

**DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA RED DE
SENSORES ZIGBEE PARA LA MONITORIZACIÓN DE CONTADORES DE
ENERGÍA DIGITALES EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE BAJA TENSIÓN**

ERIK YAIR JÁCOME CONTRERAS

LUIS EDUARDO MUÑOZ PEREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA

BUCARAMANGA

2009

**DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA RED DE
SENSORES ZIGBEE PARA LA MONITORIZACIÓN DE CONTADORES DE
ENERGÍA DIGITALES EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE BAJA TENSIÓN**

ERIK YAIR JÁCOME CONTRERAS

LUIS EDUARDO MUÑOZ PEREZ

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de ingeniero
electrónico**

Director

MIE. JOSÉ DE JESÚS RUGELES URIBE

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA

BUCARAMANGA

2009

DEDICATORIA

A Dios por ser quien iluminó mi camino durante toda mi carrera
y derramó bendiciones sobre mí para alcanzar lo esperado.

A mis padres Oliva y Jorge quienes con su amor fueron mi fortaleza
en los momentos difíciles, a quienes con una palabra
de aliento me levantaban de mis tropiezos.

A mis hermanos Lizbeth y Jefferson a quienes estuvieron ahí a pesar de los
golpes de la vida y a quienes espero ser un ejemplo para ellos.

A Alejandra y a mis amigos por ser mis apoyos incondicionales
y por brindarme momentos inolvidables.

Y en general a todos los que en algún momento me dieron su
apoyo para que hoy alcance este triunfo tan esperado.

ERIK YAIR JACOME CONTRERAS

DEDICATORIA

A Dios por ser mi soporte en todas las circunstancias, y mi amigo incondicional ayudandome a superar todas las pruebas que se me presentaron durante el desarrollo de este largo camino, que llega a su culminación.

A mis padres Luis Muñoz, Doris Perez por apoyarme y aconsejarme en todas las decisiones y momentos difíciles dandome un motivo por el cual luchar y seguir adelante.

A mi hermana María Carolina Muñoz por estar ahí a pesar de la distancia.

A mis amigos y compañeros de proyecto que de alguna manera contribuyeron a cumplir satisfactoriamente el objetivo que nos planteamos.

Y en general a todas las personas que en algun momento me brindaron su apoyo.

LUIS EDUARDO MUÑO PÉREZ.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander (UIS) por acogernos en su morada, para ser quienes somos hoy; en especial a la escuela de Ingeniería Electrónica y a todos los docentes que de alguna manera contribuyeron a nuestra formación.

Al grupo de investigación Conectividad y procesamiento de señales (CPS), por ser nuestro segundo hogar durante este año de trabajo, por el préstamo de equipos y la disponibilidad de sus integrantes.

A nuestro Director de Proyecto el MIE. José de Jesús Rugeles Uribe, quien con su dedicación y entrega hizo que este proyecto se culminara con éxito.

Al ingeniero Mauricio Erazo por su constante ayuda y por sacarnos de apuros en el laboratorio.

A Colciencias por ser nuestro apoyo financiero durante este proyecto en equipos y materiales.

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA | 4 |
| 3. HARDWARE UTILIZADO | 6 |
| 4. PRUEBAS REALIZADAS | 7 |
| 4.1. VARIACIÓN DE LA POTENCIA RECIBIDA CON RESPECTO A LA DISTANCIA PARA ESPACIOS ABIERTO CON LÍNEA DE VISTA | 7 |
| 4.2. ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD EN LA TRANSMISIÓN DE DATOS | 9 |
| 4.3. ANÁLISIS DE ENRUTAMIENTO DE PAQUETES | 11 |
| 4.4. IMPLEMENTACIÓN EN AMBIENTE SUBURBANO | 12 |
| 5. RESULTADOS | 14 |
| 5.1. VARIACIÓN DE LA POTENCIA RECIBIDA CON RESPECTO A LA DISTANCIA PARA ESPACIOS ABIERTO CON LÍNEA DE VISTA | 14 |
| 5.2. ADECUACIÓN DE LOS MODELOS DE ESPACIO LIBRE Y LEE PARA LOS MÓDULOS XBEE SERIE 2. | 15 |
| 5.3. ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD EN LA TRANSMISIÓN DE DATOS | 19 |
| 5.4. ANÁLISIS DEL ENRUTAMIENTO DE PAQUETES | 20 |
| 5.5. IMPLEMENTACIÓN EN AMBIENTE SUBURBANO | 22 |
| 6. DISCUSIÓN | 24 |
| 7. CONCLUSIONES | 27 |
| REFERENCIAS | 28 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Escenario de Prueba en un Ambiente Suburbano (Google Earth). | 4 |
| Figura 2: Módulo Xbee Serie 2 en Tarjeta XBIB-R-DEV, y Sniffer Inalámbrico CC2420DK de Texas Instrument. | 6 |
| Figura 3: Configuración del Módulo Xbee <i>Serie 2</i> Router 1 y Coordinador. | 8 |
| Figura 4: Range Test del X-CTU® | 8 |
| Figura 5: Esquema General de los Módulos Xbee Serie 2 | 9 |
| Figura 6: Ubicación Física de los Módulos Xbee <i>Serie 2</i> . | 10 |
| Figura 7: Configuración del Programa Transmisor. | 10 |
| Figura 8: Ubicación de la Segunda Prueba Indoor y Niveles de RSSI de los enlaces en dBm. | 11 |
| Figura 9: Esquema de Ubicación de los Módulos Xbee Serie 2. | 12 |
| Figura 10: Red de Sensores Inalámbricos Suburbana (Google Earth). | 13 |
| Figura 11: Niveles de RSSI vs Distancia con los Módulos Dentro y Fuera de la Caja Contenedora. | 14 |
| Figura 12: Comparación de los Niveles de RSSI vs Distancia con los Módulos Dentro y Fuera de la Caja Contenedora. | 15 |
| Figura 13: Comparación de los Modelos de Espacio Libre y Lee con los Datos Obtenidos en la Prueba de Campo. | 18 |
| Figura 14: Resultado Primera Prueba Indoor. | 19 |
| Figura 15: Resultado segunda prueba Indoor. | 20 |
| Figura 16: Primer Esquema de Enrutamiento. | 20 |
| Figura 17: Segundo y Tercer Esquema de Enrutamiento. | 21 |
| Figura 18: Captura de Paquetes de Datos con PACKET SNIFFER®. | 22 |
| Figura 19: Ubicación Física de los Módulos Xbee <i>Serie 2</i> en un Ambiente Suburbano. | 22 |

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Niveles de RSSI medidos y obtenidos a través de los modelos de propagación

23

RESUMEN

TITULO

DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA RED DE SENSORES ZIGBEE PARA LA MONITORIZACIÓN DE CONTADORES DE ENERGÍA DIGITALES EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE BAJA TENSIÓN*.

AUTORES

ERIK YAIR JACOME CONTRERAS
LUIS EDUARDO MUÑOZ PEREZ**

PALABRAS CLAVES

Xbee, WSN, *Zigbee*, Análisis, Propagación

En la actualidad las redes de sensores inalámbricos (WSN) están presentando una gran evolución en la investigación mundial debido a la gran cantidad de aplicaciones industriales en las que se puede aplicar este tipo de tecnologías; Existen varias alternativas para el protocolo a usar en las WSN, como la tecnología *Bluetooth* que posee anchos de banda suficientes para manejar multimedia, pero *Zigbee* busca convertirse en la mejor alternativa para este tipo de aplicaciones, debido a las ventajas que presenta en cuanto a consumo de energía, facilidad y transparencia en la configuración de la red desde el punto de vista del usuario, y la máxima cantidad de nodos que pueden conformar la red (teóricamente mayor a 65000), por ende, se busca en esta investigación encontrar los parámetros y problemas de funcionamiento reales de redes de sensores inalámbricos usando módulos *Xbee Serie 2 XB24-B*, así como establecer un modelo de propagación adecuado. Se realizaron pruebas de propagación en campo abierto donde se determinó que la distancia máxima de transmisión entre dos nodos es de 145 metros, para unas condiciones óptimas (línea de vista y sin obstáculos) y potencia de transmisión máxima; Por otro lado, se ajustaron los modelos de propagación de *Lee*, *Espacio Libre* y *Okumura-Hata*, concluyéndose que el modelo de *Espacio Libre* es adecuado para una red de sensores inalámbricos de microceldas, a pesar de no tener en cuenta pérdidas por multitrayectoria.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: MIE. José de Jesús Rugeles Uribe. Grupo de Investigación CPS (Conectividad y Procesado de Señales)

ABSTRACT

TITLE

DESIGN, IMPLEMENTATION AND CHARACTERIZATION OF A ZIGBEE SENSOR NETWORK FOR THE MONITORING OF A DIGITAL POWER METER IN LOW VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORK*.

