

Monitoreo de variables ambientales en invernaderos usando tecnología Zigbee.

Juan Carlos Suárez Barón
Asistenete de Investigación
Escuela Colombiana de Carreras Industriales
ECCI
Bogotá, Colombia
jsuarezbaron@gmail.com, suarez.juan@ecc.edu.co

Msc. Marco Javier Suárez Barón
Docente e Investigador
Escuela Colombiana de Carreras Industriales
ECCI
Bogotá, Colombia
marcojaviersuarezbaron@gmail.com, msuarezb@ecc.edu.co

Abstract. Este artículo describe el diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores (WSN) aplicando el estándar Zigbee, usada para monitorear humedad relativa y temperatura en invernaderos. Este desarrollo permite conectar múltiples dispositivos inalámbricos en arcos de transmitir datos de las variables de humedad relativa y temperatura a una LCD y a un ordenador. El sistema fue hecho en tres etapas: 1) Desarrollo del hardware; 2) construcción de una red e integración de los sensores; 3) evaluación, con el fin de definir las especificaciones de cada nodo y el alcance de la comunicación. El sistema diseñado es portable, de tamaño reducido, capaz de transmitir datos con un porcentaje éxito de recepción cercano al 100%, y puede ser implementado para ser usado en ambientes extremos.

Keywords: Variables ambientales, WSN, Zigbee, Sensor.

1. Introducción

Los invernaderos son usados para reducir la influencia de factores adversos que limitan la producción y la calidad de los cultivos. Ellos incluyen el control de las variables ambientales y hacen un uso eficiente del agua. Por otro lado, invernaderos modernos cubren varios cientos de metros cuadrados, donde la ubicación para medir la temperatura, la humedad y la iluminación se elige cuidadosamente con el fin de mejorar la eficiencia de la producción, por lo que se requiere una red de inalámbrica de sensores (WSN).

Una WSN incluye varios dispositivos distribuidos espacialmente que utilizan sensores para controlar diversas condiciones en varios puntos, incluyendo la temperatura, sonido, vibración, presión, movimiento y contaminantes [1]. Las WSN han sido utilizadas para varias aplicaciones, por ejemplo monitoreo del hábitat, la agricultura, la supervisión y el control industrial, electrónica, automatización del hogar y el cuidado médico [2]. Hay diferentes tecnologías para desarrollar WSN, sin embargo, la tecnología conocida como Zigbee es una de la más generalizadas y utilizadas. Zigbee como tecnología, fue desarrollada para aplicaciones en las que el consumo de energía y la complejidad son la principal preocupación. Zigbee es adecuado para la comunicación sensores, actuadores y otros dispositivos pequeños entre ellos. Hace uso de un ancho de banda limitado, bajo consumo de energía y baja latencia [3].

Zigbee se basa en el estándar IEEE 802.15.4, que define el hardware y el software descritos en términos de conexión de red, como la capa física (PHY) y la capa de control de acceso al medio (MAC). El sistema desarrollado en el presente trabajo se compone de un nodo sensor y un dispositivo coordinador. El nodo sensor es, básicamente, una unidad de adquisición de datos, y es responsable de recoger datos de las variables climáticas tales como la temperatura, y humedad relativa, y los transmite al coordinador de módulos a través Zigbee.

2. Background

Las redes de sensores inalámbricos representan un avance significativo respecto a los métodos invasivos tradicionales para el monitoreo de especies, que puede lograr menores costos y errores en el proceso de medición [4]. Por ejemplo, las WSN se utilizan para controlar el comportamiento reproductivo de las aves en el Great Duck Island (Maine, EE.UU.), como se describe en [5].

Este sistema permite a los biólogos analizar los cambios en las condiciones ambientales dentro y fuera de las madrigueras durante la época de reproducción. Las condiciones ambientales son también una preocupación. Eso ha motivado desarrollos como el descrito en [6], que consiste en un sistema de vigilancia de la contaminación causada por las emisiones de gases de los tubos de escape de los automóviles. Los datos generados por los sensores de gases son transmitidos a estaciones remotas por medio de módulos Zigbee. Sistemas similares basados en Zigbee han sido usados para monitorear la calidad del agua en ríos y lagos, como se explica en [7], [8].

En la agricultura, las redes de sensores inalámbricos se usan para aumentar la eficiencia en la producción y el crecimiento de la cosecha. Por lo general, los datos de sensores corresponden a las condiciones ambientales tales como la temperatura, velocidad del viento, dirección del viento, la humedad del suelo y las propiedades físicas y químicas del suelo, tales como el pH [9]. Otra forma de aumentar la eficiencia en los cultivos es por gestión del agua, y en este sentido, se han implementado varios sistemas basados en redes de sensores. En [10] se describe el desarrollo de un sistema de control de riego de cultivos en Pakistán. Este sistema hace uso de las redes de sensores y actuadores inalámbricos (WSAN) para controlar los parámetros ambientales, que se envían a través de módulos Zigbee a una computadora.

