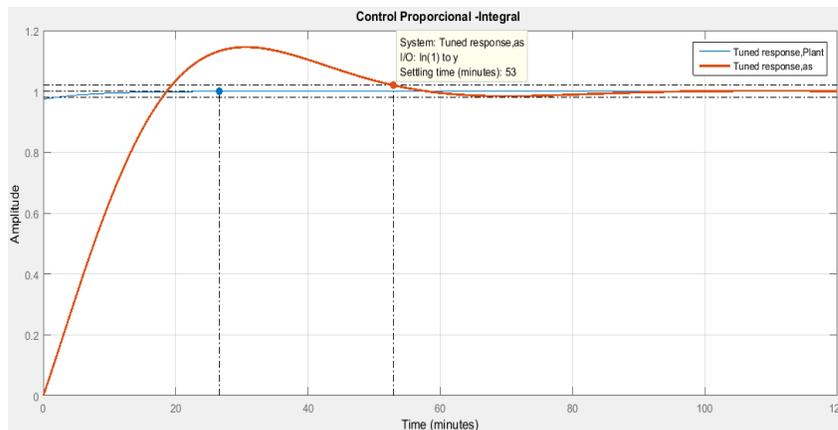
Figura 3-9: Correlación función de transferencia y datos OD



Fuente: Autor

Se realizó una evaluación de los controladores PI y PID. La sintonización de los controladores se realizó con la herramienta PID TUNE de Matlab, obteniendo los siguientes parámetros del controlador de tipo PI, se sintonizó con $k_p=37.27$ y $k_i=0.09381$, este controlador generó un sobreimpulso de 14.5% con un tiempo de estabilización de 53 minutos como puede observarse en la Figura 3-10.

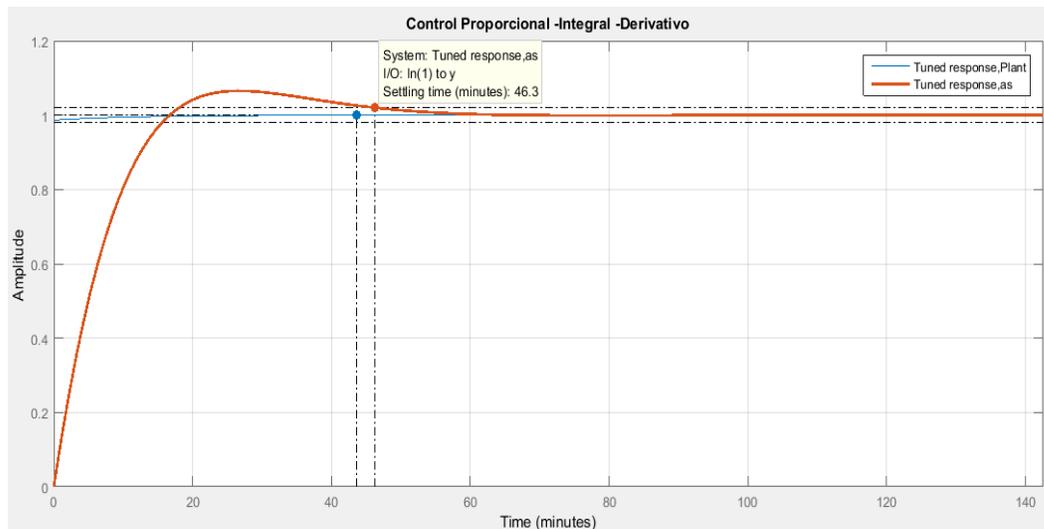
Figura 3-10: Control PI Oxígeno Disuelto



Fuente: Autor

El controlador de tipo PID se sintonizó con $k_p=73.69$, $k_i=0.1117$, $k_d=0.023$, este controlador generó un sobreimpulso de 6.56%. El tiempo de estabilización fue de 46.3 minutos como puede observarse en la Figura 3.11.

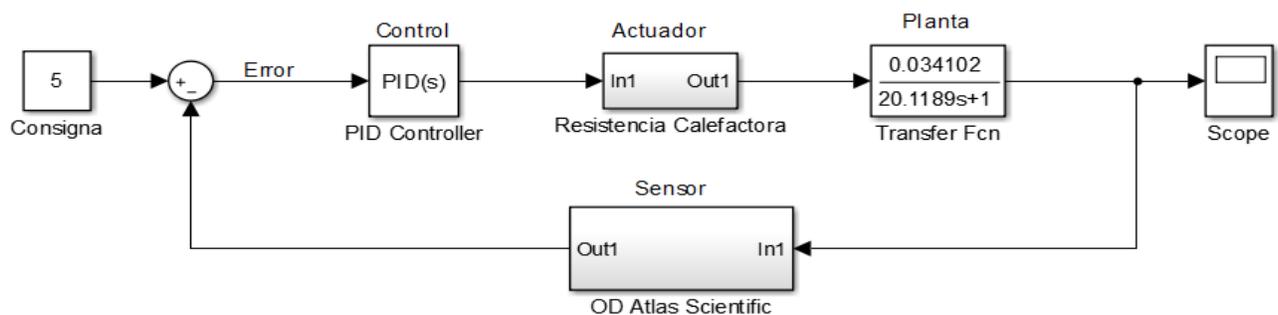
Figura 3-11: Control PID Oxígeno Disuelto



Fuente: Autor

Se seleccionó el controlador PID, debido a que presentó un sobreimpulso menor al controlador PI, así como una reducción en el tiempo de estabilización. Este controlador mantuvo el oxígeno disuelto en valores de 5mg/L.

Figura 3-12: Diagrama bloques control PID oxígeno disuelto

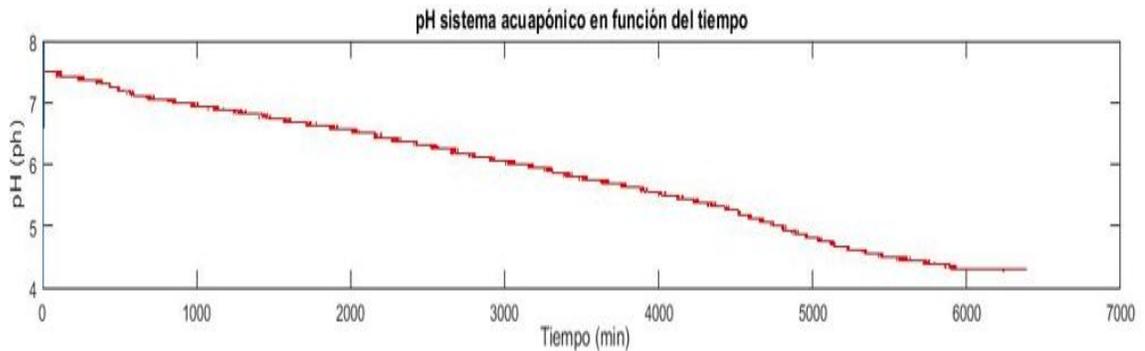


Fuente: Autor

- pH

Se encontró que la variable pH presentó cambios decrecientes en función del tiempo, partiendo de valores de pH neutros- básicos de 7.5 “agua tubería” hasta valores ácidos de 4.5. Estos cambios son lentos en el tiempo tomando aproximadamente cuatro días en realizar este cambio. Esta variación se asocia al proceso biológico realizado por las bacterias nitrificantes y reportado por Massimiliano (2000). El comportamiento del pH en el sistema acuapónico presento la tendencia registrada en la Figura 3-13.

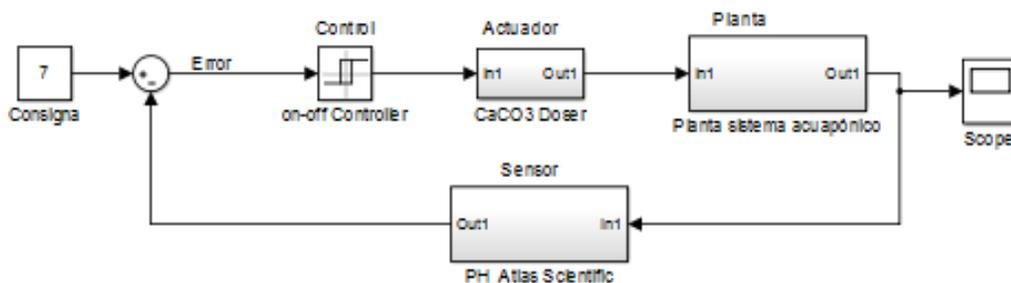
Figura 3-13: pH sistema acuapónico



Fuente: Autor

Para el control de esta variable se dosificó carbonato de calcio, el cual permitió subir el valor de pH a niveles neutros, así como generar un buffer para amortiguar el valor de pH. Se implementó un control todo o nada con histéresis. El valor de consigna fue de 7.0 con histéresis de -1.5, manteniendo la variable en los rangos de [7.0 – 5.5 pH].

Figura 3-14: Diagrama bloques control todo o nada pH

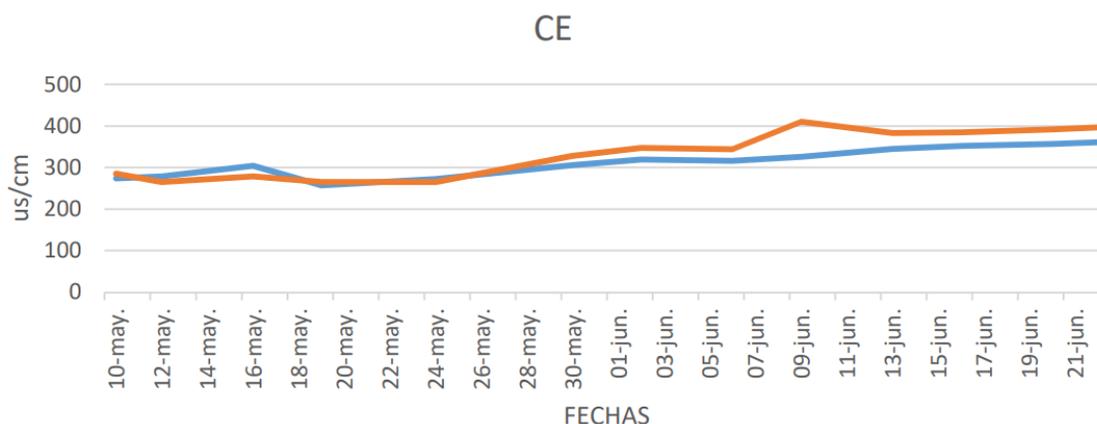


Fuente: Autor

▪ **Conductividad Eléctrica**

Se realizaron mediciones de conductividad eléctrica en el tanque de peces por un periodo de un mes y medio para identificar el comportamiento de esta variable en el tiempo. Se identificó una tendencia a la estabilidad en el rango de [0.3 - 0.4 mS/cm], como se evidencia en la Figura 3-15. La curva de color azul representa la CE del sistema tradicional acuapónico y la roja representa la CE del sistema acuapónico de doble recirculación.

Figura 3-15: CE en sistema acuapónico tradicional y de doble recirculación

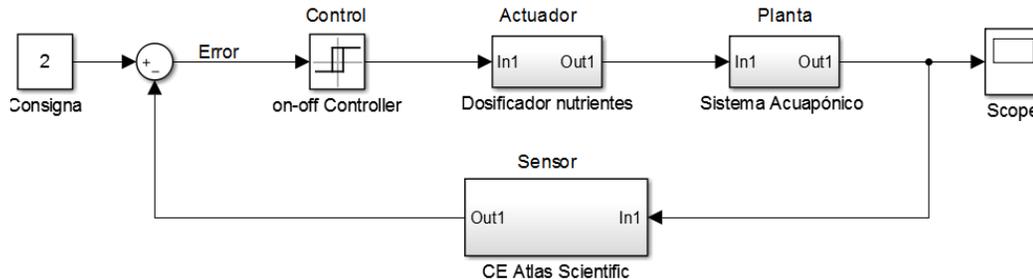


Fuente: Autor

La conductividad eléctrica en el tanque de peces no requirió acción de control debido a que siempre se mantuvo en el rango de [0.3 - 0.4 mS/cm]. Para el cultivo de plantas se propuso una estrategia de control que permitiera adicionar al agua proveniente del tanque de peces una solución de nutrientes buscando incrementar los valores de 0.3 a 2.0 mS/cm.

El control de la CE se realizó solamente en el sistema acuapónico de doble recirculación implementando un control todo o nada. En el tanque de mezcla se dosificó una solución de nutrientes junto al agua proveniente del tanque de peces hasta que esta alcanzó el valor de 2.0 mS/cm. El tiempo necesario para hacer este incremento en CE fue de 5 minutos debido a la velocidad de dosificación de la electroválvula. El control propuesto se presenta en la Figura 3-16.

