

Diseño y evaluación de una red de sensores para analizar entornos acuáticos

Gerardo F. Sacarelo V., Gabriela A. Romero M., Patricia Chávez, Daniel Ochoa

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Km. 30,5 vía perimetral, Guayaquil, Ecuador.

Autor para correspondencia: gsacarel@espol.edu.ec

Fecha de recepción: 21 de septiembre de 2014 - Fecha de aceptación: 17 de octubre de 2014

RESUMEN

En la acuicultura, la producción de camarón depende de parámetros ambientales, y químicos en el agua. Usualmente, la medición y compilación de datos acerca de estos parámetros se realiza manualmente. En este trabajo se propone y evalúa una red de sensores cuyos nodos se interconectan inalámbricamente para recolectar datos automáticamente. El diseño de la red explota la topología de malla, misma que permite incrementar la fiabilidad en la transmisión de datos. Adicionalmente, los módulos de hardware utilizados se configuran para reducir el consumo de energía. Se realizaron pruebas en entornos reales (tanques y piscinas) con varios nodos colocados en plataformas flotantes para capturar, transmitir y acumular datos relativos a temperatura del agua. Los resultados obtenidos son alentadores y demuestran las posibilidades que existen para explotar componentes electrónicos de bajo costo en aplicaciones de acuicultura inteligente.

Palabras clave: Acuicultura, sensor, red inalámbrica, malla.

ABSTRACT

In aquaculture, shrimp growth and health are affected by changes in environmental and water quality parameters. Currently, parameter data is collected manually. This paper proposes a wireless sensor network to collect automatically water parameter related data in shrimp farms. A mesh topology was used in the network implementation. This topology increases data transmission reliability. To reduce power consumption off-the-shelf hardware modules with energy saving mode were used. Nodes were placed on floating platforms to collect and transmit water temperature data at various rates. The sensor network was tested in lab and field environments (tanks and farms). The results obtained so far are encouraging and demonstrate the possibilities of exploiting low-cost electronic hardware for smart aquaculture applications.

Keywords: Aquaculture, sensor, wireless network, mesh.

1. INTRODUCCIÓN

El camarón representa el segundo rubro de ingreso de exportaciones para Ecuador; y de la producción total de camarón, la especie *litopenaeus vannamei* (camarón blanco) representa el 95%. Ecuador vende 400 millones de libras anuales de camarón, incluyendo productos de valor agregado (PRO ECUADOR, 2014). Solo en el mes de abril del 2014, el país obtuvo un ingreso aproximado de 200 millones de dólares en la exportación del camarón (CNA, 2014).

En entornos acuícolas, el crecimiento del camarón se ve afectado por las condiciones climáticas y la contaminación del agua (Petriella & Boschi, 1997). Así mismo, la forma como se cultiva el camarón: cría intensiva, uso indiscriminado de químicos, tóxicos y antibióticos, tiene influencia directa en la aparición de enfermedades (Bravo, 2002). Por esto, es indispensable el monitoreo

continúo de parámetros ambientales y químicos para mantener la calidad del agua en niveles adecuados para el cultivo de camarón; caso contrario, las enfermedades se pueden propagar rápidamente y generar una caída en los niveles de producción. Según FAO (2012) en 2010, 1,7 millones de toneladas de camarón se perdieron en China por contaminación del agua y enfermedades; y en 2011, brotes de enfermedades acabaron con gran parte de la producción de camarón.

El uso de sistemas de monitoreo con múltiples sensores ya fue propuesto por Shen *et al.* (2009) para evaluar la calidad de agua en acuicultura. Este sistema estuvo basado en redes neuronales requiere altas capacidades de procesamiento de datos. La transmisión inalámbrica de datos y procesamiento off-line fueron sugeridos usando tecnología GPRS (Hua *et al.*, 2010). Estos enlaces punto a punto utilizan la infraestructura de telefonía celular. Una alternativa de bajo coste es la tecnología Zigbee (Sun & Zhang, 2009), basada en el estándar IEEE 802.15.4. Un trabajo previo utilizando esta tecnología fue presentado en (Simbeye *et al.*, 2014). El sistema propuesto consistía en varios nodos con sensores y un nodo coordinador. En esta arquitectura, cada nodo transmite información al nodo coordinador de manera independiente.