AUTHORS

ERIK YAIR JACOME CONTRERAS
LUIS EDUARDO MUÑOZ PEREZ**

KEYWORDS

Xbee, WSN, Zigbee, Analysis, Propagation.

Nowadays the wireless sensor networks (WSN) are presenting a great evolution in wide world research due to the large number of industrial applications in which can be applied these types of technologies; There are several alternatives for the protocol to use in WSN, like Bluetooth technology which has enough band wide for manage multimedia, but Zigbee look for be the most suitable protocol to be used on these types of applications, because the benefits in terms of energy consumption, transparency and an easy network configuration from the user's point of view, and the maximum number of nodes that can embed the network (theoretically more than 65,000), there for, look for real operations parameters and problems of a wireless sensor network using Xbee Series 2 XB24-B, and set an adequate propagation model became an objective of this research. Were made propagation tests on open fields, and it was determined that the maximum transmission distance between two nodes is 145 meters, for optimal conditions (line of sight without obstacles) and maximum transmission power; On the other hand, were adjusted the *Lee*, Free Space, and *Okumura-Hata* propagation models, concluding that free space model is adequate for a microcell wireless sensor networks, despite not taking into account multipath losses.

* Degree Project

** Physical-Mechanical Engineering Faculty. Electronics, Electric, and Telecommunication School. Director: MIE. José de Jesús Rugeles Uribe. CPS Research Group (Connectivity and Signal Processing)

1. INTRODUCCIÓN

El uso de las redes de sensores inalámbricos (*Wireless Sensor Networks*) en la actualidad es de notable importancia, para nadie es un secreto que la “Conectividad” juega uno de los papeles más importantes en la electrónica moderna, debido a la necesidad creciente de monitorizar variables de procesos industriales y de manejar procesos remotos a través de redes; por esto, se ha venido buscando en los últimos años sistemas que permitan de una manera óptima (técnica y económicamente hablando) una implementación práctica. Los sistemas AMR (*Automatic Meter Reading*) son un ejemplo de la necesidad por monitorizar procesos de medición de variables de una manera cercana y continua, en el cual las redes de sensores inalámbricos son una de las alternativas para la recolección de datos, establecimiento de fallas y servicios adicionales remotos. Lo anterior es una de las tantas aplicaciones que han impulsado el desarrollo de protocolos orientados al manejo de redes que permitan grandes radios de cobertura en el manejo de la información, basados en topologías que manejan una cantidad significativa de nodos con radios de micro celdas de transmisión interconectados entre sí; en particular estos nodos son dispositivos desarrollados buscando una alta eficiencia en cuanto a consumo de potencia y costos relativamente bajos que no necesitan de una infraestructura compleja para su puesta en marcha. Los módulos *Xbee Serie 2 XB24-B* son una alternativa frente a otros tipos de hardware, que están en continuo desarrollo buscando cumplir los requerimientos para la implementación óptima de las redes de sensores inalámbricos; en particular *Xbee* funciona bajo un protocolo propietario denominado *Znet 2.5* que está basado en *Zigbee* (Zigbee Alliance, 2004), y entre sus ventajas se encuentra un bajo consumo de potencia, disponibilidad de red de más de 65000 nodos, y facilidad de configuración, debido a que procesos como el

establecimiento de algoritmos para el enrutamiento de la información y el manejo de nuevos nodos que entran a la red ya han sido predispuestos por *Znet 2.5* y son prácticamente transparentes al usuario; todo lo anterior se logra con un *trade off* de un ancho de banda muy inferior a otras alternativas inalámbricas como *bluetooth*, descartándose el manejo de multimedia, y radios de transmisión relativamente bajos entre nodos individuales.

Teóricamente las redes de sensores inalámbricos son sistemas seguros, y de implementación sencilla, debido a las facilidades que presentan los nodos que la forman, pero lo cierto es que al momento de la implementación real surgen varios problemas que pueden ser atribuidos a la misma naturaleza embebida de las redes de sensores inalámbricos y el impacto del ambiente en el sistema, otras suelen ser fallas del software provisto por el fabricante o hasta el mismo protocolo, y algunas son desconocidas (Choi, et al, 2007). De aquí surge la necesidad de la observación y el análisis de redes de sensores inalámbricos implementadas bajo distintos tipos de hardware, para esta investigación en particular, se busca determinar que tan robusto es un sistema que use módulos *Xbee Serie 2* conociendo los alcances y las limitaciones de los mismos.

Para la implementación de una red de sensores inalámbricos a gran escala es necesario establecer un modelo matemático que se amolde a las características de propagación de este tipo de hardware, en escenarios suburbanos. El modelo de *Espacio Libre* ofrece una predicción de las pérdidas por trayectoria basada en una teoría de propagación ideal, en la cual la onda de radio no es reflejada o absorbida, y aunque este método ofrece buenas aproximaciones bajo condiciones de espacio abierto, para ambientes suburbanos las predicciones podrían alejarse de los valores reales. Otros modelos de propagación como el de *Okumura-Hata* ofrecen predicciones más acertadas teniendo en cuenta parámetros como las alturas de las antenas transmisoras y receptoras, frecuencias de propagación, regularidad del terreno, entre otras, las cuales implícitamente implican un nivel de

complejidad mayor al momento de modelar una red de sensores inalámbricos para una posterior implementación.

En esta investigación se aborda la relevancia de utilizar el modelo de propagación de *Okumura-Hata* respecto a modelos de menor complejidad como el de *Espacio Libre* y *Lee*, asociados a una red de sensores inalámbricos de micro celdas, basados en los porcentajes de error entre las predicciones de los modelos y los valores obtenidos a través de una implementación real. De igual manera evaluar el desempeño de una red de sensores inalámbricos usando módulos *Xbee*, buscando establecer que tan robusta es una red bajo este tipo de hardware en un ambiente suburbano; A partir de pruebas de propagación en espacios abiertos y cerrados se determinaron las pérdidas por trayectoria (Saunders, 1999) de los módulos *Xbee* con lo cual se establecieron las características principales de la red teniendo en cuenta las distancias de propagación entre nodos, análisis de enrutamiento, calidad de la comunicación bajo condiciones óptimas de RSSI (*Received signal strength indicator*), y se ajustaron modelos matemáticos de propagación de *Espacio Libre* y *Lee* para el hardware.

Con el fin de verificar la validez de los modelos de propagación, y de realizar una comparación entre los modelos de *Lee*, *Espacio Libre* y *Okumura-Hata*, se implementó una red de sensores inalámbricos en un ambiente suburbano usando módulos *Xbee Serie 2 XB24-B* y un *Gateway Connect Port X8* de *Digi*.

El resto de este artículo está organizado como sigue: La sección 2 muestra las pruebas de propagación para ambientes *Outdoor* e *Indoor*, y las pruebas de enrutamiento. La sección 3 muestra los resultados de las pruebas de propagación y enrutamiento. En la sección 4 se analizan las repercusiones de los resultados y finalmente la sección 5 se presenta las conclusiones del trabajo y observaciones realizadas.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA



Figura 1: Escenario de Prueba en un Ambiente Suburbano (Google Earth).

Al momento de implementar una red de sensores inalámbricos en un ambiente suburbano, es necesario evaluar los alcances y limitaciones del hardware a usar, así como establecer modelos de propagación que se adecuen al hardware, y el solo hecho de establecer una implementación de una red de sensores inalámbricos para la observación y análisis del desempeño del hardware , implica una logística importante, además de una gran cantidad de tiempo y recurso humano, que se busca ahorrar en esta investigación para desarrollos posteriores que retomen este tema; todo lo anterior en procura de encontrar algunos problemas que de otra manera serian imposibles de predecir, debido a la interacción tan cercana entre el ambiente y el sistema como tal, un ejemplo de esto es que para el funcionamiento de los módulos en campo abierto es necesario el uso de contenedores que filtren al máximo las influencias del ambiente en el sistema, lo cual podría implicar una atenuación importante.

