

Richard Ariel, Aguilar Coronel. <https://orcid.org/0000-0002-8604-1131>¹Universidad Nacional de Itapúa. Dirección de Investigación y Ambiente. Facultad de Ciencias y Tecnología, Encarnación, Paraguay. raac90@gmail.com

Resumen

El agua es un factor esencial para los seres vivos, del que depende la calidad de vida. En la actualidad, el crecimiento de la población y el aumento de contaminantes en el medio ambiente provocan el deterioro de los canales de agua. Por lo tanto, su monitoreo constante para la remediación o acción temprana es cada vez más importante. Bajo estas consideraciones, esta investigación ha desarrollado un dispositivo (nodo sensor) de tamaño reducido (~ 5 x 5 cm) equipado con un número considerable de sensores (hasta siete) principalmente para monitorear el agua. El sistema resultante, implementado en una placa de circuito impreso, ofrece flexibilidad para la transmisión y el almacenamiento de datos a la vez que es energéticamente eficiente (<1 mW de consumo), que, junto con las técnicas de *energy harvesting*, puede operar indefinidamente. El sistema resultante es adecuado para diferentes condiciones ambientales y se puede aplicar en diferentes escenarios donde se requiere un monitoreo constante de la calidad del agua.

Palabras clave: pH. Turbidez. TDS. Energy harvesting. Wireless.

Abstract

Water is an essential factor for living beings, on which the quality of life depends. At present, population growth and the increase in pollutants in the environment lead to the deterioration of water channels. Therefore, their constant monitoring for remediation or early action is increasingly important. Under these considerations, this research has developed a device (sensor node) of reduced size (~ 5 x 5 cm) equipped with a considerable number of sensors (up to seven) primarily for monitoring water. The resulting system, implemented on a printed circuit board, offers flexibility for data transmission and storage while being energy efficient (<1mW consumption), which, together with built-in harvesting techniques, can operate indefinitely. The resulting system is suitable for different environmental conditions and can be applied in different scenarios where constant water quality monitoring is required.

Key words: pH. Turbidity. TDS. Energy Harvesting. Wireless.

Área del conocimiento: Ingeniería y Arquitectura.

Correo de Correspondencia: raac90@gmail.com

Conflictos de Interés: El autor declara no tener conflictos de intereses



Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia Creative Commons CC-BY

Fecha de recepción: 16/06/2021

Fecha de Aprobación: 19/11/2021

Página Web: <http://publicaciones.uni.edu.py/index.php/rseisa>

Citación recomendada: Aguilar Coronel, R. A. (2021). Desarrollo de una herramienta de monitoreo remoto de la calidad del agua basado en nodos IoT de bajo consumo. Revista sobre estudios e investigaciones del saber académico (Encarnación), 15(15): e2021009

Introducción

El agua es indispensable para la supervivencia humana, la fauna y la flora. Garantizar la calidad del agua se ha vuelto de vital importancia a medida que las fuentes contaminantes se vuelven más frecuentes debido al rápido ritmo de industrialización y extinción de las fuentes de remediación naturales presentes en una naturaleza cada vez más reducida. Por lo tanto, es un recurso valioso que debe monitorearse y mantenerse cuidadosamente.

Esfuerzos previos para el control de calidad del agua pueden encontrarse mayormente en el desarrollo de sensores independientes (T. L. Dinh et al, 2007). Sin embargo, estos dispositivos requieren condiciones ambientales específicas para su correcto funcionamiento. Igualmente, en su mayoría, son de un tamaño considerable.

Varios desarrollos han tenido como objetivo fusionar varios sensores en un solo sistema para reducir dimensiones y ofrecer una medición más completa e integrada, agregando al mismo tiempo otras características, como la posibilidad de acceder a los datos del sensor de forma remota mediante un enlace inalámbrico (Pule et al, 2017). No obstante, la mayoría de los sistemas siguen requiriendo un alto mantenimiento y no pueden desplegarse en ambientes remotos debido a que requieren una alimentación externa para su funcionamiento continuo ya que no están optimizados para un funcionamiento a bajo consumo.

