

SISTEMA DE MONITOREO PARA EL ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE LA LAGUNA DEL CARPINTERO

Julio Laría Menchaca

Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Ingeniería "Arturo Narro Siller"
jlaria@uat.edu.mx

Salvador Ibarra Martínez

Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Ingeniería "Arturo Narro Siller"
sibarram@uat.edu.mx

José Antonio Castan Rocha

Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Ingeniería "Arturo Narro Siller"
jacastan@uat.edu.mx

Emilio Castan Rocha

Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Ingeniería "Arturo Narro Siller"
ecastan@uat.edu.mx

Resumen

Una de las características más importantes de los estuarios o lagunas, es la interacción entre el agua dulce y la de mar. La dinámica de estos es afectada por las mareas, el oleaje, el viento, la precipitación pluvial, la evaporación, los flujos de agua dulce y el transporte de sedimentos. El estudio de la hidrodinámica en estos ecosistemas es uno de los aspectos más importantes que se necesitan para crear las bases necesarias para una correcta y debida planeación en diseño de obras de infraestructura turística y social. Por tal motivo en el presente trabajo se desarrollo un sistema de monitoreo con la finalidad de comenzar a generar una base de datos de gran importancia para poder realizar un estudio hidrodinámico de la Laguna del Carpintero, situada en el centro de la ciudad de Tampico. El sistema está compuesto por un mareógrafo ultrasónico que permite el monitoreo en tiempo real del nivel del agua con una exactitud de $\pm 7\text{mm}$ y de su temperatura con una

resolución de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

Palabra(s) Clave(s): limnógrafo, mareógrafo, radio frecuencia, ultrasonido.

1. Introducción

Los estuarios o lagunas son complejos y fascinantes ambientes naturales en cuyas márgenes se sitúan los mayores asentamientos humanos. Estas zonas son extremadamente valiosas desde el punto de vista ambiental y socioeconómico.

Son diversas las definiciones de un estuario que han sido creadas en función de su naturaleza geográfica, o de sus procesos físicos, biológicos, químicos y socioeconómicos. Son varias las definiciones existentes para un estuario. Para este trabajo utilizaremos la definición propuesta por [1], que define a un estuario como un cuerpo costero semicerrado de agua que tiene una conexión libre con el mar, que se extiende a lo largo del río hasta el límite de la influencia de la marea, y donde el agua de mar es diluida con el agua dulce procedente de masas de agua continentales. La dinámica de estos es afectada por las mareas, el oleaje, el viento, la precipitación pluvial, la evaporación, los flujos de agua dulce y el transporte de sedimentos. El balance entre todos estos procesos determina las características imperantes en cada laguna [2, 3].

Por tanto, el estudio de la hidrodinámica en estos ecosistemas es uno de los aspectos más importantes que se necesitan para crear las bases necesarias para una correcta y debida planeación en diseño de obras de infraestructura turística y social, además es complemento para llevar a cabo algunos estudios biológicos y químicos en la laguna [4, 5].

Entre los parámetros más importantes a medir para poder realizar un estudio hidrodinámico están el nivel del agua de la laguna y su variación en relación con las mareas. Para la medición del nivel del agua en los estuarios como consecuencia de las mareas se utilizan los mareógrafos o limnógrafos. Según el fenómeno utilizado para realizar la medida del nivel del agua, se pueden distinguir tres tipos fundamentales de mareógrafos [6, 7]:

- *Mareógrafo de flotador*, consiste de un cilindro introducido en el agua. Este cilindro contiene varios orificios en su base que el movimiento hacia

adelante y atrás del agua asociado al oleaje inducido por el viento y otras ondas de períodos cortos no puede pasar a través de él; solamente el cambio lento del nivel del agua asociado a la marea puede entrar en el pozo. Este cambio del nivel del agua es recogido por un flotador y registrado por lo general en papel o como el caso del propuesto por Peng[8] donde digitalizan la posición del flotador. Sin embargo, estos mareógrafos requieren una instalación algo laboriosa y son poco prácticos lejos de la orilla.

