



## II Congreso de Agua Ambiente y Energía, AUGM

### Desarrollo de una plataforma flexible y abierta para monitoreo remoto de variables ambientales.

Nicolás Pérez<sup>a</sup>, Mariana del Castillo<sup>a</sup>, Pablo Monzón<sup>a</sup>, Guillermo Roth<sup>b</sup>, Pablo González<sup>b</sup>, Moisés Knochen<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay, [nico@fisica.edu.uy](mailto:nico@fisica.edu.uy), [mdelcastillo@fing.edu.uy](mailto:mdelcastillo@fing.edu.uy), [monzon@fing.edu.uy](mailto:monzon@fing.edu.uy)*

<sup>b</sup> *Grupo de Instrumentación y Automatización en Química Analítica, Facultad de Química, Universidad de la República, Uruguay, [groth@fq.edu.uy](mailto:groth@fq.edu.uy), [pablog@fq.edu.uy](mailto:pablog@fq.edu.uy), [mknochen@fq.edu.uy](mailto:mknochen@fq.edu.uy)*

**RESUMEN:** Con el avance de la tecnología, cada día se encuentran mas recursos disponibles para realizar monitoreo y control en tiempo real de sistemas complejos y distribuidos. En particular esto puede aplicarse al monitoreo de variables ambientales y relacionadas con la calidad de aguas. El desarrollo de redes de sensores inteligentes que reporten información en forma sistemática y accesible para el control de la calidad del agua es cada día más, una necesidad. En el presente trabajo presentamos del desarrollo de una arquitectura de hardware flexible que permite la realización de monitoreo remoto y el reporte a una base de datos mediante un enlace de telefonía móvil. El desarrollo tiene tres guías de diseño básico: bajo costo, robustez para ser instalado en campo y flexibilidad para servir de plataforma a diversas aplicaciones. La arquitectura es modular y impone el uso de una plataforma de hardware interna a cada módulo, solo se debe respetar el bus de interconexión definido.

Como ejemplo de aplicación presentamos la implementación de una plataforma basada en ARDUINO para la medición remota de fósforo, nitratos, temperatura y pH.

La iniciativa esta disponible para ser compartida con otros grupos de investigación universitarios que puedan requerir de sistemas de monitoreo remoto flexibles y de bajo costo.

**PALABRAS CLAVE:** Monitoreo remoto, redes de sensores, calidad de agua.

## 1 INTRODUCCIÓN

El monitoreo sistemático de cuencas y sistemas hidrológicos ha tenido gran desarrollo en los últimos 30 años (Strobl y Robillard, 2008). En particular es de interés la determinación de contaminantes y fuentes de polución ambiental, por lo que se han venido desarrollando arquitecturas de red cada vez mas complejas y con acceso a mas diversidad de información (Sousa et al., 2018). En nuestro país, hemos tenido en los últimos años eventos públicos notorios, como la aparición de las cianobacterias en aguas del Rio de la Plata. Esto ha resaltado la necesidad de contar con información actualizada sobre el estado de algunos contaminantes o productos químicos que producen las condiciones para el crecimiento bacteriano (De Leon y Yunes, 2001)(González-Piana et al., 2017).

Aquí surge la motivación inicial de nuestro grupo de trabajo, la necesidad de contar con un sistema que permita el monitoreo remoto de algunos parámetros relevantes en la calidad de aguas, en particular aquellos relacionados con el crecimiento de cianobacterias. El grupo de trabajo está

formado por investigadores del Grupo de Instrumentación y Automatización en Química Analítica de la Facultad de Química y el Departamento de Sistemas y Control del Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, ambos pertenecientes a la Universidad de la República.

En un primer momento el problema se planteó como el desarrollo de las técnicas analíticas que permitieran la determinación de fósforo y nitratos utilizando absorción óptica. Esto motivó la realización de una Tesis de Maestría en Química para la puesta a punto de las técnicas y la realización de un primer prototipo de dispositivo de campo, parte de los resultados son descritos en Gonzales et al. (2016). Como segundo paso, se realizó la integración en un sistema modular para su instalación en campo, este desarrollo fue realizado con el apoyo de un proyecto financiado I+D financiado por la CSIC-UdelaR, “*Desarrollo de una plataforma analítica flexible y de bajo costo para la telemedición de parámetros de calidad de agua*”.

