



Sistema dinámico para el monitoreo y control de redes inalámbricas de sensores que operan bajo el protocolo de comunicación ZigBee

Dynamic system for monitoring and control wireless sensor networks operating under ZigBee communication protocol

Alvarado-Medellin Pedro
Universidad Autónoma de Zacatecas
Unidad Académica de Ingeniería
Correo: ampedro@uaz.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0002-3484-2623>

Aguilar-Escarca Silvia Paulina
Universidad Autónoma de Zacatecas
Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica
Correo: paulina_151090@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-1191-6703>

Ramírez-Aguilera Atziry Magaly
Universidad Autónoma de Zacatecas
Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica
Correo: atziry.ra@uaz.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0002-0979-8608>

Ortiz-Gómez Ruperto
Universidad Autónoma de Zacatecas
Unidad Académica de Ingeniería
Correo: ortizgr@uaz.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0003-3764-5091>

Resumen

Actualmente, las redes inalámbricas de sensores (WSN) constituyen una alternativa para el control y análisis de datos en diferentes aplicaciones. Para el desarrollo de una WSN se tienen dos retos principales: el diseño electrónico de los nodos y el desarrollo de la aplicación computacional para el monitoreo, registro y análisis de datos recolectados. En la presente investigación se describe el diseño y la construcción de un sistema dinámico para el monitoreo y control de una red inalámbrica de sensores que opera bajo el protocolo ZigBee. El sistema permite tener una comunicación interactiva con los sensores, manipular la cantidad de nodos de la red, así como gestionar el control de datos del sistema de comunicación. Asimismo, cuenta con una interfaz amigable para administrar y mostrar la información proveniente de los nodos. Una de las principales bondades del sistema es la aplicación computacional debido a que presenta gran escalabilidad para desplegar en campo un número importante de sitios de monitoreo, así mismo, permite manipular los intervalos de tiempo de la recepción de los datos y el uso de una Base de Datos para almacenar la información proveniente de los sensores. Se muestra como caso de estudio, el monitoreo de las variables físicas de presión, flujo y nivel de una red de distribución de agua potable de la ciudad de Calera de Víctor Rosales, Zacatecas, México. El diseño del sistema, presentó un buen desempeño para procesar, almacenar y visualizar la información proveniente de los nodos, sin embargo, el aumento considerable del número de nodos o el decremento de latencia para el envío de los datos disminuye el índice de comunicación, debido a las características propias del protocolo de comunicación ZigBee.

Descriptor: Redes inalámbricas de sensores, monitoreo, aplicación computacional, manejo de bases de datos en tiempo real.

Abstract

Currently, wireless sensor networks (WSN) are an alternative for data control and analysis in different applications. The development of a WSN encompasses two main tasks: the design of the nodes and the development of the application for monitoring and analyzing the data collected. In this research the design and construction of a dynamic system for monitoring and control a wireless sensor network that operates under the ZigBee protocol is described. The system allows to have an interactive communication with the sensors, to manipulate the number of nodes of the network as well as to manage the data control of the communication system allowing to obtain information about physical variables and transmit these to a server, and on the other end a computer application where the user can manage the sensors information and the communication system. One of the main advantage of the system is its computer application that presents high scalability allowing it to cover a large number of sampling sites and collect data in time intervals which are defined by the user based on the specific needs of the phenomenon analyzed. The existing duplex communication between the nodes and the computer application enables a high efficiency in data processing and prevents saturation in the communication network when the number of nodes deployed in field are numerous. As a case of study, the system was applied to monitor hydraulic variables (flow, pressure and level) on water supply distribution network in Calera de Víctor Rosales, Zacatecas, México. The design of the system presented a good performance when processing, storing and visualizing the information coming from the nodes, however the increase in the number of nodes deployed in field or the decrease in latency directly affects communication index due to ZigBee protocol features.

Keywords: Wireless sensor networks, monitoring, computational application, real time data base management.

INTRODUCCIÓN

Las Redes Inalámbricas de Sensores (WSN, por sus siglas en inglés), es un conjunto de dispositivos de tamaño relativamente pequeño (llamados nodos, motas o nodo-sensor) interconectados entre sí, que monitorean variables físicas para enviar información del entorno de forma inalámbrica hasta un coordinador o servidor. En las WSN cada nodo se considera como un dispositivo autónomo que puede tener como elementos una fuente de alimentación, unidad de procesamiento, memoria, sensores y dispositivo de comunicación inalámbrica.

En la última década se han creado WSN para diferentes aplicaciones, entre las que es posible destacar algunos ejemplos: redes para el control del tráfico vehicular (Cranor *et al.*, 2002), rastreo del desplazamiento de personas (Chen y Ferreira, 2009), monitoreo de áreas urbanas (Mainwaring *et al.*, 2002 y Ulmer *et al.*, 2003), monitoreo ambiental y del clima (Vivoni y Camilli, 2003), agricultura de precisión (Damas *et al.*, 2001), sitios riesgosos como los volcanes (Wang *et al.*, 2005), entre otros.

