

Sistema automatizado soportado en IoT para monitoreo de calidad de agua en sistemas acuapónicos

IoT-supported automated system for water quality monitoring in aquaponic systems

William Fernando Bernal Suarez^{1,*}, Luis Alexander Páez Guevara², Ludy Paola Villamil Moreno³, Edna Rocío Riaño Castillo⁴

Resumen

El programa nacional de ciencia, tecnología e innovación en ciencias agropecuarias, plantea la implementación de sistemas de innovación eficientes y sostenibles alternos a las prácticas tradicionales de piscicultura. En acuaponía no se ha logrado implementar sistemas automatizados de monitoreo de control de calidad de agua, debido a los altos costos y la desinformación que se crea alrededor de nuevas tecnologías, como lo es el internet de las cosas (IoT). Es así, que este trabajo tuvo como propósito implementar un prototipo soportado en IoT y energizado por energía fotovoltaica para el monitoreo de oxígeno disuelto (OD), sólidos disueltos totales, (SDT) temperatura de agua (T_A), temperatura ambiente (T_{Am}) y pH, en la puesta en marcha de un sistema acuapónico a mediana escala en el municipio de Lengupa- Boyacá. La arquitectura del hardware se realizó usando una tarjeta de Arduino, placa electrónica basada en el microprocesador Atmega2560 y una fuente de energía fue apoyada por panel solar fotovoltaico. Los resultados muestran que es posible implementar prototipos soportados en la IoT y alimentados por energía fotovoltaica para el monitoreo de OD, humedad, T_A , SDT, T_{Am} y pH en sistemas acuapónicos. La toma y visualización de datos en tiempo real, podría contribuir en la toma oportuna de decisiones.

Palabras Clave: IoT, automatización, acuaponía, calidad de agua.

Abstract

The national program for science, technology and innovation in agricultural sciences proposes the implementation of efficient and sustainable innovation systems alternatives to traditional fish farming practices. In aquaponics, it has not been possible to implement automated water quality control monitoring systems, due to the high costs and the misinformation that is created around new technologies, such as the Internet of Things (IoT). Thus, the purpose of this work was to implement a prototype supported by IoT and energized by photovoltaic energy for the monitoring of dissolved oxygen (DO), total dissolved solids, (SDT), water temperature (T_A), ambient temperature (T_{Am}) and pH, in the implementation of a medium-scale aquaponic system in the municipality of Lengupa-Boyacá. The hardware architecture was carried out using an Arduino card, an electronic board based on the Atmega2560 microprocessor and a power source was supported by a photovoltaic solar panel. The results show that it is possible to implement prototypes supported by the IoT and powered by photovoltaics for the monitoring of DO, humidity, T_A , SDT, (T_{Am}), and pH in aquaponic systems. The collection and visualization of data in real time could contribute to timely decision making.

Keywords: IoT, automation, aquaponics, water quality.

Recepción: 01-Mayo-2023

Aceptación: 06-Julio-2023

^{1,*} Magíster en Ingeniería, Fundación Universitaria Juan de Castellanos, Tunja, Colombia. Dirección electrónica: wbernal@jdc.edu.co

² Magíster en Química, Fundación Universitaria Juan de Castellanos, Tunja, Colombia. Dirección electrónica: lapaez@jdc.edu.co

³ Magíster, Fundación Universitaria Juan de Castellanos, Tunja, Colombia. Dirección electrónica: lvillamil@jdc.edu.co,

⁴ Magíster en Ciencias Agropecuarias, Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia. Dirección electrónica: ednarciorc@gmail.com.

1. Introducción

Durante los últimos años, el Informe mundial sobre crisis alimentarias (GRFC) ha proporcionado una visión general basado en el consenso de la gravedad, la magnitud y los impulsores de la crisis alimentaria mundial, frente a esta realidad, es necesario buscar alternativas para disminuir los efectos de esta problemática; teniendo en cuenta que las dinámicas de la población cambiarán radicalmente la demografía en las próximas décadas y se estima que para el año 2050 la población mundial alcanzará casi los 9700 millones de personas [1]. En este contexto, la denominada cuarta revolución industrial (4RI) tendrá un papel importante en el sector agrícola y podrá dar un mejor manejo a los problemas de producción, distribución y consumo mediante sistemas automatizados; contribuyendo así a disminuir los efectos de la crisis alimentaria. Además, se visualiza que en la 4RI las tecnologías de la información y de comunicación (TIC) convergerán en beneficio de la producción de alimentos, y apoyaran a lo que se ha denominado como agricultura de precisión [2]. Este concepto fue creado para mejorar los procesos de producción con aproximaciones precisas acorde a las condiciones donde se realice la siembra y las necesidades del cultivo. La tecnología actual (información y comunicación) está contribuyendo en el cambio de métodos de producción convencionales a sistemas de producción inteligentes con el objetivo de realizar un manejo más eficiente de insumos (abonos orgánicos e inorgánicos) y un uso racional de agua [3–5]. Lo anterior puede realizarse a través del monitoreo de datos en tiempo real; usando sensores y conexiones de redes inalámbricas, permitiendo así, tener el control de los parámetros críticos del sistema de producción y tomar decisiones para la optimización de insumos y la preservación de agua y nutrientes [6].

El uso de materiales de fácil acceso y bajo costo (hardware) combinado con software de acceso libre como Arduino IDE permite diseñar e implementar sistemas de comunicación mediante lenguajes de programación y modelamiento matemático, con potencial aplicación en procesos de producción agrícolas, logrando una arquitectura soportada en la transferencia de datos a través de redes inalámbricas conocida como Internet de las Cosas (IoT) [7, 8]. La acuaponía es considerada una tecnología de producción sostenible que logra la producción de peces en estanques y especies vegetales en un espacio diferente del suelo, todo esto en un sistema cerrado donde los desechos de los peces con alto contenido de macro y micronutrientes son aprovechados por las plantas para su crecimiento y desarrollo [9]. La integración de tecnologías inteligentes como IoT en procesos acuapónicos contribuye a mejorar la producción (peces y plantas), disminuir mano de obra (costos), mejorar los productos finales en términos de calidad y promover la autosostenibilidad del cultivo [10].

