

DISEÑO DE UNA ARQUITECTURA DE SUPERVISIÓN Y CONTROL DE ECOSISTEMAS  
ACUAPÓNICOS BAJO EL ENFOQUE DE IOT Y LA NORMA ISA-95 1

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

**Apéndice E. Tablas utilizadas en el trabajo de grado**

**2.1 Acuaponía**

**Tabla 1**

*Principales componentes de un sistema acuapónico*

Componente	Función principal	Detalles de diseño citados
Tanque de peces	Cría y alimentación de la biomasa acuática	Volúmenes variados; densidades típicas 10-30 kg m <sup>-3</sup> (Tilapia, Carpa) (Al-Hafedh et al., 2008; Tyson & Simonne, 2014).
Filtro de sedimentador	Retener sólidos > 50 µm antes del biofiltro	Puede ser un clarificador de flujo ascendente o tambor giratorio; caudal = 1-2 × volumen h <sup>-1</sup> (Supajaruwong et al., 2020).
Filtro Biológico	Soporte para bacterias nitrificantes	Lecho fijo (grava, biobolas) o móvil; relación volumen Biofiltro: Tanque 0,5–1:1 (Colt et al., 2021; Tyson et al., 2011).
Cultivo hidropónico	Proveer a las plantas de agua y nutrientes necesarios para su crecimiento sin utilizar suelo	Tres formatos principales: media bed (flood & drain), raft (DWC) y NFT; cada uno con caudal óptimo distinto (0,8-8 L min <sup>-1</sup> ) (Maucieri et al., 2018).
Bomba y tuberías	Recirculación constante y oxigenación	Bomba sumergible o en línea; materiales PVC/PE; retorno por gravedad al tanque o a un sump (tanque adicional) (Mudashiru et al., 2025; Tidwell, 2012).
Sistema de aireación	Mantener O <sub>2</sub> disuelto > 5 mg L <sup>-1</sup>	Difusores, crítico en climas cálidos (Tyson & Simonne, 2014; Tyson et al., 2011).

Depósitos auxiliares (desperdicios, desgasificador, tanque de ajuste de pH)	Estabilizar nivel de agua, eliminar CO <sub>2</sub> , dosificar alcalinidad	Opcionales pero comunes en sistemas de demostración y clima tropical (Mudashiru et al., 2025).
-----------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------

*Nota.* Elaboración propia. Componentes principales que conforman un sistema acuapónico en general.

## 2.4 Tecnologías de supervisión, control y automatización

Las tecnologías de supervisión y control implementadas en sistemas acuapónicos pueden clasificarse según su función dentro de la jerarquía ISA-95. La Tabla 2 resume los elementos tecnológicos más comunes y su rol dentro de la estructura del estándar ISA-95.

**Tabla 2**

*Elementos tecnológicos asociados al estándar ISA-95*

Tecnología	Función principal	Ejemplos
Sensores y actuadores (Nivel 0)	Captación de variables y acción física	Sondas pH/OD, interruptores de nivel, bombas, válvulas, entre otros. *
Microcontroladores/PLCs (Nivel 1)	Lógica de control en tiempo real, bucles PID, alarmas locales	Microcontroladores como Arduino, ESP32, ESP8266, Raspberry. PLCs de marcas como Siemens, Allen- Bradley, Schneider. *
HMI/SCADA (Nivel 2)	interfaz operatoria, supervisión del proceso, alarmas, históricos	Node-RED, Grafana, ThingSpeak, Blynk, Ubidots iFIX, Ignition, entre otros. *
Servidores de operaciones (MES) (Nivel 3)	Gestionar y monitorear las operaciones de producción en tiempo	Ajuste ración diaria según crecimiento estimado; planea limpiezas O mantenimientos preventivos. Herramientas como

	real, mantenimiento, optimización	Siemens Opcenter, Rockwell fatoryTalk, AVEVA MES *
Plataformas en la nube (ERP) (Nivel 4)	Planificar, coordinar y optimizar recursos empresariales.	AWS IoT, Azure, ThingsBoard; generan reportes de agua/kg pez para certificaciones de sostenibilidad. *
Gateways / Edge devices	Puentean sensores locales y la nube; ejecutan lógica intermedia	Gateway LoRa-WAN o dispositivo MQTT que agrupa datos de varios módulos e implementa reglas simples.
Protocolos de comunicación	Transporte de datos industrial o IoT	Modbus-RTU/TCP, OPC UA (SCADA); MQTT, HTTP, LoRa WAN (IoT).

*Nota.* Elaboración propia. \*Se puede encontrar más información en el Apéndice B y/o el agente recomendador (Apéndice D).

2.5 Variables en la acuaponía

Tabla que recopila variables consideradas en la literatura revisada. Para cada variable se incluye su nombre, una breve descripción y la referencia bibliográfica que sustenta su uso y relevancia en sistemas acuapónicos.