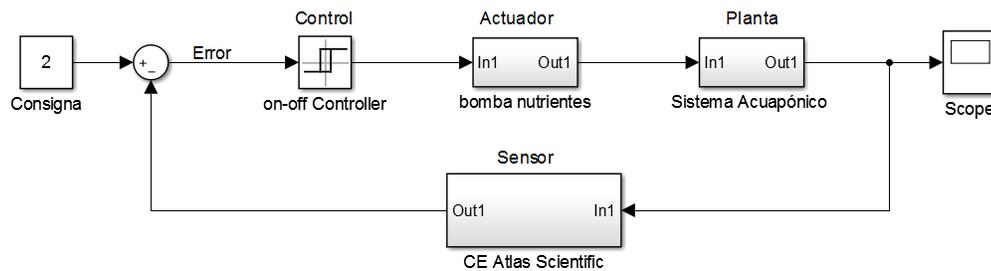
Figura 3-16: Diagrama bloques control todo o nada CE tanque mezcla.



Fuente: Autor

En el tanque de plantas también se realizó un control todo o nada con histéresis para la variable CE. Cuando esta variable alcanzó niveles de 1.5 mS/cm el controlador activó una bomba para subir la mezcla con nutrientes del tanque de mezcla al tanque de las plantas. El valor de consigna para esta variable fue de 2.0 mS/cm con histéresis de -0.5. El tiempo que tardó la variable en decrementar su valor de 2.0 a 1.5 fue de 8 días. El controlador implementado se registra en la Figura 3-17.

Figura 3-17: Diagrama bloques control todo o nada CE tanque plantas



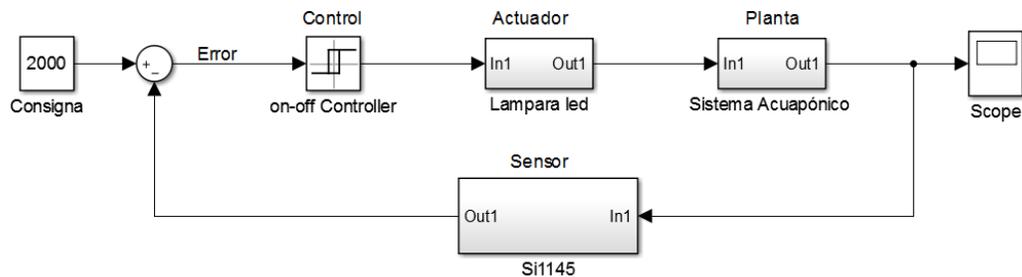
Fuente: Autor

▪ Iluminación

Se tomaron mediciones de niveles de iluminación en lugar del desarrollo del proyecto “Laboratorio de Ensayos Hidráulicos UNAL”, encontrando niveles insuficientes para el correcto crecimiento del cultivo de lechuga. Los valores registrados se encontraron en el rango de [0-1000 lx]. Se realizó un control todo o nada para suministrar la iluminación requerida. Los horarios de iluminación programados fueron hora de encendido 6 am y hora

de apagado 6 pm asignando un ciclo de luz de 12 horas/día. En la Figura 3-18 se presenta el control aplicado a esta variable.

Figura 3-18: Diagrama bloques control todo o nada iluminación.



Fuente: Autor

▪ Nivel de agua en biofiltro

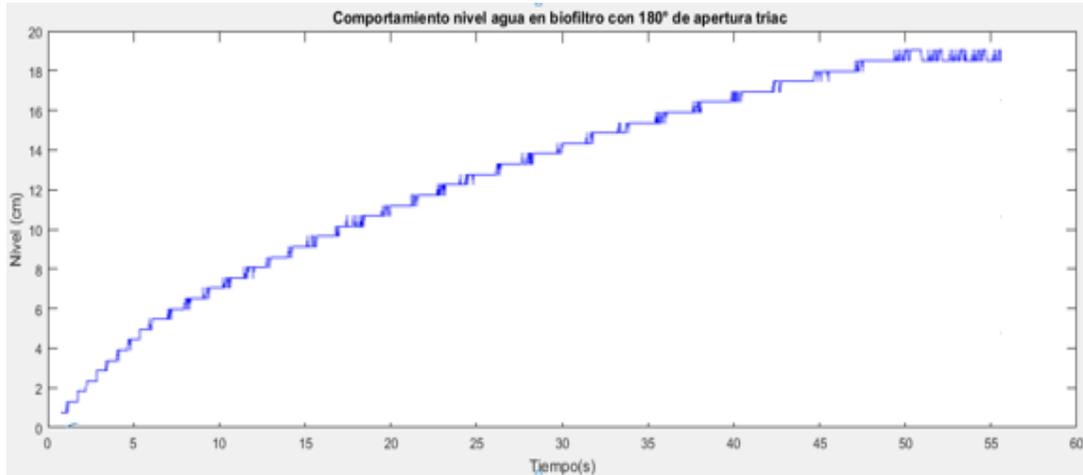
Inicialmente se registraron medidas de con un sensor de ultrasonido, sin embargo esté presento errores de fluctuación en las lecturas de aproximadamente un 20%. Este error fue asociado al vapor generado en la superficie del biofiltro, el cual se encontraba a temperatura de 27°C.

Los errores obtenidos también se asociaron a la turbulencia generada por la bomba de aire y el movimiento del material filtrante. Por tal motivo se realizó un cambio hacia el uso de un sensor de presión diferencial el cual presento un comportamiento estable luego de aplicar un filtro virtual a las medidas. La tensión de salida del sensor MPX2010DP fue relacionada con el nivel de agua por medio de un ajuste lineal representado en la ecuación 3.

$$y = 2.3529 x + 8.9118 \quad (3)$$

El sensor de presión diferencial MPX2010DP presenta una salida en el orden de los milivoltios siendo necesario la amplificación de la señal. Adicionalmente se implementó un filtro virtual el cual promedió las últimas cinco medidas tomadas de nivel. Se aplicó una entrada de 180° de apertura al triac que gobierna la bomba de suministro de agua, obteniendo la curva de llenado para el biofiltro (Figura 3-19).

Figura 3-19: Curva llenado filtro biológico



Fuente: Autor

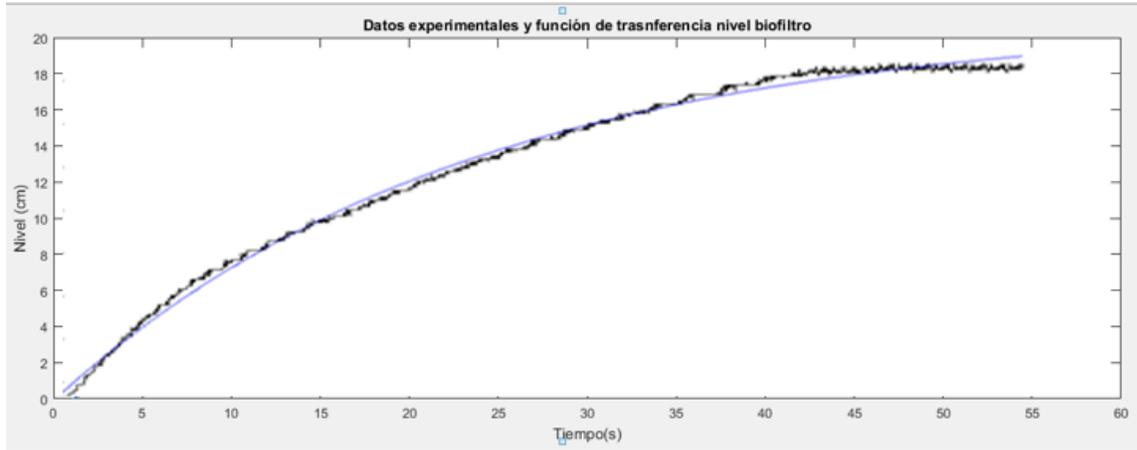
La bomba de agua de suministro debe elevar el fluido a una altura de 1 metro, según la curva dada por el fabricante la tasa de flujo para esa altura es de 1500 L/h “25 L/min”. Esto representa el llenado del biofiltro “22L” en un tiempo de 52.8 segundos, representando una similitud con el tiempo de la gráfica anterior.

El nivel de agua en el biofiltro sigue un comportamiento de primer orden con lo cual se generó la función de transferencia expresada en la ecuación 1.

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad G(s) = \frac{0.1055}{31.75s + 1} \quad (1)$$

Donde K es la ganancia y τ es el tiempo en el cual la variable alcanza el 63%. Se evaluó la función de transferencia graficándola respecto a los datos experimentales obtenidos, encontrando una covarianza del 93.87%, como puede observarse en la Figura 3-20.

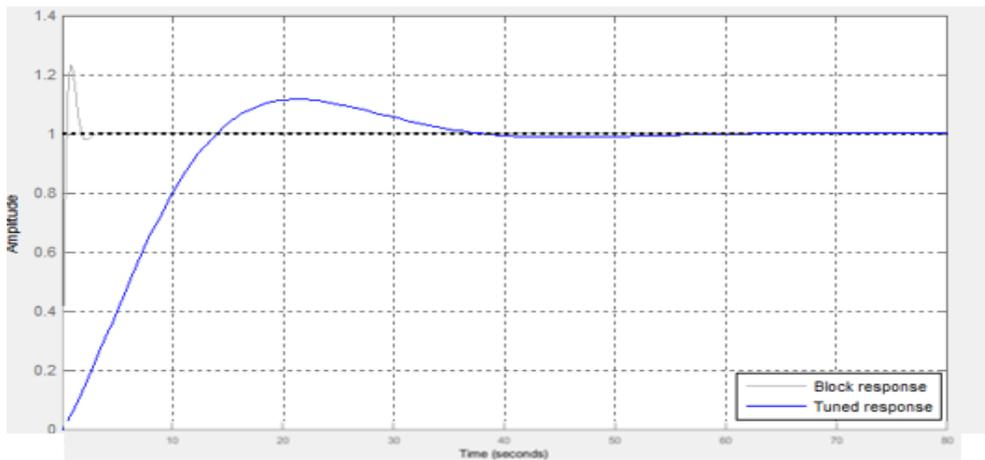
Figura 3-20: Correlación función de transferencia y datos nivel biofiltro



Fuente: Autor

Se evaluó el controlador de tipo PI, el cual se sintonizó con $k_p=30.79$, $k_i=0.1963$, este controlador generó un sobre impulso de 5% con un tiempo de estabilización de 60 segundos (Figura 3-21).

Figura 3-21: Control PI nivel biofiltro

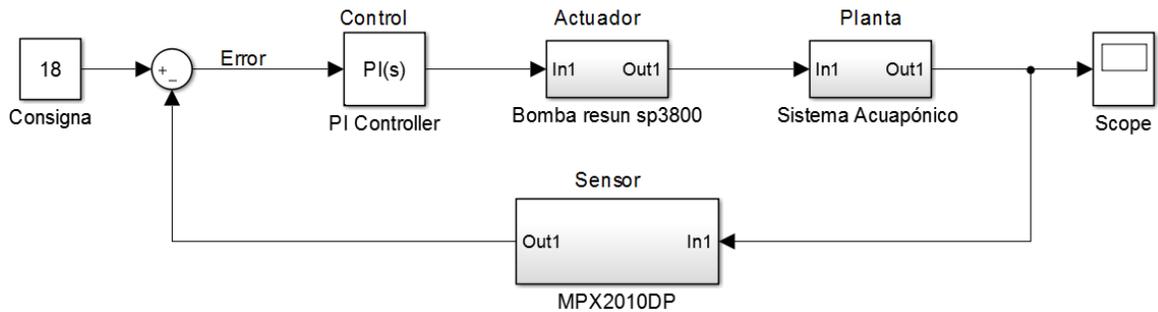


Fuente: Autor

Se seleccionó el control PI para la variable nivel agua en biofiltro. Esta es una variable crítica en el sistema, puesto que de este nivel depende que la bomba de recirculación de

agua funcione, permite mantener un nivel de agua para el crecimiento continuo de las bacterias nitrificantes. El controlador seleccionado mantuvo el nivel de agua en el biofiltro en el valor de 18cm.

Figura 3-22: Diagrama bloques control PI nivel biofiltro

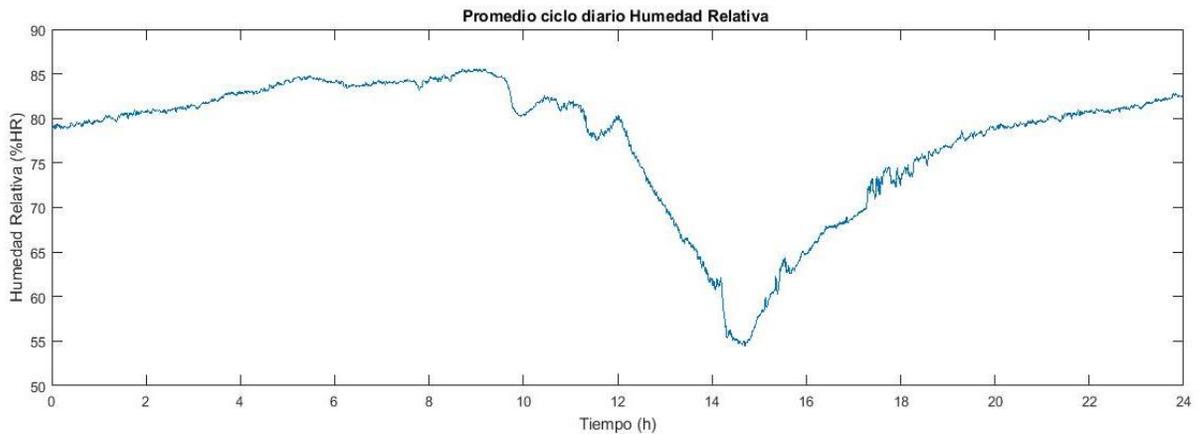


Fuente: Autor

- **Humedad Relativa**

Se tomaron mediciones de la humedad relativa ambiente en el lugar del desarrollo del proyecto encontrando niveles apropiados para el cultivo de lechuga, el comportamiento de la humedad relativa en el transcurso del día puede observarse en la Figura 3-23.

