

Sistema de monitorización basado en una red de sensores Inalámbrica (WSN) implementada con software y hardware libre

Renato José Manzo¹, Emiliano López¹, Guillermo Contini¹, Carlos Vionnet^{1,2} y Dario Villarreal¹

¹ Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral. RN 168 - KM 472.4. (3000) Santa Fe. Argentina

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad Nacional del Litoral, Ciudad Universitaria, Paraje El Pozo, (3000) Santa Fe, Argentina

Resumen La medición de variables agroclimáticas es indispensable para comprender un fenómeno o proceso particular. Mantener registros periódicos con una buena resolución espacial demanda una considerable inversión en equipamiento comercial, generalmente de acotada flexibilidad para adaptarse a diferentes escenarios. El rápido avance de tecnologías emergentes han permitido el acceso a numerosos componentes electrónicos compatibles con plataformas de hardware libre como Arduino, cuyas especificaciones y software para su programación son de libre disponibilidad para su uso y modificación. Sensores variados y la plataforma de desarrollo Arduino fueron usados para diseñar un sistema de monitorización basado en una red de sensores inalámbrica - mejor conocidas por sus siglas Wireless Sensor Network WSN - implementada íntegramente con hardware y software libre, con capacidades de almacenamiento y transmisión para su uso en proyectos relacionados con la agricultura y los recursos naturales. En el estudio actual se presentan resultados finales obtenidos en pruebas de laboratorio y campo donde se evaluaron sensores y componentes que dieron cuenta de su factibilidad en el desarrollo de una estación de monitorización.

Keywords: Hardware Libre, Arduino, WSN, IoT

1. Introducción

Las mediciones de variables como humedad y temperatura de suelo a diferentes profundidades, nivel freático, precipitación, humedad y temperatura ambiente -entre otras- son de gran valor en el análisis de problemas hidro-ambientales donde generalmente son utilizadas para alimentar modelos de simulación, hacer análisis estadísticos, estimar parámetros y contrastar o validar modelos.

Si bien la monitorización continua y a largo plazo permite estudiar diversos problemas hidro-ambientales mejorando la comprensión sobre su dinámica puntual es necesario contar con una buena resolución espacial para aquellos fenómenos de escala regional. Ya sea para caracterizar el estado de humedad en

un determinado lote o para conocer el riesgo hídrico de una determinada región, es necesario contar con varios puntos de observación automáticos que finalmente terminan conformando una red de sensores.

Contar con un registro a una gran resolución espacial utilizando estaciones convencionales se hace difícil de afrontar por su excesivo costo, principalmente por los enlaces de transmisión inalámbricos requeridos en cada punto de observación. Una alternativa a esta dificultad es la implementación de una Red de Sensores Inalámbricos (WSN por sus siglas en inglés) bajo la plataforma de hardware libre Arduino [13].

En la actualidad, las WSN son destacadas como una de las tecnologías más prometedoras [16]. Ofrece una valiosa alternativa de solución a problemas donde es imperioso contar con redes de comunicación flexibles, con cualidades de auto-configuración, de bajo consumo y sin depender de una estructura física. No obstante, la principal motivación de su uso radica en sustituir y/o complementar equipamiento de elevada complejidad, costoso y escaso en número, por una red de pequeños dispositivos que no solo cumplen la tarea de relevar las magnitudes físicas, sino que presentan la ventaja de ser ellos mismos elementos de la propia infraestructura.

El movimiento IoT o por sus siglas en inglés Internet of Things (Internet de las cosas) es un concepto tecnológico que refiere a la interconexión de objetos cotidianos con Internet. Con el advenimiento del movimiento y gracias a la miniaturización de las computadoras y el abaratamiento en la construcción de sensores fue desarrollándose en los últimos 10 años la idea de lo que hoy conocemos como las WSN.

Aunque no se sabe a ciencia cierta el origen de las WSN, como la mayoría de los avances tecnológicos su existencia tiene un origen militar. En los años 1950 y en plena guerra fría, los militares de Estados Unidos construyeron el sistema Sound Surveillance System (SOSUS) utilizando sensores subacuáticos para la detección sonora de los submarinos soviéticos. Este fue el primer prototipo de lo que hoy conocemos como WSN y sigue aún en uso pero para fines pacíficos como el reconocimiento de fauna marina y actividad volcánica³.

Durante la década de los 80', y gracias al desarrollo en los años 60' y 70' de lo que conocemos hoy como Internet, el gobierno de los Estados Unidos mediante la agencia United States Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) comenzó con el programa Distributed Sensor Network (DSN) con el objeto de promover el desarrollo y exploración científico en la implementación de las redes distribuidas.

En conjunto con el nacimiento de las DSN, universidades como Carnegie Mellon University y el Massachusetts Institute of Technology Lincoln Labs, ayudaron a que este concepto tenga una rápida inserción en principales centros de investigación del mundo y en las empresas tecnológicas. Hoy día este concepto se conoce como redes de sensores inalámbricas o por sus siglas en inglés WSN.

