

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

Karen Yissel Marín Franco Luis Fernando Riveros Orozco

Director: Dr. Juan Manuel Nogales Viedman

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

Noviembre 25 de 2021

Santiago de Cali, Noviembre 25 de 2021
Señores  Pontificia Universidad Javeriana — Cali  Dr. Luis Eduardo Tobón Llano  Director Carrera de Ingeniería Electrónica  Cali.
Cordial Saludo.
Por medio de la presente me permito informarle que los estudiantes de Ingeniería Electrónica, Karen Yissel Marín Franco (cod: 8943216) y Luis Fernando Riveros Orozco (cod: 8943642) trabajan bajo mi dirección en el proyecto de grado titulado "Diseño e implementación de un sistema de automatización y control para cultivos acuapónicos en zonas urbanas".
Atentamente,
Dr. Juan Manuel Nogales Viedman

Santiago de Cali, Noviembre 25 de 2021

Señores

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Dr. Luis Eduardo Tobón Llano Director Carrera de Ingeniería Electrónica Cali.

Cordial Saludo.

Nos permitimos presentar a su consideración el anteproyecto de grado titulado "Diseño e implementación de un sistema de automatización y control para cultivos acuapónicos en zonas urbanas" con el fin de cumplir con los requisitos exigidos por la Universidad para llevar a cabo el proyecto de grado y posteriormente optar al título de Ingeniero Electrónico.

Al firmar aquí, damos fe que entendemos y conocemos las directrices para la presentación de trabajos de grado de la Facultad de Ingeniería y Ciencias aprobadas el 26 de Noviembre de 2009, donde se establecen los plazos y normas para el desarrollo del anteproyecto y del trabajo de grado.

Atentamente,

Karen Yissel Marín Franco Luis Fernando Riveros Orozco

Código: 8943216 Código: 8943642

# Índice general

1.	Des	cripción del problema	2
	1.1.	Problema de investigación	2
	1.2.	Objetivos	3
		1.2.1. Objetivo General	3
		1.2.2. Objetivos Específicos	3
	1.3.	Justificación del problema	4
	1.4.	Alcances y Limitaciones	5
		1.4.1. Alcances	5
		1.4.2. Limitaciones	6
2.	Des	arrollo del proyecto	7
	2.1.		7
		2.1.1. Marco Conceptual	7
		2.1.2. Marco Teórico	7
		2.1.3. Estado Actual	17
	2.2.	Metodología	18
	2.3.	Resultados Esperados	20
	2.4.	Supuestos y riesgos asociados al proyecto	20
	2.5.	Cronograma de actividades	21
	2.6.	Recursos	22
		2.6.1. Técnicos	22
		2.6.2. Humanos	26
		2.6.3. Presupuesto	26
Bi	bliog	grafía	27
3.	Ane	exos	32
٠.		Curriculum Vitae Juan Manuel Nogales Viedman	32

## Introducción

La acuaponia es una técnica de cultivo que históricamente ha sido utilizada como solución ante diferentes situaciones sociales, económicas y ambientales [1], dadas sus múltiples ventajas tales como: bajo consumo de agua [2], necesidad casi nula de fertilizantes e insecticidas [2], y su alto nivel de productividad al aprovechar la relación simbiótica entre plantas, peces y bacterias [3].

Actualmente, los recursos para cultivos tradicionales, en especial, los recursos hídricos [4] y el territorio para sembrados, son cada vez más reducidos por el crecimiento de la población esto se ve reflejado en el crecimiento de los entornos urbanos que cada vez son más grandes [5]. Por lo tanto, los sistemas acuapónicos a pequeña escala son considerados una bondadosa alternativa para el cultivo de plantas en zonas urbanas [6].

En el presente trabajo se plantea un sistema de automatización y control para cultivos acuapónicos en entornos urbanos. Debido a que el cuidado y mantenimiento de estos suele ser manual y experimental, herramientas o técnicas de automatización brindan alternativas de solución para regular las complejas interacciones biológicas dentro del cultivo [7]. Se ha identificado la falta de desarrollos tecnológicos relacionados con la automatización y control de cultivos a pequeña escala, pues la mayoría de trabajos actuales se centran en mejorar el manejo y producción de cultivos a mediana y gran escala.

La metodología planteada para el desarrollo del trabajo de grado está dividida en 5 etapas. En la primera, se investiga y selecciona el tipo de cultivo acuapónico a utilizar para el sistema de automatización. En la segunda etapa se selecciona diseñan los módulos y espacios necesarios dentro del sistema de automatización, una vez elegidas las variables a sensar y/o controlar. En la tercera etapa, se realiza el diseño y montaje de una prueba de concepto física que será usada para la recolección de datos y prueba del sistema de automatización diseñado. En la cuarta etapa, se recolectan los datos y se diseña el sistema de control moderno multivariado. Por último, se realizan las pruebas de diagnóstico y adaptaciones necesarias al sistema.

Este documento se estructura en tres capítulos: descripción del problema, desarrollo del proyecto y anexos. En el primer capítulo se aborda la problemática y se formula la pregunta de investigación, se establecen los objetivos a alcanzar, se explica el porqué y para qué de la propuesta y se limitan los alcances del proyecto. En el segundo capítulo, se encuentra la base teórica necesaria para la comprensión de la propuesta, las tareas planteadas para la consecución de los objetivos, los resultados esperados, los posibles riesgos, el cronograma de actividades y los recursos necesarios para el desarrollo del proyecto. Por último, los anexos.

## Descripción del problema

### 1.1. Problema de investigación

A lo largo de la historia, la iniciativa de cultivar en entornos urbanos ha estado ligada a suplir las necesidades alimentarias de la población en contextos de crisis económica o situaciones bélicas [1]. Hoy día, las zonas urbanas funcionan de manera más sistémica, siendo un conjunto equilibrado de procesos culturales, identitarios, sociales, económicos y políticos. En este sentido, sus habitantes también son más conscientes de esta sinergia y adaptan sus hobbies a sus necesidades para sacarles mayor provecho, de cultivo de plantas en general es una actividad que no se queda atrás en esta tendencia. Los huertos urbanos actualmente están siendo utilizados desde fines netamente estéticos, por ejemplo, con el uso de plantas ornamentales atractivas [8], hasta fines más ambientales como la mejora de la calidad del aire gracias al proceso de fotosíntesis y la liberación de oxígeno [9], la absorción del ruido [10] o fines más personales como la mejora de la calidad de los productos alimentarios [2] y el acceso a diversidad de plantas como especies medicinales y aromáticos [11].

Los sistemas acuapónicos a pequeña escala son considerados una bondadosa alternativa para el cultivo de plantas en entornos reducidos resaltando la relación simbiótica entre plantas y peces. A partir de la utilización de los desechos de los peces, se producen nutrientes para las plantas mientras que, por su parte, estas últimas purifican el agua que retorna a los peces [3]. Estos sistemas ofrecen grandes ventajas en términos agrícolas permitiendo el cultivo de diversos tipos de plantas sin necesidad del uso de fertilizantes y/o pesticidas; al mismo tiempo, brindan otros beneficios como la reducción de un 90 % del consumo de agua empleada (en comparación con la agricultura tradicional) [2], el aumento cuidado personal mediante el consumo alimentos orgánicos [12] y la liberación de endorfinas causando efectos psicológicos positivos [13].

Por lo anterior, los sistemas acuapónicos resultan ser una gran opción para aportar a la solución de diferentes situaciones sociales, económicas y ambientales alarmantes que se presentan actualmente, tales como la creciente migración de las personas de las zonas rurales a las zonas urbanas [5], el aprovechamiento de espacios urbanos reducidos y su relación con las formas alternativas de producir alimentos [14] y la escasez del recurso hídrico que hoy

1.2. Objetivos 3

día hace que 3 de cada 10 personas en el mundo no tengan acceso a agua potable [4].

