

Diseño y Creación de Sensor Inalámbrico y Registrador para Plataforma de Prueba de Redes de Sensores Inalámbricos con Tecnología Zigbee Utilizando Módulos XBEE

Resumen: Gracias al avance en las tecnologías de comunicaciones inalámbricas y al uso de las redes de sensores inalámbricos se ha facilitado la transmisión de datos de sensores ambientales. El presente trabajo es una etapa inicial de un proyecto que consiste en el diseño y creación de una plataforma de desarrollo para prueba de redes de sensores inalámbricos basados en tecnología Zigbee utilizando módulos XBEE y hardware libre para estudio de distintos tipos de topologías y sensores y la monitorización a través de una central registradora. En el trabajo se explica el diseño y desarrollo de un sensor de temperatura inalámbrico basado en tecnología Zigbee y alimentado a batería, y de un registrador con almacenamiento de datos con topología de red en estrella con dos sensores y registrador como nodo central. En los sensores se han logrado autonomías teóricas de más de 4 años.

Palabras Claves: Comunicación Zigbee; Redes de Sensores Inalámbricos; Sensor de temperatura; Sensor a Batería.

Abstract: Thanks to advances in wireless communications technologies and the use of wireless sensor networks it has been facilitated the transmission of data from environmental sensors. This paper is an initial stage of a project that involves the design and creation of a development platform for testing wireless sensor networks based in Zigbee technology using XBee modules and free hardware for studying different types of topologies and sensors and monitoring through a central recorder. In the work the design and development of a wireless temperature sensor based on Zigbee technology and battery powered, and a recorder with data storage in star network topology with two sensors and a central node logger is explained. The sensors have been achieved theoretical autonomy of over 4 years.

Keywords: Zigbee Communication; Wireless Sensor Networks; Temperature Sensor; Battery Sensor.

Pablo S. Gaspoz, Emanuel Baer

Grupo de Investigación en Control y Seguridad Eléctrica (CySE), Lavaisse 610, Santa Fe,

Facultad Regional Santa Fe, UTN

E-mail de contacto: pgaspoz@frsf.utn.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Los recientes avances en la tecnología de sistemas micro-electro-mecánicos (MEMS por sus siglas en inglés), en las comunicaciones inalámbricas y en la electrónica digital han permitido el desarrollo de nodos sensores multifuncionales de bajo costo y bajo consumo de energía que son de pequeño tamaño y se comunican libremente en distancias cortas (Akyildiz et al., 2001).

Una Red de Sensores Inalámbrica (WSN por sus siglas en inglés) típica, o simplemente una red de sensores, se compone de una serie de nodos sensores distribuidos, capaz de detectar las condiciones ambientales, comunicarse entre sí a través de transceptor radio de corto alcance, y organizarse a sí mismos en una red de malla multi-salto (multi-hop) autónoma, como se observa en la figura 1. En los últimos años, este tipo de redes se desarrollan para una amplia variedad de dominios de aplicación, en particular, para aplicaciones de monitoreo ambiental (Mainwaring et al., 2002) (Martinez et al., 2004) (Cardell-Oliver et al., 2005) (Musaloiu-E et al., 2006) (Yang y Li, 2010).

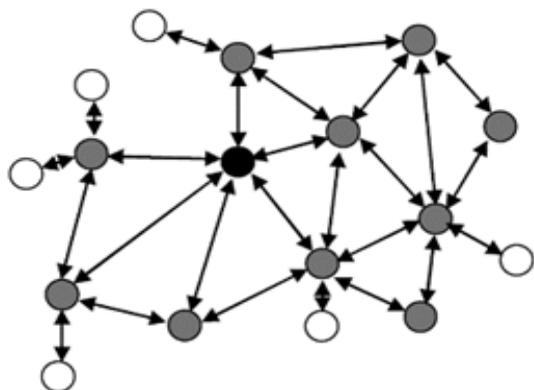


Figura 1 - Ejemplo de red malla multi-salto.