- *Mareógrafo Aanderaa*, llamados también mareógrafos de presión, obtienen el nivel del agua a partir de la medida de la presión hidrostática. Esta medida se obtiene anclando el medidor de presión en el fondo del mar o laguna. Un inconveniente de este tipo de medidor es que la información se va almacenando en una memoria y no es hasta que se descargue dicha información que se conoce el comportamiento del nivel del agua o sea no brindan información en tiempo real.
- *Mareógrafo Sonar*, estos son los más recientes y está compuesto por un emisor - receptor de ultrasonido colocado a una distancia de la superficie del agua y mediante la medición del tiempo que tarda en llegar el eco de una señal que ha mandado se determina la distancia recorrida y se traduce a nivel de agua. Sobre estos mareógrafos existe en la actualidad varios desarrollos donde se destacan los propuestos por [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16] en todos ellos envían la señal de manera inalámbrica y utilizan electrónica desde microprocesadores, DSP y hasta circuitos más complejos.

La zona sur del Estado de Tamaulipas se caracteriza por un variado número de sistemas laguneros en los cuales, se deberían estar monitoreando de manera permanente y sistemática, los distintos parámetros de calidad del agua y meteorológica como: mareas, corrientes, temperaturas del agua, salinidad, turbidez, pH, oxígeno, así como presión barométrica, viento temperatura ambiente. Además, estudios limnológicos que nos permita conocer las características del

agua y conocer su capacidad de regeneración natural o mecánico, sin embargo esto no se hace en la actualidad.

Entre estas lagunas se encuentra la Laguna del Carpintero (ver espacio cerrado en contorno de color rojo figura 1) situada en la zona centro de la ciudad de Tampico. La laguna tiene conexión mediante el Canal de la Cortadura con el río Pánuco, localizado a unos 7 km, aguas arriba de su desembocadura, dicha laguna posee una profundidad media de 1.2 metros. Esta abarca un espacio de aproximadamente 90 hectáreas, en pleno corazón de la ciudad, y no obstante estar sometido a una constante presión urbana, posee una variedad de flora y fauna.

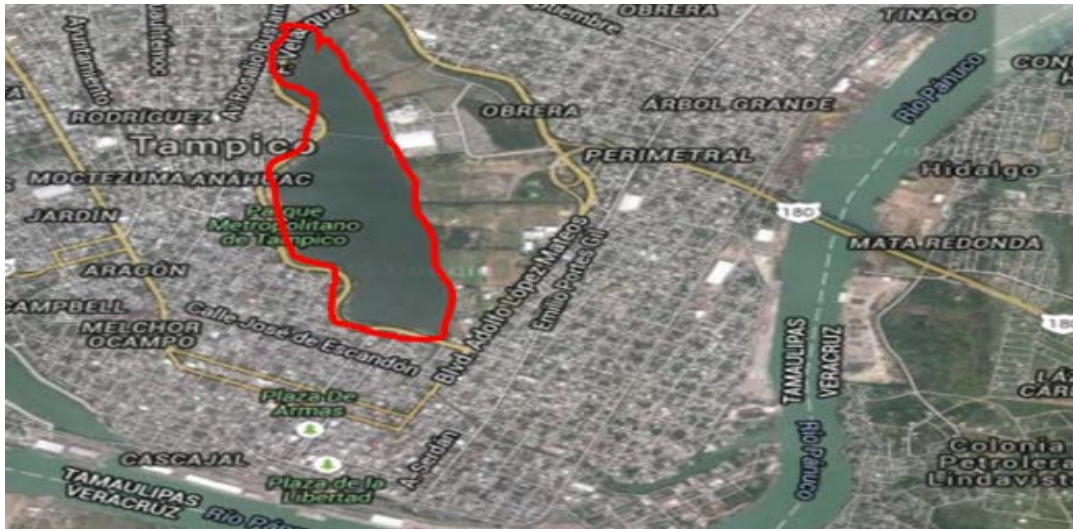


Figura 1 Vista satelital de la laguna del Carpintero.

