

Diseño de una Arquitectura de Supervisión y Control de Ecosistemas Acuapónicos Bajo  
el Enfoque de IoT y la Norma ISA-95

Diego Andrés García Díaz, Nicolás Chaparro Tolosa

Trabajo de Grado para optar por el Título de Ingenieros Electrónicos

Director

Rodolfo Villamizar Mejia

Doctor en Tecnologías de la Información e Ingeniero Eléctrico, Electrónico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T)

Ingeniería Electrónica

Bucaramanga, Santander

2025

### **Dedicatoria**

A mi padre, Miguel García, y a mi madre, Claudia Díaz, por su esfuerzo incondicional y por estar siempre a mi lado en cada etapa de mi vida y de la carrera. A mis hermanos, Miguel y Rafael, por su constante apoyo y compañía. A mi pareja, María, por ser más que un apoyo: mi refugio, mi impulso y mi mayor compañía durante este proceso. A mis profesores, quienes con su exigencia, guía y compromiso académico me motivaron a dar siempre lo mejor de mí.

Diego Andrés García Díaz

A mi padre, Alirio Ignacio, y a mi madre, Rosalba Tolosa, por su esfuerzo constante para que estudiara, por motivarme a dar siempre lo mejor de mí y por estar presentes en cada etapa de mi vida; su apoyo incondicional ha sido fundamental. A mi hermano, por su compañía y por ser una fuente de inspiración, deseándole éxito en todos sus proyectos. A mi pareja, por ser una persona tan bonita y por acompañarme hasta el último día; tu amor y apoyo han sido esenciales en este camino. Al profesor Rodolfo, por su guía, consejería y las oportunidades brindadas. Finalmente, a todos los compañeros y profesores que me acompañaron en este proceso, gracias por su apoyo y amistad.

Nicolás Chaparro Tolosa

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Marco teórico .....	15
2.1 Acuaponía .....	15
2.2 Internet de las Cosas (IoT) como habilitador tecnológico .....	17
2.2.1 Arquitectura de IoT.....	18
2.2.2 Aplicación del IoT en la agricultura .....	19
2.2.3 Plataformas y escalabilidad.....	20
2.3 Estándar ISA-95.....	21
2.3.1 Integración de ISA-95 con el IoT .....	22
2.3.2 Aplicación en sistemas acuapónicos .....	22
2.3.3 Tendencias actuales: UNS y enfoque de Industria 4.0 .....	23
2.4 Tecnologías de supervisión, control y automatización .....	24
2.5 Variables en la acuaponía .....	25
2.6 Normas y/o leyes para la acuaponía en Colombia .....	25
3. Metodología .....	27

3.1 Revisión documental y establecimiento de criterios de diseño .....	27
3.2 Definición de la arquitectura basada en el estándar ISA-95 .....	28
3.3 Selección de elementos tecnológicos por nivel .....	29
3.4 Agente recomendador .....	30
3.4.1 Arquitectura del agente .....	30
3.4.2 Plataforma de desarrollo .....	31
3.4.3 Rol del agente en la arquitectura.....	31
3.5 Evaluación del agente recomendador .....	32
3.5.1 Caso 1 - Usuario sistema de baja inversión .....	32
3.5.2 Caso 2 - Usuario sistema de mediana inversión .....	32
3.5.3 Caso 3 - Usuario sistema de alta inversión .....	33
4. Resultados .....	34
4.1 Revisión documental y criterios de diseño .....	34
4.2 Arquitectura propuesta basada en ISA-95 .....	35
4.2.1 Flujo de información entre niveles ISA-95.....	35
4.2.2 Pirámide de automatización.....	36
4.2.3 Representación de sistema acuapónico .....	37
4.3 Clasificación tecnológica por niveles .....	38
4.3.1 Variables .....	38
4.3.2 Sensores .....	38
4.3.3 Actuadores .....	39

4.3.4 Microcontroladores .....	39
4.3.5 PLCs.....	40
4.3.6 Plataformas de la nube.....	40
4.4 Agente recomendador .....	41
4.5 Validación agente recomendador.....	42
4.5.1 Usuario baja inversión .....	42
4.5.2 Usuario media inversión .....	42
4.5.3 Usuario alta inversión .....	43
5. Conclusiones.....	44
6. Recomendaciones .....	45
Referencias.....	46
Apéndices.....	53

### **Lista de Tablas**

Dada la extensión del presente trabajo, se optó por trasladar la totalidad de las tablas al Apéndice E con el fin de facilitar la lectura del cuerpo principal del documento. No obstante, cada tabla continúa siendo referenciada explícitamente en el texto, indicando tanto el número correspondiente como su ubicación en dicho apéndice.

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Sistema acuapónico</i> .....	15
Figura 2 <i>Arquitectura de Internet de las Cosas (IoT)</i> .....	18
Figura 3 <i>Niveles funcionales y pirámide según el estándar ISA-95</i> .....	21
Figura 4 <i>Mapa conceptual “Acuaponía, desafíos e innovaciones”</i> .....	27
Figura 5 <i>Flujo funcionamiento del agente</i> .....	31
Figura 6 <i>Diagrama arquitectura con flujo de información</i> .....	35
Figura 7 <i>Niveles funcionales y pirámide según el estándar ISA 95</i> .....	36
Figura 8 <i>Primeras interacciones con el chatbot</i> .....	41

**Lista de Apéndices**

Apéndice A. Glosario

Apéndice B. Tabla revisión documentación ordenada por niveles ISA 95

Apéndice C. Libro de Excel con arquitectura y tecnologías por nivel

Apéndice D. Agente recomendador

Apéndice E. Tablas utilizadas en el trabajo de grado

### **Glosario**

Dado que el glosario de términos técnicos y abreviaturas empleados en este trabajo presenta una extensión considerable, y con el fin de facilitar la lectura sin interferir con el desarrollo del documento, este se ha ubicado en el Apéndice A. Allí se incluyen definiciones técnicas y acrónimos utilizados a lo largo del estudio.

## Resumen

**Título:** Diseño de una Arquitectura de Supervisión y Control de Ecosistemas Acuapónicos Bajo el Enfoque de IoT y la Norma ISA-95\*

**Autor:** Diego Andrés García Díaz, Nicolás Chaparro Toloza \*\*

**Palabras Clave:** Acuaponía, IoT, Estándar ISA 95, Agricultura Sostenible, Agente recomendador, Supervisión y control.

La escasez alimentaria y la contaminación del agua son desafíos globales agravados por el crecimiento poblacional, el cambio climático y el uso insostenible de los recursos. En este contexto, la acuaponía se presenta como una alternativa prometedora al combinar la cría de peces con el cultivo de plantas, optimizando el uso del agua y los nutrientes. No obstante, su adopción se ve limitada por los altos costos de implementación, la complejidad en el monitoreo y control de variables críticas del sistema.

Este proyecto propone una arquitectura de supervisión y control para sistemas acuapónicos, estructurada según el estándar ISA-95 e integrada con tecnologías del Internet de las Cosas (IoT). A partir de la revisión del estado del arte, se clasificaron tecnologías según los niveles funcionales del modelo ISA-95. Con esta base, se desarrolló un agente recomendador en la plataforma N8N, capaz de sugerir configuraciones tecnológicas personalizadas en función del perfil del usuario y su capacidad de inversión.

La solución fue validada mediante tres escenarios representativos (baja, media y alta inversión), demostrando su aplicabilidad práctica. El proyecto busca democratizar el acceso a tecnologías de automatización para pequeños productores, fomentar prácticas agrícolas sostenibles y contribuir a la seguridad alimentaria, la sostenibilidad ambiental y la innovación educativa en contextos rurales y urbanos.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Rodolfo Villamizar Mejía. Doctor en Tecnologías de la Información e Ingeniero Eléctrico, Electrónico

### Abstract

**Title:** Design of a Monitoring and Control Architecture for Aquaponic Ecosystems under the IoT Approach and the ISA-95 Standard\*

**Author:** Diego Andrés García Díaz, Nicolás Chaparro Toloza\*\*

**Key Words:** Aquaponics, IoT, ISA 95 Standard, Sustainable Agriculture, Recommender Agent, Monitoring and Control.

Food scarcity and water pollution are global challenges intensified by population growth, climate change, and unsustainable resource use. In this context, aquaponics offers a sustainable alternative by combining fish farming and plant cultivation, optimizing water and nutrient cycles. However, its adoption is often hindered by high implementation costs and the complexity of monitoring and control.

This project proposes a monitoring and control architecture for aquaponic systems, structured according to the ISA-95 standard and integrated with Internet of Things (IoT) technologies. Following a comprehensive literature review, relevant technologies were classified according to the functional levels of the ISA-95 model. A recommender agent was developed on the N8N platform to suggest personalized technological configurations based on user profiles and budget constraints.

The proposal was validated through three representative scenarios (low, medium, and high investment), demonstrating its practical applicability. The project aims to democratize access to automation technologies for small-scale producers, foster sustainable agricultural practices, and contribute to food security, environmental sustainability, and educational innovation in both rural and urban contexts.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Rodolfo Villamizar Mejía. PhD in Information Technologies and Electrical, Electronic Engineering.

## Introducción

En la búsqueda actual de sistemas de producción sostenibles, la acuaponía se presenta como una alternativa prometedora, al integrar la acuicultura e hidroponía en un sistema cerrado y recirculante. Sin embargo, su adopción en países como Colombia es aún limitada, en parte por la falta de soluciones tecnológicas accesibles y adaptadas a las condiciones locales.

Frente a esta problemática, el presente trabajo propone una arquitectura de supervisión y control para sistemas acuapónicos, estructurada según el estándar internacional ISA-95 e impulsada por tecnologías del Internet de las Cosas (IoT). Este enfoque busca facilitar la implementación gradual y escalable de soluciones digitales, permitiendo a diferentes tipos de usuarios acceder a herramientas que optimicen la gestión del sistema. Como punto de partida, se realizó una revisión detallada del estado del arte de sistemas acuapónicos que integran IoT. A partir de esta revisión se elaboró una matriz tecnológica basada en los cinco niveles del modelo ISA-95, identificando variables críticas, sensores, actuadores, microcontroladores, PLCs y plataformas en la nube.

Con esta base, se desarrolló un agente recomendador implementado en la plataforma N8N, diseñado para asistir en la selección de tecnologías según el nivel de implementación y la capacidad de inversión. El agente fue alimentado con la información técnica sistematizada a lo largo del trabajo de grado, organizada según los niveles del modelo ISA-95. Para su validación, se definieron tres perfiles de usuario (bajo, medio y alto costo), y se evaluó la pertinencia y coherencia de las recomendaciones generadas.