Este proyecto tiene como objetivo trabajar sobre los desarrollos introducidos anteriormente mientras se aprovecha la nueva generación de electrónica de baja potencia combinada con optimizaciones para permitir un consumo de energía de trabajo reducido. Estos ahorros de energía permitirán que el dispositivo funcione en el rango de potencia compatible con pequeños subsistemas solares de Energy Harvesting que serán parte del diseño.

En consecuencia, esta investigación ha desarrollado un dispositivo no intrusivo de 5 x 5 cm incluyendo siete sensores principalmente para monitorear la calidad del agua. El sistema ofrece flexibilidad para la transmisión y el almacenamiento de datos a la vez que es energéticamente eficiente (menor a 1 mW de consumo). El sistema es apto para diferentes condiciones ambientales y se puede aplicar en diferentes escenarios donde se requiere un monitoreo constante de la calidad del agua considerando que puede trabajar en modo continuo por medio de un sistema de *energy harvesting*.

Proporcionar datos en tiempo real sobre la calidad del agua puede ayudar a una rápida detección, reduciendo o evitando completamente una contaminación que pueda tener implicaciones en la

salud humana, la fauna, la flora y economía de la región. Por ello, consideramos que este trabajo puede tener implicaciones significativas en el corto y largo plazo.

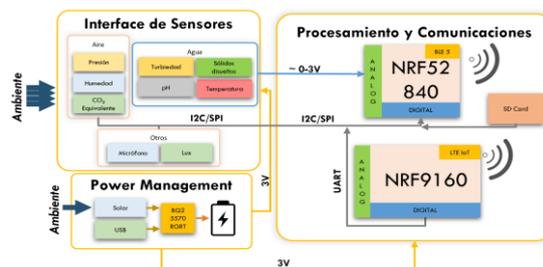
Materiales y métodos

Estructura del sistema.

La Fig. 1 presenta un diagrama en bloques de la estructura general del sistema desarrollado, dividido en tres partes principales: interfaz de sensores, procesamiento y comunicaciones y gestión de energía (Power Management). A continuación, se detallan cada una de estas secciones.

Figura 1.

Diagrama de bloques del sistema desarrollado



Interfaz de sensores

Basado primordialmente en el monitoreo de la calidad del agua, esta interfaz presenta siete sensores, incluyendo sensores de turbiedad (TSD-10, General Electric), potencial de hidrógeno o pH (E-201, OEM), Temperatura (DS18B20, Maxim) y total de sólidos disueltos o TDS (Total Dissolved Solids, basado en la sonda de conductividad a dos terminales metálicas) para mediciones de la calidad del agua. La selección de estos sensores está basada en parámetros típicamente relacionados con la calidad del agua y algunas referencias literarias (Strobl, 2008). Complementariamente, el sistema ofrece la capacidad de monitorear la calidad del aire (temperatura, humedad y CO2 equivalente) a través del sensor BME680 (Bosh), sonido (MP34DT05-A, STMicroelectronics) y luminosidad (MAX44009EDT, Maxim). Estos sensores son muestreados en el dominio analógico a través de convertidores digitales (ADCs) integrados o bien digitalmente cuando el sensor lo permite. Todas las señales analógicas fueron condicionadas previamente con diferentes redes amplificadoras.

Procesamiento y comunicaciones

Los sensores anteriormente citados son muestreados usando el System-On-Chip (SoC) NRF52840 de Nordic Semiconductor. El microcontrolador (MCU), basado en una arquitectura Arm Cortex-M4 (64 MHz) permite interactuar, muestrear los diferentes sensores en el dominio digital a través de protocolos SPI/I2C/UART (o USB para actualizaciones o debug) y analógico a través de convertidores ADC y realizar el procesamiento digital de las señales para su transmisión, de ser requerido. (Semiconductor, 2019).