En este contexto, y dada la importancia que tiene la Laguna del Carpintero desde el punto de vista ambiental, socioeconómico y cultural para la ciudad de Tampico, es que en el presente trabajo se muestra el desarrollo de un sistema para el monitoreo en tiempo real del nivel y temperatura del agua, con la finalidad de comenzar a generar una base de datos de gran importancia para poder realizar un estudio hidrodinámico de la laguna y así conocer también el estado que guarda de manera espacial y temporal este cuerpo de agua. El sistema se desarrolló utilizando componentes de bajo costo y de fácil adquisición y de tal manera que

permite agregarle la medición de otros parámetros como la velocidad y dirección de corriente, propiedades físico-químicas y biológicas, que nos permitan crear un proyecto de reestructuración de este cuerpo de agua de importancia para la ciudad de Tampico.

2. Desarrollo

El sistema de monitoreo hidrográfico desarrollado está compuesto por dos mareógrafos ultrasónicos. Uno de los mareógrafos se instaló cerca de la conexión de la laguna con el canal de la Cortadura con el cual tiene su conexión con el río Pánuco (ver punto 1 en la figura 2) y el segundo mareógrafo se instaló en el otro extremo de la laguna (ver punto 2 en la figura 2).

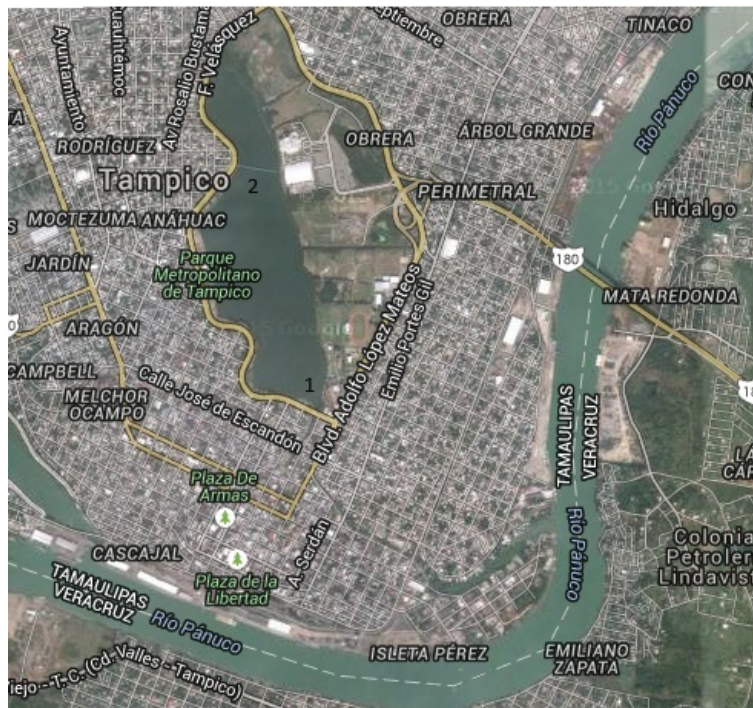


Figura 2 Distribución de los puntos de monitoreo en el interior de la laguna.

La diferencia del mareógrafo desarrollado en relación con los existentes en el mercado es que en el desarrollo del mismo se utilizaron módulos electrónicos de fácil acceso en el mercado y de bajo costo.

El mareógrafo se desarrolló en base a un sensor ultrasónico de bajo costo. La mayoría de los sensores de ultrasonido de bajo costo se basan en la emisión de un pulso de ultrasonido cuyo lóbulo, o campo de acción, es de forma cónica.

Midiendo el tiempo que transcurre entre la emisión del sonido y la percepción de eco se puede establecer la distancia a la que se encuentra el obstáculo que ha producido la reflexión de la onda sonora, mediante la ecuación 1 [17].

$$d = \frac{1}{2} V t \quad (1)$$

Donde V es la velocidad del sonido en el aire y t es el tiempo transcurrido entre la emisión y recepción del pulso.

A pesar de que su funcionamiento parece muy sencillo, existen factores inherentes tanto a los ultrasonidos como al mundo real, que influyen de una forma determinante en las medidas realizadas. Entre estos factores el más determinante es la densidad del medio material por donde se mueven las ondas ultrasónicas que en este caso es el aire. La densidad del aire depende a su vez de la temperatura influyendo este factor sobre la velocidad de propagación de la onda según la ecuación 2.

$$V_s = V_{s0} [1 + (T/273)]^{1/2} \quad (2)$$

Siendo V_{s0} la velocidad de propagación de la onda sonora a 0 °C, y T la temperatura absoluta (en grados Kelvin).

