

**CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVOS DE REDES DE SENSORES
INALÁMBRICOS EN AMBIENTES INDOOR Y OUTDOOR**

DIEGO ARMANDO MALDONADO DELGADO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA, ELECTRONICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2007

**CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVOS DE REDES DE SENSORES
INALÁMBRICOS EN AMBIENTES INDOOR Y OUTDOOR**



DIEGO ARMANDO MALDONADO DELGADO

Proyecto presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

PhD. OSCAR GUALDRÓN GONZÁLEZ

Codirector

MI(c). JOSE DE JESUS RUGELES URIBE

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA, ELECTRONICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2007**

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento y reconocimiento a:

Doctor Oscar Gualdrón González y Ms. José Rugeles Uribe, Director y Codirector del proyecto respectivamente.

Al grupo de Investigación CPS de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

A la Especialización en Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander.

Al Ingeniero Jairo Mantilla, encargado de los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

...Dedicado a cada uno de los integrantes de la familia Maldonado Delgado.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	1
1. REDES DE SENSORES INALAMBRICOS-WSN	3
1.1 CONCEPTOS GENERALES	3
1.1.1 Funcionamiento de una WSN	4
1.1.2 Aplicaciones de redes de sensores inalámbricos	5
1.1.3 Ventajas de usar una Red de Sensores Inalámbricos WSN	6
1.2 ESTÁNDAR IEEE 802.15.4 Y ESPECIFICACIÓN ZIGBEE™	8
1.2.1 Estándar IEEE 802.15.4	8
1.2.2 Especificación ZigBee™	10
1.3 HARDWARE Y SOFTWARE USADO EN EL DESARROLLO DEL PROYECTO	13
1.3.1 Hardware	13
1.3.2 Software	16
2. NIVELES DE POTENCIA Y RADIO DE COBERTURA	18
2.1 PRUEBAS EN ESCENARIO OUTDOOR	18
2.1.1 Diseño y Desarrollo de las pruebas	18
2.1.2 Análisis y procesamiento de la información obtenida	22
2.2 PRUEBAS EN ESCENARIO INDOOR	31
2.2.1 Diseño y Desarrollo de las pruebas	31
2.2.2 Análisis y procesamiento de la información obtenida	33
3. PARAMETROS INDICADORES DE CALIDAD DEL SERVICIO (PER-PRR-LQI)	47
3.1 CONCEPTOS GENERALES	47
3.1.1 Indicador de calidad del enlace – LQI	47
3.1.2 Tasa de error de paquetes - PER y Porcentaje de paquetes recibidos – PRR	47
3.2 CONFIGURACIÓN DE LAS PRUEBAS	48
3.3 RESULTADOS OBTENIDOS	50

4. LATENCIA	55
4.1 DISEÑO DE LAS PRUEBAS	55
4.1.1 Esquema General	55
4.1.2 Tipos de Pruebas	57
4.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS	60
4.2.1 Prueba 1	60
4.2.2 Prueba 2	61
4.2.3 Prueba 3	61
5. CONSUMO DE ENERGIA	63
5.1 CONSUMO DE CORRIENTE DEL RADIO TRANSCEIVER CC2420 Y LOS LEDS	63
5.2 CORRIENTE CONSUMIDA AL LEER LOS SENSORES (ACCESO A LA MEMORIA FLASH)	67
5.3 CONSUMO DE CORRIENTE AL EJECUTAR OPERACIONES MATEMÁTICAS	68
5.4 EVALUACIÓN DEL CICLO ÚTIL DE OPERACIÓN (DUTY CYCLE)	68
5.5 INCONVENIENTES PRESENTADOS	70
5.6 CONCLUSIONES	70
6. OTRAS PRUEBAS BASICAS DE CARACTERIZACION	71
6.1 INTERFERENCIA ENTRE CANALES	71
6.2 ATENUACIÓN POR PLACAS (COBERTURA ENTRE PISOS)	73
6.3 TIPOS DE ANTENAS	79
6.4 COEXISTENCIA ENTRE LAS REDES IEEE 802.15.4/ZIGBEE Y WI-FI - IEEE 802.11	82
7. CONCLUSIONES FINALES	87
8. RECOMENDACIONES	90
BIBLIOGRAFIA	91
ANEXOS	94

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros fundamentales de un dispositivo de una WSN	7
Tabla 2. Comparación entre estándares IEEE para WLAN y WPAN	8
Tabla 3. Bandas de Operación IEEE 802.15.4	9
Tabla 4. Equipo de pruebas outdoor	18
Tabla 5. Resultados Outdoor - Potencia Tx 0 dBm	22
Tabla 6. Configuración de los dispositivos para las pruebas de potencia	31
Tabla 7. Equipo Indoor	31
Tabla 8. Resultados de las pruebas indoor	34
Tabla 9. Cálculo de la diferencia entre valores	40
Tabla 10. Sensibilidad del CC2420	50
Tabla 11. Resultados de las Pruebas de Calidad del Enlace	51
Tabla 12. Resultados totales de la prueba de latencia	62
Tabla 13. Consumo de corriente al ejecutar la aplicación CntToLedsAndRfm	65
Tabla 14. Consumo de corriente al ejecutar la aplicación CntToLeds	65
Tabla 15. Cálculo de la corriente I_3	65
Tabla 16. Consumo de corriente al ejecutar la aplicación RfmToLeds	66
Tabla 17. Cálculo de la corriente I_5	66
Tabla 18. Porcentajes de Error del Consumo de Corriente del CC2420	67
Tabla 19. Resultados de las pruebas de tipos de antenas	81

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Componentes básicos de un nodo sensor inalámbrico	3
Figura 2. Funcionamiento de una WSN	4
Figura 3. Aplicaciones de Redes de Sensores Inalámbricos	5
Figura 4. Topologías básicas de red IEEE 802.15.4	9
Figura 5. Modelo de capas ZigBee™	11
Figura 6. Esquema de una red ZigBee™ en topología de malla	12
Figura 7. Diagrama de bloques de un <i>mote</i>	14
Figura 8. Nodos inalámbricos TmoteSky (derecha) y telosb (izquierda)	14
Figura 9. Diagrama de bloques del <i>Tmote Sky</i>	15
Figura 10. Chipcon Sniffer Receptor	16
Figura 11. Escenario para pruebas de potencia Outdoor – Cancha de Fútbol UIS	19
Figura 12. Esquema de pruebas outdoor	19
Figura 13. Registro de paquetes	20
Figura 14. Bases para Ubicación de los <i>motes</i> y el Sniffer	21
Figura 15. Desarrollo de Pruebas Outdoor	21
Figura 16. <i>Tmote Sky</i> Outdoor – Máxima Potencia (0 dBm)	23
Figura 17. <i>Telos B</i> Outdoor – Máxima Potencia (0 dBm)	24
Figura 18. Curva teórica de friss (0 dBm)	26
Figura 19. Friss contra Resultados Experimentales	26
Figura 20. Friss contra Resultados Experimentales con k ajustado	28
Figura 21. <i>Telos B</i> Outdoor – Mínima Potencia (-25 dBm)	29
Figura 22. Curva teórica de friss (-25 dBm)	29
Figura 23. Friss contra resultados experimentales (-25 dBm)	30
Figura 24. Ajuste de k para transmisión a la mínima potencia	30
Figura 25. Segundo piso edificio de alta tensión	32
Figura 26. Puntos de transmisión indoor	32

Figura 27. Puntos de transmisión y recepción indoor	32
Figura 28. Matriz en Excel de la potencia medida por puntos	35
Figura 29. Tx 201-Distribución de la potencia medida	35
Figura 30. Tx 205-Distribución de la potencia medida	36
Figura 31. Tx Pasillo-Distribución de la potencia medida	36
Figura 32. Simulación MATINDOOR punto por punto. Tx Pasillo	37
Figura 33. Distribución de potencia simulada – Tx201	38
Figura 34. Distribución de potencia simulada – Tx201	38
Figura 35. Distribución de potencia simulada – Tx201	39
Figura 36. Puntos seleccionados – Tx201	43
Figura 37. Puntos seleccionados – Tx205	44
Figura 38. <i>Telos B</i> y <i>Tmote Sky</i> indoor	44
Figura 39. <i>Tmote Sky</i> indoor y outdoor	45
Figura 40. <i>Telos B</i> indoor y outdoor	45
Figura 41. Campo Time Line	48
Figura 42. Configuración Máxima Potencia	49
Figura 43. Configuración Potencia Intermedia	49
Figura 44. Configuración Mínima Potencia	50
Figura 45. Paquetes Recibidos por el Sniffer para $P = -10$ dBm	51
Figura 46. PRR versus distancia entre emisor y receptor en escenario indoor	52
Figura 47. LQI versus distancia entre emisor y receptor en escenario indoor	53
Figura 48. RSSI versus PRR	53
Figura 49. RSSI versus LQI	54
Figura 50. Registro del voltaje en el cátodo del LED	56
Figura 51. Puntos de los <i>motes</i> donde se mide el escalón de voltaje	56
Figura 52. Diagrama General de las Pruebas de Latencia	57
Figura 53. Proceso generador de latencia	58
Figura 54. Latencia entre un emisor y un receptor	58

Figura 55. Comparación de latencia entre dos receptores (un emisor)	59
Figura 56. Latencia entre saltos consecutivos	60
Figura 57. Resultado Prueba 1	60
Figura 58. Resultado Prueba 2	61
Figura 59. Latencia entre saltos consecutivos	61
Figura 60. Latencia entre saltos consecutivos	62
Figura 61. Configuración física de las pruebas de consumo de energía	64
Figura 62. Grafica del ciclo útil de operación de un <i>mote</i> IEEE 802.15.4 / ZigBee	69
Figura 63. Selección del canal en el archivo CC2420Const	71
Figura 64. Configuración de dos redes no interferentes entre sí	72
Figura 65. Distribución de potencia en el ancho de banda de un canal IEEE 802.15.4	73
Figura 66. Plantas de la parte izquierda del edificio de Eléctrica Nueva	74
Figura 67. Plantas de la parte derecha del edificio de Eléctrica Nueva	74
Figura 68. Configuración del escenario. Pruebas 1 y 2	75
Figura 69. Resultados de las mediciones. Prueba 1	75
Figura 70. Resultados de las mediciones. Prueba 2	76
Figura 71. Configuración del escenario. Prueba 3	77
Figura 72. Valores Promedio de RSSI para la prueba de atenuación por placas	78
Figura 73 <i>Telos B</i> con antena externa	80
Figura 74. Esquema de la configuración de las antenas PCB y externa	80
Figura 75. Antenas SMA para emisor y receptor	81
Figura 76. Canales IEEE 802.15.4 (2.4 GHz) e IEEE 802.11b (Europa y Norte América)	83
Figura 77. Selección de Canales IEEE 802.15.4 (2.4 GHz)	83
Figura 78. Interferencia Wi-Fi -1	84
Figura 79. Interferencia Wi-Fi -2	85
Figura 80. Interferencia Wi-Fi-3	85
Figura 81. Resumen Final	87

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. HERRAMIENTAS JAVA USADAS POR TINYOS	94
Anexo B. PROGRAMACIÓN DE LOS MOTES	95
Anexo C. APLICACIONES TINYOS USADAS EN EL PROYECTO	98
Anexo D. PROGRAMACIÓN DEL NIVEL DE POTENCIA DEL RADIO CC2420	105
Anexo E. CAMBIO DE FRECUENCIA DE UN CONTADOR	108
Anexo F. MANUAL DE PROGRAMACIÓN TINYOS 2.0	108
Anexo G. FORMATOS DE LAS TRAMAS DE DATOS 802.15.4/ZIGBEE	108
Anexo H. ESTRUCTURA DE LAS CAPAS ZIGBEE	109

TITULO

CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVOS DE REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS EN AMBIENTES INDOOR Y OUTDOOR*

AUTOR

Diego Armando Maldonado Delgado **

Palabras Claves

IEEE 802.15.4, *mote*, *Tmote Sky*, *Telos B*, pruebas de caracterización, consumo de energía, sensibilidad, potencia.

Descripción

Las redes de sensores inalámbricos (WSN) surgieron como una solución de comunicaciones para ejecutar labores de monitorización y control de variables físicas por medio del despliegue y la operación de sensores ubicados en dispositivos conocidos como *motes*, que se comunican de forma inalámbrica entre sí, conformando redes tipo malla para dar cobertura a toda un área extensa. Los *motes* cumplen con todos los lineamientos del estándar IEEE 802.15.4 y la especificación ZigBee quienes son los encargados de definir las normas de comunicación. En la etapa de planeación es necesario realizar un estudio de las características reales de funcionamiento de los nodos de red o *motes*, con el fin de alcanzar el óptimo desempeño de una WSN.

Se diseñó y desarrolló una serie de pruebas y mediciones de laboratorio para dos *motes* de referencia *Tmote Sky* y *Telos B*, fabricados por las empresas Moteiv y Crossbow respectivamente. Los resultados de este proceso de caracterización producen información sobre algunos de los más importantes parámetros de funcionamiento de los *motes* como el radio de cobertura en espacios abiertos y cerrados, porcentaje de error de paquetes, sensibilidad, consumo de energía, latencia, calidad del servicio, entre otros. Esta información es procesada para obtener resultados que al ser comparados con los datos obtenidos de herramientas de simulación y las hojas de datos de los fabricantes, permiten concluir acerca de las condiciones de operación de los *motes* y de las posibilidades y limitaciones de los mismos en la futura conformación de una WSN.