Estas variables sirven como entradas al sistema de control. Además, los autores en [11] proponen el diseño e implementación de un sistema de riego basado en la tecnología ZigBee de bajo costo. El otro lado, en [12] se introdujo el uso de una red de sensores inalámbrica basada en la tecnología Zigbee (ZWSN). Las variables climáticas controladas son la temperatura, la velocidad y la dirección del aire, la humedad relativa y la precipitación. Los datos e imágenes relacionadas con la cantidad de hojas y frutos se envían a un asistente digital personal (PDA), que procesa y muestra la información con el fin de vigilar, de manera detallada, la evolución de las enfermedades. En particular, se realiza un seguimiento el impacto causado por la mosca de la fruta. Por último, los autores en [13] desarrollan una red de sensores inalámbricos basados en la tecnología Zigbee, que utiliza dispositivos MPWi-NodeZ, destinados a aplicaciones de viticultura de precisión. Una topología de red de malla se utiliza para controlar el contenido de humedad del suelo, la temperatura del aire, humedad relativa y radiación solar.

3. Materiales y Métodos

3.1 Descripción del sistema y desarrollo del hardware

El sistema se compone de un nodo sensor (dispositivo final) y un dispositivo coordinador. El nodo sensor es básicamente una unidad de adquisición de datos. Es responsable de recopilar variables del clima como temperatura y humedad relativa, y transmite los datos recopilados al coordinador por medio de módulos Zigbee. En este trabajo, el sensor SHT71 fue seleccionado como sensor que contiene en un mismo chip el elemento para medir la humedad relativa y la temperatura. En cuanto a la humedad relativa, el rango de operación es de 0 a 100%, y el rango de funcionamiento de temperatura es de -40 a 125 ° C. Los sensores SHT71 tienen un bajo consumo de energía y tiempo de respuesta rápido, precisión de temperatura de $\pm 0,4$ ° C y menos de $\pm 3,0\%$ de humedad relativa. Por lo tanto, SHT71 es una buena solución para el seguimiento de estas variables en el campo de la agricultura [14].

El coordinador, actúa como estación central del sistema. Se encarga de recibir los datos adquiridos por el nodo sensor (formando una red de topología estrella) para procesarlos, almacenarlos y proveer una conveniente y fácil manera que permite a los usuarios acceder fácilmente a ellos y mostrarlos en tiempo real en una LCD y una interfaz gráfica de usuario (GUI). El diagrama esquemático del sistema es mostrado en la Fig 1.

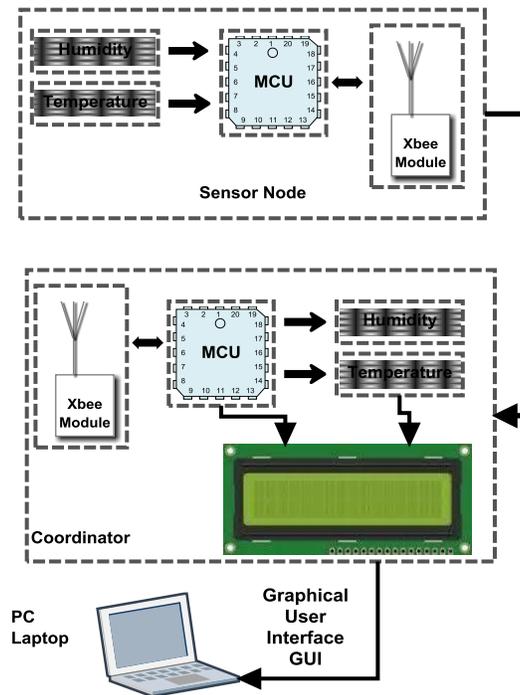


Fig. 1. Diagrama esquemático del sistema de monitoreo inalámbrico.

3.2. Prototipo de nodo de red e integración de los señores

El nodo sensor está compuesto de cuatro elementos:

- Módulo de sensores
- Módulo de procesamiento
- Módulo de comunicación inalámbrica
- Módulo de alimentación

3.2.1 Diseño del nodo sensor

El módulo de sensores es responsable de recolectar información sobre los parámetros de temperatura y humedad relativa. El módulo de procesamiento controla el funcionamiento del nodo sensor, almacena y procesa los datos recolectados, mediante el uso de un microcontrolador. El microcontrolador seleccionado para esta aplicación es el MC9S08JM16, perteneciente a la familia HC9S08 de Freescale®. Esta familia de microcontroladores es muy útil para este tipo de aplicaciones por varias razones, entre las cuáles se destacan: bajo consumo (a través de sus modos de operación run, wait, stop), Capacidad de memoria y procesamiento suficiente para soportar la pila de protocolos ZigBee [15] [16]. El módulo de comunicación inalámbrica se comunica con otros nodos, intercambia información de control y envía y recibe datos.

El módulo de alimentación proporciona la energía para el módulo de sensor, el procesamiento y el módulo de comunicación inalámbrica.

La fuente de alimentación del nodo sensor corresponde a una batería alcalina de 9 V (Zn/MnO₂), una solución portátil y de bajo mantenimiento bajo costo. Por otro lado, el módulo Xbee, el sensor SHT71 y el microcontrolador MC9S08JM60 requieren 3,3 V, que son proporcionados por un regulador LM1117. El diagrama de bloques del nodo sensor se muestra en la Fig 2.

