



*Design of a communication device for monitoring and on-off control of a network using the IEEE 802.15.4 communication protocol*

**Diseño de un dispositivo de comunicación para monitoreo y control *on-off* de una red mediante el protocolo de comunicaciones IEEE 802.15.4**

**Jheison Ríos L.<sup>1</sup>, Víctor Copete A.<sup>2</sup>, David Goetz S.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>[jheison259\(AT\)gmail.com](mailto:jheison259(AT)gmail.com), <sup>2</sup>[victorashawo\(AT\)gmail.com](mailto:victorashawo(AT)gmail.com), <sup>3</sup>[germangoetz\(AT\)itm.edu.co](mailto:germangoetz(AT)itm.edu.co)  
Instituto Tecnológico Metropolitano. Medellín – Antioquia

Artículo de Investigación

**Abstract**

*The development of technology for wireless communications has had a deep impact in the life of human beings. Along these lines, every system used to optimize services and resources are welcome, especially when caused by express needs. Thus, the development of devices and applications in home automation, building automation, and industrial wireless communications has become the subject for specialized researchers and research groups. This project proposes the design of a communications device to on-off control based on the IEEE 802.15.4 communications standard, because this wireless protocol enables operation where wired system implementation is not possible. Obtained prototype results are satisfactory, especially when using mesh network topology under IEEE 802.15.4 standard, and its capacity to use different nodes as bridges to interconnect network devices that due to barriers or distance may not be seen in terms of RF.*

*Keywords: ZigBee, Mesh networks, sensors, microcontrollers, communication protocol, Arduino, X-CTU.*

**Resumen**

El desarrollo de las tecnologías para la comunicación inalámbrica ha tenido un impacto profundo en la vida de los seres humanos. En este sentido, todo sistema que sirva para optimizar los servicios y los recursos son bienvenidas, en especial cuando se presentan a partir de necesidades expuestas. Por esto, el desarrollo de dispositivos y aplicaciones en domótica, inmótica y las comunicaciones inalámbricas industriales han sido tema de investigadores y grupos de investigación especializados. En este proyecto se propone el diseño de un dispositivo de comunicaciones para el monitoreo y control On-Off basado en el estándar de comunicación IEEE 802.15.4, ya que este protocolo inalámbrico facilita la operación en lugares donde no es viable la implementación de un sistema cableado. Los resultados obtenidos con el prototipo son satisfactorios, en especial al usar la capacidad de la topología de red tipo malla implementada bajo el estándar IEEE 802.15.4. Y su capacidad de usar los diferentes nodos como puente para interconectar dispositivos de la red que por obstrucciones o distancia no se pueden ver en términos de RF.

Palabras clave: Zigbee, redes Mesh, redes de Sensores, Micro controladores, protocolo de comunicación, Arduino, X-CTU.

© 2016. IAI Allrights reserved

*Citación*

Ríos, J., Copete, V. and Goetz, D. 2016. Diseño de un dispositivo de comunicación para monitoreo y control on-off de una red mediante el protocolo de comunicaciones IEEE 802.15.4. Actas de Ingeniería 2, 240-245.

## 1. Introducción

La comunicación inalámbrica es una de las tecnologías que más desarrollo ha experimentado en las últimas décadas. Aunque es común citar los trabajos de Hertz y Marconi, de finales del siglo XIX, como los pioneros de estos sistemas, el origen de la radio se puede remontar al 1680, con la teoría de Newton sobre la composición de la luz blanca y que fue la base de los sistemas de comunicación inalámbrica [1]. En un sentido amplio y general, se entiende por comunicaciones inalámbricas todas las que suceden entre dispositivos, móviles o no, que intercambian información utilizando el espectro electromagnético [2]. Esta capacidad se potencializa desde las comunicaciones a nivel industrial, es decir, redes de sensores, monitoreo y control.