Las características presentadas en la práctica son muy cercanas a las especificadas por los fabricantes pero se cumplen bajo ciertas condiciones que dependen en gran medida del entorno en donde se encuentre ubicada la red. Es posible ajustar los modelos teóricos a los datos experimentales para desarrollar futuras herramientas de planeación de WSN.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Ingeniería Electrónica. Director de Proyecto: PhD. Oscar Gualdrón González.

TITLE

CHARACTERIZATION OF WIRELESS SENSOR NETWORK DEVICES IN OUTDOOR AND INDOOR SURROUNDINGS*

AUTHOR

Diego Armando Maldonado Delgado **

Keywords

IEEE 802.15.4, *mote*, *Tmote Sky*, *Telos B*, characterization measurements, power consumption, sensitivity.

Abstract

Wireless sensor networks (WSN) were born as a communication solution aimed to develop monitoring and control processes of physical and environmental variables through deployment and performance of sensors placed on devices known as *motes*, which communicate each other wirelessly in order to arrange a mesh-type networking so they can cover a whole wide area. Mote devices fulfill both IEEE 802.15.4 and ZigBee standards which are in charge of define communication rules. It is necessary develop an assessment process of the actual running characteristics of motes at the planning stage, in order to accomplish an optimum performance of a WSN.

It was designed and executed a set of laboratory measurements for two *motes* named *Tmote Sky* and *Telos B*, which were made by Moteiv and Crossbow companies respectively. From outcomes of the characterization process, it is obtained information regarding to more important working parameters like cover range in outdoors and indoors, packet error rate, sensitivity, power consumption, latency, quality of service. This data is processed in order to obtain results which, when compared with results from simulation tools and datasheets, make possible to conclude about running conditions of *motes* and their chances and limitations in a future conformation of WSN.

Characteristics observed in practice are quite coincident to datasheets specifications that are fulfilled under certain conditions depending strongly on the area where WSN is placed. It is possible to adjust theoretical equations and models to experimental data, so it may be possible to develop future planning tools.

* Final Project

** Faculty of Physics-mechanic Engineering, School of Electric, Electronics and Telecommunications Engineering, Electronics Engineering. Project Manager: PhD. Oscar Gualdrón González.

Introducción

Dentro del auge y la constante evolución que están presentando por estos tiempos las comunicaciones inalámbricas, se han desarrollado varios tipos de redes como IEEE 802.15.3 e IEEE 802.11a/b/g (Wi-Fi) para comunicaciones que manejan altas tasas de transferencia de datos. En el año 2003, IEEE publicó un estándar conocido como IEEE 802.15.4 orientado a redes de corto alcance, baja potencia y bajas tasas de transferencia de datos.

Gracias a que los sistemas de telemetría de la actualidad han estado generando una demanda creciente de conectividad, flexibilidad y portabilidad, este nuevo estándar ha comenzado a abrirse paso en el mercado al convertirse en la base para el desarrollo de una nueva tecnología de control y monitoreo conocida como redes de sensores inalámbricos.

Algunas empresas que han estado a la vanguardia de estas nuevas implementaciones ya han desarrollado sus propios dispositivos de radio compatibles con el estándar, que rápidamente se han consolidado como productos altamente comerciales. Otras empresas, trabajando conjuntamente con universidades, han logrado integrar en una misma tarjeta, componentes básicos de telemetría como sensores y microcontroladores junto con dispositivos de radio compatibles con IEEE 802.15.4, creando así los dispositivos que se conocen como *motes* o nodos de redes de sensores inalámbricos.

Tal nivel de desarrollo ha generado la idea masiva de que las redes de sensores inalámbricos están llamadas a ser el futuro de los procesos industriales y se piensa que su impacto y consolidación serán comparables con los de Internet.

Las características de estos nodos, que resultan tan atractivas para los ingenieros y especialistas desarrolladores de aplicaciones, son especificadas por los fabricantes en sus hojas de datos como si se tratase de valores establecidos que siempre se alcanzan sin condiciones.

Sin embargo, en cualquier red inalámbrica, la calidad de servicio de un enlace depende tanto de factores propios de los dispositivos, como de las características físicas del lugar en donde estos son instalados. Las redes de sensores inalámbricos no son la excepción, de modo que en la práctica, sus atributos pueden presentar un comportamiento un tanto diferente al esperado.

Bajo ese orden de ideas se hace evidente que si el objetivo es obtener el máximo aprovechamiento de los recursos ofrecidos por la tecnología, la etapa de planeación debe ser fundamental durante el diseño de una red. Esto significa que antes de configurar una red es

recomendable conocer en detalle las características de operación que presentan los dispositivos dentro de un entorno en particular.

Desde la llegada al mercado de los primeros *motes*, se han comenzado a hacer algunos estudios analíticos mediante herramientas de simulación para intentar caracterizar el desempeño del estándar IEEE 802.15.4 [12]. En estos estudios se ha hecho un gran esfuerzo particularmente en la caracterización de la eficiencia en el consumo de energía [26] y en el nivel de coexistencia con otras redes como 802.11a/b/g y Bluetooth (IEEE 802.15.1)[11]. Desafortunadamente, hasta la fecha de inicio de este trabajo¹ no se registraban resultados acerca de una evaluación práctica de estas y otras importantes características de desempeño de los dispositivos de redes de sensores inalámbricos.

Este proyecto se desarrolló con el fin de llevar a cabo una caracterización a través de mediciones reales del funcionamiento de dos *motes* cuyos fabricantes en la actualidad tienen varios de sus productos empleados en la creación de proyectos importantes en varias ramas de la ciencia, la industria y la medicina.

El proceso de caracterización comprende el diseño y ejecución de una serie de pruebas de campo y laboratorio de donde se obtiene información sobre algunos de los más importantes parámetros de funcionamiento como el radio de cobertura que se alcanza en espacios abiertos y cerrados, el porcentaje de datos transmitidos correctamente, la sensibilidad, el consumo de energía, entre otros.

La primera parte de este documento presenta los conceptos generales de una red de sensores inalámbricos, seguido por la descripción de las características del estándar IEEE 802.15.4 y de los *motes* sobre los que se realiza la evaluación. El resto del documento está organizado de tal manera que cada capítulo está destinado a un parámetro en particular mostrando el diseño, ejecución y resultados de las pruebas. Finalmente se realiza el procesamiento de la información obtenida de donde se generan las conclusiones de todo el proceso de caracterización.

¹ Septiembre de 2006

Capítulo 1

Redes de Sensores Inalámbricos -WSN

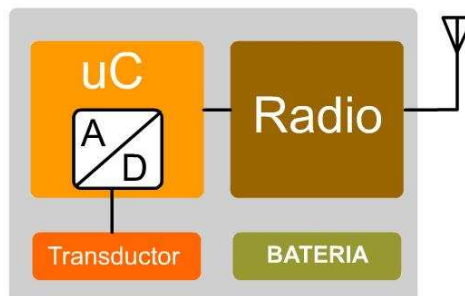
1.1 Conceptos Generales

Una red de sensores inalámbricos (*Wireless Sensor Networks - WSN*) es una solución de comunicaciones que lleva a cabo labores de monitorización y control sobre un área específica en donde se desea observar el comportamiento de variables físicas por medio del despliegue y la comunicación de varios dispositivos autónomos distribuidos espacialmente, los cuales usan sensores para monitorear de forma cooperativa, condiciones físicas o medioambientales como temperatura, vibración, presión o intensidad luminosa en diferentes ubicaciones.

Además de uno o mas sensores (transductores), cada nodo de una WSN está equipado con un radio emisor/ receptor (*transceiver*), un micro controlador, una batería como fuente de energía y por supuesto, una antena (Figura 1).

El tamaño de un nodo sensor es variable. Puede llegar a ser menor que el de una moneda, aunque los más comerciales actualmente alcanzan el tamaño de una tarjeta de crédito. El costo de un sensor también es variable, desde cientos de dólares hasta unos pocos centavos de dólar, dependiendo de la complejidad. Las restricciones en cuanto a costo y tamaño se ven reflejadas en sus correspondientes restricciones en recursos como memoria, velocidad de procesamiento, velocidad de transmisión de datos y ancho de banda [5], [6].

Figura 1. Componentes básicos de un nodo sensor inalámbrico



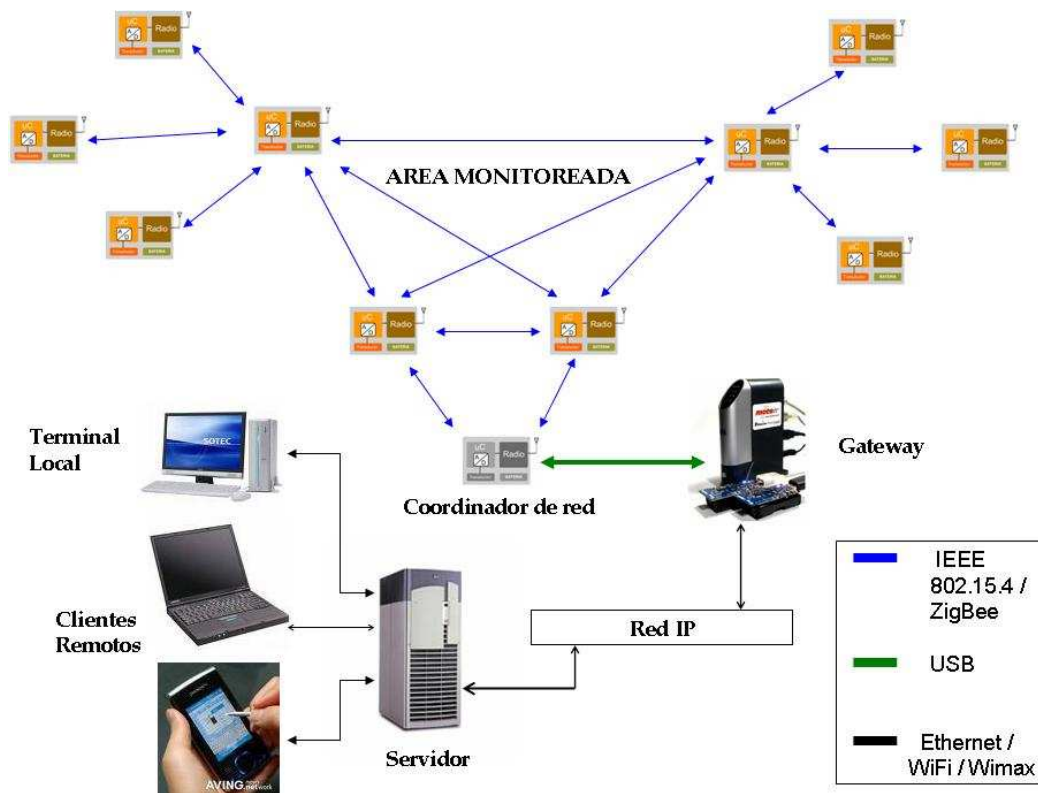
Fuente [3]

1.1.1 Funcionamiento de una WSN

Una vez ubicadas, las WSN deben permanecer funcionando por mucho tiempo, idealmente durante años, sin la necesidad de reemplazar o recargar sus fuentes de energía. En todas las aplicaciones el objetivo fundamental es dispersar los diferentes nodos dentro de un área donde se desea tomar información a través de los sensores, para después guardarla en el servidor de una red local para el análisis y el procesamiento de los datos.

Cuando un sensor detecta el evento que está siendo monitoreado (temperatura, presión, sonido, intensidad luminosa, intensidad de campo electromagnético, vibración), esta información puede ser reportada a un nodo coordinador de red, quien pasa la información a la red del usuario (Internet, LAN) a través de un *gateway* [3].

Figura 2. Funcionamiento de una WSN



Fuente: Autor

Dependiendo de la aplicación, serán necesarias diferentes estrategias de transmisión de datos que consideren ciertas necesidades específicas como respuesta en tiempo real (retardos mínimos), redundancia de la información (alta confiabilidad), seguridad, entre otras [6].

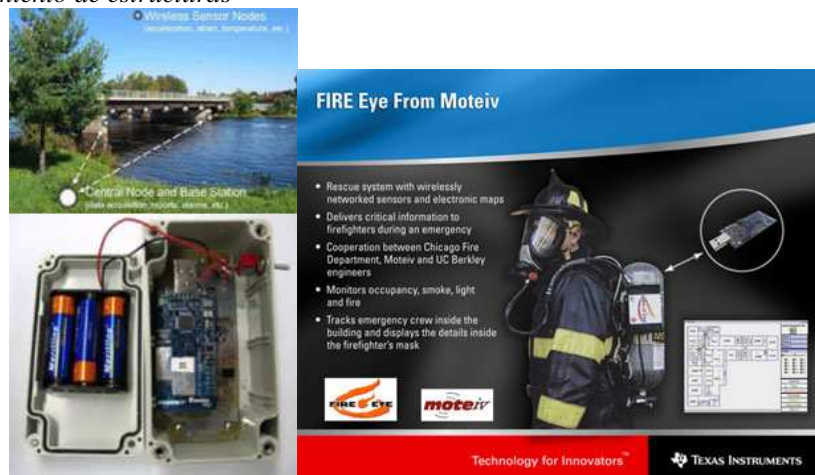
En la figura 2 se observa que la comunicación entre la WSN y el usuario es bi-direccional; de manera que además de la recopilación de la información sobre las variables monitoreadas, el administrador de la red cuenta con la posibilidad de realizar su gestión de forma remota seleccionando un nodo específico para consultar su información o realizando una reprogramación inalámbrica de los nodos con el fin de realizar una nueva tarea.

