

# DESARROLLO DE PROTOTIPO SCADA PARA CONTROL DE NIVEL DE AGUA EN DOS CONTENEDORES DE LA COMISIÓN DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DEL MUNICIPIO DE ACAPULCO (CAPAMA)

Ing. Hugo Rojas Salgado<sup>1</sup>, M.T.I. Eloy Cadena Mendoza<sup>2</sup>,  
M.T.I. Juan Miguel Hernández Bravo<sup>3</sup> y Dr. José Antonio Montero Valverde<sup>4</sup>

**Resumen**— Desarrollo de prototipo SCADA para controlar el nivel de agua en dos contenedores, para su uso futuro en la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado de Municipio de Acapulco, la intención fundamental de este prototipo es formalizar y fundamentar la base en la cual CAPAMA se pueda apoyar para aplicarlo en sus tanques de agua reales, mediante la obtención de datos a través de sensores ultrasónicos y el envío de la información mediante el uso del protocolo MQTT a una aplicación web diseñada en ASP.NET Core que muestra una interfaz gráfica de dos tanques con su nivel de agua en tiempo real, en un mapa del municipio de Acapulco, ejecutada a través de un servidor que hospeda la aplicación y que puede ser consultada y visualizada mediante su IP local, en prácticamente cualquier dispositivo que esté conectado a ese punto de acceso y que tenga un navegador web que soporte el estándar HTML5.

**Palabras clave**— HTML5, Interfaz gráfica, MQTT, SCADA, Sensor ultrasónico, Aplicación de una Sola Página, Tiempo real.

## Introducción

Presentamos una propuesta de desarrollo de un prototipo de sistema SCADA utilizando para su proceso de construcción componentes de bajo costo y orientados al “hardware libre”, además de la utilización del conjunto de librerías de “código libre” para desarrollar el firmware y el software del prototipo SCADA, con el objetivo de medir, supervisar y controlar los niveles de líquido en dos contenedores, la finalidad es presentar una alternativa de solución a la empresa CAPAMA para que pueda utilizarse este tipo de prototipo y tecnología emergente en un futuro en sus instalaciones de sus tanques de agua reales y pueda sobre todo evitar muchas pérdidas de agua.

## Antecedentes

En el año de 1993 la Organización de las Naciones Unidas (ONU) designó el 22 de marzo como el día mundial del agua, con la finalidad de difundir cada año un mensaje de concientización para la conservación y el correcto uso del agua en todo el mundo, para el año 2018 la (Comisión Nacional del Agua, 2019), adopta un lema que lleva por nombre “Naturaleza para el agua” con el objetivo de promover investigaciones y acciones que exploran las diferentes formas en las que la naturaleza puede ayudar a la población a enfrentar los desafíos en materia del agua en el siglo XXI. Por lo que en el año 2018 en México y con la finalidad de tener un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos, se aplica el Plan Nacional Hídrico, en el cual uno de los objetivos dice “Incrementar las capacidades técnicas, científicas y tecnológicas del sector”.

En el último estudio realizado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD, 2016) titulado; “Gobernanza del agua en las ciudades”, informa que México tiene 8 ciudades de 42 ciudades encuestadas, que representan los más altos índices de desperdicio de agua, entre ellos Acapulco, por el elevado porcentaje de pérdida de agua por la contaminación, infraestructura deficiente y obsoleta.

En CAPAMA alrededor del año 2002 se implementó por patrocinio de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Comisión de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento del Estado de Guerrero (CAPASEG) un sistema denominado SCADA del inglés Supervisory, Control and Data Acquisition y traducido al español como Supervisión, Control y Adquisición de Datos, en 53 sitios de tanques distribuidos en el municipio de Acapulco, pero

<sup>1</sup> Ing. Hugo Rojas Salgado, alumno de la Maestría en Sistemas Computacionales en el Instituto Tecnológico de Acapulco, Acapulco de Juárez, Guerrero. hugorojas@live.com.mx.

<sup>2</sup> M.T.I. Eloy Cadena Mendoza docente de la Maestría en Sistemas Computacionales en el Instituto Tecnológico de Acapulco, Acapulco de Juárez, Guerrero. eloy\_cadena@yahoo.com.

<sup>3</sup> M. T. I. Juan Miguel Hernández Bravo, docente de la Maestría en Sistemas Computacionales en el Instituto Tecnológico de Acapulco, Acapulco de Juárez, Guerrero.