Por lo tanto este tipo de redes pueden ser utilizadas para monitorear continua o periódicamente variables de interés, como pueden ser los parámetros ambientales en recintos cerrados, como los edificios empresa-

riales o habitacionales.

El desarrollo de soluciones tecnológicas en los ámbitos técnico-académicos permiten acercar a los tecnólogos en formación, herramientas para el perfeccionamiento en temáticas novedosas y permiten la actualización tecnológica, lo que a su vez realimenta el circuito al generar nuevos desarrollos a partir de la capacitación y formación de becarios.

En el marco de este concepto de actualización tecnológica se propuso el diseño y creación de una plataforma de desarrollo prototipo para pruebas de redes de sensores inalámbricos basados en el estándar tecnológico IEEE 802.15.4/Zigbee (IEEE-TG15.4, 2003) (Zigbee Alliance, 2015).

Existe variedad de plataformas WSN. En el proyecto se propuso la utilización de módulos XBEE Serie 2 de la marca Digi que permiten implementar el estándar Zigbee completo y que fueron seleccionados en función de su facilidad de uso, disponibilidad en el mercado y accesibilidad a una amplia documentación, así como bibliografía específica disponible en el Grupo (Faludi, 2010). La tecnología Zigbee es de gran aplicación en la industria (Lin et al., 2007) así como en el ámbito del control edilicio, medicinal y otros.

El hardware adicional utilizado para el resto de la arquitectura del sistema es de libre licencia y/o desarrollado en el marco del trabajo. Esto permite estudiar distintos tipos de sensores, tanto a batería como alimentados con fuente externa o incluso de manera mixta. La posibilidad de adicionar dispositivos actuadores en el interior de la red, permite transformarla en una Red de Sensores y Actuadores Inalámbrica (WSNA por sus siglas en inglés) (Mainwaring et al., 2002). El sistema es monitoreado y/o controlado a través de una central que se encarga de coordinador de red y posee capacidades de registro de datos y disponibilidad de múltiples puertos de comunicación para ser adaptado

a diferentes plataformas de monitoreo.

La implementación adoptada en esta primera etapa del proyecto y que se desarrolla en el presente trabajo consiste en el diseño y desarrollo de un sensor de temperatura inalámbrico basado en comunicación Zigbee alimentado a batería que mide en un rango de 0°C a 50°C en ambientes interiores, y por otro lado un registrador con almacenamiento en tarjeta micro SD y comunicación a PC. Se destaca en el trabajo la necesidad de disminuir el consumo energético del módulo sensor a batería implementando estrategias de parametrización de la red Zigbee para la mejora de las prestaciones energéticas.

METODOLOGIA

La arquitectura planteada en la red inalámbrica implementada consiste en dos nodos sensores alimen-

tados a batería (no recargables) con sus transceptores XBEE configurados como Dispositivo Final (ED por sus siglas en inglés) y una estación registradora conectada a una PC donde los datos pueden ser almacenados y procesados. Esta estación registradora a su vez es el coordinador de la red por lo que su transceptor XBEE se configuró como Coordinador (C), puede observarse en la figura 2 la arquitectura implementada así como cada uno de los elementos componentes de los módulos.

En la figura 2 además se puede observar que los módulos sensores no disponen de microcontrolador, esto se estableció de esa manera para optimizar el consumo energético del módulo y aprovechar las ventajas que ofrece el transceptor, que ya dispone de una serie de pines de E/S (Entradas/Salidas) tanto digitales como analógicas así como de interfaz de