Para determinar las limitaciones del hardware se realizaron pruebas de propagación en ambientes abiertos con y sin línea de vista teniendo en cuenta las pérdidas por trayectoria e ignorando las interferencias producidas por *shadowing* (Dousse, et al, 2005) y *fast fading*, así mismo se evaluó la influencia de tener los módulos *Xbee* dentro de gabinetes plásticos para uso en exteriores (www.tableplast.com/UserFiles/G.pdf, 2009) con grado de protección IP679. Todas las pruebas de campo tuvieron varias horas de duración, buscando una validez estadística en las conclusiones.

Se adecuaron modelos de propagación a los módulos *Xbee*, realizando comparaciones entre los valores obtenidos en una implementación real y a través de los modelos de propagación.

3. HARDWARE UTILIZADO

Se utilizaron los módulos *Xbee Serie 2 XB24-B* con una potencia de transmisión de salida de 2mW (+3dBm) y una tasa de transferencia de datos de 250kbps. La alimentación de los módulos y la comunicación serial, fue provista por tarjetas de desarrollo ([www.mastec.co.nz/Digi/Digi Sale.html](http://www.mastec.co.nz/Digi/Digi%20Sale.html), 2009) con interfaz RS232. Para las mediciones de RSSI se utilizó el software XCTU (www.digi.com/support/kbase/kbaseresultdetl.jsp?id=2125, 2009) que permite una comunicación vía RS232 con los módulos *Xbee Serie 2*, en conjunto con tarjeta de desarrollo CC2420DK: *Packet Sniffer* (focus.ti.com/lit/ug/swru045/swru045.pdf, 2009) y el software *SmartRF®* (focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/smartrftm-studio.html, 2009) el cual permite capturar, filtrar y decodificar paquetes de la capa MAC bajo el protocolo 802.15.4.

En la figura 2 se muestra la tarjeta de desarrollo y el módulo *Xbee Serie 2 XB24-B*, así como el *Sniffer* inalámbrico CC2420DK

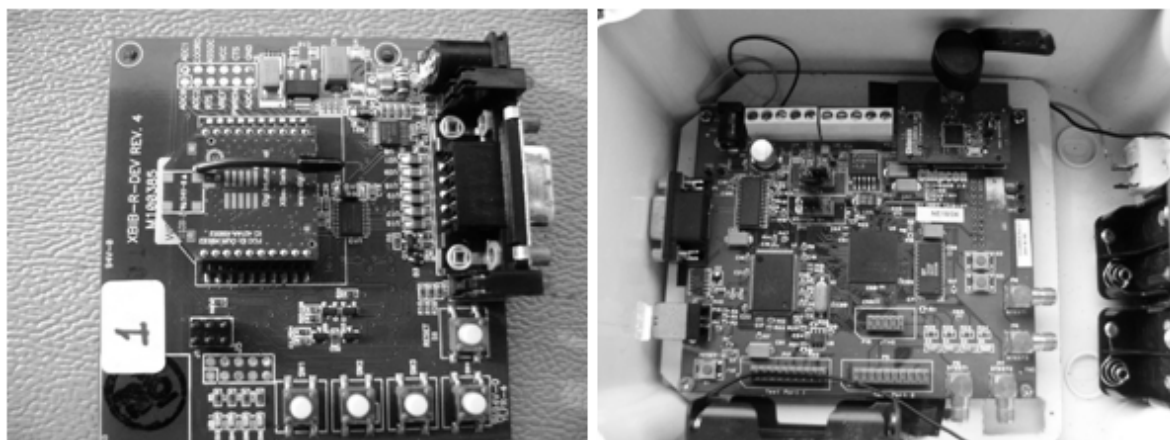


Figura 2: Módulo *Xbee Serie 2* en Tarjeta XBIB-R-DEV, y *Sniffer* Inalámbrico CC2420DK de *Texas Instrument*.

4. PRUEBAS REALIZADAS

4.1. VARIACIÓN DE LA POTENCIA RECIBIDA CON RESPECTO A LA DISTANCIA PARA ESPACIOS ABIERTO CON LÍNEA DE VISTA

En esta prueba se busca encontrar los límites de distancia reales a los cuales los módulos *Xbee Serie 2* empiezan a tener problemas de transmisión de paquetes de datos entre dos módulos que se encuentran en un espacio abierto y con línea de vista entre ellos, además de registrar los niveles de RSSI para varias distancias de separación que permitan la adecuación de modelos de propagación para este tipo de hardware; en la figura 2 se muestra la tarjeta de desarrollo y el módulo *Xbee Serie 2 XB24-B*, así como el *Sniffer* inalámbrico CC2420DK utilizado para contrastar niveles de RSSI asociados a cortas distancias de transmisión; en la figura 3 se muestra la configuración de los módulos *Xbee Serie 2* a través de X-CTU®, que consistió en escoger un canal de transmisión C (2410MHz) (IEEE Computer Society, 2003) y establecer el firmware *Znet 2.5* para el funcionamiento de un coordinador y un *Router/end device*. Los módulos fueron ubicados a 1.5m del suelo y a una distancia inicial entre módulos de 5m.

Para esta prueba se discrimino la influencia de paquetes de transmisión de diferentes longitudes, debido a que esto solo modificaría el tiempo de espera de los mensajes en los módulos *Xbee Serie 2*; en la figura 4 se presenta una herramienta del X-CTU® denominada "*Range Test*", que permite determinar parámetros como los niveles de RSSI, paquetes perdidos/entregados y la descripción del mensaje enviado en caracteres ASCII, de manera que cuando el coordinador recibe los paquetes de datos de vuelta se obtienen sus niveles de RSSI.

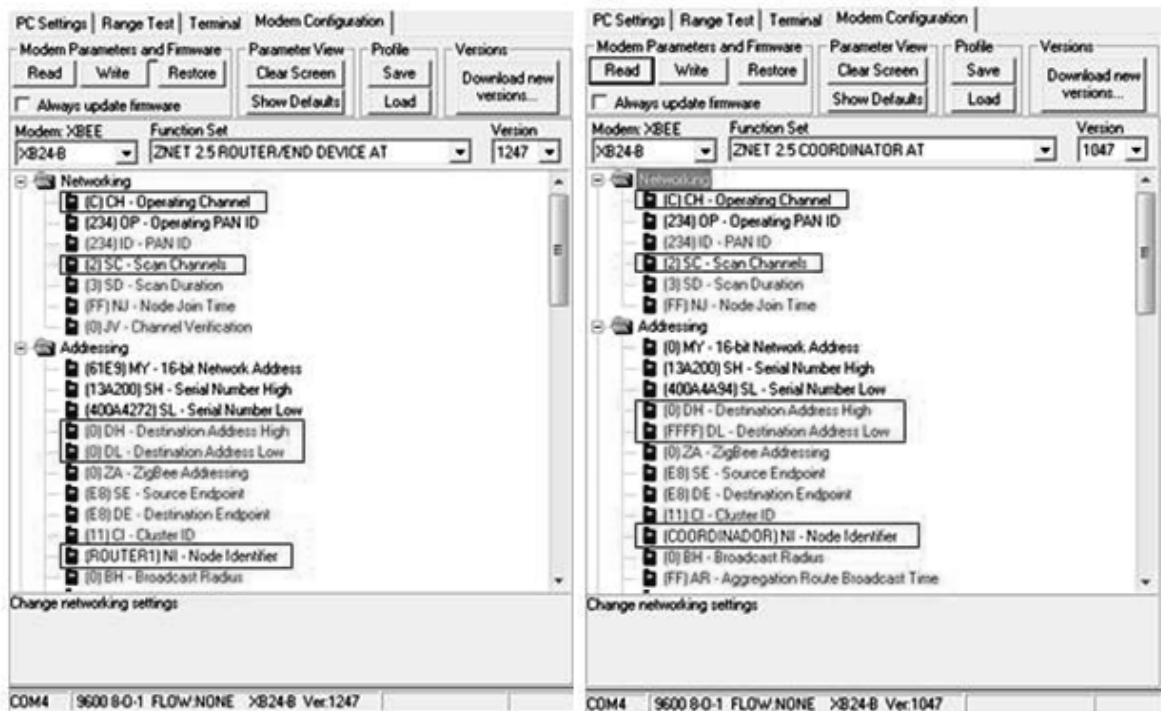


Figura 3: Configuración del Módulo Xbee Serie 2 Router 1 y Coordinador.