En esta misma línea, debido al creciente interés de las personas en los cultivos orgánicos [15] y al poco tiempo de supervisión que pueden destinar a los mismos en entornos urbanos, se hace necesario facilitar el cuidado y mantenimiento de cultivos acuapónicos en dichas zonas. Es por esto, que se busca investigar acerca de ¿Cómo automatizar sistemas acuapónicos de cultivos uso personal para <del>cultivos</del> en zonas urbanas?

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

#### 1.2. **Objetivos**

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

#### Objetivo General 1.2.1.

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

#### 1.2.2. Objetivos Específicos

- 1. Identificar un sistema de cultivo acuapónico modular y adaptable a condiciones ambientales a través de revisión bibliográfica y vigilancia tecnológica, con el fin de generar un sistema que pueda ser aplicado en zonas urbanas.
- 2. Desarrollar los módulos del sistema con ayuda de un software CAD, para que la estructura sea reconfigurable.



- 3. Implementar una prueba de concepto aplicando técnicas de prototipado para observar el comportamiento del sistema de automatización y recopilar los datos necesarios para la construcción del módulo de control.
- 4. Adaptar una técnica de control moderno multivariable en el sistema identificado, evaluando el desempeño al ajustar diferentes parámetros acuapónicos, con el fin de garantizar el equilibrio de las interacciones entre peces, plantas y bacterias.

5. Evaluar el desempeño del cultivo acuapónico con y sin el sistema de automatización diseñado, para demostrar la utilidad de incluir el sistema de automatización.

### 1.3. Justificación del problema

Los recursos hídricos han sido uno de los aspectos importantes del desarrollo humano. Es por esto, que las investigaciones relacionadas con el consumo y distribución de los mismos han tomado cada vez más relevancia, ya que con los recursos existentes es difícil satisfacer las crecientes necesidades de la población. La agricultura representa aproximadamente el 70% de las extracciones de agua dulce procedente de ríos, lagos y acuíferos [16] y se estima que para el 2050 sería necesario aumentar la producción de alimentos en un 70% [17].

Por lo anterior, la acuaponia es una de las alternativas más significativas en la mejora del consumo de agua y la producción alimentaria al combinar tanto los sistemas de recirculación acuícola (RAS) con los cultivos hidropónicos. Por un lado, un cultivo hidropónico utiliza aproximadamente el 5 % del agua necesaria para producir una cantidad equivalente de productos en la agricultura tradicional [18], mientras que en los sistemas RAS, el agua de la cría de peces se recicla casi por completo después de una etapa de filtración, reduciendo el consumo de agua y evitando la descarga de desechos orgánicos (excrementos de pescado, alimentos no consumidos) en el medio ambiente [19].

En este sentido, debido al aumento en la población mundial, los costos de la energía, la reducción de recursos naturales y la demanda de alimentos, el desarrollo continuo de los sistemas acuapónicos se convierte en una necesidad. Sin embargo, no solo basta con la implementación de estos, sino que también es necesario garantizar que los peces y las plantas crezcan de manera saludable. Es allí, donde se destaca la importancia de monitorear y controlar, al ser aspectos relacionados con algunos de los retos existentes actualmente, pues según [20], la investigación sobre el control colaborativo multifactorial con el medio ambiente, el control inteligente de la calidad del agua y el control preciso de los nutrientes en el complejo entorno de la acuaponía se ha quedado rezagada. Además, la automatización y el diseño de sistemas de control replicables, fomentan el desarrollo de la estandarización, un aspecto muy importante al momento de implementar sistemas acuapónicos en entornos urbanos, puesto que no solo la agricultura urbana es un modelo que ha tomado cada vez más relevancia debido a la reducción de la huella de carbono y la diversificación de los productos [21], sino que tiene diversas aplicaciones no productivas y de uso doméstico.

Desarrollar un sistema de automatización para cultivos acuapónicos es una aporte pertinente ante las necesidades planteadas, dado que no hay actualmente una propuesta consolidada que satisfaga los retos existentes en los cultivos acuapónicos a micro y pequeña escala. En

Colombia, aún no hay muchos estudios relacionados con la incursión de sistemas acuapádesarrollo como opción de adquisición tecnológica, sin embargo, según una investigación realiza Rumania [22], se recomienda la integración de los sistemas de producción de acuapor los cultivos la red de adquisiciones verdes de dicho país dado que disminuiría la cantidad de pestacuapónicos... empleados y la huella generada por los sistemas de transporte de alimentos. Es por esto, que la propuesta del presente trabajo podría ser una oportunidad de aportar al desarrollo de tecnologías acuaponicas destinadas a entornos urbanos, teniendo en cuenta los posibles beneficios, además de la importancia de mantenerse al día con las tendencias mundiales, especialmente en el contexto colombiano.

brinda un tecnológico para



Actualmente, no muchas personas poseen conocimiento relacionado con la acuaponia y las que sí, solo poseen conocimiento general del principio de funcionamiento tras los sistemas acuapónicos [7]. Esto, quiere decir que al momento de implementar este tipo de sistemas, pocas están capacitadas para lograrlo exitosamente, es por esto, que el desarrollo de un sistema de automatización para cultivos acuapónicos posibilita una implementación más adaptable y estandarizada para los posibles usuarios, lo que permitiría que más personas pudiesen implementar y utilizar sistemas como este. replicadores de la propuesta

Por otra parte, en el contexto del estilo de vida de las personas que habitan en zonas urbanas, se hacen presentes dos aspectos de gran relevancia: la disponibilidad de tiempo para destinar al cuidado de un cultivo y la disposición de espacio para garantizar las condiciones mínimas necesarias para su crecimiento adecuado. Parte de la utilidad del presente trabajo, radica en que la automatización brinda comodidades relacionadas con el tiempo necesario para dedicar a los requerimientos tanto de las plantas como de los peces (alimentación, riego, seguimiento de variables, planeación, diagnóstico, etc.) y la versatilidad estructural que brindan los sistemas hidropónicos, permite una fácil implementación en entornos reducidos, pues requiere menos espacio horizontal que si se emplean otras técnicas tradicionales [23].

#### Alcances y Limitaciones 1.4.

El énfasis del presente trabajo es el diseño de un sistema de automatización para cultivos acuapónicos en zonas urbanas, más no la construcción de un prototipo. Para ello, se contemplan los siguientes alcances y limitaciones:

#### Alcances 1.4.1.

• El sistema de automatización y control se plantea como un diseño de acceso público aplicable a cultivos acuapónicos en zonas urbanas.

- Se pretende generar una estructura de cultivo acuapónico modular en una sola configuración para implementar la prueba de concepto.
- El sistema de automatización se contempla como un sistema aplicable en cultivos acuapónicos de uso personal.
- Las plantas y peces ornamentales empleados serán de libre adquisición identificados a partir de un proceso riguroso para cumplir con la normativa Colombiana.
- Las plantas y peces tienen como propósito ser usados en el proceso de adquisición de datos y evaluación del sistema de automatización.
- Se plantea un sistema adaptable a condiciones climáticas y sujeto a la disponibilidad de recursos presentes en la mayoría de entornos urbanos.
- Se documentaran las condiciones óptimas para el funcionamiento del sistema.