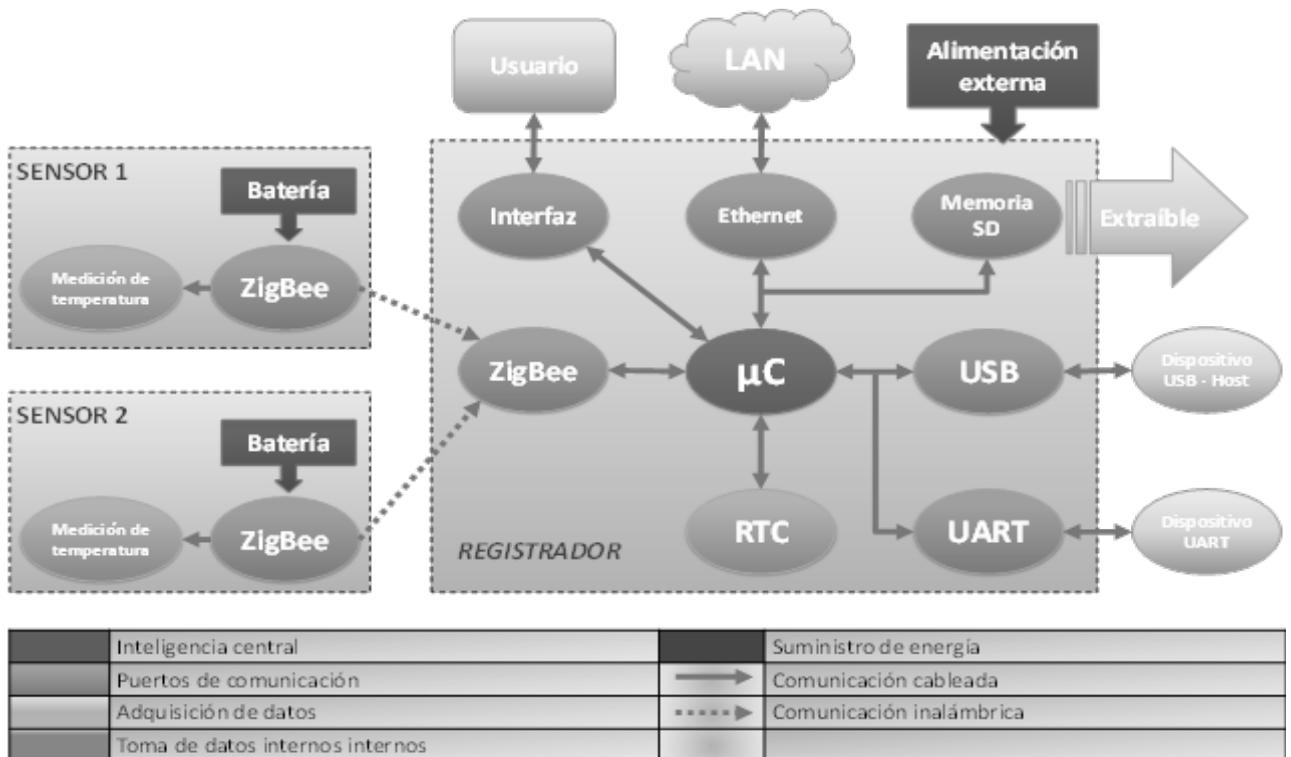


Figura 2 – Arquitectura implementada con dos sensores y una central.

comunicación UART (Receptor-Transmisor Asíncrono Universal) (Digi International, 2012).

En pruebas preliminares para el diseño del módulo sensor se utilizaron sensores DS18B20 que disponen de envío de valor de temperatura mediante comunicación bus serial a través de un pin. Sin embargo ante la necesidad de diseñar un sensor a batería y configurando al transceptor para hibernar cada determinado período de tiempo se encontró como inconveniente la dependencia de un microcontrolador adicional para gestionar la comunicación y solicitud de temperatura al sensor (Maxim Integrated, 2008). Esta dependencia

incrementa notablemente los consumos del módulo debido al consumo propio del microcontrolador que finalmente es algunos órdenes superior que el que puede obtenerse del XBEE configurado adecuadamente (Digi International, 2012).

