

Development of a prototype wireless sensory network implemented with Zigbee technology for monitoring water quality.

Ana Belén Albarracín Samaniego
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Escuela Politécnica del Ejército, ESPE
Quito, Ecuador
ana.belen.albarracin@gmail.com

Daysi Ximena Contero Rosero
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Escuela Politécnica del Ejército, ESPE
Quito, Ecuador
daysiximena@gmail.com

ABSTRACT— *This project presents the design and implementation of a system for monitoring water quality at the treatment plant wastewater Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey - Mexico when have developed a wireless sensor network using modules Zigbee-based communication technology. The project consists of three main stages: implementation stage, wireless network and the development of user interface. For the development of WSN (Wireless Sensor Network) was used XBee Development Kit ZNet. The user interface was programmed using the graphical tool for Labview™ data visualization, presentation graphics and iDigi™ server access. Warning alarms were programmed contaminants in water features, to get out of range values for parameter: pH, dissolved oxygen and temperature. Finally, we conducted performance tests of the system include tests of range, accuracy, communication and power consumption.*

Keywords. - *Design, coverage, Zigbee, AODV, water quality, pH, dissolved oxygen, temperature.*

I. INTRODUCCIÓN

Debido a la creciente escasez de agua a nivel mundial, centros de investigación trabajan en el desarrollo de nuevos métodos para la conservación de este recurso. La reutilización de agua residual doméstica tratada es una opción importante para ser explorada con el objetivo de proteger la salud pública y el medio ambiente. Por esta razón es esencial el riguroso control y monitorización oportuna de la calidad higiénica del agua regenerada.

Las redes inalámbricas de sensores han sido ampliamente consideradas como una de las tecnologías más importantes del siglo XXI [1], ya que una característica común para este tipo de redes es que pueden ser utilizadas para realizar tareas específicas a través de un largo periodo de tiempo y aplicarlas en diversos entornos como por ejemplo en sistemas de monitorización y control de plantas industriales, aplicaciones militares, cuidado de la salud, monitorización del ambiente, domótica, entre otros.

Zigbee es un estándar de comunicaciones inalámbricas diseñado por la Alianza Zigbee [2] la cual es una comunidad internacional de compañías, quienes promueven esta tecnología

con capacidades de control y monitorización basados en características de flexibilidad, consumo energético y bajo costo, funcionando vía radio y de modo bidireccional, cumpliendo el estándar público global que permite a cualquier fabricante crear productos compatibles entre sí.

Producto de la investigación y estudios realizados previo a la implementación del prototipo se obtuvo un artículo técnico basado en experimentación real llamado “Consideraciones Esenciales de Diseño de Redes Zigbee”, ISSN 1390-4663 [3], el cual fue publicado en el volumen 7 de la revista científica correspondiente al Congreso de Ciencia y Tecnología de la ESPE 2012. Los resultados de este artículo sirvieron como base experimental para el diseño e implementación de las diferentes etapas del proyecto.

En base a los argumentos expuestos anteriormente se desarrolla un prototipo de red inalámbrica sensorial implementada con la tecnología Zigbee para monitorización de la calidad del agua en una planta de tratamiento de agua residual, determinando parámetros primordiales como: nivel de pH, Oxígeno disuelto (OD) y temperatura en tres diferentes tanques de tratamiento.

El Departamento de Telecomunicaciones y Microelectrónica del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) [4], apoyó al desarrollo de este proyecto proporcionando el Kit de desarrollo XbeeZNet 2.5 de Digi y por otro lado, el Centro del Agua para América Latina y el Caribe (CAALC) [5], un centro de investigación del Tecnológico enfocado a temas del uso sustentable del agua, nos apoya con la instrucción acerca de los parámetros determinantes de la calidad de agua, así también con los sensores especializados con los que cuenta su laboratorio.

II. ESPECIFICACION ZIGBEE

Una de las especificaciones más importantes para este tipo de aplicaciones es Zigbee [2], respaldado por la Alianza Zigbee, quienes han desarrollado una tecnología de bajo costo, consumo y tasa de datos, además incluye la capacidad de ser

escalable ofreciendo protocolos de comunicación de alto nivel y configuración en topología malla.