Realizando varias transformaciones obtenemos la ecuación 3.

$$d = (0.1658 + 0.0003 T) t \quad (3)$$

Siendo d la distancia en milímetros, a la que se encuentra el obstáculo que ha producido la reflexión de la onda sonora; T la temperatura del aire dentro del tubo de PVC, en °C y t el tiempo en microsegundos, transcurrido entre la emisión y recepción del pulso.

En la figura 3 se muestra el esquema en bloques del sistema de monitoreo. El mismo está constituido por un módulo electrónico y un módulo de adquisición el cual recibe la señal del módulo electrónico mediante módems de radiofrecuencias.

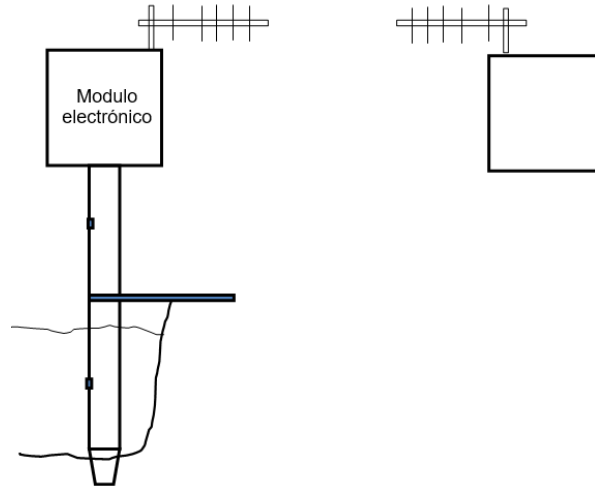


Figura 3 Esquema en bloques del sistema de monitoreo.

El modulo electrónico está conectado en la parte superior de un tubo de PVC de 160 mm de diámetro el cual va anclado al fondo de la laguna. Este contiene en su parte inferior cuatro huecos de 50 mm x 50 mm de tamaño para permitir el paso del agua a su interior y que permita a su vez seguir el nivel del agua que hay en el exterior del mismo. El modulo electrónico contiene tres sensores, un emisor y receptor ultrasónico que se utiliza para medir el nivel del agua, un sensor de temperatura que permite medir la temperatura del agua y otro sensor de temperatura para la compensación del valor de la velocidad del sonido. Estos van conectados a una tarjeta multifunción la cual envía de forma inalámbrica a través de un modem de radiofrecuencia, los valores del nivel del agua y su temperatura al módulo de adquisición.

El módulo de adquisición está constituido por una computadora la cual recibe a través de un modem de RF los datos de las señales del módulo electrónico, los almacena en su memoria y envía también los datos registrados por correo electrónico cada cierto periodo de tiempo.

3. Resultados

En la figura 4 se muestra el esquema en bloque de los circuitos que componen el modulo electrónico. El mismo se diseñó en base a una tarjeta multifunción modelo Arduino Uno. Esta tarjeta contiene un microcontrolador ATmega328 y

calcula además, el promedio de 12 mediciones, realizadas cada 5 segundos lo que hace un total promedio en tiempo de 1 minuto y lo envía a través del modem de RF al módulo de adquisición.

Como modem de RF se utilizó un XBee-Pro 900 conectado con la tarjeta Arduino a través de una interface que se encarga de la conversión de los niveles de voltajes de las señales. Este módulo está programado para trabajar como transmisor y es ideal para aplicaciones punto a punto y punto a multi punto, así como para aplicaciones que requieren transmisión a grandes distancias ya que con sus 50 mW de potencia de transmisión puede abarcar distancias desde 500 m en interiores hasta 1.6 km en exteriores.

El módulo electrónico se alimenta con +12 V que lo proporciona una fuente de alimentación en base a una batería la cual puede cargarse a través de una celda fotovoltaica o a través de la red eléctrica según sea el caso.