El resultado es una solución técnica organizada y adaptable, que aporta al desarrollo de la acuaponía inteligente en Colombia, promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles, automatizadas y alineadas con los retos del siglo XXI.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Diseñar una arquitectura de supervisión y control de ecosistemas acuapónicos, por niveles de acuerdo con el estándar ISA-95, empleando IoT para la transmisión y gestión de datos.

### 1.2 Objetivos Específicos

1. Establecer criterios de diseño de una arquitectura de supervisión y control, basado en una revisión del estado del arte de sistemas acuapónicos con aplicaciones IoT y otras tecnologías.

2. Definir la arquitectura de supervisión y control en ecosistemas acuapónicos alineado con los niveles definidos en el estándar ISA-95, integrando sensores, controladores y sistemas de gestión.

3. Establecer los elementos de supervisión y control de cada uno de los niveles de la arquitectura.

4. Proponer un agente recomendador para sistemas acuapónicos, fundamentado en la revisión del estado del arte, y validarlo con tres perfiles de usuario diferenciados por capacidad de inversión.

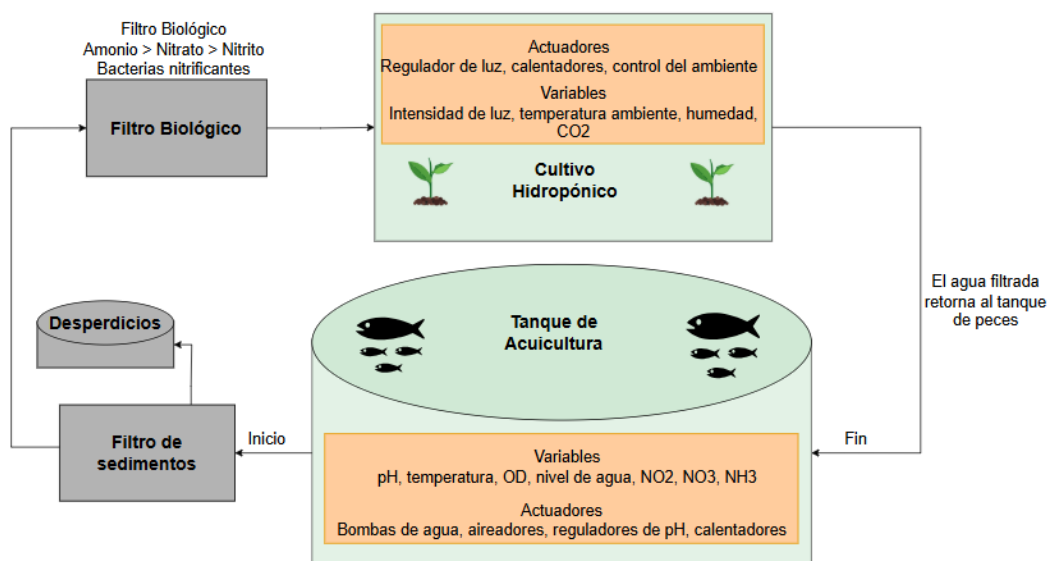
## 2. Marco teórico

Este capítulo reúne los conceptos que sustentan el diseño de una solución técnica para sistemas acuapónicos. Se inicia con la definición y principios de la acuaponía, destacando sus componentes clave y su relevancia como alternativa sostenible. Luego, se introduce el Internet de las Cosas (IoT) como tecnología clave para la adquisición de datos, el control automatizado y la gestión remota de procesos, describiendo su arquitectura funcional. Asimismo, se aborda el modelo ISA-95 como referencia para organizar el sistema por niveles jerárquicos, facilitando su integración y escalabilidad. Posteriormente se presentan las tecnologías empleadas para la supervisión, control y automatización y finalmente se presentan las variables fisicoquímicas que condicionan la estabilidad del ecosistema.

### 2.1 Acuaponía

#### Figura 1

*Sistema acuapónico*



*Nota.* Elaboración propia. Se muestra un esquema general de un sistema acuapónico, donde se

ilustran las principales etapas del proceso y la interacción entre los distintos componentes.

La acuaponía es un sistema de producción integrado que combina la acuicultura (cría de peces u organismos acuáticos) con la hidroponía (cultivo de plantas sin suelo), generando un ecosistema simbiótico y autosostenible. Este tipo de sistema aprovecha los desechos metabólicos de los peces como fuente de nutrientes para las plantas, gracias a la acción de bacterias nitrificantes que convierten el amoníaco en nitratos asimilables. A su vez, las plantas absorben estos compuestos del agua, purificándola antes de que regrese al tanque de peces, cerrando un ciclo ecológico eficiente (Tidwell, 2012; Tyson et al., 2011). En la Tabla 1 del Apéndice E se detallan los componentes presentados en la Figura 1, describiendo su función dentro del sistema acuapónico y algunas características.

Como se muestra en la Tabla 1 del Apéndice E, un sistema acuapónico se compone de diversos elementos interconectados que permiten su funcionamiento integral. Más allá de su estructura, la acuaponía ofrece múltiples ventajas desde el punto de vista de la sostenibilidad: reduce hasta un 90-95% el consumo de agua en comparación con la agricultura convencional, elimina el uso de fertilizantes químicos y pesticidas, y permite producir simultáneamente alimentos de origen animal y vegetal (Somerville et al., 2022; Yep & Zheng, 2019). Adicionalmente, su adaptabilidad a diversos contextos como zonas urbanas, rurales o regiones con recursos hídricos limitados, la convierte en una opción viable frente a los desafíos del cambio climático y la seguridad alimentaria global (Palm et al., 2018; Somerville et al., 2022).

En su implementación, los sistemas acuapónicos pueden adoptar configuraciones acopladas o desacopladas. Los sistemas acoplados integran todos los componentes en un circuito cerrado, facilitando su instalación y reduciendo costos, mientras que los desacoplados separan subsistemas para un mayor control técnico, lo cual puede ser beneficioso en escalas comerciales

(Yep & Zheng, 2019). La FAO (Food And Agriculture Organization Of The United Nations) resalta que los sistemas de pequeña escala, especialmente aquellos basados en camas de cultivo con sustrato, son ideales para zonas rurales, instituciones educativas y proyectos comunitarios debido a su simplicidad, bajo costo y alto valor pedagógico.

A nivel productivo, los sistemas acuapónicos han mostrado rendimientos comparables a los sistemas hidropónicos tradicionales, a pesar de operar con menores niveles de nutrientes, gracias a la acción de microorganismos benéficos que promueven la absorción de nutrientes (Yep & Zheng, 2019). Su versatilidad permite cultivar especies vegetales de alto valor como lechugas, espinacas, albahaca, tomates, y peces como tilapia, bagre o carpa, promoviendo la diversificación de ingresos (Somerville et al., 2022).

No obstante, mantener la estabilidad biológica del sistema exige monitoreo constante de parámetros clave como el pH, la temperatura del agua, el oxígeno disuelto, los niveles de amoníaco, nitritos y nitratos, así como la relación entre la biomasa de peces y el área de cultivo vegetal (Somerville et al., 2022; Tyson et al., 2011). Estas variables son determinantes para el rendimiento y la salud de los organismos involucrados, siendo necesarias para evitar acumulación de compuestos tóxicos, deficiencias nutricionales o estrés fisiológico.

## **2.2 Internet de las Cosas (IoT) como habilitador tecnológico**

El Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) es un paradigma tecnológico que habilita la interconexión de objetos físicos (equipos, sensores, actuadores y dispositivos) a través de redes digitales, permitiendo la captura, transmisión, análisis y uso inteligente de datos sin intervención humana directa. En el contexto de sistemas acuapónicos, el IoT se convierte en un componente clave para la supervisión y el control remoto de variables ambientales y biológicas críticas, optimizando la eficiencia del sistema y reduciendo la necesidad de intervención manual)

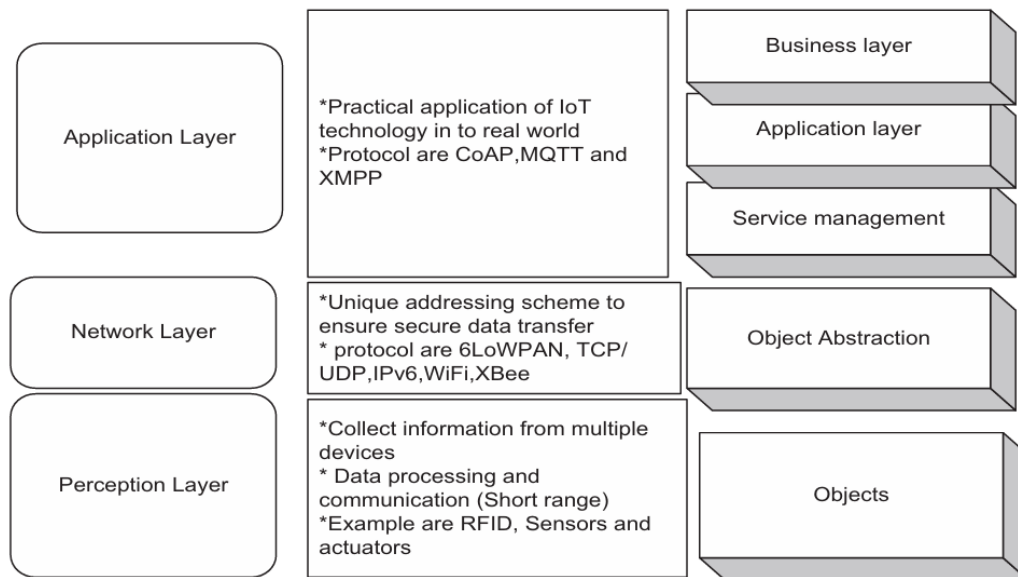
(Singh et al., 2018).

### 2.2.1 Arquitectura de IoT

En el contexto de los sistemas tecnológicos, una arquitectura se refiere a la organización estructural de los componentes físicos y lógicos que integran un sistema, así como a las relaciones funcionales entre ellos. En el caso de los sistemas IoT, la arquitectura define cómo se conectan e interactúan los dispositivos, las redes de comunicación y las aplicaciones, con el fin de habilitar la captura, transmisión, procesamiento y utilización de datos. De manera general, la arquitectura de un sistema IoT se estructura en tres capas fundamentales: percepción, red y aplicación.