1.1.2 Aplicaciones de redes de sensores inalámbricos

Las WSN son usadas en aplicaciones comerciales e industriales que requieren ciertos tipos de monitoreo de datos cuya implementación resultaría muy compleja si se utilizaran redes sensores cableadas tradicionales. Las principales áreas sobre las que se desarrollan aplicaciones son:

- Monitoreo de entornos medioambientales (Invernaderos, Actividad volcánica, etc.)²
- Agricultura
- Detección acústica
- Vigilancia militar
- Rastreo de inventarios
- Monitoreo de procesos industriales
- Monitoreo de la salud humana³
- Mantenimiento de estructuras (figura 3)
- Seguimiento inalámbrico de ubicaciones (figura 3)

Figura 3. Aplicaciones de Redes de Sensores Inalámbricos
Mantenimiento de estructuras



Seguimiento inalámbrico de ubicaciones
Fuente: [9]

² Pagina web para ver mas información: <http://www.eecs.harvard.edu/~mdw/proj/volcano/>

³ Enlace para ver video en youtube: <http://www.youtube.com/watch?v=Vb57skQzz-I>

La figura 3 presenta las fotografías relacionadas con dos aplicaciones que se encuentran actualmente en desarrollo.

En el área de mantenimiento de estructuras, el Profesor Kerop Janoyan de la Universidad de Clarson en Nueva York, está liderando un proyecto de monitoreo de puentes usando redes de sensores inalámbricos. El sistema toma información acerca de las vibraciones y deformaciones que va sufriendo la estructura a lo largo del tiempo por intermedio de nodos sensores ubicados debajo de los puentes. Los datos son transmitidos a las autoridades que se encargan de analizar y llevar registro de los datos con el fin de prevenir posibles colapsos [9].

La aplicación más importante sobre la que se tiene información hasta la fecha es un proyecto desarrollado conjuntamente por la Universidad de Berkeley (California, USA), la empresa Moteiv , y el departamento de bomberos de la ciudad de Chicago en Estados Unidos. El proyecto llamado **FIRE (Fire Information and Rescue Equipment)** emplea una tecnología de redes de sensores inalámbricos para indicarle a los bomberos su ubicación dentro de un edificio cuando el humo o las llamas reducen la visibilidad. Los sensores ubicados en el equipo de cada bombero también monitorean la temperatura, la presión y otros factores para después enviar la información a una Laptop ubicada fuera del edificio, de manera que los coordinadores del equipo puedan ver en tiempo real las posiciones de sus hombres y las condiciones a las que se están enfrentando dentro del edificio⁴[10].

1.1.3 Ventajas de usar una Red de Sensores Inalámbricos WSN

Las redes de sensores inalámbricas fueron concebidas para brindar soluciones que se consideran difíciles de alcanzar con el uso de la telemetría habitual. Si se tiene en cuenta la naturaleza de las aplicaciones para las que fueron creadas, es lógico pensar que al diseñar, configurar, implementar y administrar una red de este tipo, se deben garantizar varias funciones claves para que sea justificable la inversión realizada por el usuario de esta nueva tecnología.

Las características principales que debe tener una WSN [8], de acuerdo a la bibliografía publicada hasta la fecha, son:

- Nodos de tamaño y costo reducido
- Área de cobertura extensa
- Bajo consumo de energía (maximización del ciclo de vida útil)
- Alta confiabilidad (reducida tasa de error de paquetes)
- Lectura remota de datos en tiempo real (minimización de retardos)
- Topología de red dinámica y flexible (auto-configuración y auto-re-configuración)
- Escalabilidad (Posibilidad de incorporar nuevos nodos sin alterar la configuración)
- Interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes
- Tolerancia a fallos en los enlaces de comunicación (obstrucciones, pérdida de LOS)

⁴ Enlaces para ver los videos en youtube: <http://www.youtube.com/watch?v=MFky26RedOM>
<http://www.youtube.com/watch?v=JzMwj7lLvcA>

- Tolerancia a fallos en nodos
- Operación de dispositivos sin supervisión (autonomía)
- Movilidad de los nodos
- Seguridad de la información

Dependiendo de las necesidades de cada aplicación, algunas de las características serán más determinantes que otras; sin embargo existen algunos parámetros fundamentales observables que condicionan en mayor medida el desempeño de los dispositivos de la red.

En el presente trabajo se estudian algunos de estos parámetros para dos dispositivos de fabricantes diferentes que serán presentados en el siguiente capítulo. La tabla 1 relaciona los parámetros bajo evaluación en el marco de este proyecto con las características sobre las que tienen incidencia.

Tabla 1. Parámetros fundamentales de un dispositivo de una WSN

Parámetro Evaluado	Características que condiciona
Potencia de Transmisión	Área de cobertura extensa
	Alta confiabilidad
	Bajo consumo de energía
	Tolerancia a fallos en los enlaces de comunicación
	Movilidad de los nodos
Tasa de error de paquetes	Alta confiabilidad
	Área de cobertura extensa
	Tolerancia a fallos en los enlaces de comunicación
	Interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes
Latencia	Lectura remota de datos en tiempo real
Consumo de energía	Ciclo de vida útil
	Autonomía

Fuente: Autor

La evaluación de cada uno de ellos implica una serie de análisis y pruebas, que en conjunto permiten caracterizar los dispositivos con el fin de construir una expectativa confiable acerca del desempeño de una red de sensores inalámbricos, incluyendo sus posibilidades, limitaciones y condiciones específicas de funcionamiento⁵[3].

⁵ Las demás características mencionadas que no aparecen en la tabla 2 están condicionadas por las funciones de enrutamiento de la información por parte de los nodos. Estas funciones no se consideran en el presente trabajo y quedan como desarrollo propuesto para futuros proyectos de pregrado e investigación.

1.2 Estándar IEEE 802.15.4 y Especificación Zigbee™

1.2.1 Estándar IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 fue desarrollado en 2003 por la IEEE como parte de la familia de estándares para las capas físicas y de control de acceso al medio para redes inalámbricas de área personal (WPANs) de baja tasa de transmisión de datos, con baja complejidad y bajo consumo de energía. [12].

La tabla 2 muestra las principales características del estándar con relación a otras especificaciones IEEE para redes inalámbricas de área local y personal.

Tabla 2. Comparación entre estándares IEEE para WLAN y WPAN

Estándar	IEEE 802.11 WiFi	IEEE 802.15.1 Bluetooth	IEEE 802.15.4 ZigBee	IEEE 802.15.3 Ultra Wide Band	Wireless USB	IrDA
Frecuencia	2.4 / 5 GHz	2.4 GHz	868 - 915 MHz / 2.4 GHz	3.1 - 10.6 GHz	2.4 GHz	800-900
Tasa de Tx de datos	11 / 54 Mbps	1 Mbps	20 - 250 Kbps	100 - 500 Mbps	62.5 Kbps	1.6 Mbps
Cobertura	50 - 100 m	10 m	100 m	< 10 m	10 m	1 - 9 m (LOS)
Topología de red	Estrella - Malla	Estrella	Estrella, Arbol, Malla	Punto-Punto	Estrella	Punto-Punto
Complejidad	Compleja	Compleja	Simple	Media	Simple	Simple
Consumo de potencia	Alto	Medio	Muy Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
Aplicaciones	LAN inalámbricas	Reemplazo de Cables	Automatización y Control	Transmisión de señales de banda ancha	Equipos PC	Control Remoto Transmisión de datos a distancia

Fuente: Autor

El estándar IEEE 802.15.4 define dos capas físicas, la banda de 2.4 GHz y la banda de 868/915 MHz. La banda no licenciada ISM (Industrial-Scientific-Medical) de 2.4 GHz está disponible a nivel mundial, mientras que la banda de 868 MHz y la banda 915 MHz solo se encuentran disponibles para Europa y América del Norte respectivamente. IEEE 802.15.4 define un total de 27 canales con tres tasas de transmisión diferentes: 16 canales con una velocidad de transmisión de datos de 250 kbps en la banda de 2.4 GHz, 10 canales con una velocidad de 40 Kbps en la banda de 915 MHz y un canal de 20 Kbps en la banda de 868 Mhz [11]. La banda de 868/945 MHz utiliza modulación BPSK, mientras que la banda de los 2.4 GHz usa modulación O-QPSK. (Ver tabla 3).

Tabla 3. Bandas de Operación IEEE 802.15.4

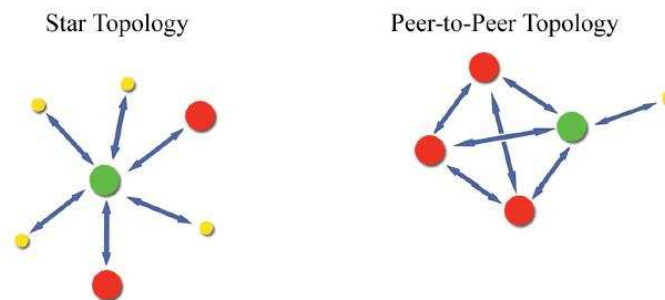
PHY	Frequency Band	Channel Numbering	Spreading Parameters		Data Parameters		
			Chip Rate	Modulation	Bit Rate	Symbol Rate	Modulation
868/915 MHz	868-870 MHz	0	300 kchip/s	BPSK	20 kb/s	20 kbaud	BPSK
	902-928 MHz	1 to 10	600 kchip/s	BPSK	40 kb/s	40 kbaud	BPSK
2.4 GHz	2.4-2.4835 GHz	11 to 26	2.0 Mchip/s	O-QPSK	250 kb/s	62.5 kbaud	16-ary Orthogonal

Fuente: [16]

El IEEE quiso desarrollar un estándar que presentara una muy baja complejidad, bajo costo y bajo consumo de energía para conectividad inalámbrica para aplicaciones de telemetría, monitoreo y control. Para tener una disponibilidad global, los dispositivos IEEE 802.15.4 están diseñados en su mayoría para trabajar en la banda ISM (2.4 GHz).

La capa MAC del estándar IEEE 802.15.4 controla el acceso al canal de radio usando CSMA /CA (carrier sense multiple access with collision avoidance) y puede operar en modo ad-hoc o infraestructura, estableciendo topologías de estrella o punto-a-punto (peer-to-peer). (Ver figura 4).

Figura 4. Topologías básicas de red IEEE 802.15.4



Fuente: [13]

En las configuraciones ilustradas en la figura 4, cada nodo representa un dispositivo RF.

El estándar define dos tipos fundamentales de dispositivos de RF:

- Dispositivo de funciones completas (Full Function Device – FFD): Soportan todas las características y funciones especificadas por el estándar. Pueden funcionar como coordinadores de red. Su gran capacidad de memoria y poder de cómputo los hacen ideales para desempeñar cualquier rol (administración, enrutamiento, dispositivos de borde de red).
- Dispositivo de funciones reducidas (Reduced Function Device - RFD): Posee funcionalidad limitada pero a la vez presenta menor consumo de potencia, costo y complejidad. No pueden desempeñar roles de administración ni enrutamiento. Se usan

principalmente como dispositivos de borde de red (Network edge devices), en donde el bajo consumo de potencia es fundamental.

IEEE 802.15.4 define diferentes parámetros de funcionamiento que caracterizan a las redes que cumplen sus especificaciones. La observación y el análisis de algunos de los más importantes representan la esencia del presente trabajo.

- Potencia de Transmisión Según la especificación, un dispositivo transmisor debe alcanzar como mínimo una potencia de -30 dBm, y debe ser capaz de transmitir correctamente a la potencia más baja posible para reducir la interferencia con otros dispositivos. [13]
- Sensibilidad La sensibilidad de un receptor está definida por dos términos. Uno es la tasa de error de paquetes (PER) que es la fracción promedio de los paquetes emitidos que no se reciben correctamente. El otro término es el umbral de potencia de la señal de entrada que produce un PER específico. Un dispositivo que cumpla satisfactoriamente con la especificación IEEE 802.15.4 debe tener una sensibilidad de al menos -85 dBm. [13]
- Indicador de calidad del enlace (LQI) Es una caracterización de la potencia y/o la calidad de un paquete recibido. Para medirla se tiene en cuenta la relación señal a ruido (SNR). [13]
- Evaluación de canal libre (CCA-Clear Channel Assessment), se usa para determinar si un canal está ocupado o disponible. Su operación está basada en la medición de la energía del canal; de manera que si se supera un umbral determinado, se considera que el canal está ocupado. [13]
- Seguridad IEEE 802.15.4 tiene tres modelos de seguridad definidos. *Modo Inseguro*, en donde no se cuenta con ningún tipo de seguridad, el *Modo de Listas de Acceso* que no usa ningún tipo de cifrado pero donde la red rechaza todos los paquetes provenientes de dispositivos desconocidos, y el modo *Seguro* en donde los dispositivos manejan listas de control de acceso, cifrado de 128 bits e integridad de tramas [13].

1.2.2 Especificación ZigBee™

La Alianza ZigBee™ es una asociación de empresas que trabajan conjuntamente para definir un estándar abierto y global para la implementación de redes inalámbricas de bajo consumo de energía y baja tasa de transmisión de datos que define cómo construir diferentes topologías de red con características de seguridad y perfiles de aplicación interoperables [14]. La asociación incluye compañías de diferentes categorías, desde fabricantes de chips hasta de integración de servicios. La primera versión de la especificación fue publicada a

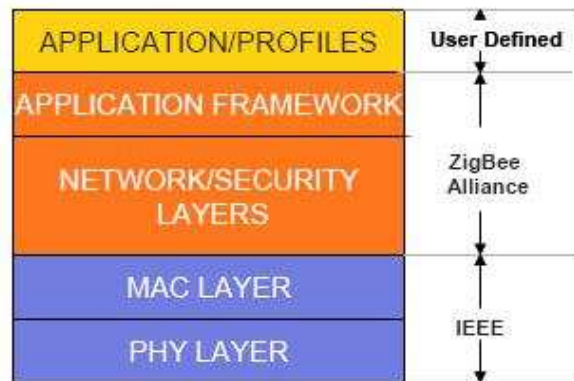
finales del 2004 y la más reciente (diciembre de 2006) [15] se puede descargar desde la página web [14].