³ <https://www.silabs.com/documents/public/white-papers/evolution-of-wireless-sensor-networks.pdf>

Gracias al abaratamiento tecnológico y al impulso como parte del movimiento IoT, las WSN han logrado expandir el abanico de aplicaciones en un amplio espectro. Se pueden mencionar desde sistemas de automoción, aplicaciones industriales, aviónica [10], entornos inteligentes, identificación y transporte de productos [5], domótica y seguridad [3], control de consumo energético, estudio de invernaderos [6], monitorización del medio ambiente [12,11], y un sinfín de nuevas aplicaciones [15,7].

Dentro de este universo, podemos mencionar la existencia desde hace ya un par de años de empresas dedicadas exclusivamente al desarrollo de WSN como Libelium⁴, MicaZ⁵ y/o otro jugador fuerte de la industria como Spectrum Tec.⁶, con más de 30 años de experiencia en la medición de variables hidro-ambientales; entre otros. Por otra parte, también podemos mencionar la existencia de empresas como SeeedStudio⁷ e Industrial Shields⁸ que apuestan a la construcción de redes utilizando como base plataformas de hardware de código abierto.

En el caso particular de las ciencias de la tierra podemos mencionar la existencia de trabajos orientados en el mismo sentido que el presente trabajo. Tal es el caso del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) donde han instrumentado gran parte de la cuenca del Río Christina utilizando como plataforma de hardware libre Arduino [17].

El Stroud Water Research Center de Pennsylvania, ha desarrollado diversos equipos y WSN sobre la misma Cuenca, donde integraron una diversa cantidad de sensores comerciales (calidad de agua, humedad, presión, etc.) con plataformas Arduino, justificado en que el ahorro económico ha dado como resultado una mejora significativa en la resolución espacial de las mediciones[9]. Así mismo, en otros trabajos del USDA [8] se han desarrollado sistemas de sensado de bajo costo para registrar la fluctuación de niveles de agua utilizando dataloggers basados en Arduino.

En todos los trabajos previamente mencionados se han utilizado plataformas Arduino como placas principales para el diseño de dataloggers basados en memorias SD. Otro trabajo de tenor similar es el desarrollado por el Institute of Arctic and Alpine Research [1], un datalogger de bajo costo, bajo consumo energético para registrar variables en el Observatorio del Delta del Lago Wax, sitio de estudio para la restauración del Delta del Río Mississippi.

Para la implementación de las WSN se requieren principalmente de dos componentes de infraestructura, tecnología de comunicación inalámbrica y una plataforma de hardware para el montaje y desarrollo de la red.

Dentro de las tecnologías de comunicación inalámbrica las más utilizadas para la implementación de WSN [4] se basan principalmente en los protocolos ZigBee, NRF24l01+, NF433, Bluetooth, Wibree y WiFi, entre otras. Todas tec-

⁴ <http://www.libelium.com/>

⁵ <http://www.cmt-gmbh.de/Produkte/MICA2DevelopersKit.html>

⁶ <https://www.specmeters.com/weather-monitoring/weather-stations/retriever-and-pups/watchdog-pup/>

⁷ <https://www.seeedstudio.com/>

⁸ <https://www.industrialshields.com/es/>

nologías que operan sobre la base de las bandas no licenciadas y de uso libre. Dependiendo de la necesidad de la aplicación varía su uso, pero las más mencionadas y utilizadas en el ámbito de la investigación para la implementación de WSN son ZigBee y NRF24l01+.

Las plataformas de hardware más reconocidas y utilizadas para el desarrollo de dispositivos de medición son Raspberry Pi, Arduino y BeagleBone Pi [14]. De las tres plataformas, Arduino suele ser la alternativa preferida y se debe principalmente a que es una plataforma de hardware y software libre, basada en una placa microcontroladora y con un entorno de desarrollo diseñado para facilitar la electrónica en proyectos multidisciplinares. Su costo y consumo es comparativamente menor que las otras lo que la convierte en la plataforma ideal para el desarrollo de las WSN.

El objetivo de la presente comunicación es mostrar una versión final y en funcionamiento de un sistema de monitorización basado en una red de sensores inalámbricas, la cual fue diseñada para el desarrollo de actividades de investigación del Centro de Estudios HidroAmbientales (CENEHA).

2. Materiales y Métodos

2.1. Arquitectura del Sistema

El diseño del sistema fue pensado teniendo en cuenta tres actores: La WSN, donde se miden, almacenan y transmiten las magnitudes físicas del entorno; el servidor web / base de datos, donde se almacena la información recibida y el usuario, quien mediante la aplicación web accede para visualizar y administrar remotamente a la WSN. En la Figura 1 se representa el sistema básico, siendo Internet el nexo de comunicación entre los tres conjuntos.

2.2. Diseño de nodos

La WSN se compone de tres tipos de elementos/nodos (Fig. 1 (abajo e izq.)): *Coordinador*, *Router* y *Hoja*. Los nombres provienen del rol que ejercen en el sistema y permiten vincular a cada dispositivo con las tareas que llevan a cabo dentro de la red. Los tres se vinculan e interactúan entre sí mediante comunicación inalámbrica enviándose paquetes con contenido y siendo el último destino el nodo Coordinador.