**Figura 2**

*Arquitectura de Internet de las Cosas (IoT)*



*Nota.* Tomado de *Internet of Things in Automotive Industries and Road Safety* (p. 7), por R. Singh,

R. Chimata, A. Gehlot, B. Singh, y P.S.Ranjit, 2018, *River Publishers*.

[https://www.riverpublishers.com/book\\_details.php?book\\_id=569](https://www.riverpublishers.com/book_details.php?book_id=569). Copyright 2018.

**2.2.1.1 Capa de percepción.** Es responsable de la adquisición de datos del entorno físico mediante sensores inteligentes y dispositivos electrónicos. En el contexto de sistemas IoT, incluye sensores para variables como temperatura, pH, oxígeno disuelto, humedad, o nivel de agua. Estos datos pueden provenir de dispositivos homogéneos o heterogéneos integrados en redes de sensores inalámbricos (WSNs). Además, esta capa incorpora actuadores (como válvulas, bombas o sistemas de iluminación) que permiten ejecutar acciones automáticas en función de los datos recibidos. Los componentes de esta capa se comunican entre sí a través de distintos protocolos de corto o mediano alcance, tales como XBee, Bluetooth, RF (2.4 GHz/433 MHz), nRF (identificación) o Wi-Fi, según los requerimientos de la aplicación (Singh et al., 2018, p. 7).

**2.2.1.2 Capa de red.** Es intermediaria entre los dispositivos de campo (capa de percepción) y las plataformas de gestión y análisis (capa de aplicación). Su función principal es asegurar el transporte eficiente, seguro y continuo de los datos capturados por los sensores hacia servidores locales o plataformas en la nube. Para ello, se apoya en tecnologías de comunicación tanto inalámbricas como cableadas, incluyendo Wi-Fi, LoRa, ZigBee, NB-IoT, Bluetooth, Ethernet y redes móviles (4G/5G), cuya elección depende de factores como el rango de cobertura, consumo energético, ancho de banda requerido y condiciones del entorno (Singh et al., 2018, p. 7).

**2.2.1.3 Capa de aplicación.** Representa la interfaz entre el sistema IoT y el usuario final. Aquí es donde los datos procesados se traducen en valor mediante visualización, análisis, reportes, alertas o acciones automatizadas. Esta capa permite cerrar la brecha entre la operación técnica del sistema y la toma de decisiones, facilitando así el monitoreo remoto, la configuración de reglas de control y la integración con otras plataformas o servicios (Singh et al., 2018, p. 7).

## ***2.2.2 Aplicación del IoT en la agricultura***

El Internet de las Cosas (IoT) ha revolucionado el sector agrícola al introducir soluciones

tecnológicas escalables que permiten una gestión más precisa, eficiente y sostenible. Su aplicación abarca desde el monitoreo automatizado en invernaderos y campos de golf, hasta redes de estaciones meteorológicas y sistemas de compostaje inteligente (Singh et al., 2018, p. 32).

Los sistemas acuapónicos se benefician ampliamente de estas capacidades ya que la integración de tecnología IoT permite la supervisión continua del entorno productivo mediante sensores que miden parámetros como temperatura, sólidos disueltos totales (TDS), pH, concentración de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), oxígeno disuelto (OD), entre otros. Simultáneamente, los actuadores pueden controlar dispositivos clave como bombas, aireadores, válvulas, entre otros, habilitando respuestas automáticas frente a condiciones variables.

Este enfoque automatizado ayuda a incrementar la eficiencia operativa y también contribuye a mantener la estabilidad de las condiciones biológicas del sistema acuapónico, esenciales para el crecimiento saludable de peces y plantas.

### ***2.2.3 Plataformas y escalabilidad***

La infraestructura tecnológica que soporta estos sistemas puede adaptarse a distintos niveles de complejidad. En contextos de bajo costo o prototipos, es común emplear microcontroladores como el ESP32 o la Raspberry Pi junto a plataformas de visualización accesibles como Node-RED, ThingSpeak, Blynk o ThingsBoard (Wan et al., 2022). Estas soluciones permiten implementar reglas de control, generar registros históricos y recibir alertas en tiempo real sin depender de servicios en la nube de alto costo (Anggi Firdaus et al., 2023).

En contraste, para aplicaciones industriales más exigentes, se emplean controladores robustos (como PLCs), redes industriales seguras y plataformas empresariales como AWS IoT, Azure IoT o Google Cloud IoT, que ofrecen mayor capacidad de análisis, escalabilidad global y cumplimiento normativo. Una ventaja clave del IoT es la escalabilidad modular, ya que nuevos

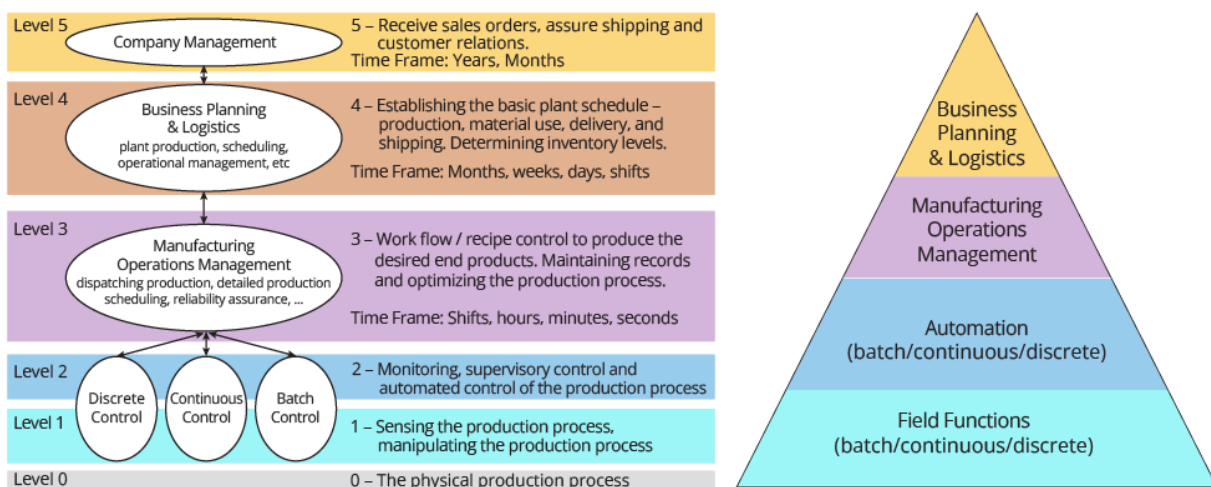
sensores, tanques o cultivos pueden integrarse fácilmente añadiendo nodos al sistema, sin necesidad de rediseñar por completo la arquitectura. Esto permite evolucionar desde soluciones domésticas hasta implementaciones comerciales complejas (Wan et al., 2022).

### 2.3 Estándar ISA-95

La norma ISA-95, también reconocida como IEC 62264, es un estándar internacional desarrollado por la International Society of Automation que busca establecer un marco estructurado para integrar de manera eficiente los sistemas de control de planta (como PLC, SCADA o DCS) con los sistemas de gestión empresarial (ERP). Su finalidad es resolver los problemas de interoperabilidad, duplicación de datos y ambigüedad de terminología entre estos niveles, permitiendo una comunicación estandarizada y segura en entornos productivos (International Society of Automation, 2000; OPC Foundation Inc, 2013; SYDLE, 2024).

#### Figura 3

*Niveles funcionales y pirámide según el estándar ISA-95*



*Nota.* Tomado de *ISA-95 standard overview*, por ISA, n.d. (<https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-95-standard>)

ISA-95 se basa en una jerarquía funcional de cinco niveles, alineada con el modelo de Purdue, que va desde el nivel físico de sensores y actuadores (Nivel 0), hasta los procesos de planeación estratégica y gestión empresarial (Nivel 4). Esta jerarquía permite estructurar sistemas industriales de forma modular, facilitando la asignación de funciones, tecnologías y responsabilidades a cada nivel (Casseiro, 2024; Garcia et al., 2018; International Society of Automation, 2000). La jerarquía funcional de ISA-95 suele representarse mediante una pirámide que ilustra la distribución de funciones desde el nivel físico hasta el empresarial, como se muestra en la Figura 3.

### ***2.3.1 Integración de ISA-95 con el IoT***

La integración de ISA-95 con tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) es clave en la evolución hacia sistemas inteligentes e interconectados bajo el enfoque de la Industria 4.0. En este contexto, dispositivos como sensores, actuadores, microcontroladores y gateways, que tradicionalmente operan en los niveles 0 a 2, generan datos en tiempo real que requieren ser contextualizados, estructurados y gestionados eficientemente. ISA-95 proporciona el modelo semántico y jerárquico necesario para que esos datos sean interpretados y utilizados por sistemas MES (Nivel 3) y ERP (Nivel 4) de manera coherente y estandarizada (Delsing, 2017; Garcia et al., 2018).

### ***2.3.2 Aplicación en sistemas acuapónicos***

Aunque ISA-95 fue desarrollada originalmente para entornos de manufactura, su diseño modular y su orientación a procesos lo hacen aplicable a otras áreas productivas como los sistemas acuapónicos, que integran procesos físicos, biológicos y tecnológicos. En este contexto, los sensores y actuadores que monitorean las diferentes variables del sistema o procesos conforman los niveles 0 y 1 de la jerarquía. A través de controladores locales (Raspberry Pi,

Microcontroladores y/o PLCs), se puede implementar el Nivel 2, encargado de regular condiciones en tiempo real (International Society of Automation, 2000).

Posteriormente, un software de control (SCADA o MES ligero) puede gestionar la operación del sistema completo, registrando ciclos de alimentación, alarmas, tasas de recirculación o tiempos de cosecha, cumpliendo funciones del Nivel 3. Finalmente, un sistema ERP puede utilizar estos datos para planificación agrícola, gestión de inventario biológico, control de costos o trazabilidad del producto, integrando así el Nivel 4. Esto convierte a ISA-95 en una columna vertebral para escalar sistemas acuapónicos desde prototipos hasta implementaciones comerciales o industriales, garantizando compatibilidad con soluciones de Industria 4.0 (International Society of Automation, 2000).

### ***2.3.3 Tendencias actuales: UNS y enfoque de Industria 4.0***

Con la llegada de la Industria 4.0, la forma de integrar los distintos niveles funcionales definidos por el estándar ISA-95 ha evolucionado. Tradicionalmente, la comunicación entre niveles se realizaba de manera jerárquica y punto a punto, en lo que puede considerarse un flujo de datos descentralizado, donde cada sistema intercambia información directamente con otro sin un repositorio común. En contraste, la aparición de arquitecturas basadas en el concepto de Unified Namespace (UNS) ha permitido establecer un flujo de datos centralizado, en el cual todos los sistemas industriales (desde sensores hasta plataformas de gestión) publican y consumen datos desde un espacio común, accesible y estandarizado (Manditereza, 2022).