1.2.2.1 Arquitectura ZigBee™

La arquitectura ZigBee™ está compuesta por un bloques de capas. Cada capa desarrolla un conjunto de funciones y presta servicios a las capas superiores a través de una interfaz conocida como punto de acceso al servicio (service access point, SAP), y cada SAP soporta un número de primitivas para lograr la funcionalidad requerida.

La pila ZigBee™ ilustrada en la figura 5, esta basada en el modelo OSI y define las capas que brindan funcionalidad a las aplicaciones.

Figura 5. Modelo de capas ZigBee™



Fuente: [15]

El estándar IEEE 802.15.4 (2003) define las dos capas inferiores y la alianza ZigBee™ define la capa de red y la estructura para la capa de aplicación [15].

La capa de red está encargada de los siguientes procesos :

- Unirse a una red y abandonar una red
- Dar seguridad a las tramas
- Enrutar las tramas a sus destinos correctos
- Crear y mantener rutas entre dispositivos
- Descubrir vecinos que se encuentren a un salto de distancia
- Almacenar información pertinente acerca de los vecinos

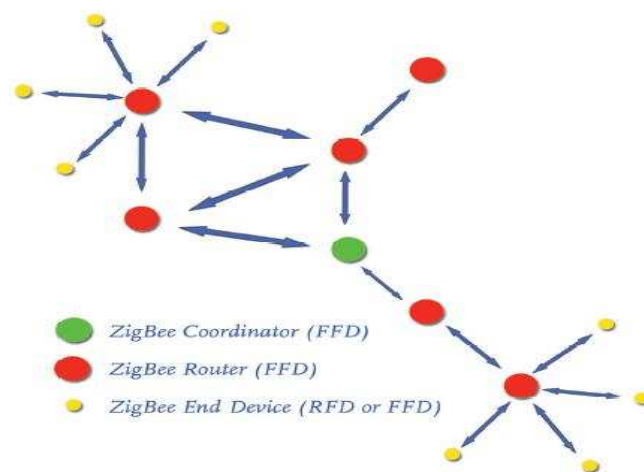
La capa de red de un dispositivo coordinador (FFD) es responsable de crear una nueva red cuando es apropiado y asignar direcciones a los dispositivos que se van asociando. También maneja funciones de seguridad.

1.2.2.2 Establecimiento de redes ZigBee™

La capa de red ZigBee™ soporta topologías de estrella, árbol y malla. En una topología de estrella la red es controlada por un dispositivo llamado coordinador de red (FFD), quien es responsable de iniciar y mantener la comunicación con los dispositivos finales. En topologías malla y árbol, el coordinador es responsable de iniciar la red y configurarla para que pueda extenderse a través del uso de routers (FFD).

Con la tecnología ZigBee™ se pueden configurar redes en topología malla, la cual puede extenderse sobre un área extensa y contener miles de nodos. El protocolo de enrutamiento optimiza el camino más corto y más confiable a través de la red y este puede cambiar dinámicamente. Esto permite contar con una red muy confiable ya que la red puede auto-reconfigurarse si uno de sus nodos es deshabilitado por cualquier motivo. Las aplicaciones ZigBee™ se benefician de la habilidad para recibir y retransmitir información rápidamente y después pasar a modo inactivo para ahorrar energía. Igualmente los dispositivos están diseñados para pasar rápidamente de modo activo a modo inactivo y así disminuir los retardos en la red (Latencias).

Figura 6. Esquema de una red ZigBee™ en topología de malla



Fuente: [13]

En la figura 6 se observa la configuración de una red ZigBee™ en topología de malla, en donde se combinan las dos topologías definidas para IEEE 802.15.4. (Ver figura 4). El coordinador de la red (FFD) que es el encargado del establecimiento de la misma, se comunica en modo infraestructura (estrella) tanto con los routers (FFD) como con los dispositivos de borde de red (RFD o FFD), mientras que los routers se comunican entre sí en modo punto-a-punto para facilitar el enrutamiento de los paquetes a través de la malla. Finalmente los dispositivos finales se conectan en estrella con el router o con el coordinador, de acuerdo al caso.

1.3 Hardware y Software usado en el desarrollo del proyecto

1.3.1 Hardware

Esta sección contiene la descripción del circuito integrado emisor/receptor de RF, que es el dispositivo sobre el cual se centra gran parte del trabajo. Se encuentra integrado dentro de los dos nodos de red sobre los que se realiza el proceso de caracterización y también dentro de la tarjeta receptora que realiza el análisis y procesamiento de los paquetes recibidos. También se describen brevemente los dos tipos de nodos y la tarjeta mencionada.

1.3.1.1 Radio-Emisor/Receptor IEEE 802.15.4/ZigBee - 2.4Ghz

El circuito de radio usado en este proyecto es el **CC2420 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver**⁶[21] desarrollado por el consorcio TEXAS INSTRUMENTS – CHIPCON⁷. Es un integrado programable y altamente configurable para diferentes aplicaciones que cumple con todas las especificaciones IEEE 802.15.4 – ZigBee y ofrece soluciones de capa física y algunas de capa MAC.

Sus características más relevantes son [24]:

- Frecuencia de operación: 2400 a 2483.5 MHz.
- Spread Spectrum de Secuencia directa (DSSS).
- Tasa de transmisión de 250 Kbps
- Modulación O-QPSK con pulsos coseno de media onda.
- Bajo consumo de corriente: Rx: 18.8 mA & Tx: 14.4 mA
- Alta sensibilidad : -95 dBm (Superior a la especificada por IEEE 802.15.4: -85 dBm)
- VCO, LNA y PA integrados en un mismo encapsulado
- Bajo voltaje de alimentación : 2.1 – 3.6 V
- Potencia de transmisión programable (Anexo D)
- Transmisión y recepción FIFO de 128 Bytes
- Registros de transmisión y recepción separados
- No requiere filtros externos
- Interface SPI de cuatro cables
- Soporte hardware del estándar IEEE 802.15.4
- RSSI digital

Los detalles de las opciones de configuración y condiciones de operación se pueden consultar en las hojas de datos del circuito integrado [17].

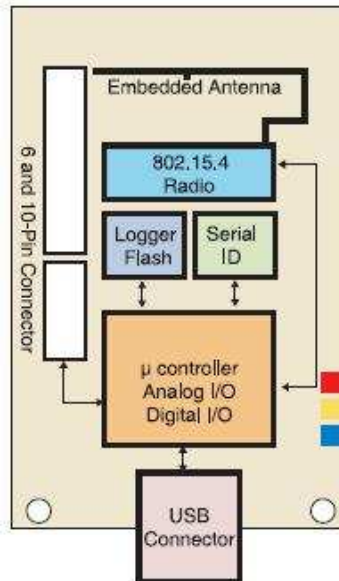
⁶ En ingles Trasnmitter-Receiver. No existe un término adecuado en español para la traducción, de manera que a lo largo de este documento se usa en lugar de Transmisor – Receptor.

⁷ <http://www.chipcon.com/index.html>

1.3.1.2 Nodos de red - *MOTES*

Los nodos de una red WSN son unos dispositivos programables creados originalmente en un proyecto de grado de la universidad de Berkeley en California, USA. Como se ve en la figura 7 estas tarjetas conocidas como *Motes* están compuestas básicamente por un radio, un microcontrolador, un conector y un controlador de USB, dispositivos de almacenamiento y una antena.

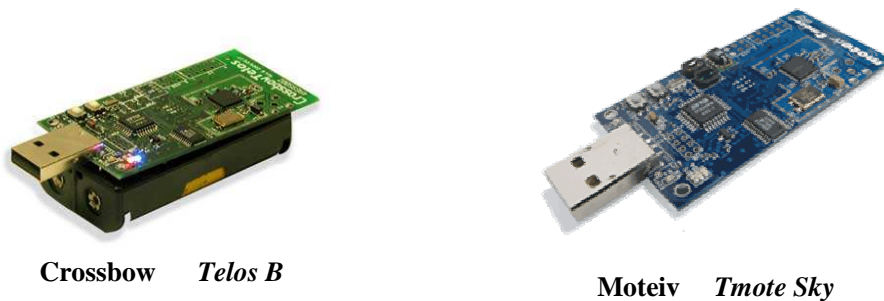
Figura 7. Diagrama de bloques de un *mote*



Fuente: [24]

Con el avance de la tecnología, algunas empresas como Crossbow y Moteiv, líderes en el desarrollo de aplicaciones para redes de sensores inalámbricos, han desarrollado gran variedad de *motes*, dentro de los que se destacan el *Telos B* y el *Tmote Sky* por ser usados en la actualidad en el desarrollo de destacados proyectos mencionados en el capítulo anterior. Estos dos dispositivos fueron los seleccionados para realizar el proceso de evaluación y caracterización.

Figura 8. Nodos inalámbricos TmoteSky (derecha) y telosb (izquierda)



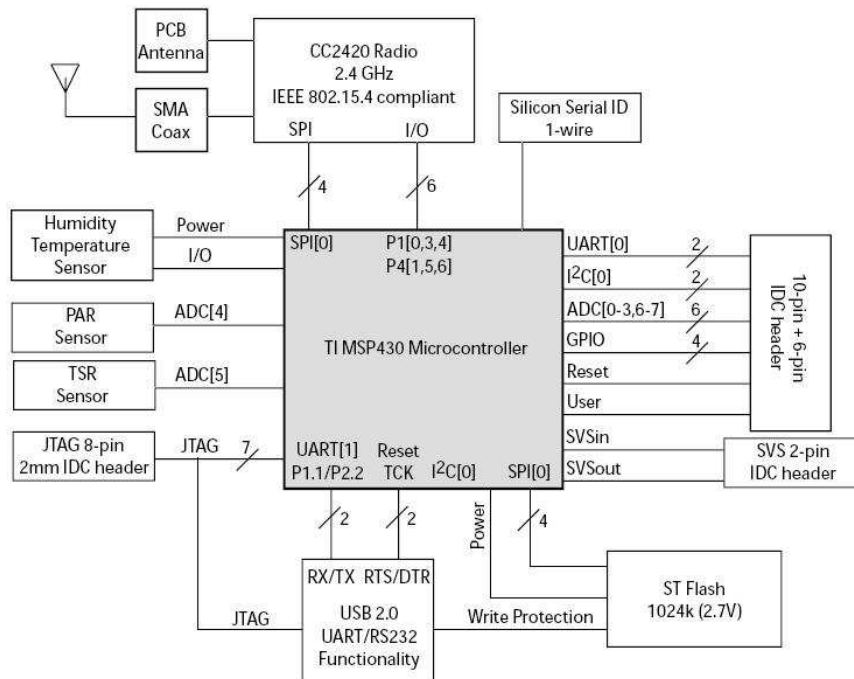
Crossbow *Telos B*

Moteiv *Tmote Sky*

Fuente: [24]

Otra de las razones por las cuales se eligieron estos dos *motes* fue el hecho de que usan los mismos componentes. La figura 9 muestra el diagrama de bloques funcional para estos dispositivos.

Figura 9. Diagrama de bloques del *Tmote Sky*



Fuente: [24]

Las siguientes son las principales características de estos *motes*, destacadas por sus fabricantes:

- Bajo consumo de energía (se energizan con un par de baterías alcalinas AA)
- Bajo costo (<U\$100)
- Interoperabilidad con dispositivos de diferentes fabricantes
- Sensores de luz, temperatura y humedad
- Rápido cambio de modo activo a inactivo y viceversa (<6 μ s)
- Memoria flash externa de 1024kB
- Programación e intercambio de datos con el PC host vía USB
- Antena impresa On-Board + posibilidad de usar antena externa SMA.

Ambos dispositivos usan el **CC2420 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver** como circuito de radio, por lo tanto, todo el sistema goza de las características de este integrado.

El microcontrolador empleado por estos dispositivos es el **Texas Instruments MSP430 F1611** [24], el cual cuenta con 10KB de memoria RAM, 48 KB de memoria Flash y 128B de memoria para el almacenamiento de información.

1.3.1.3 Receptor y Analizador de paquetes

Este dispositivo esta compuesto por una tarjeta base CC2400EB y un modulo CC2420 EM con una antena omnidireccional de 2.4 GHZ, alimentados por cuatro baterías de 1.5 V, como se observa en la figura 10.

La tarjeta base, se conecta al computador a través del puerto USB. Y el software Packet sniffer captura los paquetes IEEE 802.15.4. Mediante este Sniffer se pueden monitorizar los paquetes enviados o recibidos desde y hacia los sensores inalámbricos y además se facilita el proceso de programación de los *motes* ya que permite ver los paquetes enviados o recibidos por los módulos.

Su software presenta una interfaz de usuario en donde es posible seleccionar los campos de cada paquete que se quieren visualizar (*MAC Header, Beacon, Data, Command, Network Layer, Application Layer*)

Figura 10. Chipcon Sniffer Receptor



Fuente: [17]

1.3.2 Software

Los sistemas operativos para las redes de sensores inalámbricos se han desarrollado tratando de lograr una eficiencia en el uso de las limitadas prestaciones del hardware de estos dispositivos.