Tanto el nodo Router como el nodo Hoja miden magnitudes físicas diferenciándose en una única tarea, el reenvío. El nodo Hoja solo envía su información relevada mientras que el nodo Router tiene la capacidad de recibir los paquetes de sus hijos (nodos Hoja) y reenviarlos hacia el Coordinador o bien hacia otro nodo Router. Finalmente, el rol del nodo Coordinador es concentrar la información de la red y enviar a través de Internet los datos hacia el Servidor web.

Teniendo como base a trabajos precedentes del CENEHA[?], era relevante para un correcto diseño e implementación de la WSN que nuestros nodos de la red cumplan con las siguientes características:

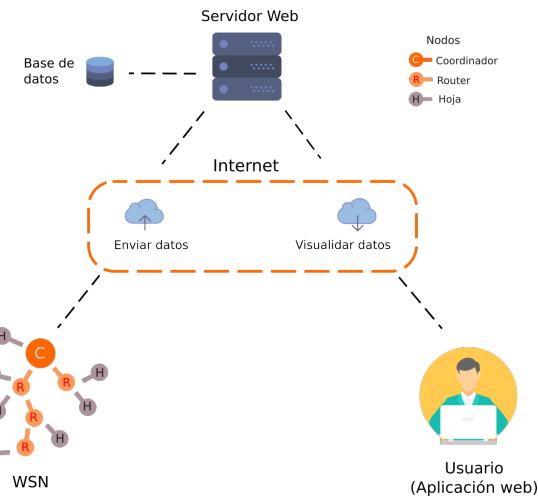


Figura 1. Sistema general propuesto

- Sensar: medir las magnitudes físicas de su entorno
- Almacenar: guardar datos localmente y externamente
- Transmitir: comunicarse con otros nodos en forma inalámbrica

Utilizando un concepto modular se diseñaron y construyeron dos tipos de shield (cascos), por un lado el Datalogger Shield para guardar la información y por otro lado el Wireless Shield para la comunicación inalámbrica. Estos shield fueron luego los utilizados para la implementación de nuestra WSN.

Datalogger Shield. Sensar una magnitud física y almacenarla junto a información cronológica son dos tareas fundamentales para el análisis de un determinado fenómeno. Partiendo de esta importante premisa, se pensó y diseñó el Datalogger Shield como unidad mínima para cualquier proyecto, utilizando para ello tres componentes básicos:

- Arduino Pro Mini
- Clock DS3231
- Catalex Micro SD

Para el diseño del prototipo del Datalogger Shield (Figura 2 der.) se utilizaron estos tres componentes manteniendo las dimensiones y disposición de los pines de Arduino UNO.

La placa Pro Mini tiene la misma cantidad de conexiones que la placa Arduino UNO, de modo tal que se mapearon los pines del Pro Mini al del Arduino UNO. De esta manera, no solo se logra una mejor manipulación de la placa sino que nos permite a futuro poder utilizar cualquier shield comercial para Arduino UNO junto a nuestro Datalogger Shield.

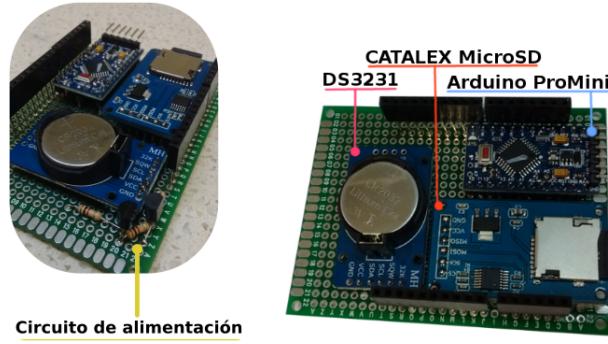


Figura 2. Datalogger shield - Componentes y circuito de corte

Uno de los aspectos más importantes que se desprenden de la realización del trabajo fue la optimización en la alimentación de los componentes físicos. Para obtener valores de consumos realmente bajos, se tuvo que diseñar un circuito de alimentación [Figura 2 der.] individual por cada módulo de modo tal que se le corta el suministro de energía cuando este componente no es utilizado. A su vez, se tuvo que realizar una pequeña modificación sobre la placa ProMini, cortando para ello los led de notificación y logrando así finalmente una placa base con un consumo realmente bajo.

Wireless Shield. Siguiendo el diseño tipo Arduino UNO del Datalogger Shield, planteamos el desarrolló del Wireless Shield con dos finalidades: pruebas y uso futuro de las tecnologías inalámbricas Rf433, ESP8266 y/o NRF24l01+. A su vez, el diseño del shield debía contemplar la utilización de cada tecnología individualmente y/o en simultáneo (Figura 3 izq.).

Al igual que el Datalogger Shield, el Wireless Shield dispone de un circuito de alimentación pero asociado a otro pin digital. Por defecto el switch de corte esta en baja y solo cuando se requiere del uso del shield se activa por software.