Este enfoque promueve la interoperabilidad, la escalabilidad y la visibilidad en tiempo real, características clave en entornos industriales modernos. A su vez, permite mantener la estructura jerárquica del ISA-95, pero con una arquitectura desacoplada que facilita la integración progresiva de tecnologías IoT, plataformas de supervisión, analítica y sistemas empresariales.

## 2.4 Tecnologías de supervisión, control y automatización

En los sistemas acuapónicos, la supervisión, control y automatización permiten mantener condiciones estables ante perturbaciones, optimizando variables clave del ecosistema. Estos sistemas integran sensores, dispositivos de control locales que procesan la información, y plataformas de supervisión que permiten su análisis, visualización y respuesta automática. La adopción de tecnologías de supervisión y control ha cobrado una creciente importancia en trabajos de estandarización y diseño de sistemas acuapónicos, así como en la práctica cotidiana de productores, quienes cada vez demandan soluciones más conectadas y accesibles (Colt et al., 2021, 2024; Pattillo et al., 2022).

Es clave diferenciar los conceptos monitoreo, supervisión y control, ya que representan distintos niveles de complejidad. El monitoreo se limita a la recolección y visualización de datos, la supervisión añade análisis de umbrales y alertas, y el control ejecuta acciones para corregir desviaciones. Las tecnologías de supervisión y control implementadas en sistemas acuapónicos pueden clasificarse según su función dentro de la jerarquía ISA-95, en el Apéndice E se encuentra la Tabla 2.

Estas tecnologías no solo viabilizan el funcionamiento técnico de los sistemas acuapónicos, sino que permiten mantener parámetros críticos dentro de rangos seguros, reduciendo riesgos sanitarios (Maucieri et al., 2018; Tyson et al., 2011). La automatización del sistema mediante SCADA o plataformas IoT favorece la trazabilidad y la estandarización operativa. La analítica avanzada contribuye a optimizar recursos como agua y energía, finalmente las arquitecturas modulares permiten escalar desde sistemas domésticos hasta comerciales sin rediseño (Pattillo et al., 2022).

## **2.5 Variables en la acuaponía**

En un sistema acuapónico, el éxito del proceso depende del control de las variables fisicoquímicas que inciden directamente sobre la salud de los peces, el desarrollo de las plantas y la actividad de las bacterias nitrificantes en el biofiltro. Estas variables constituyen la base del diseño operativo, pues definen los rangos críticos de operación, el dimensionamiento de los componentes y la estrategia de supervisión. en el Apéndice E se presenta la Tabla 3

## **2.6 Normas y/o leyes para la acuaponía en Colombia**

La acuaponía, al combinar la acuicultura y la hidroponía, se ve influenciada por diversas normativas que regulan tanto la producción animal acuática como el uso del suelo y los recursos hídricos. A nivel general, el marco legal en Colombia busca establecer requisitos para la sanidad, inocuidad, sostenibilidad y formalización de las actividades productivas.

En el ámbito de la acuicultura, la Ley 13 de 1990 establece un marco para el fomento y desarrollo de la actividad pesquera y acuícola en Colombia (Ley 13 de 1990, 1990). Complementando esta ley, el Decreto 1835 de 2021 se encarga de reglamentar el Subsistema de Cuarentena de la Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (AUNAP), crucial para el control sanitario en la producción acuícola (Decreto 1835 de 2021, 2021a; Decreto 1835 de 2021, 2021b). Además, el Decreto 1071 de 2015, del Sector Administrativo Agropecuario, Pesquero y de Desarrollo Rural, compila normativas relacionadas con este sector, incluyendo aspectos de acuicultura (Decreto 1071 de 2015, 2024).

Para la inocuidad de los productos acuáticos destinados al consumo humano, la Resolución 776 de 2008 del Ministerio de Salud y Protección Social establece los requisitos fisicoquímicos y microbiológicos para productos de la pesca, incluyendo pescados, moluscos y crustáceos. Esta resolución fue modificada parcialmente por la Resolución 000122 de 2012 (Resolución 000122 de

2012, 2012; Resolución 776 de 2008, 2008). En relación con la exportación, la Resolución No. 00009907 de 2024 del ICA establece requisitos para el registro de establecimientos productores de animales acuáticos (RESOLUCIÓN No.00009907, 2024).

En cuanto a la gestión del recurso hídrico, la Ley 373 de 1997 establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua (Ley 373 de 1997, 1997). El Decreto 1076 de 2015, del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, es relevante al consolidar la normativa ambiental, incluyendo aspectos relacionados con la concesión y uso del agua (Decreto 1076 de 2015, 2025).

Adicionalmente, el Decreto 1500 de 2007 del Departamento Administrativo de la Función Pública, aunque más amplio, establece el reglamento técnico que se aplica a todas las empresas que producen y comercializan alimentos para consumo humano (Decreto 1500 de 2007, 2007). Por último, la Clasificación de las tierras por su capacidad de uso del IGAC proporciona criterios para la utilización adecuada del suelo (Clasificación de Las Tierras Por Su Capacidad de Uso, 2021). El Decreto 1780 de 2015 también es relevante en el ámbito nacional (Decreto 1780 de 2015 Nivel Nacional, 2015).

### 3. Metodología

Esta investigación es de carácter aplicado, con un enfoque tecnológico y descriptivo. Comienza con una revisión de documentos como artículos, libros, páginas web, con el fin de establecer los criterios de diseño, seguido por la definición de una arquitectura de supervisión y control basada en el estándar ISA-95, integrada con tecnologías del Internet de las Cosas (IoT). A partir de esta arquitectura, se desarrolla un agente recomendador, cuya funcionalidad es validada mediante tres perfiles de usuario diferenciados por el presupuesto de cada usuario.

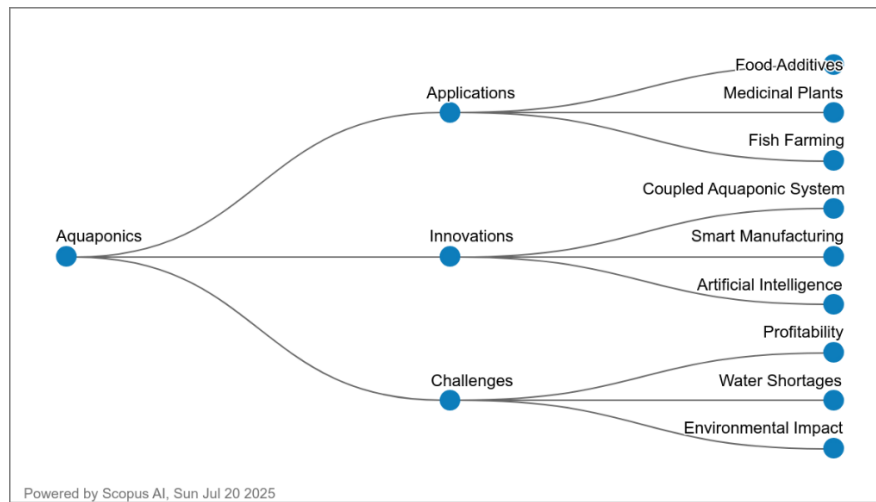
El desarrollo del proyecto, se utilizaron diversas herramientas de apoyo: bases de datos académicas como IEEE Xplore, ScienceDirect, Undermind y Scopus IA para el levantamiento del estado del arte; asistentes de inteligencia artificial como ChatGPT y Gemini para la redacción técnica y estructuración de ideas; Draw.io para la elaboración de diagramas; N8N para el desarrollo e implementación del agente recomendador; y Mendeley para la gestión de citas y referencias bibliográficas.

#### 3.1 Revisión documental y establecimiento de criterios de diseño

Con apoyo las herramientas Scopus IA y Undermind, se generó el mapa conceptual de la Figura 4 a partir del prompt “Acuaponía, desafíos e innovaciones”, esto permitió identificar ejes temáticos clave como aplicaciones tecnológicas, retos del sistema y áreas de innovación. A partir de este análisis preliminar, se definieron las líneas principales de búsqueda y se orientó la revisión hacia tres conceptos fundamentales para este trabajo: los sistemas acuapónicos, el Internet de las Cosas (IoT) y el estándar ISA-95. Con base en estos ejes, se desarrolló la revisión detallada de literatura académica, seleccionando artículos y documentos que abordan dichos temas desde distintas perspectivas técnicas y metodológicas.

**Figura 4**

*Mapa conceptual “Acuaponía, desafíos e innovaciones”*



*Nota.* Mapa conceptual generado con SCOPUS IA a partir del análisis del prompt "Acuaponía, desafíos e innovaciones".

De la información extraída en esta etapa, se construyó una hoja de cálculo en la que se registraron y clasificaron los componentes tecnológicos (sensores, actuadores, controladores, plataformas, entre otros) descritos en cada artículo consultado (Apéndice B). Esta clasificación se organizó conforme a los niveles de la pirámide de automatización del estándar ISA-95, lo que permitió identificar patrones en la implementación de tecnologías, variables comúnmente monitoreadas y los niveles más abordados en los estudios revisados.

De forma paralela, se analizaron fuentes de tipo review que abordaban la evolución, desafíos y oportunidades en la integración de tecnologías digitales en sistemas acuapónicos. Estos análisis sirvieron como base para establecer una visión crítica sobre las necesidades actuales del sector, justificando así el diseño de una arquitectura de supervisión y control.

### **3.2 Definición de la arquitectura basada en el estándar ISA-95**

Para la construcción de la arquitectura, se revisaron diversas propuestas de arquitecturas

IoT y sistemas aplicados a la acuaponía, junto con el modelo jerárquico definido por el estándar ISA-95. Este modelo sirvió como base para definir una secuencia lógica de intercambio de información entre dispositivos físicos, sistemas de control, plataformas de visualización y capas de gestión, considerando el flujo operativo típico de un sistema acuapónico. Aunque la mayoría de los estudios analizados se concentraron en los niveles inferiores del modelo (sensado y control), se reconoció la relevancia de los niveles superiores para escenarios de mayor complejidad, donde se requiere trazabilidad, análisis de datos y toma de decisiones más allá del control local, alineados con los principios de la Industria 4.0.