En función de la potencialidad de configurarse para obtener un muy bajo consumo que dispone el transceptor XBEE y la disponibilidad de entradas analógicas en el mismo, se optó por la utilización de un termistor como sensor de temperatura que se conectó a través de un divisor de tensión a una entrada analógica del XBEE para la toma de medición de temperatura. En la

Pin #	Nombre	Dirección	Estado por defecto	Descripción
1	VCC	-	-	Fuente de alimentación
2	DOUT	Salida	Salida	Salida de Datos UART
3	DIN / CONFIG	Entrada	Entrada	Entrada de Datos UART
4	DIO12	Ambos	Desabilitado	E/S Digital 12
5	RESET	Ambos	Colector abierto con módulo pull-up	Reset (pulso reset debe ser al menos 200ns)
6	RSSI PWM / DIO10	Ambos	Salida	Indicador de Fuerza de Señal RX / E/S Digital 10
7	DIO11	Ambos	Entrada	E/S Digital 11
8	[reserved]	-	Desabilitado	No Conectar
9	DTR / SLEEP_RQ / DIO8	Ambos	Entrada	Línea de Control de Pin de Sueño o E/S Digital 8
10	GND	-	-	Masa
11	DIO4	Ambos	Desabilitado	E/S Digital 4
12	CTS / DIO7	Ambos	Salida	Control de Flujo Listo-para-Enviar o E/S Digital 7. CTS, si está habilitada, es una salida.
13	ON / SLEEP	Salida	Salida	Indicador de Estado del Módulo o E/S Digital 9
14	VREF	Entrada	-	No usado para EM250. Se utiliza para procesador secundario programable. Por compatibilidad con otros módulos XBEE, recomendamos conectar este PIN de referencia de voltaje si se desea muestreo Analógico. De otra manera, conectar a GND.
15	Associate / DIO5	Ambos	Salida	Indicador Asociado, E/S Digital 5
16	RTS / DIO6	Ambos	Entrada	Control de Flujo de Solicitud-de-Envío, E/S Digital 6. RTS, si está habilitada, es una entrada.
17	AD3 / DIO3	Ambos	Desabilitado	Entrada Analógica 3 o E/S Digital 3
18	AD2 / DIO2	Ambos	Desabilitado	Entrada Analógica 2 o E/S Digital 2
19	AD1 / DIO1	Ambos	Desabilitado	Entrada Analógica 1 o E/S Digital 1
20	AD0 / DIO0 / Commissioning Button	Ambos	Desabilitado	Entrada Analógica 0, E/S Digital 0, o Botón de Puesta en Marcha

Tabla I – Asignación de Pines para los módulos XBEE/XBEE-PRO.

tabla I se puede observar la gran capacidad de gestión de E/S que dispone el XBEE.

Arquitectura de la central registradora

Está compuesta por los siguientes elementos:

- Placa de desarrollo “Arduino Nano” basada en el microcontrolador ATmega328 de la firma Atmel (Arduino, 2015).
- Placa de desarrollo Arduino Ethernet shield, el cual está basado en el chip Wiznet W5100.
- Módulo Arduino de tarjeta Micro SD 5V con adaptador 3,3V.
- Reloj de Tiempo Real (RTC) Ds1302 con memoria RAM estática y batería.
- Pantalla LCD 4x20 Hitachi.
- Transceptor XBEE (Coordinador).

Dispone de puerto serie virtual de manera que se pueda comunicar con el XBEE y al mismo tiempo enviar la información procesada por el puerto USB hacia el ordenador. Además posee interfaz UART, interfaz Ethernet, RTC para la estampa de tiempo de cada valor de temperatura y registro de datos en tarjeta micro SD extraíble así como visualización de valores actuales en pantalla LCD (Figura 2).

Hardware módulo ED sensor a batería.

Se eligió como sensor de temperatura un termistor NTC de 10kΩ que posteriormente se linealiza en la central registradora, de esa manera se mantiene un muy bajo consumo energético en el módulo al no requerir procesamiento de la señal. Solo se adaptó la señal para poder utilizar la entrada analógica del XBEE que trabaja en niveles de tensión de máximo de 1,2V mientras que la alimentación del módulo requiere

entre 2,1V a 3,6V. Para ello se alimentó el módulo con dos baterías no recargables de tipo AA en serie obteniendo aproximadamente 3V de alimentación. Para adaptar los niveles de tensión de la entrada analógica se construyó un divisor resistivo con ajuste de la tensión a través de la resistencia variable multi-vuelta de 2kΩ como el que se muestra en la figura 3 para proveer al sensor de un ajuste de ganancia y de esta manera permitir la calibración del mismo.