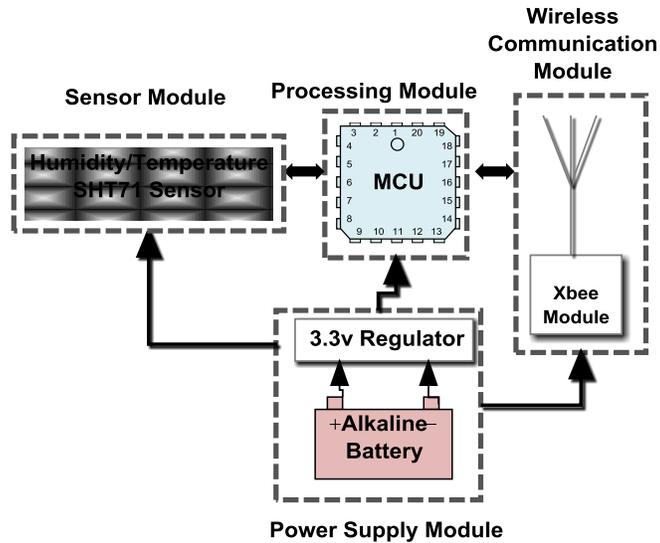


Fig. 2 . Diagrama de bloques del nodo sensor.

El diseño final consiste de dos capas de circuito impreso (PCB). La capa superior o top layer es usada para colocarel módulo XBee, leds (encendido, y los indicadores de Rx y Tx), el microcontrolador, el sensor SHT71, conector de la batería y un interruptor de encendido. La capa inferior o bottom layer se utilizó para colocar el regulador de 3.3v y como un plano de tierra bajo el módulo XBee para reducir al mínimo cualquier interferencia causada por las señales de RF. Los componentes electrónicos usados fueron ensamblados con tecnología de montaje superficial SMT (Surface Mount Technology). El diseño final del nodo sensor es mostrado en la Fig 3.

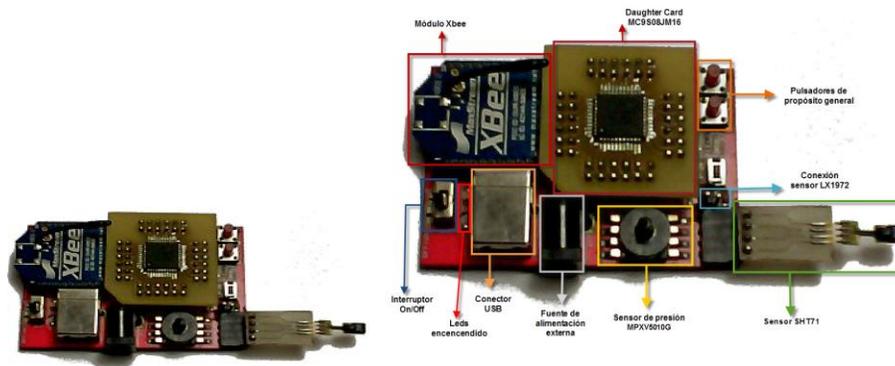


Fig. 3. Diseño final del nodo sensor.

3.2.2 Diseño del coordinador

El coordinador recibe las señales desde el nodo sensor, integra y almacena los datos automáticamente.

El coordinador está conformado por cuatro partes: módulo de procesamiento, módulo de comunicación inalámbrica, módulo de alimentación, módulo de visualización, módulo de comunicación USB y un módulo de registro de datos o data logger. El módulo de procesamiento controla el funcionamiento de los nodos de sensores, almacena y procesa los datos recolectados. El módulo de comunicación inalámbrico se comunica con el nodo sensor, para recibir los datos de los sensores. El módulo de alimentación, al igual que en el nodo sensor, proporciona la energía a los demás módulos. El módulo de data logger se encarga de almacenar los datos de los sensores y visualizarlos en una pantalla de cristal líquido LCD. El módulo de comunicación USB permite una conexión y comunicación directa entre el coordinador y el PC. Estos módulos en conjunto permiten que el coordinador reciba periódicamente los datos del nodo sensor y los muestre en una LCD. El diagrama de bloques del coordinador se muestran en la Fig 4.

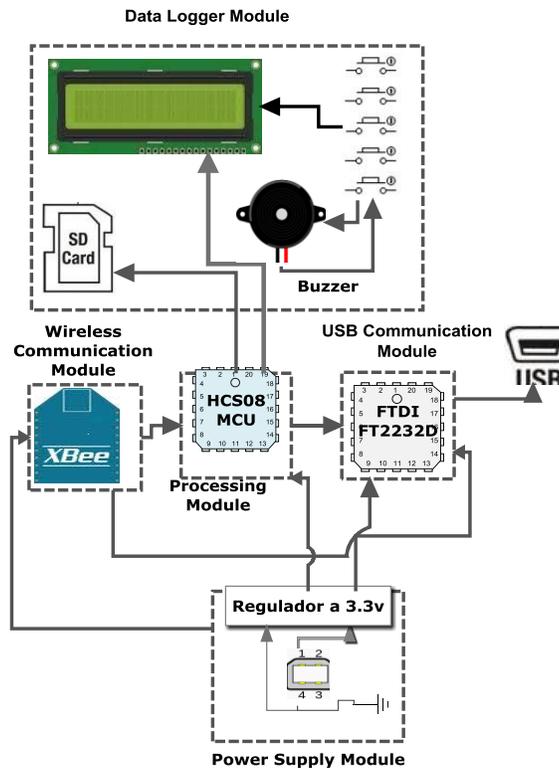


Fig. 4. Diagrama de bloques del coordinador.