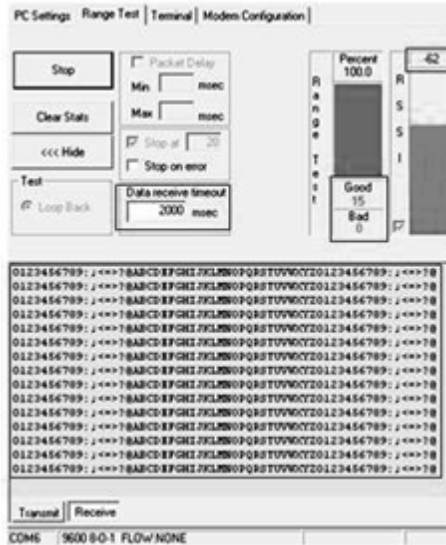


Figura 4: Range Test del X-CTU®

En la prueba el *Range Test* fue configurado para enviar 3 paquetes de datos de 60 caracteres ASCII cada uno, con un *data receive timeout* de 2s.

En la figura 5 se muestra un esquema general de la prueba, en la cual el módulo Coordinador envía los paquetes de datos establecidos con *Range Test* hacia el *Router 1*, este a su vez los manda de vuelta al Coordinador, donde se analiza si el paquete es correcto, y en caso afirmativo, se registra el nivel de RSSI con el que llega el paquete a través del *sniffer* inalámbrico y *Range Test*, a continuación se aumenta la distancia "X" de separación entre los módulos en 5m y el proceso anterior se repite hasta los 150m, tomándose registro del nuevo valor de RSSI; este proceso se realizó con los módulos *Xbee Serie 2* dentro y fuera de cajas contenedoras plásticas normalizadas con protección IPV6 para tener una referencia de los niveles de atenuación que introducirían en el sistema.

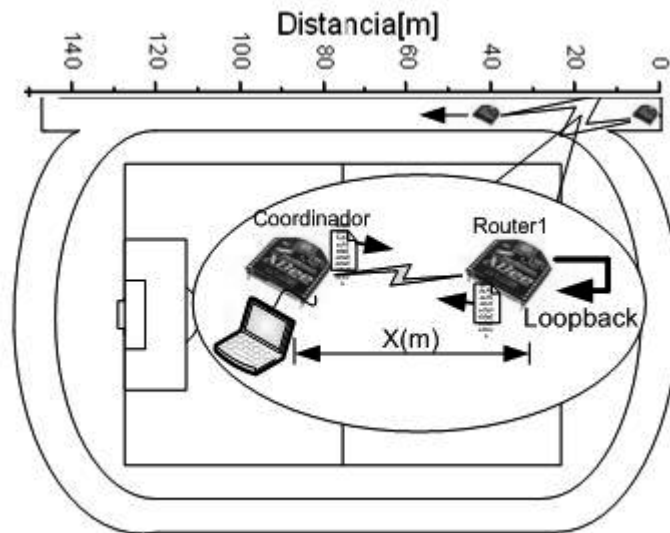


Figura 5: Esquema General de los Módulos *Xbee Serie 2*

4.2. ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD EN LA TRANSMISIÓN DE DATOS

Para este análisis se adecuaron 3 módulos *Xbee Serie 2*, uno de ellos configurado como Coordinador y 2 configurados como *Router 1* y *Router 2*, ubicados en oficinas contiguas como se observa en la figura 6.

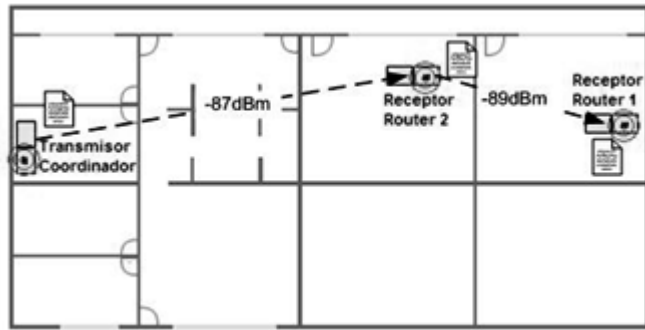


Figura 6: Ubicación Física de los Módulos Xbee Serie 2.

La ubicación fue determinada teniendo en cuenta que en los enlaces *Coordinador-Router 2* y *Router 2-Router 1* los niveles de RSSI marcaban valores cercanos al nivel de sensibilidad teórica de -96dBm , como son -87dBm y -89dBm respectivamente y que un enlace directo *Coordinador-Router 1* fuera imposible, teniendo que acceder a un enlace indirecto a través de *Router 2*.

A partir de un programa en Matlab (Figura 7), se generó un código pseudoaleatorio, que se envió desde el coordinador hasta el *Router 1*; teniendo en cuenta que un enlace directo entre estos dos módulos no es posible, debido a los niveles de RSSI, el coordinador debió usar el nodo intermedio *Router 2* para entregar los paquete de datos.

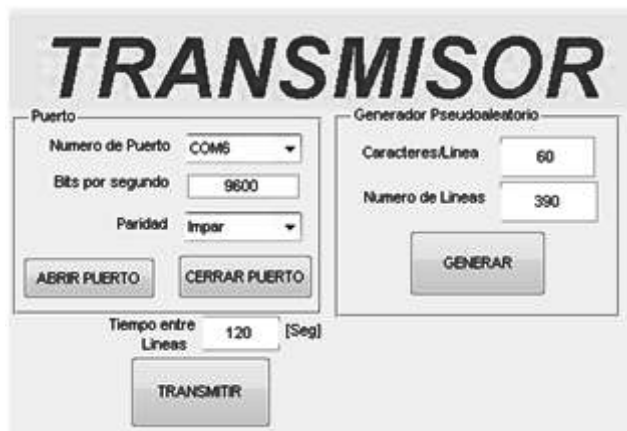


Figura 7: Configuración del Programa Transmisor.

La prueba tuvo una duración de 13 horas, donde se enviaron 390 paquetes de 60 bytes cada 120 segundos desde el coordinador al *Router* 1, teniendo en cuenta los datos que recibían los dos *Routers* para una comparación posterior con el mensaje original. Cabe destacar que el objetivo primordial de esta prueba era encontrar problemas al nivel del enrutamiento entre dos enlaces que funcionan al límite de las restricciones de RSSI entre enlaces.

Para una segunda prueba *indoor* donde se buscaba evaluar la calidad de la transmisión bajo optimas condiciones de RSSI, se adecuaron 8 módulos *Xbee Serie 2*, ubicados como indica la figura 8, uno funcionando como Coordinador y el resto como *Routers*, donde cada módulo tenía comunicación directa con el Coordinador, el cual hacía peticiones de datos a los módulos cada 600s, los cuales posteriormente serian comparados para verificar la validez de la transmisión; esta prueba tuvo una duración total de 12 horas.

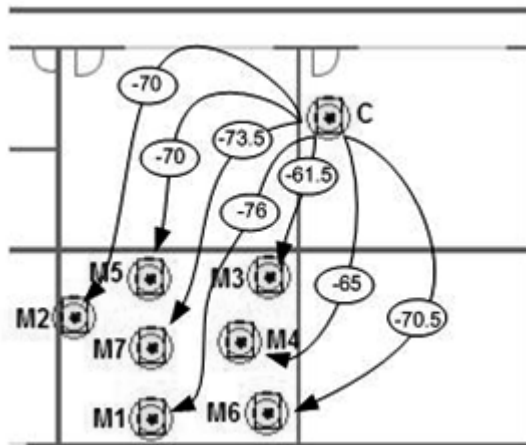


Figura 8: Ubicación de la Segunda Prueba *Indoor* y Niveles de RSSI de los enlaces en dBm.

4.3. ANÁLISIS DE ENRUTAMIENTO DE PAQUETES

Se adecuaron 8 módulos *Xbee Serie 2* de los cuales 1 funcionaba como Coordinador y 7 como *Routers*, todos en el canal 12 (2440 MHz); El objetivo general de esta prueba, fue observar las rutas de cada uno de los módulos *Xbee Serie 2* al no tener una línea de vista con el coordinador de la red, debido a

obstáculos típicos de un edificio de oficinas, como paredes y ventanas, y analizar el comportamiento de la red sobre errores controlados como dar de baja módulos que eran necesarios para la comunicación entre dos nodos, buscando así reconstruir las rutas de los mensajes bajo distintas condiciones de funcionamiento.