#### 1.4.2. Limitaciones

- El sistema de automatización y control no se plantea como un producto de comercialización.
- No se pretende generar una estructura de cultivo acuapónico modular para comercialización.
- El sistema de automatización no está contemplado para ser usado en cultivos acuapónicos de producción agropecuaria.
- No hay problemas éticos y morales asociados al uso de las plantas y peces elegidos.
- En este proyecto no se tiene como propósito realizar experimentos de cultivo asociados a la identificación de plantas y peces ni a las interacciones entre diferentes especies.
- El sistema no será adaptable a condiciones climáticas extremas, catástrofes ambientales, ni solventará la falta de recursos como agua, electricidad y/o infraestructura.
- No se generará un manual de usuario.

## Desarrollo del proyecto

### 2.1. Marco de Referencia

A continuación, se exponen los conceptos fundamentales relacionados con la propuesta presentada, la base teórica necesaria para la comprensión de los subsistemas de un cultivo acuapónico y un conjunto de investigaciones que muestran el estado actual de la automatización y control de los cultivos acuapónicos en entornos urbanos.

### 2.1.1. Marco Conceptual

Aunque el eje central de la propuesta es el diseño del sistema de automatización y control, es necesario precisar los términos básicos relacionados con cultivos acuapónicos. A continuación, se ordenan y se definen alfabéticamente.

- Endógeno: que se produce en el interior de un organismo.
- Plantas ornamentales: plantas que se cultivan con propósitos meramente decorativos o estéticos.
- Simbiosis: forma en la que individuos de diferentes especies se relacionan entre sí, obteniendo el beneficio de al menos uno de los dos.
- Sistema de recirculación acuícola (RAS): conjunto de procesos y componentes que constantemente limpian el agua y la reutilizan para el cultivo de organismos acuáticos
- Solución acuosa: Preparación líquida que contiene una o más sustancias químicas solubles disueltas en agua.
- Sustrato: un medio sólido e inerte que da soporte a las plantas, éste puede ser de origen natural o artificial.

#### 2.1.2. Marco Teórico

Para el desarrollo de un sistema de automatización de cultivo acuapónico se hace necesario precisar los subsistemas que le componen y su relación. Por esto, el marco teórico se es-

tructuró en apartados que incluyen agricultura en entornos urbanos, hidroponía, acuicultura y acuaponía. Luego, se identifican cuáles son las variables más importantes y sus posibles opciones de sensado y/o control. Por último, se recopilan algunos trabajos y tecnologías existentes relacionadas con los cultivos acuapónicos en entornos urbanos.

#### Agricultura

La agricultura urbana es un conjunto de actividades y técnicas mediante las cuales se emplean pequeñas superficies dentro de las ciudades para la producción de diversos tipos de plantas. Para comprender las tendencias actuales de este campo, es necesario conocer primero el contexto en el cuál surgió esta actividad.

En los inicios del Siglo XIX, en países como Gran Bretaña, Francia, Bélgica y Alemania, la aparición de los huertos urbanos se relaciona con funciones de subsistencia e higiene en zonas con altos índices de pobreza [24], dado que tanto las grandes fábricas como los gobiernos se vieron en la necesidad de mejorar las condiciones de vida de los obreros y para ello destinaron pequeños terrenos dentro de la zona urbana los cuales fueron ofrecidos a la clase trabajadora.

Luego, en el siglo XX aparece el auge de los conflictos bélicos a nivel mundial y con ello, el concepto de agricultura urbana visto como alternativa para suplir necesidades alimentarias básicas y como apoyo a la economía de guerra y a los procesos de posguerra [1].

En los años 70, en un contexto de crisis energética, recesión económica y suburbanización en Estados Unidos, se emplean los huertos urbanos como herramienta de apoyo comunitario, en relación la calidad ambiental, el bienestar social y la educación, impulsando desde colectivos de base ambientalista y ecologista.

Los cultivos urbanos actualmente están siendo utilizados desde fines netamente estéticos con el uso de plantas ornamentales atractivas [8], hasta fines más ambientales como la mejora de la calidad del aire [9], la absorción del ruido [10] o fines más personales como la mejora de la calidad de los productos alimentarios [2], el acceso a diversidad de plantas como especies medicinales y aromáticas [11], la recuperación del nexo con la naturaleza y sus beneficios terapéuticos [13] [25], entre otros.

#### hidroponía

Los cultivos hidropónicos carecen de la necesidad de suelo, suministrando los minerales y nutrientes necesarios a través de una solución acuosa nutritiva. La hidroponía posee muchas ventajas en contraste con el cultivo tradicional, puesto que no necesita pesticidas, permite producir de manera estable a lo largo del año, tiene menores demandas espaciales, altos rendimientos por unidad de cultivo, ahorro de agua hasta en un 95 % [18], entre otros.

El estudio de los cultivos hidropónicos proviene desde el Antiguo Egipto, los cultivos en las terrazas de la cultura Inca, los antiguos jardines flotantes chinos, las labores agrícolas aztecas, entre otros. Sin embargo, el estudio de las soluciones nutritivas para la hidroponía no se desarrolló sino hasta el siglo XIX, cuando Von Sachs probó que bajo ciertas condiciones se podían cultivar plantas en agua, diluyendo abonos químicos en proporciones específicas para que estas pudieran crecer normalmente; su estudio fue aceptado medio siglo después por la comunidad científica.

Los sistemas hidropónicos parten del mismo principio: proveer nutrientes a las raíces de las plantas a través de una solución acuosa, lo que varía es la forma en la que se suministran. A continuación, se presentan las 3 formas de entregar nutrientes en cultivos hidropónicos y algunas de las técnicas usadas en ellas [23, 26].

Tipos de suministros de nutrientes:

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

Técnicas hidróponicas: Existen muchos tipos de técnicas y variaciones, las cuales tienen distintas necesidades energéticas o de implementación. En la figura 2.1 se muestran las principales técnicas hidropónicas, con imágenes tomadas de [3] [27] [28], a las cuales se les pueden adicionar métodos como caída artificial del agua para potenciar la oxigenación o encendido periódico del sistema para reducir el consumo de energía.

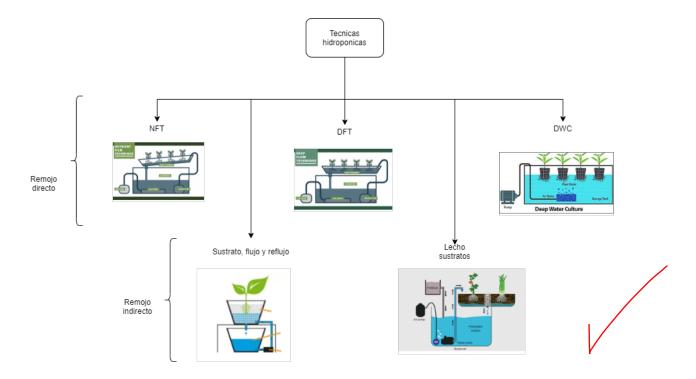


Figura 2.1: Técnicas hidróponicas

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

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

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

#### Acuicultura

La acuicultura consiste en la cría de organismos acuáticos en entornos controlados por el hombre, los cuales pueden ser naturales o artificiales. La cría de peces y la ganadería han acompañado al hombre desde tiempos remotos, incluyendo en específico la acuicultura, actividad de la cual hay registros que datan desde 4580 a.C [29]. El paisaje cultural de Budj Bim, Patrimonio de la Humanidad, se cree que es uno de los sitios de acuicultura más antiguos del mundo [30], la evidencia muestra que la comunidad indigena establecida en esa región, desarrolló un complejo sistema de canales y cría empleado para garantizar un suministro de anguilas durante todo el año.

Los métodos modernos de acuicultura, poseen una alta densidad de peces por espacio de agua. Sin embargo, este tipo de producción suele tener un significativo componente de contaminación y consumo de agua, además del estricto control de variables dañinas para los peces (como el amoniaco u oxígeno disuelto). Es por esto que se introducen como solución los sistemas RAS(Recirculating Aquaculture System)[31], los cuales parten del principio de recirculación de agua y se aplican a sistemas de producción cerrados donde los peces son criados en estanques totalmente controlados, luego el agua dentro del sistema se filtra y finalmente recircula constantemente usando diferentes métodos.

