

## Red ZigBee para la Medición de Variables Físicas con Interfaz en Arduino-MATLAB

ZigBee Network for Measuring Physical Variables with Arduino-MATLAB Interface

**EDWIN LEONEL ÁLVAREZ GUTIÉRREZ**

*Ingeniero Mecatrónico  
Grupo de Investigación GIMAC  
Universidad de Boyacá, Colombia  
Correo electrónico: edwalvarez@uniboyaca.edu.co*

Recibido: 20/08/2015

Aceptado: 29/10/2015



## RESUMEN

En este documento se dan a conocer las pautas, desarrollos y resultados de una investigación desarrollada sobre el diseño de una red ZigBee para la medición de variables físicas tales como temperatura, humedad, gases, etc. en entornos dinámicos, mediante interfaz en Arduino-MATLAB®; además, se plantean los beneficios de implementar sistemas de comunicación inalámbrica y algunas aplicaciones y soluciones frente a un mercado lleno de necesidades tecnológicas.

**Palabras clave:** Arduino, comunicación inalámbrica, MATLAB®, monitoreo, protocolo ZigBee.

## ABSTRACT

This paper presents the guidelines, developments, and results of a research conducted on a ZigBee network design for the measurement of physical variables (such as temperature, humidity, gases, etc.) in dynamic environments, with an interface in Arduino-MATLAB®. In addition, it is shown the benefits of implementing wireless communication systems, some applications, and some solutions for a market full of technological needs.

**Keywords:** Arduino, wireless communication, MATLAB®, monitoring, ZigBee protocol.

Citar este artículo así:

Álvarez E. (2016). Red ZigBee para la Medición de Variables Físicas con Interfaz en Arduino-MATLAB. Revista I3+, 3(2), 50 - 64 p.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicación inalámbrica han jugado un papel importante en los últimos años y han facilitado la interacción entre procesos y la transmisión de información de un lugar a otro de una forma alternativa al cableado tradicional. Cada día se desarrollan nuevos modelos, procesos o prototipos, pensando en la complejidad de los sistemas y en el número excesivo de conectores, factor significativo a tener en cuenta debido a que, en gran medida, puede volverse un problema y puede limitar algunas de las tareas específicas de dichos procesos, como por ejemplo la medición de variables de estado, expansión, monitoreo, etc. Debido a esto se ha optado por alternativas de comunicación inalámbricas (Cegarra Sánchez, 2004).

La tecnología inalámbrica surgió como complemento de los sistemas alámbricos, permitiendo mayor accesibilidad, flexibilidad y movilidad en el desarrollo de procesos de mantenimiento y control de variables. En los últimos años esta tecnología ha ido mejorando sus características respecto a la velocidad de transmisión, cobertura, procesamiento de datos, seguridad, entre otras, lo cual permite ser una alternativa de solución a las necesidades crecientes de la industria, donde se han visto cada vez más involucrados (Muñoz Rodríguez, 2002).

Por otro lado, cada tipo de tecnología inalámbrica trabaja bajo un protocolo de comunicación, este documento se centra en la radiofrecuencia y específicamente en el protocolo ZigBee. Este último es un protocolo de comunicaciones basado en el estándar 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (WPAN). Su concepción comenzó en el año de 1998 debido a la interacción de importantes empresas como Motorola, Ember, Honeywell y Mitsubishi, consorcio denominado ZigBee Alliance (Muñoz Rodríguez, 2002). Dentro de las principales necesidades a solventar con la implementación de este protocolo, está la aplicación de sistemas de baja velocidad, disminución de costos, bajo consumo y bajos recursos frente a otras tecnologías (Horvat, Sostaric, y Zagar, 2012); por otra parte, las aplicaciones en las cuales se pueden implementar estos sistemas inalámbricos son diversas y van desde lecturas básicas de variables físicas, ejercer control de procesos industriales, hasta la monitorización de procesos de propósito específico.

La principal tarea al implementar una red basada en el protocolo ZigBee para la medición de variables físicas es diseñar una interfaz que permita al usuario observar en tiempo real el comportamiento de estas señales, para que pueda así tomar acciones inmediatas (acciones de control) (Thrun et al., 2004). Para llevar a cabo lo anterior, en este documento se plantea realizar una comunicación de software y hardware a través de Matlab® IDE<sup>1</sup> y Arduino, la cual permita desarrollar una interacción global de un sistema integrado de sensores, actuadores, controladores, etc.