A nivel de servicios al usuario se ha detectado posibilidades de desarrollo y oportunidades empresariales, por ejemplo, en hoteles, clínicas, restaurantes, universidades y centros comerciales, donde se presenta inconformidad entre los clientes y el personal encargado de controlar los equipos receptores de señal (televisores), cuyo servicio depende del pago de tiempo de uso. La razón es la falta de control automático que permita el encendido y el apagado de estos equipos en un tiempo programado, porque, generalmente, el control del tiempo de uso se hace de forma manual, por medio de la sustracción de los cables de alimentación eléctrica o de señal, cuando el tiempo de arrendamiento del equipo se cumple. Esto conlleva a un desgaste operativo en las personas encargadas de mantener el funcionamiento de estos equipos, además, implica pérdidas cuando el equipo no se apaga en el momento oportuno.

Todo esto demuestra la necesidad de implementar un dispositivo que permita controlar automáticamente el tiempo de funcionamiento acordado con el usuario. Una solución podría ser una red de sensores inalámbricos, que se basa en dispositivos distribuidos espaciados autónomos que utilizan sensores para monitorear condiciones físicas o ambientales [3]. Actualmente, y gracias a la domótica, se cuenta con dispositivos automáticos que realizan diversas tareas programadas, tales como sensores de alarma, sistemas de encendidos luces y sistemas de riego. Sin embargo, para los equipos receptores de señal (televisores) no se encuentra una herramienta para administrar el encendido, el apagado y el control de tiempo de forma masiva a través de una red.

Luego del censo, estas herramientas suministran tramas con información que provee conectividad inalámbrica con el mundo de los cables y demás componentes electrónicos en la red. Esas ventajas de la tecnología electrónica se aprovechan en los contextos donde se dificulta construir sistemas, porque la implementación de una red cableada es un obstáculo, entonces, gracias a las redes, cada nodo se conecta directamente al Gateway, o a un nodo de mayor jerarquía, hasta tener comunicación con el mismo. Entre las topologías de redes, los tipos de malla son las que ofrecen mayor confiabilidad porque los nodos pueden conectarse con múltiples nodos en el sistema y buscar el camino más confiable, en condiciones físicas o ambientales para la entrega de la información. La Figura 1 muestra las diferentes topologías que se pueden implementar en una red de sensores.

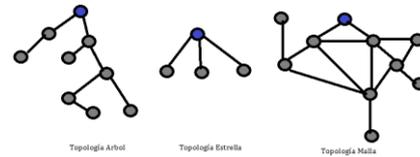


Figura 1. Topología para una red de sensores

En este trabajo se presenta el diseño de un dispositivo electrónico asociado a un sistema de comunicación inalámbrico basado en el estándar IEEE 802.15.4, para monitoreo del tiempo de encendido y control *on-off* de una red de televisores con control por tiempo de uso. La organización de este artículo es la siguiente: en la sección 2 se introducen los modelos de propagación en interiores, en la sección 3 se presenta el sistema electrónico diseñado, en la sección 4 los resultados y el análisis y, finalmente, en la sección 5 se proporcionan las conclusiones sobre los resultados obtenidos y los lineamientos a seguir para futuros trabajos.

## 2. Modelos de propagación en interiores y topología de red

### 2.1 Propagación de RF en interiores

Los modelos de propagación *indoor* se pueden clasificar en tres grupos: 1) empíricos de banda estrecha, 2) empíricos de banda ancha, y 3) determinísticos. Los empíricos de banda estrecha se expresan como una ecuación matemática simple, mediante la cual se obtienen las pérdidas de trayecto. Los empíricos de banda ancha (Trayecto Dominante) también permiten predecir las características del ancho de banda del canal (*delay spread*). Por su parte, los determinísticos son métodos de cálculo que simulan físicamente la propagación de ondas de radio. Estos modelos brindan información tanto en banda ancha como en banda estrecha del canal dentro del edificio [4]. Las pérdidas de trayecto en el espacio libre (FPL) en escala lineal se calculan con la ecuación (1).

$$L_0 = \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right)^2 \quad (1)$$

Donde:

- $L_0$  Son las pérdidas de trayecto en el espacio libre
- $\lambda$  Es la longitud de onda
- $d_0$  Es la distancia en metros

Siendo  $\lambda = 0.125m$  y  $d_0 = 1m$ , las pérdidas de trayecto en el espacio libre en *dB* son:

$$L_0(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right)^2$$

Por razones prácticas, los tipos de pared se dividen en dos categorías únicas, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos de pared para el modelo multi-pared

Tipo	Descripción	[dB]
$L_{w1}$	pared de la luz: placas de yeso, tableros de partículas o delgadas (<10 cm), muro de hormigón ligero.	3.4
$L_{w2}$	La pared pesada: grueso (> 10 cm), hormigón o ladrillo	6.9

Para el análisis de pérdidas en interiores se utiliza el modelo de Paredes Promedio, basado en multi-pared Costo-231, en el que se usó la pérdida debido a que obstruye las paredes, entonces se agrega solamente un parámetro  $L_w$  (ecuación (2)).

$$L_{dB} = L_{0,dB} + 20\text{Log}_{10}d + k_w L_w \quad (2)$$

Donde  $k_w$  denota el número de paredes penetradas. Con el fin de determinar el parámetro  $L_w$ , cada pared que obstruye el camino directo entre el receptor y las antenas del transmisor debe tener su pérdida [5].

## 2.2 Topología de red implementada

La red mesh permite transmitir desde un módulo a otro, que este fuera del rango de alcance, a través de módulos intermediarios que funcionan como enrutadores y que re-direccionan el paquete para que pueda llegar a su destino [6]. Para el desarrollo de esta red se utilizaron 3 módulos Xbee, uno como coordinador y dos como *router*, para lograr conectar los demás dispositivos que estarán por fuera del alcance. A final, se piensa añadir más dispositivos para la red propuesta. En la Figura 2 se ilustra la red mesh diseñada.

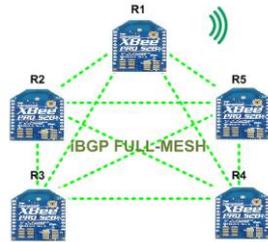


Figura 2. Topología red mesh Zigbee

## 3. Sistema de monitoreo y control de tiempo

El sistema electrónico está conformado por dos tipos de dispositivos: 1) final, asociado a cada dispositivo a los que se debe monitorear y su distribución corresponde a una topología de red tipo malla, y 2) coordinador, encargado de integrar la red inalámbrica con la intranet, para que todo el sistema pueda ser monitoreado de forma remota.

### 3.1 Sistema que realiza la acción de control

El sistema cuenta con diversos elementos, entre los que se cuentan un relé, encargado de controlar la corriente eléctrica de la red 120 VAC, una fuente AC/DC, proveedora principal de energía del sistema, una batería tipo Li-po de 3.7 VDC, que es la fuente de la UPS, y los conectores para el ingreso y la salida de la corriente eléctrica del dispositivo que se quiere controlar, además de una LCD de 2x16, encargada de presentar la información al usuario final. Este sistema se implementó sobre dos impresos diferentes para independizar la etapa de control de potencia y la etapa que contiene el micro controlador y el sistema de comunicaciones. En las Figuras 3 y 4 se muestra el diseño en esquemático y el diseño en *board* del sistema actuador para la etapa de potencia.

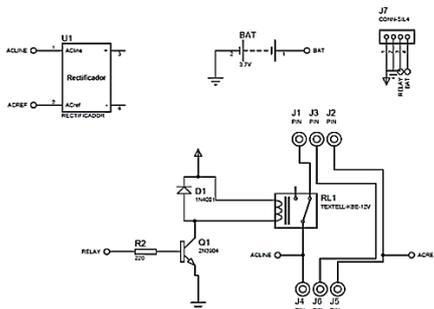


Figura 3. Esquemático de la etapa de potencia



Figura 4. Diseño en board de la etapa de potencia

En las Figuras 5 y 6 se muestra el diseño en esquemático y el diseño en *board*, que integran el sistema microcontrolador y el módulo de comunicaciones, con base en el estándar IEEE 802.15.4.