Figura 3-23: Promedio humedad relativa ambiente

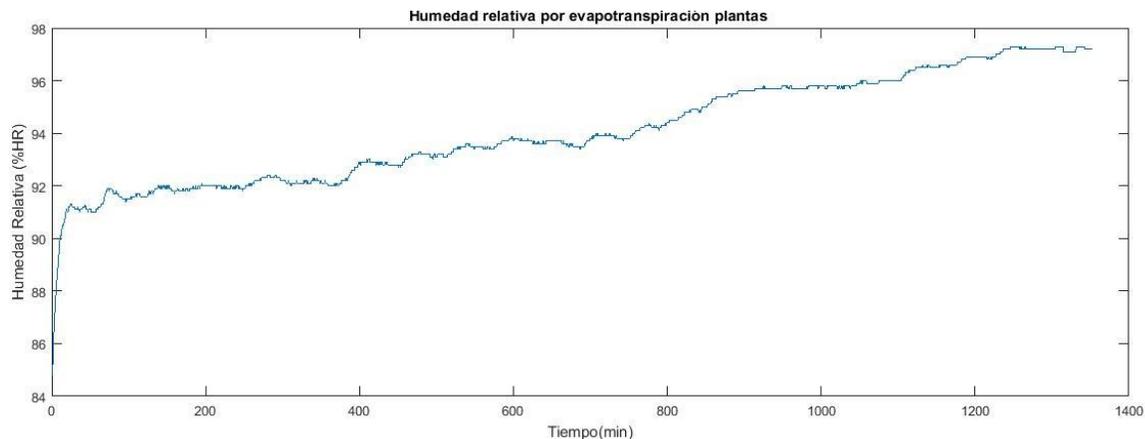


Fuente: Autor

Para el sistema acuapónico tradicional esta variable se mantiene en los niveles adecuados para un correcto crecimiento de la lechuga, sin embargo el diseño propuesto para el sistema acuapónico de doble recirculación obliga a un incremento en la humedad relativa cuando el invernadero es sellado. Esta variable incremento de 84% HR a 97.3 %HR en un tiempo de 22.5 horas.

Este valor elevado de humedad relativa es inadecuado para el crecimiento de la lechuga en el sistema acuapónico de doble recirculación, puesto que aumenta la probabilidad de generación de hongos y bacterias en el cultivo (Reza, 2013). En la Figura 3-24 puede observarse el incremento en la variable cuando el invernadero es cerrado.

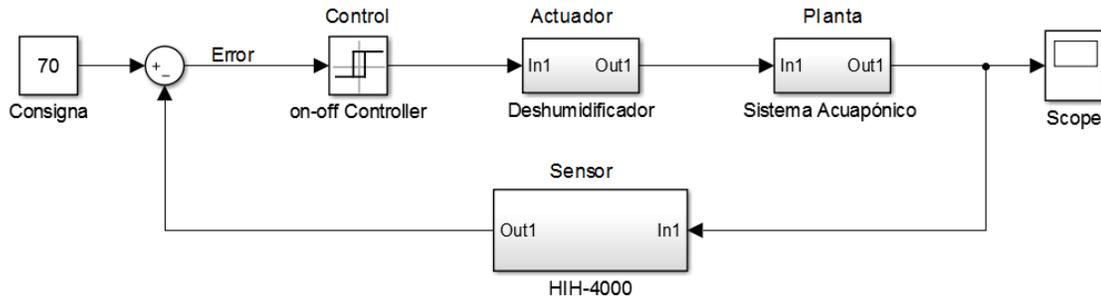
Figura 3-24: Humedad relativa sistema acuapónico doble recirculación



Fuente: Autor

Con los anteriores resultados evidencian la necesidad de controlar la humedad relativa, para lo cual se realizó un control todo o nada, ajustando el valor de consigna a niveles de 70% HR. El controlador tardó 140 minutos en reducir el valor de 97% HR al 70% HR. El actuador utilizado para controlar la HR fue un deshumidificador Bonaire.

Figura 3-25: Diagrama de bloques control humedad relativa



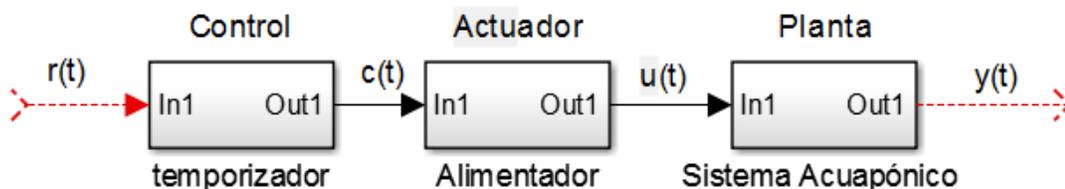
Fuente: Autor

Inicialmente se realizaron mediciones con el deshumidificador Ivation GMD20 “22.5 W”, sin embargo no presentó la capacidad suficiente para reducir los valores de humedad relativa presentes en el interior del invernadero, siendo necesario incorporar al sistema un deshumidificador de mayor capacidad, para este caso el Bonaire BMD100 – LA013 “60W”.

▪ **Alimentación**

El peso inicial de los peces ingresados al sistema acuapónico relaciono una cantidad de suministro de alimento de 4.3% de la biomasa total. Se implementó un control en lazo abierto por medio de temporización. El ajuste del cambio de la cantidad de alimento se realizó cada quince días de forma manual, después de realizar muestras de peso en tilapia.

Figura 3-26: Diagrama de bloques control alimentación.



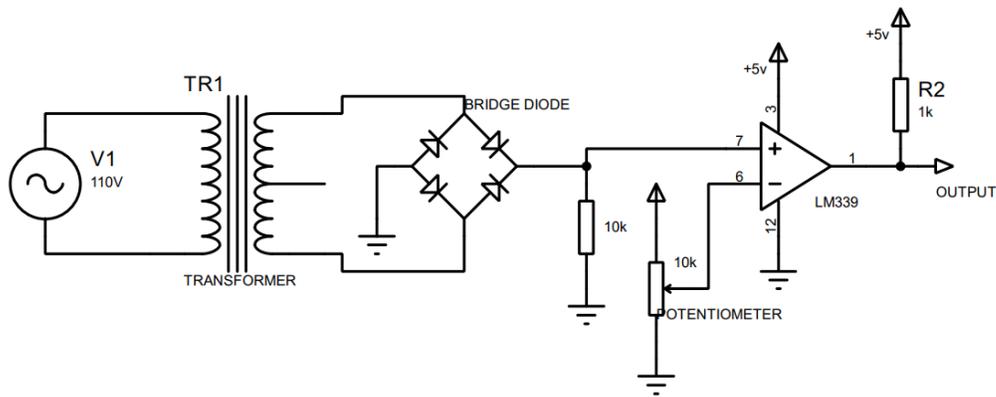
Fuente: Autor

▪ **Circuitos electrónicos**

El circuito electrónico diseñado se compone de los siguientes subcircuitos:

El circuito de identificación de cruce por cero permite realizar la sincronización de las señales AC con las señales generadas por el microcontrolador para la activación de los actuadores.

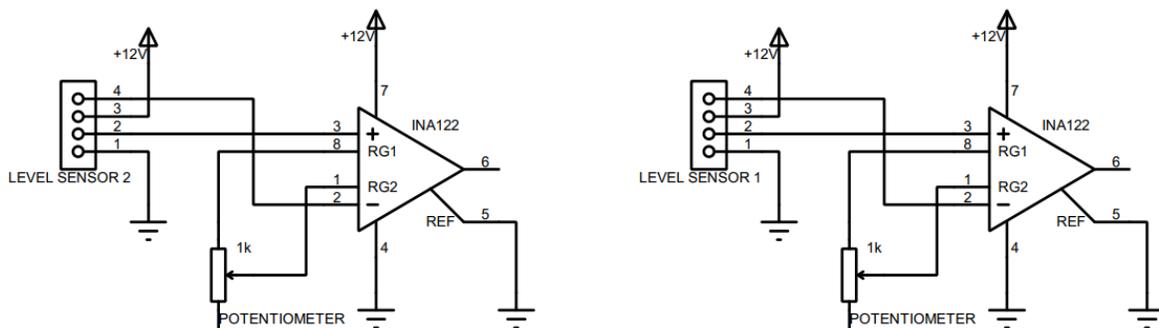
Figura 3-27: Circuito de identificación de cruce por cero.



Fuente: Autor

El sensor de presión diferencial MPX2010DP posee un span de salida de 0 a 25 mv, por lo cual fue necesario implementar un circuito de amplificación de voltaje a la escala de 0 a 5v.