1.3.2.1 Tiny OS

TinyOS [31], es un sistema operativo de código libre basado en eventos, desarrollado por un consorcio integrado por la Universidad de Berkeley en cooperación con el departamento de investigaciones de Intel. Fue concebido para utilizarse en redes de sensores inalámbricos, utiliza un modelo de programación basado en el concepto de “*wiring*” (enlazar o cablear) componentes software para producir un programa final. Este modelo de programación tiene en cuenta los limitados recursos en hardware (por ejemplo, 512 bytes de RAM) lo cual justifica una necesidad de eficiencia en la utilización de los recursos.

TinyOS no es un producto terminado y continuamente está evolucionando, en la actualidad la versión mas utilizada es la 1.1 (usada en este proyecto) encontrándose la serie 2.x en desarrollo. En los anexos se encuentra suficiente información sobre el uso de este sistema operativo.

1.3.2.2 NesC

NesC es un lenguaje de programación que se utiliza para crear aplicaciones en el sistema operativo TinyOS que serán ejecutadas en los *motes Telos B* y *Tmote Sky*, proporcionando ciertas características necesarias para poder realizar aplicaciones de una forma más cómoda para el programador.

El lenguaje se basa en una programación orientada al enlace entre componentes u objetos, esta filosofía permite al programador, desentenderse de los detalles de bajo nivel para la programación de los módulos de sensores, ofreciendo una gran cantidad de funciones y utilidades presentes en el sistema operativo; para que el programador de este tipo de dispositivos pueda utilizar dichos componentes y centrarse solo en programar la funcionalidad que desea en el dispositivo sin necesidad de tener que preocuparse por todos estos aspectos.

1.3.2.3 MatIndoor de MATLAB

En el marco de un proyecto de grado desarrollado en la escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la UIS, se desarrolló una herramienta software en el lenguaje de programación MATLAB que importa planos de edificios para realizar una simulación de la distribución de potencia en 2D para una frecuencia de 2.4 Ghz [32].

El software está basado en el modelo de propagación Cost-MultiWall y fue desarrollado originalmente para la evaluación de los niveles de potencia de redes Wi-Fi IEEE 802.15.4. Funciona exclusivamente sobre MATLAB versión 6.1

Esta herramienta es usada para realizar una comparación entre los valores de potencia experimentales medidos dentro de un área de pruebas indoor y los valores simulados, con el fin de determinar si es posible realizar un ajuste del código del software de tal manera que pueda ser usado en la planeación de redes IEEE 802.15.4 / ZigBee en entornos indoor.

Capítulo 2

Niveles de potencia y radio de cobertura

Los resultados de estas mediciones representan los máximos niveles de señal que se pueden alcanzar con estos *motes* para una potencia de transmisión específica. Para una futura implementación de una red con los *Tmote Sky* y *Telos B*, esta información servirá para determinar la potencia con la que deben operar los *motes* de modo que los enlaces soporten una comunicación óptima. También servirá para estimar la distancia máxima que se puede alcanzar con determinada potencia de transmisión.

2.1 Pruebas en escenario *Outdoor*

2.1.1 Diseño y Desarrollo de las pruebas

El equipo usado en esta práctica se describe en la tabla 4

Tabla 4 Equipo de pruebas outdoor

EQUIPO PRUEBAS OUTDOOR		
ITEM	CANTIDAD	UTILIDAD
Mote IV - Tmote Sky	1	Transmisor
Crossbow- Telos B	1	Transmisor
Chipcon Packet Sniffer	1	Receptor
Laptop con Software Chipcon Packet Sniffer	1	Monitorización de la Información
Bases de Madera y PVC	2	Ubicación de los transmisores y receptor
Baterías AA 1.5 v	12	Fuentes de Energía
Cinta Señalización	100 m	Ubicación de los puntos de medición
Conos	10	Ubicación de los puntos de medición
Metro	1	Ubicación de los puntos de medición

Fuente: Autor

Las pruebas se realizaron en la cancha de fútbol de la Universidad Industrial de Santander, de manera que se garantizara un entorno libre de obstáculos (figura 11).

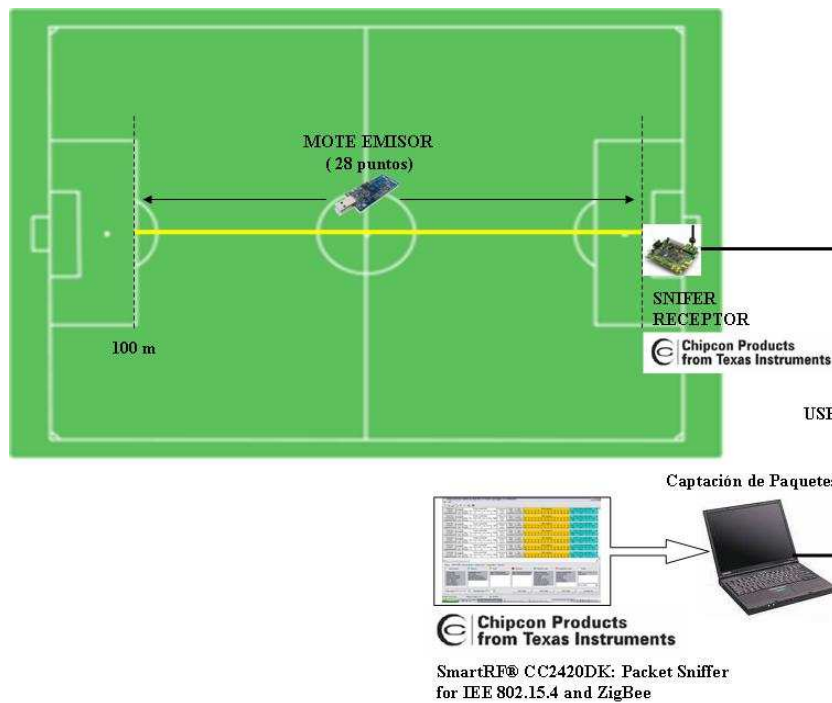
Figura 11. Escenario para pruebas de potencia Outdoor – Cancha de Fútbol UIS



Fuente: Autor

El computador portátil con el software de chipcon instalado⁸ se conecta mediante un cable USB al Sniffer, el cual actúa como receptor de los paquetes enviados por el *mote* transmisor que se desplaza a lo largo de una línea recta (figura 12).

Figura 12. Esquema de pruebas outdoor

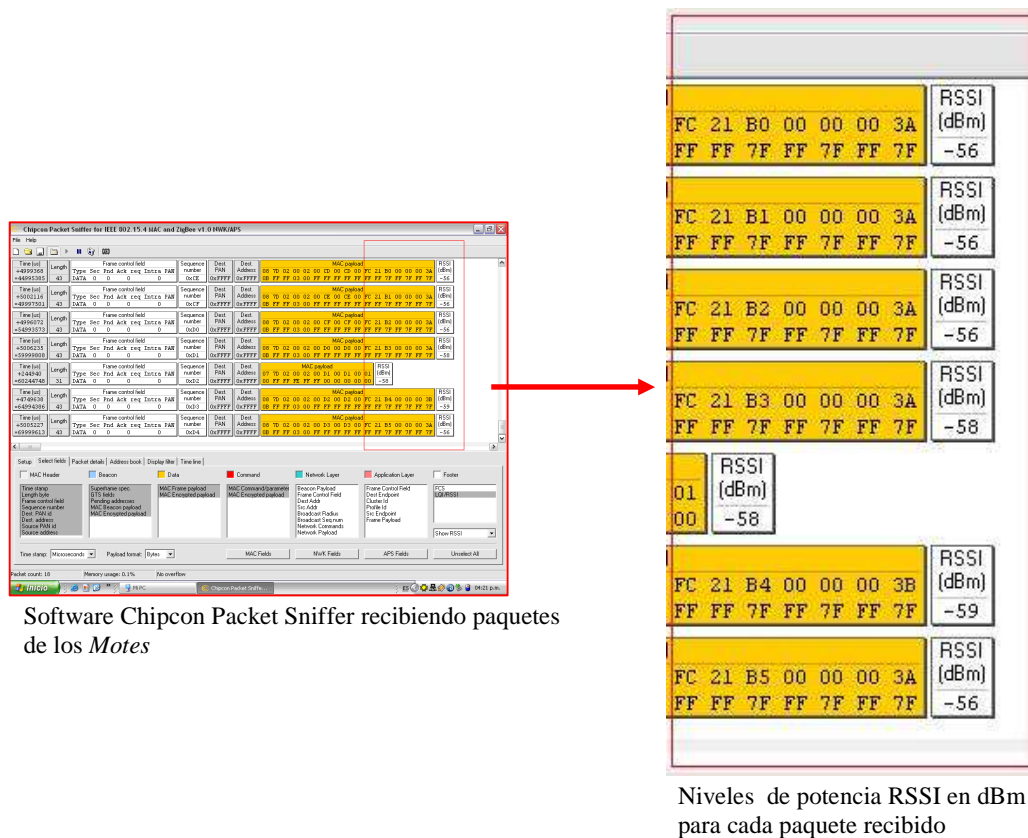


Fuente: Autor

⁸ SmartRF® CC2420DK: Packet Sniffer for IEEE 802.15.4 and ZigBee. www.chipcon.com

A lo largo de la recta, el *mote* se ubica en 28 puntos de transmisión, el primero ubicado a 50 centímetros del Sniffer receptor, hasta llegar a una distancia máxima de 100 metros de separación entre el *mote* y el Sniffer. Se realizan tres registros por cada punto de transmisión (figura 13) de manera que para cada uno se tengan aproximadamente 20 paquetes.

Figura 13. Registro de paquetes



Software Chipcon Packet Sniffer recibiendo paquetes de los *Motes*

Niveles de potencia RSSI en dBm para cada paquete recibido

Fuente: Autor

Los 28 puntos de transmisión se ubicaron con diferentes separaciones entre ellos de manera que se pudiera registrar la variación de la señal al variar la distancia en mayor y menor medida. La idea es registrar 20 valores de RSSI para cada uno de los 28 puntos de transmisión y después realizar un promedio de manera que a cada punto quede asociado a un valor de potencia. Este procedimiento se realiza tanto para el *Tmote Sky* como para el *Telos B*

La potencia de transmisión del radio-transceiver CC2420 puede ser programada en 8 niveles diferentes (Anexo D). En esta prueba se realiza el procedimiento diseñado para los niveles máximos y mínimos de señal (0 y -25 dBm respectivamente) con el fin de realizar una comparación entre los dos extremos.

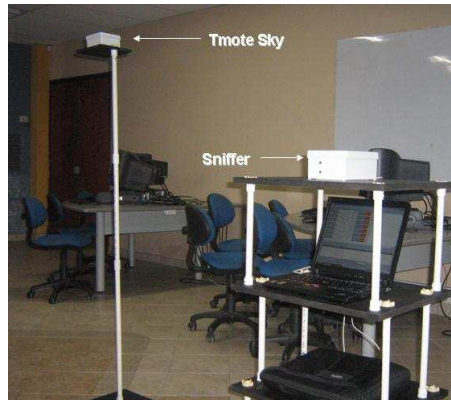
Como se necesitaba que el *mote* transmitiese varios paquetes continuamente, se seleccionó la aplicación *CntToLedsAndRfm* que viene incorporada en el sistema operativo TinyOS. Se

programa en los *motes* por medio de la consola cygwin. El proceso de programación es explicado en detalle en el Anexo A.

La aplicación CntToLedsAndRfm que significa Counter-to-Leds-And-Rfm (Anexo C) mantiene un contador de 4Hz, de manera que los *motes* iluminan sus LEDs mostrando los 3 bits menos significativos del conteo para luego transmitir cada valor en un paquete. Esta configuración también es usada en las pruebas *indoor*.

Una vez listas las configuraciones del transmisor y el receptor, estos se ubicaron en unas bases de madera y PVC (Figura 14) que facilitarían el desplazamiento y un proceso adecuado de monitorización y registro de la información. La base para los *motes* tiene una altura de 1.67 m y la base para el portátil y el Sniffer es de 1.06 m. Estas bases también se usan en las pruebas *indoor*.

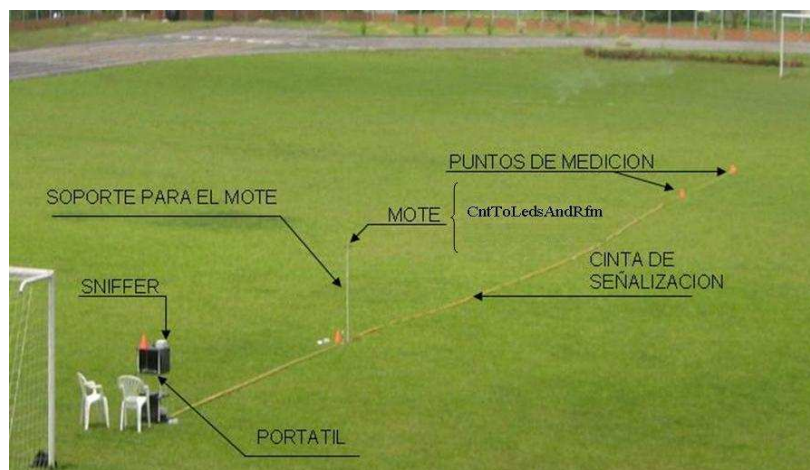
Figura 14. Bases para Ubicación de los *motes* y el Sniffer



Fuente: Autor

Finalmente, se realizó la logística necesaria para ubicar los equipos en la cancha de fútbol, medir y marcar los puntos de medida e iniciar las mediciones.