El módulo de adquisición está constituido por modem de RF modelo XBee-Pro 900 conectado a través de una interface para USB a una computadora y está programado para trabajar como receptor. En la computadora hay un programa escrito en LabVIEW el cual utiliza un algoritmo programación gráfico. Este brinda un panel frontal como el que se muestra en la figura 5 y un panel de programación.

En la ventana marcada con el número 1 en la figura 5 se escribe el nombre y ruta del archivo en el cual se almacenarán los datos que se reciban del módulo electrónico. El nombre del archivo deberá tener extensión .csv para que pueda ser abierto posteriormente en EXCEL. Las ventanas agrupadas con el número 3 en la figura 5, se utilizan para configurar el puerto donde está conectado el módulo de RF receptor. Las ventanas con los números 2, 4 y 5 respectivamente, muestran la fecha y hora así como el promedio de las 12 últimas mediciones últimas recibidas y almacenadas en el archivo del nivel y temperatura del agua.

Este programa también permite enviar por correo electrónico el archivo con las mediciones almacenadas. La dirección o direcciones de los destinatarios se editan en las ventanas agrupadas con el número 6 en figura 5. El correo se envía a través del servidor configurado en las ventanas agrupadas con el número 7 en

figura 5. En la ventana con el número 8 se selecciona cada cuantos minutos enviar el correo. Si se selecciona 60 minutos, durante 60 minutos se estará almacenando mediciones en el archivo seleccionado en la ventana 1 y al cabo de ese tiempo se envía, a las direcciones de correo configuradas en las ventanas con el número 6, el archivo con las mediciones almacenadas durante ese periodo de tiempo. Posteriormente el archivo se mantiene almacenado en la computadora y se comienza un nuevo archivo con el mismo nombre y en la misma ubicación pero con un número consecutivo.

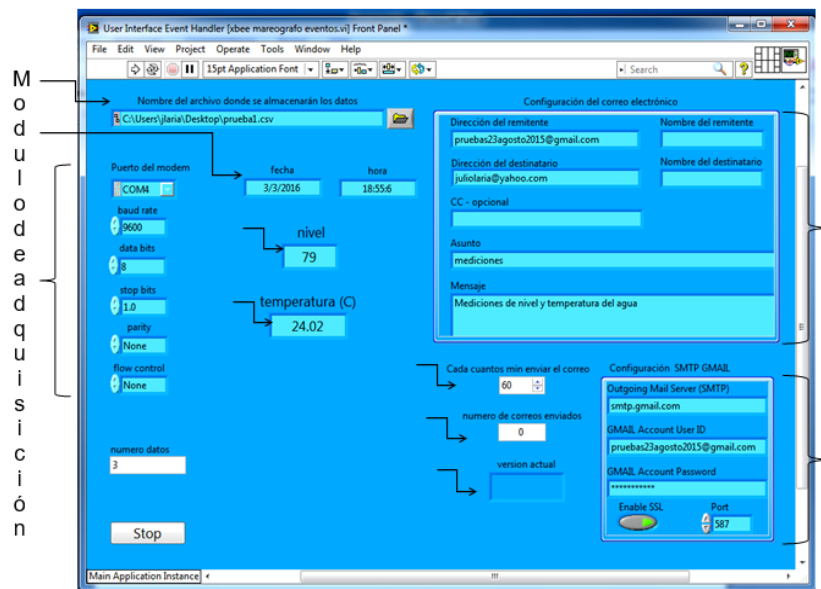


Figura 5 Panel frontal del programa del módulo de adquisición.

De esta manera se tiene en archivos, almacenadas las mediciones recibidas del módulo electrónico a parte de las almacenadas en la memoria SD que se localiza en el módulo electrónico.

En la ventana con el número 9 se va mostrando la cantidad de correos electrónicos enviados y en la número 10 la versión del correo actual en proceso.

4. Discusión

Para comprobar el funcionamiento del sistema se realizó una prueba a nivel de laboratorio colocándose dentro del tubo de PVC una tapa a una distancia del

sensor de 423 mm y la temperatura en el laboratorio durante la prueba se mantuvo en los 30.4 °C. El tiempo de la prueba fue de 1 hora y los resultados obtenidos se muestran en la figura 6 para el nivel medido y en la figura 7 para la temperatura medida.