En este artículo reporta el avance en el diseño e implementación de una red de sensores inalámbricos, donde cada nodo está ubicado sobre una plataforma flotante. En el diseño propuesto no existe nodo coordinador. Cada nodo envía información al nodo más cercano, eventualmente la información llega a su destino. Es tipo de red, usualmente referida como red malla, tiene la ventaja de ser redundante, auto-regenerable y auto-configurable (Copas, 2010). A fin de demostrar la utilidad de la red en la medición de la temperatura del agua, se realizaron pruebas en la Estación Experimental del Centro Nacional de Acuicultura e Investigaciones Marinas (CENAIM-ESPOL).

Para implementar nuestro diseño se utilizaron módulos de radiocomunicación de bajo costo que emplean la tecnología ZigBee y el protocolo DigiMesh. Esta combinación, permite crear una red con topología malla utilizando todos los nodos. Adicionalmente, es posible configurar cada módulo a modo inactivo para ahorrar energía. El costo y uso de energía es importante porque en países productores, la mayor cantidad de acuicultores realizan esta actividad a baja escala y el acceso a las redes de energía y comunicación es limitada.

2. DISEÑO DE LA RED

Para el diseño de la red, se estudiaron dos entornos acuáticos diferentes ubicados en las instalaciones del CENAIM-ESPOL. Los tanques son entornos en interiores, tal como se ilustra en la Fig. 1, corresponde a recipientes negros ovalados de 24 m² de superficie y 1 m de profundidad. Las piscinas de tierra son entornos exteriores, como se muestra en la Fig. 2, y consisten en piscinas grandes (aprox. 2500 m²) y pequeñas (aprox. 500 m²), con una profundidad máxima de 1,2 m. La parte inferior de las piscinas es inclinada para facilitar la recolección de los camarones.



Figura 1. Tanques en las Instalaciones del CENAIM-ESPOL, San Pedro.

2.1. Topología de la Red

Existen topologías de red, tales como anillo y árbol, las cuales pueden ser utilizadas pero no cumplen con el propósito de crear una red redundante; en la cual, si uno de los nodos falta o falla, la comunicación inalámbrica no sea afectada. Por consiguiente, se decidió diseñar una red con topología de malla.



Figura 2. Estanques en Estación Experimental del CENAIM-ESPOL, Manglaralto.

Inicialmente se estudió cómo funciona la comunicación punto a punto para establecer las condiciones del enlace, los patrones de comportamiento y el alcance máximo entre dos nodos. Luego se determinó cuántos módulos de comunicación se necesitan en cada tipo de entorno, y se verificó la calidad de la radiocomunicación, como se explica a continuación:

- *Punto a punto:* Este tipo de comunicación fue utilizada para los tanques debido al reducido espacio de trabajo. La distancia máxima entre nodos fue de 27,3 m. En cambio, en piscinas pequeña, los enlaces punto a punto permitieron interconectar una fila de nodos, como se ilustra en la Fig. 3.

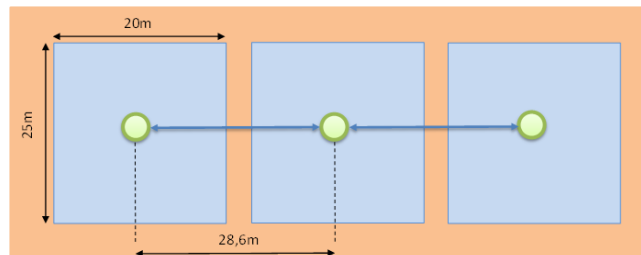


Figura 3. Topología punto a punto entre piscinas pequeñas.