<sup>4</sup> Dr. José Antonio Montero Valverde, docente de la Maestría en Sistemas Computacionales en el Instituto Tecnológico de Acapulco, Acapulco de Juárez, Guerrero. jamontero1@infinitummail.com.

el paso del tiempo ha generado el colapso de la vida útil de los sensores; como de nivel de agua, de temperatura y humedad, además otro factor que ha ocasionado inconvenientes al sistema es el deterioro ocasionado por la naturaleza, como; la salinidad, la corrosión de los materiales y la falta de mantenimiento en la mayoría de los sitios. Cabe hacer mención que también la destrucción de infraestructura material en los sistemas SCADA provocada por el vandalismo, la rapiña o averías técnicas en la comunicación ha ocasionado el incorrecto funcionamiento en los tanques de almacenamiento y distribución de CAPAMA.

### **Planteamiento del problema**

Los responsables de CAPAMA estiman que del 100% de agua potable que se almacena en un tanque, el 70% del agua se pierde por derrame en el contenedor y por fugas, debido a que no cuentan con un sistema eficaz y eficiente que supervise los niveles de agua y administre el control de las bombas.

Ha habido intentos por reparar y rehabilitar los sistemas SCADA en los sitios en donde no funcionan, más sin embargo no se ha podido por que el sistema fue desarrollado por una empresa privada; por tal motivo no se tiene acceso a los diagramas electrónicos ni al código del software para adaptarlo y escalarlo, además el costo de reimplementación por cada sitio es muy alto. Por otra parte existe el problema que no se puede invertir en la adquisición de componentes electrónicos para rehabilitar el sistema SCADA o en su defecto adquirir nuevos sistemas de monitoreo de nueva generación pues representan un costo elevado. Dado que en la actualidad la CAPAMA tiene implementado SCADA en 53 sitios, de los cuales solo 2 están en funcionamiento con dicho sistema, si no se resuelve el control supervisado de las bombas y la adquisición remota de las señales de los sensores de nivel de agua se seguirá desperdiciando mucha agua potable.

### **Objetivo general**

Desarrollar un prototipo SCADA para contralar el nivel de agua en dos contenedores para su uso futuro en la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado de Municipio de Acapulco.

### **Objetivos específicos**

- Investigación y análisis de requerimientos.
- Desarrollar prototipo electrónico SCADA con la implementación de una tarjeta de desarrollo Intel Galileo 2 y sensores ultrasónicos orientados al IoT.
- Desarrollar el software servidor que implementa el protocolo MQTT en Asp.net Core.
- Desarrollar el software de la interfaz gráfica en un mapa que mostrará la información de tiempo real mediante la librería Knockout.js.
- Integrar la comunicación del prototipo electrónica SCADA y el software para realizar pruebas de comunicación en tiempo real de los niveles del agua.

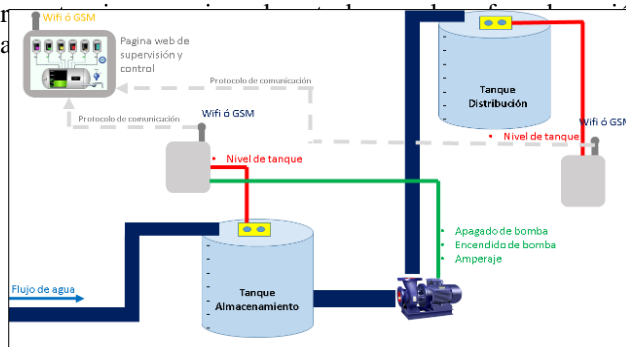
### **Justificación**

Se propone desarrollar un prototipo SCADA para controlar los niveles de agua en dos contenedores, por lo que mediante esta herramienta la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Acapulco pueda utilizar en un futuro controlar y supervisar los niveles de sus tanques de almacenamiento y distribución, por lo que en un futuro se pretende que este proyecto ayude a disminuir las pérdidas de agua potable y ahorrar agua, dado que en la actualidad existe una pérdida significativa de agua potable en los tanques, por lo que causaría un impacto social, además de un impacto tecnológico pues en este artículo se sugiere el uso de tecnologías orientadas al IoT que son de bajo costo y eficientes. Con respecto a la viabilidad, generar un proyecto con nuevas tecnologías emergentes orientadas al Internet de las Cosas ayudará a invertir menos en los componentes electrónicos y a capitalizar más ganancias por el ahorro de agua potable.