En la Fig. 1 se muestran las capas correspondientes a Zigbee, que a su vez brindan servicio a las capas superiores. Las primeras dos, física (*PHY*) y de control de acceso al medio (*MAC*) son definidas por el estándar IEEE 802.15.4 de Redes Inalámbricas de Área Personal (*WPAN*) [6]; La alianza Zigbee provee la capa de red (*NWK*) y de aplicación (*APS*). La estructura de la capa de aplicación consiste en el soporte de las subcapas *APS* y de Objetos de Dispositivos Zigbee (*ZDO*). Además, los fabricantes definen los objetos de aplicación usando la estructura y compartiendo los servicios de *APS* y de seguridad con los *ZDO*.

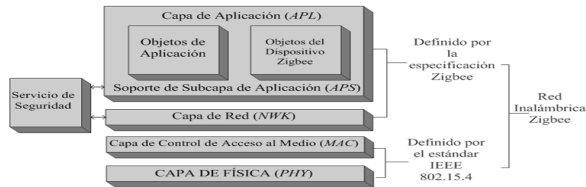


Figura 1. Capas de la Arquitectura Zigbee [3].

III. DISEÑO Y DESARROLLO DEL PROTOTIPO

A. Arquitectura del Sistema

El sistema de monitorización de la calidad de agua residual consiste en la colocación de los dispositivos finales en tres puntos para la toma de muestras en los tanques del proceso de tratamiento del agua residual. De esta manera, se ubicaron dos dispositivos finales en dos tanques de aireación captando valores de oxígeno disuelto y temperatura; y uno en el tanque de desinfección detectando niveles de pH y temperatura.

La Fig. 2 muestra la arquitectura del sistema, donde el coordinador luego de recolectar la información de cada dispositivo final, envía dicha información a la base de datos iDigi Cloud [7] provista por el fabricante de los módulos Digi, con los cuales estamos trabajando, gracias a que este servicio web es habilitado gratuitamente para un máximo 5 dispositivos coordinadores.

Se ha desarrollado una interfaz de usuario diseñada en LabView™ [8], donde se permite visualizar indicadores y gráficas de los parámetros censados por cada dispositivo final correspondiente a cada punto de muestreo, además un sistema de alarmas y consulta de históricos independientes por cada dispositivo.

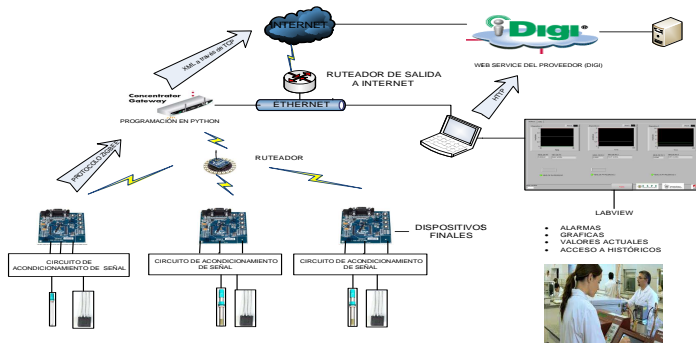


Figura 2. Arquitectura del Sistema

B. Frecuencia de Muestreo y Gestión de ahorro de energía

El proceso de muestreo de un cuerpo de agua es una actividad muy importante pues determina, junto al análisis adecuado de la muestra, la integridad y confiabilidad de los datos derivados de la misma. La frecuencia de muestreo debe ser programada de tal forma que exista un equilibrio entre el tiempo mínimo requerido para la oportuna toma de decisiones y un eficiente consumo energético.

Analizando los requerimientos y opiniones del CAALC, y bajo la norma mexicana de aguas residuales NMX-AA-003-1980 [9], se ha determinado que un tiempo de 4 minutos entre cada muestra sería suficiente para evitar la pérdida de información importante producida por un evento desafortunado. Durante este tiempo los dispositivos finales permanecerán dormidos o en estado de ahorro de energía.