Figura 3-28: Circuito de amplificación señal sensor presión diferencial



Fuente: Autor

Figura 3-29: Circuito adquisición de datos con microcontrolador PIC18F4550

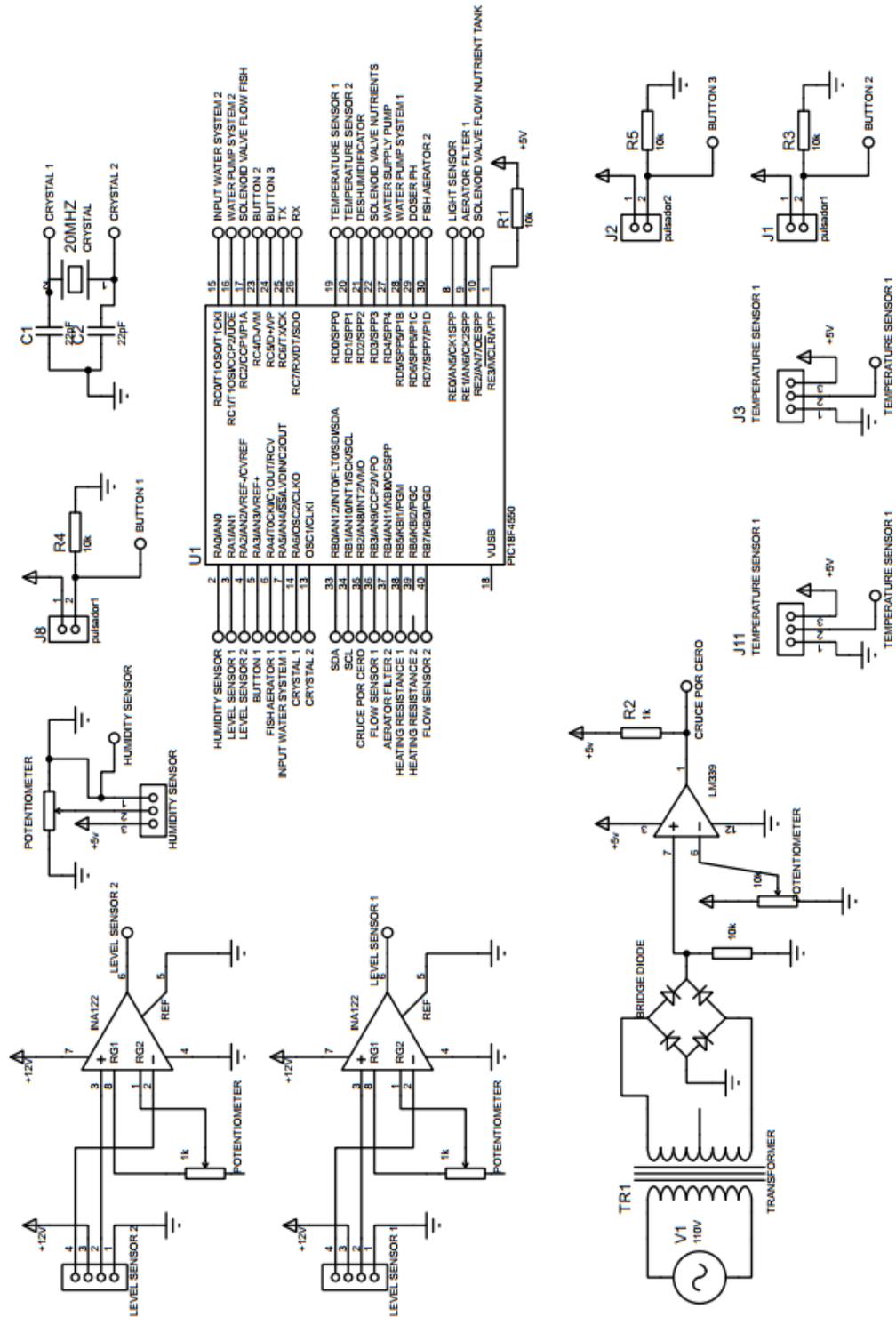


Figura 3-30: Circuito de potencia

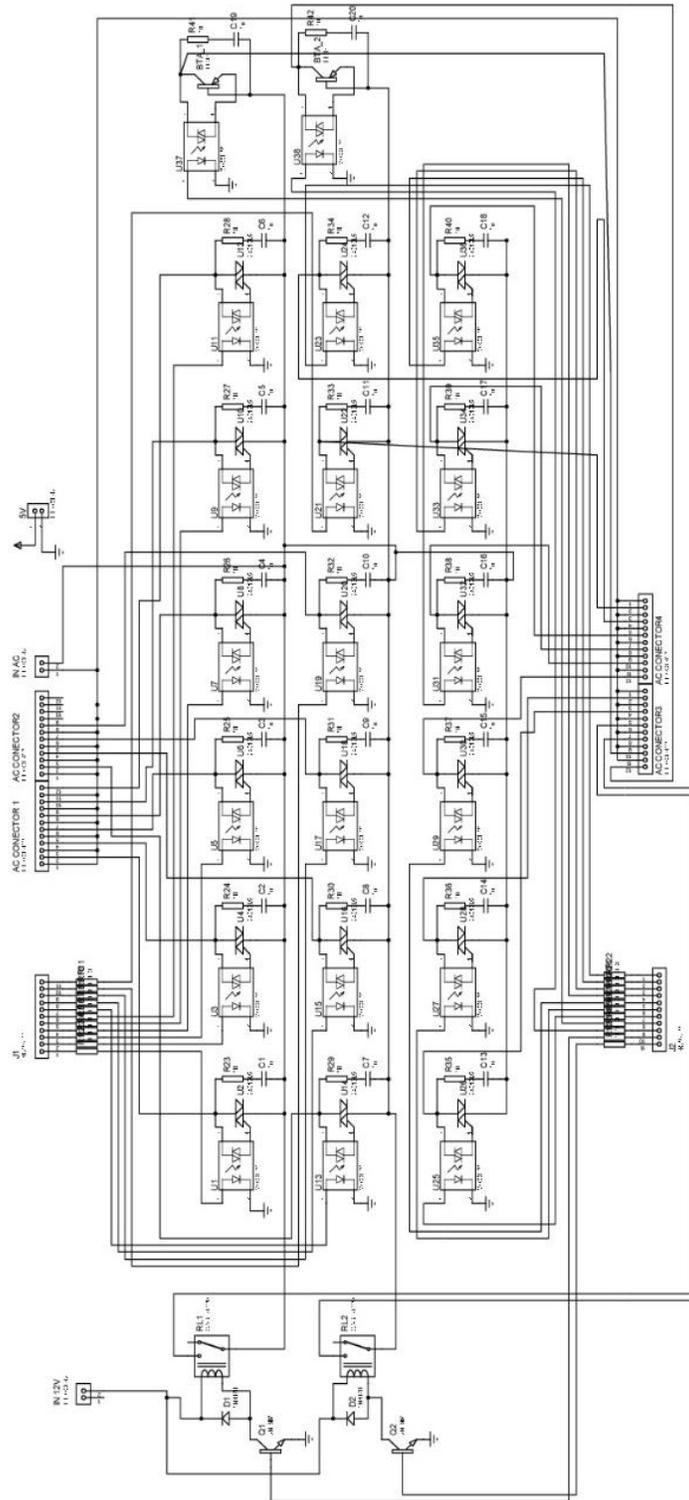
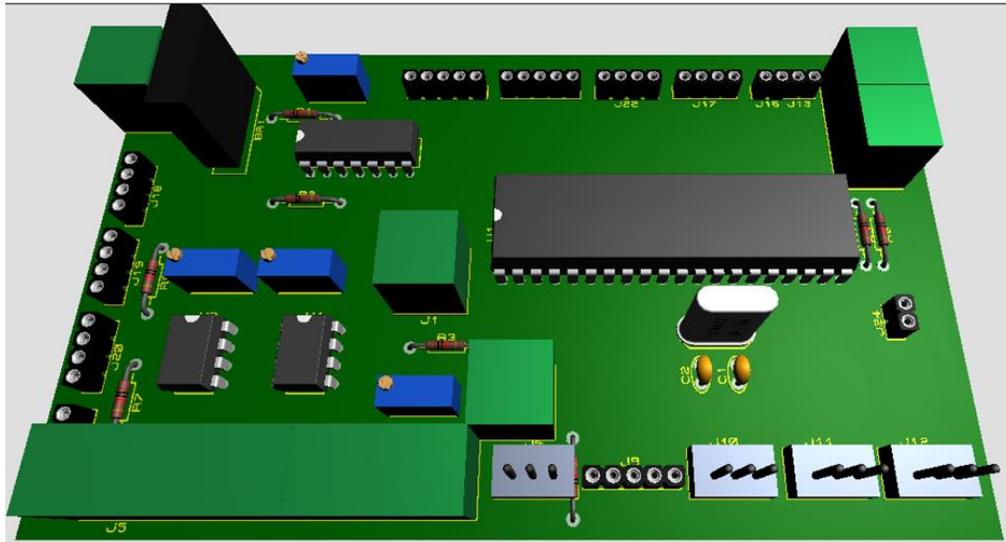
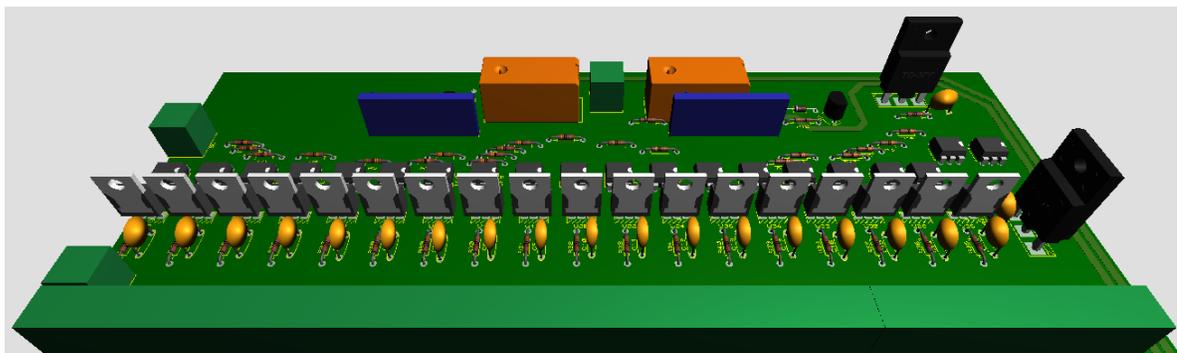


Figura 3-31: Placa electrónica circuito adquisición de datos



Fuente: Autor

Figura 3-32: Placa electrónica circuito potencia



3.5 Conclusiones

Se implementó una estrategia de control que sirvió para mantener las variables de proceso en los valores deseados. Los sistemas acuapónicos y en general los sistemas biológicos presentan una velocidad de reacción lenta en función del tiempo, por tal razón las estrategias de control clásico pueden ser aplicadas para mantener las variables de proceso en niveles adecuados.

La estrategia de control propuesta controló las variables de pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, temperatura de agua, iluminación, nivel de agua en biofiltro y alimentación de peces. Se identificaron las variables temperatura, oxígeno disuelto y nivel de agua en biofiltro como críticas para el sistema, debido a que su descompensación provocaría la muerte de los agentes biológicos presentes en el sistema acuapónico.

Se aplicaron estrategias de control clásico de tipo PID, PI y todo o nada con histéresis, los cuales controlaron adecuadamente los niveles de consigna propuestos. El sistema de control permitió desarrollar un sistema acuapónico automatizado de tipo tradicional y un sistema acuapónico automatizado de tipo doble recirculación.

Estas tecnologías permiten reducir la intervención humana a la siembra inicial de plántulas y alevines obteniendo autónomamente los productos comerciales transcurridos los tiempos de cultivo. El controlador fue evaluado durante un periodo de 90 días con la especie de tilapia- lechuga. El sistema de control propuesto puede ser escalado a granjas actualmente productivas ofreciendo una herramienta para aumento en producción de cultivos.

3.6 Bibliografía

Buentello, D. (2000). Effects of water temperature and dissolve oxygen on daily feed consumption, feed utilization and growth of channel catfish (*Ictalurus punctatus*). *Aquaculture*, 182, 339-352

Geisenhoff, L.O., Jordan, R.A., Santos, R.C., Oliveira, F.C., Gomez, E.P. (2016). Effect of different substrates in aquaponic lettuce production associated with intensive tilapia farming with water recirculation systems. *Eng Agr*, 36, 291-299.

Graber, A.J. (2009). Aquaponics systems: nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Aquaculture Innovations*, 246,147–156.

- Hurtado, H., Ramirez, L., Gómez, E. (2010) Montaje y evaluación de sistemas de cultivo acuapónicos carpa roja "Ciprinus carpio"-orégano "Origanum vulgare. Revista Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Militar Nueva Granada, 7, 12-27.
- Kumar, H. (2016). An autonomus Aquaponics System using 6LoWPAN based WSN. 4th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops.
- Kuo, B. (1996). Sistemas de control automático. Séptima edición. Prentice-Hall.
- Mahesh, P., Shyba, S. (2016). New Aspect for Organic Farming Practices: Controlled Crop Nutrition and Soilles Agriculture. IEEE Global Humanitarian Technology Conference.
- Massimiliano, F. (2000). Robust multivariable PID control for linear parameter varying systems. Dipartimento di Informatica Matematica, Elettronica e Trasporti, Università Mediterranea degli Studi di Reggio Calabria.
- Nagayo, A., Mendoza, C., Vega, E. (2017). An Automated Solar- Powered Aquaponics Systems towards Agricultural Sustainability in the Sultanate of Oman. IEEE International Conference on Smart Grid and Smart Cities.
- Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna. Quinta edición. Prentice-Hall.
- Rafiee, G., Saad, C.R. (2006). The effect of natural zeolite (clinoptiolite) on aquaponic production of red tilapia (*Oreochromis sp.*) and lettuce (*Lactuca sativa var. longifolia*), and improvement of water quality. *J. Agric Sci Technol*, 8, 313-322.
- Reza, H. (2013). Comparison of the vegetative growth, ecophysiological characteristics and mineral nutrient content of basil. *Jorunal of plant nutrition*, University of Rafsanjan.
- Saaid, M. (2013). Automated Indoor Aquaponic Cultivation Technique. IEEE 3th International Conference on System Engineering and Technology, Malaysia.

Silva, P. (2016). An Industry 4.0 based Architecture for Distributed Soil-less Food Production Systems. Proceedings of the first Industrial Engineering Symposium.

Simbeye, D. S., Yang, S. F. (2014). Water quality monitoring and control for aquaculture based on wireless sensor networks. Journal of Networks, 9, 840–849.

4. Evaluación de sistema acuapónico tradicional y de doble recirculación para cultivo de tilapia-lechuga

Evaluación de sistema acuapónico automatizado tradicional y de doble recirculación en parámetros de rendimiento de cultivo y consumo de agua.

4.1 Resumen

En esta investigación se evaluó el rendimiento de cultivo de lechuga y tilapia, así como el consumo de agua en un sistema acuapónico automatizado. Se utilizaron dos prototipos, uno de sistema acuapónico tradicional y otro de sistema acuapónico con doble recirculación. Los dos sistemas replicaron las mismas condiciones de tamaño de prototipo y cantidad de biomasa. El primer sistema sirvió de testigo de sistema acuapónico tradicional para realizar comparaciones de crecimiento de peces y plantas respecto al sistema propuesto. Se desarrollaron en cada sistema acuapónico dos cultivos con duración de 45 días cada uno, en cada cultivo se evaluaron los parámetros en peces de longitud total, peso y factor de conversión alimenticia y en plantas número de hojas, peso fresco total, altura, color y textura. Para los dos cultivos se encontraron rendimientos similares en peces con rendimientos esperados para la especie. En el cultivo de plantas se evidenció un lento crecimiento para el sistema acuapónico tradicional comparado con el rendimiento encontrado en el sistema acuapónico de doble recirculación. Esta diferencia se asocia al suministro de los nutrientes faltantes a las plantas en el sistema de doble recirculación. Respecto al uso de agua se identificó un consumo del 6% para el sistema tradicional y 2% para el sistema de doble recirculación. Esta disminución se relaciona a la inclusión del sistema de doble recirculación en un invernadero y a la recuperación del agua de evapotranspiración de las plantas por medio de condensación la cual fue reincorporada al sistema.

PALABRAS CLAVE: acuaponía, lechuga, poscosecha, rendimiento, tilapia.