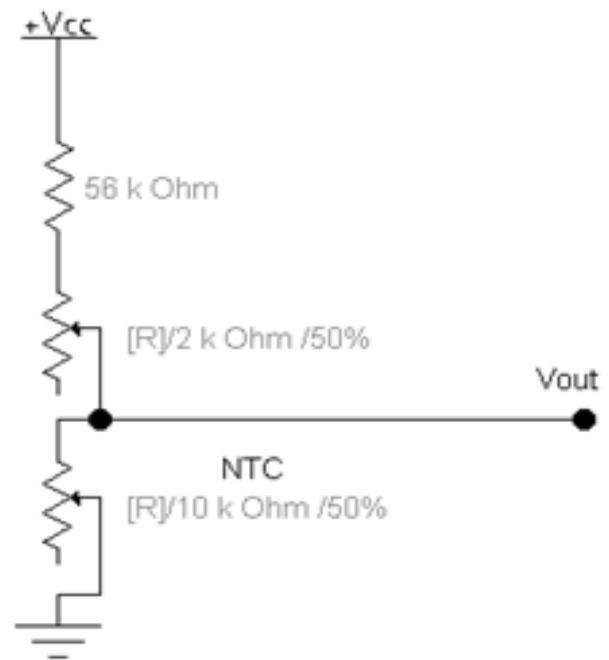


Figura 3 – Adaptador de nivel de tensión para entrada analógica.

La NTC que figura como una resistencia variable conectada a masa, se conecta a una resistencia fija más una resistencia variable multi-vuelta para su calibración.

La resistencia fija, debe ser lo suficientemente grande para que en ningún punto del rango de variación de temperatura, la salida (Vout) supere 1,2V que es el nivel de tensión máximo que mide una entrada analógica de un módulo XBEE. A su vez, no debe ser excesivamente grande para no desaprovechar

parte del rango de medición de la entrada. El prototipo dispone entre la Resistencia fija y la Resistencia variable de $56K\Omega + 2K\Omega$.

Al tener como requerimiento disminuir el consumo de potencia para aumentar la duración de la batería, los módulos XBEE trabajan en modo sueño cíclico, hibernando la mayor parte del tiempo. Esto se logra parametrizando el XBEE a través del software XCTU provisto por Digi Internacional de modo que el módulo se parametriza para que funcione como ED y en modo sueño cíclico enviando el estado de la entrada analógica y el nivel de tensión (parámetro V+ en FFFF) en un tiempo de 40ms (parámetro ST en 40) para que tenga tiempo suficiente de enviar los datos (trama API "IO Data Sample") por radio y durmiendo por un tiempo de 5 segundos (parámetro SP en 500).

Hardware módulo Coordinador registrador.

El coordinador de la red Zigbee es a su vez el registrador de la WSN y al disponer de capacidad de procesamiento también se encarga de recopilar la información de las entradas analógicas de los módulos remotos y calcular las temperaturas de cada sensor en función de esta información.

Los sensores de tipo NTC, poseen la particularidad de que la resistencia no varía de forma lineal en función de la temperatura por lo que deben linealizarse. Para esto, se utiliza la ecuación desarrollada por Scarr y Settingington (Sánchez-Mares et al., 2010) que se presenta en la fórmula 1 en la que se considera un parámetro β que se obtiene de la documentación del fabricante del sensor (EPCOS AG., 2009) y las temperaturas son en grados kelvin.

$$R_t = R_0 e^{\left\{ \beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right\}} \quad (1)$$

Para pasar a grados centígrados, se tiene en cuenta que para el cálculo de temperatura T se debe restar 273,15 al resultado que es el equivalente en kelvin de grados centígrados.

El fin de enviar el nivel de tensión de alimentación desde el modulo sensor es por el motivo de que la fuente de alimentación no es regulada sino que depende de la carga de la batería por lo que la lectura de la temperatura registrada a través del NTC conectada a la entrada analógica depende de la carga de la batería.