Dado que el sistema de medición propuesto es un sistema directo, en el que el tiempo entre la captura de la muestra y el análisis de la misma es muy corto, esto reduce considerablemente la posibilidad de tener mediciones erradas. A pesar de esto, fue considerado oportuno el tomar 2 muestras por cada ciclo, una al principio y otra al final del período en el que el dispositivo despierta.

C. Seguridad de Red.

La seguridad de la red Zigbee se basa en el algoritmo de cifrado, el cual modifica un mensaje utilizando una cadena de bits conocida como la clave de seguridad, la cual se configura previamente en cada dispositivos y sólo el destinatario sabrá para recuperar el mensaje original. El estándar IEEE 802.15.4 soporta el uso de *Advanced Encryption Standard* (AES) para cifrar sus mensajes salientes, el cual es uno de los algoritmos más empleados para cifrado.

D. Diseño de los circuitos de acondicionamiento de señales

Es fundamental diseñar los circuitos de acoplamiento de señales que permitan la lectura de los parámetros del nivel de pH, OD y temperatura, leídos desde los puertos analógicos de cada dispositivo final para posteriormente procesarlos y enviarlos hacia el usuario final.

Considerando que las entradas analógicas de estos dispositivos soportan de 0 a 1.2 V, todas las señales de salida de los sensores que serán colocados a cada nodo, debieron ser amplificadas dentro de este rango.

La salida del sensor de pH fue de entre -400 mV a 400 mV con respecto a una escala de 14 (ácido) a 0 (alcalino) niveles de pH, lo cual después de la etapa de amplificación fue escalado de 0 V a 1 V inversamente proporcional al nivel de pH. Para esta conversión se utilizó una etapa de filtrado que permitió atenuar el ruido que pudiere causar al electrodo que conforma el sensor; una etapa de alta impedancia para mejorar la sensibilidad de estos dispositivos; una etapa inversora para invertir la señal y un amplificador diferencial para crear un offset en la función de transferencia y que los valores de la salida de dicho sensor sean todos positivos.

El sensor de OD es un sensor polarográfico, esto quiere decir que necesita de un voltaje de polarización negativa aplicado a su cátodo para funcionar.

Para este caso, el sensor requirió de un voltaje de polarización negativa de $-0.666V$, dato obtenido del fabricante. Con este voltaje de polarización, el sensor entrega un rango de corriente aproximadamente de $0 - 66nA$ a una temperatura de $25\text{ }^{\circ}C$. El circuito de acoplamiento consta de tres etapas: la etapa de conversión de corriente a voltaje con ganancia, inversión de voltaje negativo a positivo y producción de voltaje de polarización, la cual se realizó con un regulador de voltaje negativo.

La salida del sensor de temperatura no tuvo la necesidad de un circuito de acondicionamiento, debido a que utilizando el integrado LM35DT su salida entrega un valor de voltaje de 0 a $1V$.

E. Diseño de la Gestión de Red

El software utilizado para la programación en el nodo coordinador es Digi ESP for Python versión 1.3.0 [8], en el cual utilizamos varias librerías de Python que permiten la gestión de la red, logrando así la monitorización y control de todos los nodos que forman la red inalámbrica Zigbee, además de las funciones de escalamiento.

F. Diseño de la interfaz de usuario.

Se diseñó una interfaz de usuario práctica, sencilla y que permita la monitorización de los datos en tiempo real, utilizando Labview™ como herramienta gráfica que permite la programación del acceso a los datos, visualización de gráficas e históricos y detección de alarmas, describiendo el comportamiento de los parámetros a controlar para determinar la calidad de agua, como lo muestra la Fig. 5.

Se requiere un servicio web para el acceso a los datos que fueron cargados a través de DigiESP™ al servidor de iDigi®, los cuales se requirió leer desde la interfaz de usuario, utilizando las funciones del web service de Labview™.