Además del circuito de alimentación, se incorporó al sistema un regulador de 3.3V⁹ para la alimentación de las placas ESP8266 y NRF24l01+. Ninguna de las dos soporta tensiones de trabajo por encima de los 3.3V.

2.3. Variables Registradas

Humedad y Temperatura Ambiente. Se utilizó el sensor digital DHT22. Mide valores de humedad entre 0 y 100 % con una precisión de 2 % y un rango de valores de temperatura entre -40°C y 80°C con +/- 0.5°C de precisión. El intervalo mínimo entre muestras es de 2 segundos [2].

⁹ AMS1117 - 1A Low Dropout Voltage regulator <http://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf>

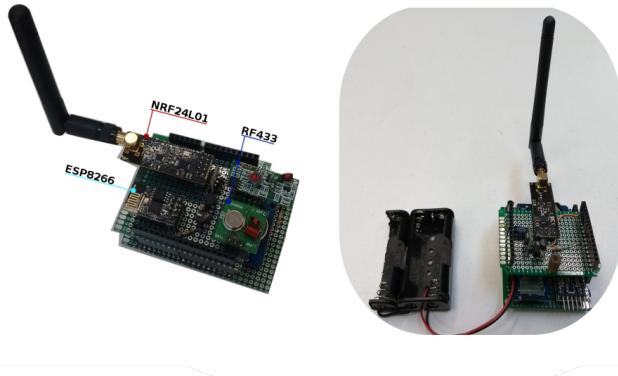


Figura 3. Wireless shield (izq.) y Wireless Shield (solo NRLF2401+) sobre datalogger shield (der).

Presión atmosférica. Se utilizó el sensor digital BMP183¹⁰ cuyo rango de medición es de 300 a 1100 hPa, contiene además un sensor de temperatura, utiliza el protocolo SPI para su comunicación y tiene un bajo consumo por lo que es ideal para integrar la estación de medición.

Tensión. Para saber el estado de carga de las baterías se incorporo al Datalogger Shield un divisor de tensión para la medición de la tensión de entrada al sistema. Conociendo el valor de las resistencias y de la tensión base (regulador interno), se puede estimar el valor de entrada. Este pequeño circuito es fundamental para conocer el estado de salud de las baterías y en función del valor de entrada determinar o no el cambio de las mismas.

2.4. Implementación de WSN

Teniendo ya todos los componentes necesarios para armar la red física, lo único que restaba para la construcción de los nodos era la definición de la fuente de alimentación y una caja contenedora que soportara diversas condiciones ambientales.

Para su protección elegimos las cajas estanco de PVC marca Roker de 10x10 cm. Están especialmente diseñadas para las condiciones exteriores, previniendo la humedad y el ingreso de agua en su interior. Son fáciles de conseguir en ferreterías o casas de iluminación.

En el caso de la alimentación se decidió utilizar tres pilas AA alcalinas en serie. De este modo se logra obtener una tensión de 4.5V y una carga eléctrica total aproximada de 2000 mAh.

Para la implementación de la red construimos dos tipos de dispositivos: el nodo Coordinar y el nodo Router/Hoja.

¹⁰ BMP183 datasheet: <http://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Bosch/BMP183.pdf>

Nodo Coordinador. El nodo Coordinador es el responsable de definir las directivas de la red y de transmitir la información colectada hacia internet. En la WSN solo se dispone de un único dispositivo con este rol y su implementación fue desarrollada utilizando un Datalogger Shield y el Wireless Shield.

En la Figura 3 izq. se observa el prototipo final del nodo Coordinador pero siendo solo las tecnologías inalámbricas NRF24l01+ y ESP8266 las utilizadas en la construcción final. Una para la comunicación interna con los nodos de la red mediante la placa NRF24l01+, de comunicación bidireccional semiduplex, es decir, envía o recibe información y con una distancia máxima de referencia de 1 km. Por otra parte el acceso a Internet se realizó mediante la placa ESP8266 (conexión WiFi), en su versión ESP-01 y con una distancia promedio de cobertura de 50 mts.

Nodo Router/Hoja. El nodo Router/Hoja fue desarrollado utilizando un Datalogger Shield y el NRF24l01+ Shield. La diferencia entre los Nodo Router y Hoja es el rol que ocupan en la red, es decir, el hardware es exactamente el mismo, solamente cambia su software. El nodo Hoja se encarga de medir las variables de los diferentes sensores y el Router de retransmitir hacia el nodo Coordinador. En la Figura 3 der. se puede apreciar la versión final del prototipo ensamblado.

Funcionamiento de la red. Una de las cualidades buscadas en el diseño de una estación de medición es su autonomía. Para lograrla no solo basta con disminuir el consumo energético mediante hardware. El microcontrolador que utiliza tanto la placa Arduino UNO como la ProMini (ATmega328P) soporta un modo de trabajo de bajo consumo por software. Este modo de trabajo lleva al Arduino a un estado de suspensión que puede ser desactivado mediante una interrupción externa o después de un tiempo determinado. Esta última es la que se utilizó permitiendo su modificación al usuario de manera remota.