Básicamente el coordinador enviaba el comando AT (ATND), el cual descubre cuales módulos están en la red, este proceso hace que todos los módulos envíen un paquete de confirmación al Coordinador, los cuales pueden observarse a través software *PACKET SNIFFER*®, determinándose además de otros parámetros, la dirección de destino y la dirección fuente del paquete de datos, con lo cual se puede establecer cuáles fueron los nodos por los que paso un mensaje en particular. En la figura 9 se presenta el esquema de ubicación de los módulos *Xbee Serie 2* para la prueba, la cual fue realizada en un área de oficinas, para simular un ambiente *Indoor*.

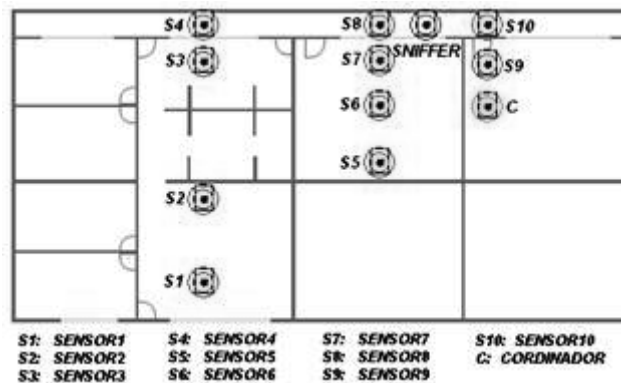


Figura 9: Esquema de Ubicación de los Módulos *Xbee Serie 2*.

4.4. IMPLEMENTACIÓN EN AMBIENTE SUBURBANO

Con el objetivo de evaluar los modelos de propagación de *Espacio Libre* y *Lee* ajustados a los módulos *Xbee Serie 2*, se implemento una red en un ambiente suburbano, a partir de 11 nodos, 10 módulos *Xbee Serie 2* configurados como *Routers*, y un *Gateway* todos los nodos con línea de vista entre su primer salto más cercano, funcionando en el canal 12 (2440MHz), a una altura del suelo de 6m

y distribuidos en un área de 5830 m² (Figura 10). Es lógico pensar que debido a la gran cantidad de reflexiones asociadas a los edificios cercanos, que no son tenidas en cuenta en el análisis, la aproximación de los modelos de propagación de *Lee* y *Espacio Libre* se vean comprometidas, con respecto a las registradas en espacios abiertos, sin la presencia de obstáculos.



Figura 10: Red de Sensores Inalámbricos Suburbana (Google Earth).

Se desarrollo una prueba en la que un *Gateway Connect Port X8* registraba cada 60 segundos los niveles de RSSI de los enlaces entre nodos cercanos. Luego de una recolección de datos de 13 horas se analizaron los promedios de los niveles de RSSI de los enlaces entre distintos módulos.

5. RESULTADOS

5.1. VARIACIÓN DE LA POTENCIA RECIBIDA CON RESPECTO A LA DISTANCIA PARA ESPACIOS ABIERTO CON LÍNEA DE VISTA

En la figura 11 se muestran los niveles de RSSI de la pruebas con los módulos dentro y fuera de las cajas contenedoras; Para la prueba con los módulos fuera de las cajas no existieron pérdidas de paquetes de datos entre los -61dBm y -87dBm para 5 metros y 145 metros respectivamente.

Los datos anteriores son adecuados si se piensa en trabajar con esas distancias máximas y con línea de vista entre los módulos, pero si se necesita trabajar en aplicaciones industriales que estén bajo la influencia de los fenómenos naturales, es necesario pensar en un contenedor, el cual representará una atenuación en los niveles de RSSI; al repetir la prueba anterior, con los módulos dentro de las cajas contenedoras se tiene que los niveles de RSSI para las cuales no hubo perdida de paquetes de datos oscilaron entre los -66dBm y -90dBm para 5m y 105m respectivamente, lo cual implica una reducción del rango de transmisión satisfactoria de 145m sin caja a 105m dentro de la caja contenedora.

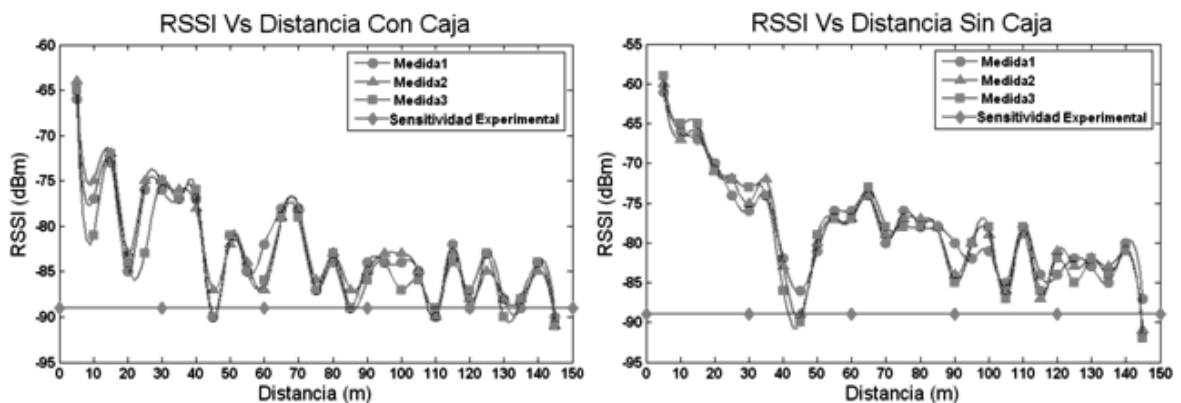


Figura 11: Niveles de RSSI vs Distancia con los Módulos Dentro y Fuera de la Caja Contenedora.

En la figura 12 se presenta una comparación de los promedios de los datos obtenidos en las pruebas anteriores, en los cuales se encuentra una leve atenuación cuando los módulos están dentro de las cajas contenedoras.

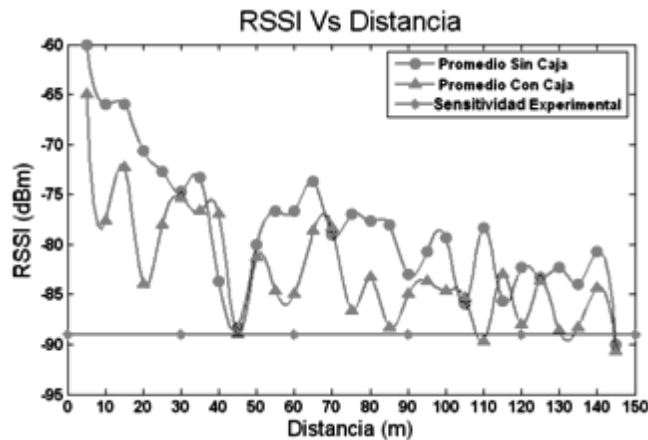


Figura 12: Comparación de los Niveles de RSSI vs Distancia con los Módulos Dentro y Fuera de la Caja Contenedora.

5.2. ADECUACIÓN DE LOS MODELOS DE ESPACIO LIBRE Y LEE PARA LOS MÓDULOS XBEE SERIE 2.

A partir de los resultados obtenidos en la prueba *Outdoor*, se tienen los datos para establecer un modelo de propagación que se amolde a las características de los módulos *Xbee Serie 2*, para ello, existen distintos modelos de propagación, entre los cuales se escogieron el modelo de Lee y el modelo de Espacio Libre debido a sus requerimientos en cuando a distancias de propagación, tamaño de antena y frecuencia de transmisión.

Cuando una señal de radio se propaga a través de terreno plano, experimenta una atenuación, que es debida a varios factores como son las pérdidas de Espacio Libre, las reflexiones debidas al suelo y las refracciones debido a la superficie de la tierra (Willis, Kikkert, 2007). El modelo de Espacio Libre calcula el decremento en el nivel de potencia de la señal de radio teniendo en cuenta la distancia entre la antena transmisora y receptora, la frecuencia a la que se transmite y una

constante que fue determinada experimentalmente en base a las pruebas de propagación en campo abierto para los módulos *Xbee Serie 2*.

En particular para el modelo de propagación de Espacio Libre se cumple que:

$$LOS_{F(dBm)} = 2,44 + 20\text{Log}_{10}(d) + 20\text{Log}_{10}(f) + C \quad (1)$$

Donde la distancia d se expresa en Km, la frecuencia f en MHz y la Constante C se determina experimentalmente.