El diseño se orientó a una arquitectura modular y escalable, capaz de adaptarse a distintos perfiles de usuario, desde pequeños productores hasta sistemas industriales o de investigación. Se analizaron diversas formas de organizar el flujo de información entre los niveles definidos por ISA-95, evaluando aspectos como la centralización, la interoperabilidad y la capacidad de integración tecnológica. Se consideró pertinente representar la arquitectura bajo dos configuraciones diferenciadas: una basada en Unified Namespace (UNS), adecuada para arquitecturas modernas altamente integradas, y otra sin UNS, con un enfoque más descentralizado, apropiado para aplicaciones simples o de bajo costo. Estas configuraciones permiten reflejar los distintos grados de madurez tecnológica.

### **3.3 Selección de elementos tecnológicos por nivel**

Con base en la arquitectura, se seleccionaron las tecnologías específicas para cada uno de los niveles del modelo ISA-95. Este proceso consistió en identificar sensores, actuadores, controladores, plataformas de visualización y gestión que cumplieran con los criterios establecidos para la aplicación en sistemas acuapónicos. La búsqueda se orientó por una serie de hojas de evaluación elaboradas en Excel (Apéndice C), organizadas por diferentes categorías (sensores,

actuadores, PLCs, microcontroladores, plataformas de la nube). En cada hoja se sistematizó información técnica de múltiples dispositivos, obtenida de sus respectivas hojas de datos y páginas web oficiales de fabricantes y/o distribuidores, permitiendo una comparación basada en criterios como precisión, rango de operación, tipo de conectividad, facilidad de integración, escalabilidad y costo estimado.

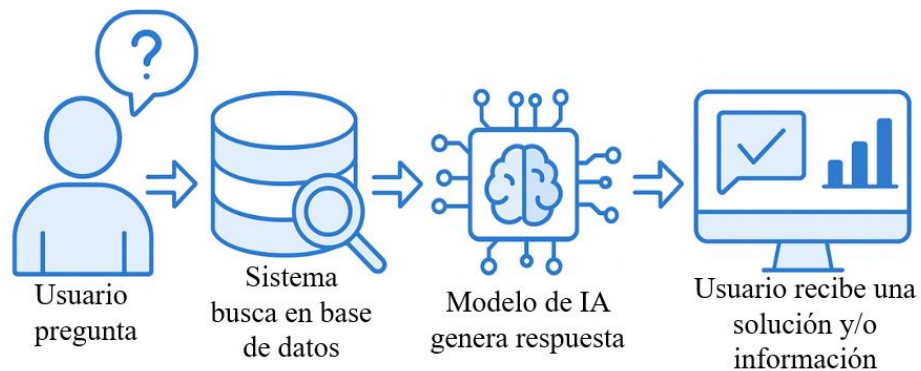
Esta selección se apoyó en la frecuencia de aparición y recomendación de estas tecnologías en la literatura consultada, incluyendo casos de estudio, artículos científicos y documentos técnicos, lo que permitió priorizar soluciones ampliamente validadas por la comunidad especializada en acuaponía.

### **3.4 Agente recomendador**

A partir de la información sistematizada en las matrices de evaluación (Apéndice C), y con el fin de asistir a distintos tipos de usuarios en la selección de tecnologías apropiadas para sistemas acuapónicos, se diseñó e implementó un agente recomendador basado en inteligencia artificial. Este agente permite ofrecer respuestas personalizadas y fundamentadas según el nivel de implementación (siguiendo estándar ISA-95), el tipo de componente (sensor, actuador, etc.) y el perfil del usuario.

#### ***3.4.1 Arquitectura del agente***

El agente se construyó siguiendo un enfoque de Recuperación Aumentada con Generación (RAG, por sus siglas en inglés), el cual combina una base de conocimiento estructurada con un modelo de lenguaje que genera respuestas a partir de información relevante recuperada. Este enfoque permite mantener la trazabilidad y precisión de las recomendaciones, evitando respuestas genéricas no fundamentadas. La Figura 5 muestra el flujo de funcionamiento del agente.

**Figura 5***Flujo funcionamiento del agente*

*Nota.* Elaboración propia. Explica el funcionamiento del agente.

### 3.4.2 Plataforma de desarrollo

La implementación del agente recomendador, explicada a continuación de forma general, se desarrolla con mayor profundidad técnica en el Apéndice D.

Se utilizó N8N, una herramienta de automatización de flujos de trabajo que permite orquestar múltiples servicios sin necesidad de programación avanzada. Se desarrollaron dos flujos principales:

**Flujo de carga a la base de datos vectorial (Pinecone).** Permite indexar conocimientos extraídos del trabajo de grado y las hojas de cálculo clasificadas por nivel ISA-95 (Apéndice C).

**Flujo de interacción con el usuario (chatbot).** Permite consultar esa base de conocimientos a través de lenguaje natural y generar respuestas contextualizadas mediante un modelo de lenguaje de OpenAI.

### 3.4.3 Rol del agente en la arquitectura

El agente funciona como una capa de soporte inteligente para la toma de decisiones. No reemplaza la arquitectura técnica propuesta, sino que actúa como asistente que traduce el

conocimiento técnico a recomendaciones adaptadas al usuario. Esto refuerza la adopción y escalabilidad de la solución planteada, al brindar apoyo en la fase de diseño o mejora del sistema acuapónico.

### **3.5 Evaluación del agente recomendador**

Con el objetivo de evaluar el funcionamiento del agente recomendador, se plantearon tres perfiles de usuario diferenciados por su capacidad de inversión y nivel de complejidad tecnológica bajo, medio y alto. A cada perfil se le aplicó el agente recomendador con el fin de observar las soluciones tecnológicas sugeridas. Dichas recomendaciones fueron generadas a partir del contenido técnico extraído del presente documento (tesis) y de las hojas de cálculo clasificadas por niveles ISA-95 (Apéndice C), lo que permitió analizar la pertinencia de las recomendaciones generadas frente a escenarios reales de implementación.

#### ***3.5.1 Caso 1 - Usuario sistema de baja inversión***

Este perfil corresponde a un pequeño productor rural que desea implementar un sistema acuapónico básico con fines de emprendimiento o producción comercial a pequeña escala. Su objetivo principal es monitorear de forma remota las variables más importantes del sistema, priorizando una solución de bajo costo, fácil de implementar y operar.

#### ***3.5.2 Caso 2 - Usuario sistema de mediana inversión***

Este perfil representa a un usuario con recursos moderados, que busca implementar o mejorar un sistema acuapónico con funcionalidades más avanzadas. Puede partir desde cero o tener como base una solución existente, la cual desea ampliar integrando tecnologías como visualización más detallada, sistemas de alerta y cierto grado de automatización.

### ***3.5.3 Caso 3 - Usuario sistema de alta inversión***

Este perfil representa a un usuario con alta capacidad de inversión, como una institución académica, empresa o inversionista que busca implementar o ampliar un sistema acuapónico de gran escala. El objetivo es contar con un sistema altamente automatizado, con mínima intervención humana, que integre sensores, actuadores y plataformas avanzadas de supervisión, control y análisis de datos. Se considera la incorporación de los niveles superiores del modelo ISA-95 incluyendo operaciones MES (nivel 3) y ERP (nivel 4), para una gestión más integral de la producción y toma de decisiones.

## 4. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del desarrollo metodológico propuesto. Se exponen los productos derivados del análisis del estado del arte, la definición de la arquitectura de supervisión y control basada en el modelo ISA-95, la clasificación tecnológica por niveles, y la implementación del agente recomendador en tres perfiles de usuario según nivel de inversión.

### 4.1 Revisión documental y criterios de diseño

Como resultado del proceso de revisión documental, se consultaron diversas fuentes académicas y técnicas relacionadas con el diseño de sistemas de supervisión y control aplicados a ecosistemas acuapónicos. La mayoría de los trabajos revisados presentaban soluciones centradas en el monitoreo en tiempo real, haciendo uso de tecnologías IoT, plataformas en la nube y sistemas embebidos. Sin embargo, se identificó una escasa aplicación de marcos de referencia estandarizados, como el modelo ISA-95, en este tipo de sistemas.

La ausencia de una estructura jerárquica clara para la organización de dispositivos, datos y procesos motivó la orientación del presente trabajo hacia la integración del modelo ISA-95. La adopción de este estándar permite estructurar de manera lógica y escalable los diferentes niveles de supervisión y control, desde el registro de variables físicas hasta la toma de decisiones operativas, aportando así un marco más robusto para el desarrollo de soluciones en acuaponía.

A partir de la revisión se construyó una hoja de cálculo en Excel en la que, por cada artículo analizado, se registraron los niveles abordados según la pirámide de automatización del modelo ISA-95, junto con los elementos tecnológicos involucrados. Esta matriz permitió identificar qué variables se monitoreaban, qué sensores y controladores se utilizaban, y qué plataformas de

supervisión estaban presentes, proporcionando una visión comparativa del panorama actual. El documento completo puede consultarse en el Apéndice B

Complementariamente, se desarrolló una segunda hoja de cálculo en la que se recopilaron fichas técnicas comparativas de los distintos componentes tecnológicos identificados en la literatura. Estas fichas abarcan variables, sensores, actuadores, microcontroladores, PLCs y plataformas en la nube, caracterizados por atributos como precisión, tiempo de respuesta, conectividad, tipo de alimentación, escalabilidad, prioridad, rango óptimo y costo estimado. Si bien el punto de partida fue la revisión documental, esta información se complementó mediante la búsqueda de fichas técnicas oficiales y la identificación de tecnologías aplicadas en proyectos reales del sector agrícola. La estructuración detallada de estos datos y su organización se desarrolla con mayor profundidad en la sección 4.3 de resultados, “*Clasificación tecnológica por niveles*”. El documento completo puede consultarse en el Apéndice B.

La matriz por artículo y las fichas comparativas constituyen un dataset técnico que fundamenta los criterios de selección tecnológica utilizados en este trabajo. Además, sirvieron como insumo directo para el diseño del agente recomendador, permitiendo una toma de decisiones más informada, sistemática y adaptable a los diferentes perfiles de usuario.