Una de las principales características de las WSN es su limitada capacidad en relación con el ancho de banda, procesamiento de datos, memoria y baterías (Beltrán, 2011). Respecto al procesamiento de los datos, en general, las WSN se diseñan con un enfoque centralizado, es decir, los nodos actúan como simples recolectores de información y el procesamiento de la información se realiza en el equipo de cómputo donde se reciben y almacenan los datos. Esta situación ha provocado en muchos casos, que el análisis de los datos se vuelva una tarea difícil y con alto costo computacional (Mainwaring *et al.*, 2002). Para solucionar este problema se han propuesto diferentes alternativas en las que destaca la compresión de los datos antes de ser enviados, sin embargo, debido a las limitaciones en el ancho de banda se corre el riesgo de perder información importante (Zhang *et al.*, 2006). Otra alternativa, llamada procesamiento distribuido consiste en que el procesamiento de los datos de los sensores se realiza en cada nodo, disminuyendo la trama de datos de información entregados a la estación base (Chagas *et al.*, 2008).

Por otro lado, la mayoría de los trabajos publicados sobre las WSN se han centrado en el desarrollo de hardware dejando a un lado la complejidad que surge en relación con el manejo, almacenamiento y consulta de la información que se procesa en tiempo real (Diallo *et al.*, 2014). Aunque en la actualidad existen diferentes sistemas y plataformas computacionales de licencia libre relacionadas con el almacenamiento y observación de los datos para las WSN, en su mayoría

han sido desarrolladas específicamente para ciertas aplicaciones, por lo que difícilmente pueden ser utilizados por usuarios que requieren procesar grandes volúmenes de información, además tienen baja escalabilidad y poca aplicación en trabajos de investigación (Cao *et al.*, 2009).

En el presente trabajo se muestra el diseño y la construcción de una WSN de procesamiento distribuido para el monitoreo de un Sistema de Abastecimiento de Agua Potable (SAAP). Este sistema lo integran dos elementos principales:

- 1) Los nodos donde se realiza la lectura de presión y flujo en tuberías de la red y de niveles en los tanques de agua potable.
- 2) Una Aplicación computacional (APP) para la recolección, procesamiento y control de la información.

La importancia y motivación de esta investigación se debe en gran medida a que actualmente en México se pierde por fugas cerca de 50% del agua que ingresa a las Redes de Distribución de Agua Potable (RDAP) (PNH, 2014), provocado en gran medida por la falta de información en tiempo real de las condiciones de operación de los sistemas hidráulicos.

En este artículo se presenta el diseño electrónico de los nodos para dar lectura a las variables físicas del SAAP y la construcción de la WSN que opera bajo el protocolo de comunicación ZigBee (2014). A su vez, se describe la construcción de la APP que tiene una interfaz donde es posible visualizar en tiempo real las condiciones de las variables hidráulicas, dar de alta/baja nodos, mostrar alertas al usuario de valores fuera de rango y presentar reportes de registros históricos. Para el manejo y almacenamiento de la información se creó una Base de Datos (BD) dinámica con una arquitectura flexible que le permite tener una gran escalabilidad para adaptarse al crecimiento de la WSN, así como definir los intervalos de tiempo de registro en función de las necesidades de cada usuario. Asimismo, esta APP posibilita al usuario interactuar constantemente con los nodos y solicitar información de los sensores en instantes de tiempo diferentes a los establecidos. El sistema se diseña con una comunicación bidireccional entre los nodos y el coordinador con el objetivo de tener el control de flujo de datos, aumentar la eficiencia en la transmisión y la capacidad de procesamiento de la información, hacer un mejor uso del ancho de banda del sistema de comunicación y con esto, la posibilidad de aumentar la cantidad de nodos desplegados en campo.

Este trabajo se presenta bajo el siguiente orden: en la primera sección se muestra la construcción del nodo

describiendo los elementos que lo integran, en la sección 2 se muestra la aplicación computacional desarrollada y en la sección 3 se muestran los resultados obtenidos al instalar la WSN en el SAAP de la ciudad de Calera de Víctor Rosales, Zacatecas. Por último se muestran las conclusiones del trabajo.

DISEÑO DEL NODO

Cada nodo se diseña como una unidad autónoma equipada con un sistema de alimentación, sensores, unidad de acondicionamiento de señal, sistema de comunicación, reloj, teclado y visualizador. En la Figura 1 se muestra un diagrama de bloques del nodo y enseguida se describen sus elementos.

Sistema de alimentación. Se utiliza para energizar cada elemento del sistema. Cada nodo se alimenta con 110Vca-60Hz, la cual se regula para proporcionar los voltajes adecuados a cada elemento del nodo: sensores con 12Vcd, unidad de control con 5Vcd, visualizador con 5Vcd, sistema de transmisión con 3.3Vcd, reloj con 3.3Vcd y acondicionamiento de señales con 5Vcd.