Para el coordinador, así como en el nodo sensor, los módulos XBee basados en los estándares IEEE 802.15.4/Zigbee Wireless Personal Area Network (WPAN) para construir WSNs de bajo consumo de energía, bajo mantenimiento y auto-organización [17] fueron utilizados. El tamaño pequeño, de baja potencia, de bajo costo y de larga duración de la batería son las razones del uso de ZigBee. El microcontrolador MCS08JM60 fue seleccionado como módulo de procesamiento, teniendo en cuenta las mismas razones del uso de la familia HCS08.

En el caso del coordinador la fuente de alimentación se obtiene del puerto USB de la PC a través de un conector tipo B. El registrador de datos incluye una pantalla LCD y cinco botones que se utilizan seleccionar las variables físicas que se muestran y se almacenan en una tarjeta de memoria SD. Para comunicar el PC con el coordinador, se utilizó un chip FTDI FT2232D. El diseño final de la coordenada del sensor se muestra en la Fig 5.

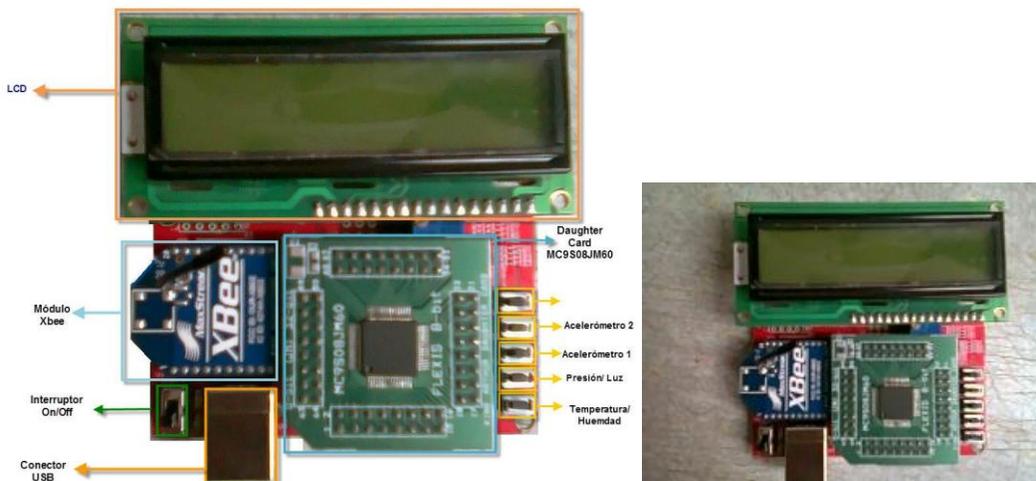


Fig. 5. Diseño final del coordinador.

3.3 Configuración de los sensores

La salida del sensor de temperatura se ajustó a formato de 12 bits, y la de humedad relativa fue configurado para el formato de 8 bits, por lo que se consigue una resolución de $0,04\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $0,5\%$ RH para las variables de temperatura y humedad relativa, respectivamente. El sensor y el microcontrolador interactúan mediante el uso de protocolo I²C, por lo tanto, sólo se requieren dos pines del microcontrolador. Uno de los pines se utiliza para la sincronización, mientras que el otro se utiliza para la transferencia bidireccional de datos entre los dos dispositivos. Con el fin de interactuar adecuadamente con el sensor, una secuencia específica de eventos debe ser seguida. El diagrama de flujo en la Fig 6 ilustra los eventos que se deben seguir para solicitar el sensor para tomar medidas de modo que la información se puede leer.