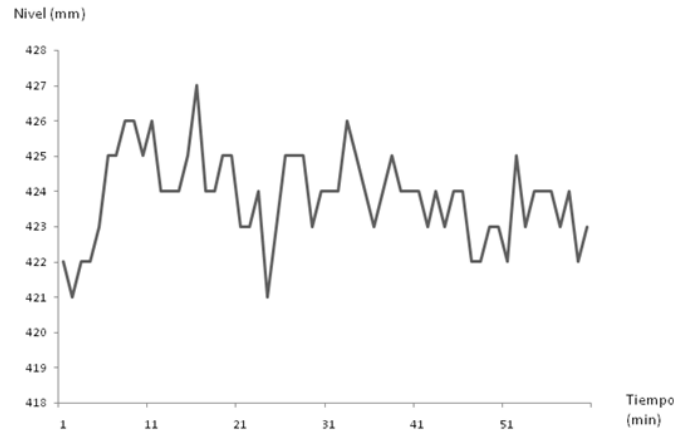


Figura 6 Comportamiento de la medición de nivel en el laboratorio.

El comportamiento de la medición de nivel en el laboratorio y mostrado en la figura 6 mostro una media de 423.8 mm y una desviación estándar de 1.27. Para el caso de la temperatura se obtuvo una media de 30.48°C y una desviación estándar de 0.12.

Actualmente el sistema se instaló en la Laguna del Carpintero y funciona correctamente.

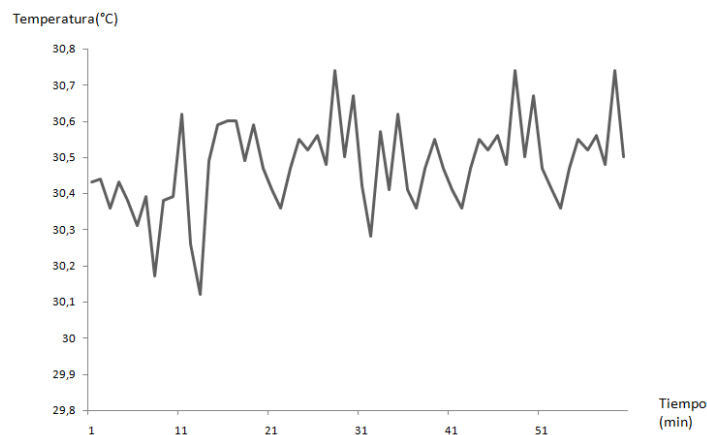


Figura 7 Comportamiento de la medición de la temperatura en el laboratorio.

5. Conclusiones

Como resultado del presente trabajo se obtuvo el desarrollo de un sistema de monitoreo compuesto por dos mareógrafos ultrasónicos que permiten el monitoreo en tiempo real del nivel del agua de la Laguna del Carpintero en la ciudad de Tampico, con una exactitud de ± 7 mm y de su temperatura con una resolución de ± 0.5 °C. El diseño del sistema permite agregar otros sensores por lo que puede ampliarse la cantidad de parámetros a medir en los puntos de monitoreo. El bajo costo de los componentes utilizados permite la reproducción del sistema para el monitoreo de otras lagunas y ríos.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] R.D. Dyer, *Estuaries: A physical introduction*. Second ed. 1997. John Wiley and Sons. Pág. 195.
- [2] R.H. Freije, J. Marcovecchio, *Oceanografía química*, En: *Ecosistema del Estuario de Bahía Blanca*. 2004. M.C. Piccolo & M. Hoffmeyer eds. ISBN 987-9281-96-9, Bahía Blanca, Argentina. Pág. 233.
- [3] M.O. Hayes, "Morphology of sand accumulations in estuaries". *Estuarine Research*, Vol.2. 1975. Pp.3-22.
- [4] G.M.E. Perillo (1995) *Definitions and geomorphologic classifications of estuaries*, Chapter 2. En: *Geomorphology and sedimentology of estuaries*. *Developments in sedimentology* 53. 1995. Ed. G.M.E. Perillo. Elsevier Science. Pp 17- 47.
- [5] Martín, J. Padín, F. García, *Apuntes de Geodesia Física*. 2000. Editorial. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. Pág.181.
- [6] D. Pugh, T. Surges, *Mean Sea Level*.1996. Ed. John Wiley and Sons, Wiltshire. Pág. 472.
- [7] *Guide to Hydrological Practices Volume II*. Sexta Edición. 2008. WMO - No. 168. Suiza. ISBN 978-92-63-10168-6.
- [8] P. Xuange, L. Peipei, H. Chunying, *One Kind of Water Level Monitor Recording Instrument*. In: 978-1-4244-1718-6/08/IEEE. 2008.