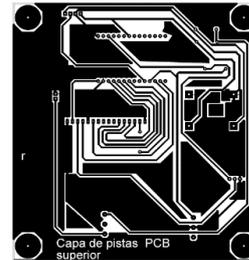


Figura 5. Diseño en board sistema microcontrolador y comunicaciones

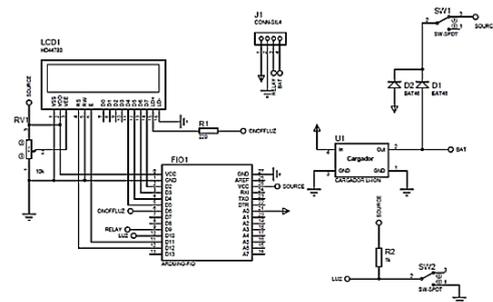


Figura 6. Esquemático sistema microcontrolador y comunicaciones

El Microcontrolador encargado de la gestión del sistema se basa en un Arduino Fio que, como característica principal, integra un microcontrolador ATmega328P y una base, para implementar directamente un módulo Zigbee de MaxString. En la Figura 7 se muestra el módulo usado en el dispositivo propuesto.



Figura 7. Arduino FIO [7]

Después de implementar y probar el funcionamiento individual de cada uno de los impresos, se integran y se prueba su funcionamiento final. La integración se realizó mediante la conexión de un puerto de 5 pines de atención eléctrica en los impresos y la conexión de la fuente principal de la PCB1 al cargador de la PCB2 por medio de un cable con puertos USB, tal como se observa en la Figuras 8 y 9.



Figura 8. Integración de los impresos

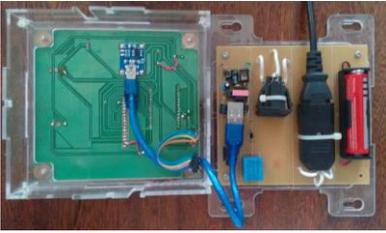


Figura 9. Conexión fuente principal entre los impresos

Luego de la integración de los impresos que conforman la etapa que interactúa con el usuario y ejecuta el control *on-off*, se optó por desarrollar una caja en material de acrílico para darle estética y protección, tal como se observa en las Figuras 10 y 11.



Figura 10. Dispositivo ensamblado en carcasa



Figura 11. Dispositivo ensamblado

### 3.2 Sistema inalámbrico basado en 802.15.4

El establecimiento de la red se realiza a través de un módulo de comunicaciones denominado coordinador (Figura 12), que se encarga de iniciarla y proporcionar los parámetros necesarios para que los demás dispositivos se asocien a ella. En la Tabla 2 se muestran las características generas de los módulos de comunicaciones que se usaron en este trabajo.



Figura 121. Modulo coordinador de la red Zigbee

Tabla 2. Características de los módulos Xbee-Pro ZB [8]

Alcance en interiores/zonas urbanas	40m
Alcance en exteriores/línea de visión	1,6 Km
Potencia de transmisión	50 Mw(17dBm)
Corriente de reposo	<1µA@25°C.
Frecuencia de Operación	2,4 GHz
Velocidad de datos en RF	251 ps

### 3.3 Protocolo de comunicación para monitoreo y control

Para la elaboración del protocolo del dispositivo se tuvo en cuenta el estándar IEEE 802.15.4 que utilizan los módulos Xbee-S2 PRO. Para éstos existen varios modos de operación, entre de los que se encuentra el modo transparente, modo de comandos Transparent (AT) y el modo Application Programming Interface (API). Se optó por utilizar el modo API, aunque su manejo a nivel de programación es más complicado, porque permite mayor control sobre la red a la vez que se usa menor tráfico de datos. El modo de operación API es una alternativa al AT, que proporciona diferentes alternativas para configurar los módulos, así como diferentes tipos de ruteo de los datos. Una aplicación puede enviar datos a diferentes módulos sin tener que cambiar la dirección de destino mediante la configuración del módulo, porque cada trama enviada contiene un campo con la dirección destino.