Adicionalmente, el SoC cuenta con un Bluetooth 5 (BLE) stack flexible y de bajo consumo energético, que permite su uso en aplicaciones mesh, esenciales en este tipo de aplicaciones. El consumo de energía de la radio es de 15,9 mW/16,2 mW (1 Mbps@0dBm) en recepción y transmisión, respectivamente. Su consumo puede reducirse hasta 4.5 uW con el sleep. El consumo de energía se puede reducir hasta 2,1 uW cuando el sistema completo está en modo de suspensión. Debido a estas prestaciones, este MCU se sitúa en el centro del sistema, actuando como agente de todos los módulos del sistema.

Extendiendo las capacidades de comunicación, el sistema integra, junto al NRF52840, el nrf9160 (Nordic Semi, Arm Cortex-M33) que sirve como interfaz celular (LTE IoT) para el envío de datos a la nube. Los datos a ser recibidos o transmitidos son canalizados usando una interfaz UART común entre ambos microcontroladores.

Finalmente, este subsistema integra un slot de memoria SD (conectada el NRF52840 a través de una interfaz SPI), lo que permite almacenar datos temporalmente.

Power Management

Este subsistema proporciona la energía requerida para la operación correcta del sistema. En su centro se encuentra el BQ25570RGRT (Texas Instrument), administrando el suministro de energía, la carga de la batería y la recolección de energía (Harvesting Solar). El circuito integrado (IC) implementa el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) para maximizar la eficiencia de conversión de energía para todas las condiciones de iluminación. Conectado a un panel solar de 5x5cm, la energía recolectada se utiliza para recargar una batería de 1000mAh. El IC también proporciona un buck converter de alta eficiencia que genera los 3V necesarios para suministrar las partes digitales de la placa/sensores.

Implementación del sistema en circuito impreso (Printed Circuit Board, PCB).

Figura 2.

Circuito impreso con elementos electrónicos insertados y soldados.



El sistema introducido previamente es integrado en un circuito impreso con una dimensión de 5.1x5.1. Fig. 2 presenta la placa PCB con los elementos electrónicos montados y soldados. El PCB está constituido por 4 capas, en donde la superior e inferior contienen los elementos electrónicos y las intermedias, señales y pistas de energía. Para reducir interferencias en las señales analógicas debido a las señales de alta velocidad de los dispositivos analógicos, dos planos de masa separados son utilizados. Durante el diseño del PCB, numerosos pads y pines de debug son incorporados. Para permitir el test selectivo del prototipo, el sistema cuenta con diferentes jumpers que permiten activar secciones específicas del sistema, ayudando al proceso de debugging. Finalmente, se han tenido consideraciones especiales con el ruteo de pistas dedicadas a antenas (BLE y LTE). Los elementos electrónicos son en su mayoría de montaje superficial, lo que permite obtener un diseño a dimensiones reducidas.

Validación del sistema.

El sistema es validado utilizando pruebas dinámicas, permitiendo corroborar el correcto funcionamiento de todo el conjunto. Las pruebas iniciales son de tipo eléctrico, permitiendo eliminar potenciales problemas de fabricación. Posteriormente, los diferentes módulos son validados. La interfaz de sensores es validada utilizando sistemas de referencias comerciales. Específicamente:

- **pH:** comparadas con el sistema Gravity: Analog pH Sensor/Meter Kit V2, medidos a un pH fijo (~7) por un periodo de 10 minutos.
- **Temperatura (agua):** comparadas con el sistema DS18B20 (AZ-DELIVERY), medidos a una temperatura de 25 grados centígrados por un periodo de 10 minutos. (Maxim integrated, 2019)

- **Turbidez:** comparadas con el sistema SEN0186 (DFRobot), medidos a una unidad nefelométrica (NTU) fija menor a 1 NTU, por un periodo de 10 minutos.
- **Sólidos disueltos:** comparadas con el sistema TDS meter v1.0 (KeyStudio), a una cantidad de partes por millón fija (~50-150 ppm) por un periodo de 10 minutos. (TDS Meter V1.0, 2020)
- **Temperatura, presión y CO2 equivalente del aire:** Comparados con el dispositivo BME680 (TecnoIoT) a condiciones atmosféricas presentes al momento del experimento por un periodo de 10 minutos. El CO2 equivalente ha sido excluido de las mediciones. (BME680,2017)
- **Luminosidad:** comparados con un sensor integrado a un teléfono móvil (onePlus Nord) en condiciones de oficina.