Figura 15. Desarrollo de Pruebas Outdoor



Fuente: Autor

2.1.2 Análisis de la información obtenida

2.1.2.1 Máxima Potencia de Transmisión (0 dBm)

Tabla 5 Resultados Outdoor - Potencia Tx 0 dBm

PRUEBAS DE POTENCIA OUTDOOR																					
Tmote Sky. CntToLedsAndRfm. Potencia de TX: (25 dbm)																					
Distancia [m]	Niveles de Potencia Recibidos [dBm]																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	PROMEDIO
0,5	-45	-45	-44	-44	-45	-45	-44	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	44,85
1,0	-49	-52	-53	-53	-53	-53	-50	-52	-52	-50	-53	-53	-50	-54	-50	-53	-50	-53	-50	-53	51,75
1,5	-56	-56	-55	-53	-55	-55	-56	-56	-56	-57	-57	-56	-57	-56	-57	-56	-57	-56	-57	-56	56,05
2,0	-54	-54	-55	-54	-58	-55	-54	-56	-55	-58	-58	-58	-58	-58	-60	-58	-55	-58	-59	-56	56,55
2,5	-59	-59	-56	-58	-58	-58	-55	-58	-58	-56	-58	-58	-55	-55	-56	-56	-58	-55	-58	-56	57,00
3,0	-61	-61	-62	-62	-61	-60	-63	-62	-62	-62	-62	-62	-62	-62	-62	-62	-61	-61	-62	-62	61,70
4,0	-67	-65	-65	-66	-66	-66	-66	-67	-67	-66	-66	-66	-66	-66	-66	-66	-66	-66	-66	-66	66,05
5,0	-69	-70	-71	-69	-69	-70	-69	-70	-68	-69	-70	-70	-69	-69	-70	-70	-70	-70	-70	-70	69,60
6,0	-69	-68	-68	-68	-66	-67	-67	-66	-67	-68	-66	-66	-67	-67	-68	-68	-68	-68	-67	-68	67,35
7,0	-68	-68	-69	-68	-69	-67	-71	-68	-68	-69	-68	-69	-67	-71	-70	-70	-70	-70	-70	-70	69,00
8,0	-70	-70	-71	-70	-69	-70	-70	-71	-70	-70	-70	-71	-71	-72	-73	-74	-79	-76	-74	-73	71,70
9,0	-79	-82	-82	-82	-82	-81	-82	-80	-81	-81	-81	-80	-80	-80	-81	-80	-80	-80	-80	-80	80,70
10,0	-76	-79	-79	-80	-80	-80	-80	-76	-76	-76	-76	-76	-76	-76	-80	-78	-79	-78	-78	-79	77,90
12,5	-72	-70	-70	-70	-70	-72	-70	-72	-72	-72	-72	-71	-72	-72	-72	-72	-71	-72	-72	-72	71,40
15,0	-79	-80	-81	-82	-82	-82	-82	-80	-81	-80	-80	-81	-81	-80	-80	-80	-80	-80	-80	-80	80,55
17,5	-70	-73	-73	-72	-72	-72	-72	-73	-74	-73	-73	-74	-74	-74	-75	-73	-73	-73	-73	-74	73,00
20,0	-76	-76	-76	-76	-76	-76	-76	-77	-77	-76	-76	-76	-76	-76	-77	-77	-77	-76	-76	-76	76,25
25,0	-86	-83	-83	-83	-83	-83	-83	-89	-86	-85	-85	-85	-85	-85	-84	-85	-85	-84	-85	-85	84,60
30,0	-84	-83	-83	-83	-83	-84	-84	-84	-84	-84	-84	-84	-84	-84	-84	-83	-83	-84	-84	-84	83,70
35,0	-86	-87	-87	-87	-87	-88	-88	-88	-89	-88	-89	-89	-89	-89	-88	-87	-88	-87	-87	-87	87,75
40,0	-84	-84	-84	-84	-84	-84	-84	-84	-84	-85	-85	-85	-86	-85	-86	-84	-84	-83	-83	-83	84,20
45,0	-80	-80	-81	-80	-80	-80	-80	-80	-80	-81	-80	-80	-80	-80	-81	-80	-80	-80	-80	-81	80,20
50,0	-86	-84	-84	-84	-84	-85	-84	-84	-84	-84	-85	-84	-85	-84	-84	-83	-83	-83	-84	-83	84,05
60,0	-85	-86	-85	-85	-85	-84	-85	-83	-83	-85	-84	-84	-84	-86	-85	-87	-83	-83	-84	-84	84,50
70,0	-86	-86	-86	-86	-86	-84	-84	-87	-84	-85	-85	-85	-85	-85	-87	-86	-86	-85	-85	-85	85,40
80,0	-85	-84	-85	-84	-84	-85	-84	-85	-83	-83	-83	-83	-83	-83	-85	-84	-84	-84	-84	-84	83,95
90,0	-88	-89	-89	-85	-86	-87	-85	-89	-88	-89	-89	-87	-87	-87	-87	-86	-86	-87	-88	-89	87,40
100,0	-90	-88	-90	-91	-89	-89	-90	-90	-89	-93	-88	-92	-90	-90	-89	-91	-91	-92	-92	-92	90,25
Telos B. CntToLedsAndRfm. Potencia de TX: (25 dBm)																					
Distancia [m]	Niveles de Potencia Recibidos [dBm]																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	PROMEDIO
0,5	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	45,00
1,0	-48	-49	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-49	-48	-47	-48	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	48,45
1,5	-57	-58	-55	-55	-55	-55	-55	-55	-56	-56	-56	-57	-55	-54	-56	-55	-55	-55	-55	-55	55,55
2,0	-57	-57	-57	-57	-57	-57	-56	-56	-56	-56	-56	-56	-57	-57	-57	-56	-56	-56	-56	-56	56,45
2,5	-56	-56	-57	-57	-57	-57	-56	-56	-56	-56	-56	-56	-56	-56	-56	-56	-56	-56	-56	-56	56,20
3,0	-57	-57	-57	-57	-57	-57	-57	-57	-57	-57	-57	-57	-57	-57	-57	-57	-57	-57	-57	-57	57,00
4,0	-62	-61	-61	-63	-63	-64	-63	-63	-63	-63	-63	-63	-63	-63	-63	-63	-63	-62	-62	-62	62,65
5,0	-69	-69	-69	-69	-69	-69	-69	-69	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	70,10
6,0	-69	-69	-69	-69	-69	-69	-69	-69	-69	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-68	-68	-68	-68	69,05
7,0	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	71,40
8,0	-73	-73	-73	-73	-73	-73	-71	-71	-72	-73	-73	-73	-74	-72	-73	-73	-73	-73	-73	-74	72,80
9,0	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-73	-73	-73	-73	72,20
10,0	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-76	-78	-78	-78	-75	-75	-75	-75	-76	-76	-76	-75	-78	75,80
12,5	-80	-78	-80	-80	-80	-80	-80	-82	-82	-82	-80	-80	-80	-78	-78	-78	-81	-81	-81	-81	80,10
15,0	-78	-78	-78	-78	-78	-78	-78	-78	-79	-79	-79	-79	-79	-78	-78	-78	-78	-78	-78	-78	78,25
17,5	-82	-82	-82	-82	-82	-82	-82	-82	-82	-82	-82	-81	-81	-81	-81	-81	-81	-81	-81	-81	81,60
20,0	-84	-84	-84	-83	-83	-84	-83	-84	-84	-84	-84	-84	-84	-84	-83	-84	-84	-84	-84	-84	83,80
25,0	-89	-91	-91	-90	-91	-90	-90	-90	-90	-90	-91	-90	-90	-90	-88	-89	-89	-89	-89	-89	89,80
30,0	-89	-88	-88	-88	-88	-87	-88	-88	-89	-89	-89	-89	-89	-89	-92	-91	-89	-88	-88	-87	88,65
35,0	-90	-89	-88	-88	-89	-89	-88	-89	-88	-89	-88	-89	-89	-88	-87	-88	-85	-85	-86	-86	87,90
40,0	-84	-84	-84	-84	-84	-84	-84	-85	-84	-85	-85	-84	-84	-84	-84	-84	-85	-85	-84	-84	84,30
45,0	-84	-84	-84	-84	-84	-84	-83	-84	-84	-84	-84	-84	-84	-85	-85	-84	-85	-85	-85	-85	84,25
50,0	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-88	-88	-88	-88	-88	-88	-88	-89	-89	-89	89,15
60,0	-90	-89	-88	-88	-89	-89	-88	-89	-88	-89	-88	-89	-89	-88	-87	-88	-85	-85	-86	-86	87,90
70,0	-89	-91	-91	-90	-91	-90	-90	-90	-90	-90	-91	-90	-90	-90	-90	-90	-89	-89	-89	-89	89,95
80,0	-90	-91	-91	-90	-91	-88	-88	-88	-88	-90	-90	-91	-88	-88	-88	-88	-89	-89	-89	-89	89,20
90,0	-89	-92	-92	-92	-92	-87	-88	-88	-89	-89	-89	-89	-89	-89	-90	-90	-89	-88	-88	-87	89,30
100,0	-92	-92	-92	-92	-92	-92	-92	-91	-91	-91	-92	-92	-92	-92	-93	-93	-93	-93	-93	-93	92,10

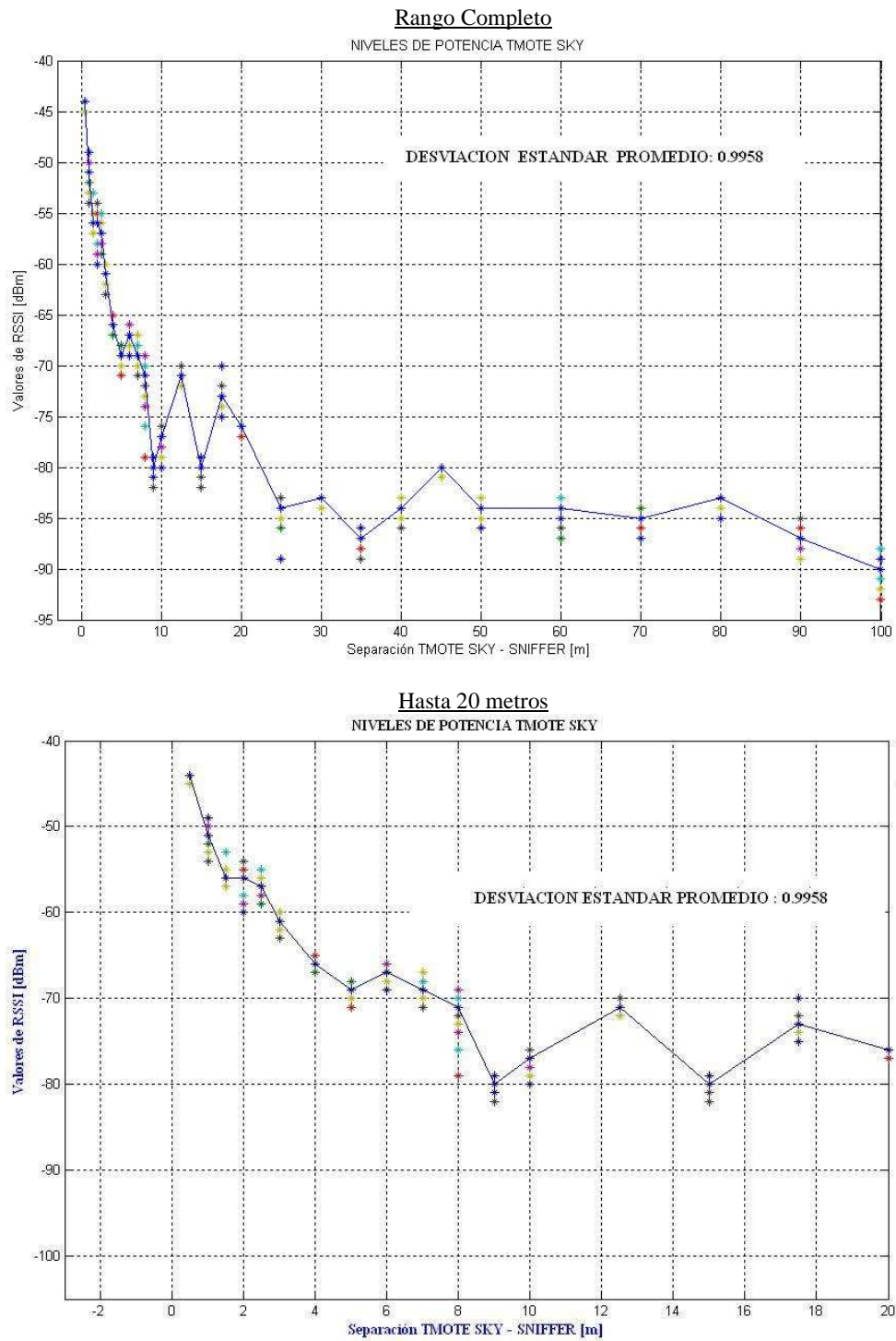
Fuente: Autor

Con estos valores se crearon matrices en Excel en formatos *.csv (delimitados por comas), que son importadas por los códigos de Matlab que se programaron para obtener las gráficas de los resultados de las mediciones.