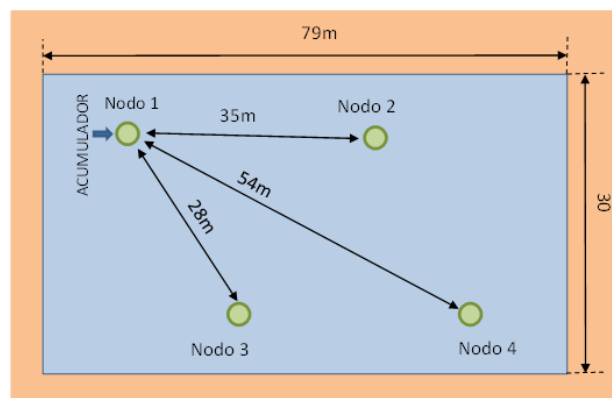


Figura 4. Topología tipo malla en piscinas grandes.

- *Mallada*: Se implementó esta topología para las piscinas grandes, lugares donde se realiza el policultivo. Estas áreas requieren por lo menos cuatros nodos para poder monitorear correctamente la temperatura, como se puede apreciar en la Fig. 4.

2.2. Arquitectura de la red

Las topologías de redes estudiadas, estuvieron conformadas por tres tipos de nodos: transceptor, acumulador y repetidor. Cada nodo consistía de: una batería, un controlador y un módulo transceptor, excepto el repetidor que no poseía microcontrolador. Los nodos (transceptores y acumulador) son capaces de obtener, procesar y enviar datos de temperatura del agua. Como se observa en la Fig. 5, el dispositivo electrónico para cada nodo es el mismo, solo cambia el programa que se graba en el microcontrolador.

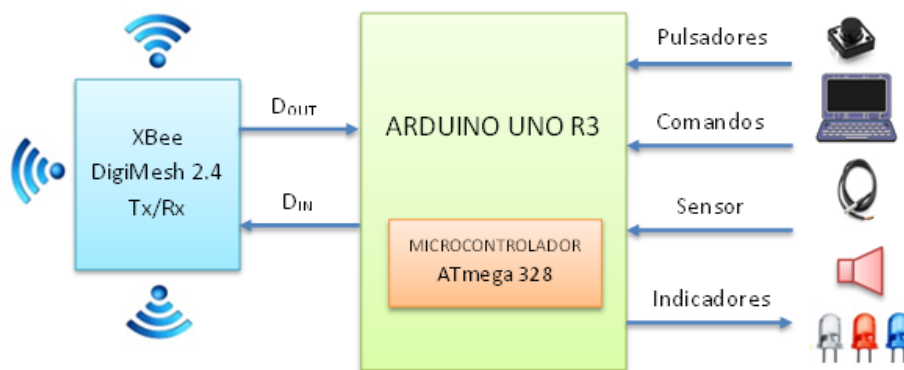


Figura 5. Diagrama de bloque del transceptor.

Para la topología malla se utilizaron nodos repetidores, los cuales transmiten la información hacia los demás nodos hasta llegar al nodo acumulador. Estos nodos permiten hacer una red expansible. Se puede incluir más sensores en estos nodos para aprovechar su memoria, capacidad de procesamiento, interfaces de entrada/salida, etc.

3. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Cada tipo de nodo tiene un sistema electrónico, el cual es colocado dentro de una caja térmica para protegerlo del agua, la salinidad y la humedad. Las cajas fueron colocadas sobre bases flotantes sensores hechas de espuma de polietileno y fibra de vidrio.

3.1. Materiales

Para el procesamiento de comandos e información, se utilizó un controlador, el cual está compuesto principalmente por un microcontrolador Atmega328, catorce puertos digitales, seis puertos analógicos y tres tipos de memorias: Flash, SRAM y EEPROM. Los puertos permiten capturar la información de los sensores. Las memorias almacenan el programa y la información procesada. Se recomienda que el voltaje de entrada en el controlador esté en el rango de 7 a 12 V.