En los sistemas acuapónicos, el monitoreo en tiempo real de parámetros como temperatura (T), oxígeno disuelto (OD),

pH, conductividad eléctrica (CE) y salinidad influyen directamente la producción de peces y plantas [11]. Por ejemplo, el OD es un indicador crítico de la calidad del agua, permitiendo la respiración como también la oxidación de nitrógeno a través de las bacterias nitrificantes [12]. En el caso de la temperatura, esta tiene efectos en raíces y absorción de nutrientes en las plantas; y en peces puede influir en el crecimiento, conversiones alimenticias y presenta influencia en el riesgo de desarrollar enfermedades [13, 14]. Finalmente, el pH y la CE tienen efectos sobre el crecimiento de las plantas y peces; y tiene efecto directo sobre la actividad microbiana del sistema. Es así que el monitoreo en tiempo real y control de estas variables es crítico para esta tecnología [14]. En este sentido, el objetivo del estudio fue implementar un prototipo soportado en la Internet de las Cosas y alimentado por energía fotovoltaica para el monitoreo de OD, T, pH y CE en la puesta en marcha de un sistema acuapónico a mediana escala en el municipio de Miraflores-Boyacá. El prototipo permitirá a mediano plazo ayudar en la toma de decisiones del sistema acuapónico con el fin de lograr una mayor rentabilidad y mayor bienestar del cultivo.

2. Materiales y métodos

Este desarrollo se basa en una metodología de trabajo de campo tipo experimental mixto (cualitativo y cuantitativo). El dispositivo fue implementado en un sistema acuapónico. Ver especificaciones Figura 5. El funcionamiento del prototipo soportado en la Internet de las Cosas y con un sistema de respaldo energético fotovoltaico, fue diseñado e implementado teniendo en cuenta las características de la zona, como temperatura ambiente, humedad, conectividad y estabilidad eléctrica. El monitoreo de variables en el agua fue realizado teniendo en cuenta una serie de bloques funcionales (Figura 1) centrados en la medición de parámetros de calidad de agua de un cultivo acuapónico de tilapia, lechuga cresspa y albahaca con recirculación de agua. Los detalles de cada uno de los bloques se muestran en secciones posteriores.

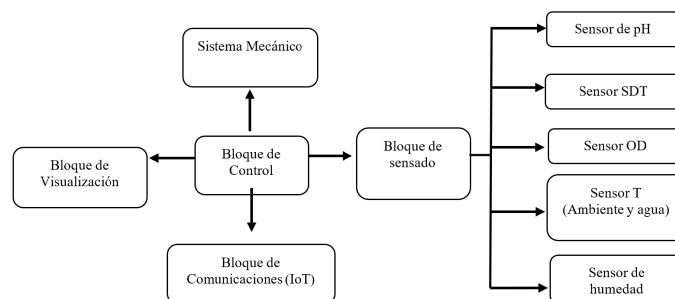


Figura 1: Diagrama de Bloques del sistema.

A su vez se ha tomado como referencia en el diseño, que sea un sistema práctico, fácil de manipular y de bajo costo comparado con sistemas comerciales, se ha buscado a su vez que sea un sistema autónomo que implique el menor contacto posible con el personal a cargo del cuidado del

cultivo, la cual se limita a la limpieza de los sensores y cambio de membranas según las especificaciones técnicas del fabricante de cada uno de estos.

La arquitectura del hardware se realizó usando una tarjeta de Arduino Mega 2560, placa electrónica basada en el microprocesador Atmega 2560 (Fig 2) con 54 entradas / salidas digitales de las cuales 15 pueden utilizarse para salidas PWM, 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertas seriales), un oscilador de 16MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un header ICSP y un reset. La distribución de conexiones de cada uno de los sensores se presenta en la tabla 1, esto basados en aspectos técnicos como tipo de señal suministrada (analógica o digital) y protocolo de comunicación.

Tabla 1: Distribución de conexiones de la arquitectura del hardware

Sensor	PIN
Sólidos disueltos totales (SST)	A8
Sensor pH	A11
Oxígeno disuelto (OD)	A12
Temperatura agua (T)	23
Temperatura y humedad del ambiente	24



Figura 2: Tarjeta de Arduino Mega 2560. Fuente: [16]

2.1. Construcción del prototipo

El prototipo cuenta con tres etapas fundamentales (Figura 3) 1^{ra} de tipo mecánico; 2^{da} de tipo electrónico y 3^{ra} de tipo de alimentación.

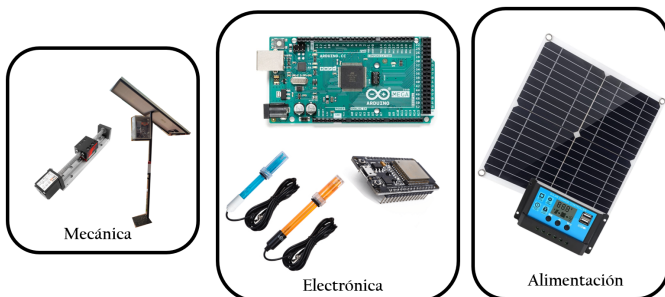


Figura 3: Gráfico de las etapas fundamentales del prototipo. Fuente: [17–20]

La etapa mecánica consta de una estructura que alberga el

sistema fotovoltaico, la caja electrónica, la sonda y el sistema mecanizado de sondeo tipo brazo para el descenso y ascenso de la sonda al agua. La etapa electrónica cuenta con todo el sistema de monitoreo y control centralizado en una Tarjeta Arduino Mega 2560, un módulo ESP32 para la conexión a la nube, una pantalla grafica para la visualización de datos en tiempo real y una sonda que contiene todo el bloque de sensores. Finalmente, la etapa de alimentación consta de un sistema interconectado (red eléctrica y sistema fotovoltaico) el cual asegura el suministro eléctrico 24/7 así se presente corte en el suministro energético convencional.

El lenguaje de programación que se utilizó está basado en Processing, un lenguaje de programación muy similar a C++ y de gran portabilidad. En la fig. 4, se muestra el diagrama de flujo del software el cual garantiza la visualización, almacenamiento y transmisión de datos en el sistema de forma lógica y en tiempo real. Este diseño permite hacer comparaciones de los parámetros de calidad del agua en función del tiempo (pH, temperatura agua, temperatura ambiente, OD y SDT) con valores de referencia dispuestos en manuales de cultivo de tilapia y/o sondas comerciales como la usada en este proyecto, ayudando en la toma de decisiones de forma rápida y segura, sin poner en riesgo la producción de peces y plantas.