#### Factores importantes:

■ Variables: Las condiciones específicas de las diferentes variables que influyen en el sistema varían con cada especie y con las condiciones del acuífero. Sin embargo, las

variables sobre las cuales debe hacerse mayor hincapié[32] son:

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

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

■ Desechos: Los procesos metabólicos de los organismos acuáticos generan diferentes compuestos, de los cuales su concentración depende mucho del tipo de pez y su dieta. La composición de los desechos metabólicos en un acuífero [33] contiene bicarbonatos, sulfatos, potasio, nitrito, iones de magnesio y amonio. En los sistemas de circulación con filtros físicos o biofiltros, se usan bacterias que descomponen estos desechos en compuestos no tóxicos u otros que pueden ser consumidos por las mismas, por las plantas o por otro tipo de organismos.

#### Acuaponía

La acuaponía es una técnica de cultivo que mediante la combinación de sistemas hidropónicos y acuícolas posibilita el crecimiento de plantas y peces mediante la recirculación de agua. La acuaponía permite solucionar inconvenientes tanto de la hidroponía como de la acuicultura aprovechando la relación simbiótica entre plantas, peces y bacterias. Los desechos producidos por los peces y los restos de alimentos que estos dejan son convertidos en nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas por medio de procesos bacterianos [2].

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

cultivaron peces y plantas alimentarias como maíz y zapallo.

El adecuado funcionamiento del sistema es consecuencia de la interacción conjunta de factores bióticos y abióticos. El principio biológico bajo el cual interactúan estos factores puede apreciarse en la Figura 2.2.

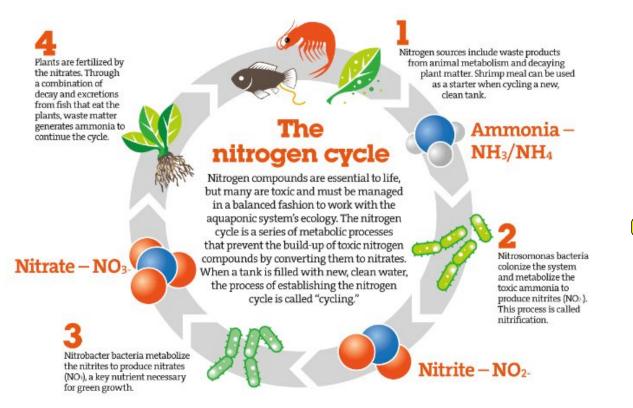


Figura 2.2: Proceso de nitrificación [34]

Como se mencionaba anteriormente, este ciclo biológico se basa principalmente en la obtención de nutrientes para el crecimiento y desarrollo de las plantas a partir de los desechos de los peces, gracias a dos bacterias quimiolitotróficas: Nitrosomona y Nitrobacter [35].

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



las plantas absorben estos nitratos y actuando como filtro limpian el agua que regresará a los peces [3].

Partes de un sistema acuapónico:

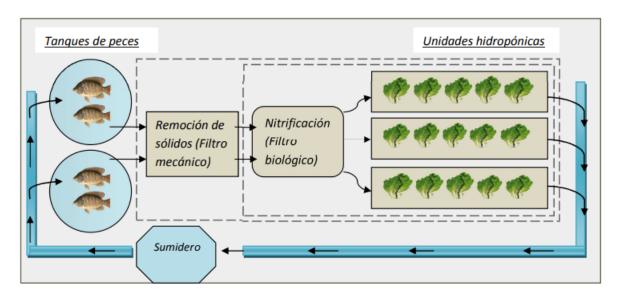


Figura 2.3: Partes de un sistema acuapónico [35]

Como se puede apreciar en la Figura 2.3, desde el punto de vista de la implementación física, un sistema acuapónico debe contar con:

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

necesario. Estos procesos de dosificación se suelen llevar a cabo manualmente, lo que convierte al colector de agua en un componente de interés para aplicar automatización.

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

Para la implementación exitosa de un cultivo acuapónico, cobra vital importancia contar con un sistema de circulación que permita que el agua se oxigene y circule continuamente, garantizando el contacto entre los peces y las plantas, lo que sugiere una oportunidad para la implementación de control automatizado. Se estima que por medio de la reutilización del agua previamente tratada (en el caso de un cultivo acuapónico con filtros físicos y biológicos), el sistema de circulación hace que se utilice menos del 10 % del agua requerida comparada con una producción convencional y ofrece facilidad respecto al control del sistema por parte de quien lo opera [36].

En la acuaponía, especialmente dentro de la unidad hidropónica, suele emplearse la circulación de agua por flujo y reflujo, la cual consiste en bombear la solución nutritiva de un recipiente a otro y así, con ayuda del movimiento generado por la bomba se garantiza que el agua tenga altos niveles de oxígeno disuelto para que los peces, bacterias y plantas se mantengan sanos. En este mismo sentido, los costes de electricidad se vuelven un reto importante, por lo que a la hora de elegir las bombas y la fuente de energía hay que prestar especial atención [37].

#### Variables importantes

A partir de la información sintetizada en los apartados 2.1.2 y las tendencias existentes en las diferentes tecnologías, mencionadas en el siguiente apartado, se identifican las variables más importantes que actúan sobre el sistema y aquellas que según la literatura han sido las más utilizadas en el área de control para determinar cuáles son las candidatas para ser medidas y/o controladas directamente. Lo anterior queda expresado en la figura 2.4.

Variable	Descripción	Medible	Controlable
рН	El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidronio [H3O+] presentes en determinados medios y afecta el comportamiento de otras variables.	х	х
Turbidez	La turbidez, como uno de los parámetros más importantes en la calidad del agua, mide la cantidad de sólidos disueltos en la misma.	х	
Oxigeno disuelto	El oxigeno disuelto (OD) es la cantidad de oxigeno gaseoso que esta disuelto en el agua. El cual, es fundamental para la vida de los peces, plantas y bacterias.	х	х
Nitrato	Los nitratos son compuestos químicos inorgánicos que se producen de manera natural en un acuario durante el ciclo del nitrógeno.	х	
Amoniaco	El amoníaco es un compuesto nitrogenado, gaseoso, incoloro y alcalino. Las proporciones de amoníaco se ven afectadas por el pHy de la temperatura del agua. En exceso, es perjudicial para los peces.	х	
Temperatura	La temperatura es una magnitud utilizada para medir el nivel de energía calórica de un cuerpo o medio. Toma un papel importante dentro del sistema, pues la temperatura interna afecta los peces y las bacterias, mientras que la externa afecta a las plantas.	Х	х
Humedad relativa	La humedad relativa es la razón entre el vapor de agua en el aire y la cantidad de agua que podria contener en estado de saturado. Es una variable muy importante para el crecimiento de las plantas.	х	х
Luminosidad	La luminosidad se define como el flujo de luz por unidad de área. Para las plantas es de gran importancia ya que, estas toman la energía lumínica para realizar sus procesos fotosintéticos.	х	х
Tasa de alimentación	Se define como la masa diaria suministrada sobre la biomasa presente en el acuario y se representa en forma porcentual.		x
Flujo de agua	Representa el caudal que circula a través del sistema acuapónico, lo que lo hace un componente fundamental para garantizar la interaccion peces-plantas-bacterias.		х

Figura 2.4: Variables importantes

#### 2.1.3. Estado Actual

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

En [38], un artículo tomado de la 11º conferencia HMICEM de IEEE, los autores implementaron un sistema acuapónico automatizado destinado a su uso en zonas urbanas, específicamente condominios. Como resultado final, automatizaron la iluminación y humedad relativa de las plantas, la alimentación de los peces y el flujo de agua a partir del monitoreo de la temperatura externa e interna, la humedad relativa, el pH y el nivel del agua usando un sistema de bucle cerrado con control On/Off.