Sensor. Cada nodo se diseña para monitorear tres variables físicas de un sistema de abastecimiento de agua potable: presión, flujo y nivel. Los nodos tienen la

capacidad de realizar la medición de las tres variables simultáneamente. En la Tabla 1 se muestran las características de los sensores utilizados.

Unidad de control y acondicionamiento. Los sensores tienen una señal de salida que debe ser acondicionada para utilizar los puertos de entrada de la unidad de control (Tabla 1). La unidad de control se encarga de procesar y digitalizar la señal proveniente de cada sensor, utiliza el microcontrolador ATMEGA328-PU de ATMEL y la programación se realiza en el lenguaje C. La frecuencia de lectura de los sensores se realiza cada segundo, se acumula durante un minuto para obtener un promedio y este valor promedio se almacena en la memoria EPROM del microcontrolador para mostrarse en el visualizador. De esta manera, el valor se actualiza cada minuto tanto en la memoria EPROM como en el visualizador. La etapa de acondicionamiento y procesamiento de las señales de los sensores se describe a continuación:

- a) Lectura de presión: El sensor entrega una señal de corriente que se transforma en señal de voltaje utilizando una resistencia definida por $R = (V_{ps} - 13)/I_{max}$, donde V_{ps} es el voltaje de alimentación del sensor e I_{max} es la corriente máxima en el sensor. Esta señal se

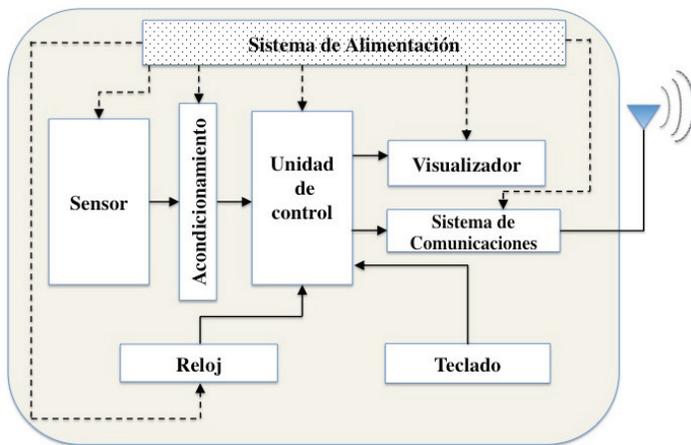


Figura 1. Diagrama de bloques del nodo

Tabla 1. Características de los sensores

Variable	Fabricante	Modelo	Salida	Rango de medición	Principio de funcionamiento
Nivel	SENIX	TSPC-30S1-232	Digital	4 – 150 in	Ultrasónico
Flujo	DWYER	PFT	Frecuencia (3.2 – 200 Hz)	0.37 – 7.62 m/s	Rueda de paleta
Presión	DWYER	626	Corriente (4 – 20 mA)	0 – 40 Bar	Piezoeléctrico

introduce a un filtro pasa bajas para posteriormente introducirla a un puerto analógico de la unidad de control. Una vez conocidos el voltaje que representa la presión máxima y mínima de la señal de entrada al microcontrolador se determina la señal que representa la presión medida.

- b) Lectura de flujo: El sensor entrega una señal de onda cuadrada de 12V de amplitud, pero antes de introducirlo al puerto digital de la unidad de control se utiliza un divisor de voltaje para reducirlo a $\pm 5V$. La unidad de control mide los flancos de subida y bajada de la señal para definir la frecuencia que está relacionada con la velocidad del flujo en la tubería. Con la información de la velocidad y el área de la tubería (proporcionada por el usuario y almacenado en la memoria EEPROM del microcontrolador) se determina la cantidad de agua que fluye por la tubería.
- c) Lectura de nivel: En este caso, el sensor entrega una señal en código ASCII que representa la distancia entre el sensor y un objeto. Para introducir esta señal por el puerto UART del microcontrolador se utiliza el circuito MAX232. En la unidad de control se realiza la conversión a formato decimal para representar la distancia medida.

Visualizador y teclado. Cada nodo cuenta con un teclado matricial de 4x4 para que el usuario pueda ingresar parámetros necesarios para la medición, tales como área de la tubería, área y altura de los tanques, así como la fecha y hora del inicio de la lectura. Estos datos se almacenan en la memoria EEPROM de la unidad de control. Asimismo, cuenta con una unidad de visualización

LCD de 16x2 para mostrar de forma local los valores medidos, así como fecha y hora.

Reloj. Cada nodo está equipado con un reloj que se utiliza en la configuración inicial del nodo con el objetivo de tener la información temporal de la medición en forma local.

Sistema de comunicación. Para la transferencia y recepción de datos se utilizan radios Xbee Serie 2 PRO que operan bajo el protocolo de comunicación ZigBee y el estándar IEEE 802.15.4 (IEEE, 2003). Los radios están configurados para formar una topología de comunicación tipo malla. Asimismo, según la función que desempeña en la red, están configurados para operar como dispositivo final, router o coordinador. El microcontrolador transmite y recibe los datos al Xbee utilizando el puerto UART.