## **4.2 Arquitectura propuesta basada en ISA-95**

Se desarrolló una arquitectura general para la supervisión y control de sistemas acuapónicos, basada en el modelo ISA-95 e integrada con tecnologías de IoT. La propuesta se estructura a partir tres diagramas fundamentales, que en conjunto conforman la solución integral:

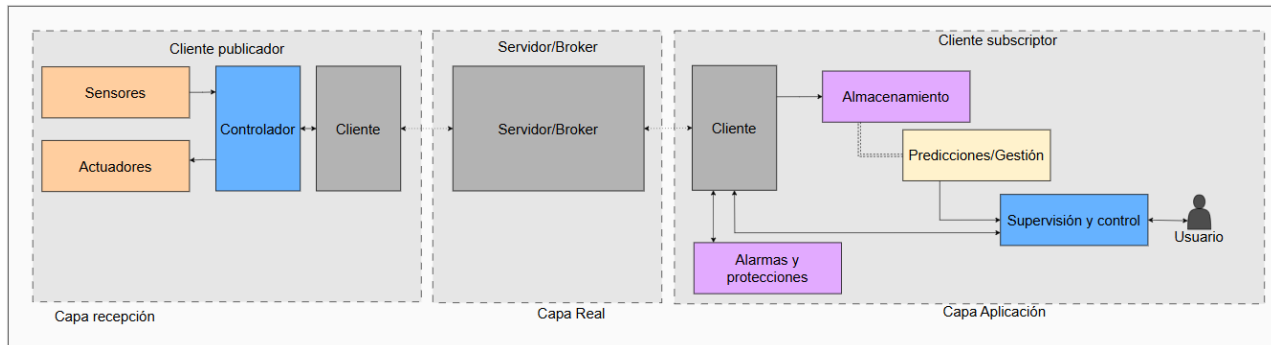
### ***4.2.1 Flujo de información entre niveles ISA-95***

Se presenta un diagrama de bloques (Figura 6) que ilustra cómo fluye la información a lo largo de los cinco niveles definidos por el modelo ISA-95. Desde la captura de datos físicos (nivel

0) y el sensado/actuación (nivel 1), hasta la supervisión y monitoreo (nivel 2), la gestión de producción (nivel 3) y la toma de decisiones estratégicas (nivel 4), el esquema muestra la transformación progresiva de los datos y su uso para el control eficiente del sistema acuapónico.

**Figura 6**

*Diagrama arquitectura con flujo de información*



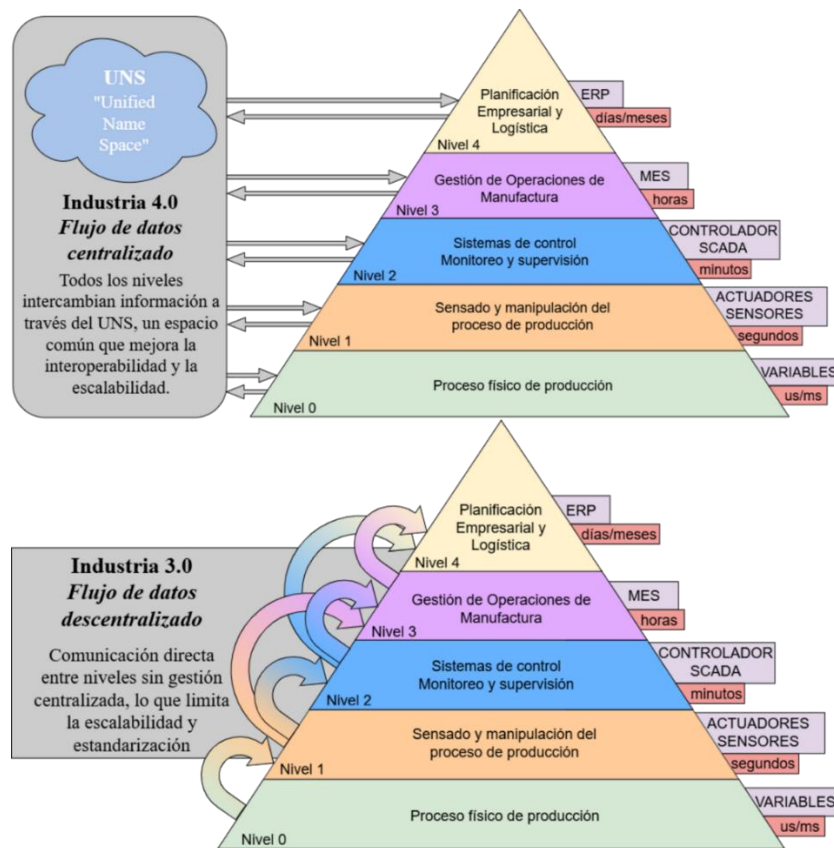
*Nota.* Elaboración propia. Basada en las arquitecturas analizadas del Apéndice B, Representa la interacción entre capas del IoT y niveles del estándar ISA 95 en sistemas acuapónicos.

#### 4.2.2 Pirámide de automatización

Se muestran dos representaciones en la figura 7 que comparan dos arquitecturas posibles, una con Unified Namespace (UNS), que presenta un espacio común de datos accesible por todos los niveles. y otra con flujo de información descentralizado que refleja la transmisión de datos entre niveles de forma secuencial. Disponer de ambos enfoques permite adaptar la arquitectura a distintos perfiles de usuario: el uso de UNS se orienta a sistemas más robustos e interconectados, mientras que la estructura descentralizada resulta más adecuada para implementaciones simples o con recursos limitados.

**Figura 7**

*Niveles funcionales y pirámide según el estándar ISA 95*



*Nota.* Elaboración propia. Adaptado de ISA-95 Series of Standards: Enterprise-Control System Integration (International Society of Automation, 2000).

#### 4.2.3 Representación de sistema acuapónico

Se presenta un esquema general de un sistema acuapónico (Figura 1), en el que se integran los elementos físicos (tanques, plantas, sensores, actuadores, entre otros). Este diagrama funciona como puente entre la teoría de arquitectura industrial y la realidad del sistema productivo, facilitando la comprensión de cómo se aplica la arquitectura propuesta en un entorno real.

Estos tres elementos conforman la arquitectura propuesta, y su integración permite comprender de manera clara cómo diseñar e implementar un sistema de supervisión y control en

acuaponía. La solución está pensada para ser modular y escalable, permitiendo su aplicación tanto en pequeños sistemas como en entornos más complejos o de investigación. Los tres diagramas mencionados pueden consultarse en el Apéndice C, en la hoja titulada "ARQUITECTURA". Allí se presenta de forma consolidada la representación gráfica de la solución propuesta, la cual sirve como guía práctica para el diseño e implementación de sistemas de supervisión y control en acuaponía.

### **4.3 Clasificación tecnológica por niveles**

Se desarrolló una documentación técnica que clasifica diferentes tecnologías aplicables a cada uno de los niveles definidos por el modelo ISA-95 (Apéndice C). Esta clasificación se organizó en un archivo en formato de hoja de cálculo de Excel, en el cual cada hoja representa una categoría tecnológica clave para la implementación del sistema de supervisión y control en acuaponía. La información recopilada se basó en documentación técnica de fabricantes, literatura académica y criterios de compatibilidad con sistemas acuapónicos. Para cada tecnología se incluyen atributos clave para cada nivel. A continuación, se describen brevemente los contenidos de cada hoja del archivo, el documento completo puede ser consultado en el Apéndice B:

#### ***4.3.1 Variables***

Se listan las principales variables fisicoquímicas y ambientales relevantes en un sistema acuapónico. Esto corresponde al Nivel 0 "Proceso físico de producción" en el estándar ISA-95. Para cada variable se incluye una definición, rangos de operación, la prioridad de monitoreo (entendida como el nivel de criticidad de su medición en el funcionamiento del sistema) y una descripción de su impacto, es decir, los efectos que su variación puede generar en la estabilidad del ecosistema acuapónico.

#### ***4.3.2 Sensores***

Se listaron diversas opciones de sensores para las variables descritas en la hoja de “SENSORES”. Cada sensor fue documentado con información técnica clave, incluyendo: referencia comercial, tipo de sensor, rango de medición, precisión, resolución, tiempo de respuesta, tipo de salida, voltaje de operación y un costo estimado en pesos colombianos (COP). Además, se incluyó un enlace a la hoja técnica oficial del fabricante (URL de documentación) y una columna de comentarios con observaciones prácticas o recomendaciones útiles para su implementación.

Cabe resaltar que también se identificaron sensores multifuncionales capaces de medir más de una variable simultáneamente; estos fueron incluidos en la misma tabla, indicando las variables que cubren.

#### ***4.3.3 Actuadores***

Se listaron diferentes opciones de actuadores asociados a las variables listadas en la hoja de “ACTUADORES”. Para cada actuador se documentó referencia comercial, tipo de actuador, función principal, modo de operación (por ejemplo, encendido/apagado, programado, temporizado), tipo de alimentación, tiempo de respuesta y un costo estimado en pesos colombianos (COP). Además, se incluyó una URL que remite a la documentación técnica del fabricante y una columna de comentarios con recomendaciones adicionales o consideraciones prácticas para su implementación.

#### ***4.3.4 Microcontroladores***

Se identificaron diversos microcontroladores utilizados en aplicaciones de supervisión y control, a partir del análisis documental descrito en el Apéndice B. Para cada microcontrolador se sistematizó información clave que facilita su selección según los requerimientos del sistema: referencia, voltaje de operación, capacidad de manejo de datos, memoria, capacidades de comunicación (inalámbrica y cableada), entorno de desarrollo (IDE), entre otras características.

#### **4.3.5 PLCs**

Se recopilaron distintos Controladores Lógicos Programables (PLC) enfocados a aplicaciones de mayor robustez e industrialización, como alternativa a los microcontroladores en escenarios donde se requiere mayor fiabilidad, escalabilidad y compatibilidad con plataformas SCADA. Para cada PLC se registraron atributos técnicos clave como: referencia, tipo de microcontrolador, voltaje de operación, capacidad de procesamiento de datos, memoria, capacidades de comunicación inalámbrica y cableada, entorno de desarrollo (IDE), entre otras características.

#### **4.3.6 Plataformas de la nube**

Esta sección presenta un conjunto de tecnologías que permiten implementar funcionalidades asociadas a los niveles 2, 3 y 4 del modelo ISA-95, incluyendo la supervisión de procesos, la gestión de operaciones y el análisis estratégico. Se recopilaron herramientas orientadas a la visualización de datos, el almacenamiento en la nube, el procesamiento en tiempo real, la escalabilidad del sistema y la integración con dispositivos IoT. Cada tecnología fue evaluada con base en criterios como su capacidad de visualización, análisis de datos, escalabilidad, modelo de seguridad, soporte para grandes volúmenes de dispositivos, protocolos de comunicación compatibles y existencia de opciones gratuitas. Además, se incorporaron dos columnas clave: una para indicar el nivel ISA-95 que aborda cada plataforma, y otra de comentarios que proporciona contexto adicional, recomendaciones de uso o detalles técnicos relevantes. Esta clasificación permite identificar qué herramientas son más adecuadas según el alcance y complejidad de su sistema, ya sea para construir una solución tipo SCADA, MES o incluso ERP, facilitando así el diseño de arquitecturas de supervisión y control robustas y escalables.