Por otra parte, F. Rozie, I. Syarif y M. Al Rasyid [39] diseñaron e implementaron un sistema de gestión de la calidad del agua en estanques de Bagre mediante la aplicación de control difuso para controlar los niveles de amoniaco y temperatura. Además, construyeron una interfaz de usuario en un servidor web y un sistema ChatBot en Telegram para informar el estado del sistema al usuario.

En el contexto nacional, podemos tomar como referente el trabajo de L. Hernandez [40] quien diseñó, construyó y evaluó el rendimiento de dos sistemas acuapónicos con diferente tipo de recirculación de agua. Para ello, empleó control multivariable descentralizado, usando PID para temperatura, oxígeno disuelto, nivel del agua y On/Off: para pH, conductividad eléctrica, iluminación, humedad relativa, Control temporal: alimentación.

En cuanto a trabajos recientes con técnicas poco exploradas en este campo, [41] propuso desarrollar un sistema hidropónico inteligente basado en IoT mediante Deep Neural Networks. El sistema fue lo suficientemente inteligente para proporcionar la acción de control adecuada en el entorno hidropónico en función de los múltiples parámetros de entrada recopilados (pH, temperatura, humedad, nivel, iluminación), junto a tres parámetros de salida (bomba de agua, iluminación y ventilación).

En el marco local vallecaucano, J. Agudelo y M. Jaimes [42] diseñaron e implementaron un sistema acuapónico automatizado manejado a través de una página web. Este diseño, además de permitir al usuario cambiar las condiciones del sistema, ejecuta medición y control on/off para las variables pH y temperatura interna y externa. Es de destacar, que realizaron un montaje completamente funcional del sistema propuesto, logrando comprobar el diseño planteado.

### 2.2. Metodología

Para cada uno de los objetivos planteados anteriormente, se establecen una serie de tareas e hitos que se especifican a continuación:

O1. El primer objetivo específico, se centra en identificar un sistema de cultivo acuapónico que pueda ser modular y adaptable a condiciones ambientales. Para lograrlo exitosamente es necesario:

- **T1.1** Hacer una revisión bibliográfica y vigilancia tecnológica, y sintetizar en una tabla la información recopilada.
- **T1.2** Identificar las especificaciones del sistema acuapónico, de tal manera que sea modular y adaptable a condiciones ambientales.
- T1.3 Definir las características de los diferentes componentes dentro del cultivo acuapónico, de acuerdo a las especificaciones identificadas y a la información recopilada.

Hito: definición de las características de los componentes del sistema acuapónico elegido

**O2.** El segundo objetivo específico, pretende desarrollar los módulos empleando un software CAD. Para ello, las labores a seguir deben ser:

- **T2.1** Elegir las variables a medir y controlar, teniendo en cuenta las características definidas en la tarea 1.3.
- **T2.2** Definir las características necesarias de los sensores y actuadores para las variables elegidas.
- T2.3 Identificar los posibles sensores y actuadores a emplear.
- **T2.4** Idear los módulos y espacios necesarios de acuerdo a las necesidades del sistema acuapónico, sensores y actuadores.
- **T2.5** Diseñar los módulos dentro del software CAD.

Hito: diseño en el software CAD

O3. En el tercer objetivo específico, se diseña una prueba de concepto para el sistema de automatización. Para su desarrollo adecuado, se hace necesario:

- T3.1 Definir los requerimientos para la construcción de la prueba de concepto.
- **T3.2** Seleccionar los sensores, actuadores y placa de control para la prueba de concepto.
- **T3.3** Proponer la estructura física del sistema acuapónico.

- T3.4 Aplicar técnicas de prototipado para la construcción de los módulos.
- T3.5 Diseñar esquemas de distribución de hardware.
- **T3.6** Diseñar y desarrollar el software.
- T3.7 Montar y acoplar todas las partes de la prueba de concepto.

Hito: prueba de concepto en funcionamiento

**O4.** Con el cuarto objetivo específico, se busca adaptar una técnica de control moderno multivariable para el sistema acuapónico. Para tal son necesarias las siguientes tareas:

- **T4.1** Revisión bibliográfica de las técnicas de control multivariable moderno empleadas actualmente en sistemas acuapónicos.
- **T4.2** Elección de la técnica de control moderno multivariable a emplear, de acuerdo a la información recopilada hasta el momento y la concepción de los módulos realizada.
- **T4.3** Definición de la arquitectura del sistema de control.
- T4.4 Obtener los datos necesarios para el desarrollo del sistema de control.
- **T4.5** Desarrollo del sistema de control.

Hito: sistema de control

O5. El último objetivo específico, tiene como finalidad valorar qué tan útil es usar el sistema de automatización diseñado en un cultivo acuapónico. Para lograrlo, se plantearon las siguientes tareas:

- **T5.1** Identificar las plantas y peces que podrían ser usados dentro del sistema acuapónico, y caracterizarlos según sus beneficios y necesidades.
- **T5.2** Realizar una revisión bibliográfica de experimentos en cultivos acuapónicos clásicos, que podrán ser empleados para contrastar con la prueba de concepto propuesta.
- **T5.3** Seleccionar las plantas y peces que serán utilizados en la prueba de concepto del cultivo acuapónico, de acuerdo a las dos tareas anteriores.
- T5.4 Definir los parámetros a comparar en la evaluación de desempeño.
- **T5.5** Integrar todos los módulos y componentes necesarios para la medición de los parámetros de evaluación.
- **T5.6** Tomar las medidas de los parámetros de evaluación para su comparación y análisis estadístico.

Hito: resultado de la evaluación

### 2.3. Resultados Esperados

Con el desarrollo del proyecto de grado, una vez culminadas las tareas propuestas en la metodología, se espera obtener los siguientes resultados:

#### Modelo:

- Diseño en un software CAD de los módulos definidos en la tarea 2.4.
- Prueba de concepto de acuerdo a los requerimientos definidos en la tarea 3.1.

## Datos: BD in vivo para estudios con

- Tabla de otros métodos omendados para el sistema acuapónico urbano diseñado.
- Base de datos, ordenada de acuerdo a las interacciones entre las variables identificadas en la tarea 2.1. Los datos serán tomados de la prueba de concepto.
- Conjunto de estadísticas que muestren el desempeño del sistema de automatización y control diseñado, al ser usado en el cultivo acuapónico elegido.

Sistema de automatización y control:

- Sistema de control moderno multivariable, apoyado en la base de datos, para las variables identificadas en la tarea 2.1.
- Sistema de automatización y control funcional para el cultivo acuapónico en entorno urbano implementado en la prueba de concepto.

### 2.4. Supuestos y riesgos asociados al proyecto

El desarrollo del presente trabajo está planteado bajo las siguientes condiciones:

#### Supuestos:

- Estado actual de comercio interior y exterior en Colombia.
- Disponibilidad para el uso de laboratorios, dispositivos e infraestructura por parte de la universidad.
- Situación social actual en el territorio Colombiano.

### Riesgos:

- Situación sanitaria por COVID-19 o cualquier percance a nivel mundial o nacional.
- Demora en la adquisición de los componentes necesarios para el desarrollo del proyecto.

### 2.5. Cronograma de actividades

En la figura 2.5 se muestra el cronograma de acuerdo a las tareas definidas en el apartado metodología .

