

# Monitoreo del consumo doméstico de agua potable utilizando tecnología ZigBee

## ***Pedro Alvarado Medellín***

Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería, programa de ingeniería civil, Av. Ramón López Velarde 208, Col. Centro, Zacatecas, Zac., Teléfono: (492) 9256690 Ext. 4251  
*ampedro@uaz.edu.mx*

## ***Job Daniel Rodríguez Hernández***

Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Programa de Ingeniería en Computación, Campus UAZ siglo XXI, Carr. Zacatecas-Guadalajara Km. 6, Ejido La Escondida, Zac., México, Teléfono: (492) 9495163  
*Job.jdrh@gmail.com*

## ***Ruperto Ortiz Gómez***

Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería, programa de ingeniería civil, Av. Ramón López Velarde 208, Col. Centro, Zacatecas, Zac., Teléfono: (492) 9256690 Ext. 4250  
*ortizgr@uaz.edu.mx*

## ***Blanca Esthela Solís Recendez***

Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Programa de Ingeniería en Computación, Campus UAZ siglo XXI, Carr. Zacatecas-Guadalajara Km. 6, Ejido La Escondida, Zac., México, Teléfono: (492) 9256690 Ext. 4061  
*bsolre@yahoo.com.mx*

## **Resumen**

En este artículo se presenta el diseño y la implementación de un sistema para el monitoreo del consumo de agua potable doméstico. El sistema se diseñó en tres etapas; en la primera se obtienen las señales eléctricas de los sensores, se digitalizan y se acondicionan; en la segunda etapa son enviadas de un sistema de comunicación inalámbrica integrada por radios Xbee. En la etapa final, los datos procedentes de la red

inalámbrica son visualizados y almacenados en una interface construida utilizando el lenguaje de programación JAVA donde se administra la información.

**Palabra(s) Clave(s):** consumo doméstico de agua, microcontroladores, protocolo de comunicación ZigBee, sensores, sistemas de comunicación inalámbricos.

## **1. Introducción**

El agua es el recurso natural más importante para la vida en el planeta, el ser humano la utiliza prácticamente en todas sus actividades y es palanca para el desarrollo industrial, económico y social; en la agricultura es esencial para la sustentabilidad alimenticia, sin embargo, el proceso de concentración de la población en localidades urbanas ha dado como resultado un crecimiento acelerado en la demanda del vital líquido. En el periodo de 1950 a 2005 la población del país se cuadruplicó y paso de ser mayormente rural (57.3 rural) a predominantemente urbana (76.5% urbana) [1].

Un tema preocupante en los países en desarrollo es la gran cantidad de agua que se pierden por fugas en las redes de distribución de agua potable (RDAP). En México, se estima que a nivel nacional se pierden entre el 40 y 50% de agua por fugas [2], esto se debe principalmente a la falta de tecnología para el monitoreo y a las políticas de operación de los sistemas de distribución que en la mayoría de las ciudades del país es empírico.

En los últimos años se han realizado avances importantes en la modelación matemática de las redes de distribución de agua potable, sin embargo, no es así en cuanto a la modelación del consumo doméstico. Usualmente para representar el consumo de agua se emplean curvas de variación horaria (método tradicional). La modelación de las redes con el uso de este tipo de curvas resulta aceptable para las tuberías principales donde la variación del caudal conducido es continuo, pero resulta poco realista en las tuberías secundarias que proporcionan el servicio directamente a los usuarios finales, dado que el consumo doméstico se presenta en pulsos instantáneos, generalmente de poca duración, seguidos por periodos prolongados sin consumo [3].

Sin embargo la falta de datos es una de las principales limitantes a la hora de construir estos modelos de simulación. En este sentido, se presenta la necesidad de generar tecnología aplicada a la medición de estas variables que permita contar con los datos necesarios para construir modelos matemáticos con la capacidad de representar con mayor certeza el comportamiento hidráulico de las redes de distribución.

