



Parámetros de configuración en módulos XBEE-PRO® S2B ZB para medición de variables ambientales

Configuration Parameters in Module XBEE-PRO® ZB S2B for Measuring Environmental Variables

Carlos Alberto Vera Romero*, Jhon Erickson Barbosa Jaimes**,
Diana Carolina Pabón González***

Fecha de recepción: 2 de septiembre de 2014

Fecha de aceptación: 6 de abril de 2015

Como citar: Vera Romero, C. A., Barbosa Jaimes, J. E., & Pabón González, D. C. (2015). Parámetros de configuración en módulos XBEE-PRO® S2B ZB para medición de variables ambientales. *Revista Tecnura*, 19(45), 141-157. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a11

RESUMEN

Este artículo presenta información sobre la configuración de la comunicación inalámbrica mediante los protocolos del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos IEEE 802.4.15 y ZigBee®. Haciendo uso de los módulos de radiofrecuencia XBee-PRO® S2B ZB de Digi International Inc., se muestra la fase de diseño del enlace inalámbrico utilizando la topología estrella; se realiza la caracterización de los parámetros para configurar los dispositivos de radiofrecuencia que permiten la comunicación para la medición de los parámetros de algunas variables ambientales mediante el acoplamiento de diversos sensores utilizando el XBee Shield para la placa del microcontrolador Arduino Mega 2560. Se forman cuatro nodos, cada uno de los cuales permite medir cuatro variables: temperatura ambiental, humedad relativa, precipitación

y radiación solar global. A su vez, el coordinador y una tarjeta Arduino Ethernet permiten visualizar los datos en tiempo real mediante un aplicativo en la red de área local.

Palabras clave: IEEE 802.15.4, interfaz de programación de aplicaciones, XBee-Pro® S2B, ZigBee®.

ABSTRACT

This article presents information on the configuration of the wireless communication through the Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE 802.4.15 and ZigBee® protocols, using RF modules XBee-PRO® ZB S2B Digi International Inc. The design phase of the wireless link using the star topology is shown; it is also characterized the parameters for the configuration of radio frequency devices that enable the communication for the measurement of parameters of some environmental

* Ingeniero electrónico, especialista en Pedagogía Universitaria, especialista en Gestión de Proyectos Informáticos, magíster en Controles Industriales. Docente Asistente, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería, Pamplona, Colombia. Contacto: carlos.vera@unad.edu.co

** Ingeniero mecánico, magíster en Ingeniería Mecánica. Docente Asistente, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería, Cúcuta, Colombia. Contacto: jhon.barbosa@unad.edu.co

*** Ingeniera mecatrónica, especialista en Pedagogía para el Desarrollo del Aprendizaje Autónomo. Docente Ocasional, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Vicerrectoría de Medios y Mediaciones Pedagógicas, Pamplona, Colombia. Contacto: diana.pabon@unad.edu.co

variables, by coupling various sensors using the XBee shield for Arduino Mega 2560 microcontroller board making up four nodes, allowing each one to measure four variables: environment temperature, relative humidity, precipitation and global solar radiation. In turn, the coordinator and

Arduino Ethernet card allows to observing the data in real time through an application on the local area network.

Keywords: application programming interface, IEEE 802.15.4, XBee-Pro® S2B, ZigBee®.

INTRODUCCIÓN

Una red de sensores inalámbrica es una colección de nodos organizados en una red cooperativa (Hill, y otros, 2000). Las redes de sensores son la clave para la recopilación de la información que necesitan los entornos inteligentes, ya sea en edificios, servicios públicos, domótica, en sistemas industriales, transporte u otros lugares (Lewis, 2004).

La creación de redes de sensores inalámbricos es una tecnología emergente que tiene una amplia gama de aplicaciones potenciales, incluyendo la vigilancia del medio ambiente, espacios inteligentes, los sistemas médicos y la exploración robótica (Ye, Heidemann, & Estrin, 2002).

Las redes inalámbricas de sensores comúnmente se les denominan WSN (Wireless Sensor Network) (Stankovic, 2008). Las WSN es un sistema compuesto por Tx/Rx (transceptores) RF, sensores, microcontroladores y fuentes de poder, que generalmente es autoorganizable, autoconfigurable, autodiagnosticable y autoreparable (Jiménez, Ravelo, & Gómez, 2010). Las WSN han estado atrayendo un creciente interés por apoyar a una nueva generación de sistemas de computación ubicua con un gran potencial para muchas aplicaciones, tales como vigilancia, control medioambiental, control de atención médica o de domótica (Koubâa, Alves, & Tovar, 2006).

Una red inalámbrica de sensores permite obtener información de un fenómeno físico, procesando la información para luego ser enviada a un nodo central de coordinación en forma remota, pero con ciertas restricciones. Ahora bien, para

el diseño de una red de este tipo existen diversas tecnologías de comunicación inalámbrica, pero este artículo se centra en la utilizada por los módulos de radiofrecuencia XBee-Pro® S2B. El protocolo IEEE 802.15.4 (Howitt & Gutierrez, 2006) especifica la subcapa MAC y la capa física para LR-WPAN (en lo sucesivo designada como PAN, o sea, red de área personal). El protocolo 802.15.4 IEEE está muy asociado con el protocolo ZigBee® (ZigBee Alliance, 2005), que especifica las capas superiores del protocolo IEEE 802.15.4 para proporcionar una pila de protocolo completa, de bajo costo, bajo consumo de energía y de baja tasa de transmisión en comunicaciones inalámbricas (Koubâa, Alves, & Tovar, 2007). ZigBee® / IEEE 802.15.4 es una tecnología inalámbrica basada en estándares diseñados para satisfacer las necesidades de las redes de bajo costo, de sensores inalámbricos de baja potencia y de control en casi cualquier mercado, además se puede utilizar en casi cualquier lugar, es fácil de implementar y requiere poca energía para funcionar (Kinney, 2003). Los módulos XBee son dispositivos utilizados para enviar y recibir datos de forma inalámbrica valiéndose del protocolo IEEE 802.15.4, los cuales pueden funcionar dentro de una topología de red de diferentes maneras, incluyendo el Coordinador, Router y End Device (Faludi, 2010).

La topología de una red de sensores inalámbricos puede ser clasificada en cuatro categorías: topología punto, topología de estrella, topología de clúster árbol y topología de malla (figura 1) (Faludi, 2010).