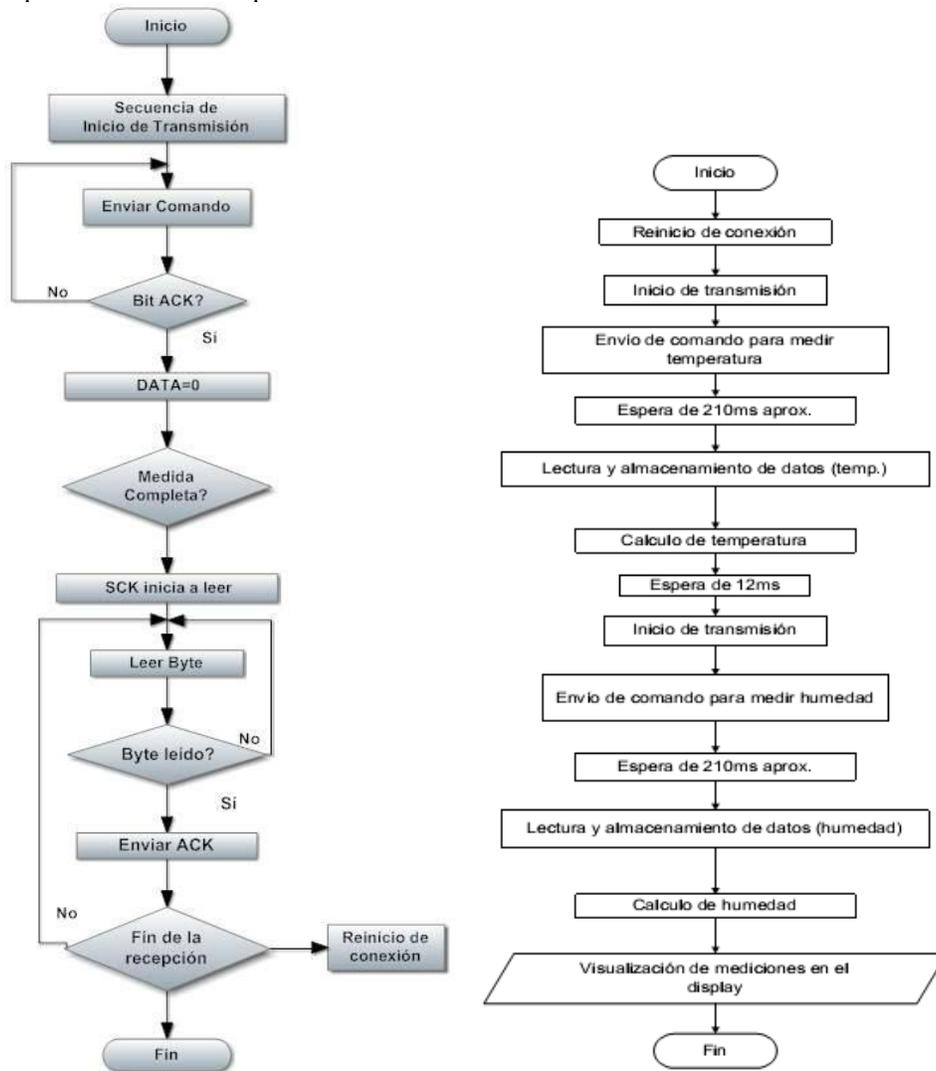


Fig 6. Diagrama de flujo de las secuencias para obtener medidas del sensor SHT71

3.4 Comunicación entre dispositivos

La comunicación del sensor SHT71 con el microcontrolador MC9S08JM16 se hizo a través del módulo I²C. Esto es posible, dado que no hay otro dispositivo conectado al módulo I²C del microcontrolador, por lo que no se generan interferencias [18] y el sensor puede funcionar adecuadamente.

El protocolo de comunicación incluye una condición de inicio, un bloque de datos tanto de lectura como de escritura, y un bit de conformación o ACK. La comunicación se basa en dos pines, uno de reloj (SCK) que siempre debe ser de salida, y se utiliza para

sincronizar el microcontrolador y el sensor, y un pin de datos bidireccional (DATA), que se utiliza tanto para dar instrucciones al SHT71 como para obtener datos de este.

4. Resultados y discusión

Después de verificar la correcta comunicación entre los diversos elementos del sistema construido, se procedió a probar la correcta conectividad de todo el prototipo y el buen funcionamiento de las tareas. Para emular un entorno de efecto invernadero, que se creó un espacio con dos plantas ornamentales. Cerca de cada planta, se encuentra un nodo sensor que mide la humedad relativa y la temperatura alrededor de las plantas. Los resultados del nodo sensor se visualizan en la pantalla LCD. La Fig 7 muestra las plantas y las medidas correspondientes que se muestran en la LCD.



Fig. 7. Resultados de las pruebas en las plantas 1 y 2 en la LCD.

Los resultados de la prueba están representados en la Fig 8 y en la Fig 9. Los resultados obtenidos a partir de los experimentos muestran pequeñas variaciones entre las lecturas del sensor SHT71 para las dos pruebas. Junto a esos resultados, se muestra una comparación de los datos de las variables con la estación meteorológica Kestrel 4500, la cuál estaba previamente calibrada.

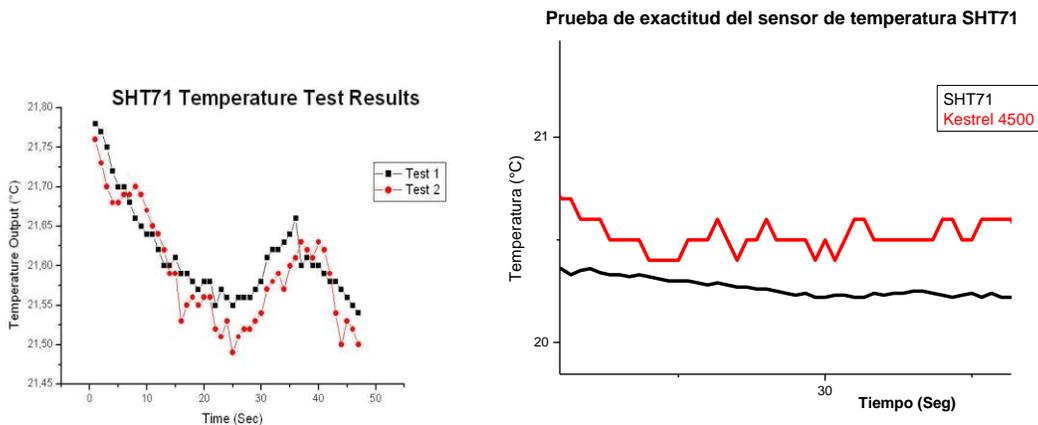


Fig. 8. Resultados experimentales de temperatura obtenidos del sensor SHT71 y comparación con la estación meteorológica Kestrel 4500.