Los módulos transceptores operan en la banda de frecuencias no licenciadas ISM de 2,9 GHz y pueden transmitir datos hasta 250 Kbps. El rango de cobertura en escenario en interiores puede alcanzar hasta los 30 m, y en exteriores, hasta los 100 m protegiendo la línea de vista y el primer radio de Fresnel (Saunders & Aragón Zavala, 2007). El transceptor puede ser alimentado con 3,3 o 5 V, necesita 1mW para transmitir y la sensibilidad del receptor es de -92 dBm.

Las pruebas consistieron en analizar la temperatura en medios acuáticos, debido a que este factor influye en la solubilidad de oxígeno en el agua y por consiguiente en la supervivencia del camarón. Se utilizaron termómetros digitales (DS18B20) pues solo requieren una línea de datos para comunicarse con el microprocesador y no es necesario una fuente externa de energía. El sensor usado reporta la temperatura en Celsius en un tiempo máximo de 750 ms con una resolución digital de 12 bits equivalente a 0,0635°C. El rango operativo del sensor es -55°C a +125°C con una exactitud de $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

3.2. Procedimiento

Se realizaron cuatro tipos de pruebas, las cuales se enfocaron en: (1) comprobar el bajo consumo de energía de los módulos transceptores en los diferentes modos de operación, (2) determinar el tiempo que demora en establecer el enlace entre dos nodos, (3) evaluar los errores en la transmisión de datos de una red punto a punto, y (4) verificar la calidad de la transmisión de la red malla propuesta.

Para las pruebas, excepto consumo de energía, se debe fijar la tasa de datos en el puerto serial a 9600 bps y en RF a 250 Kbps. En cada escenario se repitieron las pruebas 100 veces para tener un margen de error aceptable, ya que el número mínimo de muestras requeridas eran 73 a un 95% de confiabilidad basado en la fórmula estadística del tamaño de muestreo para un intervalo de confianza conocido (Badii *et al.*, 2008). A continuación, se detalla cada una de las pruebas:

1. Consumo de energía de los módulos transceptores: Medir el voltaje y la corriente de los módulos transceptores utilizando un par de multímetros. Para voltaje, conectar un multímetro en paralelo con la fuente de alimentación y para corriente, uno en serie.
2. Tiempo del enlace de una red punto a punto: Para obtener el retardo entre dos nodos, se debe programar un saludo, el cual consiste en que el transmisor envía un mensaje para iniciar la comunicación al receptor con un sello de tiempo. Si el receptor recibe el mensaje, devuelve una confirmación para calcular el retardo. El tiempo en establecer el enlace entre dos nodos, es la mitad del tiempo transcurrido debido a que recorre dos veces la misma distancia.
3. Pérdidas de paquetes de una red punto a punto: El transmisor envía tramas de 32 KB y espera a que el receptor procese lo recibido, para enviar la siguiente. Se repite el procedimiento hasta completar el tamaño total del paquete y el número de muestras, para luego comparar la información recibida con la enviada, y calcular los paquetes perdidos en la transmisión.
4. Calidad de la red malla: En las piscinas grandes, colocar varios nodos donde cada uno captura la temperatura de una región específica y la envía al nodo acumulador. Este nodo recibe los datos obtenidos por los demás y los almacena en la memoria EEPROM del controlador.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en los diferentes entornos.

4.1. Consumo de energía

En la Tabla 1, se muestra la potencia instantánea consumida por los módulos transceptores en los diferentes modos de funcionamiento:

Tabla 1. Consumo energético instantáneo de los módulos de comunicación.

XBee DigiMesh <i>Modo</i>	Energía Instantánea		
	<i>Voltaje (V)</i>	<i>Corriente (mA)</i>	<i>Potencia (mW)</i>
Transmisión	3,28	26,63	87,3
Recepción/ Espera	3,28	37,22	122,1
Ahorro	3,28	0,05	0,16

El modo ahorro de energía que posee el módulo transceptor tiene un gran impacto para la construcción de la red. Esto implica, como se observa en la Tabla 1, reducir su potencia un 99,87% respecto al modo de espera. Entre más tiempo permanezca en este modo mayor es la carga remanente de la batería. Es decir podría disponerse de energía para los 90 días que dura una cosecha completa de camarón.