Uno de los objetivos específicos del proyecto fue “*proveer a la comunidad científica de herramientas analíticas modernas, flexibles y de bajo costo para la monitorización ambiental*”. En este trabajo se presenta la descripción de la arquitectura, las consideraciones de diseño y los primeros diseños realizados en dicha arquitectura. Los detalles de la implementación de la medida de fósforo y nitrato se comentan en un apartado pero no se profundizan, ya que son parte de otro trabajo enviado a este congreso titulado “*Desarrollo de un analizador químico in-situ para aguas superficiales*”.

Es de destacar que la implementación propuesta es flexible y se adapta a numerosas aplicaciones. En este momento estamos trabajando en cuatro aplicaciones de la misma plataforma: medición de calidad de agua (Knochen et al., 2018), medición de contaminación sonora, medición de estabilidad de estructuras por análisis de vibración (Salvermoser et al., 2015) y detección de contaminación en colmenas de abejas analizando sonido (Pérez et al., 2016). En lo que sigue se presenta la arquitectura general del sistema y a posterior la solución encontrada para la aplicación de monitoreo de fósforo, nitratos, pH y temperatura.

## 2 ARQUITECTURA DE SISTEMA

El objetivo del presente desarrollo es contar con un sistema flexible, de bajo costo y abierto que permita la adquisición de parámetros remotos. El sistema debe permitir el almacenamiento remoto de los parámetros adquiridos, la comunicación vía red celular de los mismos, el funcionamiento autónomo en campo y la adición de módulos específicos de medición que dependen de la aplicación. Se trata de lograr la compatibilidad entre diferentes desarrollos que se están implementando en este momento en por parte de los investigadores de nuestro grupo de trabajo y generar una plataforma para nuevas aplicaciones. Para ello se definió una arquitectura base junto con un bus de alimentación y datos que deben respetar todos los módulos del sistema.

Los módulos están pensados para operar en el exterior, por lo que se requiere de un grado de protección de tipo IP65. En el otro extremo el sistema remoto debe conectarse con un servidor accesible en Internet donde se almacenan los datos de forma periódica. Opcionalmente el servidor puede implementar una comunicación bidireccional, permitiendo configurar parámetros o realizar medidas a demanda. La figura 1 muestra el sistema completo de adquisición de datos, la unidad de medida de campo, un servidor de Internet que recibe la transmisión por la red celular y almacena los datos y usuarios que acceden a los mismos a través de Internet. Los nodos de transmisión de datos pueden ser múltiples formando una red distribuida de monitoreo.

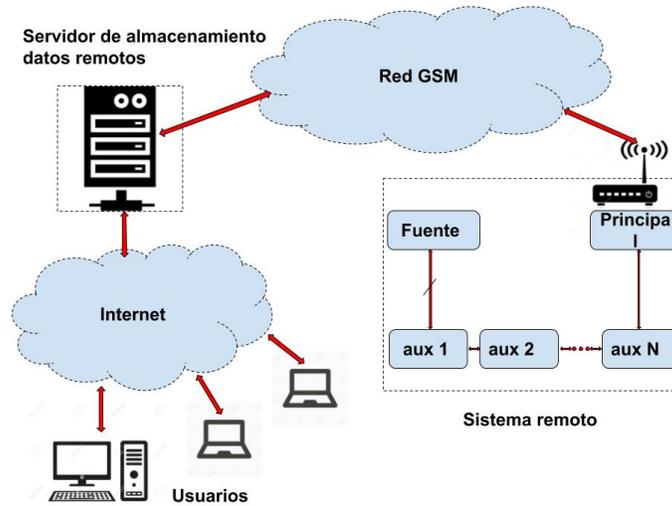


Figura 1. Sistema remoto de adquisición de datos.

## 2.1 Definición de la arquitectura.

Se define una arquitectura modular donde cada módulo se implementa por separado y se interconecta mediante un bus de alimentación y datos. Se definen tres tipos de módulo: Módulo de Fuente, Módulo Principal y Módulos de Medida y Expansión.

Dichos módulos se interconectan en un bus que permite la alimentación y la comunicación local. Para ello se definió un bus a nivel físico de forma que se pueda garantizar la compatibilidad del hardware. La figura 2 muestra como se realiza la interconexión de módulos, como todos los sistemas deben contar con alimentación y comunicaciones, estos son el inicio y el fin del bus.

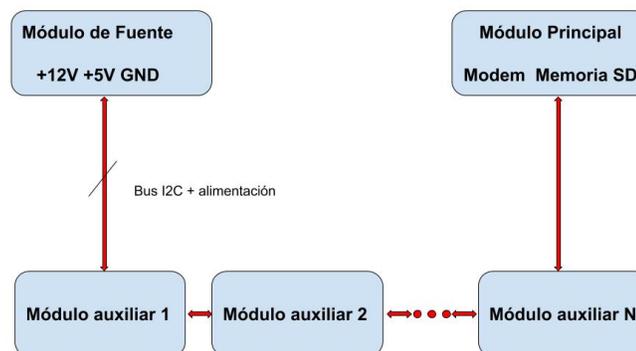


Figura 2. Arquitectura del sistema modular.