A partir de los parámetros y los resultados de la prueba *Outdoor* se puede establecer una ecuación para determinar la magnitud de la potencia recibida (Ecuación 5 y 8).

$$P_{R(dBm)} = P_T + G_T + G_R - LOS \quad (2)$$

Donde P_T es la potencia transmitida en dBm, P_R es la potencia recibida en dBm, G_T es la ganancia de la antena transmisora y G_R es la ganancia de la antena receptora.

$$P_{R(dBm)} = P_T - 20\text{Log}_{10}(d) - 20\text{Log}_{10}(f) + K \quad (3)$$

Donde K es la constante que depende de las ganancias de las antenas.

$$K = G_T + G_R - 2,44 - C \quad (4)$$

Con lo cual queda definido el modelo de propagación de Espacio Libre como se muestra en la ecuación 5.

$$P_{R(dBm)} = -102,8 - 20\text{Log}_{10}(d) \quad (5)$$

El modelo de Lee es usado para predecir los niveles de potencia de una señal recibida para una distancia determinada entre la antena transmisora y la antena receptora debido a pérdidas por trayectoria, en particular, la filosofía del modelo de Lee se basa en que para un sistema de comunicación inalámbrico donde la altura de la antena transmisora este muy cerca al suelo, la señal recibida se verá

afectada por dos factores. Uno de ellos es la fuerte reflexión del suelo, la cual depende del contorno del terreno a lo largo del camino de la onda de radio, el otro factor es debido a las pérdidas producidas por estructuras como edificios (Lee, 1988). Para la aplicación del modelo de Lee al patrón de propagación de los módulos *Xbee Serie 2* no se tendrán en cuenta las reflexiones debido a estructuras cercanas en los ambientes suburbanos.

Para el modelo de Lee se cumple la siguiente ecuación:

$$P_{R(dBm)} = P_{R0} - 10\gamma \text{Log}_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (6)$$

Donde la distancia de referencia d_0 se expresa en Km, la distancia d en Km, la potencia recibida de referencia en dBm y la Constante γ se determina experimentalmente.

$$\gamma = \frac{P_{R0} - P_R}{10 \text{Log}_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right)} \quad (7)$$

$$P_{R(dBm)} = -48 - 17.3 \text{Log}_{10}\left(\frac{d}{1000}\right) \quad (8)$$

En la figura 13 se presenta una comparación entre los niveles de RSSI obtenidos en campo, y los a través de los modelos de propagación, marcándose una desviación estándar de 4.03 para el modelo de Espacio Libre y de 0.49 para el Modelo de Lee.

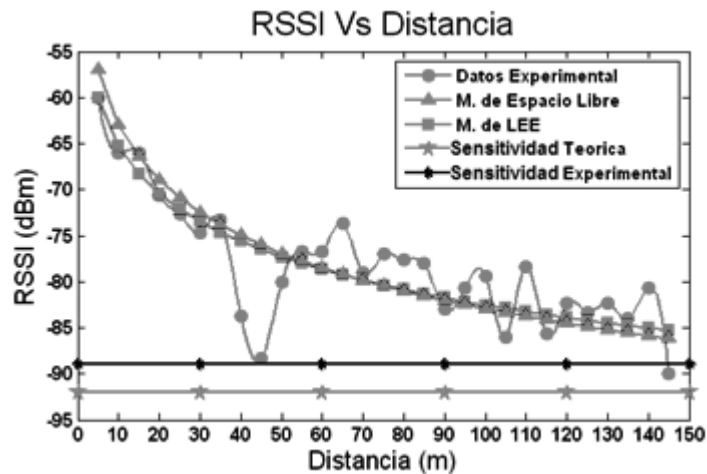


Figura 13: Comparación de los Modelos de Espacio Libre y Lee con los Datos Obtenidos en la Prueba de Campo.

El modelo de propagación de *Hata* predice los niveles de RSSI para diferentes distancias, entre la antena transmisora y receptora teniendo las siguientes limitaciones: frecuencia portadora de 150MHz a 1500MHz, distancias desde la base transmisora de 1Km a 20Km, altura de la antena de la estación base de 30m a 200m, altura de la antena móvil de 1m a 10m (Elfadhil, et al, 2005). Y aunque el modelo de *Hata* tiene modelos matemáticos para varios entornos, en esta investigación solo será tenido el modelo matemático de pérdidas por trayectoria para ambientes suburbanos.

Aunque las restricciones anteriores excluyen a los módulos Xbee Serie 2 del modelo de propagación de *Hata*, se realizó una adaptación para comparar los resultados predichos por los modelos de Lee y Espacio Libre.

Para el modelo de *Hata* se cumple que:

$$L_{(dB)} = 69.55 + 26.16 \log(f) - 13.82 \log(h_{te}) - ah_{te} + (44.9 - 6.55 \log(h_{te})) \log(d) \quad (9)$$

$$ah_{te(dB)} = (1.1 \log(f) - 0.7) h_{te} - (1.56 \log(f) - 0.8) \quad (10)$$

Donde la distancia d se expresa en Km, la frecuencia f en MHz, la altura del transmisor h_{te} en m y la altura del receptor h_{re} en m.

La adecuación del modelo de *Hata* para la potencia recibida de los módulos *Xbee Serie 2* se muestra en la ecuación 11 para un ambiente suburbano.

$$P_r(\text{dBm}) = -126.36 - 38.98 \text{Log}(d) \quad (11)$$

5.3. ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD EN LA TRANSMISIÓN DE DATOS

En la figura 14 se muestran los resultados de la prueba obtenidos a través de Matlab, registrándose pérdidas de 950 bytes en el *Router 2*, lo que indirectamente implica la no recepción del mensaje en el *Router 1*.



Figura 14: Resultado Primera Prueba *Indoor*.

Teniendo en cuenta que existieron 950 bytes erróneos de los cuales 56 se perdieron, se puede establecer una BER como sigue:

$$BER = \frac{\text{Numero de bits errados}}{\text{Numero de bits transmitidos}} \quad (12)$$

$$BER = \frac{894 * 8 \text{bits}}{187200 \text{bits}} \quad (13)$$

$$BER = 0.0382 \quad (14)$$

Para la segunda prueba *Indoor*, no se presentaron errores en el envío y recepción de paquetes de datos (Figura 15).



Figura 15: Resultado segunda prueba *Indoor*.

5.4. ANÁLISIS DEL ENRUTAMIENTO DE PAQUETES

Las tablas de rutas establecidas por los módulos dependen del mejor nivel de RSSI entre cada uno de ellos para tener una óptima transmisión de los paquetes hacia el coordinador descritos en la figura 16, ya que ellos tiene un algoritmo vector-distancia transparente para el enrutamiento de paquetes que depende del nivel de RSSI.

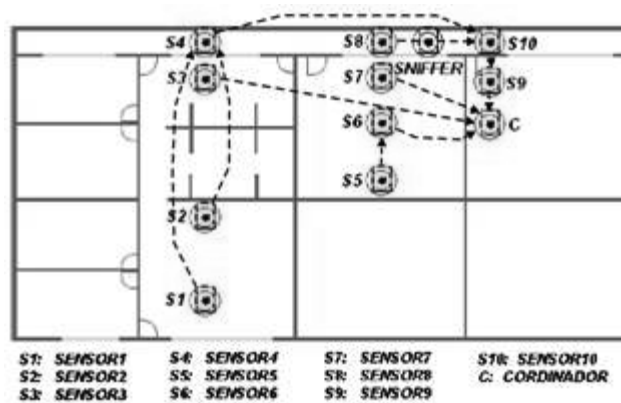


Figura 16: Primer Esquema de Enrutamiento.

En la figura 17 se muestran las distintas rutas que se generan al quitarse nodos intermedios, cabe aclarar que la tabla de rutas que maneja el coordinador se actualiza cada 250ms, lo que permite la detección de problemas en alguno nodo

intermedio o exista una mejor ruta hacia un destino en particular a través de las mediciones de RSSI entre nodos.

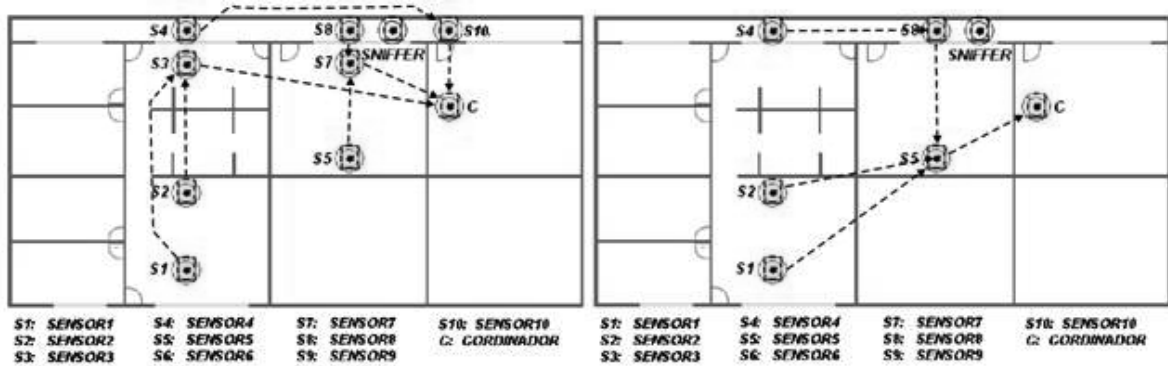


Figura 17: Segundo y Tercer Esquema de Enrutamiento.