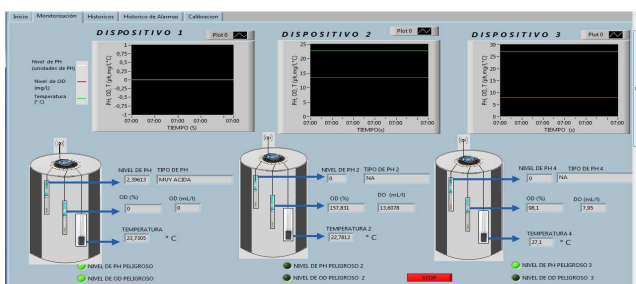


Figura 5. Interfaz de usuario en Labview™

G. Integración del Sistema.

Los módulos creados para la integración de los dispositivos finales en los respectivos tanques son de fácil instalación, compactos y a su alimentación es a base de baterías. La salida de cada sensor es conectada a los circuitos de acoplamiento, los

mismos que son conectados a las entradas analógicas de los módulos Zigbee para ser procesados y enviados inalámbricamente hacia el nodo coordinador, Fig. 6.

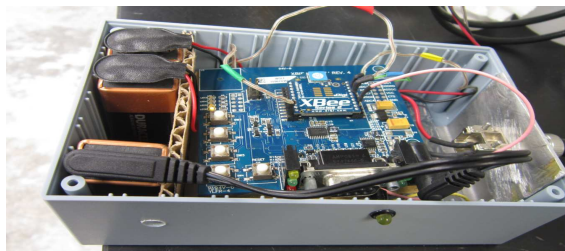


Figura 6. Integración de los dispositivos remotos.

El módulo coordinador fue necesario instalarlo dentro de la caseta ubicada en la planta de tratamiento de agua residual conectado vía Ethernet al computador del usuario final, el que será quien realice la monitorización. El módulo viene integrado con una antena tipo dipolo para la comunicación RF con el resto de dispositivos.

IV. PRUEBAS Y RESULTADOS

A. Pruebas de alcance de transmisión

El alcance de transmisión es la distancia requerida entre el transmisor (T_x) y el receptor (R_x) para que la comunicación sea confiable.

El fabricante de estos módulos proporciona la interfaz X-CTU, la cual permite realizar una transmisión entre dos dispositivos con un paquete de datos configurable, mostrando si el paquete ha sido entregado o si existe un error de transmisión, permitiendo de esta manera describir el alcance de estos dispositivos.

Esta interfaz permite definir el alcance de los dispositivos en base al número de paquetes exitosos y el nivel de Received Signal Strength Indicator (RSSI) del paquete recibido.

Para poder validar el alcance máximo de cada uno de ellos se procede a realizar esta prueba de comunicación. El Dispositivo 1 ubicado en el tanque de sedimentación y el nodo coordinador ubicado a 50 metros de éste, muestra menos del 50% de paquetes exitosos, por lo que se justifica la colocación del nodo enrutador a 30 metros del Dispositivo 1, donde se ha comprobado un 100% de paquetes exitosos. Por otro lado el Dispositivo 2 se encuentra ubicado a 60 metros del nodo coordinador y podrá utilizar el mismo nodo enrutador definido anteriormente.

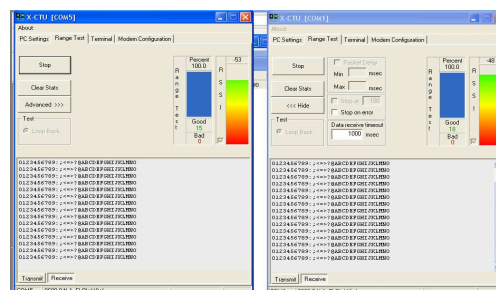


Figura 7. Prueba de alcance mediante X-CTU

Finalmente con al Dispositivo 3 no hubo necesidad de moverlo debido a que dispone de un módulo Xbee Series2PRO de mayor alcance.

En base a esta prueba se define que el alcance máximo para dispositivos Xbee Series2 es de 30 metros y el módulo Xbee Series2PRO cumple con un alcance de 100 metros en exteriores.

B. Validación de los datos

Para analizar el nivel de precisión del prototipo de red para monitorización de la calidad del agua, se realizaron pruebas con otro sistema de medición encontrado en los laboratorios del CAALC y mostrado en la Fig. 10, el cual es utilizado para analizar las muestras que son tomadas en la planta residual. De esta manera se desarrolló una comparación entre la medición de los parámetros pH, OD y temperatura en los dos sistemas y así encontrar su grado de error.