En la figura 3, se observa como varía la lectura de tensión de la entrada analógica conectada al sensor en función de la carga de batería. Como prueba se consideró una tensión de alimentación de 3,3V para la curva superior y 2,2V para la inferior, el mínimo está dado por el mínimo nivel de tensión de alimentación con el que se puede alimentar al módulo XBEE que es de 2,1V.

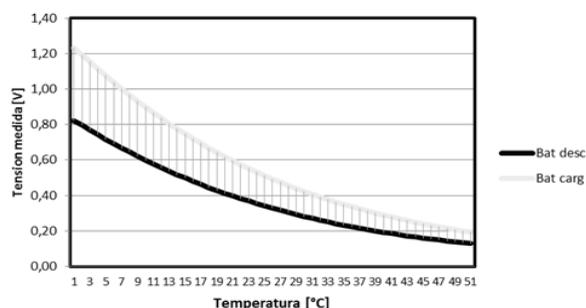


Figura 4. - Valores de tensión en entrada analógica de XBEE sensor vs temperatura para dos niveles de tensión de alimentación aplicados.

Como puede verse en la fórmula 2 la resistencia del termistor es afectada por un factor calculado a partir de la tensión de alimentación del módulo remoto, donde VBatería es la tensión de la batería que alimenta el módulo sensor y que se envía en la trama API y el valor BitsAD es el valor digital de 10 bits correspondiente a la medición del conversor Analógico-Digital (AD) de la entrada analógica en la cual se conecta el divisor resistivo del NTC.

$$T = \frac{\beta}{\ln\left(\frac{R_t \times \left(\frac{V_{batería}}{Bits_{AD} \times 1,2} - 1\right)}{R_0}\right) + \frac{\beta}{T_0}} - 273,15 \quad (2)$$

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Para la calibración del sensor XBEE remoto lo primero que se definió fue el β correspondiente al NTC utilizado que fue obtenido de la hoja de datos del mismo. El valor para el modelo utilizado correspondiente a 10k Ω es de 3988 \pm 1%, por lo que se tomó como valor para la linealización el valor medio de 3988, es decir, sin considerar la incertidumbre. Posteriormente durante la confección y pruebas del módulo construido se realizan ajustes a través de la resistencia multi-vuelta de 2k Ω para varios puntos de la curva buscando ajustar en función de los valores de tabla disponibles del fabricante. Las pruebas posteriores dieron buenos resultados luego del ajuste.

Posteriormente se realizó un contraste contra un termómetro y termocupla tipo J, para visualizar el comportamiento ante un cambio de temperatura utilizando un horno controlado a través de lazo PID utilizado para ensayos de impronta de bolilla en plásticos disponible en Laboratorio de Mediciones y Ensayos

(LaMyEn) de UTN FRSF. Los resultados se muestran en la gráfica de la figura 5. Los valores de temperatura obtenidos del sensor XBEE NTC fueron observados y registrados en el módulo registrador.

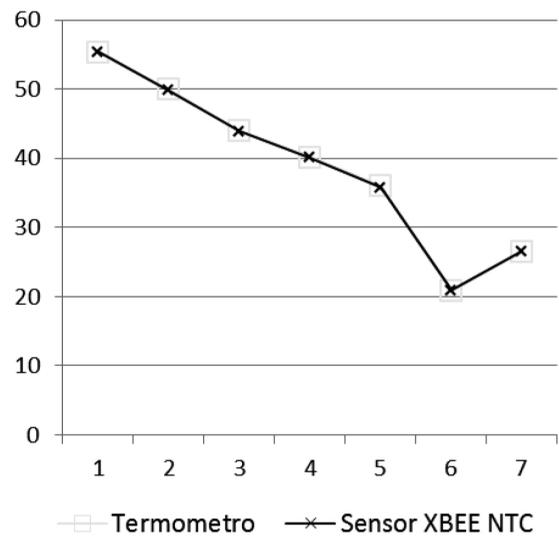


Figura 5. Comportamiento del sensor XBEE NTC frente a Termómetro y termocupla tipo J.