El micrófono no ha sido comparado con otro sensor, pero su funcionalidad ha sido corroborada adquiriendo diferentes muestras de audio.

La interfaz de procesamiento y comunicación es validada enviando datos adquiridos desde los sensores a través de las interfaces de comunicación y almacenamiento disponibles (BLE, LTE/3G, SD CARD). Los resultados son reportados en Mb por segundo por cada medio de transmisión de datos.

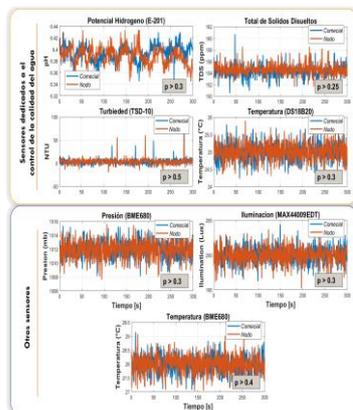
Finalmente, el sistema de *energy harvesting* es evaluado y el consumo de sistema (en mW) y duración de la batería en una configuración determinada es presentado.

Resultados

Performance de sensores

Figura 3.

Datos adquiridos durante la validación del sistema, denotando un similar funcionamiento entre el sistema presentado y los de referencia (comerciales).



Los resultados obtenidos utilizando la metodología presentada anteriormente son presentados en la Fig. 3, en donde por cada figura se observa que los datos obtenidos por el nodo sensor y los sistemas comerciales especificados en la sección de materiales y métodos son similares. Una comprobación ANOVA denota un valor $p > 0.25$ (mínimo) en todos los casos.

Performance del sistema de procesamiento y comunicación.

Tabla 1.

Throughput de los diferentes mecanismos de comunicación y almacenamiento.

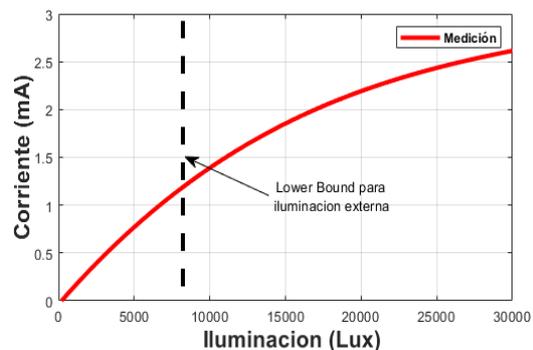
	BLE	NB-IOT/3G	SD Card
Resultado	~700 kbps	~ 300 kbps/85 kbps	~ 400 kbps

Los resultados obtenidos durante las pruebas de velocidad (throughput) se encuentran resumidos en la Tabla 1. La comunicación BLE fue ejecutada utilizando un módulo auxiliar (NRF52840DK) con conectividad USB. Los resultados relacionados a la comunicación con redes celulares incluyen inicialmente resultados para NB-IoT. Adicionalmente, resultados para redes 3G son incluidos, realizados con un módulo externo. Finalmente, los resultados para el almacenamiento de datos son reportados utilizando una tarjeta SD convencional (SandDisk 64Gb). Todos los resultados están en línea con hojas de datos de los fabricantes y experimentos previamente efectuados en literatura.

Consumo de energía y harvesting:

Figura 4.

Corriente generada por el panel solar y el subsistema de energy harvesting presente en el nodo sensor.