Dependiendo de la aplicación se conectan los módulos auxiliares. Esta arquitectura es típica de los autómatas programables modulares, permitiendo la expansión simple del sistema y la reutilización del hardware diseñado.

Parte de los objetivos del diseño es que sea de bajo costo, para poder ser utilizado en prototipos de investigación y robusto, para soportar la operación remota en campo. Los primeros diseños se realizaron utilizando placas de la familia ARDUINO, en las cuales se evitan las conexiones rápidas para dar robustez al sistema.

## 2.2 *Definición del bus*

Como paso inicial para asegurar la compatibilidad se define un bus de sistema que incluye alimentación y el bus I2C. Se decide utilizar un bus de 7 hilos con conector físico roscado para exterior, tipo conector de aviación rosca M16. Se utilizan seis hilos en el bus básico y se dispone de un hilo de reserva para una señal de control extra dependiente de la aplicación.

El bus cuenta con tres voltajes de alimentación, 12V, 5V y 3.3V, dos pines de comunicación I2C, SDA y SCL (datos y clock) y un terminal de tierra. Se seleccionó para la comunicaciones la interfase I2C, que es serial y sincrónica y habitualmente implementada en los microprocesadores y placas de desarrollo.

## 2.3 *Módulo de Fuente*

Todos los sistemas remotos necesitan una fuente de alimentación eléctrica. Esta puede provenir en algunos casos de la propia red de energía, paneles solares o simplemente batería. Esto depende de la disponibilidad y la autonomía deseada. La solución interna de cada unidad de fuente depende de la aplicación, pero se definen las tensiones de salida y la interfase física para garantizar que los diferentes módulos sean intercambiables. Se utilizan los mismos voltajes e identificación de colores que en las fuente de PC estandar tipo ATX. Como conector de salida se utiliza un conector de aviación de 7 pines que es el que define el bus del sistema. Las tensiones que suministra el módulo de fuente son: 12V, 5V, 3.3V y la referencia de tierra. La corriente mínima de cada terminal es de 1 A.

## 2.4 *Módulo Principal*

En el módulo principal se resuelven cuatro funciones: Lógica de control y scheduler del sistema, Maestro del bus I2C, Comunicación con el Modem GSM, Almacenamiento en memoria SD. Para la lógica de control y el scheduler del sistema el módulo principal maneja los tiempos donde se debe realizar una medida, los parámetros que deben pasarse a los módulos remotos en caso de ser configurables y la interpretación de comandos provenientes del servidor remoto.

Inicia todos los procesos de medida de los módulos de adquisición, estos realizan una medida a pedido del maestro. En este módulo se encuentra el modem GSM que realiza la comunicación remota. El sistema inicializa la comunicación y envía los datos al servidor. Se realiza el almacenamiento de los datos relevados y variables de estado relevantes en la memoria SD.

Este módulo debe estar presente en todos los desarrollos, por ello se define como terminador del bus, su caja tienen un solo conector.

### 3 EJEMPLO DE APLICACIÓN

Como ejemplo de aplicación presentamos la implementación realizada en el proyecto “*Desarrollo de una plataforma analítica flexible y de bajo costo para la telemedición de parámetros de calidad de agua*”. En el mismo se trata la medición de cierto número de parámetros fisicoquímicos que permiten evaluar el potencial de crecimiento de cianobacterias en aguas superficiales. Normalmente, estas determinaciones analíticas se realizan en el laboratorio por lo que se requiere que previamente se realice la toma de la muestra, su transporte y conservación hasta el momento del análisis. La propuesta es realizar un analizador basado en técnicas avanzadas de análisis en flujo empleando detección fotométrica para la detección de fósforo y nitrato además de otras variables ambientales.