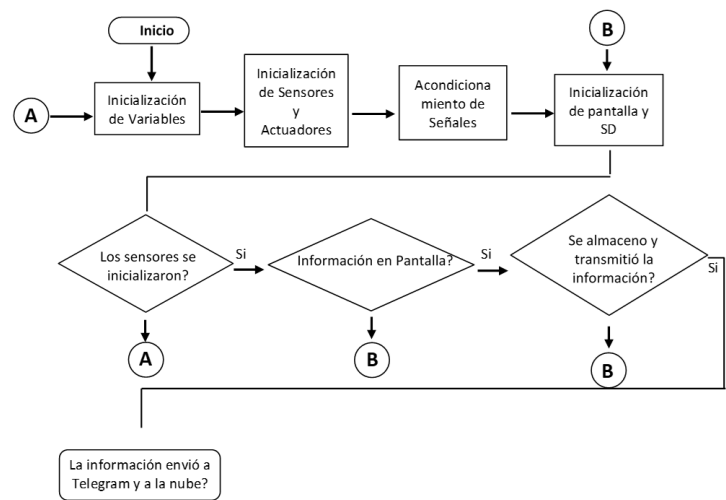


Figura 4: Diagrama de flujo del software implementado para le monitores de parámetros de calidad de agua en sistemas acuapónicos Fuente: Los autores

Los sensores que contiene la sonda fueron seleccionados dadas características como, consumo eléctrico, rangos de lectura, tamaño, entre otros, con el fin de asegurar una medición confiable, a continuación, se presentan algunas características técnicas para su conocimiento.

2.1.1. Sensor de sólidos disueltos totales (SDT)

Permite la medición en agua doméstica, hidropónica y otros campos de pruebas de calidad del agua. Voltaje de entrada:

3.3 ~ 5.5V Voltaje de salida: 0 ~ 2.3V. Corriente de trabajo: 3 ~ 6mA. Rango de medición de SDT: 0 ~ 1000ppm. Precisión de medición de SDT: $\pm 10\%$ FS (25 °C). Tamaño del módulo: 42 * 32 mm [21].

2.1.2. Sensor de pH SEN0169

Sensor de pH profesional con electrodo industrial, con LED que funciona como indicador de encendido, un conector BNC y una interfaz de sensor pH 2.0. Rango de medición: 0-14 pH, temperatura de medición: 0-60 °C, precisión: 0,1 pH (25 °C) [21].

2.1.3. Sensor de oxígeno disuelto SEN0237-A

Sensor de oxígeno disuelto (OD) equipado con una sonda galvánica, no necesita tiempo de polarización cuenta con una solución de llenado y tapa de membrana las cuales son reemplazables, lo que reduce el costo de mantenimiento. Compatible con voltajes de 3.3-5V, salida analógica de 0 3V, rango de presión máxima de trabajo 50 PSI y conector de la sonda tipo BNC [21].

2.1.4. Sensor de temperatura en agua DS18B20

El DS18B20 es un sensor digital de temperatura que usa el protocolo 1-Wire, este protocolo necesita solo un pin de datos para comunicarse y permite conectar más de un sensor en el mismo bus, el encapsulado es tipo TO-92 similar al empleado en transistores pequeños. La presentación es la del sensor dentro de un tubo de acero inoxidable resistente al agua. Compatible con voltajes de 3.0V a 5.5V $\pm 0,5$ °C de temperatura: -55 a 125 °C, resolución seleccionable 9 a 12 bits y utiliza interfaz 1-Wire requiere sólo un pin digital para la comunicación [19].

2.1.5. Sensor de temperatura y humedad del ambiente AM2305

Este dispositivo contiene un sensor de temperatura y un sensor de humedad capacitivo. Un pequeño microcontrolador en el interior realiza las lecturas y proporciona una interfaz 1-wire con un alto rendimiento. Rango de temperatura: -40-80 °C, resolución: 0.1 °C Exactitud: ± 0.3 °C, rango de Humedad: 0 100 % humedad relativa, resolución: 0.1 % HR y exactitud: $\pm 2\%$ HR (Máx $\pm 5\%$ HR) [19].

2.2. Almacenamiento y Transmisión

Para este proceso se ha implementado un Módulo microSD como método de respaldo de almacenamiento de información y acogiendo el concepto de IOT se integró el sistema a la red de internet permitiendo enviar los datos a la nube

usando herramientas como la aplicación para visualización (Blynk), la aplicación de mensajería instantánea (Telegram) y almacenamiento en Google Drive en formato XLS. Para lograr el proceso de interconectividad entre el bloque hardware y a nube se utilizó un módulo Wifi ESP32 de Espressif Systems, Esta tarjeta está integrada por un microprocesador de 32-bits (dual core o single core), comunicación inalámbrica Wifi y Bluetooth, también incluye seguridad criptográfica por hardware, un coprocesador para el modo bajo consumo e interfaces periféricas como: I2C, SPI, CAN, PWM, entre otros.

2.3. Proceso de montaje

El sistema de monitoreo fue ensamblado en un cultivo acuapónico de mediana escala en Miraflores Boyacá, el cual está compuesto por dos tanques de peces, cuatro unidades de tratamiento y cuatro unidades hidropónicas con sistema de oxigenación y recirculación. Cada estanque tiene una capacidad de 32 m³ para 1700 peces (Fig. 5A) y seis camas de hidroponía en NFT para 2800 hortalizas (Fig. 5B). El ensayo de la sonda se hizo en uno de los tanques con presencia de tilapia (Fig. 5A y B). El prototipo se ensambló sobre una estructura metálica resistente a la humedad e intemperie, sobre la cual se dispusieron un panel fotovoltaico, una batería, la sonda, sistema mecánico tipo brazo robótico y el sistema de control (Fig. 5 C y D).

Se definieron tres ciclos de sondeo, permitiendo verificar las condiciones de calidad del agua del estanque de tilapia en tres horas específicas (2:00am; 10:00am; 6:00pm) de cada día, estos ciclos de sondeo pueden ser reprogramados desde la pantalla TFT según la necesidad y etapa del cultivo. El proceso de recolección de datos se realizó durante. El proceso de recolección de datos se realizó durante un periodo de 10 días en el mes de abril del 2023.