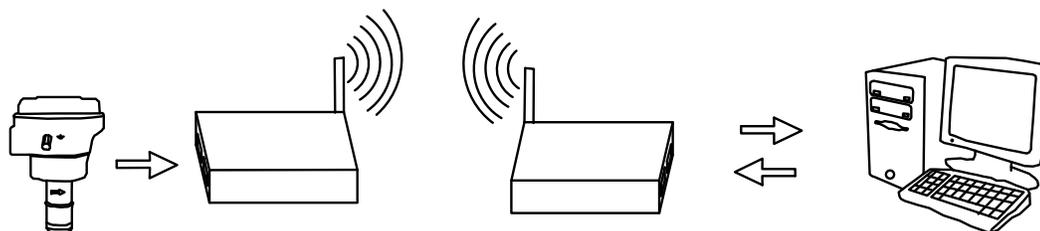
Avances recientes en la tecnología, específicamente en el área de sensores, microcontroladores y sistemas de comunicación inalámbricos han permitido la integración de distintos componentes para la creación de sistemas de monitoreo. Cuando estos sistemas integran un número considerable de dispositivos de monitoreo forman lo que se conoce como redes inalámbricas de sensores o WSN por sus siglas en inglés. En la última década se han desarrollado WSN para distintas aplicaciones, tales como el monitoreo de la salud humana [4], medio ambiente, agricultura de precisión, sismografía, volcanes, entre otros [5].

Estas tecnologías inalámbricas han permitido utilizar sensores en ambientes hostiles o de difícil acceso para medir datos que con las tecnologías tradicionales sería casi imposible obtener [6]. La medición de variables ambientales como la temperatura, la humedad relativa, la radiación solar, la presión atmosférica, entre otras, son importantes para estudios meteorológicos, monitoreo del clima y en diversas aplicaciones de la ingeniería.

Por su parte, la dificultad de medir el consumo doméstico radica en la naturaleza aleatoria del uso del agua en las casas. Cada consumo tiene un comportamiento en cantidad y duración diferentes que varía a lo largo del día. Para obtener datos confiables del consumo, es necesario hacer mediciones con intervalos de tiempo de 1 segundo o menores. Al realizar estas mediciones, se tiene la ventaja de obtener directamente la evolución del consumo instantáneo, sin embargo, se requiere el diseño de sistemas que permitan hacer la medición y el almacenamiento de datos.

En la presente investigación se diseñó un sistema para la medición del consumo de agua doméstico utilizando sensores de flujo y sistemas de comunicación inalámbrica. El

El sistema consiste en una interfaz creada en JAVA para la visualización y el almacenamiento de los datos, la interfaz está ligada a un sistema de comunicación inalámbrica que opera bajo el protocolo de comunicación ZigBee [7]. En la figura 1, se muestra el diagrama de funcionamiento del sistema de adquisición.