Para la prueba de duración de batería vs frecuencia de monitoreo, se establecieron las siguientes condiciones: primero, un monitoreo equivale a transmitir durante un minuto; segundo, la comunicación es half dúplex (envía o recibe); tercero, el tiempo de recepción más el tiempo de espera equivale al doble del tiempo de transmisión y por último, el tiempo de ahorro es lo que reste del día (configurar el SM del modo transceptor). Como se ilustra en la Fig. 6, el consumo de energía por cada módulo transceptor disminuye notablemente la duración de la batería conforme aumenta la frecuencia de muestreo.

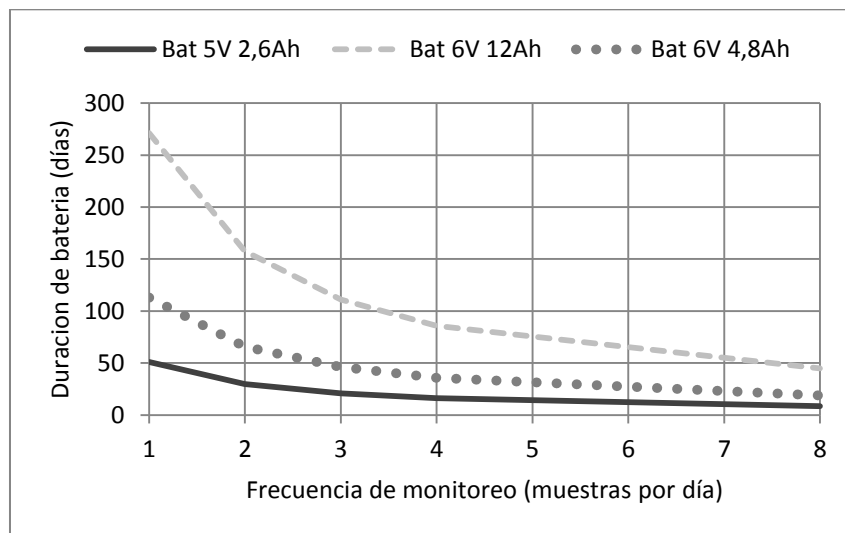


Figura 6. Duración de la batería vs frecuencia de monitoreo por módulo.

Al agregarle al nodo, un microcontrolador y un sensor de temperatura, el consumo de energía instantánea tuvo un aumento de 203 mW. Cabe recalcar, que los módulos transceptores son de bajo consumo de energía, y para un manejo exhaustivo del modo ahorro, existe la puerta de enlace (Connect Port), la cual puede sincronizar los tiempos de toda la red.

4.2. Retardo del enlace

De acuerdo a las pruebas realizadas punto a punto entre los módulos de transmisión en los diferentes entornos, se obtuvo los retardos promedios con su respectiva dispersión (ver Tabla 2).

Tabla 2. Retardos del enlace entre dos nodos de comunicación.

Lugar	Distancias (m)	Retardos promedios (ms)	
		Promedio	Desviación Estándar
Tanques	20,00	25,45	6,46
	27,30	38,71	10,26
Piscinas	20,30	16,50	3,74
	40,60	17,60	4,23
	60,90	16,40	3,65

Al experimentar la transmisión en el medio acuático, los valores obtenidos del retardo fueron coherentes con los valores teóricos, por lo que podemos emplear la fórmula de la hoja de especificaciones técnicas de los módulos transceptores para determinar el tiempo máximo en que llega un mensaje al realizar 32 saltos entre nodos.

$$\text{BroadcastTxTime} = \text{NN} \times \text{NH} \times (\text{MT} + 1) \times 18 \text{ ms} \quad (1)$$

El parámetro NN son los “network delay slots”, tiempo que espera antes de retransmitir la información, por defecto es 3. El parámetro MT es el número de veces en que se retransmite el mensaje para dar mayor seguridad, su valor es 3. Finalmente, el parámetro NH es el número de saltos que puede realizar el mensaje antes de ser descartado, el valor máximo es 32. Al reemplazar los valores, el tiempo en que se demora en hacer 32 saltos es de 6,9 s.