4.2 Introducción

Los sistemas acuapónicos son la combinación de un sistema hidropónico “cultivo de plantas en soluciones nutritivas” y la acuicultura “cultivo de peces”. En estos sistemas conviven tres organismos vivos los cuales se benefician mutuamente a través de un sistema de circulación de agua. Tanto peces, plantas y bacterias son de vital importancia para el equilibrio en un sistema acuapónico. Estos sistemas han tenido auge a partir de la necesidad medioambiental en reducción del impacto ambiental y disminución de consumo de recursos naturales. Los sistemas acuapónicos presentan dos configuraciones principales, sistemas NFT y sistemas de raíz flotante con y sin sustrato.

En los sistemas acuapónicos los residuos de alimento no consumido y los desechos de los peces son transformados por medio de las bacterias nitrificantes para convertir los compuestos tóxicos para los peces en compuestos asimilables como nutrientes para las plantas. Los sistemas acuapónicos presentan las ventajas de aprovechamiento de residuos “desecho peces”, reducción de tierra y agua utilizados en la producción convencional y se obtienen productos orgánicos. Dentro de las especies más cultivadas se encuentra la combinación tilapia- lechuga, carpa-oregano- tilapia-tomate, trucha-lechuga. Para este trabajo se seleccionó la combinación tilapia-lechuga.

Los sistemas acuapónicos presentan rendimientos lentos en las plantas asociado a la falta de ciertos nutrientes que no son generados en el sistema, comparados con cultivos hidropónicos en los cuales la solución nutritiva aporta los nutrientes en concentraciones adecuadas. Kloas propuso un sistema de doble recirculación en el cual logró suministrar los nutrientes faltantes a las plantas sin afectar la calidad del agua de los peces, logrando incrementar la producción en los sistemas acuapónicos.

Aguilar y Trelles (2014), sugieren analizar los rendimientos en sistemas acuapónicos midiendo en peces el peso, longitud estándar y longitud total, en plantas peso, altura, número de hojas, color y textura. La mayoría de trabajos propone tomar las medidas en peces realizando previamente una sedación, sin embargo para reducir el estrés en los peces para este trabajo se siguió la metodología de diferencia de peso.

4.3 Materiales y métodos

- **Material Vegetal**

Se utilizaron 36 plántulas de lechuga crespa verde (*Lactuca Sativa*) provenientes del Centro de Bio-sistemas Alberto Lozano Simonelli de la Universidad Jorge Tadeo Lozano. Las plántulas presentaron un promedio de 3 hojas verdaderas, altura promedio de 5 cm y turba como sustrato de siembra. Inicialmente fueron adquiridas 18 plántulas para un primer cultivo y transcurridos 50 días se adquirieron otras 18 plántulas para realizar un segundo cultivo.

- **Material Animal**

Se utilizaron 40 alevines de Tilapia Roja "*Oreochromis Mossambicus*" adquiridos en el Laboratorio de Ictiología y Peces Ornamentales de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá. Los alevines presentaron un peso promedio de 3.23g y una longitud promedio de 3.2 cm. Inicialmente fueron adquiridos 20 alevines para un primer cultivo y transcurridos 45 días se adquirieron otros 20 alevines para realizar un segundo cultivo.

- **Agua**

El agua utilizada para el suministro a los sistemas acuapónicos fue tomada de la tubería principal de agua potable de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.

- **Prototipo sistema acuapónico tradicional**

El sistema acuapónico tradicional consta de un tanque para cultivo de plantas, tanque para cultivo de peces, filtro mecánico y filtro biológico. Este prototipo incorpora un sistema cerrado de recirculación de agua, el cual presente una conducción de agua del tanque de plantas, al tanque de peces, filtro mecánico y filtro biológico por medio de una conducción por gravedad. Del filtro biológico hacia el tanque de plantas se conduce el agua utilizando una bomba de agua.

- **Prototipo sistema acuapónico de doble recirculación**

El sistema acuapónico de doble recirculación consta de un tanque para cultivo de plantas, tanque para cultivo de peces, filtro mecánico, filtro biológico y tanque de mezcla de nutrientes. Este prototipo presenta dos sistemas de circulación de agua, el primero conduce

el líquido entre el tanque de peces, filtro mecánico y filtro biológico. El segundo del filtro biológico hacia el tanque de mezcla de nutrientes y tanque de cultivo de plantas. Este sistema se desarrolló en condiciones de invernadero e implementando un mecanismo de recuperación de agua por condensación.

Métodos

▪ Establecimiento filtro biológico

Antes de iniciar los cultivos en los sistemas acuapónicos, se realizó el proceso de maduración del filtro biológico utilizando el producto Stability del fabricante Seachem, esta fase incorporó bacterias aerobias, anaerobias y facultativas para su posterior proliferación autónoma en el filtro. Los sistemas acuapónicos se dejaron recirculando con una mezcla de agua de clorada y agua proveniente de acuario. Se tomaron medidas de Amonio/Amoniaco, Nitritos, Nitratos y Fosfatos por medio de test de colorimetría de la marca API, cuando estos niveles fueron inferiores a los valores tóxicos referidos en la literatura, se incorporaron los alevines de tilapia y plántulas de lechuga al sistema.

▪ Cultivo de plantas

Se desarrollaron dos cultivos de lechuga, el primero utilizando la metodología de raíz flotante con medio de soporte poliestireno expandido. El segundo cultivo se desarrolló con sustrato arlita como medio de soporte. Se implementó un sistema de control de iluminación led para proveer la cantidad de horas luz requeridas en el cultivo de lechuga. Para el sistema acuapónico de doble recirculación se realizó el control de la humedad relativa en el interior del invernadero en el nivel de 70% de HR. El sistema acuapónico de doble recirculación suministró una mezcla de nutrientes al tanque de plantas, buscando incrementar los rendimientos respecto al cultivo tradicional.

Inicialmente se realizó un lavado del cepellón de las plántulas para retirar la turba adherida, se tomaron medidas de peso inicial, altura y número de hojas, posteriormente se realizó el trasplante de las plántulas en vasos para hidroponía de dos pulgadas. Cada cultivo presentó una duración de 45 días. Cada 5 días, se retiraron las plantas en su totalidad para la toma

de medidas de peso fresco, altura y número de hojas. Al final del cultivo se realizaron medidas poscosecha de color y textura.

- **Cultivo de peces**

Se desarrollaron dos cultivos de tilapia roja con una duración de 45 días cada uno. Cuando los alevines llegaron al lugar del proyecto, estos fueron incorporados en un tanque de cuarentena por un periodo de 5 días para revisar su comportamiento de consumo de alimento y supervivencia al transporte. Cada 5 días fueron retirados la totalidad de peces para tomar la medida de peso y longitud total.

Los peces fueron sustituidos en su totalidad al terminar cada cultivo, puesto que para obtener medidas comparables en el rendimiento de la lechuga en los dos cultivos era necesario mantener las mismas condiciones de generación de nutrientes y a medida que los alevines van creciendo es necesario suministrar más cantidad de alimento y por ende generaran una mayor cantidad de compuestos repercutiendo en las condiciones del agua del sistema acuapónico.

- **Análisis de Agua**

Se realizó análisis a muestras de agua del sistema acupónico tradicional, sistema acupónico de doble recirculación, sistema de recuperación de agua, tanque de mezcla y agua de suministro proveniente de la tubería. Este análisis se llevó a cabo en el Laboratorio de Aguas y Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia. Se evaluaron los parámetros de pH, CE, cationes (Ca, Mg, Na, K), RAS, aniones (Cl, SO₄, HCO₃, CO₃, NO₃, NH₄, PO₄).

Toma de datos plantas de lechuga

- **Peso**

Se utilizó la balanza digital Lexus Star 3000. Se retiró la planta de lechuga del sistema acuapónico por un tiempo de 5 minutos para reducir la cantidad de agua contenida en las raíces, seguidamente se registró el peso fresco total de la lechuga.

- **Ganancia de peso**

A partir de los resultados de peso final y peso inicial se determinó la ganancia de peso en gramos y ganancia de peso porcentual utilizando la siguiente ecuación.

$$\text{ganancia de peso (g)} = P_f - P_i \quad (1)$$

$$\text{ganancia de peso (\%)} = \frac{P_f - P_i}{P_i} \times 100 \quad (2)$$

Donde P_f corresponde al peso registrado para el día 45 y P_i al peso registrado el día 1.

- **Altura lechuga**

Se utilizó un calibrador vernier para la medición de la altura de las plantas de lechuga, se ubicó el punto cero encima del cepellón y se tomó la medida hasta la parte más alta de la planta.

- **Ganancia de altura**

A partir de los resultados de altura final y altura inicial se determinó la ganancia de altura en centímetros y ganancia de altura porcentual utilizando la siguiente ecuación.

$$\text{ganancia de altura (cm)} = H_f - H_i \quad (3)$$

$$\text{ganancia de altura (\%)} = \frac{H_f - H_i}{H_i} \times 100 \quad (4)$$

Donde H_f corresponde a la altura registrada el día 45 y H_i a la altura registrada el día 1.

- **Número de hojas**

Se realizó el conteo manual de número de hojas verdaderas para cada planta de lechuga, sin tomar en cuenta los cotiledones.

- **Color**

El color de las hojas de lechuga se determinó con el uso del colorímetro digital Minolta CR-400 configurado en las coordenadas de color $[L^*, a^*, b^*]$.

- **Textura**

La firmeza en las hojas de lechuga se determinó utilizando el Texturómetro (Brookfiel CT3, modelo CT3-4500, 0 to 4500 g, USA) del laboratorio de poscosecha del programa de Ingeniería Agrícola. Se realizaron pruebas con diferentes puntas buscando que el texturómetro detectara el cruce exacto de la hoja de lechuga.

Toma de datos cultivo de tilapia

- **Peso**

Se utilizó la balanza digital Lexus Star 3000. Partiendo del peso conocido de un recipiente con agua el pez fue introducido y por medio del cálculo de diferencias de pesos se registró el peso del alevín.

- **Ganancia de peso**

A partir de los resultados de peso final y peso inicial se determinó la ganancia de peso en gramos y ganancia de peso porcentual utilizando las ecuaciones 1 y 2.

- **Longitud total**

Se realizó la medición de la longitud total del pez “cabeza – aleta caudal” sobre un plano horizontal compuesto por un papel plastificado con cuadrícula de tamaño 0.5 cm. Se realizó una toma fotográfica para la identificación de la medida puesto que el pez no permanece estático sobre la superficie y se debe mantener el menor tiempo posible fuera del agua para así reducir el estrés generado. La ganancia en longitud se determinó mediante las ecuaciones 3 y 4.

- **Índice de conversión alimenticia**

El índice de conversión alimenticia relaciona el consumo de alimento y la ganancia en peso. En el transcurso del cultivo la alimentación fue controlada y se asume consumo total del alimento suministrado a los peces. Este índice se determinó mediante la ecuación 5.

$$\text{Índice de conversión alimenticia} = \frac{\text{total alimento consumido}}{P_f - P_i} \quad (5)$$

- **Consumo de agua**

Se identificó la cantidad de agua utilizada para cada sistema acuapónico mediante la medida de sensores de flujo ubicados en las tuberías de suministro de agua fresca de cada uno de los sistemas.

4.4 Resultados y discusión

Rendimiento cultivo peces

- **Peso**

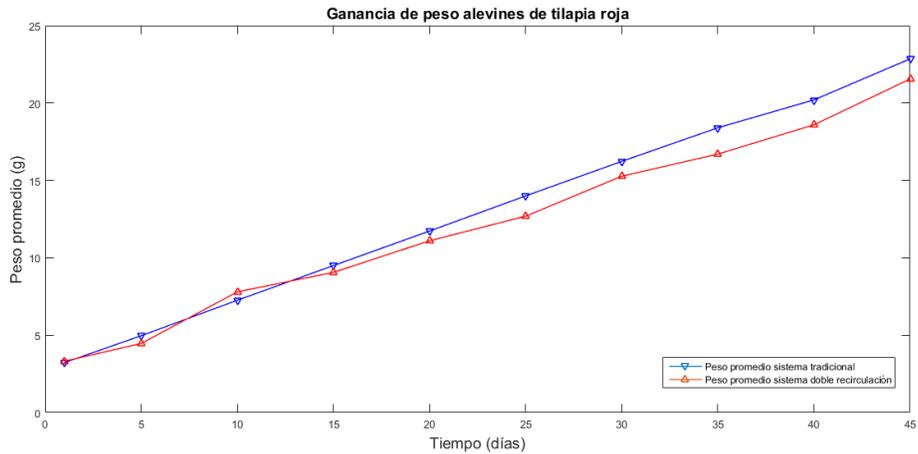
Para el cultivo 1 el peso inicial promedio para los alevines de tilapia roja fue de 3.23g para el sistema acuapónico tradicional y 3.32g para el sistema acuapónico de doble recirculación. Los pesos finales transcurridos 45 días fueron de 22.85g y 21.55g respectivamente. Los pesos intermedios registrados se presentan en la tabla 4-1.

Tabla 4-1: Pesos promedio para cultivo 1 de tilapia roja.