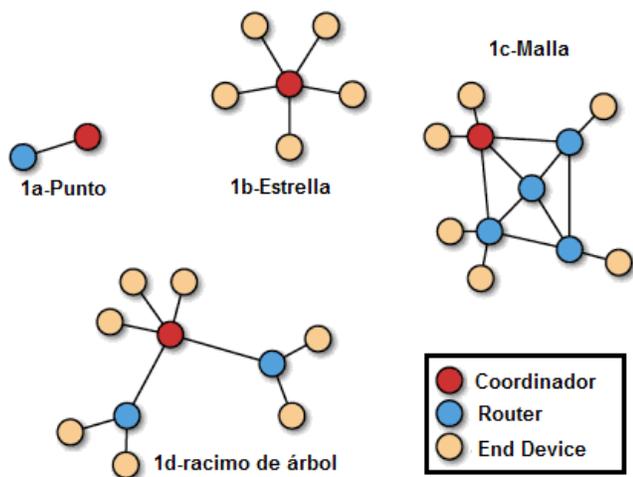


Figura 1. Topologías ZigBee®: par, estrella, malla y de árboles de racimo.

Fuente: Faludi (2010).

Este artículo proporciona un estudio de la aplicación de las redes de sensores inalámbricos aplicados en la medición de algunas variables meteorológicas. Se diseña un sistema de hardware y software con capacidad de acceso y gestión de datos de forma remota, con una topología estrella, la cual está formada por un módulo que desempeña el papel de coordinador de la red, y cuatro módulos adicionales que cumplen la función de dispositivos finales. La tabla 1 muestra la asignación dada a cada dispositivo XBee-PRO® de la serie 2.

Tabla 1. Asignación rol dispositivo XBee-PRO® S2B

Dispositivo	Función
Módulo 0	Coordinador
Módulo 1	End Device 1
Módulo 2	End Device 2
Módulo 3	End Device 3
Módulo 4	End Device 4

Fuente: elaboración propia.

METODOLOGÍA

Caracterización de los parámetros en la configuración de los módulos XBee-Pro® S2B. Módulo XBee-Pro® S2B ZB soporta tanto modo transparente como API (Application Programming Interface) interfaces seriales (Digi®, 2009).

Funcionamiento transparente: los módulos actúan como una línea serie de reemplazo. Todos los datos recibidos a través del UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) pin DIN se ponen en cola para la transmisión por radiofrecuencia (RF). Cuando los datos de RF se reciben, los datos se envían a través del pin DOUT.

Operación de la API: es una alternativa a la operación transparente. La API basada en tramas extiende el nivel al de una aplicación host, de modo que puede interactuar con las capacidades de red del módulo.

Cuando está en modo API, todos los datos que entran y salen del módulo están contenidos en las tramas que definen las operaciones o eventos dentro del módulo (Yawit, 2011).

Para comprender la configuración de los módulos XBee-PRO® S2B, se realizó una descripción de los principales parámetros que tienen que ser establecidos en los dispositivos RF para que la red pueda funcionar de forma correcta. A continuación se describe los parámetros configurables en los módulos XBee-Pro® S2B ZB.

Parámetro CH: Permite asignar el canal que será utilizado para transmitir o recibir datos entre los módulos (tabla 2).

Tabla 2. Parámetro CH

Rango	0x0B-0x1A
Valor seleccionado	0x0c

Fuente: elaboración propia.

Parámetro ID: Permite identificar a una Red de Área Personal en particular (tabla 3). Para enviar

un mensaje a todas las Redes de Área Personal el valor de ID debe ser 0xFFFF (se supone la convención de Lenguaje C para representar números hexadecimales).

Tabla 3. Parámetro ID

Parámetro ID	
Rango	0-0xFFFF
Valor seleccionado	123

Fuente: elaboración propia.

Parámetro DH: Corresponde a los últimos 32 bits (más significativos) de los 64 bits correspondientes a la dirección de destino (tabla 4). Este valor, en conjunto con el parámetro DL, forma la dirección de destino usada para la transmisión. Para transmitir utilizando direcciones de 16 bits, el valor de DH debe ser cero, y el valor de DL debe ser inferior a 0xFFFF.

Parámetro DL: Corresponde a los primeros 32 bits (menos significativos) de los 64 bits que forman la dirección de destino. El valor de DL, en conjunto con el valor de DH, define la dirección de destino. Para emplear direcciones de 16 bits, el valor de DH debe ser 0 y el valor de DL debe ser menor a 0xFFFF. En la tabla 5 se muestra la elección.

Parámetro MY: Define una dirección de origen de 16 bits. Para deshabilitar la dirección de 16 bits y habilitar la dirección de 64 bits, se debe poner MY=0xFFFF. La dirección de origen de 64 bits siempre está habilitada. La tabla 6 muestra el valor elegido.

Parámetro SH: admite leer los 32 bits más significativos de los 64 bits que forman la dirección de origen. La dirección de origen es un número único, asignado por el IEEE para cada módulo de RF.

Parámetro SL: permite leer los 32 bits menos significativos de los 64 bits que forman la

Tabla 4. Parámetro DH

Rango	0-0xFFFFFFFF				
Valor seleccionado	COOR	MOD 1	MOD 2	MOD 3	MOD 4
	0	DH Coor	DH Coor	DH Coor	DH Coor

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Parámetro DL

Rango	0-0xFFFFFFFF				
Valor seleccionado	COOR	MOD 1	MOD 2	MOD 3	MOD 4
	0	DL Coor	DL Coor	DL Coor	DL Coor

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Parámetro MY

Rango	0-0xFFFF				
Valor seleccionado	COOR	MOD 1	MOD 2	MOD 3	MOD 4
	0	1	2	3	4

Fuente: elaboración propia.

dirección de origen. La dirección de origen es establecida por el IEEE, como un número único para cada módulo.

Parámetro RN: El valor de este parámetro es el mínimo valor usado en el exponente del algoritmo de back-off, para determinar los periodos de tiempo que se debe esperar antes de transmitir de acuerdo con el método CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance), con el objetivo de evitar colisiones. Según la tabla 7, el valor asignado en la configuración es el valor por defecto RN=0, lo cual permite evitar una colisión; es deshabilitada durante la primera iteración del algoritmo.

Tabla 7. Parámetro RN

Rango	0-3
Valor seleccionado	0

Fuente: elaboración propia.

Parámetro CE: El valor de este parámetro define el papel que desempeña el módulo dentro de la red y se ha definido según la tabla 8.

Tabla 8. Parámetro CE

CE	Configuración				
1	Coordinador				
0	Router				
Valor seleccionado	COOR	MOD 1	MOD 2	MOD 3	MOD 4
	0	1	2	3	4

Fuente: elaboración propia.