Los resultados obtenidos de esta prueba muestran un porcentaje de error promedio de 1.31 %, esto debido a la calibración de las funciones de escalabilidad. Sin embargo es importante realizar siempre el proceso de calibración previo la medición.

El error generado se debe a la etapa de escalamiento, debido a que se realizaron funciones de transferencia tomando en consideración los valores teóricos de las muestras estándar de 4, 7 y 10 para el caso del pH y al encontrar la función exponencial que caracteriza la concentración de oxígeno disuelto dada la variación de la temperatura del agua. Pero luego de ser medidos con el sistema actual, se pudo calibrar estas funciones y minimizar los porcentajes de error promedio a casi el 0,86%.

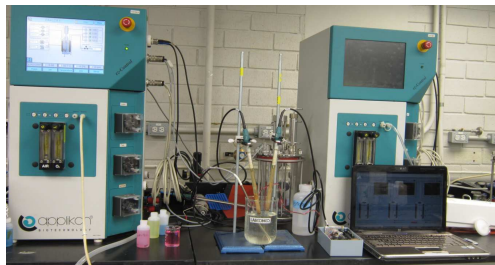


Figura 10. Validación de los datos con otro sistema de medición.

C. Prueba de recolección de datos del sistema

Para esta prueba fue recolectada la información correspondiente a un día completo de trabajo del sistema en la planta de tratamiento. Como ya se mencionó el programa en Python™ lee los datos recibidos por cada dispositivo, los convierte en información correspondiente a los parámetros de medición y los sube al servidor de iDigi™, en donde es creado un archivo de almacenamiento para cada dispositivo final de la red. Ya que estos logs incluyen la hora y la fecha medición, es posible observar que la respuesta de la red es prácticamente inmediata ante la petición de los datos por parte del coordinador, cumpliendo así con la frecuencia de muestreo

configurada en los dispositivos finales, al igual que el número de muestras tomadas en cada ciclo.

En la Fig. 11 se aprecia el archivo de almacenamiento para el Dispositivo1, el cual realiza mediciones de pH en el tanque de desinfección. Las primeras mediciones fueron realizadas para calibración con las soluciones base con pH de 7, 10 y 4. De la misma manera se observa la hora exacta en la que las muestras llegan al dispositivo coordinador. El intervalo de tiempo entre cada medición coincide de manera muy precisa con el tiempo de Sleep configurado en los dispositivos finales (4 minutos), sin embargo se aprecia un mínimo retardo en segundos ocasionado por factores ambientales u obstáculos en la trayectoria que influyen en el tiempo de latencia del sistema.

Otra razón para la generación de este retardo y a la variación del mismo es tiempo de procesamiento de los dispositivos, pues estar habilitado el cifrado en la transmisión de los datos, los dispositivos tienen que descifrar y volver a cifrar el mensaje por cada salto en su trayectoria. Una solución para esto sería adquirir un procesador que posea mayor capacidad que el actualmente utilizado en los módulos, el procesador MC9S08QE32 (core HCS08) de Freescale, el cual trabaja a una velocidad de reloj de 50.33MHz.

Del mismo modo se evidencia la toma de dos muestras por cada ciclo, una por cada segundo dentro del período que se encuentra despierto el dispositivo, sin embargo existieron ocasiones en donde varía este retardo y se demora dos segundos en recibirlo.