Para lograr una comunicación entre los diferentes nodos se tuvo que desarrollar un algoritmo que contemplara el modo de trabajo de bajo consumo y el envío de información entre las partes. Para esto se diseñó un algoritmo de sincronización que nos permitiría contemplar estas dos operaciones, enviar información desde los nodos Router/Hoja hacia el Coordinador y viceversa, del Coordinador hacia los nodos. Una vez enviado los datos, la red completa pasaba al modo de trabajo de bajo consumo y así repetitivamente. La dificultad se presentó con el modo que tiene de trabajar el ProMini, ya que al no poseer un reloj los nodos se reactivaban pero desfajados. De modo tal que en el diseño se contempló una ventana de trabajo de reconocimiento logrando así una sincronización entre los diferentes nodos de la red.

2.5. Aplicación Web

El nodo Coordinador envía sus datos a un sistema web alojado en un servidor. El desarrollo del sistema fue incremental basado en el modelo de prototipos. La

aplicación, que actualmente corre sobre la plataforma Heroku¹¹, fue desarrollada en lenguaje Python utilizando el framework Django¹².

El desarrollo del sistema contempla una doble funcionalidad, es una interfaz gráfica para visualizar y descargar los datos (Fig. 4) en formato estándar CSV y/o PDF y, proveer una API REST (del inglés Application Programming Interface) para que el nodo Coordinador se pueda comunicarse y enviar sus registros hacia el servidor.

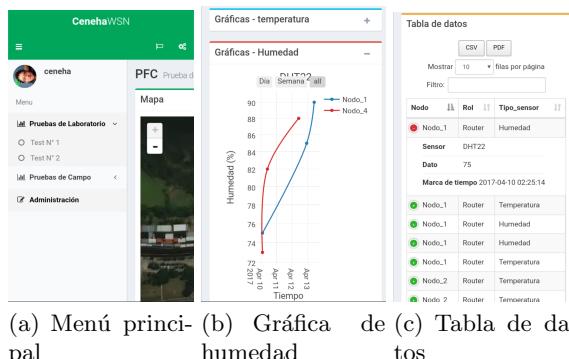


Figura 4. visualización del sistema web (versión móvil)

3. Resultados y Discusión

La evaluación del sistema en su conjunto fue basado en el estándar IEEE829¹³, norma que especifica la forma en que se documentan las pruebas de software y sistemas. Conjuntamente, se presentan los resultados y se plantean las discusiones en torno a los valores obtenidos.

Las componentes establecidas por el estándar para el plan de prueba son:

- Alcance: define los tipos y lugares de pruebas.
- Elementos a probar: indicando los componentes del sistema que serán probado.
- Enfoque: indicando las técnicas y patrones de prueba.

Alcance: Se establecieron dos etapas de pruebas. Por un lado las pruebas de laboratorio realizada dentro de las instalaciones del CENEHA y por otro lado las pruebas de campo, realizadas en el exterior del predio de la Universidad y con el sistema sometido a condiciones ambientales reales.

¹¹ Cloud Application Platform: www.heroku.com

¹² <https://www.djangoproject.com/>

¹³ <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=5983351>

Elementos a probar: En las dos etapas se probaron los shield Datalogger y Wireless, los sensores DHT22 y BMP183, la fuente de alimentación por cada tipo de nodo, la aplicación y el servidor web. En ellos se evaluó la transmisión entre nodos, la comunicación e interacción con el servicio web y el consumo de energía de cada dispositivo. Las pruebas fueron realizadas solo sobre la implementación del servidor local.

Enfoque: Se realizaron pruebas funcionales e individuales por cada tipo de nodo a distintos intervalos de tiempo y sobre el sistema web. Posteriormente, se realizaron las pruebas a distintos intervalos pero sobre el sistema en su conjunto.

Es importante aclarar que las pruebas realizadas a continuación se diseñaron con el objetivo de conocer las limitaciones del sistema. La frecuencia de muestreo con el que se realizan las mismas están por encima del sistema real esperado.

Una frecuencia de muestreo esperable para variables como humedad / temperatura es del orden de las 4 a 6 horas. Esto implicaría extender el tiempo de las pruebas por un período mayor al proyectado.

3.1. Pruebas de laboratorio

Teniendo en cuenta el estándar se diseñador dos pruebas. La primera prueba consistía en el estudio de un sistema básico con un nodo Coordinador y otros dos nodos Router/Hoja [Fig. 5 (a)] enviando datos y la segunda prueba corresponde al sistema completo con un total de cinco nodos y una topología de red de tipo estrella [Fig. 5 (b)]. Ambas pruebas integran el sistema de extremo a extremo, es decir, tanto la red como la aplicación web se prueban en simultáneo. En ambos casos, la red no contempla capacidad de auto configuración. Si un nodo critico del sistema, como por Ej. Router, deja de funcionar los nodos hojas no pueden reenviar sus datos hacia otro nodo Router.