#### 3.1 *Detalles de implementación*

La implementación para este sistema consistió en cuatro módulos. Un Módulo de Fuente, Módulo de Medidas Analíticas, Módulo de Medidas Auxiliares y Módulo Principal. Dado que se realizan medidas de absorción óptica utilizando reactivos perecederos, la autonomía del sistema no es mayor a una semana. Por ello el Módulo de Fuente se implementa directamente con una batería que se intercambia cuando se reponen los reactivos. Se implementó un Módulo de Medidas Auxiliares donde se mide temperatura y pH. Aquí también se realiza el control de la bomba de toma de muestras externas de agua. Este módulo funciona independiente del resto del sistema y responde a comando de toma de muestra o activación de la bomba. El Módulo de Medidas Analíticas es esencialmente un laboratorio a escala para realizar la mezcla de reactivos y agua de muestra para la medida de absorción óptica. Aquí se realiza la rutina de calibración y medida tanto para la medida de fósforo como para la de nitrato. Finalmente en el Módulo principal se implementa la comunicación GSM y el respaldo en memoria SD. Aquí se realiza el scheduler del sistema. Como ya se mencionó, los resultados y detalles de la medida de fósforo y nitrato pueden encontrarse en “Desarrollo de un analizador químico *in situ* para aguas superficiales” presentado a este mismo congreso.

### 4 CONCLUSIONES

Se diseñó un sistema modular, de bajo costo y robusto para ser utilizado en aplicaciones de monitoreo remoto. En particular se implementó una versión dedicada al monitoreo de calidad de agua con foco en las variables relevantes en el crecimiento de cianobacterias. El diseño físico se hace robusto para ser instalado en campo.

Se destaca la flexibilidad del sistema, el que es utilizable para otras aplicaciones cambiando el módulo de medida así como la disponibilidad del mismo para ser utilizado por otros grupos de investigación. A la fecha del presente congreso se disponibilizará la documentación técnica de los diseños realizados así como el contacto para el soporte en caso de querer utilizar el sistema proyectado.

Como tarea en desarrollo está el trabajo en la estandarización de la mensajería interna entre los módulos así como mejoras en el software de interfase de usuario.

## 5 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Comisión Sectorial de Investigación Científica de la Universidad de la República (CSIC-UdelaR) por el financiamiento del proyecto I+D 409/16, a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) y al PEDECIBA-Química por el apoyo económico.

## 6 REFERENCIAS

Adu-Manu, K. S., Tapparello, C., Heinzelman, W., Katsriku, F. A., Abdulai, J-D. (2017) Water Quality Monitoring Using Wireless Sensor Networks: Current Trends and Future Research Directions. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 13 1, doi:10.1145/3005719.

De Leon, L., Yunes, J. S. (2001), First report of a microcystin-containing bloom of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* in the La Plata River, South America. *Environmental Toxicology*, 16: 110-112. doi:10.1002/1522-7278(2001)16:1<110::AID-TOX1012>3.0.CO;2-Z

González-Piana, M., Fabián, D., Piccardo, A., Chalar, G., (2017) Dynamics of Total Microcystin LR Concentration in Three Subtropical Hydroelectric Generation Reservoirs in Uruguay, South America, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 99, 4, 488.

González, P., Pérez, N., Knochen, M. (2016). Low cost analyzer for the determination of phosphorus based on open-source hardware and pulsed flows. *Química Nova*, 39 3, 305-309. doi: 10.5935/0100-4042.20160020

Knochen, M., Roth, G., González, P., Pérez, N., Monzón, P., Del Castillo, M. (2018). Diseño, construcción y evaluación de un analizador autónomo in situ para la monitorización de los niveles de fósforo y nitrógeno en aguas superficiales. *Innotec*, 17, 18-30. doi: 10.26461/17.04

Pérez, C. J., Vega-Rodríguez, M., Reder, K., Flörke, M. (2017) A Multi-Objective Artificial Bee Colony-based optimization approach to design water quality monitoring networks in river basins, *Journal of Cleaner Production*, 166, 579-589, doi:10.1016/j.jclepro.2017.08.060.

Pérez, N., Jesús, F., Pérez, C., Niell, S., Draper, A., Obrusnik, N., Zinemanas, P., Mendoza, Y., Carrasco, L., Monzón, P. (2016) Continuous monitoring of beehives' sound for environmental pollution control, *Ecological Engineering*, 90, 326-330, doi:10.1016/j.ecoleng.2016.01.082.

Salvermoser, J., Hadziioannou, C., Stähler, S. (2015) Structural monitoring of a highway bridge using passive noise recordings from street traffic, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138, 6, 3864-3872, doi:10.1121/1.4937765

Sousa, J., Ribeiro, A., Barbosa, M., Pereira, F., Silva, A. (2018) A review on environmental monitoring of water organic pollutants identified by EU guidelines, *Journal of Hazardous Materials*, 344, 146-162, doi:10.1016/j.jhazmat.2017.09.058.

Strobl, R., Robillard, P. (2008) Network design for water quality monitoring of surface freshwaters: A review. *Journal of Environmental Management*, 87, 639-648, doi:10.1016/j.jenvman.2007.03.001.