Parámetro SC: Este parámetro define la lista de los canales que son examinados para determinar si están activos y el nivel de energía detectada. Este parámetro afecta cuando inicia el modo de comandos, durante la asociación de dispositivos

finales y durante el establecimiento de un coordinador. Un bit representa el canal (desde el 11 hasta el 26). Con el valor por defecto se examinan los canales 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23. El valor asignado ha sido SC=0x1FFE.

bit 0-0x0B bit 4-0x0F bit 8 – 0x13 bit12 – 0x17
 bit 1-0x0C bit 5-0x10 bit 9 – 0x14 bit13 – 0x18
 bit 2-0x0D bit 6-0x11 bit 10– 0x15 bit14 – 0x19
 bit 3-0x0E bit 7-0x12 bit 11– 0x16 bit15 – 0x1A

Parámetro SD: establece el tiempo para inspeccionar el canal. Para un dispositivo final, establece el tiempo durante el cual se examina el canal en un proceso de asociación. En el caso de un coordinador, si la opción de reasignación de identificador de PAN está activada, establece el periodo de tiempo durante el cual se examina el canal para localizar redes existentes. Asimismo, si la opción para reasignar el canal está activada, determina la cantidad de tiempo durante el cual se examinará el nivel de energía del canal, para determinar sobre cuál canal se operará. SD varía entre 0 a 15. El tiempo es dado por: tiempo = (número de canales)*(2^{SD})*(15,36 ms). La tabla 9 muestra el valor seleccionado.

Tabla 9. Parámetro SD

Rango	0-0x0F
Valor seleccionado	4

Fuente: elaboración propia.

Parámetro A1: Este valor permite establecer cómo un dispositivo final se puede asociar, como se indica en las siguientes opciones de la tabla 10.

Parámetro A2: Define cómo el coordinador se puede asociar. En la tabla 11 se observan las opciones.

Tabla 10. Parámetro A1

Número de bit	Opción de Asociación
0 – reasignación de identificador de PAN (ID PAN)	0 – El dispositivo final solo podrá asociarse con un coordinador que tenga el mismo identificador de red PAN. 1 – El dispositivo final debe asociarse con un coordinador que opere con cualquier identificador de PAN.
1 – Reasignación de canal	0 – Solo podrá asociarse con un coordinador que opere dentro de su mismo canal 1 – Debe asociarse a un coordinador que opere en cualquier canal.
2–Auto asociación	0 – El dispositivo final no intentará asociarse. 1–El dispositivo final debe intentar asociarse hasta lograrlo.
3 – Sondeo del coordinador	0 – El dispositivo no sondeará al coordinador para requerir mensajes pendientes. 1 – El dispositivo enviará un requerimiento.
4-7	Reservados
Valor seleccionado	0

Fuente: Digi® (2009)

Tabla 11. Parámetro A2

Número de bit	Opción de asociación
0 – reasignación de identificador de PAN(ID PAN)	0 – El coordinador no examinará los canales para encontrar identificadores de PAN. Este operará con su identificador de PAN. 1 – El coordinador examinará los canales para determinar identificadores de PAN disponibles. Si un identificador de PAN encontrado crea conflicto, el identificador será cambiado.
1 – Reasignación de canal	0 – El coordinador no examinará el nivel de energía para encontrar un canal que se encuentre libre. El coordinador operará en el canal establecido por el parámetro CH. 1 – El coordinador examinará la energía de los canales para encontrar un canal que se encuentre libre y operará en este.
2–Permitir Asociación	0 – El coordinador no permitirá que cualquier dispositivo se asocie con él. 1 – El coordinador permitirá que un dispositivo se asocie con él.
4-7	Reservados
Valor seleccionado	0

Fuente: Digi® (2009).

Parámetro AS: Inspecciona un canal. Se envía un requerimiento a todas las redes en cada canal para solicitar información. *AS* determina el tiempo durante el cual se escuchará la respuesta al requerimiento. El mensaje recibido en respuesta al requerimiento contiene información como la dirección del coordinador, el identificador de *PAN* del coordinador, el tipo de dirección que usa el

coordinador (16 o 64 bits), el canal en el cual opera, entre otros.

Parámetro ED: Comprueba el nivel de energía máximo que se detectó en cada canal.

Parámetro PL: Define el nivel de potencia con el cual el módulo de RF transmitirá. A continuación, en la tabla 12 se indica las opciones disponibles y el valor seleccionado.

Tabla 12. Parámetro PL

Valor	Nivel de potencia
0	-10dBm
1	-6dBm
2	-4dBm
3	-2dBm
4	0dBm
Valor seleccionado	4

Fuente: Digi® (2009).

Parámetro BD: En la tabla 13 se indican los posibles valores que pueden ser seleccionados y el parámetro correspondiente, además de la velocidad seleccionada.

Tabla 13. Parámetro BD

Valor	Configuración (bps)
0	1200
1	2400
2	4800
3	9600
4	19200
5	38400
6	57600
7	115200
Valor seleccionado	3

Fuente: Digi® (2009).

Parámetro AP: Establece el modo de operación del módulo. AP=0 operación transparente y AP=1 modo de operación API (Application Programming Interface). El modo de operación empleado es API. El valor seleccionado es AP=2, se ha seleccionado este valor ya que con las pruebas realizadas en la comunicación con el Arduino no fue posible establecerse en modo API = 1, una comunicación con los diferentes módulos XBee-Pro® S2B (tabla 14).

Tabla 14. Parámetro AP

Valor	Modo de operación
0	Modo Transparente
1	Modo API habilitado
2	Modo API habilitado (con escape de caracteres)
Valor seleccionado	2

Fuente: Digi® (2009).

Parámetro CA: Establece el umbral que permite decidir al módulo si existen las condiciones para transmitir o no un paquete (tabla 15).

Tabla 15. Parámetro CA

Rango	0x050(-dBm)
Valor seleccionado	0x2C(-44dBm)

Fuente: elaboración propia.

Parámetro SM: Permite seleccionar el modo dormido, que es utilizado para reducir el consumo de potencia del módulo. El valor cero deshabilita el modo dormido, el módulo siempre está activo. El modo seleccionado es el 1, el cual permite entrar o salir del modo dormido mediante el cambio de nivel en el pin 9, llamado Sleep_RQ. La tabla 16 describe cada uno de los modos que pueden ser seleccionados y la tabla 17 muestra la elección de SM.

Tabla 16. Modos de configuración SM

Valor	Configuración
0	Deshabilitado
1	Hibernación
2	Pin doce
3	Reservado
4	Ciclo dormido
5	Ciclo dormido
Valor seleccionado	COOR 0

Fuente: elaboración propia.

La tabla 18 documenta la configuración de los dispositivos XBee-Pro® S2B ZB la red.

Formato de trama para trabajar en modo de operación API del XBee-Pro® S2B. El modo de operación API1 especifica cómo comandos, respuestas a comandos y mensajes del estado del módulo son enviados o recibidos a través del puerto serial del módulo. En el modo de operación API1, los datos son estructurados en tramas mediante un orden definido. La estructura general que requiere este modo de operación se indica en la figura 2 (Digi®, 2009).

A continuación se detalla la función de los campos que son comunes en todos los tipos de mensajes. *Delimitador de Inicio*, está formado por una secuencia de 8 bits que indica el inicio de la trama, la secuencia es 0x7E. Cualquier dato recibido antes del delimitador de inicio es descartado. *Longitud*, indica el número de bytes contenidos dentro del campo de datos de la trama. Este campo está conformado por un primer byte, el más significativo, y el segundo, el menos significativo.