En la Figura 2 se muestra: a) La PCB diseñada para el nodo donde se identifican los elementos que lo integran y en b) La carcasa del sistema, en esta última representación se muestra como dispositivo externo el teclado, el visualizador y un botón que permite restablecer el sistema.

APLICACIÓN COMPUTACIONAL

Para realizar la gestión de la información y de la red de comunicación se construyó una aplicación en Java como enlace entre la WSN y el usuario que se instala en la PC donde se encuentra el radio coordinador. Esta aplicación posibilita la interacción con los nodos, la vi-

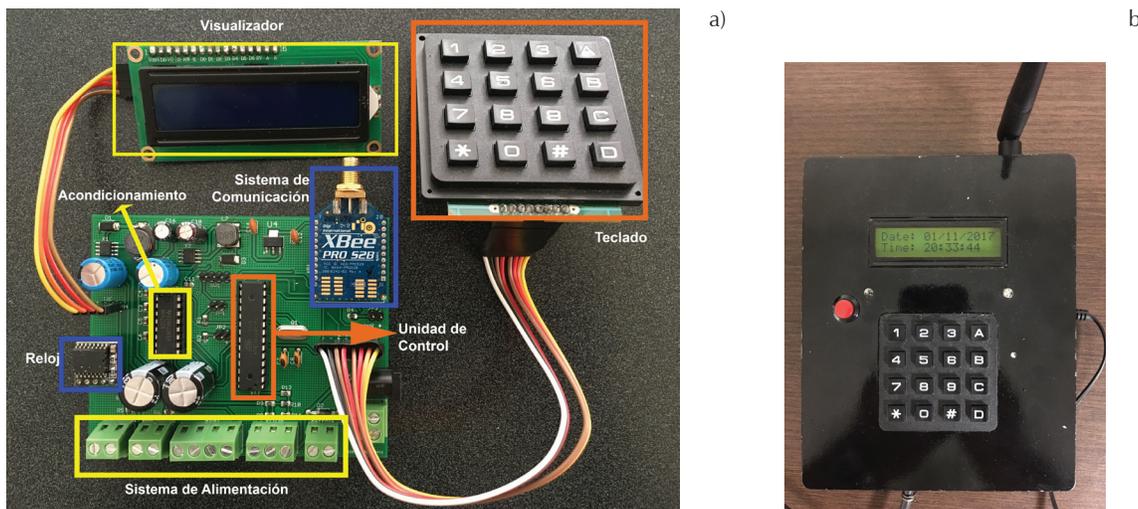


Figura 2. Imágenes: a) placa del circuito impreso y b) carcasa del nodo diseñado para la WSN

sualización del estado de la red de comunicación inalámbrica y sirve como central de almacenamiento y consulta de los datos de los sensores. La programación de la aplicación se desarrolló en el ambiente computacional Netbeans (2013) donde su principal tarea es dar soporte a la aplicación, proveer las interfaces de programación, compilación, generación y ejecución del código. Por su parte, la aplicación integra cuatro elementos principales de la WSN que son: alta y baja de nodos-sensor, control de flujo de datos, la base de datos y la generación de reportes.

Por medio de la interfaz, el usuario tiene la posibilidad de dar de alta o baja los nodos, así como manipular el intervalo de tiempo de recepción de los datos (t_{ns}). Una vez que el usuario define el t_{ns} se realiza el proceso de conexión y petición de datos, para esto, el radio coordinador emite un comando interpretado por las unidades de control de los nodos. Debido a que cada nodo cuenta con la posibilidad de enviar tres diferentes variables físicas, se realiza el control de flujo de datos de tal forma que se reciba primero la trama de datos de los sensores de flujo de todos los nodos, seguido de la variable de presión para finalmente obtener el de nivel. En la figura 3 se muestra la trama de transmisión de datos considerando que se tienen cuatro nodos: A, B, C y D y que cada uno está monitoreando las tres variables: flujo, presión y nivel. Esta secuencia de datos se establece en la unidad de control de cada nodo, así como el tiempo de envío de datos por variable representado por la latencia Δt .

Cada paquete de datos comienza con el identificador 0X7E y lleva consigo información con la que es posible reconocer el ID del nodo, ubicación, tipo de sensor, entre otros. Estas cadenas de caracteres son particionadas por la aplicación y direccionadas a su registro correspondiente en una BD. La BD se diseña para almacenar el valor de las variables físicas proporcionadas por los sensores y los datos de configuración de los nodos.

La BD se construyó en MySQL (2013) y se utilizó Java Persistence Api (JPA) para administrarla. JPA proporciona un modelo de persistencia para mapear, alma-

menar y recuperar la información en la BD y hace posible su manipulación con mayor rendimiento y velocidad.