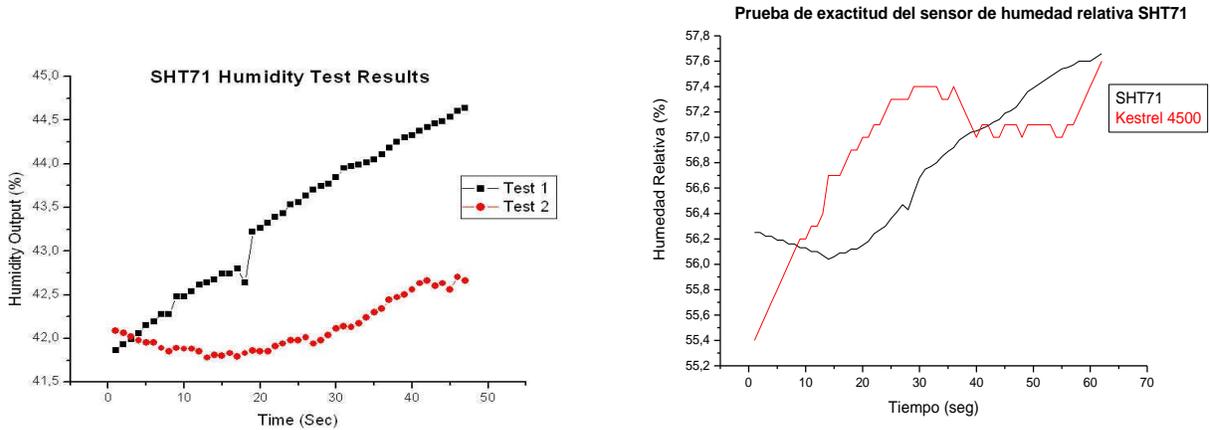


Fig. 9. Resultados experimentales de humedad relativa obtenidos del sensor SHT71 y comparación con la estación metereológica Kestrel 4500.

Otro experimento consistió en la verificación de la comunicación entre los dos módulos Xbee. La Fig 10 describe las distancias que separan el emisor (icono rojo) del receptor (icono azul). Se tomaron medidas de recepción de paquetes y el nivel RSSI (Received Signal Strength Indicator) del paquete recibido a 30 m, 60 m y 100 m de distancia. Para la prueba se utiliza dos dispositivos Xbee, dos computadoras portátiles y dos tableros de USB para el desarrollo de digi. En el software X-CTU se utilizó opción Rango-Test con la configuración predeterminada. Esta configuración envía 32 bytes de datos desde un dispositivo a otro, que devuelve la trama de datos al el origen. Otros resultados experimentales se basaron en los paquetes perdidos con valores entre 0 a 1000 y LQI dentro de los valores típicos entre-95dBm a-18dBm según IEEE 802.15.4. A continuación se presentan los resultados de las medidas experimentales de tres secuencias, con 5, 10 y 20 bytes de tamaño de carga útil por paquete, y una aplicación de red Zigbee con monitoreo de red de variables ambientales. En la Fig 11, las medidas de LQI y de paquetes perdidos se muestran, respectivamente, para 5 bytes de carga por paquete.

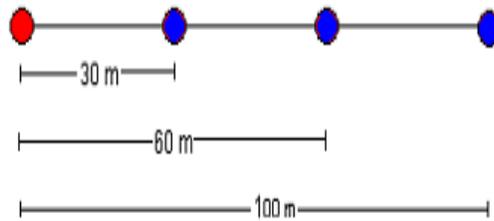


Fig. 10. Diagrama para prueba con línea de vista.

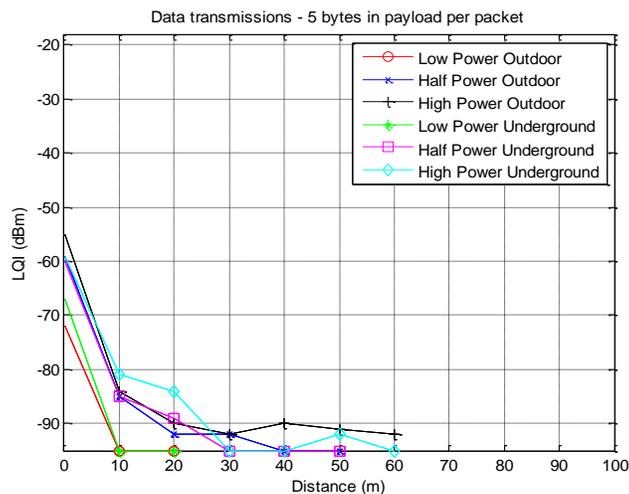


Fig 11. Gráficos de ICT frente a la distancia entre los dispositivos

Para complementar el desarrollo del sistema, se diseñó un instrumento virtual (VI), el cual está centrado en la manipulación del puerto USB del PC para la comunicación con el prototipo mediante un proceso de transmisión y recepción de datos serie (FT232D). El programa está en capacidad de indicar las mediciones realizadas de temperatura, humedad relativa según la manipulación del usuario. El puerto serial se configuró mediante la utilización de uno de los módulos VISA (Serial), este módulo permite adecuar varios parámetros referentes a este tipo de comunicación, como por ejemplo la velocidad de transmisión de los datos que para este caso es de 19200 baudios por ser la velocidad a la cual fueron programados los XBee. También permite seleccionar el puerto COM que se está utilizando en el equipo de cómputo, entre otros parámetros como por ejemplo paridad, control de flujo, bits de parada, etc. El VI tiene configurado un proceso de lectura y escritura mediante los bloques VISA READ y VISA WRITE respectivamente; con el bloque de lectura se lleva a cabo el procesamiento de los datos recibidos en buffer (mediciones) para su visualización en el panel frontal. El resultado final se muestra en la Fig 12 con el panel frontal y la Fig 13 con el diagrama de bloques del instrumento virtual que muestra el bloque de configuración del puerto serial (baudios, bits de paridad, selección del COM, etc), el bloque de lectura y un bloque de manejo de datos recibidos.