Tabla 17. Elección del parámetro SM

Configuración Modo Dormido	Transición al Modo Dormido	Transición sale del Modo Dormido	Características	Consumo de potencia
Hibernación SM=1	Sleep_RQ (pin 9) en nivel alto	Sleep_RQ (pin 9) en nivel bajo	Un dispositivo controla el nivel del pin Sleep_RQ. Despierta en 13,2 ms	<10uA a 3,0Vcc
Pin Doce SM=2	Sleep_RQ (pin 9) en nivel alto	Sleep_RQ en nivel bajo	Un dispositivo controla el nivel del pin Sleep_RQ. Despierta en 2 ms	<50uA
Periodo de tiempo Dormido SM=4-5	Automáticamente entra a este modo	Despierta cuando termina el periodo de tiempo que debe dormir	El módulo despierta cada cierto intervalo de tiempo para detectar, si alguien quiere comunicarse con él.	<50uA

Fuente: elaboración propia.

Tabla 18. Resumen de la configuración de los parámetros seleccionados en los módulos XBee-PRO® S2B

Descripción	Parámetro	Módulo 0	Módulo 1	Módulo 2	Módulo 3	Módulo 4
Canal	CH	12	12	12	12	12
Identificador PAN	ID	1234	1234	1234	1234	1234
Dirección de Destino	DH	0	0	0	0	0
Dirección de Destino	DL	1 ó 2	0	0	0	0
Dirección de Origen (16 bits)	MY	0	1	2	3	3
Tiempo antes de transmitir	RN	0	0	0	0	0
Función (Coordinador/Dispositivo Final)	CE	1	0	0	0	0
Lista de canales para examinar	SC	0x1FFE	0x1FFE	0x1FFE	0x1FFE	0x1FFE
Tiempo para examinar el canal	SD	4	4	4	4	4
Asociación Dispositivo Final	A1	-	0	0	0	0
Asociación Coordinador	A2	0	-	-	-	-
Nivel de Potencia	PL	4(0dBm)	4(0dBm)	4(0dBm)	4(0dBm)	4(0dBm)
Umbral de decisión para transmitir	CA	0X2C (-44dBm)				
Velocidad de Transmisión	BD	3(9600bps)	3(9600bps)	3(9600bps)	3(9600bps)	3(9600bps)
Modo de operación	AP	1	1	1	1	1
Modo de sueño	SM	1	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

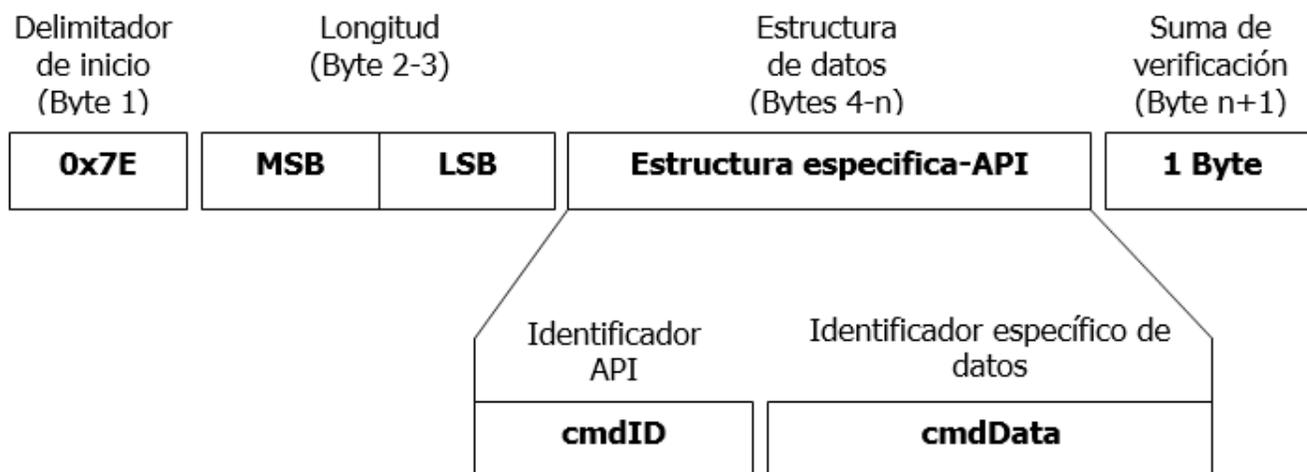


Figura 2. Estructura general de una trama en el modo de operación API.

Fuente: Digi® (2009).

Suma de Verificación (Check Sum), este campo está formado por un byte y permite verificar la integridad de los datos a la unidad receptora. Para calcular el valor que debe ser asignado a este campo, se debe sumar todos los bytes correspondientes al campo de datos de la trama (no se incluyen el delimitador de inicio ni la longitud). Si el resultado de la suma es superior a 0xFF, solamente se deben tomar los 8 bits menos significativos y al resultado obtenido restar de 0xFF; el resultado de esta operación es el valor que debe ir en el campo de suma de verificación. Para comprobar si el valor del campo de suma de verificación es correcto, se suman todos los bytes de la trama menos el delimitador de inicio y la longitud; si el resultado de esta suma es 0xFF, el valor es correcto; en caso contrario no lo es. *En el campo de datos de la trama*, guarda un determinado tipo de mensaje especificado por el identificador API. En la tabla 19 se indica el valor del identificador (hexadecimal) y el tipo de mensaje que corresponde.

Tabla 19. Identificador API y su tipo de mensaje

Identificador API	Tipo de mensaje
0x8A	Estado del módulo
0x08	Comando
0x09	Aplicar un comando
0x88	Respuesta a un comando
0x00	Requerimiento de transmisión (dirección 64-bits)
0x01	Requerimiento de transmisión (dirección 16-bits)
0x89	Estado de la transmisión
0x80	Paquete recibido (dirección 64-bits)
0x81	Paquete recibido (dirección 16-bits)

Fuente: Digi® (2009).

El enlace inalámbrico requiere el uso de tres tipos de mensajes en particular: i) un mensaje para solicitar la transmisión de datos usando una dirección de destino de 16-bits, ii) un mensaje que indica la recepción de un paquete (usando direcciones de 16-bits) y, iii) un mensaje que indica el estado de un paquete transmitido.