A continuación se encuentran las gráficas que resultan de procesar los datos de la tabla anterior usando Matlab. En la figura 16 se observa la totalidad de los paquetes capturados para cada uno de los 28 puntos de transmisión del Tmote sky. La línea azul representa el

valor promedio de la potencia recibida en dBm para cada punto. La **desviación estándar promedio** calculada para toda la gráfica fue de **0.9958**

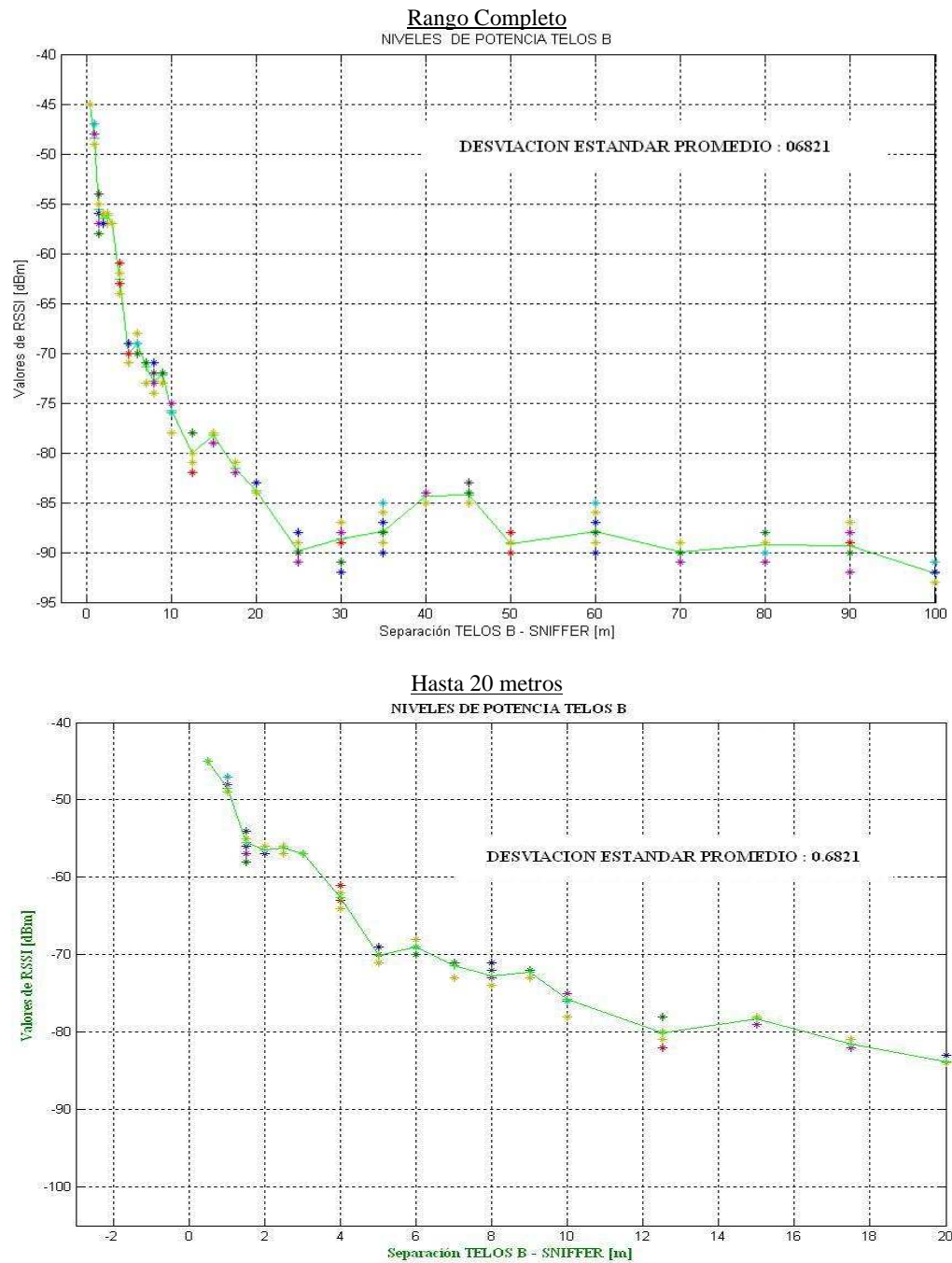
Figura 16. *Tmote Sky Outdoor* – Máxima Potencia (0 dBm)



Fuente: Autor

En la figura 17, para el *Telos B*, la línea verde representa el valor promedio de la potencia recibida en cada punto. La **desviación estándar promedio** fue de **0.6821**.

Figura 17. *Telos B* Outdoor – Máxima Potencia (0 dBm)



Fuente: Autor

En propagación de ondas de radio en espacio libre, la potencia recibida por una antena receptora, la cuál esta separada una distancia d del transmisor, está dada teóricamente por la **Ecuación de Friss (2.1)**:

$$P_r(d_1) = \frac{P_t * G_t * G_r * \lambda^2}{(4\pi)^2 * d_1^2 * K} \quad (2.1)$$

En donde:

P_t	Potencia transmitida en watts.
$P_r(d_1)$	Potencia recibida en el punto d_1 en watts.
G_t	Ganancia de la antena transmisora
G_r	Ganancia de la antena receptora
λ	Longitud de onda en metros para la frecuencia de 2.4 GHz
d_1	Distancia de separación entre transmisor y receptor para un punto p1
K	Factor de pérdidas asociado a otros fenómenos de propagación

Para obtener una ecuación mas sencilla en función de la frecuencia y la distancia, se optó por descomponer la ecuación 2.1 y expresarla en dBm como una suma, en donde también se tuviesen en cuenta las pérdidas en los conectores l_{ct} y l_{cr} .

$$P_r[dBm] = P_t - l_{ct} + G_t - L + G_r - l_{cr} \quad (2.2)$$

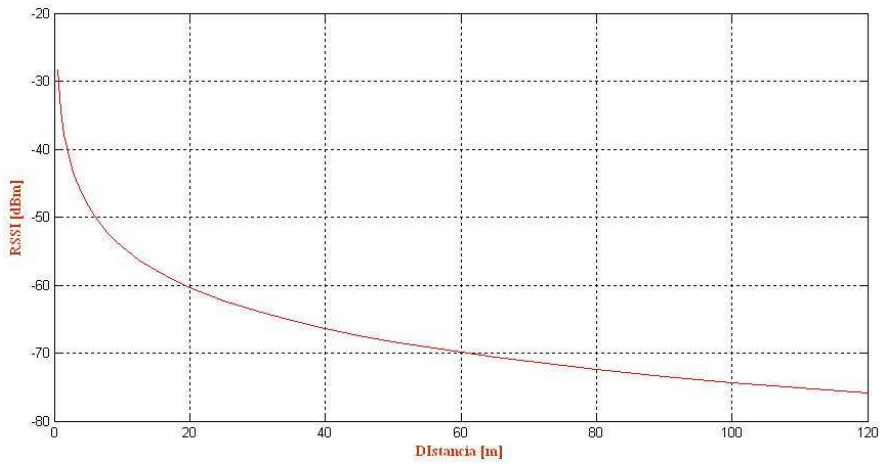
Las pérdidas L por espacio libre están determinadas por la frecuencia y la distancia. Si se maneja la frecuencia en MHz y la distancia en kilómetros, la expresión para calcular L es:

$$L = 32.44 + 20\log(f) + 20\log(d) + k \quad (2.3)$$

El valor k es una constante de ajuste asociada a las pérdidas que se presentan por los demás fenómenos de propagación que la ecuación 2.3 no tiene en cuenta.

La figura 18 muestra la gráfica de la ecuación teórica de friss para la totalidad de puntos de transmisión a una frecuencia de 2400 MHz.

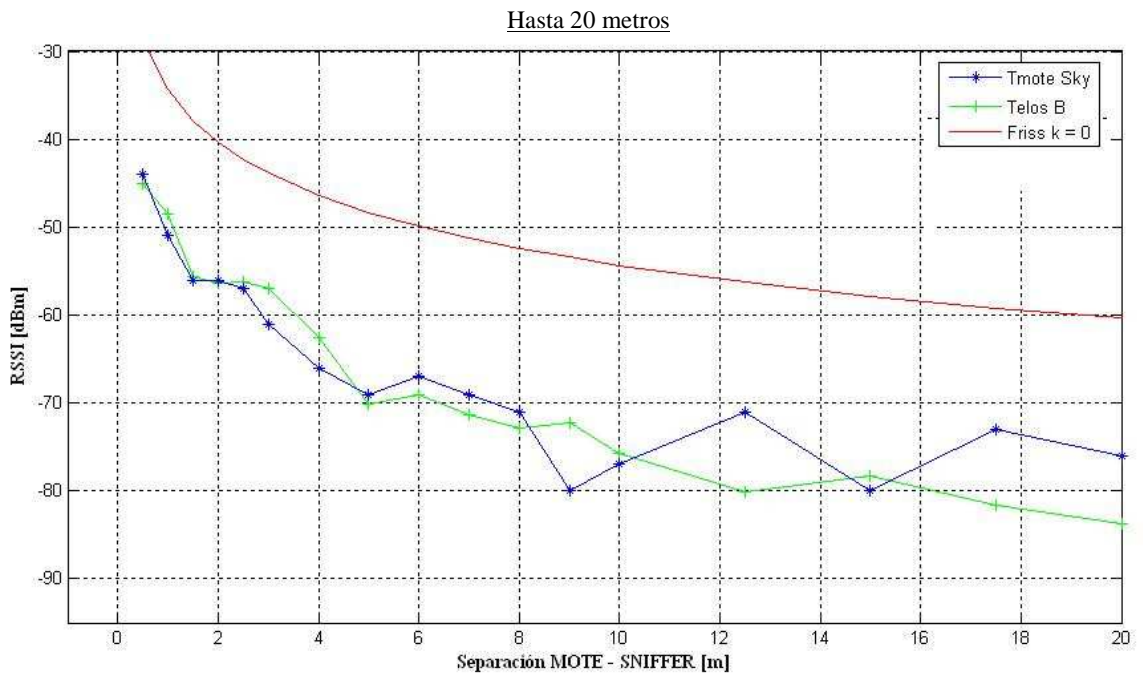
Figura 18. Curva teórica de friss (0 dBm)



Fuente: Autor

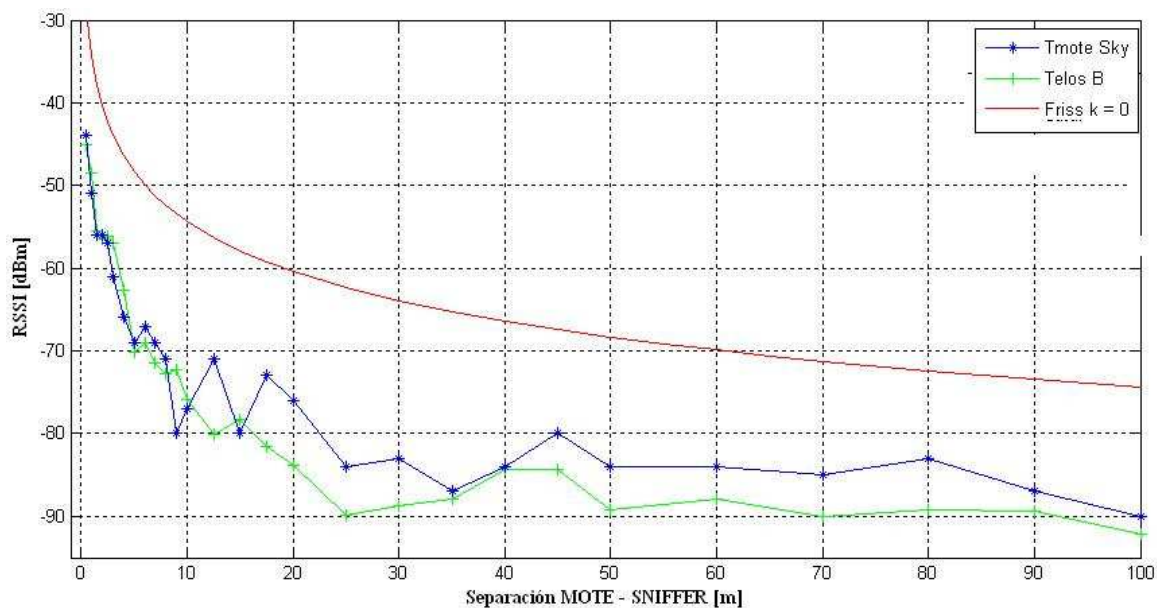
En la figura 19 se realiza el contraste entre la curva de Friss y el promedio de los valores para ambos *motes*.