Timestamp	Value 1	Value 2	Value 3	Value 4	Value 5
10:13:42-100-401-3104-00a1	6.75997802734	NA	NA	23.4022046875	07:04:02 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	6.75597802734	NA	NA	23.798821251	07:04:04 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	6.7579840291	NA	NA	23.324617552	07:04:06 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	6.6232222247	NA	NA	23.256474563	07:04:07 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	6.94379804219	NA	NA	23.544430939	07:04:08 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	6.94179804219	NA	NA	23.463095978	07:04:09 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	6.9436904047	NA	NA	23.544430939	07:04:10 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	6.9713733384	NA	NA	23.541382813	07:04:11 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	6.9539049441	NA	NA	23.500390254	07:04:12 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	6.9545230274	NA	NA	23.537092529	07:04:13 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	6.9462282812	NA	NA	24.136474563	07:04:14 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	6.9881222891	NA	NA	24.375497583	07:04:15 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	6.9539049441	NA	NA	24.375497583	07:04:16 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	6.9571738225	NA	NA	24.393622439	07:04:17 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	6.9539049441	NA	NA	24.622564979	07:04:18 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	6.9539049441	NA	NA	24.635266841	07:04:19 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	7.1212484237	NA	NA	24.425161524	07:04:20 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	7.1114372353	NA	NA	24.427194182	07:04:21 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	7.1337807769	NA	NA	24.457912513	07:04:22 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	7.1411433459	NA	NA	24.457912513	07:04:23 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	7.1437807769	NA	NA	24.525793446	07:04:24 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	7.14217482247	NA	NA	24.525793446	07:04:25 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	7.1248028493	NA	NA	24.457912513	07:04:26 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	7.1282922045	NA	NA	24.431439482	07:04:27 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	7.2395989555	NA	NA	24.603393489	07:04:28 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	7.2489723955	NA	NA	24.621749348	07:04:29 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	7.2489723955	NA	NA	24.644195244	08:00:04 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	7.2489723955	NA	NA	24.638712532	08:00:28 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	7.2324207353	NA	NA	23.022266979	08:00:02 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	7.2359250723	NA	NA	23.289821251	08:00:04 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	7.2236202734	NA	NA	24.66474563	08:00:07 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	7.2181628497	NA	NA	24.524430939	08:00:10 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	7.1832482204	NA	NA	23.463095978	08:00:13 17 May 2012
10:13:42-100-401-3104-00a1	7.1332482203	NA	NA	23.741433933	08:00:16 17 May 2012

Figura 11. Captura de archivo de datos del Dispositivo 1 cargado en el servidor iDigi®.

No existieron saltos o brechas en la recepción de las mediciones lo que significa que significa que no hubo pérdida de conexión en ningún momento de la prueba

D. Prueba consumo energético

Para este análisis se ha tomado en consideración dos aspectos: el consumo de corriente del dispositivo final y el consumo de corriente del módulo completo, el cual incluye también al circuito acondicionador. En la Figura 12 se observa cómo fue realizada la medición de corriente consumida por los dispositivos.

Para obtener el valor de corriente promedio consumida se debió definir los siguientes parámetros: capacidad de las baterías 2Ah, duración del ciclo 242 s y T_{sleep} : 240 s.

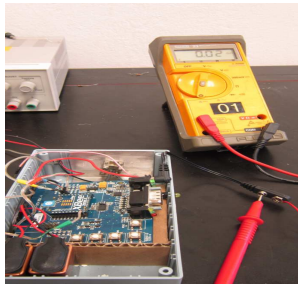


Figura 12. Medición de la corriente consumida por el módulo medidor de pH.

Se debe mencionar que las fórmulas definidas a continuación no tienen en cuenta varios parámetros importantes como auto-descarga de la batería y escapes internos, que afectan al consumo real y la duración de la batería. Así, las fórmulas deben utilizarse como una guía aproximada en estimar una capacidad apropiada de batería para una aplicación determinada.

La Ecuación 1 es utilizada para calcular la duración de la batería para una capacidad y un ciclo de trabajo determinados.

$$Tiempo\ de\ Autonomía = \frac{Capacidad\ de\ la\ Batería\ (Ah)}{Corriente\ Promedio\ Consumida\ (A)} \quad (1)$$

Para saber cuánto durarán las baterías se debe saber la capacidad de la misma y la corriente promedio, la cual está representada por la Ecuación 2 y toma en consideración el tiempo que se ha determinado para que duerma el dispositivo final que es de 4 minutos y el tiempo que permanece despierto que es 2 segundos. Las baterías utilizadas tienen una capacidad de 2Ah.

$$Corriente\ Promedio = \frac{I_{sleep} * T_{sleep} + I_{despierto} * T_{despierto}}{Tiempo\ total\ de\ ciclo} \quad (2)$$

Los resultados obtenidos en la Tabla 1 mostraron que no fue posible conseguir el tiempo deseado de autonomía de los módulos, el cual indica el estándar Zigbee que al menos debe ser de un año. Esto ocurre por la gran cantidad de corriente consumida por los circuitos de acondicionamiento, el uso de amplificadores y reguladores de voltaje incluyen un consumo de potencia indeseable en un sistema que se requiere que sea autónomo. Una alternativa para controlar el desgaste anticipado de las baterías se cita en Conclusiones.