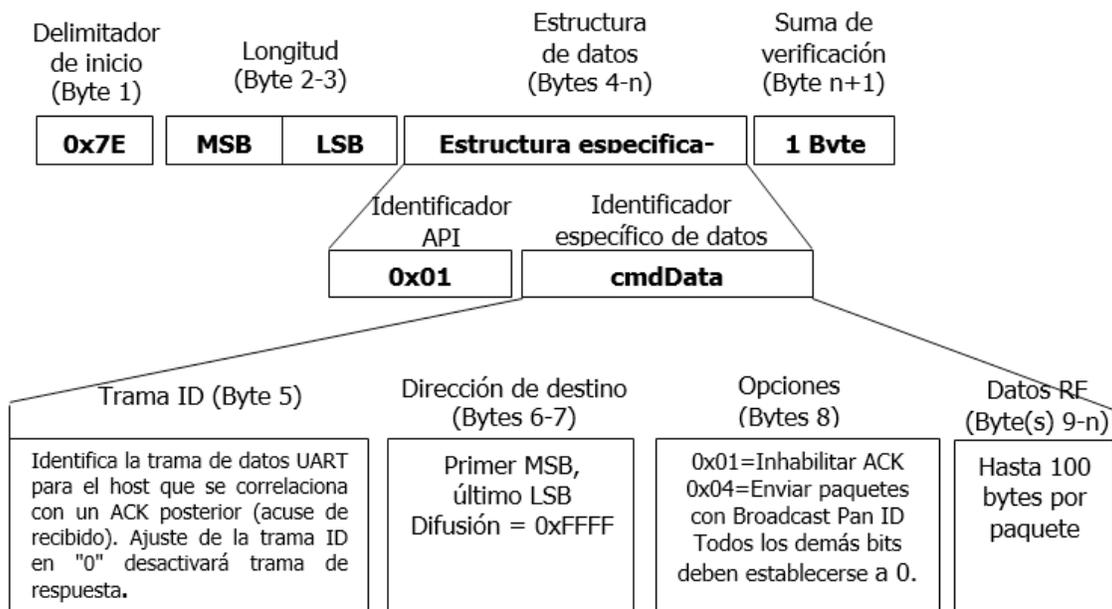


Figura 3. Estructura de una trama para transmitir datos

Fuente: Digi® (2009).

Los identificadores para estos mensajes son: 0x01, 0x81 y 0x89, respectivamente (Digi®, 2009). A continuación se explica más detalladamente la estructura de estos tipos de mensajes.

Estructura de una trama para transmitir datos: como se puede apreciar en la figura 3, la trama está conformada por varios campos. El campo de datos de la trama, a su vez, tiene varios campos, entre ellos se tiene que: el identificador API1 (tipo de mensaje), el identificador de trama, opciones y el campo de datos.

A continuación se describe la función que desempeña cada campo:

Identificador API: este campo está conformado por un byte, el cual indica el tipo de mensaje. El identificador para una trama de solicitud de transmisión usando direcciones cortas de 16-bits correspondiente es el 0x01.

Identificador de Trama: como su nombre lo indica, este campo permite reconocer a la trama, además permite relacionarla con su correspondiente acuse de recibo. Si el valor de este campo

es 0, se deshabilita la trama que indica el estado de la trama enviada.

Dirección de destino: este campo está formado por dos bytes, los cuales indican a quién está dirigida la trama. Primero se debe colocar el byte más significativo de la dirección y a continuación el menos significativo. Para enviar la trama a todas las unidades se debe utilizar la dirección 0xFFFF.

Opciones: este campo está formado por un byte, y permite deshabilitar el acuse de recibo o enviar la trama a todas las PAN.

Datos: este campo contiene la información que se desea enviar, puede tener hasta 100 bytes.

Estructura de la trama de recepción de un paquete: cuando un paquete es recibido por un módulo, este lo envía a través de su puerto serial mediante la estructura indicada en la figura 4 (Digi®, 2009).

Para este tipo de mensaje, el identificador API correspondiente es el 0x81 (recepción de un paquete usando dirección de 16-bits).

Dirección de origen: este campo permite indicar a la unidad receptora quién le envió el paquete. Este campo está formado por dos bytes, el primero representa el byte más significativo de la dirección de 16-bits y el segundo el menos significativo.

El campo RSSI (Received Signal Strength Indicator): este campo indica el nivel de potencia con que se recibieron los datos. Por ejemplo, si el valor de este campo es 0x25 (37 decimal), quiere decir que la potencia de la señal recibida es igual a -37dBm.

Opciones: este campo le permite saber a la unidad receptora cómo fue direccionada la trama. Este campo está formado por un byte: el bit 1 indica si la trama fue enviada con una dirección de difusión (DH=0xFFFF) y el bit 2 indica si la trama fue enviada a todas las PAN1 (ID PAN=0xFFFF).

Datos: este campo puede contener hasta 100 bytes, corresponde a los datos recibidos.

Estructura de una trama de estado de paquete: este mensaje se genera en respuesta a una solicitud de transmisión. En la figura 5 (Digi®, 2009)

se muestra esta clase de mensaje, que indica si el paquete enviado fue transmitido exitosamente o si la transmisión falló. El identificador API de trama proporcionado a este tipo de mensaje es 0x89.

Identificador de trama: este campo está formado por un byte y permite indicar la trama que está siendo reportada. Si el campo de identificador de trama del paquete enviado es 0x00, no se genera este mensaje.

Estado: este campo está formado por un byte e indica el estado de la trama enviada. Si el valor de este campo es 0x00, quiere decir que la transmisión se realizó exitosamente; un valor igual a 0x01 indica que el tiempo de espera para recibir el acuse de recibo expiró (no se recibió el ACK); un valor igual a 0x02 indica que el paquete no se envió porque no se dieron las condiciones adecuadas (el parámetro CA establece que la energía detectada en el canal debe ser superior a -44dBm para enviar un paquete), y por último, si el valor es igual a 0x03 quiere decir que el tiempo de espera para recibir una transmisión indirecta expiró.

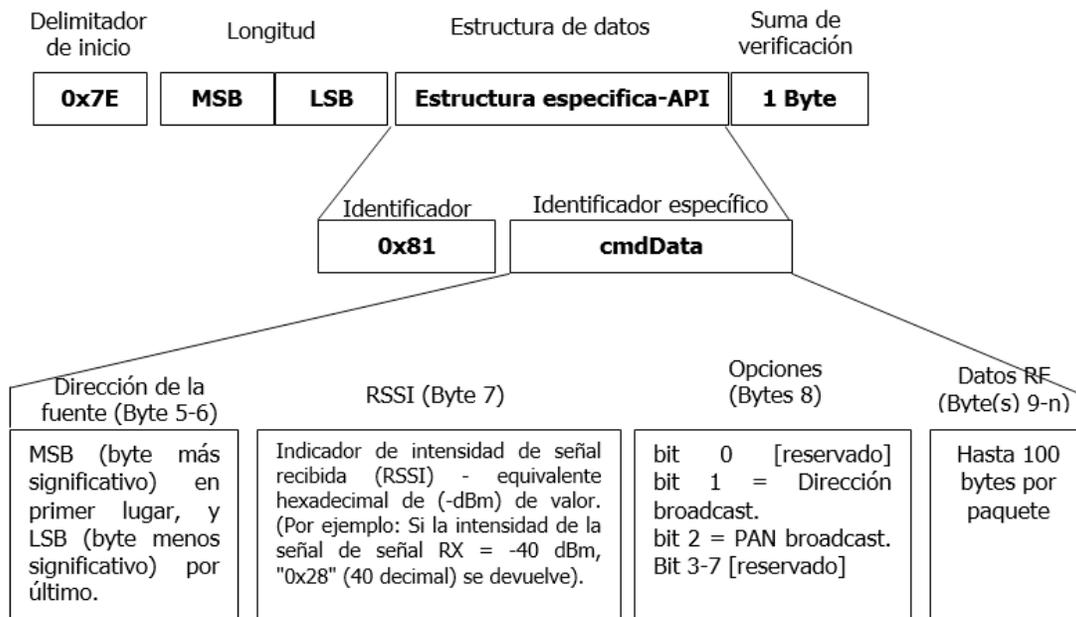


Figura 4. Estructura de una trama de recepción de un paquete.