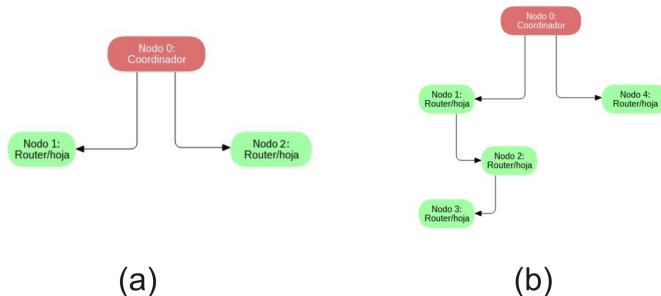


Figura 5. Pruebas - topologías de red

La primer prueba fue realizada durante 24 horas con una frecuencia de muestreo intensiva. El sistema completo dormía un minuto, luego volvía a activarse, sensar y enviar los datos hacia el nodo Coordinador, para que este finalmente los retransmitiera hacia Internet.

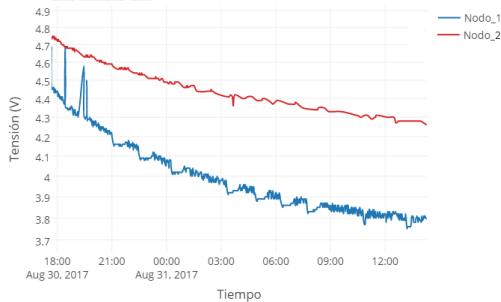


Figura 6. Prueba de Laboratorio Nº 1 - Gráfica de tensión (V)

De dicha prueba se logró establecer un correcto comportamiento del sistema. Los datos llegaban correctamente al servidor, la visualización en el sistema web era correcta aunque apreciándose ciertos inconvenientes.

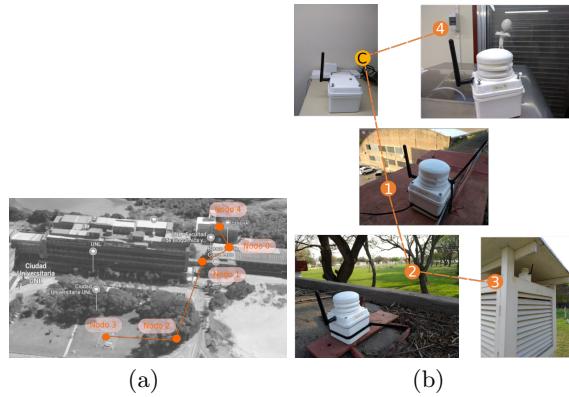
En la Figura 6 se aprecia como la tensión de las baterías se reducía drásticamente como consecuencia del consumo. Si observamos el Nodo-1 este presenta serruchos (discontinuidades) consecuentes del proceso de sincronización constante y la frecuencia de muestreo. el Nodo pasaba más tiempo sincronizándose que enviando datos. Por otra parte, dado que el nodo Coordinador suma otro elemento de transmisión su consumo era aún más alto, logrando así una autonomía muy baja de 24 hrs.

Ya con una topología de red más completa, la segunda prueba no se realizó de forma intensiva. Los nodos se activaban cada 15 minutos para cumplir con sus tareas y luego volvían a dormir. Por otro parte, para evitar los inconvenientes de sincronización detectados en la prueba Nº1 decidimos modificar el esquema de trabajo. El nodo Coordinador pasa a tener un rol activo, es decir, todo el tiempo espera paquetes y solo los nodos Router/Hoja son los que duermen luego de cumplir con sus tareas.

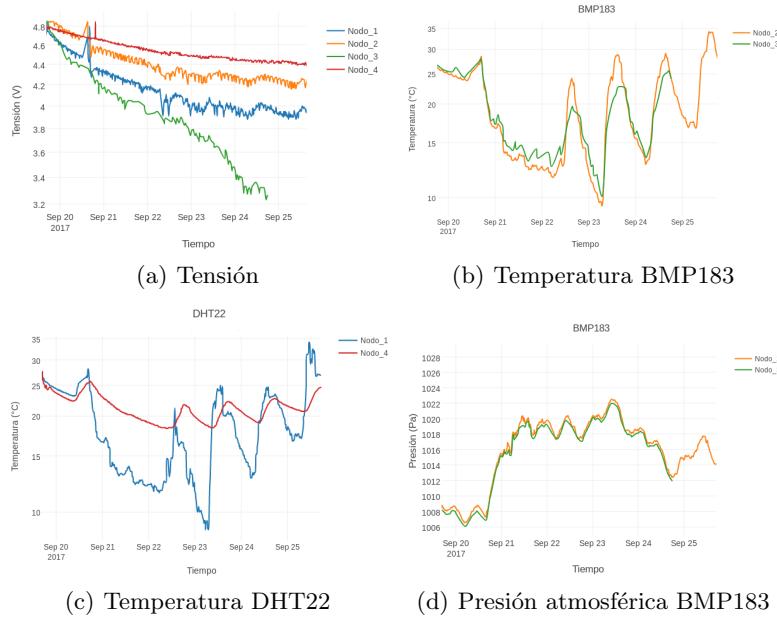
Los resultados obtenidos fueron satisfactorios. El múltiple-salto entre nodos funcionó correctamente, los datos llegan al servidor y se logró reducir el gasto excesivo en tiempo y energía de los nodos Router/Hoja en el proceso de sincronización pero a costa de depender de una fuente continua de energía para el nodo Coordinador.