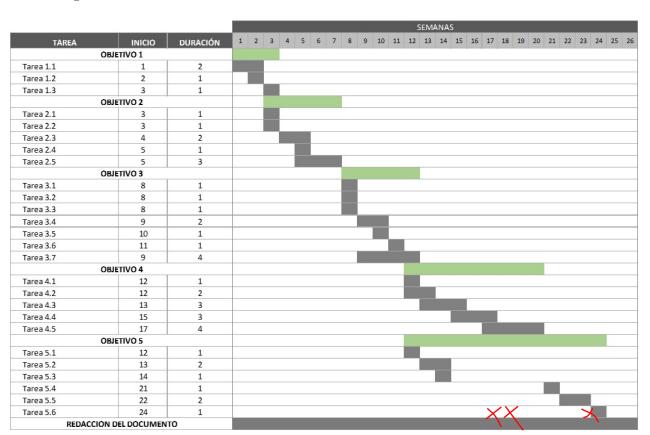


Figura 2.5: Cronograma de actividades



### 2.6. Recursos

A continuación, se especifican los costos de los posibles recursos técnicos y humanos necesarios y con ellos, se plantea el presupuesto final para el desarrollo del proyecto.

#### 2.6.1. Técnicos

Teniendo en cuenta las diversas etapas planteadas en la metodología, los recursos técnicos necesarios para el desarrollo del proyecto se han subdividido en: componentes electrónicos, materiales de construcción, material biológico, instalaciones y licencias.

#### ■ Componentes electrónicos:

Para la prueba de concepto del sistema de automatización y control planteado, serán necesarios diferentes componentes electrónicos que cumplirán la función de sensores, actuadores, microprocesadores y fuentes.

Dado que las etapas de diseño e implementación de la prueba de concepto hacen parte del desarrollo del trabajo de grado, no es posible tener con exactitud los materiales necesarios en este momento. Sin embargo, después de una revisión bibliográfica preliminar, se ha realizado una lista de posibles materiales teniendo en cuenta la figura 2.4 del presente documento, y asumiendo que se sentarán y/o se controlarán todas las variables allí descritas.

#### SENSORES:

Componente	Componente Descripción	
Sensor de pH	Kit Medidor Pro Análogo de PH diseñado para el monitoreo en linea a largo plazo	310.590
Sensor de temperatura resistente al agua	Sensor DS18B20	19.159
Temperatura externa y humedad relativa	Sensor AM2315C	121.618
Sensor de Oxigeno disuelto	Sensor de oxígeno disuelto/Kit	712.689
Sensor de turbidez	Sensor capaz de detectar partículas en suspensión en el agua	117.572
Sensor de intensidad de luz	Módulo sensor de luz BH1750 con encapsulado plástico (3 unidades)	64.260
Sensor de nivel	Sensor tipo flotador para medir el nivel de líquido (paquete por 3 unidades)	37.812
	1.383.700	



Figura 2.6: Precio estimado de los posibles sensores a emplear

2.6. Recursos 23

### **ACTUADORES**:

Componente	Descripción	Precio (COP)
Bomba preristáltica(pH)	ristáltica(pH)  Bomba de dosificación pequeña con función de autocebado sin válvulas	
Ventilador	Ventilador de 5.5 x 5.5 x 1.0 in, con flujo de aire de 57 CFM y ruido de 18 dBA	75.188
Dosificador de alimento	Dispensador automático y manual de comida para peces	60.000
Oxigeno disuelto	Bomba de aire sumergible,8W, 110V AC, 3600L/H	75.920
Luminosidad	dad Luz de crecimiento 13W, 110V AC, 15000H	
Flujo de agua	Bomba de agua sumergible,48W, 24V CC, 2000L/H	71.229
Humedad relativa	Humidificador, 24V CC, 19W, 400mL/h	55.391
Electrovalvulas	Electroválvula 12V 1/2 (paquete por 2 unidades)	39.554
	TOTAL	539.418

Figura 2.7: Precio estimado de los posibles actuadores a emplear

### MICROPROCESADORES Y ALIMENTACIÓN:

Componente	Descripción	Precio (COP)
Microcontrolador	Raspberry pi pico	40.000
Modulo wifi	Wifi Module esp8266	20.000
Modulos	AI,AO,DI,DO	200.000
Fuente	Fuente de alimentación AC/DC. 12V	75.188
Conversor	CONVERSOR DC 3-24V/5V3A	39.553
Modulo Relay	Tarjeta para el manejo de ocho relays y optoacopladores	39.627
Otros	Cables,conectores,soldadura, pines	50.000
	TOTAL	464.368

Figura 2.8: Precio estimado de los posibles actuadores a emplear

#### Materiales de construcción:

Debido a que la etapa de construcción del modelo acuapónico hace parte del desarrollo del trabajo de grado, no es posible tener con exactitud los materiales necesarios para esta instancia. Sin embargo, se ha realizado una lista de posibles materiales de acuerdo a la literatura consultada [38, 39, 40, 41, 42] y los alcances planteados.La cantidad de materiales se plantea pensando en un montaje con una base de 0.4mt cuadrados y 1.2mt de altura, con los módulos en configuración vertical.

Material	Material Descripción	
Ángulo hierro	12mt x 1-1/2 x 3/16in	150.000
Triplex madera	1m2,15mm	50.000
Filtro multicapa	Filtro físico sistema acuapónico	30.000
Tanques	100lt, 20lt circular	300.000
Tubería	PVC 1/2x3mt	20.000
Manguera	Plástico 1/2x2mt	50.000
Otros	Materiales secundarios(soldadura, pegamento, amarras, cable, aislamiento)	100.000
TOTAL		700.000

Figura 2.9: Precio estimado de los posibles materiales de construcción a emplear

#### Material biológico y relacionados:

El sistema acuapónico trae consigo unos costos asociados correspondientes al material biológico para su funcionamiento, cabe aclarar que no se incurre en problemas éticos o de ley en la compra de plantas y peces de uso comercial.

Material	Descripción	Precio (COP)	
Plantas	16 plantas pequeñas	145.000	
Peces	10 peces, 1 lb c/u	80.000	
Alimento	Bulto alimento para peces 20 kg	60.000	
Sustrato	Sustrato natural 100 lt	100.000	
Otros	Vitaminas, sustancias para regular pH	100.000	
	TOTAL	485.000	

Figura 2.10: Precio estimado del posible material biológico a emplear

2.6. Recursos 25

#### Instalaciones y herramientas varias:

Es necesario el uso de diversas instalaciones y herramientas a lo largo del desarrollo del trabajo de grado, los cuales se encuentran expuestos en la figura 2.11.

Recurso	Descripción	Precio (COP)
CAP	1 mes Uso de Cortadora Laser, Sierra sin fin, Taladro, Esmeril.	400.000
Impresora 3d	20 Horas de impresión	200.000
Laboratorio de Electrónica	2 meses Uso de Generador de señales, Osciloscopio, Multimetro, Cautín, Elementos varios para circuitos electrónicos.	400.000
Equipo de cómputo virtual de alto procesamiento	2 meses Uso de equipo de alto procesamiento gráfico para software CAD, diseño y simulación de circuitos	500.000
	TOTAL	1.500.000

Figura 2.11: Precio estimado de las instalaciones y herramientas varias a emplear

#### • Licencias:

Para el desarrollo del proyecto de grado será necesario emplear diferentes software, algunos libres, otros con licencias gratuitas para estudiantes y otros completamente pagos. A continuación se describe el monto a pagar por las licencias, teniendo en cuenta la duración estimada del proyecto presentada en el cronograma.

Licencia	Precio (COP)
Matlab student	200.000
Altium	50.000
Office	200.000
Solidworks student	250.000
Python	0
Oracle Academy	0
Android Studio	0
Google Cloud Free	0
TOTAL	700.000



Figura 2.12: Precio estimado de las licencias varias a emplear

### 2.6.2. Humanos

En la siguiente tabla, se encuentran especificados los recursos humanos necesarios para la realización del proyecto.