### **Propuesta de solución**

Por lo tanto en el presente artículo se propone desarrollar un prototipo SCADA para contralar el nivel de agua en dos contenedores para su uso futuro en la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado de Municipio de Acapulco, la intención fundamental de éste prototipo es formalizar y fundamentar la base en la cual CAPAMA se pueda apoyar para aplicarlo en sus tanques de agua reales. El prototipo propuesto simula los requerimientos básicos de CAPAMA para la supervisión, control y adquisición de datos de sus tanques de almacenamiento y distribución, por lo tanto los requerimientos son los siguientes:

- El prototipo simula dos contenedores de agua potable, uno simula ser el tanque de almacenamiento y el otro de distribución, cada tanque simula tener un sistema SCADA que enviará la información de los niveles de los tanques, así como los parámetros de humedad, temperatura y amperaje, cuando el tanque de almacenamiento tenga más del 70% de agua y el tanque de distribución tenga menos del 20% y esté activado el control automático la bomba funcionará hasta llenar el tanque de distribución como se puede observar en la *Figura 1*, cuando por alguna circunstancia se requiere de apagar o encender la bomba a medida de la información de los sensores.

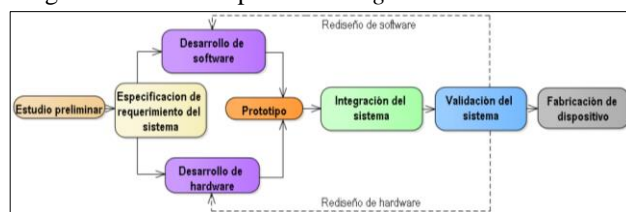


**Figura 1.** Bosquejo general de funcionamiento de los contenedores del prototipo.

- Se requiere diseñar y desarrollar un sistema para supervisar, controlar y adquirir la información de los niveles de agua en los tanques en tiempo real así como la obtención de otros parámetros como el amperaje consumido por la bomba, la humedad y temperatura del tanque enviados a una página web para consultar la información y tomar decisiones como lo puede observar en la *Figura 1*. Utilizando para su construcción componentes de bajo costo, orientados al *Internet of Things* (IoT), traducido al español como *Internet de las cosas*, dado que existe un antecedente (IMTA Coordinación de Hidráulica, 2016) acerca de la diseminación de esta tecnología en México aprovechando la integración de la telemetría con sensores especializados para el control de la calidad de agua en las redes de distribución, utilizando tecnologías como Arduino, Raspberry Pi y Cloudino para transferir información a la *nube*.

### Resultados

Para desarrollar el prototipo SCADA, se consideró trabajar en paralelo el desarrollo del sistema embebido prototipo electrónico, junto con el diseño del software interfaz web que muestra la información en tiempo real, como el flujo de la metodología clásica orientada al diseño de sistemas embebidos lo sugiere (Frank, 2005), para una mejor verificación, depuración e integración de ambas partes ver *Figura 2*.



**Figura 2.** Metodología de diseño de sistemas embebidos clásica

Para empezar el desarrollo como dice (Deitel & Deitel, 2007) se contemplan primeramente los requerimientos de sistema, y estos se anotan en el documento de requerimientos, con base en las necesidades de la empresa y haciendo un análisis de la problemática que se requiere resolver; en este caso, para que posteriormente se modelen mediante una herramienta de lenguaje de representación gráfica descriptiva, denominado **Unified Modeling Language (UML)** traducido al español como Lenguaje Unificado de Modelado con la finalidad de describir gráficamente una serie de comportamientos del sistema que puede interpretar un programador para desarrollar el sistema, estos modelos son como "los planos arquitectónicos en los que se desarrollará el software". Una vez analizada y finalizada la etapa de modelado del sistema y de los materiales y herramientas elegidas, se procede a desarrollar el prototipo, uniendo los componentes electrónicos de acuerdo al diagrama electrónico generado en la etapa de modelado del sistema prototipo SCADA, obteniendo como resultado la *Figura 3*.



**Figura 3.** Resultado de la elaboración de prototipo electrónico SCADA.

Para el desarrollo del firmware se utilizó la herramienta de *Visual Studio Code con el plugin de Arduino* para cargarlo en el sistema operativo **Linux Yocto** de la microcomputadora **Intel Galileo Gen 2**, utilizando para su programación como lenguaje base C, para dotar al prototipo de las operaciones y comportamientos que tiene que realizar con base en los requerimientos del sistema. También se muestra los contenedores de agua potable, simulando los requerimientos del sistema, con sus respectivos sensores ultrasónicos para medir el nivel del agua en tiempo real, y la bomba de rebombeo de agua de un contenedor a otro contenedor ver *Figura 4*, estos dispositivos son conectados al resultado del prototipo de la *Figura 3*.