2.4. Funcionamiento del prototipo

El sistema tiene dos modos de funcionamiento, un modo automático sobre el cual trabaja por defecto y un modo manual en caso de que el acuicultor requiera la toma de datos en un horario distinto al preprogramado en el modo automático, una vez dada la orden o llegada la instrucción, todos los sensores y actuadores inician su funcionamiento y luego envían sus valores según corresponda. Para garantizar una máxima durabilidad de los sensores se implementó un sistema tipo brazo robótico que permite el descenso de la sonda que contiene el bloque completo de sensores hasta hacer contacto con el agua del tanque, una vez en contacto con el agua se realiza la lectura y los valores son enviados a pantalla TFT (Figura 6), almacenados en la tarjeta SD y enviados vía WiFi al usuario o usuarios según corresponda. Luego de la toma de datos, el sistema mecánico asciende y toma la posición inicial. Por otro lado, de forma automática el mecanismo ubica el sensor de pH en un recipiente con

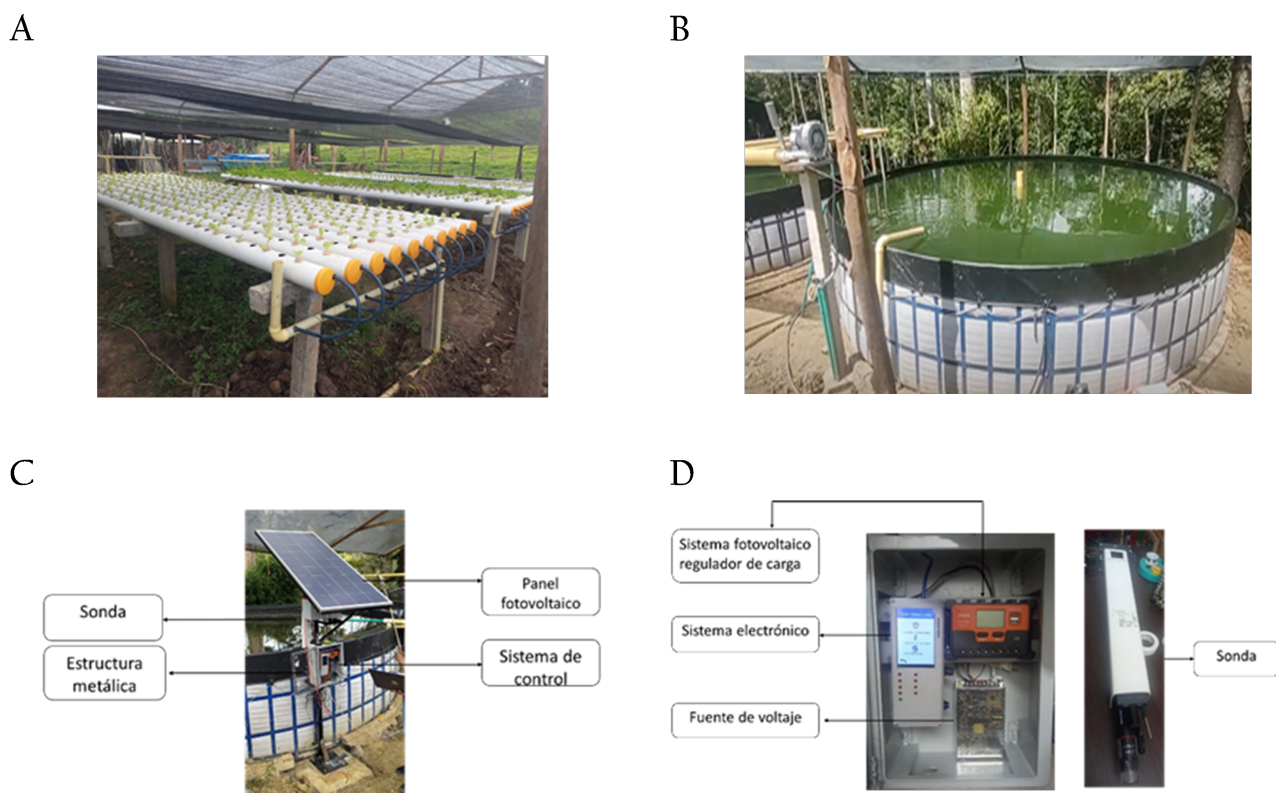


Figura 5: A) Camas producción de material vegetal. B) Tanques de cultivo de tilapia. C) Sistema automatizado para el control de parámetros. D) Sistema automatizado vista interna Fuente: Los autores

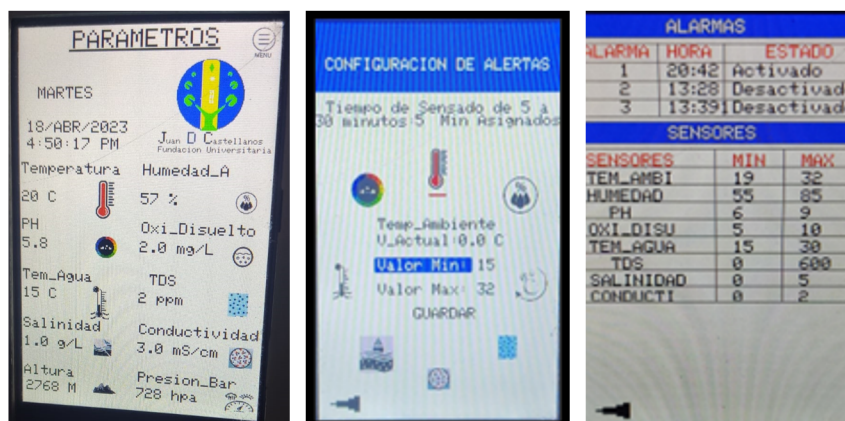


Figura 6: Pantalla LCD Touch para la visualización de datos en tiempo real Fuente: Los autores

solución de KCl 3M para aumentar el tiempo de vida útil del electrodo, los demás sensores se dejan sin ninguna protección. Finalmente, el sistema detecta si los valores medidos en tiempo real no están en el rango definido para cada sensor, procediendo a enviar un mensaje de advertencia el cual se muestra en la pantalla y se transmite por mensaje de texto a Telegram, lo que contribuye en la toma de decisiones de forma instantánea.