**Fig. 1. Diagrama de bloques del sistema.**

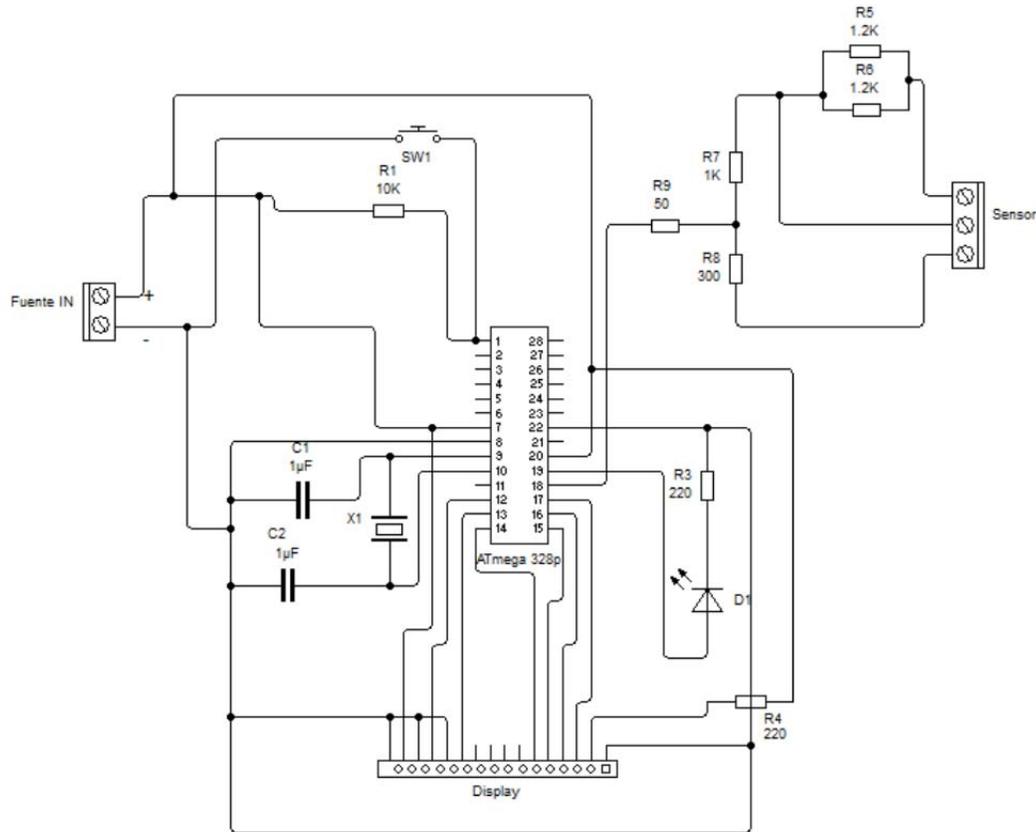
## 2. Desarrollo

El sistema se diseñó en tres etapas; en la primera se obtienen las señales eléctricas de los sensores, se digitalizan y se acondicionan; en la segunda etapa son enviadas a través de una red de comunicación inalámbrica integrada por radios Xbee. En la etapa final, los datos procedentes de la red inalámbrica son visualizados y almacenados en una interfaz que se construyó en el lenguaje de programación JAVA en donde se administra la información

### 2.1 Etapa de adquisición de datos.

En esta etapa se transforma la variable física en una variable de tipo eléctrica y se acondiciona la señal para que pueda ser transmitida hacia los radios de comunicación XBee. Para medir el flujo se utilizó un sensor electromagnético modelo 2551 de la marca Signet. El sensor se inserta en las tuberías y forma un campo electromagnético capaz de medir la velocidad del flujo, genera una señal de salida de 4 a 20 mA equivalente a una velocidad de 0.05 a 5.0 m/s, respectivamente. Las señales provenientes del sensor se adecuaron por medio de un microcontrolador ATMega328-PU, la programación del microcontrolador se realizó mediante la plataforma Arduino

UNO. Además, para el acondicionamiento de la señal eléctrica se diseñó una tarjeta electrónica como la que se muestra en la figura 2.



**Fig. 2. Circuito eléctrico para el acondicionamiento de la señal.**

## 2.2 Etapa de transmisión de Datos

Para el sistema de comunicación se utilizaron radios de comunicación Xbee Serie 2 PRO, estos dispositivos de comunicación operan bajo el protocolo de comunicación ZigBee IEEE 802.15.4 [8] para redes inalámbricas de área personal o WPAN por sus siglas en inglés. Los radios Xbee se configuraron para formar una topología punto a punto, cada radio se puede configurar de tres maneras según la función que desempeña en la red:

- **Coordinador:** Este es un dispositivo único en la red. Su función es establecer el canal de comunicación y sirve como identificador para toda la red. Una vez que este dispositivo realizó estas tareas puede unirse a la red y realizar las funciones de un router.