**Figura 4.** Descripción gráfica de los contenedores de agua y la bomba de rebombeo de agua

Para las operaciones de comunicación e intercambio de información de tiempo real entre el prototipo SCADA electrónico de la *Figura 4* y el software aplicación web que muestra la información de tiempo real mediante gráficos de la *Figura 7*, se utilizó el protocolo MQTT del inglés **Message Queuing Telemetry Transport** y traducido al español como **Transporte de Telemetría de Cola de Mensajes**, como dice (Gastón, 2017) es un protocolo de tipo M2M del inglés *Machine to Machine*, traducido al español como **máquina a máquina**, que está orientado al **Internet de las Cosas**, es muy ligero y se maneja sobre la capa de aplicación, está recomendado para la industria en el uso de los sistemas SCADA, además es un protocolo especificado y estandarizado por el consorcio **OASIS** y el **ISO/IEC 20922** en el año 2016. También ofrece varios mecanismos de seguridad y es muy robusto y flexible en áreas en donde las redes de comunicaciones sobre el protocolo TCP/IP manejan altas latencias.

Para la parte de la aplicación web que muestra gráficos con información de los niveles de los contenedores en tiempo real así como de los demás parámetros especificados en el modelado del prototipo SCADA, se desarrolló la aplicación utilizando el .NET Framework con la tecnología de ASP.NET Core, utilizando el concepto de desarrollo de las SPA (**Single Page Application**) o aplicaciones de una sola página la cual ofrece mayor rendimiento y su carga en el navegador es mucho más rápido como dice (Emmit, 2016), dado que ya no se hacen peticiones directamente al servidor para cargar todo el **DOM (Document Object Model)** de HTML, si no que este concepto

utiliza llamadas asíncronas mediante **AJAX (Asynchronous JavaScript and XML)** o basada en **WebSockets** para actualizar únicamente las partes necesarias en el **DOM** de HTML, por lo que para su uso en aplicaciones de nueva generación que muestran información de tiempo real es recomendado. En el desarrollo de la aplicación se utiliza las librerías del protocolo **MQTT** para obtener los datos de los sensores ultrasónicos del nivel de agua y los de los demás sensores especificados en los requerimientos del sistema, también se utiliza **WebAPI** y **SignalR** de **ASP.NET Core** para guardar la información capturada por los sensores y almacenarla en una base de datos no relacional como **MongoDB**, en la *Figura 5* puede observar el conjunto de tecnologías utilizadas en el desarrollo, tanto para la parte del **back-end** como para el **front-end**.



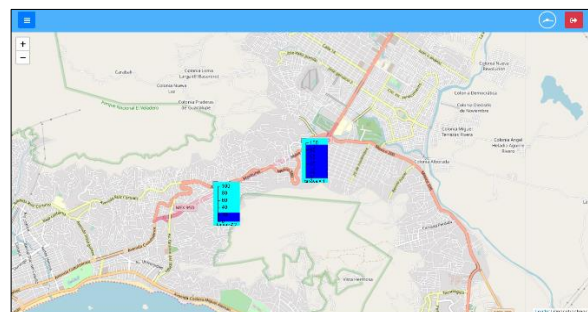
**Figura 5.** Pila de tecnologías utilizadas en el desarrollo de la aplicación web del sistema SCADA

Para la parte de la arquitectura y diseño de la aplicación se hizo una segmentación física del proyecto, aplicando el patrón **MVVM (Model View View-Model)** mediante la librería de **Knockout JS** y la arquitectura de una aplicación de **Single Page Application**, como lo dice (Emmit , 2016). Como resultado del desarrollo de la aplicación web se tiene las siguientes interfaces gráficas del sistema **SCADA**.

- Página de inicio de sesión para ingresar al sistema **SCADA**, la funcionalidad es introducir las credenciales de un usuario autorizado dado de alta en la base de datos del sistema, para acceder y controlar el sistema **SCADA** ver *Figura 6*.
- Si el usuario está autenticado y autorizado, la página de inicio se mostrará la funcionalidad principal del sistema **SCADA** esto es, que muestra un mapa con dos gráficos de contenedores que muestran información de tiempo real, en este caso; el nivel del líquido simulado de los contenedores; información enviada por los sensores ultrasónicos, como lo muestra la *Figura 7* que inicializan vacíos e inmediatamente empiezan a mostrar la información del nivel del líquido, información enviada a través por el protocolo **MQTT** y capturada por los sensores ultrasónicos. Además el usuario puede seleccionar la figura del tanque, en este caso el tanque # 1 y puede visualizar en una ventana *modal* los datos adquiridos, como la temperatura, la humedad y el nivel del líquido en tiempo real como puede apreciar en la *Figura 8* y además como se aprecia en la *Figura 9* también puede manipular el tipo de operación; manual o automático, cuando la operación es manual la bomba de rebombeo de agua se manipula conforme a la decisión del operador, cuando está en modo automático, cuando el tanque de rebombeo de agua tiene más del 70% de contenido de agua y el tanque de distribución tiene menos del 10% o igual el sistema automáticamente toma la decisión de rebompear el agua.