## METODOLOGÍA

La metodología llevada a cabo en el desarrollo de la investigación fue Descriptiva–Experimental, ya que describe el proceso del diseño desde la revisión de literatura hasta la implementación de la red de comunicación inalámbrica, cuya aplicación está orientada a la medición de variables físicas.

Dentro de la metodología se encuentra: Primera Fase, el diseño de la red y sus componentes; Segunda Fase, comunicación entre dispositivos de control; Tercera Fase, desarrollo de algoritmo de programación; Cuarta Fase, diseño y desarrollo de interfaz gráfica; Quinta Fase, integración de hardware y software, y, para terminar, pruebas finales.

### Diseño de la Red y sus Componentes:

Para el diseño de la red se tuvieron en cuenta los elementos de selección dependiendo de las necesidades que se quieren resolver (cobertura, velocidades de transmisión, seguridad, entre otras) (Chang y Jhu, 2013). El diseño estructural de la red ZigBee puede contener o no los siguientes elementos: módulos de comunicación inalámbrica (XBee), sensores, sistema microcontrolador (tarjeta de adquisición de datos, para este caso Arduino), ordenadores y otros dependiendo de la complejidad del proceso. En algunas de las aplicaciones industriales, por ejemplo, se deberían seleccionar estos elementos de acuerdo a factores críticos como la distancia, las condiciones climáticas, los costos, la escalabilidad del sistema, entre otros.

---

<sup>1</sup> IDE, Integrated Development Environment.

## Módulos XBee:



Figura 1. Módulos de comunicación inalámbrica XBee. Fuente: xbee.cl

Estos módulos de comunicación inalámbrica por radiofrecuencia, bajo el protocolo ZigBee, se seleccionaron debido a que son poderosos (envío y recepción de datos configurable y conmutable), económicos (bajo consumo), fáciles de utilizar e integrar, y poseen interfaz serial; por otro lado, una de las principales características especiales es su alcance de 100 m hasta 1,6 km en línea abierta dependiendo de la versión (figura 1).

## Arduino:

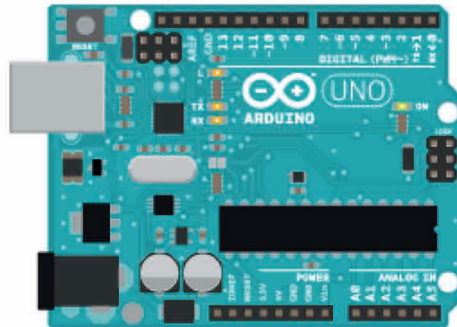


Figura 2. Tarjeta de adquisición Arduino. Fuente: Arduino.cc

Es una tarjeta de adquisición de datos abierta (open hardware), la cual permite una interacción entre dispositivos hardware como sensores, actuadores, entre otros, y software, de tal manera que se pueden crear prototipos o sistemas que resuelven las necesidades básicas del mercado (figura 2).

## Sensor:



Figura 3. Sensor de gas. Fuente: <https://www.sparkfun.com>.

Es un dispositivo capaz de determinar magnitudes físicas o químicas (variables de instrumentación) y transformarlas en variables eléctricas que permitan ser reconocidas por un microcontrolador, para este caso el Arduino. Dentro de las variables a medir se pueden mencionar: temperatura, humedad, distancia, presión, fuerza, gases, entre otras, (figura 3).

**Otros dispositivos:** dependiendo de la complejidad del proceso, la red también puede involucrar actuadores, sistemas de control, repetidores de señal a través de la estructura de la red, entre otros (figura 4).

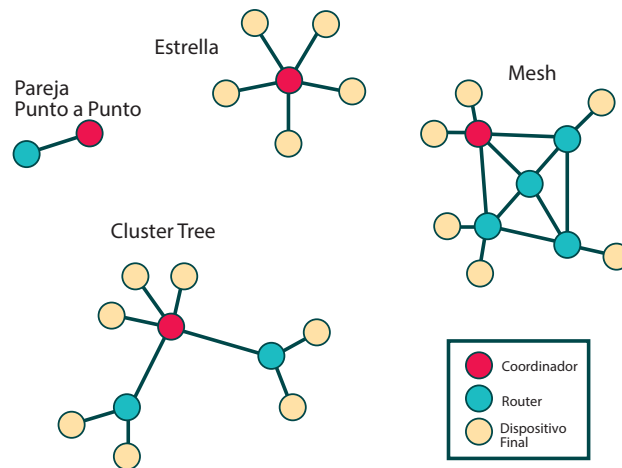


Figura 4. Ejemplos de tipos de configuración de red posible, implementando el protocolo ZigBee y Arduino. Fuente: <http://compututorialsblogspot.com.co/2012/02/como-configurar-los-modulos-xbee-basico.html>