4.3. Pérdidas de paquetes

Los resultados obtenidos en escenario exterior a una distancia de 28,6 m entre nodos e ignorar el radio de Fresnel, se muestran en la Fig. 7. En las piscinas camaroneras existía un obstáculo (h_o) en la mitad con respecto al nivel del agua de 70 cm que afectaba al radio de Fresnel, como se ilustra en la Fig. 8. Por esa razón, al aumentar la altura de la antenna, se perdían menos paquetes.

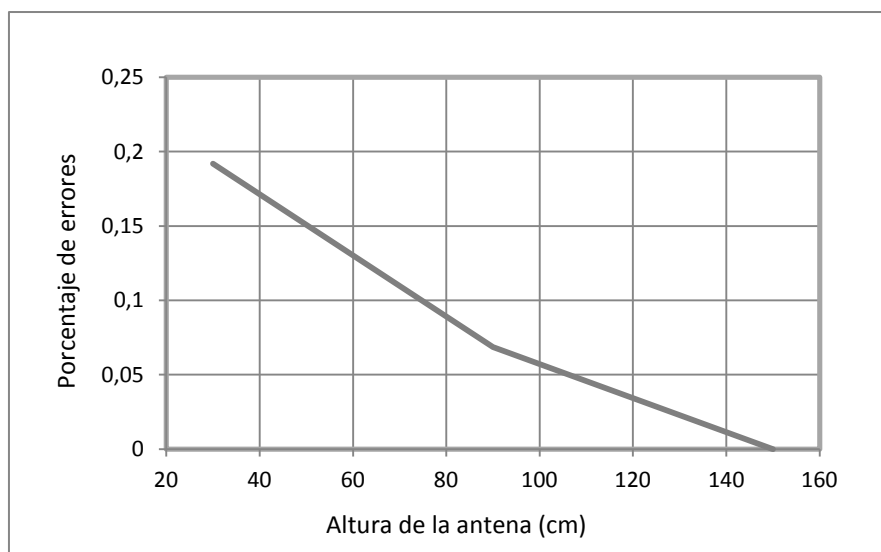


Figura 7. Porcentaje de errores versus altura de la antena.

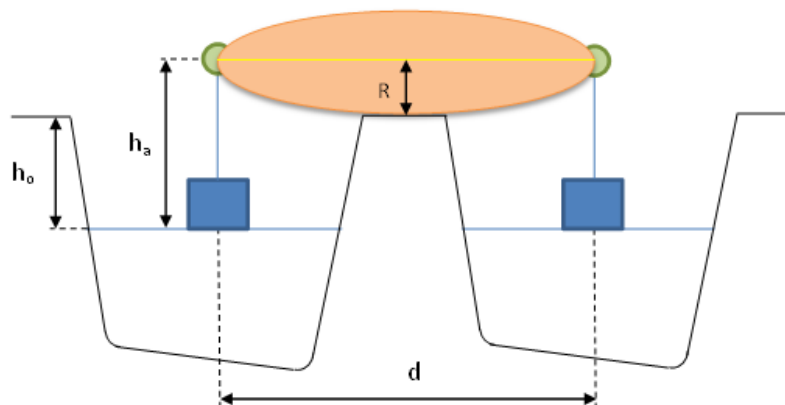


Figura 8. Esquema de la zona de Fresnel entre dos nodos.