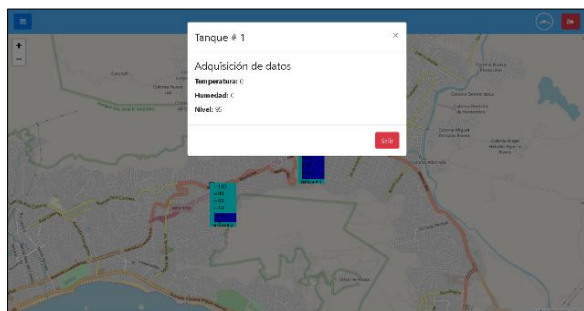


**Figura 6.** Página de inicio de sesión para ingresar al sistema SCADA.

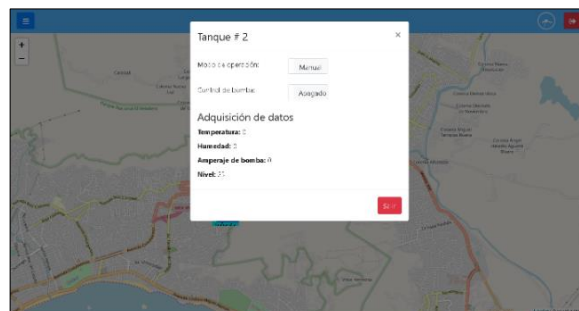


**Figura 7.** Página principal que muestra información de tiempo real del nivel del líquido de los contenedores.





**Figura 8.** Adquisición de datos del tanque 1 seleccionado, visualiza información de tiempo real como temperatura, humedad y nivel de líquido.



**Figura 9.** Adquisición de datos del tanque 2 seleccionado, visualiza información de tiempo real como temperatura, humedad y nivel de líquido, además ofrece el control de encendido y apagado de la bomba, así como el modo de operación.

### Conclusiones

En la presentación de la funcionalidad y operación del prototipo SCADA a los directores responsables de la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Acapulco (CAPAMA) se demostró que utilizando componentes electrónicos de bajo costo orientados al Internet de las Cosas y hardware opensource, así como herramientas de nueva generación para desarrollar software y utilización de patrones de diseño de software, así como repositorios llenos de librerías de desarrollo de software que simplifican el tiempo de codificación y la abundante documentación de éstas, se pueden construir sistemas de supervisión, control y adquisición de datos de tal manera que tenga un gasto mínimo significativo en la compra de los componentes electrónicos y en el software ya que no se pagan licencias de uso, en términos generales el prototipo puede llevarse a la implementación de un tanque real utilizando el mismo software y protocolo de comunicación, así como la misma tarjeta de desarrollo Intel Galileo, pero con diferentes sensores de nivel de agua, por lo que se recomienda un tipo de sensor industrial y aditivos mínimos en la interfaz electrónica.

### Referencias

- CAPAMA. (2019, Abril 19). *Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Acapulco*. Retrieved from Acerca de CAPAMA Nuestra historia: <http://www.capama.gob.mx/historia>
- Comisión Nacional del Agua. (2019, Abril 14). *gob.mx*. Retrieved from El día Mundial del Agua: <https://www.gob.mx/conagua/articulos/el-dia-mundial-del-agua?idiom=es>
- Deitel, H. M., & Deitel, P. J. (2007). *Cómo programar en C#*. México: Pearson Educación.
- Emmit, A. J. (2016). *SPA Design and Architecture - Understanding single-page web applications*. New York, EU: Manning Publications Co.
- Frank, G. (2005). *Transaction Level Modeling with SystemC TLM Concepts and Applications for Embedded Systems*. Francia: Springer.
- Gastón, H. C. (2017). *MQTT Essentials - A Lightweight IoT Protocol - The preferred IoT publish-subscribe lightweight messaging protocol*. Birmingham, UK: Packt Publishing Ltd.
- IMTA Coordinación de Hidráulica. (2016). *DISEMINACIÓN DE TECNOLOGÍA EUROPEA DE REDES INTELIGENTES DE AGUA POTABLE EN MÉXICO HC1609.1 Informe final*. México: Subcoordinación de Hidráulica Urbana.
- OECD. (2016). Water Governance in Cities. *OECD Studies on Water*, 39.