En esta última figura al fallar el módulo o sensor 5 los demás módulos quedan aislados de la red al no tener un óptimo nivel de RSSI con el coordinador.

Los esquemas de enrutamiento fueron obtenidos a través del software *PACKET SNIFFER*® por medio del cual permite seleccionar el dispositivo captador y el canal de la red (0x12 2440 MHz), también se pueden seleccionar algunos parámetros como *Lenght Byte*, *destination*, PAN ID entre otros seleccionando *Text* en *Payload format* se puede ver el paquete en código ASCII, Bytes o código hexadecimal, para posteriormente capturar los paquetes.

En la figura 18 Se presenta una de las capturas obtenidas con el software *PACKET SNIFFER*® y el módulo CC2430EM de *Texas Instruments* que permiten visualizar la longitud, la dirección fuente y destino de los paquetes de datos que están en la cobertura del *Sniffer*, así como los nodos que están asociados, los saltos que da un paquete de datos en particular y la información en si del mensaje en caso de no estar encriptado, además del nivel de RSSI entre el módulo fuente y destino.

| | | | | |
|--------|---------------|----------------|--|------------|
| Length | Dest. Address | Source Address | MAC payload | RSSI (dBm) |
| 78 | 0x6AA1 | 0x19C5 | 0*****:*****zB*0*****@J* ND*****@J* SENSOR4***** | -70 |
| Length | Dest. Address | Source Address | MAC payload | RSSI (dBm) |
| 78 | 0x0000 | 0x6AA1 | 0*****:*****zB*0*****@J* ND*****@J* SENSOR4***** | -74 |
| Length | Dest. Address | Source Address | MAC payload | RSSI (dBm) |
| 79 | 0x0000 | 0x6AA1 | 0*****:*****zB*0*****@J* ND*J*****@J* SENSOR10***** | -74 |

Figura 18: Captura de Paquetes de Datos con **PACKET SNIFFER®**.

5.5. IMPLEMENTACIÓN EN AMBIENTE SUBURBANO

En la figura 19 se observa la distribución física final de los módulos *Xbee Serie 2* en un ambiente suburbano.

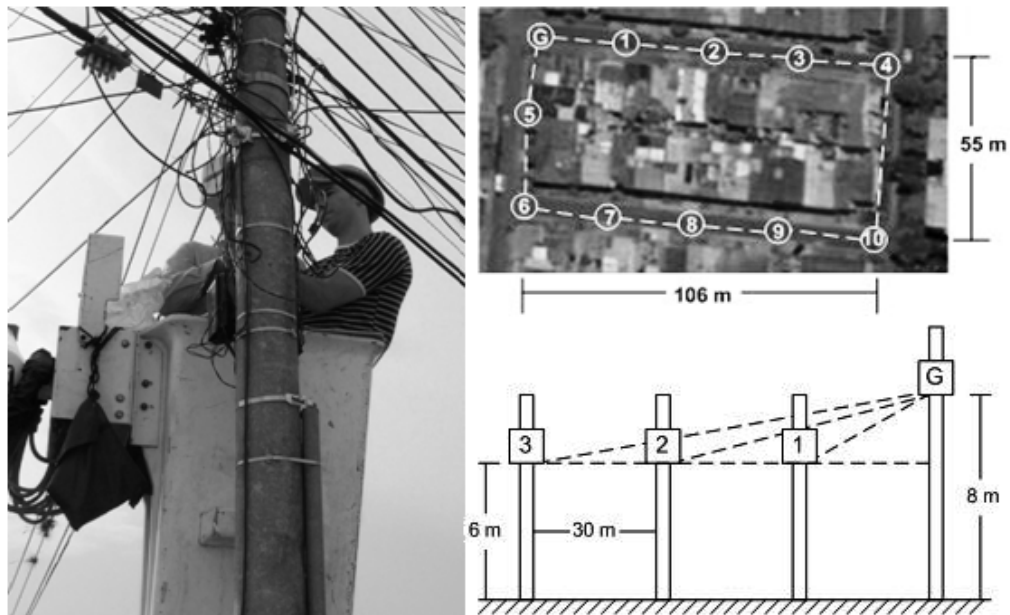


Figura 19: Ubicación Física de los Módulos *Xbee Serie 2* en un Ambiente Suburbano.

En la Tabla 1. Se observa que la peor predicción de los modelos de propagación conllevan a un error del 12.5%, y 14.1% para el modelo de Lee y Espacio Libre respectivamente, lo cual representan un mayor error con respecto a las comparaciones de los datos en la pruebas de propagación en ambientes abiertos, lo cual es obvio teniendo en cuenta que la influencia de las reflexiones multi trayectorias es mayor en ambientes suburbanos debido a las edificaciones

cercanas. A partir de una comparación entre el modelo de *Okumura-Hata* y los modelos de Lee y Espacio Libre se demuestra que los errores máximos son del 11.5% y 8.65% respectivamente.

Tabla 1: Niveles de RSSI medidos y obtenidos a través de los modelos de propagación

| Enlace | Distancia [m] | RSSI [dBm] | | | | %Error | | | | |
|--------|---------------|--------------|--------|----------|-----------------|---------------------|-----------------------|----------------------|-------------|---------------|
| | | Experimental | M. Lee | M. Friss | M. Okumura-Hata | Experimental Vs Lee | Experimental Vs Friss | Experimental Vs Hata | Lee Vs Hata | Friss Vs Hata |
| P7-P11 | 106.00 | -82.20 | -83.04 | -82.51 | -88.37 | 1.02 | 0.38 | 7.50 | 6.41 | 7.10 |
| P2-P3 | 27.50 | -72.40 | -72.90 | -70.79 | -65.53 | 0.69 | 2.22 | 9.50 | 10.12 | 7.44 |
| P1-P5 | 106.00 | -84.20 | -83.04 | -82.51 | -88.37 | 1.38 | 2.01 | 4.95 | 6.41 | 7.10 |
| P1-P9 | 77.50 | -80.40 | -80.68 | -79.79 | -83.06 | 0.35 | 0.76 | 3.31 | 2.96 | 4.10 |
| P1-P7 | 55.00 | -88.40 | -78.11 | -76.81 | -77.26 | 11.64 | 13.11 | 12.60 | 1.09 | 0.58 |
| P6-P8 | 39.00 | -75.60 | -75.53 | -73.82 | -71.44 | 0.09 | 2.35 | 5.50 | 5.42 | 3.22 |
| P1-P2 | 25.00 | -71.00 | -72.18 | -69.96 | -63.91 | 1.66 | 1.46 | 9.98 | 11.46 | 8.65 |
| P9-P10 | 28.50 | -69.40 | -73.17 | -71.10 | -66.13 | 5.43 | 2.45 | 4.71 | 9.62 | 6.99 |
| P1-P6 | 27.50 | -83.40 | -72.90 | -70.79 | -65.53 | 12.59 | 15.12 | 21.43 | 10.12 | 7.44 |
| P1-P4 | 77.50 | -80.80 | -80.68 | -79.79 | -83.06 | 0.15 | 1.25 | 2.80 | 2.96 | 4.10 |

6. DISCUSIÓN

En el momento de evaluar una red de sensores inalámbricos es necesario enfatizar en dos puntos, uno es la estimación del desempeño de la red como tal y el otro el modelado de la misma. En el primer punto es necesario el conocimiento del hardware a usar, en este caso los módulos *Xbee Serie 2*, prometen un alto nivel de confiabilidad en cuando a entrega de datos, siempre y cuando, cada nodo tenga un nivel de RSSI adecuado, esto es, mayor a -90dBm; así mismo, el tamaño máximo de datos a enviar, exceptuando las cabeceras del protocolo, se resume a 130 bytes con una tasa máxima de transferencia de 250kbps, lo cual pone en duda su uso en aplicaciones multimedia. Se debe enfocar entonces a la implementación de redes de sensores inalámbricos a nivel industrial donde se haga necesario el uso de muchos nodos y se manejen paquetes pequeños de información, lo cual en resumidas cuentas son las ventajas de *Zigbee*, y de aquí la necesidad de determinar que tan robusta es la red de sensores, ya que es posible que los datos que se manejen sean críticos.