Las temperaturas linealizadas en el registrador presentan un muy pequeño desvío de un máximo de 0,56% de error relativo al termómetro. Los valores correspondientes a la figura 5 se muestran en la tabla II a continuación:

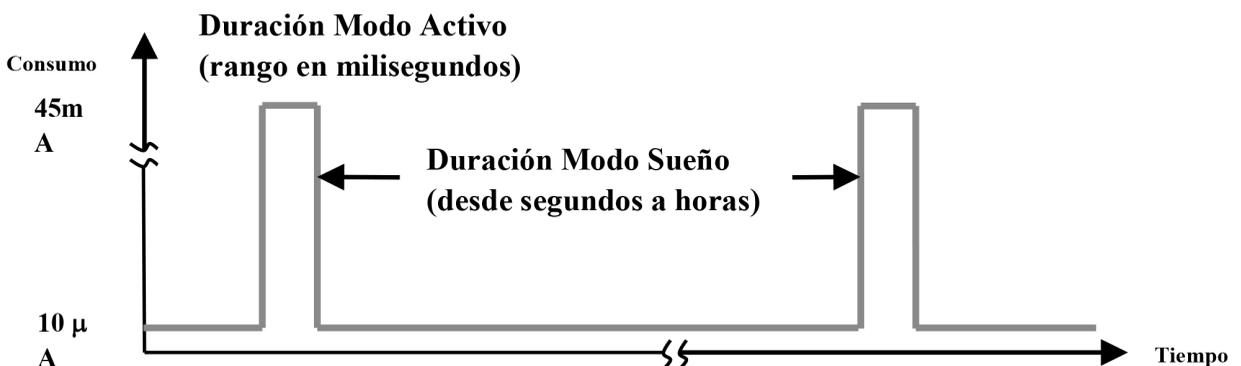


Figura 6 - Esquema para el cálculo de la autonomía de batería del módulo sensor XBEE.

Intervalo	Termometro	Sensor XBEE NTC
1	55,3	55,39
2	50,0	49,77
3	44	43,89
4	40,2	40,1
5	36	35,8
6	20,8	20,87
7	26,6	26,54

Tabla II - Valores del contraste realizado entre el sensor XBEE.

La confección del módulo registrador requiere mejoras en el diseño mecánico para incorporar adecuadamente todos los elementos en un mismo receptáculo. Para ello se ha diseñado una placa que interconecta cada uno de los elementos y diseñada de manera que todos los puertos de los distintos elementos sean accesibles desde el exterior.

Autonomía teórica del sensor XBEE remoto

Para calcular la duración de las baterías, primero se calculó la corriente eficaz del sensor en función del esquema que se muestra en la figura 6.

La fórmula utilizada para el cálculo es la siguiente (fórmula 3):

$$I_{ef} = I_{sleep} \left(\frac{T_{sleep}}{T_{sleep} + T_{tx}} \right) + I_{tx} \left(\frac{T_{tx}}{T_{sleep} + T_{tx}} \right) \quad (3)$$

Dónde: I_{ef} (Corriente eficaz), I_{sleep} (Corriente en modo sleep), I_{tx} (Corriente en transmisión), T_{sleep} (Tiempo en sleep), T_{tx} (Tiempo de transmisión).

De acuerdo a los datos extraídos de la documentación de los transceptores XBEE, la corriente en transmisión es de 45mA y la corriente en modo sleep es de 10µA. Además, en función de las pruebas preliminares

realizadas, el tiempo necesario para realizar el envío completo de la trama API a través del XBEE, es de 40 ms y estableciendo un intervalo de sueño de 1 minuto, la corriente eficaz obtenida es de 0,04 mA

Una vez obtenida la corriente eficaz, y teniendo la carga que dispone la pila (1500mAh), se calcula el tiempo de autonomía de las baterías en horas. Considerando que el sensor utiliza dos pilas en serie, la carga es igual a la de 1 sola pila (Fórmula 4).

$$A = \frac{Q_p}{I_{ef}} \quad (4)$$

Dónde: A (Autonomía en horas), Q_p (Carga de la pila), I_{ef} (Corriente eficaz del sensor).