La información se visualiza en tiempo real en una pantalla

FFT in-situ, para el proceso de transmisión de datos se usó comunicación vía WiFi dadas las características del lugar donde se implementó el sistema, las cuales permitían la conexión a internet por medio de un router, donde los recursos IoT que aquí fueron usados son: app Blynk, mensajería a través de red social Telegram e IFTTT con conexión a Google Drive (Figura 7).

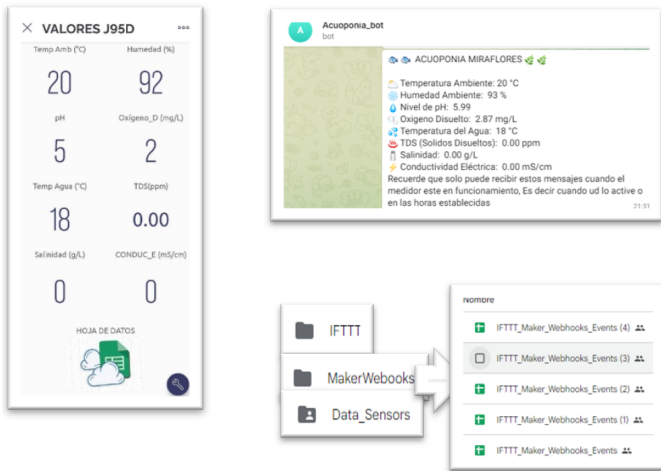


Figura 7: Recursos IoT Blink, Telegram, Google Drive Fuente: Los autores

2.5. Sonda

Para el proceso de sensado se construyó una sonda Figura 8, la cual consta de un bloque de sensores (SDT, pH, OD, TA y Tam) con características físicas que soportaran las condiciones reales sobre las cuales trabaja un sistema acuapónico como lo humedad, material particulado, variabilidad eléctrica entre otros.



Figura 8: Sonda construida.Fuente: Los autores

3. Calibración de sensores

Cada sensor fue previamente calibrado en el laboratorio de Suelos de la Fundación Universitaria Juan de Castellanos para asegurar una correcta lectura de las variables en el sistema acuapónico. La calibración se hizo basados en las especificaciones técnicas del fabricante de cada sensor, lo cual implicó uso de código y librerías específicas; el proceso fue respaldado y comparado con los datos obtenidos de

un equipo multiparamétrico Hanna HI98194 (previamente calibrado según recomendaciones del proveedor), donde se midió el pH, OD, temperatura de agua y SDT. Para la calibración del sensor de pH se usaron tres soluciones Buffer de pH 4.0, 7.0 y 10.0, el OD por calibración de dos puntos (0% de saturación y 100% de saturación), la temperatura y SDT siguiendo los datos de medidos en la sonda.

El análisis de la desviación estándar y el error porcentual de las mediciones obtenidas se muestran en la tabla 2. Los datos muestran una baja variabilidad de los datos obtenidos de la sonda multiparamétrica y la construida en este trabajo. Adicionalmente, los errores en las mediciones no superan el 6,5%. Lo que indica que la sonda construida proporciona información confiable del sistema acuapónico donde será instalada.

Tabla 2: Tendencia de los datos del sistema

	pH	OD	TA	SDT
Desviación Estándar	0,998	0,931	0,823	1,875
Error Porcentual	1,998	6,650	3,413	3,424

4. Resultados y discusión

4.1. Recolección de datos en el sistema acuapónico

Las pruebas de la sonda en el sistema acuapónico se definieron en tres ciclos de sondeo, permitiendo verificar las condiciones de calidad del agua del estanque de tilapia. El proceso de recolección de datos se realizó durante un periodo de tres meses desde el mes de abril del 2023 en tres horas específicas (2am; 10am; 6pm) de cada día, de esta manera se verificó la funcionalidad del sistema en cuanto al envío y almacenamiento de datos. El comportamiento de los parámetros de calidad del agua con parámetros de pH, CE, temperatura, OD y SDT como se muestra en los datos de muestra de la tabla 3.

Según estos datos y el seguimiento del acuicultor al sistema acuapónico se puede inferir que los sensores arrojan datos muy cercanos a los valores reales del sistema y que la mayoría de parámetros estuvieron en los rangos óptimos de producción. Por ejemplo, la temperatura de agua para un adecuado crecimiento debe estar entre 25 a 32 °C [22], sin embargo, otros autores reportan que esta especie tiene comportamiento euritermal donde puede desarrollarse en un amplio rango de temperatura de 20,2 a 31,7 °C y sobrevivir a temperaturas que oscilan entre 13 y 39 °C [23]. Los datos muestran dos comportamientos en los valores de temperatura, el primero en horas de la madrugada donde el promedio fue de 20 °C y en el día donde se logró temperaturas promedio de 25 °C en el día. Los datos muestran, que la temperatura del sistema presento valores que están dentro del rango de supervivencia (madrugada) y en los rangos donde su crecimiento y desarrollo son óptimos (día). La humedad relativa adecuada para el crecimiento y supervi-

Tabla 3: Datos de muestra recolectados por el sistema

Dia	Hora	TAm (°C)	H (%)	pH	OD (ppm)	TA (°C)	SDT (ppm)
18/04/2023	2:00	17,10	98,75	8,17	18,55	17,10	15,18
	10:00	25,44	70,22	8,65	15,24	25,44	0,71
	18:00	20,33	92,11	9,57	17,46	20,33	2,55
19/04/2023	2:00	17,20	98,75	8,25	18,43	17,15	9,62
	10:00	25,50	60,61	6,95	13,47	25,56	1,27
	18:00	20,35	91,88	8,57	17,06	20,35	1,96
20/04/2023	2:00	18,13	98,53	8,64	18,52	18,13	9,50
	10:00	23,00	71,31	7,91	15,56	22,69	2,47
	18:00	18,43	92,64	7,48	15,80	19,07	2,83
21/04/2023	2:00	17,06	98,76	7,36	17,54	17,06	8,41
	10:00	24,60	67,75	7,28	14,57	23,50	0,93
	18:00	19,29	97,29	7,24	15,64	19,19	6,15
22/04/2023	2:00	18,05	99,00	7,22	16,93	18,05	8,94
	10:00	22,50	86,70	7,17	15,78	20,70	1,66
	18:00	19,21	98,21	7,14	15,53	19,11	5,26
23/04/2023	2:00	18,05	99,00	7,13	16,98	18,05	7,63
	10:00	23,73	71,82	7,06	14,31	22,77	0,66
	18:00	18,35	97,35	7,08	15,48	18,29	5,27
24/04/2023	2:00	17,05	99,00	7,08	17,36	17,05	7,88
	10:00	26,52	66,38	7,00	12,51	24,19	0,00
	18:00	19,62	96,62	7,03	15,03	18,54	7,80
25/04/2023	2:00	16,11	99,00	7,05	17,25	16,11	10,12
	10:00	24,61	71,70	6,99	13,41	22,70	0,72
	18:00	19,43	96,00	7,00	14,96	19,29	2,98
26/04/2023	2:00	16,15	98,95	7,00	16,34	16,15	10,13
	10:00	19,88	90,36	7,52	15,43	19,88	42,82
	18:00	19,35	94,76	6,98	15,12	19,18	4,41
27/04/2023	2:00	17,11	98,79	6,99	16,32	17,11	10,67
	10:00	23,86	72,09	6,94	14,19	22,14	0,85
	18:00	20,29	92,65	6,95	14,71	20,18	1,84