Fuente: Digi® (2009).

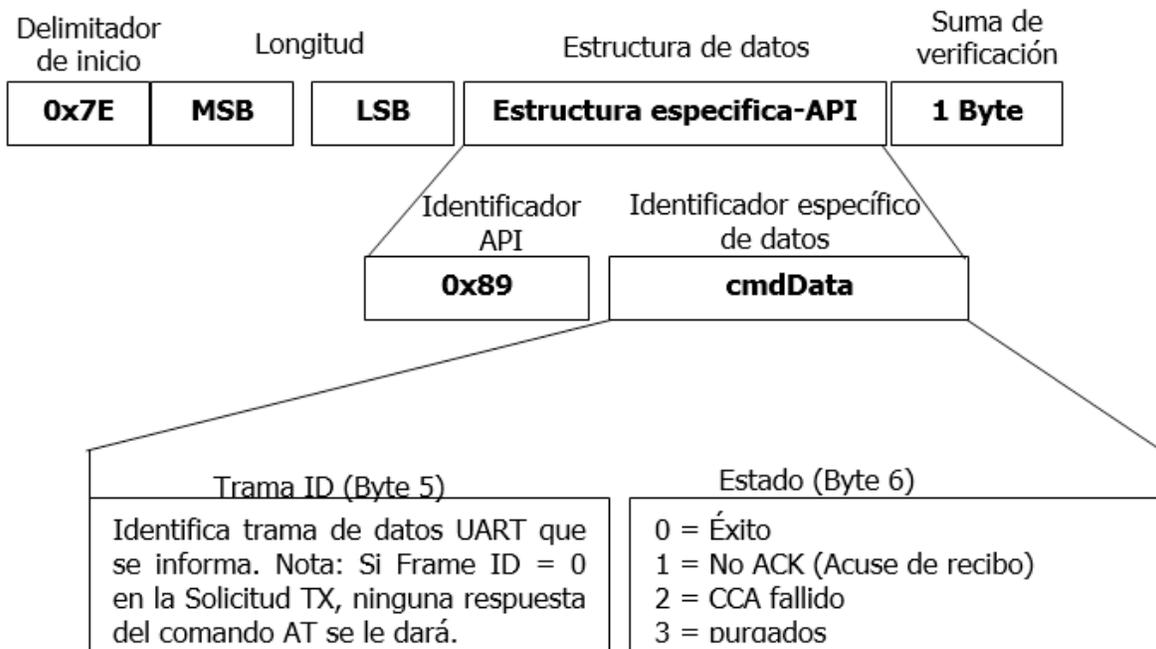


Figura 5. Estructura de una trama que indica el estado del paquete enviado.

Fuente: Digi® (2009).

RESULTADOS

X-CTU es un software de distribución libre suministrado por Digi International para interactuar fácilmente con productos de RF de Digi, el cual cuenta con cuatro pestañas principales, que son PC Settings tab, Range Test, Terminal y Modem Configuration. El software tiene una función con la que se puede acceder al firmware del módulo para estar en comando AT o API, así como ajustar el modo de comando deseado y secuencia. La pestaña de la prueba de rango se utilizó para comprobar el RSSI (Recibido Indicador de Cobertura) de cada XBee-Pro® S2B ZB en la red. La lengüeta del terminal es donde se puede enviar y recibir datos en formato hexadecimal o ASCII, y la pestaña de configuración del módem se usa para la lectura y escritura de firmware del módem de la radio del microcontrolador de acuerdo con los ajustes necesarios (Mansor, Adom, & Rahim, 2011). En la figura 6, se muestra

un pantallazo del programa X-CTU, en donde se configuraron los parámetros de los módulos XBee-Pro® S2B ZB, ya sea el del coordinador o el de cada módulo Router XBee-Pro® S2B.

Se utilizó el software X-CTU para configurar los módulos XBee-Pro® S2B ZBS2 Pro, haciendo uso del explorer USB (Universal Serial Bus), XBee-Pro® S2B ZB explorer USB, el cual permitió conectar y utilizar el módulo XBee-Pro® S2B ZB directamente mediante un puerto USB. La conexión se realizó con el acceso a los pines TX/RX del XBee-Pro® S2B. Además se empleó como una base inalámbrica desde el computador y así se pudo conectar sin el uso de cables a la placa utilizando el módulo XBee-Pro® S2B, como se muestra en la imagen de la figura 7.

Al instalar XBee-Pro® S2B ZB Explorer USB, se configuró y operó el módulo XBee-Pro® S2B ZB desde el computador, para lo cual se colocó dicho módulo en el XBee-Pro® S2B ZB Explorer USB y se conectó mediante el puerto USB al computador.

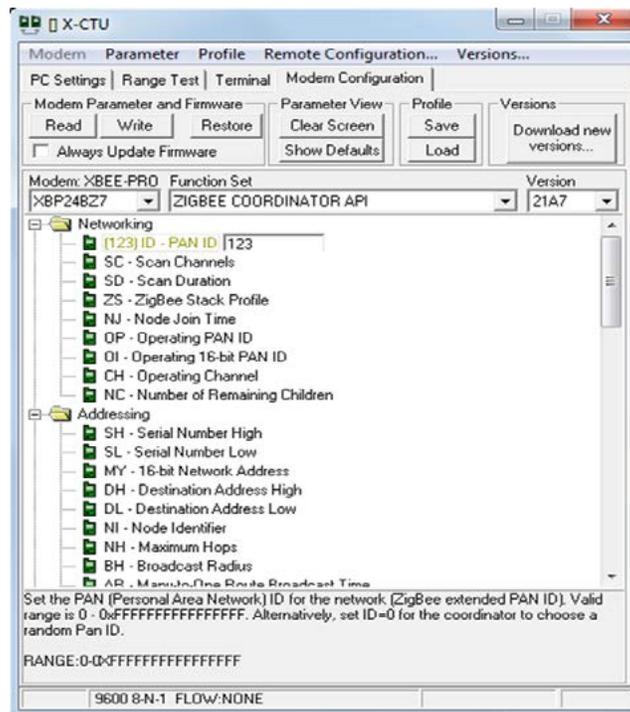


Figura 6. Entorno del programa X-CTU.