Las capacidades de recolección de energía han sido medidas a través la corriente aplicada por el

subsistema EH a la batería en diferentes iluminaciones utilizando un analizador de corriente digital. El panel solar, que posee la misma huella que el sistema integrado (~5 x 5 cm), como reportado en la Fig. 4, bajo iluminación interior happrox 600 lux, genera una corriente de alrededor de 80 uA. La corriente generada se incrementa significativamente en entornos con mayor iluminación (típicos de exteriores), donde el panel solar puede generar hasta 2,5 mA. Considerando un budget energético conservativo de 1mA (~3 mW) y tomando en cuenta que el sistema completo en una configuración de sampling diluido (muestra cada 10 min con un consumo de 0.8mW), el sistema puede funcionar ininterrumpidamente. Con una batería completamente llena, el sistema puede funcionar ininterrumpidamente por 1500 horas, lo que genera margen suficiente para un funcionamiento continuo incluyendo situaciones de poca luz extendida por varios días.

Discusión

Como ha sido demostrado en la sección de resultados, el nodo sensor se desempeña en márgenes similares a dispositivos de referencia. Igualmente, el consumo de energía total del dispositivo, junto con la capacidad de realizar *energy harvesting* permite una operación ininterrumpida bajo ciertas condiciones de funcionamiento (sampling diluido), lo cual permite al sistema ser instalado en locaciones remotas, en donde los datos adquiridos pueden ser transmitidos remotamente a través de dos sistemas de comunicación (BLE, LTE/3G) o bien almacenados localmente para su recolección posterior. Estas características (comunicación y consumo) junto a su reducida dimensión permiten al nodo sensor, en principio, sobrepasar las capacidades de otros dispositivos presentes en la literatura (O'Flynn et al, 2007), (Chen et al, 2018) y ser apto para su despliegue en masa en diferentes condiciones ambientales para el monitoreo de la calidad del agua.

Sin embargo, es necesario realizar test y pruebas de campo para determinar los límites del sistema. Adicionalmente, es de gran interés agregar otros sensores al sistema (Ej., Oxígeno y CO2 disuelto), que permiten extraer mayor información del entorno para una evaluación más completa. Otros temas como la integración en la nube de los datos transmitidos y el desarrollo de una arquitectura mesh de comunicación intra nodo serán los temas a ser desarrollados en un trabajo futuro.

Conclusiones

Esta investigación ha abordado el problema del monitoreo continuo de la calidad del agua a través del desarrollo de un nodo sensor que permite la recolección de diferentes parámetros del agua. El sistema no solamente presenta una dimensión que permite su eventual despliegue en ambientes hostiles, pero también es energéticamente eficiente. Con este desarrollo, hemos dado el primer paso para una rápida detección de la calidad de los afluentes y su entorno.

Referencia Bibliográfica

Chen, Y., & Han, D. (2018). *Water quality monitoring in smart city: A pilot project. Automation in Construction*, 89, 307-316.

Le Dinh, T., Hu, W., Sikka, P., Corke, P., Overs, L., & Brosnan, S. (2007, October). *Design and deployment of a remote robust sensor network: Experiences from an outdoor water quality monitoring network. In the 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN 2007)* (pp. 799-806). IEEE.

O'Flynn, B., Martínez-Català, R., Harte, S., O'Mathuna, C., Cleary, J., Slater, C., ... & Murphy, H. (2007, October). *SmartCoast: a wireless sensor network for water quality monitoring. In 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN 2007)* (pp. 815-816). Ieee.

Pule, M., Yahya, A., & Chuma, J. (2017). *Wireless sensor networks: A survey on monitoring water quality. Journal of applied research and technology*, 15(6), 562-570.

Strobl, R. O., & Robillard, P. D. (2008). *Network design for water quality monitoring of surface freshwaters: A review. Journal of environmental management*, 87(4), 639-648.

Semiconductor, N. (2019). nrf52840 dk. *Nordic Semiconductor*.

Nordic Semiconductor (2019). nrf9160 dk. *Nordic Semiconductor*.

DS18B20: Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer (2019). Recuperado el 26 noviembre de 2021 de <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>

BME680: Low power gas, pressure, temperature & humidity sensor (2017). Recuperado el 26 de noviembre de 2021 de

<https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3660/BME680.pdf>

KS0429 keyestudio TDS Meter V1.0 (2020)
Recuperado el 26 noviembre de 2021
https://wiki.keyestudio.com/KS0429_keyestudio_TDS_Meter_V1.04