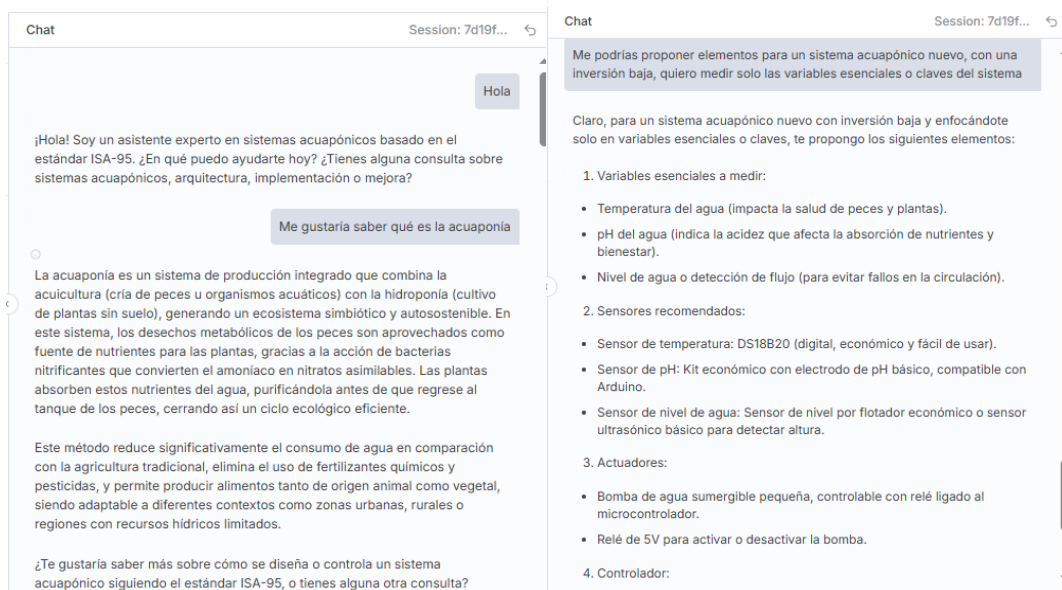
#### 4.4 Agente recomendador

Se desarrolló un agente recomendador utilizando la plataforma N8N, con el propósito de asistir a usuarios interesados en el diseño o mejora de sistemas acuapónicos. Una vez desarrollados los dos flujos de trabajo explicados en la metodología (el primero para cargar la información a la base de datos vectorial y el segundo para configurar el chatbot y vincularlo con dicha base como fuente de conocimiento) se procedió a su ejecución e interacción directa a través del entorno de N8N. Los resultados de la interacción con el flujo de trabajo se muestran en la Figura 8 y el Apéndice D.

Teniendo en cuenta que las respuestas realizadas fueron coherentes, relevantes y alineadas con la información cargada, se considera que el agente puede ser evaluado con los tres tipos de usuario definidos en la metodología.

#### Figura 8

##### *Primeras interacciones con el chatbot*



*Nota.* Capturas del entorno N8N.

#### **4.5 Validación agente recomendador**

El agente recomendador fue aplicado en tres escenarios representativos, definidos según niveles de inversión: baja, media y alta. Para cada perfil, se recopiló la respuesta generada por el agente frente a una consulta típica, considerando las necesidades y condiciones del usuario, las conversaciones completas para cada usuario pueden ser consultada en el Apéndice D. Al final de la sección, se presenta la Tabla 4, una rúbrica de evaluación que permite analizar cualitativamente los resultados en términos de pertinencia técnica, coherencia, adecuación al estándar ISA-95 y claridad-calidad de la recomendación.

##### ***4.5.1 Usuario baja inversión***

Este perfil representa a un usuario con recursos limitados, interesado en iniciar un sistema acuapónico básico. La consulta realizada se centró en qué sensores y controladores mínimos serían necesarios. Se resalta el uso de las variables esenciales del Apéndice C al ser una solución de bajo costo, un microcontrolador de bajo costo, el nivel 4 de la solución es opcional, prioriza que se pueda monitorear en tiempo real las variables como lo pedía el usuario y en general una solución fácil de implementar.

##### ***4.5.2 Usuario media inversión***

Corresponde a un usuario con interés en escalar su sistema, integrando supervisión remota y mayor automatización. El agente fue consultado sobre recomendaciones para mejorar el control y almacenamiento de datos. Se destaca el uso de las variables esenciales más recomendadas del Apéndice C para mejorar la eficiencia de la supervisión del sistema, el uso de microcontrolador o PLC si se quiere algo más robusto, y tecnologías con un poco de mejores características. Puede o no integrarse el nivel 4 del estándar. La interacción completa con el agente recomendador para este tipo de usuario puede consultarse en el Apéndice D.

### ***4.5.3 Usuario alta inversión***

En este caso se representa una entidad con capacidad técnica y financiera para implementar una arquitectura completa y orientada a investigación o producción intensiva. Se consultó por una solución integral robusta y automatizada.

Se destaca el uso de PLCs por su robustez, tecnologías y sistemas que se encuentran en la parte superior del estándar ISA 95 (nivel 3 y 4). Como se observó, el agente respondió de manera satisfactoria en los tres casos, lo cual se resume en la Tabla 4 y se retoma en la sección de conclusiones. La interacción completa con el agente recomendador para este tipo de usuario puede consultarse en el Apéndice D.

La rúbrica de evaluación aplicada a los tres perfiles de usuario definidos puede consultarse en la Tabla 4 del Apéndice E.

## 5. Conclusiones

1. se integraron de manera efectiva tres conceptos fundamentales: los sistemas acuapónicos, el IoT y el estándar ISA-95. Esta unión no sólo resultó en una arquitectura generalizada y escalable para la supervisión y el control de sistemas acuapónicos, sino que también propuso un marco estructurado que supera los enfoques encontrados en la literatura revisada.

2. La revisión del estado del arte evidenció que la mayoría de las soluciones se enfocan en montajes experimentales o monitoreo puntual, sin una estructura estandarizada. Este proyecto aportó una propuesta alineada con ISA-95 que permite escalar, replicar e integrar soluciones tecnológicas de forma modular y flexible.

3. Se recopiló y organizó información técnica proveniente de múltiples fuentes, la cual fue sistematizada en hojas de cálculo (Apéndice C), clasificando tecnologías por tipo y nivel, incluyendo variables de diseño como funcionalidad, documentación y costos. Esta base de datos técnica sirvió como insumo principal para el diseño e implementación de un agente recomendador, capaz de sugerir configuraciones tecnológicas personalizadas según las necesidades de diferentes tipos de usuarios y tipo de inversión.

4. La validación del agente recomendador, aplicado a tres perfiles de usuario, demostró su utilidad como apoyo en la selección de configuraciones tecnológicas según el contexto y presupuesto. Esta integración refuerza el valor práctico del trabajo y su aplicabilidad en escenarios reales.

5. Se logró construir una solución metodológica y tecnológica que no solo responde a los desafíos actuales de la supervisión de sistemas acuapónicos, sino que también sienta bases para futuras implementaciones más robustas, adaptables y estandarizadas en los sistemas acuapónicos.

## 6. Recomendaciones

1. Durante la revisión documental se identificó que el concepto de acuaponía ha sido ampliamente explorado en materiales académicos, particularmente en artículos tipo review y libros especializados. Muchos de estos trabajos destacan desafíos comunes en el desarrollo de sistemas acuapónicos, como la estandarización de procesos, la eficiencia en el uso de recursos y la integración tecnológica. Es recomendable que futuros estudios sigan profundizando en estos frentes, especialmente en el desarrollo de soluciones prácticas que respondan a los retos ya diagnosticados en la literatura.

2. Como resultado de la información recopilada, este trabajo optó por materializar parte del conocimiento en un agente recomendador. Sin embargo, esta misma base de datos estructurada puede utilizarse en el futuro para otros desarrollos tecnológicos, como sistemas expertos, plataformas educativas o herramientas de diseño asistido para productores. Se recomienda explorar estas posibilidades, aprovechando el conjunto de datos elaborado.

3. La mayoría de los trabajos revisados se concentraron en los niveles 0, 1 y 2 del estándar ISA-95, dejando vacíos importantes en los niveles superiores (3 y 4). Por ello, se sugiere que futuros desarrollos se orienten hacia la integración de capas más avanzadas, como los niveles de gestión, nivel 3 (MES) y operación, nivel 4 (ERP), lo cual permitiría cerrar el ciclo completo de automatización y control en estos ecosistemas acuapónicos.

4. Finalmente, este trabajo ha propuesto una arquitectura respaldada por el estándar ISA-95, y ha demostrado su aplicabilidad mediante un agente recomendador. No obstante, para validar su utilidad y escalabilidad, se recomienda realizar estudios prácticos que permitan contrastar los resultados del sistema frente a condiciones reales de operación.

### Referencias

- Al-Hafedh, Y. S., Alam, A., & Beltagl, M. S. (2008). Food Production and Water Conservation in a Recirculating Aquaponic System in Saudi Arabia at Different Ratios of Fish Feed to Plants. *Journal of the World Aquaculture Society*, 39(4), 510–520. <https://doi.org/10.1111%2Fj.1749-7345.2008.00181.x>
- Anggi Firdaus, T., Didik Widiyanto, E., & Eridani, D. (2023). Designing and Implementing IoT-Based Water Quality Monitoring and Control System of a Pilot Scale Deep Flow Technique Aquaponics for Enhanced Crop-Fish Production. *E3S Web of Conferences*, 448, 13. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344802031>
- Cassemiro, C. (2024, September 11). *ISA-95: ¿qué es, pilares y cómo aplicarla en la industria?* SYDLE. <https://www.sydle.com/es/blog/isa-95-6691920a4f85530c304db799>
- Clasificación de Las Tierras Por Su Capacidad de Uso, 41 (2021). [https://www.igac.gov.co/sites/default/files/listadomaestro/in-gag-pc05-02\\_clasificacion\\_de\\_las\\_tierras\\_por\\_su\\_capacidad\\_de\\_uso.pdf](https://www.igac.gov.co/sites/default/files/listadomaestro/in-gag-pc05-02_clasificacion_de_las_tierras_por_su_capacidad_de_uso.pdf)
- Colt, J., Schuur, A. M., Weaver, D., & Semmens, K. (2021). Engineering Design of Aquaponics Systems. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 30(1), 33–80. <https://doi.org/10.1080/23308249.2021.1886240>
- Colt, J., Tetreault, J., & Fogle, R. L. (2024). Development and Standardization of Physical, Operational, and Performance Metrics for Aquaponics. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 32(4), 562–578. <https://doi.org/10.1080/23308249.2024.2353578>
- Decreto 1071 de 2015, 49.520 Diario Oficial 430 (2024). [https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma\\_pdf.php?i=76838](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=76838)

Decreto 1076 de 2015, 49.520 Diario Oficial 465 (2025).