Una de las principales características de las redes inalámbricas es permitir gran fluidez de los datos en tiempo real, y dentro de sus desventajas está la imposibilidad de transmitir video. Por otro lado, cabe destacar que se tendría una cobertura limitada únicamente por los costos, ya que se pueden implementar subredes de medición que están interconectadas punto a punto o punto a multipunto. Por sus características, estas redes de comunicación también permiten trabajar a diferentes velocidades de transmisión de datos dependiendo de los dispositivos a emplear, la cobertura y las condiciones que se estén presentando (Muñoz Rodríguez, 2002). Finalmente, otra característica importante es medir y obtener diversas variables en tiempo real. La configuración de la red se debe adaptar como anteriormente se ha dicho de acuerdo con las necesidades que se tienen, el saber escogerlas permitirá grandes ventajas y beneficios sobre otros sistemas, por ejemplo, el de bajo costo.

### Comunicación XBee-Pc XBee-XBee y XBee-Arduino

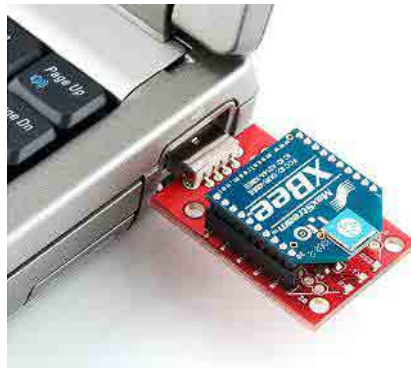


Figura. 5. USB Explorer conectada a un computador. Fuente: Didácticas Electrónica.

La comunicación entre el módulo XBee y el PC puede realizarse de varias formas, la más adecuada para ello es mediante la USB Explorer (figura 5). Esta tarjeta permite conectar los dos dispositivos mediante un puerto USB<sup>2</sup>. Hay versiones con cable mini-USB o conectada directamente al PC; por otra parte, esta tarjeta también permite configurar cada uno de los parámetros de comunicación de los módulos XBee, como por ejemplo la velocidad de transmisión de datos, la paridad, las direcciones, entre otros.

---

<sup>2</sup> SB, Universal Serial Bus.

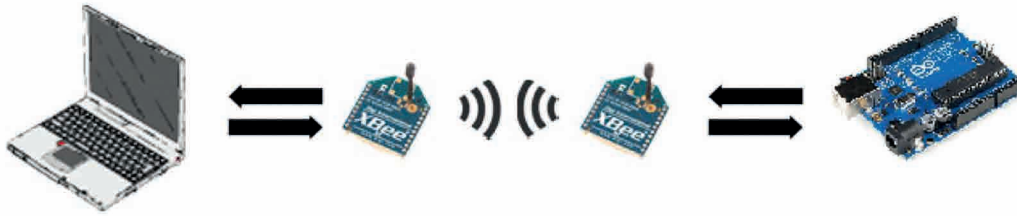


Figura. 6. Comunicación básica de red XBee, usando Arduino. Fuente: <http://www.digi.com/blog/xbee/basic-xbee-802-15-4-chat/>.

De forma general, la comunicación que se implementa con este sistema de comunicación inalámbrico es bidireccional (figura 6), es decir, que se puede enviar y recibir información. Por ejemplo, realizar lecturas de sensores o transmitir una señal de activación a un relé o a una electroválvula.

La comunicación entre dos módulos XBee parte principalmente en la programación de cada uno de ellos, uno como emisor y otro como receptor independiente de la comunicación bidireccional. En la comunicación es necesario saber cuál de los dos dispositivos es el encargado de establecer la comunicación con el PC y cuál es el encargado de recibir la información de forma inalámbrica y actuar (Wan, Wang, Qin, y Li, 2009). Esta comunicación está marcada principalmente por la velocidad de transmisión en baudios por segundo de los datos, la paridad o no de estos, bit de datos, bit de parada, el canal de comunicación, el puerto COM (Puerto Virtual), entre otros (Batista et al., 2012).