- Router: Su función es mantener información de la red para poder determinar la mejor ruta para transmitir paquetes de información. Se mantiene transmitiendo paquetes de otros routers o de dispositivos finales.
- Dispositivos finales: Estos dispositivos deben estar conectados a un coordinador o a un router debido a que no pueden enviar información a otros dispositivos finales directamente [9].

En la tabla 1 se muestran las características físicas y de funcionamiento de los radios XBee.

Alcance en interiores	90 m
Alcance en exterior con línea de vista	3.2 Km
Potencia de Transmisión	63 mW (+18dBm)
Tasa de transferencia	250 Kbps
Sensibilidad del receptor	-102 dBm
Voltaje de operación	2.8 - 3.6 V
Corriente de transmisión (típica)	40 mA (@ 3.3 V)
Corriente en modo Transparente/Recepción(típica)	40 mA (@ 3.3 V)
Corriente en modo inactivo	1 uA
Frecuencia	ISM 2.4 GHz
Dimensiones	0.0960" x 1.087"
Temperatura de operación	-40 a 85°C
Tipo de antena	RPSMA
Topologías de red	Punto a punto, estrella, malla
Número de canales	16 secuencias de canales directo
Opciones de filtrado	PAN ID, Channel & Source/Destination

**Tabla 1. Características físicas y de funcionamiento de los radios XBee serie 2 Pro.**

## Estándar de comunicación ZigBee

ZigBee es un estándar de comunicaciones inalámbricas basado en el estándar IEEE 802.15.4, es de gran utilidad en aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y un mínimo de consumo de energía. Opera en las bandas libres de 2.4 GHz, 915 y 868 MHz, con tasas de transferencia de datos de 250, 40 y 20 kbps, respectivamente. A pesar de coexistir en la misma frecuencia con otro tipo de redes como Wi-Fi o Bluetooth su desempeño no se ve afectado, tiene la capacidad de formar redes de gran densidad.

Los módulos XBee S2 utilizan un mecanismo de ruteo llamado Ad hoc On-Demand distance Vector, el algoritmo genera una tabla de ruteo entre los nodos que conforman la red para los dispositivos de comunicación conocidos, la tabla crece cuando aparece un nodo con camino desconocido, en este caso, los radios envían mensajes entre sí, de manera que se genera otra ruta para el envío de datos al nodo destino. Ante la caída de nodos que forman parte de la ruta que seguían los datos, la red busca alternativas para el intercambio de información, estableciendo rutas alternativas para seguir comunicando los dispositivos.

### 2.3 Etapa de visualización de datos

Para la visualización de los datos se diseñó una interfaz grafica en el lenguaje de programación Java bajo el entorno de desarrollo integrado NetBeans [10]. La función principal de la interface es almacenar y mostrar en tiempo real la información proveniente del sensor, los datos digitalizados ingresan a la PC por medio del puerto USB. La interfaz tiene la capacidad de mostrar los datos recibidos en forma gráfica con el objetivo de que el usuario pueda interpretar de manera fácil y rápida los datos que provienen del sensor. Dentro de la interfaz se agregó la opción "Reporte" para crear un archivo de Excel en donde se registran los datos recibidos con la hora que ingresa a la PC.

Cuando el sistema inicia su funcionamiento, la interface realiza la tarea de un escáner para verificar cuántos radios XBee están disponibles para conectarse a la red de comunicación. Una vez que se han identificado los sensores, la PC se comunica con el microcontrolador, éste responde a la interface indicándole el número de sensores conectados a la red de comunicación y el intervalo de tiempo con que se enviarán los datos. Basado en un programa en JAVA para la adquisición de los datos, se analizan los paquetes de datos enviados por los sensores, se almacenan y se grafican en tiempo real, sin embargo, cuando existen más de dos sensores en la red se dificulta el reconocer la procedencia de los datos. Para solucionar este problema se desarrolló un algoritmo de identificación de tal manera que cuando se envía un paquete de datos, al inicio y al final del paquete se indica la ubicación, tipo de sensor y el nodo de censado al que pertenece, de esta manera, la PC identifica el origen de los datos y genera de manera automática el panel correspondiente (fig. 3) para la visualización y almacenamiento de la información.