Además, el modo API permite recibir confirmación de las transmisiones realizadas, con lo que se sabe si un paquete se entrega correctamente o no. En cuanto a la recepción de paquetes, permite identificar al módulo que envió el paquete, porque la trama también incluye la dirección del nodo transmisor. En el modo API las tramas o *frames* (Tabla 3) se envían mediante Trasmisión y Recepción Asíncrona Universal (UART), por lo tanto, tienen que seguir la especificación de una trama UART, como la que se muestra en la Figura 13.



Figura 13. Estructura de la trama en API [9]

Tabla 3. Identificadores de la trama API que soportan los Xbee

Identificación de la trama API	Valor
Estado de modem	0x8A
Comandos AT	0x08
Comandos AT-Valor de Parámetro de cola	0x09
Respuesta de comando AT	0x88
Solicitud de comando remoto	0x17
Respuesta de comando remoto	0x97
Solicitud de transmisión ZigBee	0x10
Direccionamiento explícito en la trama ZigBee	0x11
Estado de la transmisión ZigBee	0x8B
Paquete recibido- ZigBee	0x90
Indicador explícito de RX - ZigBee(AO=1)	0x91
Indicador RX de los datos IO - ZigBee	0x92
Indicador de lectura - sensores Xbee (AO=0)	0x94
Indicador del nodo de identificación (AO=0)	0x95

Establecido lo anterior, se diseñó un grupo de comandos para el control de los dispositivos finales a los cuales se envía los tiempos y de los que se conoce el estado actual de cada uno, logrando una comunicación *full* dúplex donde las órdenes generadas pueden viajar en ambas direcciones, tanto del coordinador como del dispositivo final.

### 3.4 Diseño de los campos con información útil

El registro de datos del protocolo de comunicación está conformado por campos que varían en cantidad dependiendo del tipo de mensaje. Estos campos contienen información relevante sobre el funcionamiento de cada uno de los dispositivos que conforman la red. En las Figuras 14 y 15 se puede observar la lógica del algoritmo implementado para la funcionalidad del dispositivo y en la Tabla 4 se describen los comandos necesarios para el monitoreo.