La comunicación entre el módulo XBee y la tarjeta de adquisidor de datos Arduino (dispositivo microcontrolador y un dispositivo de comunicación), es realizada a través de los pines que comparten estos dos (Rx<sup>3</sup> y Tx<sup>4</sup>). Esta interacción permite el envío y la recepción de caracteres o datos que cumplirán con una función específica de acuerdo a cada caso.

<sup>3</sup> Rx, Receiver o Receptor de Información.

<sup>4</sup> Tx, Transmitter o Trasmisor de Información.



## Software-Hardware

De acuerdo con la necesidad específica, se plantea una solución que englobe los requerimientos tanto de software (algoritmos de programación) como de hardware (instrumentos y partes físicas). En este tópico se tratará específicamente la relación entre el software y sus acciones sobre el hardware.

Desde la parte de programación se plantea una solución sencilla que cumple con los requerimientos especificados con anterioridad. Para ello se opta por trabajar con Arduino IDE, que corresponde a un lenguaje de programación basado en Processing (Open Source), el cual es un software libre que va a permitir al usuario monitorear las variables de entorno e interactuar o tomar acciones de control con el medio a través de un microcontrolador. Con el entorno de programación de Arduino se puede establecer comunicación inalámbrica implementando el protocolo ZigBee y una red de sensores sin ningún problema (Ruiz Gutiérrez, 2016). Por otra parte, X-CTU es un software que permite programar los módulos XBee en dos modos diferentes, modo AT (Transmisión Serial Transparente) o a través de comandos API<sup>5</sup>. Para este caso fue desarrollada la comunicación utilizando el modo transparente.

Arduino IDE permite programar el microcontrolador para hacer mediciones o ejecutar acciones de los diversos dispositivos que puede controlar; por su parte, X-CTU permite configurar los módulos de comunicación inalámbrica XBee. La interacción entre estos dos elementos crea una gran cantidad de aplicaciones que puedan resolver determinadas necesidades (Ruiz Gutiérrez, 2015). Un ejemplo de ello es implementar una red de sensores y módulos XBee dentro y fuera de una mina para realizar mediciones de variables físicas tales como gases, humedad, temperatura, entre otras, resolviendo la necesidad o el riesgo que corren los operarios cuando realizan las mediciones, tanto dentro como fuera de estos lugares peligrosos (Thrun et al., 2004). También puede ser implementado en situaciones en las cuales puede resultar afectada la integridad de un grupo de personas en un recinto.

Generalmente no basta con tener un sistema que pueda funcionar y responder correctamente a las necesidades para las cuales fue implementado, sino que también se debe cumplir con ciertas especificaciones técnicas, como por ejemplo la interacción con el usuario. En vista de lo anterior, es necesario implementar o desarrollar una interfaz que permita al usuario interactuar con el ambiente y/o las situaciones que se presenten, ya sea el caso de observar mediciones en tiempo real o de controlar un vehículo a distancia (Vignesh y Vignesh, 2012),

---

<sup>5</sup> API, Application Programming Interface.

mover un motor para abrir una puerta que está en un lugar alejado, controlar la apertura y cierre de una electroválvula para el llenado de un tanque industrial, etc. (Thrun et al., 2004).

El desarrollo de una interfaz que pueda controlar el sistema en tiempo real es muy beneficiosa (Song, Tian, Guodong Li, Fengyu Zhou, & Dongxu Liu, 2011), un Software que permite diseñar tal interacción es por ejemplo el IDE MATLAB®, el cual es una potente herramienta de software matemático que ofrece un entorno de programación integrado permitiendo desarrollar interfaces de usuario mediante el uso de la GUIDE, MATLAB® GUI<sup>6</sup>, la cual permite diseñar un sistema de control de variables de forma global y eficiente como otros IDE's (Java, Python, etc.).