Tiempo (días)	Sistema acuapónico tradicional Peso promedio (g)	Sistema acuapónico doble recirculación Peso promedio (g)
1	3.23	3.32
5	4.97	4.47
10	7.26	7.8
15	9.50	9.06
20	11.73	11.1
25	14.0	12.69
30	16.23	15.27
35	18.40	16.7
40	20.2	18.59
45	22.85	21.55

Se evidenció una ganancia de peso durante el transcurso del cultivo. En la Figura 4-1 se representa la curva de comparación para los dos sistemas acuapónicos identificando una ganancia similar.

Figura 4-1: Curva crecimiento en peso de Tilapia Roja cultivo 1.



Fuente: Autor

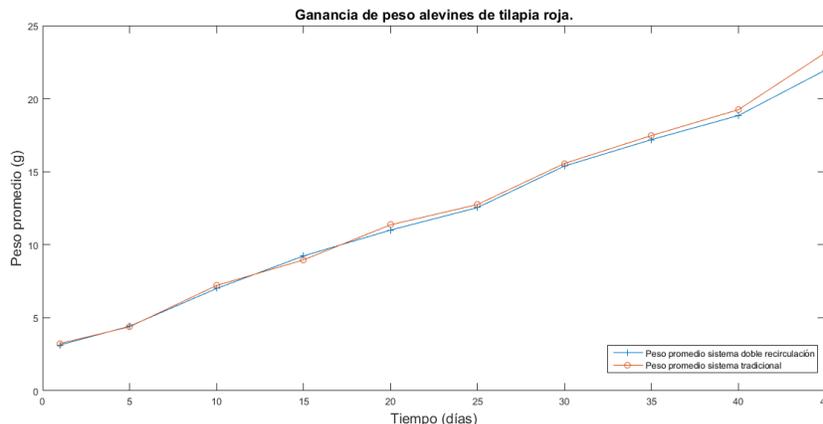
Para el cultivo 2 el peso inicial promedio para los alevines de tilapia roja fue de 3.24g para el sistema acuapónico tradicional y 3.14g para el sistema acuapónico de doble recirculación. Los pesos finales transcurridos 45 días fueron de 23.14g y 21.95g respectivamente. Los pesos intermedios registrados se representan en la tabla 4-2.

Tabla 4-2: Pesos promedio para cultivo 2 de tilapia roja.

Tiempo (días)	Sistema acuapónico tradicional Peso promedio (g)	Sistema acuapónico doble recirculación Peso promedio (g)
1	3.24	3.14
5	4.38	4.42
10	7.21	7.00
15	8.96	9.23
20	11.36	11.00
25	12.75	12.54
30	15.56	15.38
35	17.47	17.19
40	19.24	18.84
45	23.14	21.95

Se evidenció una ganancia de peso durante el transcurso del cultivo. En la Figura 4-2 se presenta la curva de comparación para los dos sistemas en la cual se identifica una ganancia de peso similar.

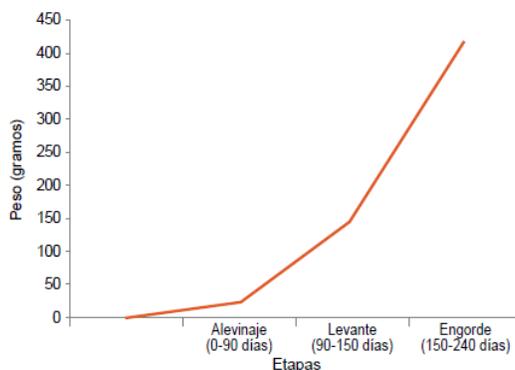
Figura 4-2: Curva crecimiento en peso de Tilapia Roja cultivo 2.



Fuente: Autor

Realizando un promedio de la ganancia de peso en los dos cultivo se encontró un mayor incremento en el sistema tradicional “0.7 %” comparado con el sistema de doble recirculación. Según (SIPSA, 2014) la curva de crecimiento para la tilapia roja desde la etapa de alevinaje hasta engorde se presenta en la Figura 4-3.

Figura 4-3: Crecimiento en peso para Tilapia Roja propuesta por SIPSA.



Fuente: SIPSA (2014). El cultivo de la tilapia roja en estanques de tierra, fuente de proteína animal de excelente calidad.

De acuerdo a la curva propuesta por SIPSA (2014), se evidencia para la etapa de alevinaje un comportamiento de tipo lineal similar a los resultados obtenidos en este proyecto.

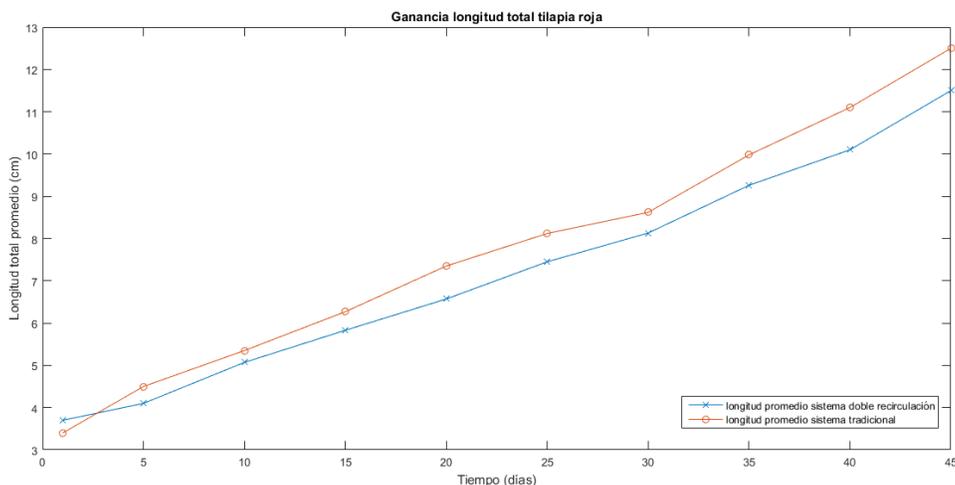
▪ **Longitud**

Para el cultivo 1 la longitud inicial total de los alevines de tilapia roja fue de 3.4 cm para el sistema acuapónico tradicional y 3.7 cm para el sistema acuapónico de doble recirculación. La longitud final total transcurridos 45 días fue de 11.5cm y 12.5cm respectivamente. Las medidas de longitud intermedia se registran en la tabla 4-3. Se evidenció una ganancia en longitud total durante el transcurso del cultivo 1. En la Figura 4-4 se presenta la curva de comparación para los dos sistemas.

Tabla 4-3: Longitud total promedio para cultivo 1 de tilapia roja.

Tiempo (días)	Sistema acuapónico tradicional Longitud total promedio (cm)	Sistema acuapónico doble recirculación Longitud total promedio (cm)
1	3.4	3.7
5	4.5	4.1
10	5.35	5.07
15	6.27	5.83
20	7.35	6.57
25	8.12	7.45
30	8.62	8.13
35	9.98	9.26
40	11.1	10.1
45	12.5	11.5

Figura 4-4: Curva crecimiento en longitud de Tilapia Roja cultivo 2..



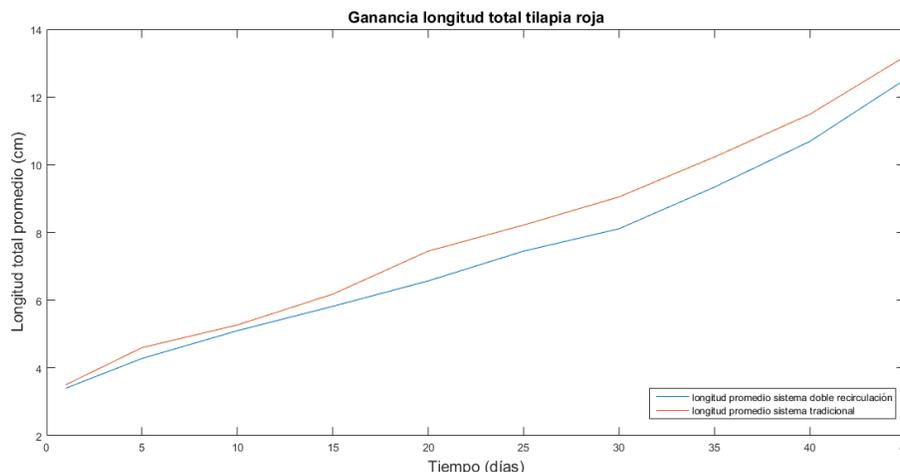
Fuente: Autor

Para el cultivo 2 la longitud inicial total de los alevines de tilapia roja fue de 3.5 cm para el sistema acuapónico tradicional y 3.4 cm para el sistema acuapónico de doble recirculación. La longitud final total transcurridos 45 días fue de 13.2cm y 12.52cm respectivamente. Las medidas de longitud intermedia se registran en la tabla 4-4. Se evidenció una ganancia en longitud total durante el transcurso del cultivo 2 similar a los resultados obtenidos para el primer cultivo. En la Figura 4-5 se presenta la curva de comparación para los dos sistemas.

Tabla 4-4: Longitud total promedio para cultivo 2 de tilapia roja.

Tiempo (días)	Sistema acuapónico tradicional Longitud total promedio (cm)	Sistema acuapónico doble recirculación Longitud total promedio (cm)
1	3.5	3.4
5	4.60	4.28
10	5.27	5.10
15	6.18	5.82
20	7.45	6.57
25	8.22	7.45
30	9.05	8.11
35	10.23	9.34
40	11.49	10.69
45	13.2	12.52

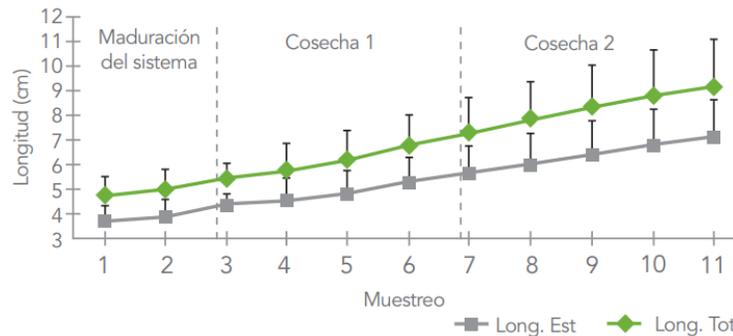
Figura 4-5: Curva crecimiento en longitud de Tilapia Roja cultivo 2



Fuente: Autor

De acuerdo a Ramírez (2011), los alevines presentan un crecimiento en longitud con tendencia lineal. Ramírez encontró valores de crecimiento para la carpa común menores a los obtenidos en este trabajo. Los resultados obtenidos por Ramírez se evidencian en la Figura 4-6.

Figura 4-6: Curva de crecimiento en longitud tilapia roja (Ramírez, 2011).



Fuente: Ramírez, 2011. Evaluación preliminar de sistemas acuapónicos e hidropónicos en cama flotante para el cultivo de orégano. En la tabla 4-5 se encuentran las imágenes de los alevines en su fase inicial y final de cultivo.

Tabla 4-5: Resultados crecimiento tilapia roja

Fase inicial cultivo (día 1)	Fase final cultivo (día 45)
	

- **Índice de conversión alimenticia**

En la búsqueda del alimento a suministrar a los peces del sistema acuapónico se consultaron las bases de datos del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) para identificar los productores de alimento que se encuentran avalados en Colombia, dentro de los cuales se seleccionó ITLACOL S.A por la variedad de alimento para cada una de las etapas del pez. ITALCOL SA presenta tablas de recomendación para suministro de cantidad de alimento y las cuales fueron tomadas en cuenta para este trabajo, esta tabla se relaciona a continuación.

Tabla 4-6: Alimentación tilapia (ITALCOL)

Temperatura °C	[5-10]g	[10-20]g	[20-40]g	[40-70]g
21	3,4%	2,8%	2,4%	2,3%
22	3,5%	2,9%	2,5%	2,4%
23	3,7%	3,0%	2,6%	2,5%
24	3,8%	3,2%	2,7%	2,6%
25	4,0%	3,3%	2,8%	2,7%
26	4,2%	3,4%	2,9%	2,8%
27	4,3%	3,6%	3,0%	2,9%
Días X ciclo	30	16	24	31

Fuente: Fuente: www.italcol.com/acuacultura/mojarras/mojarra-34/

La temperatura del agua en los tanques de peces estuvo controlada a 27°C, por tal razón se logró suministrar la mayor cantidad de alimento posible (tabla Italcol). Inicialmente se realizó el cálculo de la biomasa total en el tanque de peces encontrando los siguientes resultados:

Tabla 4-7: Biomasa peces sistema acuapónico

Biomasa total día 1	32 g
Biomasa total día 30	250 g

Utilizando la tabla de alimentación propuesta por ITALCOL se suministró la siguiente cantidad de alimento:

$$\text{Alimento suministrado día (1 - 30)} = \frac{32g * 4.3 \%}{100\%} * 30 = 41.28g$$

$$\text{Alimento suministrado día (30 - 45)} = \frac{250g * 3.6 \%}{100\%} * 15 = 135g$$

El total de alimento suministrado fue de 176.28g en cada sistema acuapónico. Esta variable fue controlada en cuatro raciones diarias suministradas por el alimentador comercial AF-2009D. El índice de conversión alimenticia se determinó siguiendo la ecuación 5 obteniendo:

$$\text{índice de conversión} = \frac{176.28g}{228.5g - 32.3g} \cong 0.90$$

Comercialmente el índice de conversión alimenticia para la tilapia está en el rango de 1.0 a 1.5, siendo más favorable para el productor un valor cercano a 1.0. Con este proyecto se obtuvo un resultado mejor, garantizando un mayor aprovechamiento del alimento suministrado. Estos resultados se asociaron al control realizado a las variables fisicoquímicas del agua para garantizar un crecimiento adecuado. El índice de mortandad de peces para los cultivos fue de 0%, 10% respectivamente. En el segundo cultivo murió un pez debido a inconvenientes en la estructura “succionamiento por la tubería”, sin embargo tan pronto fue detectado se incorporó un nuevo pez con tamaño similar para continuar con el cultivo.