Tabla 1. Corriente promedio y tiempo de autonomía de las baterías.

BATERÍA	ST Time (s)	SP Time (s)	Capacidad de Batería (Ah)	Corriente Promedio (mA)	Tiempo de Autonomía (h)
---------	-------------	-------------	---------------------------	-------------------------	-------------------------

XbeeSeries2	2	240	2	8.74	288
pH V(+)	2	240	2	35	57
pH V(-)	2	240	2	9	222
OD V(-)	2	240	2	5	400
OD V(+)	2	240	2	28	71

Es también posible optimizar el ciclo de trabajo de los dispositivos a fin de obtener el menor tiempo de actividad posible, sin ocasionar con esto errores en la transmisión o en la conectividad entre los mismos.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se confirmó la factibilidad de la implementación de una red inalámbrica para su aplicación en el área ambiental. Se logró desarrollar un sistema de monitorización en tiempo real de parámetros determinantes de la calidad del agua, de acuerdo con la norma mexicana de aguas residuales NMX-AA-003-1980, haciendo de este un proceso más eficiente, confiable y seguro que el proceso que anteriormente se realizaba.

La utilización de una característica importante de Zigbee, como lo es la topología malla, permitió crear la red de monitorización planteada evitando fallas en la conexión a través del protocolo de enrutamiento AODV que emplea esta tecnología, la cual permite la auto-recuperación de la red.

Resultado del análisis del consumo de energía, se encontró un tiempo de autonomía de 61 días, el cual es muy el tiempo comparación con el tiempo de un año que especifica el estándar. Se plantea como alternativas: utilizar componentes que posean funcionalidad de *shut down* o capacidad de apagarse cuando los dispositivos entren a modo *Sleep* para los circuitos de acondicionamiento; elaborar placas de interfaz propias diseñadas de acuerdo a la aplicación, para evitar el uso de las de fábrica que contienen elementos no requeridos; utilización de baterías de larga duración como las usadas en sistemas industriales [10]; optimizar el ciclo de trabajo de manera que los dispositivos permanezcan encendidos el menor tiempo posible, sin que esto afecte a la transmisión de los datos.

El escalamiento de la red es factible analizándolo desde el punto de vista de capacidad de Zigbee; sin embargo es necesario un análisis minucioso de las variantes del sistema como: costo de almacenamiento en la base de datos, capacidad de procesamiento de los nodos, sistema de alimentación de mayor rendimiento y optimización de los circuitos de acondicionamiento.

AGRADECIMIENTOS

Comentarios y tutoría del Dr. José Ramón Rodríguez Cruz, Profesor de la facultad de Ing. Mecánica y Eléctrica de UANL (Monterrey – México) y a las autoridades de la Escuela Politécnica del Ejército (Sangolquí - Ecuador).

REFERENCIAS

- [1] Business Week, "21 ideas for the 21st century", Aug. 30 1999, 78-167.
- [2] ZigBee Alliance, "Especificación ZigBee", San Ramón, v. r17, 2008.
- [3] D. Contero, A. Albarracín, "Consideraciones esenciales para el Diseño de Redes Zigbee", Congreso Ciencia y Tecnología ESPE, 2012.
- [4] Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, www.itesm.edu/wps/wcm/connect/Campus/MTY/Monterrey
- [5] Centro del Agua para Latinoamérica y el Caribe, <http://www.centrodelagua.org/home.aspx>
- [6] IEEE Std 802.15.4™, "Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)", 2006.
- [7] iDigiCloud, iDigi™, www.iDigi.com.
- [8] Instruments®, Labview™ 2010, www.ni.com.
- [9] L. A. B. Inclán, "UNIDAD DIDÁCTICA PARA LA APLICACIÓN DE LA NMX-AA-014-1980", Comisión Nacional del Agua, México, 2004
- [10] Wireless Hart®, www.hartcomm.org/protocol/wihart/