Una de las ventajas que presenta *Xbee* y en general la tecnología *Zigbee*, es un bajo consumo de energía a cambio de un bajo rango de transmisión y un paquete de datos máximo posible a enviar, además de distancias de transmisión bastante bajas, pero suficientes para las aplicaciones industriales a las que están destinados. En particular los módulos *Xbee Serie 2* presentan unas distancias máximas de propagación sin errores hasta los 145 metros, lo cual da una idea al diseñador de la red para la ubicación física ideal de los módulos *Xbee Serie 2*, esto es, una mayor cobertura con la menor cantidad posible de nodos. Además hay que tener en cuenta que para distancias mayores a los 100m los niveles de RSSI están casi al límite, poco menos de -90dBm, así que es posible la pérdida de datos en caso de una obstrucción temporal de la línea de vista entre los módulos.

De igual manera es necesario tener en cuenta la atenuación de un contenedor físico, así pues una distancia prudente vendría a ser cuando los niveles de RSSI estén alrededor de los -80dBm sin contenedor o -85dBm en el contenedor, lo cual significa alrededor de 105 metros con línea de vista, siendo este un valor tentativo y solo para ilustrar al diseñador de la red, ya que los parámetros reales de funcionamiento son óptimos dependiendo netamente de la aplicación.

Un punto importante a evaluar es el nivel de modificación del firmware del hardware, ya que este constituye otro parámetro de diseño, para los módulos *Xbee Serie 2* se presenta como ventaja de funcionamiento la facilidad con la que se puede establecer una red, comenzando por escoger un coordinador y un nodo *Router* o *End Device* para luego establecer un canal. Lo anterior puede verse de igual forma como una desventaja, ya que factores básicos de la red como los algoritmos usados para el enrutamiento no pueden ser modificados, limitándose así el nivel de diseño a la ubicación física de los nodos, lo cual podría no ser adecuado para algunas aplicaciones industriales. En si el nivel de configuración de los módulos puede verse como un punto positivo o negativo dependiendo de los requerimientos a los que apunte la aplicación. Cualquiera sea el caso es necesario tener presente que, dependiendo de la ubicación física de los módulos, la red podrá garantizar la mínima pérdida de paquetes en caso de que un nodo en particular falle, ya que si hay un sensor que tienen una ruta posible hacia el coordinador, cuando alguno de los nodos intermedios deje de funcionar estos datos simplemente se van a perder. En particular los módulos *Xbee Serie 2*, usan un algoritmo interno vector-distancia establecido por los niveles de RSSI entre nodos cercanos, con los cuales se crea una tabla de rutas dinámica que se va actualizando constantemente para cada módulo, de manera que en el momento de enrutar un paquete de datos, y en particular para determinar el siguiente salto, se utilizan los nodos que tengan el mejor RSSI con respecto al nodo actual.

El segundo punto a tener en cuenta es el modelado de la red, el cual parte del conocimiento de las limitaciones de la red, en el ambiente donde se piensa

implementar y en el nivel de complejidad del modelo donde se podría pensar que la mejor opción sería el que ofreciera una mejor aproximación a los valores reales, pero hay que tener en cuenta que esto siempre implica una mayor complejidad en cuanto a la obtención de datos y el análisis de los mismos, por lo que escoger adecuadamente el modelo matemático de propagación implica establecer una relación entre que tanto afectan los niveles de aproximación de los datos reales en el diseño de una implementación real a gran escala, y la logística de obtener todos los parámetros requeridos por el modelo. Los modelos de propagación complejos se basan en los parámetros de funcionamiento de la red y en las influencias del ambiente en el sistema, analizando desde el perfil del terreno de la trayectoria de propagación, hasta la influencia de fenómenos físicos asociados a los canales usados, y análisis de pérdidas multitrayectorias debido a reflexiones y absorciones asociadas a distintos obstáculos en el entorno; Mientras que modelos de propagación más sencillos tienen en cuenta un patrón de propagación ideal lo cual facilita en gran medida los cálculos, y disminuye los requerimientos de datos para establecer una aproximación.

Al observar el comportamiento de una red de sensores inalámbricos implementada en un ambiente suburbano con distancias de transmisión cercanas a los 100 metros, antenas transmisoras y receptoras a distancias menores a 10 metros del suelo, se puede concluir que el modelo de *Espacio Libre* ofrece una aproximación adecuada, si se compara con modelos de propagación que requieren una mayor cantidad de datos y un nivel mayor de cálculo.

7. CONCLUSIONES

De los resultados presentados, de su análisis y de su discusión expuestos en este artículo, se pueden obtener las siguientes conclusiones, sobre los módulos *Xbee Serie 2*: 1) Al establecer una comunicación con línea de vista y con una antena fractal, alcanzarán distancias típicas para su uso en las redes de sensores inalámbricos a nivel industrial, en los cuales la entrega de paquetes será sin errores y los niveles de RSSI estarán entre los niveles óptimos. 2) Los modelos de propagación inalámbricos para exteriores de *Lee* y *Espacio Libre* se ajustan al comportamiento en campo abierto y ambientes suburbanos con línea de vista, estableciendo una herramienta para determinar las ubicaciones óptimas con respecto al nivel RSSI para una red de sensores inalámbricos. 3) El bajo porcentaje de error en la transmisión de los datos para un largo periodo de tiempo, nos muestra que se tiene una confiabilidad aceptable cuando los niveles de RSSI están al límite y un comportamiento excelente para niveles óptimos de RSSI. 4) Al ser configurados adecuadamente, los módulos *Xbee Serie 2* tienen la posibilidad de comunicarse a través de saltos entre nodos cercanos para el envío de los datos al módulo más remoto. 5) El enrutado se realiza a través de un algoritmo de encaminamiento que utiliza un protocolo de pregunta-respuesta (*Request-Response*) para eliminar las rutas que no son óptimas y facilitar el tráfico de datos. 6) Aun cuando el estándar 802.15.4 permite varias velocidades de transmisión inalámbrica, en los módulos *Xbee Serie 2* este parámetro no es configurable y permanece en 250 kbps. 7) Al estar bajo el estándar 802.15.4, el mecanismo de acceso al canal usa CSMA-CA (IEEE Computer Society, 2003), lo que implica que dos módulos no pueden transmitir al mismo tiempo.

REFERENCIAS

- [1]. Zigbee Alliance, Network Layer Specification 1.0, Dec 2004.
- [2]. J. I. Choi, J. W. Lee, M. Wachs, and P. Levis. "Opening the sensor network black box," SIGBED Rev., vol. 4, no. 3, pp. 13-18, 2007.
- [3]. Simon R. Saunders., "Antennas and propagation for wireless communication systems", 1 ed., pp. 85-87, Wiley, Londres, Inglaterra 1999.
- [4]. O. Dousse, F. Baccelli and P. Thiran, Impact of Interferences on connectivity in ad hoc networks, IEEE/ACM Tran. On Networking, Vol. 13, No. 2, pp. 425 – 436, Apr. 2005.
- [5]. IEEE Computer Society, IEEE std 802.15.4 Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS), pp 30, 2003.
- [6]. S. Willis, C. J. Kikkert, Radio propagation model for long-range wireless sensor networks, James Cook University, pp. 1-2, ICICS 2007.
- [7]. W. C. Y. Lee, Lee's Model, PacTel Corporation, Walnut Creek, CA, pp. 343 – 344, Feb. 1988.
- [8]. N. Elfadhil, M. A. Salam, A. Al-Lawati, Modification of an open area *Okumura-Hata* propagation model suitable for Oman, pp 1-2., 2005.
- [9]. www.tableplast.com/UserFiles/G.pdf, 2009.
- [10]. www.digi.com/support/kbase/kbaseresultdetl.jsp?id=2125, 2009.
- [11]. [www.mastec.co.nz/Digi/Digi Sale.html](http://www.mastec.co.nz/Digi/Digi%20Sale.html), 2009.
- [12]. focus.ti.com/lit/ug/swru045/swru045.pdf, 2009.
- [13]. focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/smarttrftm-studio.html, 2009.