Rendimiento cultivo plantas

- **Peso fresco plantas**

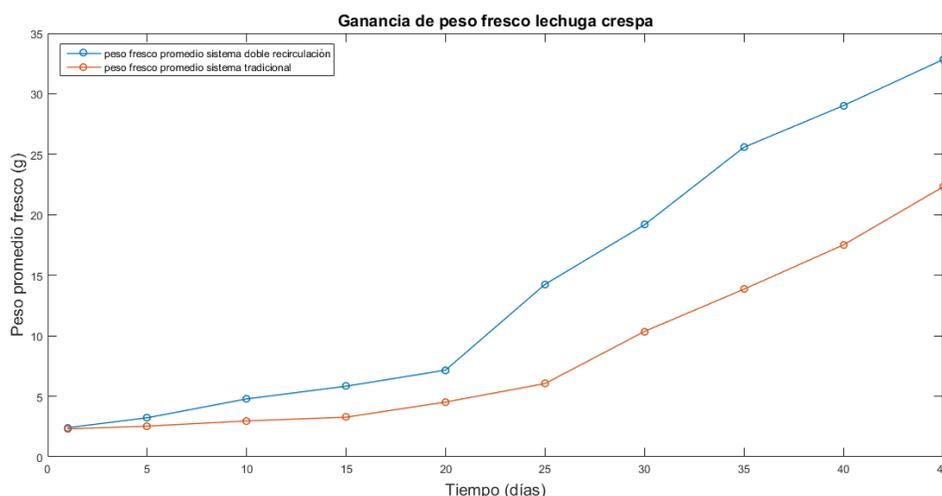
Para el cultivo 1 el peso inicial promedio de las plántulas de lechuga cresspa fue de 2.3g para el sistema acuapónico tradicional y 2.4g para el sistema acuapónico de doble recirculación. Los pesos finales transcurridos 45 días fueron de 22.3g y 32.82g respectivamente. Los pesos intermedios registrados se presentan en la tabla 4-8.

Tabla 4-8: Peso fresco promedio para cultivo 1 de lechuga crespa.

Tiempo (días)	Sistema acuapónico tradicional Peso promedio (g)	Sistema acuapónico doble recirculación Peso promedio (g)
1	2.3	2.4
5	2.53	3.22
10	2.96	4.78
15	3.27	5.83
20	4.52	7.16
25	6.05	14.25
30	10.36	19.17
35	13.85	25.58
40	17.51	29.02
45	22.3	32.82

Los resultados obtenidos en peso fresco para la lechuga fueron deficientes respecto a los resultados propuestos por (Aguilar y Trelles, 2014). Para el primer cultivo de lechuga se encontró inconvenientes asociados al ingreso de luz a las raíces de las plantas repercutiendo en la generación de algas en el agua, las cuales compitieron por los nutrientes y oxígeno presentes en la misma. Para solventar este déficit se realizó un recubrimiento con plástico y se cambió el poliestireno expandido por arlita para evitar el ingreso de luz y mejorar el soporte de las plantas.

Figura 4-7: Curva crecimiento en peso fresco lechuga crespa cultivo 1.



Fuente: Autor

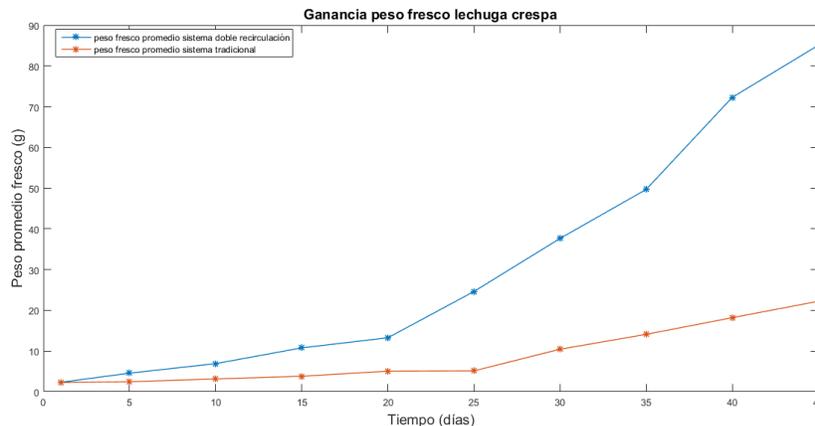
Para el cultivo 2 el peso inicial promedio de las plántulas de lechuga cresa fue de 2.27g para el sistema acuapónico tradicional y 2.32g para el sistema acuapónico de doble recirculación. Los pesos finales transcurridos 45 días fueron de 22.22g y 85.07g respectivamente. Los pesos intermedios registrados se presentan en la tabla 4-10.

Tabla 4-9: Peso fresco promedio para cultivo 2 de lechuga cresa.

Tiempo (días)	Sistema acuapónico tradicional Peso promedio (g)	Sistema acuapónico doble recirculación Peso promedio (g)
1	2.27	2.32
5	2.47	4.57
10	3.15	6.91
15	3.82	10.78
20	5.06	13.26
25	5.13	24.63
30	10.45	37.65
35	14.1	49.67
40	18.2	72.29
45	22.22	85.07

Para este cultivo se evidencio un correcto crecimiento en peso fresco para la lechuga del sistema acuapónico tradicional, sin embargo el peso fresco de la lechuga del sistema acuapónico tradicional no presento buenos rendimientos. El anterior resultado se asocia a que los sistemas acuapónicos tradicionales no generan todos los nutrientes requeridos por las plantas (Geisenhoff et al, 2016)

Figura 4-8: Curva crecimiento en peso fresco de lechuga cresa cultivo 2.



Fuente: Autor

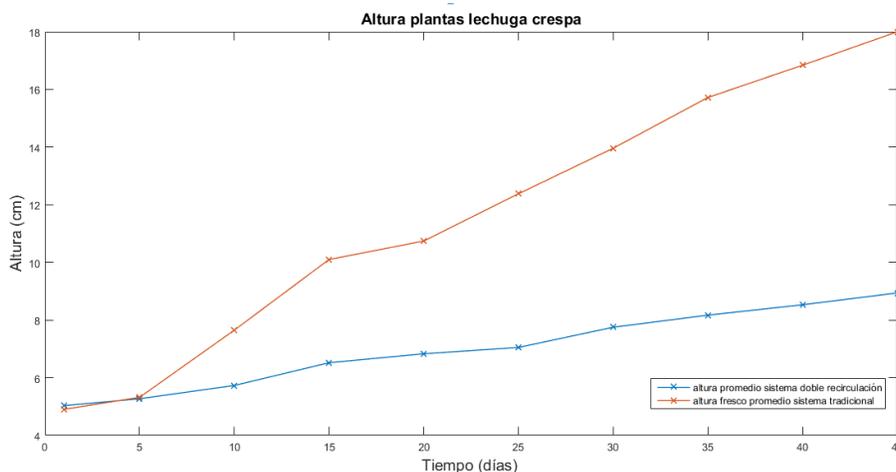
▪ **Altura**

Para el cultivo 1 la altura inicial de las plántulas de lechuga cresa fue de 4.9 cm y para el sistema acuapónico tradicional y 5.03 cm para el sistema acuapónico de doble recirculación. La longitud final total transcurridos 45 días fue de 18.5 cm y 8.94 cm respectivamente. Las medidas de altura intermedia se registran en la tabla 4-10. La altura de las plantas le lechuga cresa en el sistema tradicional presentó un comportamiento anormal, debido a que su crecimiento en altura fue elevado sin presentar abundancia foliar. En la figura 4-9 se presenta el comportamiento descrito anteriormente.

Tabla 4-10: Altura promedio para cultivo 1 de lechuga cresa.

Tiempo (días)	Sistema acuapónico tradicional Altura promedio (cm)	Sistema acuapónico doble recirculación Altura promedio (cm)
1	4.90	5.03
5	6.09	5.38
10	7.58	5.83
15	9.07	6.27
20	10.55	6.72
25	12.04	7.16
30	13.53	7.61
35	15.02	8.05
40	16.51	8.50
45	18.00	8.94

Figura 4-9: Curva de crecimiento en altura plantas de lechuga cresa cultivo 1



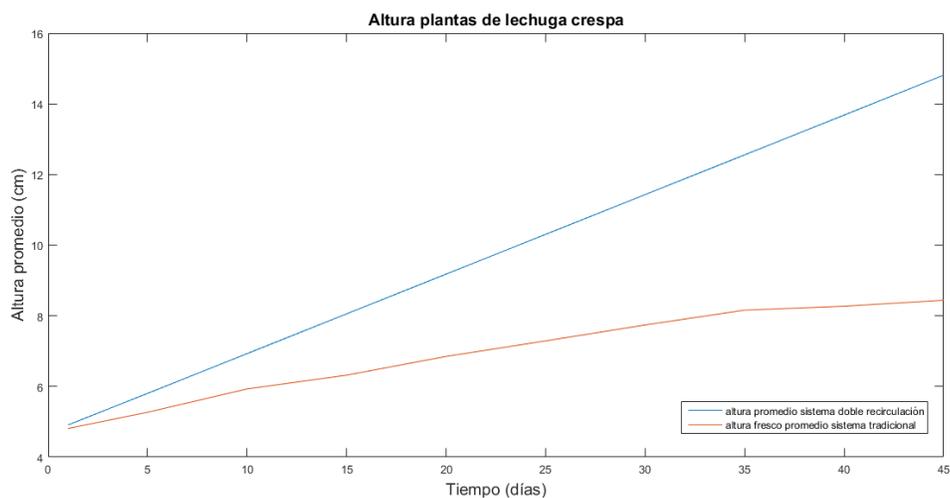
Fuente: Autor

Para el cultivo 2 la altura inicial de las plántulas de lechuga crespa fue de 4.81 cm y para el sistema acuapónico tradicional y 4.91 cm para el sistema acuapónico de doble recirculación. La longitud final total transcurridos 45 días fue de 8.44 cm y 14.81 cm respectivamente. Las medidas de altura intermedia se registran en la tabla 4-11. Se evidencio un reducido crecimiento en las plantas del sistema acuapónico tradicional, obteniendo una altura final promedio de 8.45 cm. El crecimiento de la lechuga en el sistema acuapónico de doble recirculación tuvo un crecimiento acorde a los resultados obtenidos por (Alcocer, 2017) obteniendo una altura final promedio de 14.81 cm.

Tabla 4-11: Altura promedio para cultivo 2 de lechuga crespa.

Tiempo (días)	Sistema acuapónico tradicional Altura promedio (cm)	Sistema acuapónico doble recirculación Altura promedio (cm)
1	4.81	4.91
5	5.38	5.81
10	5.83	6.94
15	6.27	8.06
20	6.72	9.19
25	7.16	10.31
30	7.61	11.44
35	8.05	12.56
40	8.22	13.69
45	8.44	14.81

Figura 4-10: Curva de crecimiento en altura plantas de lechuga crespa cultivo 2



Fuente: Autor

Número de hojas

Tabla 4-12: Numero de hojas plantas sistema acuapónico tradicional

Planta	N1i	N1f	N2i	N2f
1	2	6	3	6
2	2	7	2	5
3	3	5	3	7
4	2	4	2	5
5	3	7	2	3
6	2	7	3	7
7	2	6	3	5
8	3	6	2	7
9	3	7	3	7

N1i= número de hojas inicial cultivo 1, N1f= número de hojas final cultivo 1, N2i= número de hojas inicial cultivo 2, N2f= número de hojas final cultivo 2.

Las plántulas para los dos cultivos ingresaron con un promedio de tres hojas verdaderas y durante un tiempo de cultivo “45 días” presentaron un promedio de número de hojas de 7.

Tabla 4-13: Numero de hojas plantas sistema acuapónico doble recirculación

Planta	N1i	N1f	N2i	N2f
1	2	8	3	15
2	2	7	2	16
3	3	8	3	16
4	2	6	2	15
5	3	6	2	16
6	2	7	3	16
7	2	8	3	17
8	3	8	2	15
9	3	7	3	17

N1i= número de hojas inicial cultivo 1, N1f= número de hojas final cultivo 1, N2i= número de hojas inicial cultivo 2, N2f= número de hojas final cultivo 2.