Persona	Cargo	Precio por hora (COP)	Número de horas por semana	Número total de horas	Precio total (COP)
Juan Manuel Nogales Viedman	Director del proyecto	<b>5</b> 46.000	2	52	₹ 2.392.000
Karen Yissel Marín Franco	Estudiante	\$ 10.000	12	312	\$ 3.120.000
Luis Fernando Riveros Orozco	Estudiante	▶ 10.000	12	312	\$ 3.120.000
TOTAL				\$ 8.632.000	

Figura 2.13: Precio estimado de los recursos humanos necesitados

En anexos, se encuentra a detalle la trayectoria académica y laboral del director del proyecto.

### 2.6.3. Presupuesto

De acuerdo a las tablas de recursos técnicos y humanos, se muestra a continuación los montos finales de cada categoría y el origen de los recursos.

Artículo	Recursos propios (COP)	Suministrado por la Universidad (COP)
Componentes electrónicos	2.387.486	
Materiales de construcción	700.000	
Materiales biológicos y relacionados	485.000	
Instalaciones y herramientas varias	6 5	1.500.000
Licencias		700.000 🛧
Fotocopias	50.000	
Director de proyecto		2.392.000
Estudiantes	6.240.000	Y
TOTAL	\$ 9.862.486	\$ 4.592.000

Figura 2.14: Presupuesto proyecto de grado



- [1] A. Aja and N. Morán. (2011) Historia de los huertos urbanos. de los huertos para pobres a los programas de agricultura urbana ecológica",universidad politécnica de madrid (upm). [Online]. Available: http://oa.upm.es/12201/1/INVE\_MEM\_2011\_96634.pdf
- [2] R. Martínez, "La acuaponía como alternativa de producción agropecuaria sostenible ¿una posibilidad para tener en casa?" Revista de divulgación científica de nutrición ambiental y seguridad alimentaria de la Universidad de Guanajuato, vol. 2, no. 15, October 2019. [Online]. Available: https://www.ugto.mx/redicinaysa/images/Revista s2013/redicinaysa-sept-oct-2013-universidad-guanajuato.pdf
- [3] C. Somerville, M. Cohen, E. P. A. Stankus, and A. Lovatelli, "Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming." *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*, no. 589, p. 262, 2014. [Online]. Available: https://www.fao.org/3/i4021e/i4021e.pdf
- [4] C. Lladó and F. Izquierdo, "La escasez de agua como amenaza global," *UAB*, 2019. [Online]. Available: https://llibrary.co/document/yer0x5rq-la-escasez-de-agua-como-amenaza-global.html?utm\_source=seo\_title\_list
- [5] S. M. C. Ramírez, A. F. Barbieri, and J. I. R. Rigotti, "La migración interna en colombia en la transición al siglo xxi. una aproximación multiescalar," *Revista Latinoamericana de Población*, vol. 12, no. 22, July 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.31406/n22a4
- [6] T. Kozai, Ed., Smart Plant Factory, ser. The Next Generation Indoor Vertical Farms. Springer, Singapore, 2018, no. 1. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-981-13-1065-2
- [7] G. P. S. Cáceres, V. M. F. Cabanás, J. L. Eguíbar, and L. Pérez-Urrestarazu, "Attitudes and willingness to pay for aquaponic products in spain and latin america," *International Journal of Gastronomy and Food Science*, vol. 24, no. 100350, July 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100350
- [8] D. S. P. M. Hernández Hernández and A. M. Gil, "Auge y caída de nuevas naturalezas urbanas: plantas ornamentales y expansión turístico-residencial en alicante," *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, no. 68, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.21138/bage.1856

[9] L. Pedraza, "La biodepuración del aire con plantas purificantes y ornamentales, como alternativa ambiental en el siglo xxi," Monografía descriptiva, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, 2015. [Online]. Available: https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/3767

- [10] Y. Y. C. Loayza, "Eficiencia de las plantas ornamentales aptenia cordifolia y helxine soleirolii como barrera para la reducción de ruido 2018," Trabajo de grado, Universidad Cesar Vallejo, Lima, 2018. [Online]. Available: https://hdl.handle.net/20.500.12692/36358
- [11] L. L. A. de la Luz, "Agricultura urbana y suburbana: VÍa para cultivar plantas medicinales," *Agrotecnia de Cuba*, vol. 41, no. 2, pp. 1–12, 2017. [Online]. Available: https://www.grupoagricoladecuba.gag.cu/media/Agrotecnia/pdf/2017/2/1.pdf
- [12] A. M. et al, "Human health implications of organic food and organic agriculture: a comprehensive review," *Environmental Health*, vol. 16, no. 1, October 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1186/s12940-017-0315-4
- [13] M. s. Lee, J. Lee, B.-J. Park, and Y. Miyazaki, "Interaction with indoor plants may reduce psychological and physiological stress by suppressing autonomic nervous system activity in young adults: a randomized crossover study," *Journal of Physiological Anthropology*, vol. 34, no. 1, April 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1186/s40101-015-0060-8
- [14] F. Toledo, "Agricultura urbana, periurbana y rural del siglo xxi," Extended abstract of doctoral thesis, UCU, UFLO, UAI, Uruguay, 2018.
- [15] C. Hitaj, B. Cooke, A. Carlson, G. Ferreira, and C. Greene, "Usda ers growing organic demand provides high-value opportunities for many types of producers," *USDA ERS Home*, 2017. [Online]. Available: https://www.ers.usda.gov/amber-waves/2017/januar yfebruary/growing-organic-demand-provides-high-value-opportunities-for-many-type s-of-producers
- [16] I. C. y. l. C. Ørganización de las Naciones Unidas para la Educación. Hecho 2: La agricultura es, con diferencia, el mayor consumidor de agua dulce. [Online]. Available: http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-an d-figures/all-facts-wwdr3/fact2-agricultural-use/
- [17] "La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050," in *Como alimentar al mundo* 2050, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Roma: Foro de expertos de alto nivel, October 2019. [Online]. Available:

- $https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues\_papers/Issues\_papers\_S\\ P/La\_agricultura\_mundial.pdf$
- [18] A. AlShrouf, "Hydroponics, aeroponic and aquaponic as compared with conventional farming," ASRJETS, vol. 27, no. 1, pp. 247–265, January 2017. [Online]. Available: https://asrjetsjournal.org/index.php/American\_Scientific\_Journal/article/view/2543
- [19] F. I. Hai, C. Visvanathan, and R. Boopathy, Eds., Sustainable Aquaculture, 1st ed., ser. Applied Environmental Science and Engineering for a Sustainable Future. Springer, Cham, 2018, vol. 7, no. 327. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-73257-2
- [20] Y. Wei, W. Li, D. An, D. Li, Y. Jiao, and Q. Wei, "Equipment and intelligent control system in aquaponics: A review," *IEEE*, vol. 7, pp. 169306 169326, November 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2953491.
- [21] A. R. Chaudhry and V. P. Mishra, "A comparative analysis of vertical agriculture systems in residential apartments," in 2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), 2019, pp. 1–5.
- [22] M. Costache, D. Sebastian Cristea, S.-M. Petrea, M. Neculita, M. M. T. Rahoveanu, I.-A. Simionov, A. Mogodan, D. Sarpe, and A. T. Rahoveanu, "Integrating aquaponics production systems into the romanian green procurement network," *Land Use Policy*, vol. 108, p. 105531, 2021. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837721002544
- [23] J. Beltrano and D. O. Giménez, Eds., *Cultivo en Hidroponia*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP), 2015, ISBN:978-950-34-1258-9. [Online]. Available: https://doi.org/10.35537/10915/46752
- [24] L. V. Molleand and Y. Segers, "Micro-farming on other men's land allotments from the 19th to the 21st century: Belgian history in a global perspective," Hogeschool-Universiteit Brussel, Faculteit Economie en Management, Working Papers 2008/23, 2008. [Online]. Available: https://EconPapers.repec.org/RePEc:hub:wpecon:200823
- [25] K. H. Brown and A. L. Jameton, "Public health implications of urban agriculture," Journal of Public Health Policy, vol. 21, no. 1, pp. 20–39, 2000. [Online]. Available: http://www.jstor.org/stable/3343472
- [26] ¿Qué es la hidroponia?, Hidroponia FIL. [Online]. Available: https://hidroponiafil.com.ar/que-es-la-hidroponia/