Una de las grandes ventajas que traen consigo los desarrollos continuos en cuanto a software, es que cada día se implementan nuevas formas de comunicación con el hardware, como por ejemplo la librería desarrollada por Giampiero, un programador de MATLAB® Workgroup. Esta librería permite la comunicación entre la tarjeta de adquisición de datos Arduino y el entorno de programación gráfico de MATLAB® (Campa, G., 2010). Finalmente, al obtener una sinergia de software y desarrollo de hardware, lo que se busca es desarrollar cualquier tipo de aplicación que comprometa la solución de un problema, como por ejemplo encender un pequeño diodo Led o controlar un vehículo que permita obtener señales de 5 mediciones diferentes y observar el comportamiento de estos en tiempo real.

### **Circuitos Electrónicos Básicos**

Hay que tener en claro los circuitos generales para establecer la comunicación, ya que cualquier problema puede afectar drásticamente la comunicación inalámbrica (Batista et al., 2012).

---

<sup>6</sup> GUI, Graphical User Interfaces

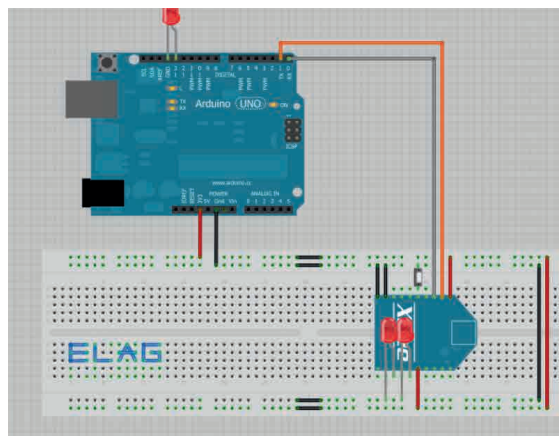


Figura 7. Esquema Comunicación XBe

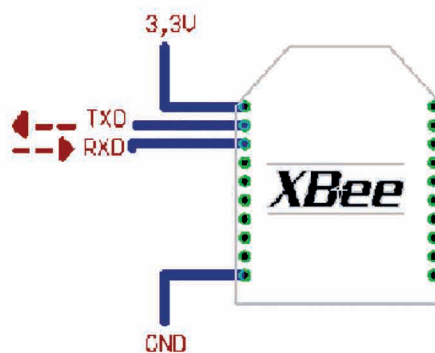


Figura 8. Esquema básico funcionamiento XBee. Fuente: <http://alvarounal.blogspot.com.co/2011/10/modulos-xbee->

En la figura 7 se observa el esquema de conexión y comunicación entre el módulo de comunicación inalámbrica XBee y el Arduino (microcontrolador), en el cual no se deben confundir los terminales de transmisión y recepción. Por otra parte, en la figura 8 se observa el esquema básico de conexión y funcionamiento del módulo de comunicación inalámbrica XBee. Este sistema no debe superar los 3.3 Voltios de conexión, de lo contrario se podría dañar.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Seguida de la parte de diseño y selección de algunos de los dispositivos, se procedió a ejecutar el algoritmo de un proyecto destinado a resolver una problemática específica, para ello fue necesario programar la placa de adquisición de datos Arduino, configurar los parámetros y demás temas ya mencionados; fue muy importante que ambos algoritmos (Arduino IDE, X-CTU y MATLAB®) manejaran la misma velocidad de transmisión de datos, de lo contrario la comunicación no se daría. En el Arduino se cargó la librería que permite desde MATLAB® controlar y configurar la placa sin ningún problema. Seguido de esto, se inició la comunicación entre la red con aproximadamente 10 segundos de duración, en este tiempo se cargó la librería de forma virtual, así como en el Arduino (Campa G., 2014).

Como se puede observar en la figura 9, se tiene una interfaz en MATLAB® que grafica 5 señales independientes de sensores, ya sea de forma alámbrica o inalámbrica; la librería permite realizar alguna de las dos sin ningún problema.

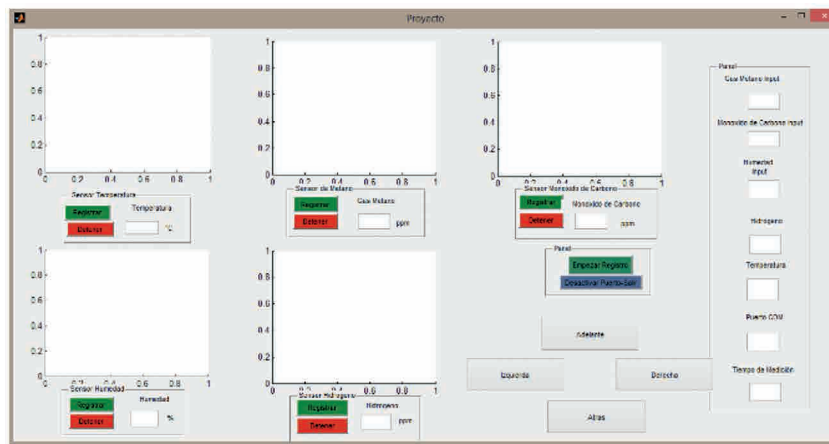


Figura 9. Ejemplo Interfaz en MATLAB.