- [9] N. Zachos, C. Kosmatopoulos, Th. Lions, "A Wireless Network of Remote Measuring Stations: Application in Water Level Monitoring". IEEE Catalog Number: 95TH8081.
- [10] S. Rachrnan, I. Pratomo, N. Mit, Design of Low Cost Wireless Sensor Networks- Based Environmental Monitoring System for Developing Country. Proceedings of APCC2008 copyright, IEICE 08 SB 0083. 2008.
- [11] S. Chen, C. Wu, "Ultrasonic Distance Measurement Based on Infrared Communication Technology". International Conference on Computer Application and System Modeling. In: 978-1-4244-7237-6/10/IEEE. 2010.
- [12] M. Zhang, S. Li, "A Method of the Untouched Ultrasonic Liquid Level Measurement With High Precision". International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCSM). 2010.
- [13] L. Zhang, L. Zhao, "Research of Ultrasonic Distance Measurement System Based on DSP". In: 978-1-4244-9763-8/11/IEEE. 2011.
- [14] G. Wang, C. Gu, J. Rice, T. Inoue, C. Li, "Highly Accurate Noncontact Water Level Monitoring using Continuous-Wave Doppler Radar". In:978-1-4673-3105-0/13/IEEE. 2013.
- [15] B. Panindrareddy, P. Eswaran, "Metro overhead tanks monitoring system using ZigBee based WSN", Proceedings of 2013 IEEE Conference on Information and Communication Technologies (ICT) In: 978-1-4673-5758-6/13/IEEE. 2013.
- [16] S. Maqbool, N. Chandra, "Real Time Wireless Monitoring and Control of Water Systems using Zigbee 802.15.4". 5th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks. In: 978-0-7695-5069-5/13 IEEE. 2013.
- [17] D. Pugh, Tides, Surges and Mean Sea Level! Ed. John Wiley and Sons, Wiltshire. 472 Pp. 1996.
- [18] Arduino. www.arduino.cc. Febrero 2016.

7. Autores

Dr. Julio Laria Menchaca obtuvo el grado de Doctor en Tecnología Avanzada en el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional, México. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Actualmente es profesor de la Facultad de Ingeniería “Arturo Narro Siller” de la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Sus intereses de investigación incluyen el diseño electrónico, el control inteligente y la automatización de procesos

Dr. Salvador Ibarra Martínez obtuvo el grado de Doctor en Tecnologías de la Computación orientado a Robótica Cooperativa en la Universidad de Girona, España. Actualmente es profesor de la Facultad de Ingeniería “Arturo Narro Siller” de la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Sus intereses de investigación incluyen los sistemas de agentes inteligentes, mecanismos de coordinación para robots autónomos móviles para su aplicación tanto en simulación como en plataformas reales, particularmente en el fútbol robótico y los sistemas inteligentes de transporte.

M.C. José A. Castán Rocha recibió el grado de Maestro en Ciencias en la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Actualmente es estudiante en el programa doctoral de Ciencias de la Computación en la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Actualmente es profesor de la Facultad de Ingeniería “Arturo Narro Siller” de la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Sus intereses de investigación están relacionados con los Sistemas Inteligentes de Transportes, Modelos para el Flujo de Vialidades y su implementación con los Agentes Inteligentes.

M.C. Emilio Castán Rocha recibió el grado de Maestro en Ciencias en el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero en el cual actualmente se desempeña como Profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Sus intereses de investigación están relacionados con las áreas de control inteligente y sistemas electrónicos.