En función de los datos, el resultado obtenido es de 37500 horas lo que equivalen a aproximadamente 4 años y 3 meses que resulta en una autonomía muy buena teniendo en cuenta los recambios de batería.

CONCLUSIONES

En función de los resultados obtenidos en las pruebas en contraste con el termómetro se observa una estabilidad en los valores de temperatura y un seguimiento con poco desvío de la curva de temperatura del otro sistema de medición conformado por el termómetro y la termocupla.

En función de cálculos teóricos se puede predecir que no presentará desvíos de consideración ante la variación de tensión de batería gracias a la incorporación como variable en la linealización del sensor.

La utilización del módulo XBEE sin la adición de otro microcontrolador y parametrizándolo adecuadamente permite ahorros considerables de potencia que implican una autonomía teórica de más de 4 años siendo la vida útil de las baterías no recarga-

bles utilizadas (DURACEL MN1500) de unos 10 años aproximadamente.

Como trabajos futuros se pretende incorporar otros tipos de sensores para medición de otros fenómenos físicos así como dispositivos con otras fuentes de alimentación. Adicionalmente se pretende incorporar dispositivos Zigbee Routers (R) con sensor incorporado para establecer redes con topologías

malladas y arquitectura jerárquica.

Las universidades como entes generadores de propuestas innovadoras a nivel regional, como la presentada, es uno de los fundamentos del proyecto en el cual se basa el presente trabajo. La herramienta presentada permite a la institución formadora promover el pensamiento innovador en alumnos y becarios a través de nuevos desarrollos.

REFERENCIAS

- Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., Cayirci, E., "Wireless sensor networks: a survey". *Broadband and Wireless Networking Laboratory, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Elsevier Science B.V, USA, pág. 1, (2001).*
- Mainwaring, A., Culler, D., Polastre, J., Szewczyk, R., Anderson, J., "Wireless sensor networks for habitat monitoring". *WSNA'02, Atlanta, Georgia, USA, pág. 1, (2002).*
- Martinez, K., Hart, J., Ong, R., "Environmental sensor networks". *IEEE Computer, (2004).*
- Cardell-Oliver, R., Smettem, K., Kranz, M., Mayer, K., "A reactive soil moisture sensor network: Design and field evaluation". *International Journal of Distributed Sensor Networks, págs. 149-162, vol. I, nro. 2, (2005).*
- Musaloiu-E, R., Terzis, A., Szlavecz, K., Szalay, A., Cogan, J., Gray, J., "Life under your feet: A wireless soil ecology sensor network". *Proceedings Of 3rd Workshop on Embedded Networked Sensors, (2006).*
- Yang, J., Li, X., "Design and implementation of low-power wireless sensor networks for environmental monitoring". *Proceedings of IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Information Security, IEEE, China, pág. 1, (2010).*
- IEEE-TG15.4., "Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)": *IEEE standard for Information Technology, (2003).*
- Zigbee Alliance, (2015). <http://www.zigbee.org>
- Faludi, R., "Building Wireless Sensor Networks". *First Edition, O'Reilly Media, Inc., USA, (2010).*
- Lin, S., Liu, J., Fang, Y., "ZigBee Based Wireless Sensor Networks and Its Applications in Industrial". *Department of Automation Wuhan University, China, (2007).*
- Digi International Inc., "Operation Manual v2.x.7x - XBEE®/XBEE-PRO® ZB RF Modules". *Minnetonka, USA, (2012).* <http://www.digi.com>
- Maxim Integrated, "Datasheet - DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer". *Rio Robles, USA, (2008).*
- Arduino, (2015). <http://www.arduino.cc>
- Sánchez-Mares, G., Padilla-García, J., Sánchez-Mares, F., Lara-Colón, R., "Cálculo de parámetros de la ecuación HOGE-3 para termistores NTC mediante simulated annealing". *Universidad Politécnica de Aguascalientes, México, (2010).*
- EPCOS AG., "Datasheet - NTC thermistors for temperature measurement - Miniature sensors with bendable wires - Series/Type: B57867S". *Alemania, (2009).*