[27] "hydroponic shipping container farms, gardens, greenhouses". pure greens: Custom container farms. [Online]. Available: https://puregreensaz.com

- [28] "fig 2: Deep water culture system of hydroponics". researchgate. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Deep-water-culture-system-of-hydroponics\_fig 1 348003824
- [29] "National Heritage Places". Water and the Environment. [Online]. Available: https://www.awe.gov.au/parks-heritage/heritage/places/national/budj-bim
- [30] M. Neal, "A decade of lobbying sees indigenous site older than the pyramids get world heritage listing," ABC. [Online]. Available: https://www.abc.net.au/news/2019-07-06/indigenous-site-joins-pyramids-stonehenge-world-heritage-list/11271804
- [31] C. H. Velandia, "Monitoreo y control de estanque para la producción piscícola," Trabajo de grado, Universidad autónoma de occidente, Santiago de cali, September 2021. [Online]. Available: https://red.uao.edu.co/handle/10614/11594
- [32] "Parámetros clave de la calidad del agua para piscicultura," BERNARDO LABORATORIOS. [Online]. Available: https://bernardolabs.com/parametros-clave-de-la-calidad-del-agua-para-piscicultura/
- [33] L. E. V. Gamboa, "Sistemas de recirculación de agua (ras) en piscicultura," Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, vol. 7, no. 7, 2013. [Online]. Available: https://revistas.udenar.edu.co/index.php/reipa/article/view/1483
- [34] "A complete guide to aquaponics for beginners," GreenKit. [Online]. Available: https://www.greenkit.net/aquaponics-for-beginners/
- [35] P. Candarle, "Técnicas de acuaponia," Centro Nacional de Desarrollo Acuícola (CENA-DAC), Tech. Rep., 2015.
- [36] "Ras sistemas de recirculación acuícola," International Aquafeed. [Online]. Available: https://aquafeed.co/entrada/ras---sistemas-de-recirculaci-n-acu-cola-20211/
- [37] A. J. J. Sáenz, "Sistemas de recirculación en acuicultura: una visión y retos diversos para latinoamérica," Sistemas de recirculación Perú, Investigación. [Online]. Available: http://www.industriaacuicola.com/PDFs/Sistemas de recirculacion.pdf
- [38] A. Z. Mae H. Ambrosio, L. H. M. Jacob, L. A. R. Rulloda, J. A. C. Jose, A. A. Bandala, A. Sy, R. R. Vicerra, and E. P. Dadios, "Implementation of a closed loop control system for the automation of an aquaponic system for urban setting," in 2019 IEEE 11th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology,

- Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM), 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/HNICEM48295.2019.9072729.
- [39] F. Rozie, I. Syarif, and M. U. H. Al Rasyid, "Design and implementation of intelligent aquaponics monitoring system based on iot," in 2020 International Electronics Symposium (IES), 2020, pp. 534–540, doi: 10.1109/IES50839.2020.9231928.
- [40] L. F. H. Zambrano, "Diseño, construcción y evaluación de un sistema acuapónico automatizado de tipo tradicional y doble recirculación en el cultivo de tilapia roja (oreochromis mossambicus) y lechuga crespa (lactuca sativa)," Trabajo de grado Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2017. [Online]. Available: https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/62954
- [41] M. Mehra, S. Saxena, S. Sankaranarayanan, R. J. Tom, and M. Veeramanikandan, "Iot based hydroponics system using deep neural networks," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 155, pp. 473–486, 2018. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169918311839
- [42] J. Fernández, M. A. Pinto, and J. Ignacio, "Diseño e implementación de un sistema acuapónico automatizado," Trabajo de grado Pregrado, Universidad Autónoma de Occidente, Via Cali-Jamundi, Julio 2020. [Online]. Available: http://red.uao.edu.co//handle/10614/12790

### 3.1. Curriculum Vitae Juan Manuel Nogales Viedman

#### ACADEMIC INFORMATION

- Mechatronic Engineer-2008, Universidad Autonoma de Occidente.
- Master in Engineer-2012, Pontificia Universidad Javeriana Cali.
- PhD in Computer Science-2018, Universidade Fed. Uberlandia Brazil.

#### WORK EXPERIENCE

### UNIVERSIDAD SANTIAGO DE CALI

Teacher Programming and Electronics (Feb 2019-Present)

- Machine learning and programming courses
- Classes of basic concepts of circuits and electronic laws
- Multisim simulations and virtual lab practices

#### PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

Teacher in Feedback systems and Introduction to Electronics (Ago 2020 - Present)

- Classes of system analysis using Laplace, Nyquist, Lyapunov, and Routh-Hurwitz
- Classes of basic concepts of electronics laws

Researcher (Feb. 2009 - June 2010)

- Development of mathematical frameworks for optimal allocation of heterogeneous agents using stability theory for nonlinear systems
- Statistical analysis by employing Monte Carlo simulations to evaluate different methods and applications of control to allocate agents on networks in a distributed fashion SENA – TECNOACADEMIA Facilitator and researcher in Design and 3D prototyping

(Feb 2019-Dec 2020) - Practical classes of design and prototyping suing 3D printers, CNC, and Laser cutter machines - Research student proposals to provide prototypes (exoskeletons, IoT smart sewers, bridges)

#### UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE

Teacher in Signals and Systems (Aug. 2012 – Dec. 2012) Teacher in Signals and Systems and Sound processing (July 2018 – July 2020)

- Classes of signal processing with Fourier, Laplace and Z transforms.
- Matlab and Python implementations for validating theoretical concepts

#### FUERZA AEREA COLOMBIANA

Teacher in Dynamic systems (Feb. 2019 – Mar. 2019)

- Classes of dynamic systems with Laplace and Lyapunov stability theory
- Matlab and Arduino implementations for validating theoretical concepts

#### **DOMA**

Project advisor (Dec. 2017 – Jan. 2019)

- Visit customer installations to plan, design, and project solutions for security systems.
- Install and provide maintenance to the installed products.

#### UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLANDIA

Doctoral researcher (Mar. 2013 – Mar. 2018)

Details of doctoral research: we worked with multi-robot systems in foraging tasks. The proposal combines social learning, Data-streaming techniques, and Complex networks concepts to bring forth a responsive communication structure for local decision-making. In particular, data-streaming techniques supervise the environmental conditions to pinpoint when an environmental change occurs. Thus, robots could regulate their rate of social learning. Our results showed improvements in performance.

Teaching assistant in Algorithms and programming in Computers (April 2015 – June 2015)

- Supplementary classes with C++ expositions and practices Teaching assistant in Formal language and automata (July 2015 Dec. 2015)
- Review tests and homeworks

### CODITEQ S.A.

Coordinator and technician (Jun 2010 – Dec. 2010)

- Organize and distribute the team of technician to attend customer needs
- Maintenance of coding equipment in the industry lines.