En la interfaz se pueden configurar valores tales como los del puerto COM que se utiliza, variar el tiempo de medición, configurar los pines de los sensores a medir, activar alarmas, entre otras.

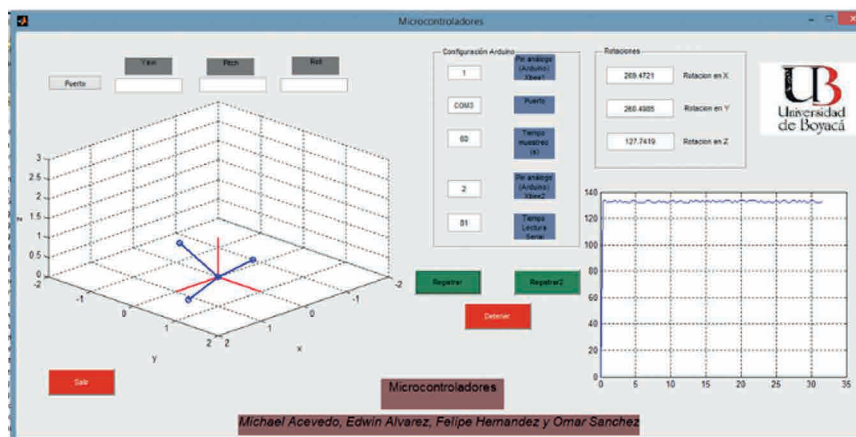


Figura 10. Interfaz Arduino-MATLAB realizando pruebas en tiempo real.

En la figura 10, lado izquierdo, se observa un control de un dispositivo IMU (dispositivo integrado de sensores, entre ellos giroscopio y acelerómetro) en 3 ejes. Al lado derecho una gráfica de un sensor de metano el cual muestra cierta cantidad de partículas por millón en el ambiente.

## CONCLUSIONES

En general, un proceso con un sistema de comunicación inalámbrica brinda muchos beneficios y ahorra ciertos gastos innecesarios; estos sistemas están siendo implementados hoy en día de manera masiva ya que por su flexibilidad, accesibilidad y comodidad han hecho del mercado inalámbrico una nueva forma de solución a aquellas necesidades que se tienen a diario, y cuando surge una interacción con más sistemas como hardware o software permiten ir más allá. La implementación de una red de comunicación inalámbrica requiere de muchos parámetros y consideraciones; dependiendo de cómo se aborde la aplicación se tienen muchos caminos, entre ellos el hardware y el software, tanto sea libre como no. Dentro de los beneficios de estos sistemas están la integración robusta de sensores y actuadores, el bajo costo, las tecnologías que están tendiendo a facilitar la vida de las personas (evitar grandes sistemas interconectados físicamente), sistemas de bajo consumo, flexibilidad a cualquier aplicación debido a sus modos transparentes y API, etc. Todo esto finalmente puede concluir la aplicabilidad, flexibilidad y facilidad de implementación de estos sistemas.

Por otro lado, en un sistema de comunicación inalámbrico se debe identificar la necesidad que se va a resolver, qué instrumentos se van a utilizar y qué tan compleja se puede volver la solución. Uno de los sistemas con más auge hoy día es la comunicación inalámbrica. Una recomendación es tener en claro los conceptos sobre esta, conocer la velocidad de transmisión de datos con la que se va a trabajar, tener conocimientos en programación y desarrollo, y ser cuidadoso con las conexiones que se realicen.