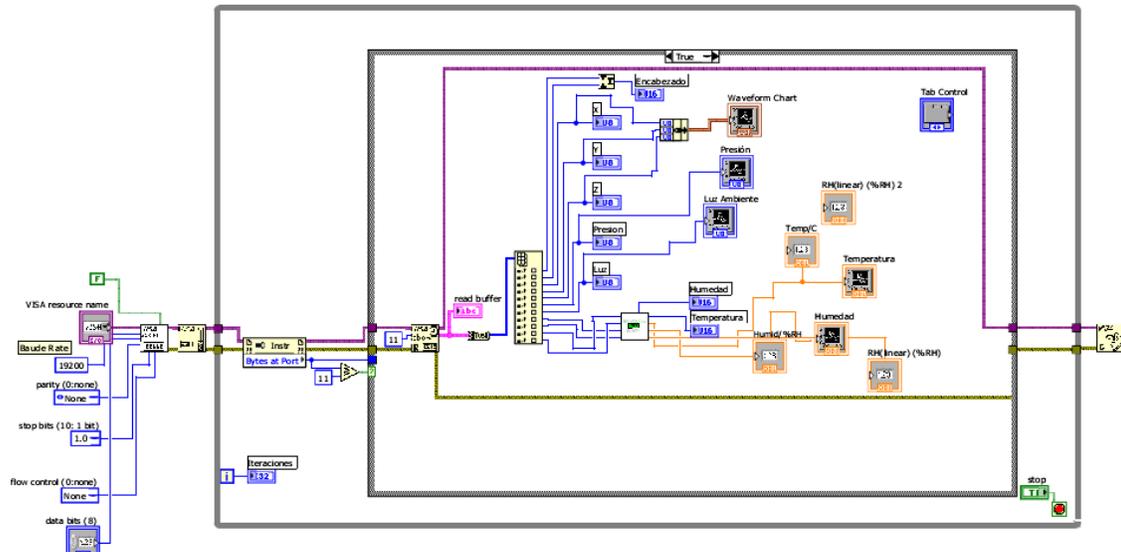


Fig 12. Diagrama de bloques del instrumento virtual.

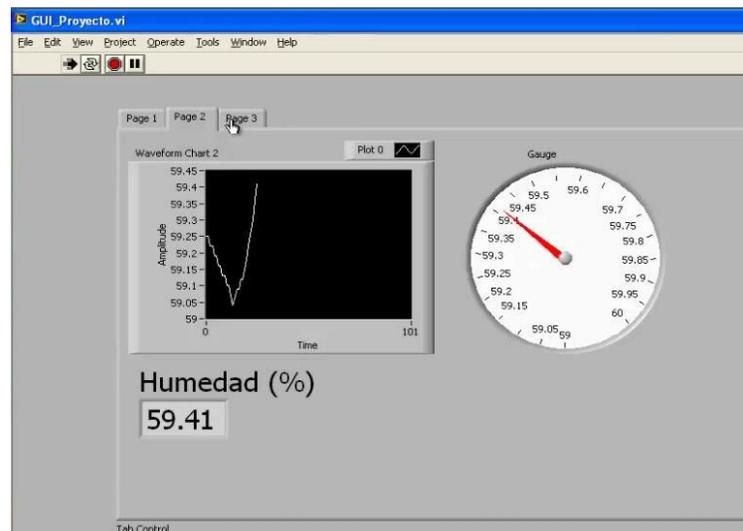


Fig 13. Panel frontal del instrumento virtual.

5. Conclusiones y trabajo futuro

La red inalámbrica de sensores desarrollada se caracteriza por tener una topología en estrella empleando el protocolo Zigbee. Esta red conforma un sistema escalable que permite transmitir valores de humedad relativa y temperatura entre el coordinador y un dispositivo final para ser mostrados en una LCD y una interfaz gráfica de usuario. El nodo sensor y el coordinador fueron cons-truidos a partir del diseño de tarjetas de circuito impreso (PCB) de doble capa, constituidas completamente con componentes SMD y con materiales de última generación como FR4, dando como resultado dos dispositivos de tamaño reducido, ofreciendo mayor portabilidad. Las pruebas de comparación con el patrón, en este caso una estación meteorológica portátil y de transmisión de datos, muestran buen desempeño del sistema en cuanto a precisión y recepción de paquetes, respectivamente.