Tabla 3

*Variables en sistemas acuapónicos*

Variable	Descripción	Rango Óptimo	Referencia
Temperatura del agua	Medida del calor en el agua del sistema acuapónico.	17 - 34 °C; 24 - 27 °C (~ideal)	(Krastanova et al., 2022; Sallenave, 2016; Taha et al., 2022; Zamnuri et al., 2024)

Temperatura del aire	Medida del calor en el ambiente donde se encuentra el sistema.	18 - 30 °C	(Taha et al., 2022 ; Zamnuri et al., 2024)
Humedad relativa	Porcentaje de vapor de agua presente en el aire respecto al máximo posible a esa temperatura.	60 - 80 %	(Taha et al., 2022 ; Zamnuri et al., 2024)
Flujo	Velocidad o caudal del agua que circula por el sistema.	0.8 - 8.0 L/min	(Maucieri et al., 2018 ; Taha et al., 2022 ; Zamnuri et al., 2024)
Intensidad de Luz	Cantidad de luz disponible.	300 - 500 lx; 600 - 900 PPFD (~ideal); $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (hojas, ej, albahaca); 500-700 PAR (plantas frutales)	(Go Green Aquaponics, 2024; Pennisi et al., 2020; Taha et al., 2022; Zamnuri et al., 2024)
pH (Potencial de Hidrógeno)	Medida de la acidez o alcalinidad del agua.	6.0/6.5 - 8.0 (general); 7.0 - 8.0 (~peces); 4.5 - 6.0 (~plantas); 7.5 (~bacterias)	(Krastanova et al., 2022; Rahayu et al., 2021; Sallenave, 2016; Spiliotis et al., 2023; Taha et al., 2022; Universidad de Letonia, n.d.; Zamnuri et al., 2024)
Oxígeno Disuelto (OD)	Cantidad de oxígeno disponible en el agua para los organismos.	>4.0 - 9.0 mg/L (general); 6 - 8 mg/L (~ideal)	(Masabni & Sink, 2020; Sallenave, 2016; Taha et al., 2022; Zamnuri et al., 2024)
TAN / Amoníaco Total (NH <sub>3</sub> )	Concentración de amoníaco en el agua.	<2 mg/L (general); <1 ppm (recomendado)	(Masabni & Sink, 2020; Sallenave, 2016; Taha et al., 2022; Zamnuri et al., 2024)
Nitritos (NO <sub>2</sub> )	Compuesto intermedio en el ciclo del nitrógeno.	0.25 - <1 mg/L (general); <1 ppm	(Masabni & Sink, 2020; Sallenave, 2016; Taha et al., 2022; Zamnuri et al., 2024)
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	Producto final del ciclo del nitrógeno, absorbido por las plantas.	100 - 200 mg/L; 50 - 100 ppm (~general); 5 - 25 ppm (plantas); <30 ppm (peces)	(Masabni & Sink, 2020; Sallenave, 2016; Taha et al., 2022; Zamnuri et al., 2024)
Dureza carbonatada	Capacidad del agua para neutralizar ácidos,	50 - 100 mg/L CaCO <sub>3</sub> ; 0 - 75 ppm (agua	(Masabni & Sink, 2020; Taha et al., 2022; Zamnuri et al., 2024)

	relacionada con la estabilidad del pH.	blanda); >300 ppm (agua muy dura)	
Conductividad Eléctrica (CE)	Medida de la capacidad del agua para conducir electricidad, relacionada con la concentración de sales.	30 - 1000 uS/cm (~general); 200 - 2000 uS/cm	(FloraFlex, 2023; Taha et al., 2022; Zamnuri et al., 2024)
Sólidos Totales Disueltos (TDS)	Concentración total de sustancias disueltas en el agua.	400 - 700 ppm; <1000 mg/L	(Taha et al., 2022 ; Zamnuri et al., 2024)
Salinidad	Cantidad de sales disueltas en el agua.	0 - 2 ppm CaCO <sub>3</sub>	(Taha et al., 2022 ; Zamnuri et al., 2024)
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	Gas presente en el agua, producto de la respiración.	<20 - 25 ppm (agua); 340 - 1300 ppm (aire)	(Krastanova et al., 2022 ; Taha et al., 2022 ; Zamnuri et al., 2024)
Nivel de agua	Altura o volumen del agua en el sistema.	Mantener constante y adecuado al diseño del sistema	(Go Green Aquaponics, 2024; Taha et al., 2022; Zamnuri et al., 2024)
Tamaño (por cámaras o visión artificial)	Medición del crecimiento de peces o plantas.	No aplica (parámetro de monitoreo, no de rango óptimo); Machine Learning e IA	(Taha et al., 2022 ; Zamnuri et al., 2024)
Alimentación peces	Cantidad y frecuencia de alimento suministrado.	No aplica (parámetro de monitoreo, no de rango óptimo)	(Taha et al., 2022 ; Zamnuri et al., 2024)
Turbidez	Medida de la claridad del agua, relacionada con partículas en suspensión.	<10 NTU (agua dulce clara); <0.3 NTU (agua potable)	(Rahayu et al., 2021 ; Taha et al., 2022 ; Zamnuri et al., 2024)

*Nota.* Elaboración propia. Adaptado de diferentes fuentes.

#### 4.5 Validación agente recomendador

Tabla con la evaluación del desempeño del agente recomendador en tres perfiles de usuario.

**Tabla 4**

*Evaluación del desempeño del agente recomendador en tres perfiles de usuario*

<b>Caso</b>	<b>Coherencia</b>	<b>Aprovechamiento de datos</b>	<b>Claridad de recomendación</b>	<b>Evaluación final</b>
<b>Baja inversión</b>	4	4	5	4.6
<b>Media inversión</b>	5	5	4	4.3
<b>Alta inversión</b>	5	5	4	4.6

*Nota.* Capturas del entorno N8N.