Fig. 3. Panel para la visualización gráfica en tiempo real de la información del sensor.

### 3. Resultados

Con la finalidad de medir todo el consumo doméstico y que no exista la posibilidad de que el agua fluya sin ser cuantificada, se realizaron mediciones cada segundo y se acumularon al minuto, por tanto, en la interface se registran los litros por minuto consumidos. Lo anterior se debe a la existencia de una gran cantidad de valores con cero consumo, de esta manera no se acumulan volúmenes enormes de información y tampoco se pierde detalle del agua consumida. En las figuras 4 y 5 se presentan las gráficas del consumo durante 24 horas y en un mes, respectivamente.

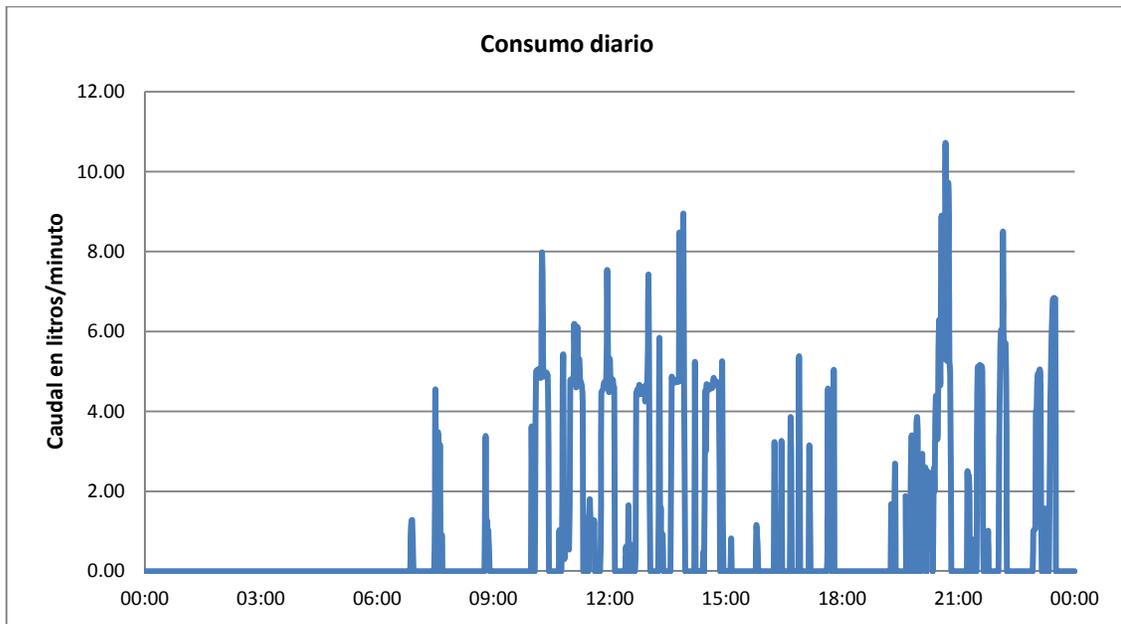


Fig. 4. Gráfica de consumos en un día.