En este artículo se ha descrito el proceso de diseño e implementación de un sistema de monitoreo de humedad y temperatura basado en Zigbee para ser aplicado en invernaderos como escenario de prueba en ambientes cerrados. Es un sistema de monitoreo que necesita ser mejorado para aumentar su desempeño, para ello se propone realizar los siguientes ajustes: Mejorar la vida útil de las baterías a través de los modos de stop y wait de los microcontroladores HCS08. El sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM) y el servicio de mensajes cortos (SMS), también se pueden integrar en el sistema. Estas características adicionales permitirán que el sistema pueda alertar directamente al usuario de cualquier cambio anormal de las condiciones climáticas en el invernadero a través de la transmisión de un mensaje de texto.

Referencias

- [1] N Aakvaag and J.-E Frey, "Redes de sensores inalámbricos.," *Revista ABB*, pp. 39-42, 2006.
- [2] M Keshtgari and A Deljoo, "A Wireless Sensor Network Solution for Precision Agriculture Based on ZigBee Technology," *Journal Wireless Sensor Network*, vol. IV, pp. 25-30, 2012.
- [3] Zigbee Alliance. Zigbee Specification 053474r17. [Online]. <http://www.zigbee.org>
- [4] Carlos Andrés Cifuentes García, *Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores aplicados a la instrumentación biomédica. Tesis de maestría*, Facultad de Ingeniería, Ed. Oro Verde: Universidad Nacional de Entre Ríos, 2010.
- [5] A Mainwaring, J Polastre, R Szewczyk, D Culler, and J Anderson, "Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring," in *WSNA '02*, 2002.
- [6] H Eren, A Al-Ghamdi, and J Luo, "Application of ZigBee for Pollution Monitoring Caused by Automobile Exhaust Gases," in *SAS 2009 IEEE Sensors Applications Symposium*, New Orleans, LA, 2009.
- [7] X Wang, L Ma, and H Yang, "Online Water Monitoring System Based on ZigBee and GPRS," *Science Direct. Procedia Engineering*, no. 15, pp. 2680 – 2684, 2011.
- [8] M Azwan Nasirudin, U Nurulhaiza Za'bah, and O Sidek, "Fresh Water Real-Time Monitoring System Based on Wireless Sensor Network and GSM," in *2011 IEEE Conference on Open Systems (ICOS2011)*, Langkawi, Malasia, 2011, pp. 354-357.
- [9] T Kalaivani, A Allirani, and A Priya, "A survey on Zigbee Based Wireless Sensor Networks in agriculture," in *3rd International Conference on Trendz in Information Sciences and Computing (TISC) 2011*, 2011, pp. 85-89.
- [10] Shaikh Z Aqeel-ur-Rehman, H Yousuf, F Nawaz, M Kirmani, and S Kiran, "Crop irrigation control using Wireless Sensor and Actuator Network (WSAN)," in *International Conference on Information and Emerging Technologies (ICIET) 2010*, 2010, pp. 1-5.
- [11] Y Zhou, X Yang, L Wang, and Y Ying, "A wireless design of low-cost irrigation system using ZigBee technology ," in *2009 International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing* , 2009, pp. 572 - 575.
- [12] A Jiménez, D Ravelo, and J Gómez, "Sistema de adquisición, almacenamiento y análisis de información fenológica para el manejo de plagas y enfermedades de un duraznero mediante tecnologías de agricultura de precisión," *Tecnura. Redalyc* , vol. XIV, no. 27, pp. 41-51, 2009.
- [13] R Morais et al., "A ZigBe multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture," *E. B.V.*, vol. II, no. 62, pp. 94-106, 2008.
- [14] Z G Kovács, G E Marosy, and H Gyula, "Case study of a simple, low power WSN implementation for forest monitoring," in *Biennial Baltic Electronics Conference (BEC2010)* , Tallinn, Estonia, 2010, pp. 161-164.
- [15] Lucas Iacono, Pablo Godoy, Osvaldo Marianetti, and Carlos García Garino, "Estudio de Plataformas de Hardware Empleadas en Redes de SensoresInalámbricas," in *CACIC 2010 - XVI Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, Buenos Aires, 2010, pp. 784- 793.
- [16] Slade Mel, Jones Mark H., and Jonathan Scott, "Choosing the right microcontroller: A comparison of 8-bit Atmel, Microchip and Freescale MCUs," Waikato, 2011.
- [17] Digi International Inc. (2007) XBee ZNet2.5/XBee-PRO ZNet2.5 OEM RF Modules, Product Manual v1.x.4x - ZigBee Protocol For OEM RF

Module Part Numbers: XB24-BxIT-00x. [Online]. <http://www.digi.com>

- [18] Sensirion AG. (2011) Datasheet SHT7x (SHT71, SHT75) Humidity and Temperature Sensor IC. [Online]. http://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion_Humidity_SHT7x_Datasheet_V5.pdf
- [19] Digi International Inc. Digi International Inc 11001 Bren Road East Minnetonka, MN 55343877 912-3444 or 952 912-3444. [Online]. <http://www.digi.com>
- [20] Lei Xiao and Lejiang Guo, "The Realization of Precision Agriculture Monitoring System Based on Wireless Sensor Network," in *International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering CCTAE2010*, 2010, pp. 89-92.
- [21] Sensirion AG. (2011) Datasheet SHT7x (SHT71, SHT75) Humidity and Temperature Sensor IC. [Online]. http://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion_Humidity_SHT7x_Datasheet_V5.pdf