[https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma\\_pdf.php?i=78153](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=78153)

Decreto 1500 de 2007, 46.626 Diario Oficial 36 (2007).

[https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma\\_pdf.php?i=38923](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=38923)

Decreto 1780 de 2015 Nivel Nacional, Secretaría General de la Alcaldía Mayor de Bogotá (2015).

<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=70118>

Decreto 1835 de 2021, AUNAP 12 (2021).

[https://www.aunap.gov.co/documentos/normatividad/Decreto\\_1835\\_de\\_2021.pdf](https://www.aunap.gov.co/documentos/normatividad/Decreto_1835_de_2021.pdf)

Decreto 1835 de 2021, Diario Oficial 13 (2021).

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=169722>

Delsing, J. (2017). Local Cloud Internet of Things Automation: Technology and Business Model

Features of Distributed Internet of Things Automation Solutions. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 11(4), 8–21. <http://dx.doi.org/10.1109/mie.2017.2759342>

FloraFlex. (2023, April 7). *EC and EC Meters Explained: The Importance of Measuring Salts in*

*Hydroponic and Aquaponic Systems*. FloraFlex Media.

<https://floraflex.com/default/blog/post/ec-and-ec-meters-explained-the-importance-of-measuring-salts-in-hydroponic-and-aquaponic-systems>

Garcia, M. V., Irisarri, E., Perez, F., Marcos, M., & Estevez, E. (2018). From ISA 88/95 meta-

models to an OPC UA-based development tool for CPPS under IEC 61499. *2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, 1–9.

<https://doi.org/10.1109/WFCS.2018.8402362>

Go Green Aquaponics. (2024, January 24). *¿Cómo afecta la luz a tu sistema acuapónico? -*

*Acuaponía Verde*. Go Green Aquaponics.

<https://gogreenaquaponics.com/blogs/news/how-does-light-water-and-oxygen-affect-your-aquaponics-system>

International Society of Automation. (2000). *ISA-95 Standard: Enterprise-Control System Integration*. ISA Org. <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-95-standard>

Krastanova, M., Sirakov, I., Ivanova-Kirilova, S., Yarkov, D., & Orozova, P. (2022). Aquaponic systems: biological and technological parameters. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, 36(1), 305–316. <https://doi.org/10.1080/13102818.2022.2074892;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER>

Ley 13 de 1990, Pub. L. No. 39143, 39.141 Diario Oficial 13 (1990). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=342>

Ley 373 de 1997, Pub. L. No. 43058, 42.966 Diario Oficial 5 (1997). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=342>

Manditereza, K. (2022, December 7). *What is Unified Namespace (UNS) and Why Does it Matter?* HiveMQ Blog. <https://www.hivemq.com/blog/what-is-unified-namespace-uns-iiot-industry-40/>

Masabni, J., & Sink, T. (2020). WATER QUALITY IN AQUAPONICS. *Texas A&G AgriLife Extension*. <https://www.fondriest.com/>

Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmautz, Z., Sambo, P., & Borin, M. (2018). Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy*, 13(1), 1012. <https://doi.org/10.4081/ija.2017.1012>

Mudashiru, R. B., Yusuf-Olawuyi, M., Tijani, A., Umar, L., Okeke, F., Adeyemi, O., Amototo, I., & Salaudeen, F. (2025). Design and Construction of an Aquaponics System: A Sustainable

- Approach to Enhancing Local Food Security in Offa, Nigeria. *ABUAD Journal of Engineering Research and Development (AJERD)*, 8(1), 50–60.  
<https://doi.org/10.53982/ajerd.2025.0801.06-j>
- OPC Foundation Inc. (2013, October 30). *OPC 10030: ISA-95 Common Object Model*. OPC Foundation Inc. <https://reference.opcfoundation.org/ISA-95/v100/docs/4#>
- Palm, H. W., Knaus, U., Appelbaum, S., Goddek, S., Strauch, S. M., Vermeulen, T., Haïssam Jijakli, M., & Kotzen, B. (2018). Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. *Aquaculture International*, 26(3), 813–842.  
<https://doi.org/10.1007/s10499-018-0249-z>
- Pattillo, D. A., Hager, J. V., Cline, D. J., Roy, L. A., & Hanson, T. R. (2022). System design and production practices of aquaponic stakeholders. *PLOS ONE*, 17(4), 1.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266475>
- Pennisi, G., Pistillo, A., Orsini, F., Cellini, A., Spinelli, F., Nicola, S., Fernandez, J. A., Crepaldi, A., Gianquinto, G., & Marcelis, L. F. M. (2020). Optimal light intensity for sustainable water and energy use in indoor cultivation of lettuce and basil under red and blue LEDs. *Scientia Horticulturae*, 272, 109508. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109508>
- Rahayu, L. P., Kindhi, B. Al, Pradika, C. D., Adhim, F. I., Priandana, C. W., Musthofa, A., Indasyah, E., & Istiqomah, F. (2021). Design of pH Control System and Water Recirculation in Aquaponic Cultivation Using Mamdani Fuzzy Logic Control. *2021 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation, ICAMIMIA 2021 - Proceeding*, 287–292.  
<https://doi.org/10.1109/ICAMIMIA54022.2021.9809775>

Resolución 000122 de 2012, INVIMA (2012).

[https://www.invima.gov.co/documents/20143/401140/Res\\_122\\_2012.pdf](https://www.invima.gov.co/documents/20143/401140/Res_122_2012.pdf)

Resolución 776 de 2008, Diario 46.923 9 (2008).

[https://www.invima.gov.co/sites/default/files/normatividad/normatividad-interna/resoluciones/alimentos/resolucion\\_776\\_2008.pdf](https://www.invima.gov.co/sites/default/files/normatividad/normatividad-interna/resoluciones/alimentos/resolucion_776_2008.pdf)

RESOLUCIÓN No.00009907, Pub. L. No. 00009907, 10 (2024).

<https://www.ica.gov.co/getattachment/839551a8-25ba-4dff-947b-bbde912231a3/2024R00009907.aspx>

Salleneve, R. (2016, October). *Important Water Quality Parameters in Aquaponics Systems* | *New Mexico State University - BE BOLD. Shape the Future*. New Mexico State University.

[https://pubs.nmsu.edu/\\_circulars/CR680/](https://pubs.nmsu.edu/_circulars/CR680/)

Singh, R., Gehlot, A., Chimata, R., Singh, B., & P.S.Ranjit. (2018). *Internet of Things in Automotive Industries and Road Safety*. River Publishers.

<https://doi.org/10.1201/9781003338635>

Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2022). *Producción de alimentos en acuaponía a pequeña escala – Cultivo integral de peces y plantas* (Vol. 589).

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

<https://doi.org/10.4060/i4021es>

Spiliotis, M., Tzimopoulos, C., Papaevangelou, G., Wang, Y.-J., Yang, T., & Kim, H.-J. (2023).

pH Dynamics in Aquaponic Systems: Implications for Plant and Fish Crop Productivity and Yield. *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 7137, 15(9), 7137.

<https://doi.org/10.3390/SU15097137>

Supjaruwong, S., Satanwat, P., Pungrasmi, W., & Powtongsook, S. (2020). Design and function

- of a nitrogen and sediment removal system in a recirculating aquaculture system optimized for aquaponics. *Environmental Engineering Research*, 26(2), 190494–0.  
<https://doi.org/10.4491/eer.2019.494>
- SYDLE. (2024, April 30). *Sistema ERP o plataforma digital all-in-one: ¿cuál es mejor para tu empresa?* SYDLE. <https://www.sydle.com/es/blog/sistema-erp-62b4991fa11789318b0c895c>
- Taha, M. F., ElMasry, G., Gouda, M., Zhou, L., Liang, N., Abdalla, A., Rousseau, D., & Qiu, Z. (2022). Recent Advances of Smart Systems and Internet of Things (IoT) for Aquaponics Automation: A Comprehensive Overview. *Chemosensors*, 10(8), 303.  
<https://doi.org/10.3390/chemosensors10080303>
- Tidwell, J. H. (2012). *Aquaculture Production Systems* (J. H. Tidwell, Ed.). Wiley.  
<https://doi.org/10.1002/9781118250105>
- Tyson, R., & Simonne, E. (2014). Practical Guide for Aquaponics as an Alternative Enterprise. *EDIS*, 2014(8), 10. <https://doi.org/10.32473/edis-hs1252-2014>
- Tyson, R. V, Treadwell, D. D., & Simonne, E. H. (2011). Opportunities and Challenges to Sustainability in Aquaponic Systems. *HortTechnology*, 21(1), 6–13.  
<https://www.doi.org/10.21273/HORTTECH.21.1.6>
- Universidad de Letonia. (n.d.). *WATER QUALITY IN AQUAPONICS*. [https://centralbaltic.eu/wp-content/uploads/2023/05/D3.2.1\\_Water-requirements-report-FINAL-ENGLISH.pdf](https://centralbaltic.eu/wp-content/uploads/2023/05/D3.2.1_Water-requirements-report-FINAL-ENGLISH.pdf)
- Wan, S., Zhao, K., Lu, Z., Li, J., Lu, T., & Wang, H. (2022). A Modularized IoT Monitoring System with Edge-Computing for Aquaponics. *Sensors*, 22(23), 9260.  
<https://doi.org/10.3390/s22239260>

- Yep, B., & Zheng, Y. (2019). Aquaponic trends and challenges – A review. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1586–1599. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.290>
- Zamnuri, M. A. H. bin, Qiu, S., Rizalmy, M. A. A. bin, He, W., Yusoff, S., Roeroe, K. A., Du, J., & Loh, K.-H. (2024). Integration of IoT in Small-Scale Aquaponics to Enhance Efficiency and Profitability: A Systematic Review. *Animals*, 14(17), 2555. <https://doi.org/10.3390/ani14172555>

## Apéndices

En este capítulo, se presenta el enlace el cual redireccionará al lector a la carpeta que contiene los apéndices correspondientes a este proyecto, los cuales respaldan el desarrollo de este y a su vez contribuyen a la comprensión del trabajo realizado.

[https://drive.google.com/drive/folders/1oh9phyC1u4D8\\_QGBY2nsBmGtf7QAiUGW?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/1oh9phyC1u4D8_QGBY2nsBmGtf7QAiUGW?usp=drive_link)