Por su parte, el almacenamiento de la información se realiza considerando que todos los nodos envían datos con intervalos de tiempo iguales. Asimismo, los comandos Java Persistence Query Language (JPQL) permiten realizar consultas para obtener información de la BD, acceder fácilmente a la información y generar los informes. La principal ventaja en el uso de esta herramienta computacional es que permiten extender la BD después de su creación original, lo que significa que se pueden añadir nuevas categorías sin la necesidad de modificar las aplicaciones existentes. Esta característica en particular es de suma importancia en las WSN, ya que brinda una gran escalabilidad a la aplicación, lo que hace posible que se puedan añadir o eliminar puntos de monitoreo o cambiar los intervalos de tiempo de registro sin la necesidad de reestructurar la interfaz o detener la recolección de datos.

La información de los sensores se recolecta por medio del XBee coordinador e ingresan a una PC utilizando un puerto USB. Posteriormente, los datos se almacenan en sus registros correspondientes en la BD con la fecha y hora de llegada, el identificador y el dato de cada sensor para futuras consultas.

PROTOCOLO DE PRUEBAS

Para determinar la capacidad de procesamiento de la aplicación computacional se realizaron pruebas de funcionamiento que consistieron en el envío de paquetes de datos de manera simultánea desde distintos nodos. Para realizar las pruebas se utilizaron radios XBee configurados como dispositivo final y un coordinador, la PC utilizada como servidor es marca HP Pavilion dv6-6167 equipada con un procesador Intel Core i7-2630QM de segunda generación, con 8 GB de memoria RAM DDR3 de 1333 MHz.

Con las pruebas se busca conocer la cantidad de paquetes de datos que pueden ser enviados desde los nodos sin perder información en la BD y así conocer el número de nodos desplegados en campo que pueden

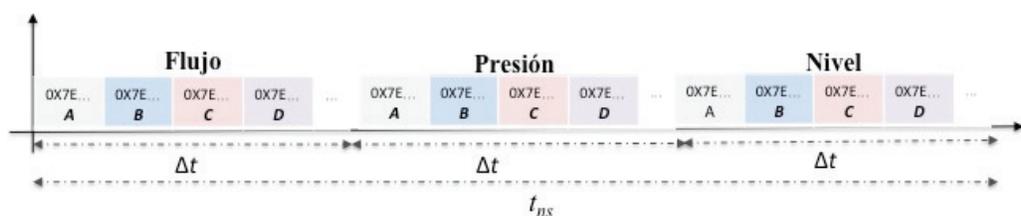


Figura 3. Control del flujo de datos de las variables físicas de los nodos A, B, C y D

enviar datos de manera simultánea. Se enviaron 50 paquetes de datos de 22 bytes por segundo y se instalaron desde uno hasta seis nodos variando la latencia entre paquetes. Los resultados obtenidos describen una relación de cambio constante entre el número de nodos y la latencia, así por ejemplo, para dos nodos se requiere una latencia de 40 ms y para tres de 60 ms, es decir, al incrementar el número de nodos es necesario incrementar la latencia para tener una recepción sin pérdida de datos.

Si bien, la distancia no es un factor que influye directamente en la capacidad de procesamiento del servidor, sí afecta directamente al sistema de comunicación y con ello la eficiencia general del sistema, por tanto, se realizaron pruebas de comunicación a diferentes distancias.

Tanto en las pruebas de distancia como en las del número de nodos se utilizó el software X-CTU proporcionado por el fabricante de los radios XBee en conjunto con la aplicación computacional. Inicialmente se utilizó solamente un nodo enviando datos al coordinador, se enviaron 100 paquetes de datos por segundo de 66 bytes cada uno y una latencia de 1000 ms entre cada paquete, se consideró un tiempo de espera de 1000 ms antes de dar por perdida la información. En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos a diferentes distancias.

En la Tabla 2 es posible apreciar que a mayor distancia el número de paquetes que muestran errores, o bien que son perdidos se incrementa, lo que provoca que el índice de comunicación disminuya, estas pruebas muestran que las distancias menores a 1000 m son las ideales para que la comunicación sea efectiva.

Posteriormente, se fueron agregando nodos y se estuvo variando el número de paquetes de datos por segundo, cada paquete de datos fue de 22 bytes. El objetivo de las pruebas fue obtener 100% de eficiencia en la comunicación y sin pérdida de información en la base de datos. En la Tabla 3 se muestran los resultados a diferentes distancias.

Los datos de la Tabla 3 indican que cuando se requiere incrementar el número de nodos desplegados en cam-

po, es necesario incrementar la latencia, así como manipular el número de paquetes de datos enviados por segundo. Asimismo, cuando se incrementa la distancia hasta 2000 m, los paquetes de datos que se envían por segundo deben disminuir considerablemente para tener una comunicación sin pérdida de información.