De acuerdo a las especificaciones técnicas de los módulos transceptores, se debería alcanzar una distancia máxima de 100 m pero en este estudio se alcanzó 60,9 m debido a que la altura requerida para los módulos es directamente proporcional a la separación entre nodos. Para alcanzar los 100 m en dicho escenario, se necesitaba 240 cm de altura, la cual produce inestabilidad física en el sistema.

4.4. Red con topología malla

En las piscinas grandes fue posible evaluar la red con topología malla. La red tenía 5 y la distancia máxima entre nodos fue de 54 m. Cada nodo transmite la temperatura capturada por su respectivo sensor hasta el acumulador durante un lapso de tiempo predeterminado.

En la Fig. 9, se muestran la temperatura promedio recopilada en el nodo acumulador. Las temperaturas de las piscinas cambian de forma similar en el transcurso del tiempo. La variación de la medición entre ellas se produce por la presencia de camarón cerca de los sensores al momento de la prueba. Una limitante del sistema electrónico para recolectar información es la capacidad de almacenamiento de datos en el microcontrolador.

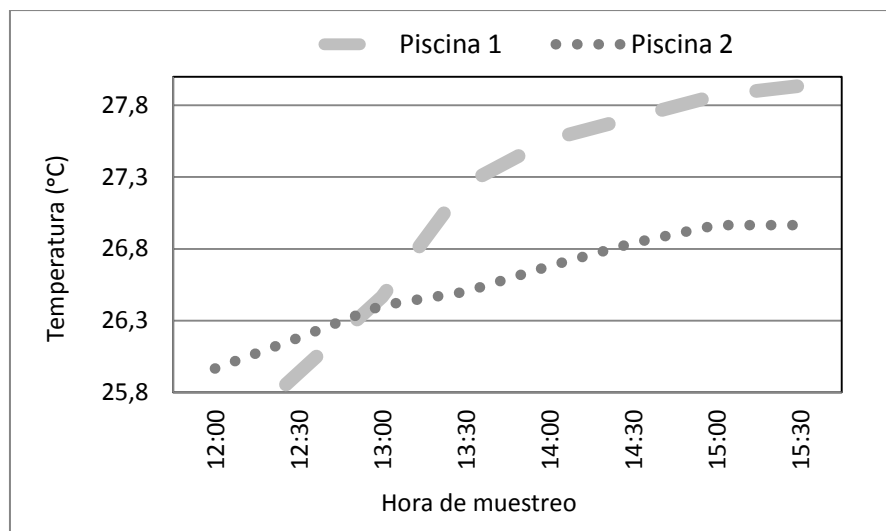


Figura 9. Promedio por piscina de datos recibidos por el acumulador desde los otros nodos.

5. CONCLUSIÓN

En este trabajo se implementó una red, donde los nodos consistían en un módulo transceptor, controlador y un sensor de temperatura. Se comprobó que estos módulos no poseen jerarquía, es decir, esta red no necesitó enrutadores y todos los nodos se comunicaban entre ellos de forma independiente. También se comprobó que el consumo de energía de los módulos transceptores es bajo y es posible ahorrar más energía al configurarlos en modo ahorro. El retardo promedio no se vio afectado en medios acuáticos. En escenario en interiores, el tiempo en establecer la conexión entre módulos transceptores es mayor que en entornos exteriores debido a que en un ambiente cerrado hay más obstáculos y se produce el efecto multi-trayectoria.

La comunicación punto a punto entre dos módulos transceptores se puede realizar hasta los 100m en entornos acuáticos exteriores protegiendo la línea de vista y por lo menos, el 60% del primer radio de Fresnel, pero requiere que la altura de los módulos sea elevada para la comunicación entre piscinas ya que el borde de la misma es un obstáculo. Los experimentos demostraron que el monitoreo automático temperatura en entornos acuícolas es posible; cada nodo enviaba la temperatura obtenida por el sensor cada cierto período de tiempo (en este caso, cada 30 minutos). Debido a que se emplearon las condiciones obtenidas en experimentos previos de la red punto a punto, y si uno de los nodos no funcionaba, la transmisión de datos no se veía afectada.