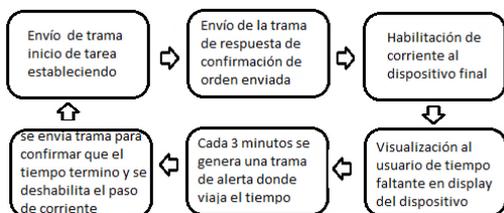


Figura 14. Ejecución del proceso de control de tiempo

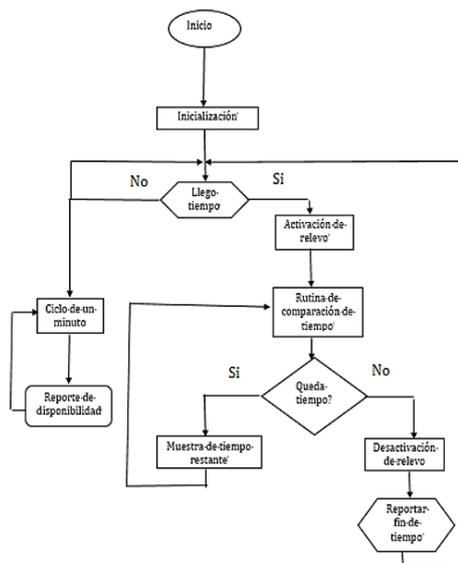


Figura 15. Diagrama de flujo algoritmo

Tabla 4. Comandos protocolo

Comando	Función
TIME <I1>1<F1><I2>2<F2>	TIME <I1>tarea<F1><I2>tiempo en minutos<F2> Comando inicio de tarea y establece tiempo.
TIMEOFF	No contiene valores es un comando para avisar que el tiempo termino
TIMERES<I1>1:20:15<F1>	TIMERES<I1>tiempo restante<F1> Comando que informa al coordinador el tiempo restante luego de la orden emitida esta tarea se realiza cada 3 minutos.
PWOFF<I1>1:20:15<F1>	PWOFF<I1>tiempo actual<F1> Este comando envía al coordinador una señal indicando que la energía se fue y envía el tiempo actual para que se guardado al coordinador
PWON	No contiene valor es un comando que avisa al coordinador que la red eléctrica 110 VAC está funcionando
DEVON<I1>0013A20040E61A2C<F>	DEVON<I1>dirección propia del dispositivo final<F1> El comando le indica al coordinador que está en línea y listo para recibir comandos, esta tarea la realiza cada minuto si no se está ejecutando una orden.

## 4. Resultados y análisis

En la implementación de la fase experimental para determinar las pérdidas de señal en el área de los dispositivos transmisores, se usaron los módulos XBee S2 PRO, porque mediante comandos AT, se les puede interrogar, lo que permite obtener de ellos la potencia con la que recibieron la última trama valida. El lugar donde se realizaron las mediciones fue en la Clínica del Norte (municipio de Bello), en los pisos 6, 7 y 8. En la Figura 16 se puede visualizar las instalaciones del piso 7 y en la Figura 17 la distribución de los dispositivos a los que se realiza la medición de potencia.



Figura 16. Piso 7 Clínica del Norte



Figura 17. Esquema de medidas de potencia

Los resultados que se obtuvieron, luego de realizar las medidas de potencia utilizando dos XBee con la configuración en modo AT, se observan en la Tablas 5, 6 y 7. Un XBee se utilizó como coordinador y otro como Router, y el comando aplicado fue ATDB, el cual reporta la potencia en -dBm con que se recibe el último paquete.

Tabla 5. Medición inicio a medio

Piso	Distancia inicio a medio	Potencia Inicio medio -dBm
6	25.74m	89.8
7	25.74m	73.4
8	25.74m	84.6

Tabla 6. Medición medio a final

Piso	Distancia medio a final	Potencia medio a final -dBm
6	25.74m	77.4
7	25.74m	63.4
8	25.74m	83.2

Tabla 7. Medición distancia total

Piso	Distancia total	Potencia total -dBm
6	51.47m	101.8
7	51.47m	102.2
8	51.47m	101.4

Luego de realizar el proceso de medición con los Xbee S2Pro en las instalaciones de la Clínica, se usa el modelo empírico de propagación en interiores que se eligió previamente. Los resultados obtenidos en este proceso se muestran en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Datos aplicados al modelo

Distancia (d)	Numero de paredes (Kw)	$L_{dB}$
25.74m	6	88.8dB
51.47m	12	115.23dB

Para la distancia 1 se aplicó la ecuación (3) y para la 2 la ecuación (4).

$$L_{dB} = 40.2 + 20\text{Log}(25.74) + 6 \times 3.4 = 88.81\text{dB} \quad (3)$$

$$L_{dB} = 40.2 + 20\text{Log}(51.47) + 12 \times 3.4 = 115.23\text{dB} \quad (4)$$

Luego se aplica la fórmula de potencia total (ecuación (5), donde se resta la potencia de transmisión entregada por el Xbee, que se toma de la Tabla, menos las pérdidas  $L_{dB}$  que entrega el modelo de paredes promedio, obteniendo la potencia final.

$$P_T = P_i - L_{dB} \quad (5)$$

Donde:

$P_T$ : potencia final

$P_i$ : potencial inicial

$L_{dB}$ : pérdidas para cada una de las distancias

Para pérdidas en la primera distancia la potencia es:

$$= 17\text{dBm} - 88.8\text{dB}$$

$$= 71.8\text{dBm}$$

Para pérdidas en la segunda distancia la potencia es:

$$= 17\text{dBm} - 115.23\text{dB}$$

$$= 98.23\text{dBm}$$

Con base a los datos obtenidos en las pruebas de potencia y aplicando la ecuación (2), se observa cierta similitud en las pérdidas que entrega el Xbee con las halladas usando el modelo de WALLS (Tabla 9).