## RECOMENDACIONES

En cuanto a recomendaciones técnicas es muy importante trabajar a la misma velocidad de transmisión de datos por segundo, ya que esta velocidad la tendrá que configurar en los módulos XBee, la tarjeta de adquisición de datos Arduino y en la librería de MATLAB®. Algo muy crítico puede ocurrir cuando se quiere programar la tarjeta Arduino al mismo tiempo que los módulos XBee, ya que estos sistemas se programan por los mismos pines (Rx y Tx), por tanto, se deben desconectar los pines del XBee. Es importante revisar la compatibilidad entre las versiones de los programas utilizados, en especial de MATLAB®, ya que se pueden generar problemas de conexión; también, revisar los puertos COM virtuales que se tengan y su configuración en cada uno de los entornos de programación. Finalmente, identificar emisor y receptor de comunicación y la forma en la cual deben conectarse. Si esto no se lleva a cabo, es muy probable que la configuración de alguno de los dispositivos presentes en la red trabaje a una velocidad diferente a la de los demás, lo cual no permite una comunicación efectiva y ofrece datos erróneos en caso de los sensores. Si los pines Rx y Tx (Recepción y Transmisión) están cambiados, no permite que haya comunicación con la red. Inadecuada programación y manejo del sistema puede bloquear los módulos XBee y de forma global las conexiones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Batista, Í. J. L., Varela, A. T., Andrade, E. P., Azevedo, J. V. C., García, T. L., Henrique da Silva, D., ... Araújo, A. L. C. (2012). A Mechatronic Description of an Autonomous Underwater Vehicle for Dam Inspection. En *Robotics* (pp. 647–662). IGI Global. doi:10.4018/978-1-4666-4607-0.ch033
- Campa Giampiero, (2010). Learning Basic Mechatronics Concepts Using the Arduino Board and MATLAB. Recuperado de <https://www.yumpu.com/s/9K8bfjVoQ7a0hcX>
- \_\_\_\_\_. (2014). *Arduino IO package: Slides and Examples*. Recuperado de <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27843-arduino-io-package--slides-and-examples>.
- Cegarra Sánchez, J. (2004). *Metodología de la investigación científica y tecnológica*. Ediciones Díaz de Santos.
- Chang, C. L., y Jhu, J. H. (2013). Zigbee-assisted mobile robot gardener. En *CACS International Automatic Control Conference* (pp. 41–46). IEEE. Nantou-Taiwan. doi: 10.1109/CACS.2013.6734104
- Horvat, G., Sostaric, D., y Zagar, D. (2012). Power consumption and RF propagation analysis on ZigBee XBee modules for ATPC. En *35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)* (pp. 222–226). IEEE. Prague, Czech Republic. doi: 10.1109/TSP.2012.6256286

- Muñoz Rodríguez, D. (Ed.) (2002). *Sistemas inalámbricos de comunicación personal*. México: Marcombo Boixareu. Recuperado de <https://books.google.es/books?id=Gvh1UA0yHJ4C&lpq=PP1&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>
- Ruiz Gutiérrez, J. M. (2015). Implementación de Sistemas de Trasmisión de Datos y Sensores en Redes Inalámbricas con XBee integrado en la Plataforma Open Hardware Arduino. *Arduino*. Recuperado de <http://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoXbeeShield>.
- \_\_\_\_\_. (2016). Interfacing Arduino to other languages, Proyecto Arduino. *Arduino*. Recuperado de <http://www.arduino.cc/playground/Main/InterfacingWithSoftware>.
- Song, B., Tian, G., Guodong L., Fengyu Z., y Dongxu L. (2011). ZigBee based wireless sensor networks for service robot intelligent space. En *International Conference on Information Science and Technology* (pp. 834–838). IEEE. Nanjing, China doi: 10.1109/ICIST.2011.5765109
- Thrun, S., Thayer, S., Whittaker, W., Baker, C., Burgard, W., Ferguson, D., ... Whittaker, W. (2004). Autonomous exploration and mapping of abandoned mines. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 11(4), 79–91. doi: 10.1109/MRA.2004.1371614
- Vignesh, P. J. A., y Vignesh, G. K. (2012). Relocating Vehicles to Avoid Traffic Collision through Wireless Sensor Networks. En *Fourth International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks* (pp. 407–412). IEEE. Phuket, Thailand. doi: 10.1109/CICSyN.2012.80
- Wan, J., Wang, Y., Qin, Q., y Li, Y. (2009). Multi-robots' communication system based on ZigBee network. En *9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments* (pp. 3–14–3–19). IEEE. doi: 10.1109/ICEMI.2009.5274350