TAm: temperatura ambiente, H: humedad, OD: oxígeno disuelto, TA: temperatura del agua, SDT: solidos disueltos totales

vencia de plantas y peces dentro del sistema debe estar entre 75% a 90% y los valores estuvieron en el rango. El pH se mantuvo neutro en la mayoría de las mediciones y este debe estar en el rango de 6 a 9 [24]. En el caso del OD la tilapia puede sobrevivir con niveles inferiores a 0,1 ppm de OD; sin embargo, el crecimiento óptimo se obtiene a concentraciones superiores a 5 ppm [25], en este trabajo los niveles estuvieron muy por encima de los requerimientos, garantizando la supervivencia de los peces. Finalmente, los sólidos disueltos presentaron un valor menor al ideal en cultivo de tilapia que debe ser superior a 5,5 ppm. Los datos tomados en el sistema, no presentan diferencias significativas, excepto para los valores de SDT. Este comportamiento podría asociarse a un sistema acuapónico estabilizado donde hay una sinergia entre los peces-microorganismos-plantas. En el ensayo, no se presentaron cortes de energía, sin embargo, para garantizar el monitoreo el sistema de respaldo energético fotovoltaico está programado de tal manera que se enciende y apague automáticamente una vez identificado un corte de energía eléctrica de la red convencional, lo que asegura un

monitoreo constante para procesos de trazabilidad y análisis de información sin segmentación de los datos. Finalmente, no se reportaron valores de CE, posiblemente a que estos estuvieron por debajo del límite de detección del sensor.

La implementación de sistemas de automatización ha sido reportada por otros autores [15], quienes validaron el funcionamiento de un sistema de monitoreo en tiempo real de tres parámetros de la calidad del agua, en un sistema acuapónico compuesto de especies acuícolas (*Oreochromis niloticus* y *Astyanax*) y especies vegetales (*Lactuca sativa* y *Lemna minor*) bajo condiciones de invernadero durante un periodo de 15 días. El trabajo implementó 3 tipos de módulos de sensores (pH, temperatura y CE) ensamblados en microcontroladoras de Arduino Uno R3. Los datos mostraron valores de pH entre 6.2 y 7.3 y temperaturas entre 21 °C en horas de la mañana y 30 °C en horas de la tarde. Por otro lado, [26] desarrollaron un sistema para monitorear NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , pH, potencial de reducción oxidativo, temperatura y CE en aguas de sistemas acuapónicos y evidenciar su calidad. El

sistema incorpora sensores back-end de alta tecnología, IoT y un marco de análisis de datos con un enfoque de front-end de baja tecnología para poder contribuir en la toma de decisiones de los agricultores. Los autores concluyeron que es posible el monitoreo y envío de datos vía internet de variables críticas en el proceso acuapónico a largo alcance usando LoRa en los nodos y Gateways con LTE-M/NB-IoT para la conectividad a Internet. Además, [27] diseñaron un sistema de monitoreo de parámetros de agua pH, temperatura, turbidez, oxígeno disuelto y conductividad. Los autores concluyeron que las medidas en tiempo real pueden llegar a reducir el uso innecesario de agua y prevenir los riesgos para la salud, sin embargo, la toma de datos para este sistema fue a nivel de laboratorio. A su vez [28], diseñaron un dispositivo inteligente de monitoreo y control para sistemas acuapónicos, el cuál consta de tres partes adquisición de datos, transferencia móvil y aplicación interactiva inteligente. Los resultados mostraron que el sistema puede monitorear humedad, intensidad de la luz, nivel del agua, oxígeno en el agua y los niveles de *E. coil*.

Las investigaciones demuestran, que las nuevas tecnologías pueden ser implementadas para monitorear la calidad de agua y contribuir en el desarrollo tecnológico en la producción de peces y hortalizas. En este sentido, el sistema de monitoreo diseñado e implantado en este estudio puede medir, almacenar y transmitir datos en tiempo real de los parámetros del sistema de acuaponía e indicar en pantalla alteraciones en la calidad del agua. Las tecnologías utilizadas para desarrollar este prototipo han facilitado la medición de parámetros críticos para el desarrollo y crecimiento de tilapia; y en consecuencia favorecer la producción de lechuga y albahaca, teniendo en cuenta que parte de los micro y macronutrientes necesarios para la planta provienen de las heces de los peces y la comida suministrada. Por otro lado, la visualización de la calidad del agua desde cualquier lugar por parte del administrador le permite hacer los ajustes correspondientes asegurando una calidad de agua estable durante todo el proceso. Algunos autores como [15] confirman que el internet de las cosas combinada con microcontroladoras de Arduino es una metodología que permite el monitoreo de parámetros de calidad en sistemas acuapónicos evitando pérdidas en la producción de peces y especies vegetales.