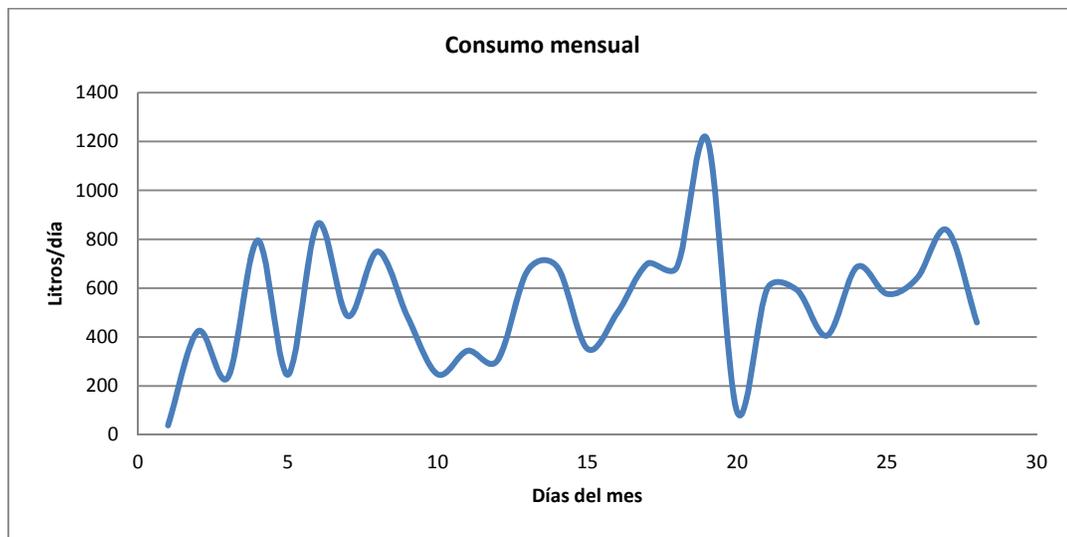


Fig. 5. Gráfica del consumo mensual.

Se realizaron pruebas de desempeño de los radios de comunicación Xbee tanto en interiores como en exteriores. Las pruebas en interiores se realizaron en el edificio del programa de Ingeniería en Computación de la UAZ, el edificio consta de tres niveles, la parte exterior del edificio esta construido de concreto y en su interior de tabla roca. Las

pruebas se realizaron utilizando el software X-CTU que provee el fabricante, se realizó una comunicación punto a punto colocando uno de los radios en la planta baja del edificio y el otro en la parte superior con una distancia en línea recta aproximada de 70 m. Para comprobar la potencia de la señal y el alcance máximo se enviaron 100 paquetes de datos de 66 bytes cada uno con una latencia de 1000 ms entre cada paquete y 1000 ms como tiempo máximo de espera antes de considerar los paquetes de datos perdidos. Se logro un 100% de comunicación con una potencia de -85 dBm, para estas condiciones no hubo pérdida de datos.

Las pruebas en exteriores se realizaron en la Cd. de Zacatecas en sitios separados aproximadamente 2100 m con línea de vista, el envío de los datos se realizó teniendo en cuenta las mismas consideraciones de envío que las pruebas en interiores. En la tabla 2 se muestran los resultados que se obtubieron de las pruebas.

No. de prueba	Distancia (m)	dBm		Paquetes		Eficiencia de comunicación (%)
		local	remota	error	perdidos	
1	1	-39	-33	0	0	100
2	2	-39	-33	0	0	100
3	300	-69	-69	0	0	100
4	1000	-86	-85	0	2	98
5	2000	-82	-85	1	1	98

**Tabla 2. Resultados de las pruebas de funcionamiento de los radios XBee serie 2 Pro.**

Para realizar las pruebas de funcionamiento de los radios Xbee, así como la adquisición de los datos del consumo doméstico se diseñó y se fabricó una placa electrónica (fig. 6), el microcontrolador instalado en la placa permite enviar datos a diferentes intervalos de tiempo.



## 5. Conclusiones

El desarrollo de tecnología para el monitoreo de sistemas hidráulicos permite elevar la eficiencia en la utilización del agua en las ciudades, lo que conlleva a una mejora en la calidad de vida de los habitantes y es parte fundamental del uso sustentable del recurso hídrico.

Por otra parte, obtener las mediciones del consumo instantáneo y acumulado en diferentes intervalos de tiempo abre la puerta a un número importante de investigaciones en el campo de la simulación hidráulica, específicamente en el análisis del comportamiento de las redes de abastecimiento, simulación de escenarios, entre otras.