Adicionalmente, se hicieron pruebas empleando un sensor de oxígeno, con la finalidad de verificar que el controlador tiene la capacidad de procesamiento necesaria para registrar datos de más de un sensor. Un trabajo futuro puede ser agregar más sensores a los nodos de la red, incorporar una memoria externa para tener mayor capacidad de almacenamiento y por último, dimensionar las baterías recargables según la operación de cada nodo y usar celdas solares.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Stanislaus Sonnenholzner por sus sugerencias y al Centro Nacional de Acuicultura e Investigaciones Marinas (CENAIM), institución que nos proporcionó sus instalaciones para realizar las respectivas pruebas en los diferentes entornos analizados.

REFERENCIAS

- Badii, M. H.J. Castillo, A. Guillen, 2008. Tamaño óptimo de la muestra. *InnOvaciOnes de NegOciOs*, 5(1), 53-65. Descargado de http://www.web.facpya.uanl.mx/rev_in/Revistas/5.1/A5.pdf.
- Bravo, E., 2002. Caso 2: La industria camaronera en el Ecuador. Ponencia presentada en "Globalización y Agricultura. Jornades para la Soberanía Alimentaria, Barcelona, 11 pp. Descargado de <http://www.edualter.org/material/sobirania/enlace7.pdf>.
- CNA, 2014. Exportaciones por Mercado y País comparativo acumulado a Abril 2014. Cámara Nacional de Acuicultura. Descargado de <http://www.cna-ecuador.com/estadisticas-cna/camaron/1334-camaron-abril-2014> el 6 de agosto 2014.
- Copas, E.F., P.P. Lizondo, M.E. Savoy, 2010. Wireless mesh networks: Estudio, diseño y aplicaciones. UTN-Facultad Regional Tucumán, Argentina, 7 pp. Descargado de http://www.frsf.utn.edu.ar/cneisi2010/archivos/33-WMN_estudio_dise%C3%B1o_y_aplicaciones.pdf.
- FAO, 2012. *The State of the World Fisheries and aquaculture 2012*. Food and Aquaculture Organization of the United Nations, Roma.
- Hua, M., De-an Zhao, W. Xia, Y. Zhu, L. Xingqiao, 2010. The design of intelligent monitor and control system of aquaculture based on wireless sensor networks. 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology (ICCSIT), Vol.2., 9-12. Disponible en <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5564771>.
- Mathiesen, A.M., 2012. The State of the World Fisheries and aquaculture. FAO, Roma, 230 pp. Descargado de <http://www.fao.org/docrep/016/i2727e/i2727e00.htm>.
- Petriella, A.M, E.E. Boschi, 1997. Crecimiento en crustáceos decápodos: resultados de investigaciones realizadas en Argentina. *Invest. Mar. Valparaíso*, 25, 135-157.
- PRO ECUADOR, 2014. Instituto de promoción de exportaciones e inversiones. Descargadp de <http://www.proecuador.gob.ec/compradores/oferta-exportable/fishing-and-aquaculture/> el 10 de septiembre 2014.
- Saunders, S., A. Aragón Zavala, 2007. *Antennas and propagation for wireless communication Systems* (2nd ed.). Wiley, 546 pp.
- Shen, X., M. Chen, J. Yu, 2009. Water environment monitoring system based on neural networks for shrimp cultivation. International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, AICI '09, Vol. 3, 427-431. Disponible en <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5376735>.
- Simbeye, D.S., J. Zhao, S. Yang, 2014. Design and deployment of wireless sensor networks for aquaculture monitoring and control based on virtual instruments. *Comput. Electron. Agr.*, 102, 31-42.

Sun, J., X. Zhang, 2009. Study of ZigBee wireless mesh networks. Ninth International Conference on Hybrid Intelligent Systems, HIS '09, Vol.2., 264-267. Disponible en <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5254462>.