El desarrollo de esta investigación aplicada contribuye a visualizar que las tecnologías de la información y de comunicación (TIC) puede convertirse en una alternativa práctica y confiable para sistemas acuapónicos, mediante el uso de Internet de las cosas donde el usuario puede observar desde cualquier lugar con acceso a internet el comportamiento de los parámetros críticos de calidad del agua, con el fin de no generar dependencia y vigilancia *in-situ* de las personas a cargo del cultivo. Aunque Internet de las cosas ya se ha implementado en el campo de la acuaponía en otras partes del mundo, en Colombia todavía se presenta un rezago que está relacionado con el costo, desconfianza en la implementación de nuevas tecnologías y la falta de conexión entre las

universidades-sociedad-empresa. En este sentido, a través del desarrollo de este proyecto, se pretendió educar y acercar a pequeños y medianos acuicultores al uso e implementación de nuevas tecnologías dando a conocer sus bondades para facilitar el seguimiento de sus cultivos. El sistema presentado en este documento es un desarrollo propio de menor costo a comparación con sistemas comerciales, lo cual hace que su implementación sea más llamativa a usuarios finales. Es así, que el Internet de las cosas y los sistemas de producción por acuaponía pueden traer una revolución en la producción de peces y especies vegetales y contribuir en la seguridad alimentaria.

4.2. Análisis estadístico

El análisis descriptivo muestra desviaciones estándar en el rango de 0,16 a 13,23, donde la mayor desviación fue observada en los sólidos disueltos. Los valores de SDT presentaron los mayores coeficientes de variación. Esto pudo estar asociado a la presencia de alimento no consumido por los peces en el agua en el momento de la medición. Los valores de humedad a las 2:00 y 10:00 am fueron superiores al 90%, lo que indica una media muy por encima de los valores adecuados para producción de peces y sobre todo para plantas. Valores de humedad altos podría afectar el crecimiento de las plantas e inducir el desarrollo de plagas y enfermedades en el cultivo, en este sentido, los valores indican que es necesario disminuir el porcentaje de humedad, en especial horas de la madrugada y en la mañana para prevenir daños en el material vegetal y evitar pérdidas económicas. Adicionalmente, los valores de pH se encuentran en los valores óptimos entre 7 y 9; por otro lado, se presentaron valores muy similares en la media, lo que indica que las especies química asociadas a este parámetro (H+) presentan un comportamiento similar en todas las mediciones. Por otro lado, la concentración de OD fue superior a los niveles requeridos, mostrando una media que oscila entre 14 ppm y 17 ppm, indicando niveles suficientes de oxígeno para los procesos metabólicos propios de los organismos aeróbicos como la tilapia. El agua presento temperaturas ideales para evitar la mortalidad; y favorecer el desarrollo y crecimiento de la tilapia, presentado una media entre 17 y 22 °C. Para los SST, la medio en el periodo de la mañana (6:00 am) presentaron valores por debajo de lo recomendado, para las demás mediciones los SST se mantuvieron por arriba de 5ppm. Finalmente, los mayores CV se observaron en los datos de SST con valores superiores al 22%.

Estadística descriptiva temperatura ambiente

Hora	Mínimo	Máximo	Mediana	Media	DS	CV (%)
10:00 a.m.	19,88	26,52	24,23	23,96	1,88	8
2:00 a.m.	16,11	18,13	17,10	17,20	0,72	4
6:00 p.m.	18,35	20,35	19,39	19,47	0,72	4

Estadística descriptiva humedad del ambiente

Hora	Mínimo	Máximo	Mediana	Media	DS	CV (%)
10:00 a.m.	60,61	90,36	71,50	72,89	9,00	12
2:00 a.m.	98,53	99,00	98,87	98,85	0,16	0
6:00 p.m.	91,88	98,21	95,38	94,95	2,45	3

Estadística descriptiva pH

Hora	Mínimo	Máximo	Mediana	Media	DS	CV (%)
10:00 a.m.	6,94	8,65	7,11	7,35	0,55	8
2:00 a.m.	6,99	8,64	7,18	7,49	0,62	8
6:00 p.m.	6,95	9,57	7,11	7,50	0,87	12

Estadística descriptiva oxígeno disuelto

Hora	Mínimo	Máximo	Mediana	Media	DS	CV (%)
10:00 a.m.	12,51	15,78	14,44	14,45	1,08	7
2:00 a.m.	16,32	18,55	17,31	17,42	0,84	5
6:00 p.m.	14,71	17,45	15,50	15,68	0,90	6

Estadística descriptiva temperatura del agua

Hora	Mínimo	Máximo	Mediana	Media	DS	CV (%)
10:00 a.m.	19,88	25,56	22,73	22,96	1,83	8
2:00 a.m.	16,11	18,13	17,10	17,20	0,72	4
6:00 p.m.	18,29	20,35	19,18	19,35	0,72	4

Estadística descriptiva sólidos disueltos totales

Hora	Mínimo	Máximo	Mediana	Media	DS	CV (%)
10:00 a.m.	0,00	42,82	0,89	5,21	13,23	254
2:00 a.m.	7,63	15,18	9,56	9,81	2,14	22
6:00 p.m.	1,84	7,80	3,70	4,11	1,99	48

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos indican que es posible implementar prototipos soportados en la Internet de las Cosas y alimentado por energía fotovoltaica para el monitoreo de parámetros de calidad de agua como OD, T, pH y CE en sistemas acuapónicos de mediana escala. Los datos obtenidos del sistema acuapónico se encuentran dentro de lo establecido para cultivo de tilapia, siendo los valores de variación más altos los SDT, por posible acumulación de alimento en a la hora de realizar la medición. La toma y visualización de datos en tiempo real por el acuicultor, podría contribuir en la toma oportuna de decisiones en los tanques de peces; disminuyendo pérdidas por mortalidad. Adicionalmente, este sistema podría influir positivamente en los rendimientos de producción y aseguramiento del bienestar animal generando un proceso eficiente y rentable para la comunidad piscicultora de Lengupa.