Fuente: elaboración propia.



Figura 7. Configuración del XBee-PRO® S2B ZB como router con el programa X-CTU.

Fuente: elaboración propia.

Sin embargo es importante señalar que para algunas versiones de Windows los *drivers* son instalados de manera automática, mientras que para otros se debe realizar el proceso de instalación de forma manual desde el administrador de dispositivos.

Iniciando el software X-CTU, en la figura 8 se observa que cuenta con cuatro pestañas principales, las cuales proporcionan soporte y control sobre los módulos de comunicación. La pestaña “PC Setting” permitió cambiar las características del puerto del computador con el que se va a configurar el XBee-Pro® S2B, modificar características como: velocidad de transmisión, control de flujo, bits de información, entre otras opciones. En la subpestaña “User Com Port” se pueden añadir los puertos del computador; después de seleccionado el puerto y conectado el XBee Explorer con su respectivo módulo, se da clic sobre la opción “Test/Query”, la cual despliega una ventana como la que se muestra en la figura 9. Dicha ventana confirmó la existencia de una comunicación entre el módulo XBee-Pro® S2B ZB y el computador, indicando el tipo del módem y la versión de firmware que tiene instalado en ese momento (el firmware cambia al cambiar las características de los módulos).

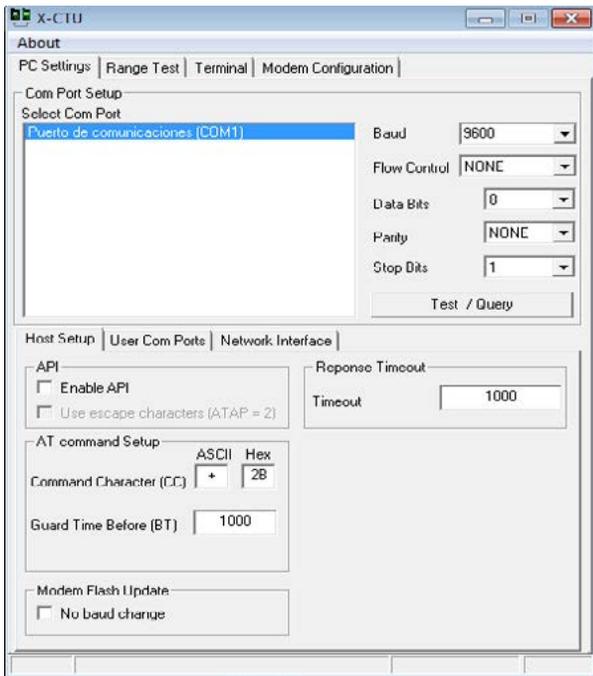


Figura 8. X-CTU Ventana principal.

Fuente: elaboración propia.

Las configuraciones de los parámetros en el programa X-CTU han sido las indicadas en la tabla 18. Sobre un estudio previo se realiza la caracterización y acople de los sensores de temperatura, humedad, precipitación y radiación solar, de manera que cada nodo queda como se indica en la figura 10.

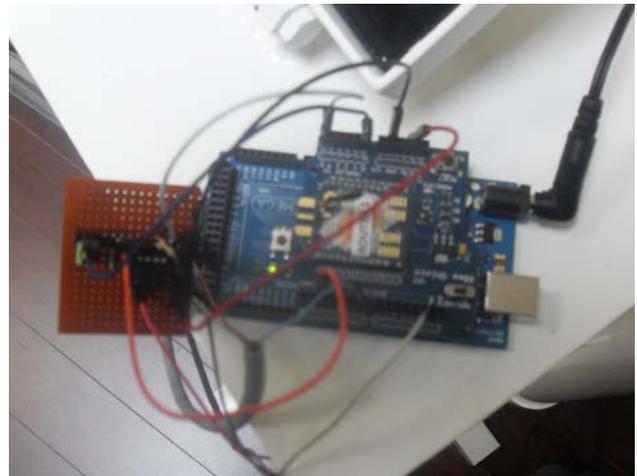


Figura 10. Montaje Router.

Fuente: elaboración propia.

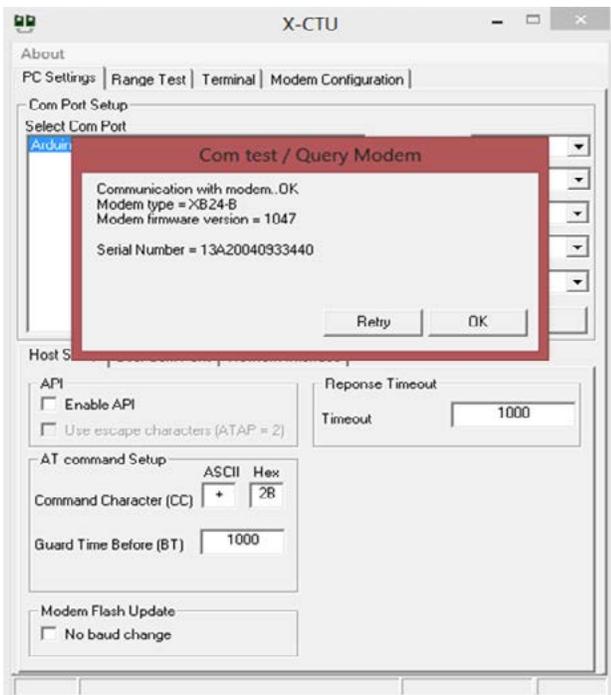


Figura 9. Test/Query.

Fuente: elaboración propia.

Cada estación está diseñada como se presenta en la figura 11. El nodo coordinador está conectado a la red local y muestra los datos en tiempo real de los datos adquiridos por los sensores. Realizando diversas pruebas, se calibran los sensores, y a través de una interfaz realizada por medio de Ethernet Arduino, se ingresa a un navegador desde la red local. Al digitar la dirección 192.168.36.78, correspondiente al proyecto SIGI-0044 Red inalámbrica de sensores basados en protocolo IEEE.802.15.4 para la medición de algunas variables ambientales, se pueden observar los dispositivos que se encuentran conectados en el momento de realizar esta prueba.

La figura 12 muestra la interfaz creada para la visualización de los datos obtenidos en tiempo real, imagen tomada en el momento de realizar pruebas de funcionamiento de la red.



Figura 11. Estación diseñada correspondiente al Nodo N.º 1.

Fuente: elaboración propia.