3.2. Pruebas de campo

Teniendo como objetivo base replicar la prueba de laboratorio N°2, se estableció como locación de estudio el Campus de la Ciudad Universitaria de la UNL (Fig. 7). Esto nos permitió exponer la WSN a diversas condiciones ambientales pero con el resguardo y control cercano ante cualquier inconveniente. Los intervalos de actividad también quedaron configurados cada 15 minutos. Es decir, cada 15 minutos cada nodo Router/Hoja se enciende por un periodo determinado, calcula las variables mediante sus sensores, envía los datos al Coordinador y luego de un tiempo vuelve a dormir. Siempre respetando la topología de árbol.

**Figura 7.** Prueba de campo - Despliegue de red

A diferencia de las pruebas de laboratorio, el objetivo fue probar la robustez del sistema y estimar la autonomía de la red. Por ello, se estableció el uso activo de la red por un período de prueba de dos semanas o bien hasta agotar las baterías. Este factor es fundamental para determinar el futuro uso del sistema en un ámbito real.

**Figura 8.** Prueba de campo - gráficas de resultados obtenidos

si observamos la Figura 8 vemos como la WSN logró mantenerse activa durante un periodo de una semana. No es lo esperado pero este resultado se debe probablemente a problemas eléctricos detectados en el Nodo-1. Esta estimación no es trivial ya que comparativamente el nodo 4, que también es hijo directo del nodo Coordinador, no presenta estos valores de tensión.

Además, si observamos las curvas de temperatura de la Fig. 8 (c) y humedad de la Figura 8 (b) vemos que los valores presentados no son congruentes con el resto de las variables. Presentan saltos y no siguen una lógica como el resto de los valores.

Por otra parte, si observamos las curvas de los nodos 2 y 3 vemos como la tendencia de la descarga de la batería se acrecienta a medida que se incorpora un nuevo salto. Es decir, entre más saltos debe hacer el nodo, más energía consume y se debe principalmente al proceso de sincronización.

Finalmente, los resultados generales en el resto de las gráficas presentes son correctas. Faltaría hacer una comparativa con sensores comerciales para lograr una correcta calibración de las variables.

3.3. Costos del proyecto

Como consecuencia del modelo de trabajo de proyectos Arduino (prueba y error), a lo largo del proceso se afrontamos diferentes costos. Para acotar este análisis se decidió tener en cuenta solo las componentes del prototipo final y no así de todo lo probado y descartado durante el proceso. El costo total de implementar el sistema propuesto fue de \$2737 pesos Argentinos, muy por debajo de los valores de adquisición de un sistema comercial de este tipo.

4. Conclusiones

El propósito del presente trabajo fue el desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo basado en una red de sensores inalámbricos en conjunto con un sistema web para la visualización y administración del sistema.

La WSN implementada constaba de un total de cinco nodos, donde cuatro se utilizaban para medir las variables ambientales que luego retransmitían a un quinto nodo concentrador. Este nodo era el encargado de comunicarse con el servidor web para transferir la información de la red.

El sistema web para visualizar y administrar el sistema en su conjunto fue desarrollada en dos partes. se implementó una API REST para la consulta e inserción de datos desde y hacia la WSN, y por otro lado un sistema que nos permitía visualizar los datos mediante mapas, gráficos y tablas. En el caso de las gráficas la visualización es dinámica, puede definirse un rango de visualización y descargar una versión imprimible. Las tablas también son dinámicas y pueden ser filtradas o/y bien descargados en formatos CSV/PDF para la utilización de los datos generados por la red.

Finalmente, el servidor web donde se alojaba el sistema fue implementado en dos instancias, una local para las pruebas intensivas y otra sobre un servicio

externo para las pruebas preliminares y para la utilización futura del sistema. Se instalaron todos los servicios web y de base de datos necesarios para el correcto despliegue de la aplicación web. Actualmente tanto el servidor local como el externo se encuentran funcionando activamente sin ningún inconveniente.

No obstante, durante el transcurso del trabajo el principal obstáculo que se nos presentó fue la comunicación, siempre relacionado a un problema de alimentación que fue resuelto parcialmente. Los módulos y/o sensores no funcionaban correctamente con la placa Arduino debido a nuestro esquema de construcción de nodos. El proceso es artesanal e implica soldar cada placa, cada componente individualmente para llegar al prototipo final. Esto lo hace un proceso replicable pero difícilmente escalable, ya que se pierde mucho tiempo en ensamblaje y el control final no es garantía de un correcto funcionamiento a futuro.

Otro inconveniente detectado durante el transcurso de las pruebas fue el excesivo consumo. Esto se debe a que las pruebas sobre la WSN fueron pensadas para obtener datos de manera intensiva, cada 15 minutos. Este esquema permite obtener datos de manera muy activa pero a costa de un consumo elevado como consecuencia de la sincronización y la transmisión de la información.