RESULTADOS

Se desarrolló un sistema de monitoreo con el objetivo de agilizar el proceso de adquisición y consulta de datos de una WSN que opera bajo el protocolo de comunicación ZigBee. En la Figura 4 se muestra el esquema de organización de las ventanas de la aplicación. Se generó una barra de menú que tiene cuatro opciones: Archivo, Históricos, Herramientas y Ayuda. Estas herramientas permiten capturar y consultar la información, ejecución de procesos y obtención de parámetros. La estructura de la aplicación se elaboró de manera que fuera de fácil entendimiento para cualquier usuario y considerando que fuese multiplataforma. A continuación se describen las opciones.

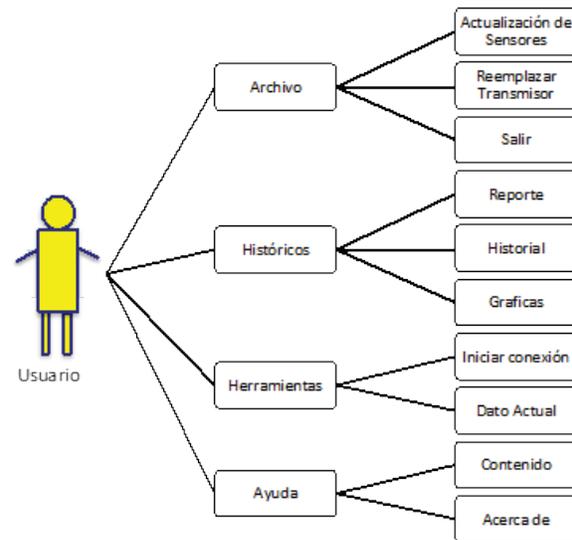


Figura 4. Esquema de organización de la interface

Tabla 2. Pruebas de distancia con un nodo

Distancia (m)	Paquetes con error	Paquetes perdidos	Índice de comunicación (%)
1	0	0	100
2	0	0	100
300	0	0	100
1000	0	1	98
2000	1	2	98

Tabla 3. Pruebas de distancia con varios nodos

Distancia (m)	Núm. de nodos	Latencia (ms)	Paquetes de datos por segundo
60	1	30	30
60	2	50	40
60	3	100	30
2000	1	250	4
2000	2	500	4

ARCHIVO

Esta herramienta tiene tres opciones:

- Actualización de sensores: permite validar, registrar, administrar y modificar los sensores que forman parte del sistema.
- Reemplazar transmisor: permite al usuario transferir la información almacenada de un transmisor a otro.
- Salir: para salir de esta opción.

HISTÓRICOS

Presenta tres opciones:

- Reporte: permite generar reportes de los datos recibidos en las fechas definidas por el usuario.
- Historial: permite consultar la información almacenada en el coordinador de los datos enviados por los nodos.
- Gráficas: permite consultar la información en forma de gráficas con la opción de definir el periodo de tiempo que se desea consultar.

HERRAMIENTAS

Esta herramienta tiene tres opciones:

- Iniciar conexión: permite iniciar el proceso de comunicación entre los transmisores conectados y se establece el tiempo de recepción de datos, t_{rs} .
- Dato actual: permite consultar el estado de un sensor seleccionado en intervalos de tiempo diferentes a los establecidos.

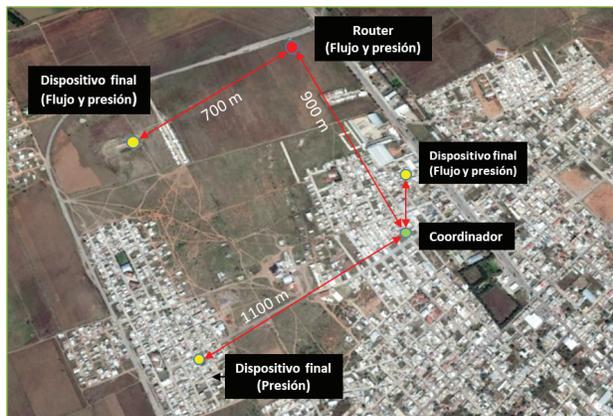


Figura 5. Sistema de monitoreo del SAAP en Calera de Víctor Rosales, Zacatecas

AYUDA

Presenta las opciones de:

- Contenido: proporciona información del manejo de la aplicación y
- Acerca de: que brinda información de la construcción del sistema.

CASO DE ESTUDIO

El sistema de monitoreo se instaló en el SAAP de Calera de Víctor Rosales, Zacatecas. El SAAP cuenta con 6 pozos profundos y abastece a una población de aproximadamente 35,000 habitantes. En los pozos se mide el flujo y la presión de extracción, además se monitorea la presión en distintos puntos de la red de distribución de agua cada 15 minutos. En la Figura 5 se muestra la ubicación de 5 puntos de monitoreo, los círculos de color rojo, amarillo y verde representan los dispositivos finales, router y coordinador, respectivamente. Cada uno de los dispositivos finales son capaces de comunicarse con un router o directamente con el coordinador.