6. Contribución de la autoría

Primer autor: metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura, borrador original, Segundo autor: análisis de datos, conceptualización, escritura borrador original, revisión y edición, Tercer autor: revisión, edición y administrador del proyecto, Cuarto autor: revisión

7. Agradecimientos

Los autores agradecen a MinCiencias por el financiamiento del proyecto titulado “Implementación de sistemas acuapónicos para la producción limpia y sostenible de peces y hortalizas como estrategia para promover el emprendimiento y la competitividad en las comunidades piscícolas de las provincias de Lengupa y Ricaurte, departamento de Boyacá” en la convocatoria para el cierre de brechas sector agropecuario Boyacá No 865-2019,

Referencias

- [1] FAO “El futuro de la alimentación y la agricultura Tendencias y desafíos”, 2017.
- [2] J. Sung “The Fourth Industrial Revolution and Precision Agriculture” En *Automation in Agriculture Securing Food Supplies for Future Generations*, S. Hussmann, IntechOpen, 2018, pp. 4-15.
- [3] V. Jahnavi & S. Ahamed “Smart Wireless Sensor Network for Automated Greenhouse”, *IETE Journal of Research*, vol. 61, pp. 180-185, Jun, 2015, DOI: 10.1080/03772063.2014.999834.
- [4] N. Yahya “Agricultural 4.0: Its implementation toward future sustainability”, en *Green Urea*, N. Yahaya, Green Energy Technol, 2018, pp. 125-145.
- [5] J. Ighalo, A. Adeniyi, G. Marques “Internet of Things for Water Quality Monitoring and Assessment: A Comprehensive Review, In: *Artificial Intelligence for Sustainable Development: Theory, Practice and Future Applications*, Studies in Computational Intelligence, A. Hasanien, R. Bhatnagar, A. Darwish, Switzerland, Springer, 2021, pp. 245-260.
- [6] W. Sambo, B. Yenke, A. Förster, P. Dayang “Optimized Clustering Algorithms for Large Wireless Sensor Networks: A Review” *Sensors*, vol. 19, pp. 19:322, Nov, 2019, DOI: 10.3390/s19020322.
- [7] E. Quiroga, S. Jaramillo, W. Campo, G. Chanchí “Propuesta de una Arquitectura para Agricultura de Precisión Soportada en IoT” *RISTI*, vol. 24, pp. 39-56, 2017.
- [8] C. Sobin “A Survey on Architecture, Protocols and Challenges in IoT”, *Wireless Pers Commun*, vol. 112, pp. 1383–1429, Jun, 2020, DOI: 10.1007/s11277-020-07108-5.
- [9] B. Yep, & y. Zheng “Aquaponic trends and challenges – A review”, *J. Clean. Prod*, vol. 228, pp. 1586-1599, Ago, 2019, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.290
- [10] Haryanto, M. Ulum, A. Ibadillah, R. Alfita, K. Aji, R. Rizkyandi “Smart aquaponic system based Internet of Things (IoT), *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1211, pp. 012047, Nov, 2019, DOI: 10.1088/1742-6596/1211/1/012047
- [11] H. Yavuzcan, L. Robaina, J. Pirhonen, E. Mente, D. Domínguez, G. Parisi “Fish Welfare in Aquaponic Systems: Its Relation to Water Quality with an Emphasis on Feed and Faeces—A Review”, *Water*, vol. 9, pp. 1-17, Dic, 2016, DOI:10.3390/w9010013
- [12] J. Colt, J. Tomasso “Hatchery water supply and treatment” In *Fish Hatchery Management*, G. Wedemeyer, American Fisheries Society: Bethesda, USA, 2002, pp. 3-55.
- [13] D. Ramirez, D.Sabogal P. Jimenez, H. Giraldo “La acuaponía: una alternativa orientada al desarrollo sostenible”, *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, vol. 4, pp. 32-51, 2017. DOI: doi.org/10.18359/rfcb.2230
- [14] H. Palm, M. Nievel, U. Knaus “Significant factors affecting the economic sustainability of closed aquaponic systems, Part III: plant units”, *AAFL Bioflux*, vol. 8, pp. 1760-1775, Feb, 2015,
- [15] O. Ortiz, P. Rituay, N. Murga, M. De Oliveira, A. Bruno “Monitoreo remoto automatizado de calidad del agua en sistemas acuapónicos en São Paulo, Brasil”, *RISTI*, vol. 31, pp. 223-235, Jul, 2020.
- [16] Arduino Company “Arduino Mega 2560 Rev3” , [Online]. (2023, Jun 10) Disponible en <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>.
- [17] Dfrobot “DFRobot WIKI”, [Online]. (2023, jun 23) Disponible en <https://wiki.dfrobot.com/>
- [18] Brightsolarpower “solar panels”, [Online]. (2023, Jun 29) Disponible en <https://brightsolarpower.co.za/product-category/solar-power-kit/>.
- [19] Electronica I+D, “Sensores” [Online]. (2023, May 22) Disponible en <https://didacticaselectronicas.com/>
- [20] Electronicshub, “ESP32 vs ESP8266 – Which One To Choose” [Online]. (2023, Feb 17) Available: <https://www.electronicshub.org/esp32-vs-esp8266/>
- [21] Rikasensor, “sensor manufacturer & solution” [Online]. (2023, Jun 29) Available: <https://www.rikasensor.com/>
- [22] N. Pandit & M. Nakamura “Effect of High Temperature on Survival, Growth and Feed Conversion Ratio of Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus*”, *Our Nature*, vol. 8: pp. 219-224, Ago, 2010. DOI: 09.10.2010.
- [23] J. Ndaou and P. Vilhelm “Capacity for thermal adaptation in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*): Effects on oxygen uptake and ventilation”, *J. Therm. Biol*, vol. 105, pp. 103206 Abr, 2022. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2022.103206.
- [24] D. DeWalle, B. Swistock, W. Sharpe “Episodic flow-duration analysis: a method of assessing toxic exposure of brook trout *Salvelinus fontinalis* to episodic increases in aluminum” *Can. J. Fish. Aquat. Sci*, vol. 52, pp. 816-827, Dic, 1994.
- [25] Y. Mallya “The Effects Of Dissolved Oxygen on Fish Growth in Aquaculture” Final Project Kingolwira National Fish Farming Centre, Fisheries Division Ministry of Natural Resources and Tourism, Tanzania, 2007.
- [26] M. Alselek, J. Alcaraz-Calero, J. Segura-Garcia, Q. Wang “Water IoT Monitoring System for Aquaponics

Health and Fishery Applications” Sensors, vol, 22, pp. 1-20, Oct, 2022. DOI: 10.3390/s22197679

CA.2018.8597179.

[27] M. Kumar, R. Kumari, M. Rashmitha R. Sinha, B. Sujatha, K. Suma “Smart Water Monitoring System for Real-time water quality and usage monitoring”, ICIRCA, pp. 617-621, Juli, 2018. DOI: 10.1109/ICIR-

[28] D. Wangl, J. Zhao, L. Huang, D. Xu “Design of A Smart Monitoring and Control System for Aquaponics Based on OpenWrt” ICIMM, pp. 937-942, Jul, 2015. DOI: 10.2991/icimm-15.2015.171.