Finalmente y en función de los resultados expuestos, podemos determinar que el uso de este tipo de sistemas para el estudio de variables hidro-ambientales en campo es sin lugar a dudas factible. Se deben realizar modificaciones que permitan mejorar su autonomía, evitando así el recambio de baterías por al menos un par de meses.

5. Trabajos Futuros

Los aspectos más relevantes e implementables a corto/mediano plazo del sistema son los siguientes:

- El funcionamiento actual de la red hace que las baterías de los dispositivos se consuman rápidamente. Hay que cambiar el esquema de funcionamiento de la red por uno más eficiente. Por ej., pensar en sincronizarse y enviar los datos una vez por día y luego dormir el resto del tiempo, incorporar cifrado punto a punto y con el servidor.
- Diseñar el prototipo final de conexión y crear una versión imprimible en PCB. De esta manera se estandariza el proceso, evitando problemas eléctricos y acelerando la construcción de los nodos. A su vez, se debería incorporar la tecnología GPRS (GSM) permitiendo así desplegar la WSN en lugares remotos sin acceso WiFi.
- Cambiar la actual fuente de alimentación (pilas AA) por baterías de iones de litio (Li-Ion) e incorporar la posibilidad de recarga por paneles solares, mejorando así la potencia total del sistema y permitiendo una autonomía a largo plazo.
- Actualmente, el nodo Coordinador se encuentra acotado de funcionalidades por falta de espacio en el sketch. Se podría cambiar el actual microcontrolador por un Arduino Mega 2560. Tiene 7 veces más espacio que el actual

microcontrolador. Esto nos permitiría incorporar la posibilidad de cambiar el comportamiento de la WSN remotamente.

Referencias

1. A., W.: The alog: Inexpensive, open-source, automated data collection in the field. *Bulletin of the Ecological Society of America* 95(2), 166–176 (2014)
2. Adafruit: DHT22 Temperature - Humidity sensor + extras. <http://www.adafruit.com/product/385> (2014), online; último acceso 2014-11-28
3. B., V., K., P., S., V., D., N., S., A.: Wsn application for crop protection to divert animal intrusions in the agricultural land. *Computers and Electronics in Agriculture* 133, 88–96 (2016)
4. Boukerche, A.: Algorithms and protocols for wireless sensor networks. wiley sons, new jersey, usa (2009)
5. D., W.A.: The alog: Inexpensive, open-source, automated data collection in the field. *Bulletin of the Ecological Society of America* 95(02), 68–78 (2014)
6. E., F., V.M., B., D., C., P., L., Iglesias J., C.J.: Wireless sensor mote for snail pest detection. *Sensors* (2014)
7. F., C.J.G., O., O.V.V., E., T.R.D., G., C.S.V., H., O.D.: Smart multi-level tool for remote patient monitoring based on a wireless sensor network and mobile augmented reality. *Sensors* 14, 17212–17234 (2014)
8. Fisher, D.K., Sui, R.: An inexpensive open-source ultrasonic sensing system for monitoring liquid levels. *Agricultural Engineering International* 15(4), 328–334 (2013)
9. Hicks, S.D., Aufdenkampe, A.K., Montgomery, D.S.: Sensor networks, dataloggers, and other handy gadgets using open-source electronics for the christina river basin czo. Fall Meeting of the American Geophysical Union. Stroud Water Research Center, Avondale, Pennsylvania (2011)
10. J., V., D., S., A., B., nad Ribeiro A., D.C.J., C., R.: An air-ground wireless sensor network for crop monitoring. *Computers and Electronic in Agriculture* 11(8), 6088–6108 (2011)
11. J., W., H., W., L., L., M., S., X., T., H., M., L., Z.: Wireless sensor for real-time perishable food supply change management. *Computers and Electronic in Agriculture* 110(01), 196–207. (2015)
12. J.V., C.H.: Redes inalámbricas de sensores: una nueva arquitectura eficiente y robusta basada en jerarquía dinámica de grupos. universidad de valencia, departamento de informática de sistemas y computadoras (2010)
13. K., F.D.: Open-source hardware is a low-cost alternative for scientific instrumentation and research. *Modern Instrumentation* 01(02), 8–20 (2012)
14. Makezine: Arduino vs beaglebone vs raspberry pi, <http://makezine.com/2013/04/15/arduino-uno-vs-beaglebone-vs-raspberry-pi/>
15. O., T., M., S., R., N.S.: Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. *Computers and Electronic in Agriculture* 118, 66–84 (2015)
16. Review, M.T.: Ten emerging technologies that will change the world, <http://www2.technologyreview.com/featured-story/401775/10-emerging-technologies-that-will-change-the/2/>
17. S., H., A., A., O., L., Karwan, D., Montgomery, D.: Christina river basin critical zone observatory (crb-czo): Wireless environmental sensor network. university of delaware on the hill. capitol hill, washington, dc. (2011)