La ubicación de los puntos de monitoreo se realiza en función de las necesidades del administrador de la red de abastecimiento y en función del alcance del sistema de comunicación de cada nodo. La lectura de los datos de los sensores se realiza desde la App instalada en una computadora central en las oficinas del organismo operador. En la Figura 6 se muestra la pantalla principal de la App donde es posible identificar el menú de Archivo, Históricos, Herramientas y Ayuda. A manera de ejemplo en la Figura 7 se muestra la ventana diseñada para dar de alta o eliminar sensores.

En la ventana Alta de sensores es posible Agregar, Eliminar o actualizar un sensor, en ella se visualiza el

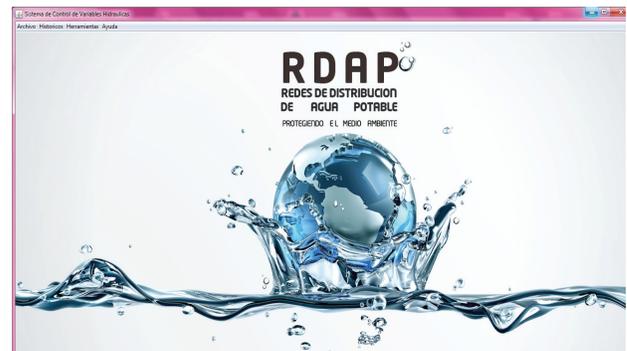


Figura 6. Pantalla principal de la App diseñada para la adquisición de datos de la RDAP

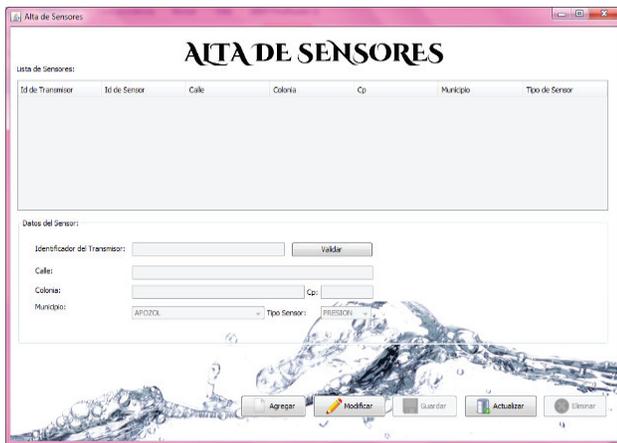


Figura 7. Ventana para la administración de sensores en la App

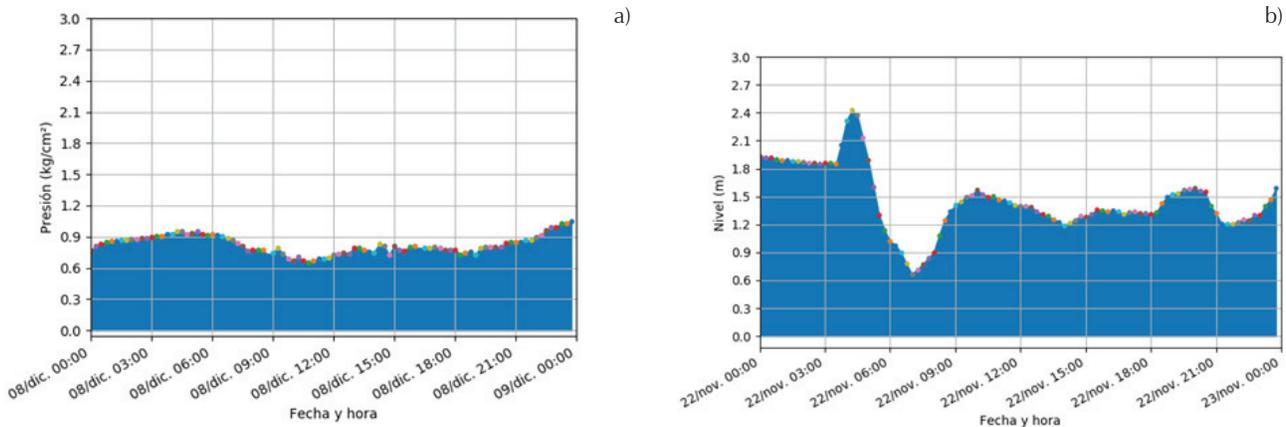


Figura 8. Comportamiento de las variables: a) presión y b) nivel, registrados durante 24h

identificador del nodo y del sensor y es posible agregar los datos de ubicación del nodo.

En la Figura 8 se muestra el comportamiento de las variables a) presión y b) nivel que proporciona la App en dos nodos diferentes a lo largo de 24 h. Los datos de los sensores se monitorean con t_{ms} igual a 15 minutos. Para el registro de la presión, es posible seleccionar como unidad de medida kg/cm^2 o su equivalencia en mca (metros columna de agua).