## 6. Referencias

- [1] Anuario estadístico de los Estados Unidos Mexicanos. INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. 2010.
- [2] El agua en México, historia reciente, actores, procesos y propuestas. ANEAS. Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento A. C. México, D.F. 2008.
- [3] V. H. Alcocer Yamanaka, V. Tzatchkov, V. Bourguett Ortíz, "Desagregación temporal de lecturas acumuladas de consumo de agua potable por medio de métodos estocásticos". *Interciencia*. Vol. 33. No. 10. Octubre 2008. 725-732 pp.
- [4] D. Bansal, M. Khan, A. K. Salhan, "Real time acquisition and PC to PC wireless transmission of human carotid pulse waveform". *Computers in Biology and Medicine*. Vol. 39. 2009. 915-920 pp.
- [5] M. Delamo, S. Felici Castell, J. J. Pérez Solano, A. Foster, "Designing an open source maintenance free Environmental Monitoring Application for Wireless

Sensor Networks". The Journal of Systems and Software. Vol. 103. 2015. 238-247 pp.

- [6] N. Wang, N. Zhang, M. Wang, "Wireless sensors in agriculture and food industry: Recent development and future perspective". Computers and Electronics in Agriculture. Vol. 50. 2006. 1-14 pp.
- [7] ZigBee Specifications, version 1.0. ZigBee Alliance. <http://www.ZigBee.org>. 2005. Octubre 2014.
- [8] IEEE 2003. IEEE Standard 802.15.4. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks. <http://standards.ieee.org/getieee802/help.html>. 2012.
- [9] Building Wireless Sensor Networks. O'REILLY. United States of America. 2011.
- [10] NetBeans. [https://netbeans.org/index\\_es.html](https://netbeans.org/index_es.html). Noviembre 2013.

## **7. Autores**

Dr. en C. Pedro Alvarado Medellín, obtuvo el doctorado en el Colegio de Posgraduados con la especialidad en hidrocencias, es profesor investigador en la Universidad Autónoma de Zacatecas en el programa de ingeniería civil. Sus líneas de investigación actuales se desarrollan en los modelos de simulación hidráulica en redes urbanas y la integración con los sistemas de monitoreo utilizando redes inalámbricas de sensores.

El ingeniero Job Daniel Rodríguez Hernández es egresado del programa de ingeniería en computación de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Obtuvo su título profesional con la tesis " Sistema de adquisición de variables hidráulicas en una red de distribución de agua potable utilizando tecnología Zigbee" actualmente es candidato para el ingreso a la maestría en ingeniería de software en el CIMAT campus Zacatecas.

El Dr. Ruperto Ortiz Gómez es Profesor-Investigador del Programa de Ingeniería Civil, de la Unidad Académica de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Integrante del Cuerpo Académico "Estudio y Modelación de Recursos Hidráulicos e Hidroinformática". Ingeniero Civil por la Universidad Autónoma de Zacatecas (1994). Maestro en Ingeniería (Hidráulica) por la Universidad Nacional Autónoma de México (2000). Doctor en Ciencias (Hidrocencias) por el Colegio de Postgraduados (2007). Las

líneas de investigación y desarrollo de interés son “Simulación y optimización de sistemas hidráulicos” y “Estudio de variables hidroclimatológicas y análisis de riesgos”.

La Dra. Blanca Esthela Solís Recéndez es Profesora-Investigadora de tiempo completo en la Universidad Autónoma de Zacatecas. Labora con el programa de Ingeniería en Computación. Es miembro del cuerpo académico CA-173 Computación y electrónica. Profesor con reconocimiento al perfil deseable. Doctora en educación de la Universidad Autónoma de Durango (2014). Las principales líneas de investigación son la computación aplicada y la electrónica. Otros tópicos de investigación son las redes de sensores inalámbricos y los objetos de aprendizaje.