Las plántulas para los dos cultivos ingresaron con un promedio de tres hojas verdaderas y durante un tiempo de cultivo “45 días” se evidencio un promedio de hojas para el primer cultivo de 8, para el segundo cultivo las plantas contaron con un promedio de número de hojas de 16.

En la tabla 4-14 se encuentran las imágenes de los plantas de lechuga en su fase inicial y final de cultivo.

Tabla 4-14: Rendimiento plantas sustrato poliestireno expandido

Fase inicial cultivo (día 1)	Fase final cultivo (día 45)
 A photograph showing several small lettuce seedlings in black plastic pots, arranged in a grid on a white expanded polystyrene substrate. The plants are in the early stages of growth.	 A close-up photograph of a mature lettuce plant with large, green, curly leaves, growing in a black plastic pot on a white expanded polystyrene substrate.

Tabla 4-15: Rendimiento plantas sustrato arlita

Fase inicial cultivo (día 1)	Fase final cultivo (día 45)
 A photograph showing several small lettuce seedlings in black plastic pots, arranged in a grid on a dark brown perlite substrate. The plants are in the early stages of growth.	 A photograph showing a dense cluster of mature lettuce plants with large, green, curly leaves, growing in black plastic pots on a dark brown perlite substrate.

- **Textura**

Se realizaron pruebas en laboratorio de poscosecha de Ingeniería Agrícola con el equipo Brookfiel CT3 modelo 4500. No se logró obtener datos confiables para esta medida puesto

que la herramienta final del equipo atravesaba la hoja de lechuga sin identificar el punto de salida, por lo cual las medidas de resistencia a la penetración de la aguja en la hoja de la lechuga se asemejaba a la deformación de la hoja mas no al punto de rotura.

▪ **Color**

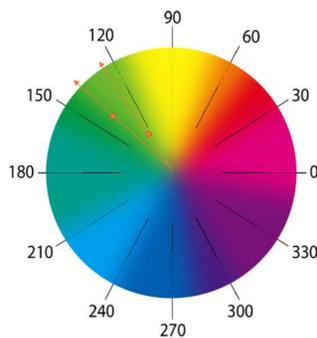
Se realizó un análisis sobre el espacio de color CIELAB encontrando un ángulo hue de 125 grados para las hojas de lechuga del sistema tradicional y 140 grados para las hojas de lechuga del sistema de doble recirculación como se observa en la figura 4-11. Esto representa una diferencia de color notable y relacionado a la deficiencia de nutrientes para las lechugas del sistema acuapónico tradicional.

Tabla 4-16: Medidas color hojas de lechuga

Planta	Sistema acuapónico tradicional			Sistema acuapónico doble recirculación		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
1	46.08	-19.3	33.68	26.78	-7.56	15.6
2	50.89	-20.25	35.59	26.77	-7.68	16.53
3	44.32	-13.95	25.15	26.79	-5.73	13.98
4	45.25	-14.53	25.32	26.8	-5.71	14.1
5	51.51	-16.90	32.77	28.49	-7.26	15.9
6	46.07	-19.61	36.08	27.37	-6.45	16.37
7	50.89	-20.58	38.09	26.83	-7.39	15.93
8	44.33	-14.18	26.70	26.47	-5.8	16.12
9	45.24	-14.77	26.88	27.25	-6.74	16.35

Los valores presentados se encuentran en las coordenadas L*,a*,b*.

Figura 4-11: Angulo HUE - medición colorimetría



Fuente: Autor

Rendimiento cultivo bacterias nitrificantes

Antes de iniciar los cultivos de peces y plantas se realizó el proceso de maduración del filtro biológico que consistió en suministrar el producto Stability de la empresa SEACHEM, el cual proporciona un cultivo de bacterias aerobias, anaerobias y facultativas. Adicionalmente se ingresó al sistema agua proveniente de un acuario para aprovechar la carga de nitrógeno a oxidar por las bacterias suministradas. Durante un periodo de 15 días se tomaron medidas de Amonio/Amoniaco, nitritos y nitratos para identificar la completa maduración del biofiltro encontrando los siguientes resultados:

Tabla 4-17: Maduración filtro biológico sistema acuapónico tradicional

FECHA	AMONIO/ AMONIACO (NH ₃ /NH ₄)	NITRITOS (NO ₂)	NITRATOS (NO ₃)	FOSFATOS (PO ₄ -3)
10/06/2017	0.25	0	0	0
11/06/2017	2.0	0	0	2
12/06/2017	4.0	5	10	5
13/06/2017	8.0	5	10	5
14/06/2017	4.0	5	10	2
15/06/2017	1.0	5	20	5
16/06/2017	1.0	5	20	5
17/06/2017	0.50	5	5	5
18/06/2017	0.25	5	5	5
19/06/2017	0	5	5	5
20/06/2017	0	2.0	5	5
21/06/2017	0	2.0	5	5
22/06/2017	0	2.0	5	5
23/06/2017	0	0	80	2

Los datos de las tablas 4-17 y 4-18, permiten evidenciar que inicialmente en el tanque de peces se produce Amonio el cual es degradado por oxidación mediante las bacterias Nitrosomonas a Nitritos, y este a su vez es degradado por oxidación mediante las bacterias Nitrobacter. Se evidencio una correcta maduración del filtro puesto que desapareció la concentración de Amonio y nitritos que son tóxicos para los peces, quedando solamente Nitratos que son asimilables como nutrientes para las plantas. Los valores de fosfatos se mantuvieron en valores adecuados para el cultivo de lechuga.

Tabla 4-18: Maduración filtro biológico sistema acuapónico doble recirculación

FECHA	AMONIO/ AMONIACO (NH3/NH4)	NITRITOS (NO2)	NITRATOS (NO3)	FOSFATOS (PO4)
10/06/2017	0.25	0	0	0
11/06/2017	1.0	0	0	2
12/06/2017	4.0	0	0	2
13/06/2017	8.0	0.25	0	2.0
14/06/2017	8.0	0.25	0	2.0
15/06/2017	8.0	0.50	0	2.0
16/06/2017	8.0	1.0	3.0	2.0
17/06/2017	4.0	2.0	3.0	2.0
18/06/2017	1.0	5.0	5.0	5.0
20/06/2017	0.5	0.15	80	5.0
22/06/2017	0	0.10	80	5.0
24/06/2017	0	0.10	80	5.0

Consumo de agua

El gasto y consumo de agua en litros se determinó de la información proveniente de los sensores de flujo instalados en la tubería de suministro de agua. Estos valores se registran en la siguiente tabla.

Tabla 4-19: Consumo agua sistema acuapónico

	Sistema acuapónico tradicional	Sistema acuapónico de doble recirculación
consumo diario (L)	6.3	2.3
Agua diaria recuperada (L)	0	0.25

El sistema de recuperación de agua propuesto permitió reducir un consumo diario de 6.3 litros para el sistema acuapónico tradicional a 2.3 litros para el sistema acuapónico de doble recirculación. Esta reducción de consumo se relaciona a la incorporación del sistema a condiciones de invernadero, reduciendo la transferencia de calor con el ambiente y permitiendo recuperar el agua evapotraspirada por las plantas y evaporada en el filtro mecánico y filtro biológico.

El consumo total de agua para el sistema acuapónico tradicional fue de 283.5 litros y para el sistema acuapónico de doble recirculación fue de 103.5 litros según la información registrada por los sensores de flujo incorporados en las tuberías de suministro de agua de cada sistema.

4.5 Conclusiones

Se realizó la evaluación comparativa de los dos sistemas acuapónicos, en cuanto a la recuperación de agua, el sistema acuapónico de doble recirculación se obtuvo una disminución en la cantidad de agua utilizada del 4% respecto al sistema acuapónico tradicional.

En cuanto al cultivo de las plantas, las lechugas en el sistema acuapónico tradicional no presentaron buenos rendimientos debido a que no fueron suministrados todos los macronutrientes y micronutrientes requeridos por las plantas quedando solo con los nutrientes que los peces podrían suministrarle. Caso contrario para el cultivo de lechuga en el sistema de doble recirculación, al cual se le suministro todos los nutrientes requeridos por las plantas sin afectar la calidad de agua para los peces.

En el cultivo de tilapia se presentó un comportamiento esperado de acuerdo a las curvas de crecimiento para la especie, por lo cual el sistema de recuperación no es un factor que afecte el crecimiento de los peces.

En general se evidencia que el sistema acuapónico de doble recirculación junto a un control de las variables fisicoquímicas y ambientales permite obtener buenos resultados de rendimiento en los sistemas acuapónicos comparándolo con los sistemas tradicionales.

4.6 Bibliografía

- Aguilar, A., Trelles, A. (2014). Crecimiento de goldfish, *Carassius auratus*, y lechuga, *Lactuca sativa*, en sistema acuapónico en condiciones de invernadero. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Trujillo, *Revista Ciencias Biológicas* 12, 54-72.
- Alcocer, M.J., Fernández, V.M. (2017). Diseño y construcción de dos sistemas acuapónicos horizontales para la producción conjunta de peces dorados y lechugas. Universidad de Sevilla
- Diodatti, F., Tadeu, R., Freato, T. (2008). Parametros morfometricos en el rendimiento de los componentes corporales de tilapia de nilo. *Anuales de veterinaria de Murica*, 24, 45-55.
- FAO. (2015). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. ISSN 0251-1371
- Geisenhoff, L.O., Jordan, R.A., Santos, R.C., Oliveira, F.C., Gomez, E.P. (2016). Effect of different substrates in aquaponic lettuce production associated with intensive tilapia farming with water recirculation systems. *Eng Agr*, 36, 291-299.
- Gomez, E., Hurtado, H., Pérez, M. (2011). Evaluación preliminar de sistemas acuapónicos e hidropónicos en cama flotante para el cultivo de orégano (*Origanum vulgare*). *Revista Facultad De Ciencias Básicas*, 7, 102 – 119.
- Hurtado, H., Ramirez, L., Gómez, E. (2010) Montaje y evaluación de sistemas de cultivo acuapónicos carpa roja "*Ciprinus carpio*"-orégano "*Origanum vulgare*". *Revista Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Militar Nueva Granada*, 7, 12-27.
- Johanna, S., Dennis, D. (2016). Advanced aquaponics: Evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs conventional hydroponics. *Agricultural Water Management*, 178, 335–344.

Montero, E., Morgado, R. (2007). Parametros mecánicos y textura de los alimentos. Universidad de Chile. Ciencias Básicas, 5, 67-82.

Pantarella, E., Cardarelli, M. (2012). Aquaponics vs hydroponics: production and quality of lettuce crop. Acta Horti, 927, 887–893.

Piñeros, Y. Manual poscosecha de brócoli, espinaca y lechuga en la sabana de Bogotá: diagnostico, manejo y tecnologías poscosecha. ISBN 978-958-725-035

Ramirez, L., Pérez, M., Jiménez, P. (2011). Evaluación preliminar de sistemas acuapónicos e hidropónicos en cama flotante para el cultivo de orégano. Revista Facultad de ciencias. Universidad Militar Nueva Granada, 7, 242–259.

Retting, M., Hen, A. (2014). El color en los alimentos un criterio de calidad medible. AGROSUR, 2, 39-48.

SIPSA. (2014.) El cultivo de la tilapia roja en estanques de tierra, fuente de proteína animal de excelente calidad.

5. Conclusiones generales

Se desarrolló un sistema acuapónico automatizado de tipo tradicional y uno de doble recirculación en cultivo de Tilapia Roja (*Oreochromis mossambicus*) y Lechuga Crespita (*Lactuca sativa*), los cuales sirven como alternativa a los cultivos tradicionales de peces y plantas, aprovechando los beneficios de ambos sistemas.

Estos desarrollos permitieron evaluar una estrategia de control para las variables pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, temperatura, luminosidad y humedad relativa, dicha estrategia de control garantizó mantener los niveles adecuados para el crecimiento de los tres sistemas biológicos presentes en los sistemas acuapónicos (peces, plantas, bacterias).

Con los desarrollos y la estrategia de control establecida se evaluó el rendimiento en los cultivos de peces y plantas. Concluyendo que el sistema acuapónico de doble recirculación permitió aumentar considerablemente los resultados en plantas, también permitió reducir en 4 % el consumo promedio de agua respecto a un sistema tradicional.

Es de importancia mencionar que la producción de los peces no se ve afectada por seleccionar alguno de los dos métodos de sistema acuapónico, con lo cual los resultados encontrados en esta investigación se basan principalmente en el aumento de la producción y calidad de las plantas.

Si este tipo de sistemas acuapónicos llegará a ser transferido a la población menos favorecida, podría llegar a ser una posible solución al desabastecimiento de alimentos y ayudaría a la seguridad alimentaria, con lo cual, la unión de diferentes ramas de la ciencia como la producción agrícola y pecuaria con ayuda de la automatización solucionaría algunos de los fuertes problemas que tenemos en el país.