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se muestra el diseño y la construcción de un sistema de monitoreo por medio de una red inalámbrica de sensores que operan bajo el protocolo de comunicación ZigBee. Destaca la gran escalabilidad que tiene la aplicación computacional y la robustez en el manejo de la información, lo que posibilita su uso en distintas aplicaciones. En el caso de estudio mostrado se utilizó el sistema para la obtención de datos de tres tipos de sensores diferentes, sin embargo, es posi-

ble adicionar otros sensores y personalizar el intervalo de tiempo de registro sin modificar la estructura original de la base de datos. La capacidad de procesamiento del servidor está ligada directamente a las características del equipo de cómputo, sin embargo, las pruebas de comunicación realizadas sugieren que la aplicación computacional tiene la capacidad de procesar información de un número considerable de sensores. El Δt empleado para retrasar el envío de datos de cada sensor no afecta la información recibida debido a que las variables físicas que se analizan no cambian en instantes de tiempos pequeños, sino más bien en algunos minutos o posiblemente en horas. Debido a que la petición de datos es de varios minutos, la recepción/transmisión de datos tiene un índice de comunicación de 100% en todo el tiempo.

AGRADECIMIENTOS

Al Fondo Mixto CONACYT-GOBIERNO DEL ESTADO DE ZACATECAS por el financiamiento de esta in-

vestigación a través del proyecto “Estudio de las sequías meteorológicas en el estado de Zacatecas y desarrollo de un prototipo de bajo costo para el monitoreo de sistemas de abastecimiento de agua potable” con clave ZAC-2013-C02-201203.

REFERENCIAS

- Beltrán, F. (2011). *Sistema de monitoreo a distancia de niveles en tanque de distribución de agua potable en la ciudad de Zacatecas* (Tesis de licenciatura). UAIE - Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México.
- Cao, X., Jiming, C., Sun, Y. (2009). An interface designed for networked monitoring and control in Wireless sensor networks, *Computer standards and interfaces*, 31(3), 579-585, <https://doi.org/10.1016/j.csi.2008.03.026>
- Chagas, L.D., Lima, E.P., Neto, P.F.R. (2010). Real-Time Databases Techniques in Wireless Sensor Networks, *2010 Sixth International Conference on Networking and Services*, 182-187, <https://doi.org/10.1109/ICNS.2010.32>
- Chen, J. y Ferreira, L. (2009). Human motion tracking using wireless sensor networks, *Technical Report HURRAY-TR-090407* Recuperado de www.cister.isep.ipp.pt
- Cranor, C., Gao, Y., Johnson, T., Shkapenyuk, V., Spatscheck, O. (2002). Gigascope: high performance network monitoring with an SQL interface. *ACM SIGMOD International Conference on Management of data*, Nueva York.
- Damas, M., Prados, A.M., Gómez, F., Olivares, G. (2011). Hydro-Bus system: fieldbus for integrated management of extensive areas of irrigated land. *Microprocessors Microsyst*, 25(3), 177-184, [https://doi.org/10.1016/S0141-9331\(01\)00110-7](https://doi.org/10.1016/S0141-9331(01)00110-7)
- Diallo O., Rodrigues J.P.C.J., Sene, M., Lloret, J. (2014). Simulation framework for real-time database on WSNs. *Journal of Network and Computer Applications* 39, 191-201, <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2013.07.001>
- IEEE (2003). IEEE Standard 802.15.4. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks. Recuperado de <http://standards.ieee.org/getieee802/help.html>. 2012
- Mainwaring, P., Culler, D., Polastre, J., Szewczyk, R., Anderson, J. (2002). Wireless Sensor Network for habitat monitoring, WSN '02 Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless sensor networks and applications. Atlanta.
- MySQL (n.d.). MySQL. Recuperado en noviembre de 2013 de <http://www.mysql.com/why-mysql/>
- NetBeans. Recuperado en noviembre de 2013 de https://netbeans.org/index_es.html.
- PNH (2014), Programa Nacional Hídrico 2014-2018, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua, México. Recuperado el 3 de diciembre de 2017 de <http://files.conagua.gob.mx/transparencia/PNH2014-2018.pdf>
- Ulmer, C., Yalamanchili, S., Alkalai, L. (2003). Wireless distributed sensor networks for in-situ exploration of mars, NASA Technical Report (Citeseer).
- Vivoni, E. y Camilli, R. (2003). Real-time streaming of environmental field data. *Computers and Geosciences*, 29, 457- 468.
- Wang, N., Zhang, N., Wang, M. (2005). Wireless sensors in agriculture and food industry - Recent development and future perspective. *Computers and Electronics in Agriculture*, 50(1), 1-14, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2005.09.003>
- Zhang, J., Zhou, G., Son, S., Stankovic, J. (2006). Ears on the ground: an acoustic streaming service in wireless sensor networks, *IEEE/ACM International Conference on Information Processing in Sensor Networks*. Nashville, TN.
- ZigBee Specifications, version 1.0. ZigBee Alliance. Recuperado en octubre de 2014 de <http://www.ZigBee.org.2005>