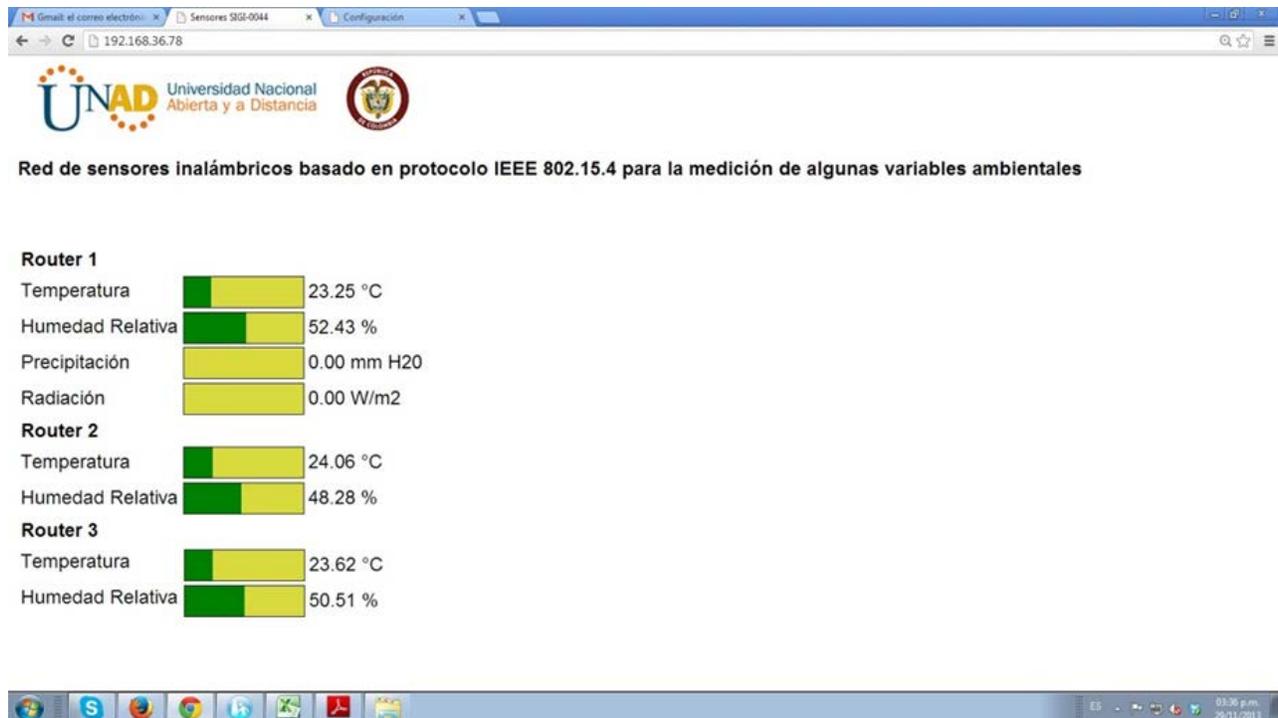


Figura 12. Acceso remoto a los datos de los nodos a través del coordinador del Router.

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Con la estandarización de productos, la alianza ZigBee® ha permitido hacer más simple, seguro, confiable y flexible el uso de redes de sensores en diversas aplicaciones.

La alianza ZigBee® se ha valido de otros estándares, como el IEEE802.15.4, para sus capas inferiores y algoritmos clásicos para ruteo y seguridad. La aplicación de la tecnología ZigBee® mediante el desarrollo del módulo XBee-Pro® S2B ZB es fácil de configurar una vez se han comprendido los parámetros que conlleva el protocolo. Es así que en este documento se ha resaltado la configuración de los parámetros y los modos de empleo de las estructuras de trama que indica el estado de transmisión, recepción y envío de paquetes a 16 bits.

El prototipo de estación remota y de red desarrollado posee características específicas para la aplicación seleccionada. Esto implicó un proceso de conocimiento de manejo de los módulos y ajuste de las diferentes señales provenientes de los distintos sensores, para lo cual se realizó previamente su correspondiente caracterización. Se caracterizaron y configuraron los módulos de radiofrecuencia XBee-Pro® S2B ZB, mostrando la fase de diseño del enlace inalámbrico utilizando la topología estrella. Que sirvió para la comunicación de diversos sensores utilizando el XBee shield para la placa del microcontrolador Arduino Mega 2560 formando cuatro nodos, permitiendo medir temperatura, humedad relativa, precipitación y radiación solar global en cada uno de los nodos, a su vez el coordinador y una tarjeta Arduino Ethernet permitió visualizar los datos en tiempo real mediante un aplicativo en la red de área local.

FINANCIAMIENTO

La investigación para realizar el presente proyecto ha sido financiada por el Sistema de Gestión de la Investigación (SIGI) de la Universidad

Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Colombia, mediante convocatoria interna N.º 002 con el código SIGI-0044 al Grupo de Investigación para el Desarrollo Económico, Tecnológico y Social GRINDES-COL0045135.

REFERENCIAS

- Digi®. (2009). *XBee®/XBee-PRO® RF Modules datasheet*. Recuperado de <https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf>.
- Faludi, R. (2010). *Building wireless sensor networks: with ZigBee, XBee, arduino, and processing*. Published O'Reilly Media, Inc., 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472
- Hill, J., Szewczyk, R., Woo, A., Hollar, S., Culler, D., & Pister, K. (2000). System Architecture Direction for Networked Sensors. *SIGOPS Operating Systems Review*, 34, 93-104.
- Howitt, I., & Gutierrez, J. (2006). IEEE 802.15.4 Low Rate-Wireless Personal Area Network Coexistence Issues. *Wireless Communications and Networking*, 3, 1481-1486.
- Jiménez, A., Ravelo, D., & Gómez, J. (2010). 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. *Revista Tecnura*, 14(27), 41-51.
- Kinney, P. (2003). ZigBee technology: Wireless control that simply works. *Communications design conference*, 2, 1-7.
- Koubâa, A., Alves, M., & Tovar, E. (2006). IEEE 802.15.4: a wireless communication technology for large-scale ubiquitous computing applications. *In Proc. of Conference on Mobile and Ubiquitous Systems*, 99-108. July 17-21, 2006-San José, California.
- Koubâa, A., Alves, M., & Tovar, E. (2007). Time Sensitive IEEE 802.15.4 Protocol. *In Sensor Networks and Configuration*, (19-49). Sensor Networks and Configuration. Fundamentals, Standards, Platforms, and Applications. Editors: Nitaigour P. Mahalik

ISBN: 978-3-540-37364-3 Springer Berlin Heidelberg 2007.

Lewis, F. (2004). Wireless sensor networks. *Smart environments: technologies, protocols, and applications*, 11-46.

Mansor, H., Adom, A., & Rahim, N. (2012). Wireless Communication for Mobile Robots Using Commercial System . *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 2(1), 53-55. Vol. 2 (2012) No. 1 ISSN: 2088-5334

Stankovic, J. (2008). Wireless Sensor Networks. *IEEE Computer*, 41(10), 92-95.

Yawit, C. &. (2011). A wireless sensor network for weather and disaster alarm systems. *In Proc. International Conference on Information and Electronics Engineering*, 6. 28th to 29th May 2011 Bangkok, Thailand

Ye, W., Heidemann, J., & Estrin, D. (2002). An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. (IEEE, Ed.) *Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, 3, 1567-1576.