**Tabla 9.** Comparación de datos obtenidos

Distancia	XBee	WALLS
25.74m	86,2	71.8
51.47m	104,4	98.23

Utilizando la configuración de los Xbee en modo API se puede mitigar estas pérdidas, porque se puede utilizar dispositivos intermedios como puente para llegar desde un dispositivo lejano otro dispositivo que, por distancia o pérdidas debidas a la estructura del edificio, no llegan directamente.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se propuso el diseño de un dispositivo de monitoreo y control de tiempo para controlar el encendido y apagado de dispositivos electrónicos de uso comercial. Se logró desarrollar un producto que cumple con características importantes en cuanto a facilidad de manejo, permitiendo controlar el tiempo de uso de televisores que son prestados en arrendamiento a usuarios.

El sistema mostró buen desempeño y robustez frente a errores de transmisión y recepción de datos a través de la comunicación inalámbrica, porque es capaz de diferenciar entre tramas dañadas y tramas con todos sus

campos completos. Esto es excelente si se tiene en cuenta que es capaz de procesar correctamente todos los datos provenientes del nodo coordinador de la red (Xbee) que la utiliza.

Dado que la cantidad de nodos de una red conformada por módulos Xbee es una variable aleatoria, fue necesario desarrollar una lógica que permitiera adecuar su implementación a un número indeterminado de nodos de una red, dándole a la herramienta categoría de expansible frente a las necesidades de la aplicación.

Se identifica que las pérdidas que entregan las pruebas de potencia de los XBee S2 PRO, son mayores a las obtenidas al aplicar la fórmula, porque el modelo de paredes promedio no logra interactuar con los diversos componentes que pueden interferir el envío de la señal, aunque el modelo permite tener un acercamiento entre las pérdidas reales y las pérdidas teóricas.

Utilizando la topología malla, con la que trabaja las Redes Mesh, se mitigaron las pérdidas generadas en la transmisión de la señal, debido a que permite amplificar la señal enviada a un dispositivo final, mientras la señal se encuentra con otros dispositivos perteneciente a la red, que puedan retransmitirla actuando como un repetidor.

Como trabajo futuro, es necesario crear una interfaz de usuario que permita agregar mucha más interactividad al administrador en el uso del dispositivo.

## Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el grupo de investigación Automática, Electrónica y Ciencias Computacionales del Instituto Tecnológico Metropolitano en el marco del proyecto P14208.

## Referencias

- [1] Alvarado, J. (2005). [Estudio de las principales técnicas de modulación para el canal de radio](#). Trabajo de grado. Universidad de las Américas Puebla.
- [2] Prieto, J. (2008). [Introducción a los sistemas de comunicación inalámbricos](#). Reporte. Universidad Oberta de Cataluña.
- [3] National Instruments (2009). [¿Qué es una Red de Sensores Inalámbricos?](#) Online [Mar 2016].
- [4] Castellanos, E. et al. (2005). [Análisis de propagación electromagnética en espacios cerrados: Herramienta software en Matlab para predicción y simulación](#). Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada 6(2), pp. 130-137.
- [5] Andrade, C. & Fabris, R. (2010). [IEEE 802.11 WLANS: A comparison on indoor coverage models](#). In Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Alberta, Canada.
- [6] Bligoo. [Xbee serie 2](#). Online [Mar 2016].
- [7] Granados, D. (2014). [Desarrollo de un prototipo inalámbrico de bajo costo para el monitoreo del flujo vehicular](#). Trabajo de grado. Universidad de Costa Rica.
- [8] CIKA. [Módulos Wireless ZigBee](#). Online [Mar 2016].
- [9] Navarro, J. (2008). [Control inalámbrico basado en redes inalámbricas de sensores mediante módulos Xbee](#). Trabajo de grado. Universidad Politécnica de Cartagena.