Figura 19. Friss contra Resultados Experimentales



Fuente: Autor

Rango Completo



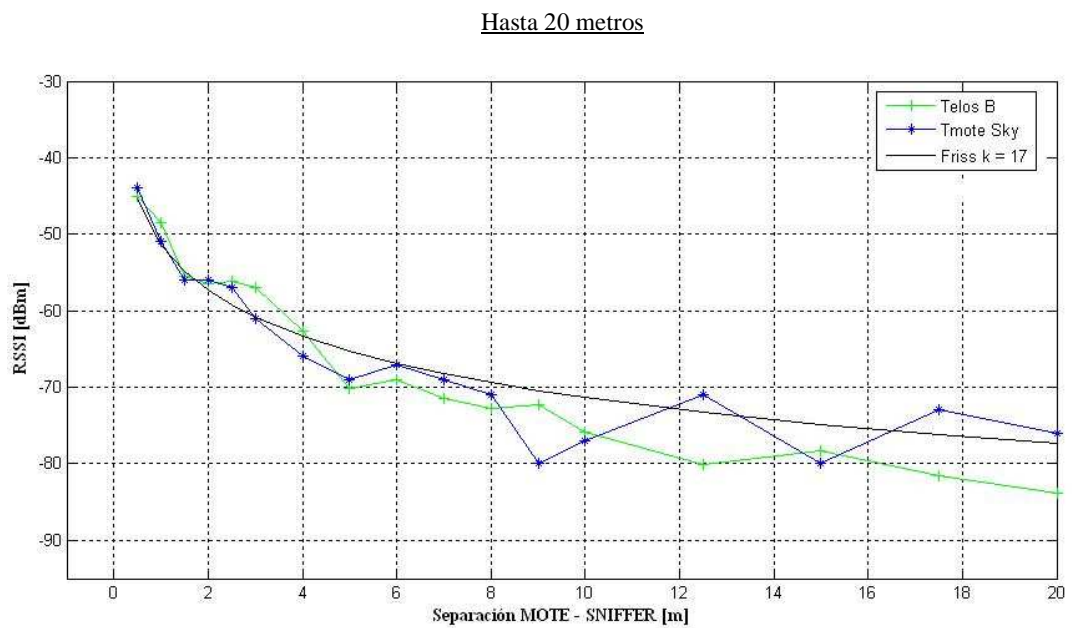
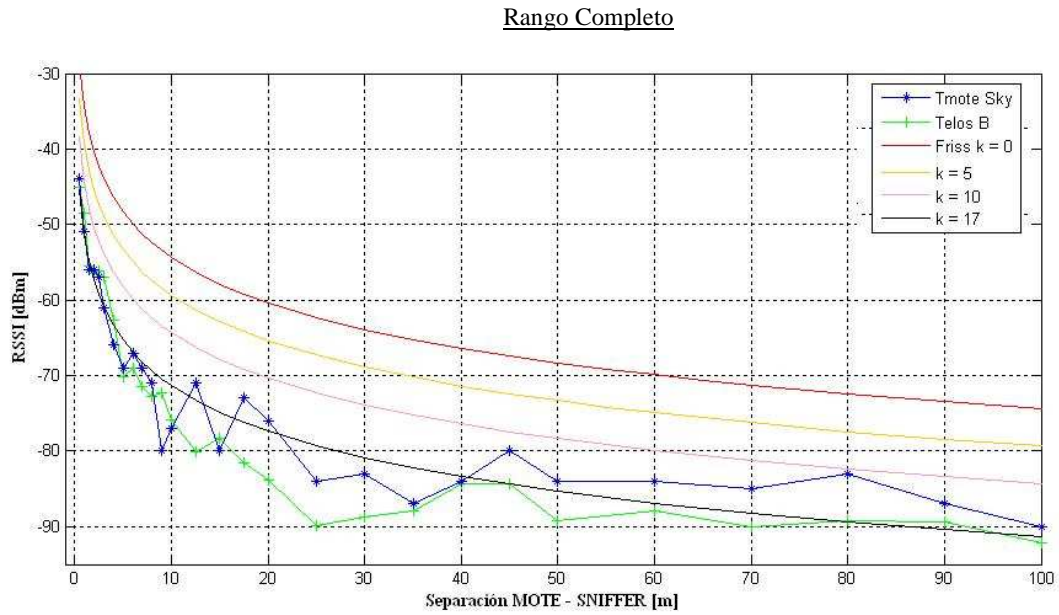
Fuente: Autor

Tal como se esperaba, los valores experimentales se encuentran por debajo de los resultados teóricos obtenidos de la ecuación de Friss. La diferencia se debe en parte a que la ecuación de Friss solo tiene en cuenta el trayecto directo de las ondas que viajan desde el emisor al receptor y no tiene en cuenta los efectos de dispersión y reflexión que introduce el terreno sobre el cual se hicieron las pruebas, en este caso la gramilla de una cancha de fútbol. Por esta razón, en la ecuación 2.3 se asume un factor k igual a 0.

Con el fin de caracterizar el comportamiento del *Telos B* y el *Tmote Sky*, se realizó un ajuste de k para tener un modelo teórico de Friss que se pueda aplicar para el radio CC2420 dentro un entorno de similares características.

El valor que produjo mejores resultados fue $k = 17$. Los resultados obtenidos se ilustran en la figura 20

Figura 20. Friss contra Resultados Experimentales con k ajustado



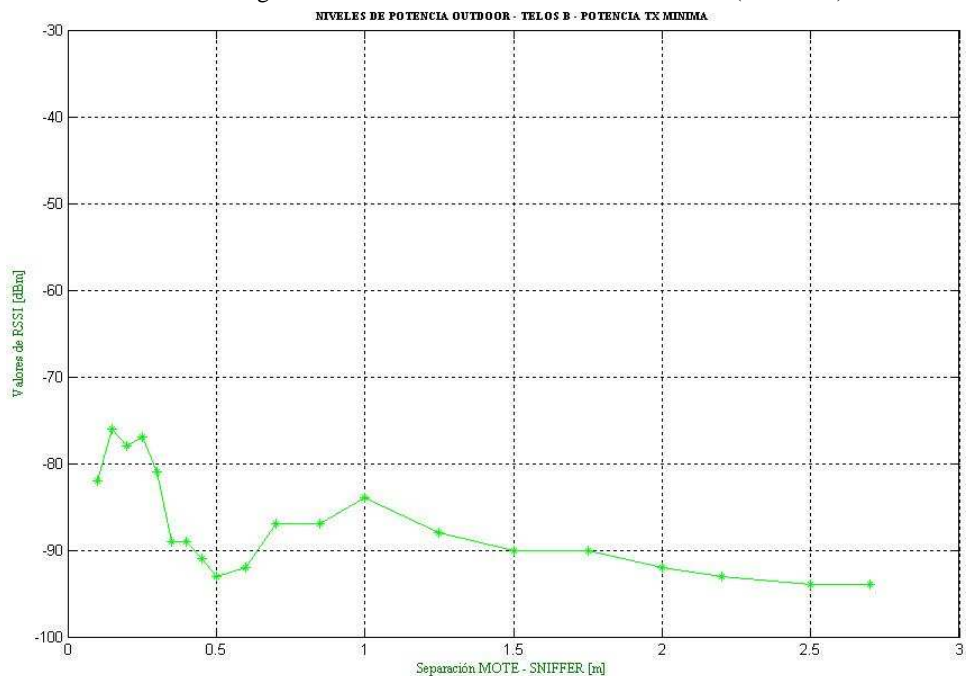
Fuente: Autor

2.1.2.2 Mínima Potencia de Transmisión (-25 dBm)

El procedimiento fue similar al anterior pero programando el radio transceiver para transmitir a -25 dBm. La prueba solo se realizó para el *Telos B* y solo se presentan los valores promedio

En la figura 21 se observan los niveles de potencia promedio recibidos.

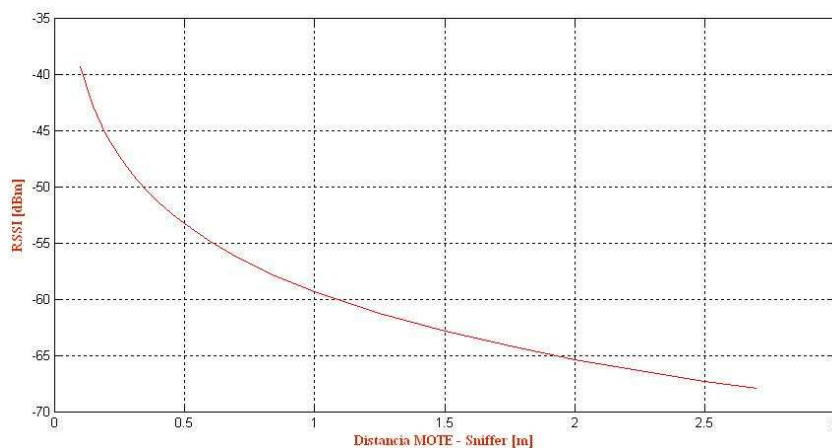
Figura 21. *Telos B* Outdoor – Mínima Potencia (-25 dBm)



Fuente: Autor

También se realizó un cálculo de la ecuación de Friss para todos los puntos. La curva se muestra en la siguiente figura.

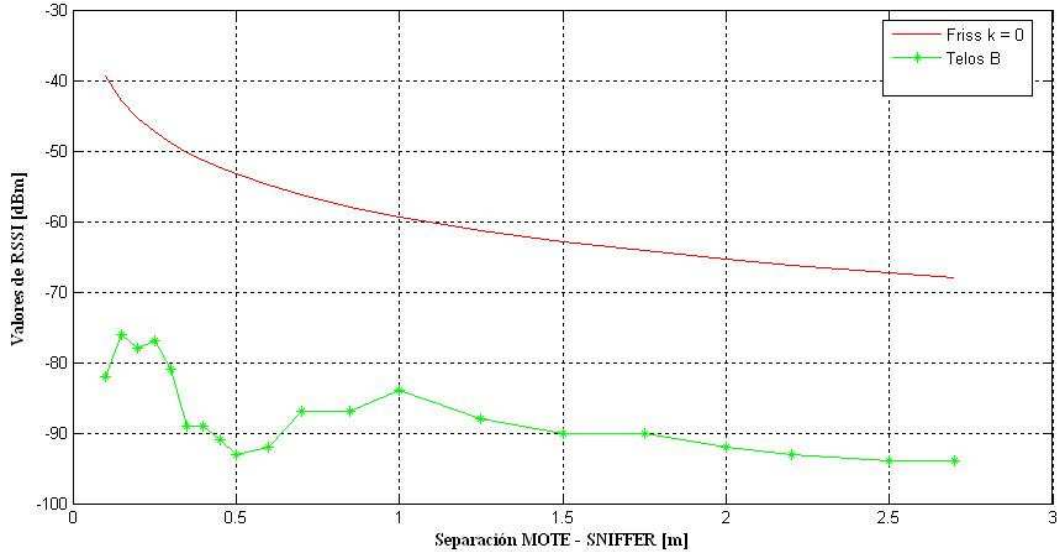
Figura 22. Curva teórica de friss (-25 dBm)



Fuente: Autor

El contraste entre la curva teórica y la curva experimental se observa en la figura 23. Igual que para la máxima potencia de transmisión, inicialmente $k = 0$.

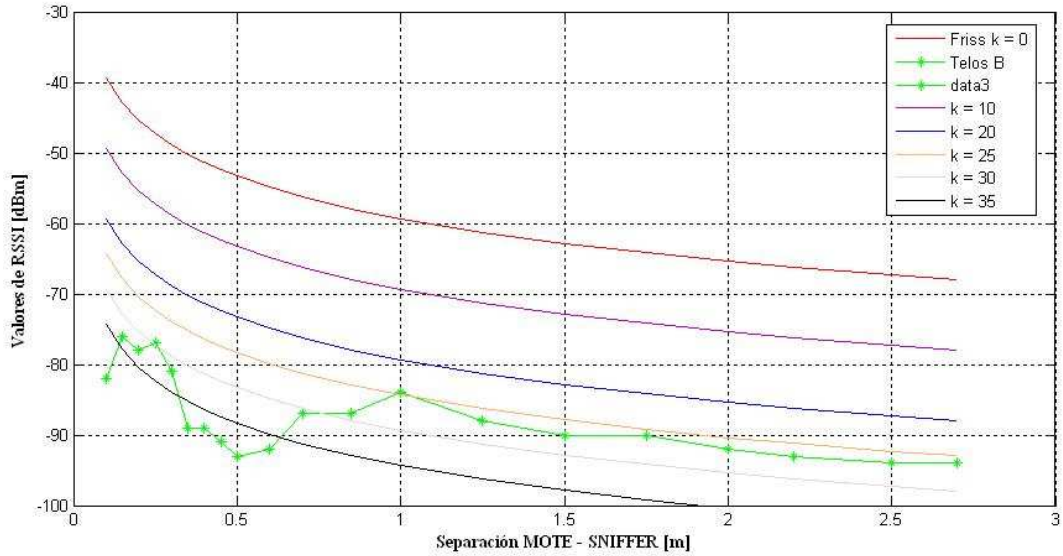
Figura 23. Friss contra resultados experimentales (-25 dBm)



Fuente: Autor

La figura 24 muestra el ajuste de la constante k que se realizó para obtener el modelo teórico cuando se transmite a la mínima potencia permitida por el CC2420

Figura 24. Ajuste de k para transmisión a la mínima potencia



Fuente: Autor

En la anterior figura es claro que no existe un solo valor de k que se ajuste a la totalidad de los puntos. De un metro en adelante, el valor de $k = 25$ presenta un alto grado de coincidencia con los resultados experimentales. Antes de un metro, el valor de k que mas se ajusta oscila

entre 30 y 35, de modo que no es posible establecer un modelo teórico ajustado para una potencia de transmisión de -25 dBm; al menos para esta prueba.

2.2 Pruebas en escenario *Indoor*

Para las pruebas realizadas dentro de un entorno que presentan obstáculos como paredes, puertas y muebles, se mantuvo la misma configuración de los *motes* y el sniffer usada para las pruebas en espacio libre. También se usaron las mismas bases de madera y PVC de manera que se mantuviera la altura. El resumen de la configuración esta consignado en la tabla 6

Tabla 6. Configuración de los dispositivos para las pruebas de potencia

	Potencia de transmisión [dBm]	Ganancia de la antena	Aplicación Programada	Altura de la Base [m]
Tmote Sky	0	1,7	CntToLedsAndRfm	1.67
Telos B	0	1,7	CntToLedsAndRfm	1.67
Packet Sniffer		4.1	Chipcon Packet sniffer CC2420	1.06

Fuente: Autor

El equipo usado en esta práctica se observa en la tabla 7.

Tabla 7. Equipo Indoor

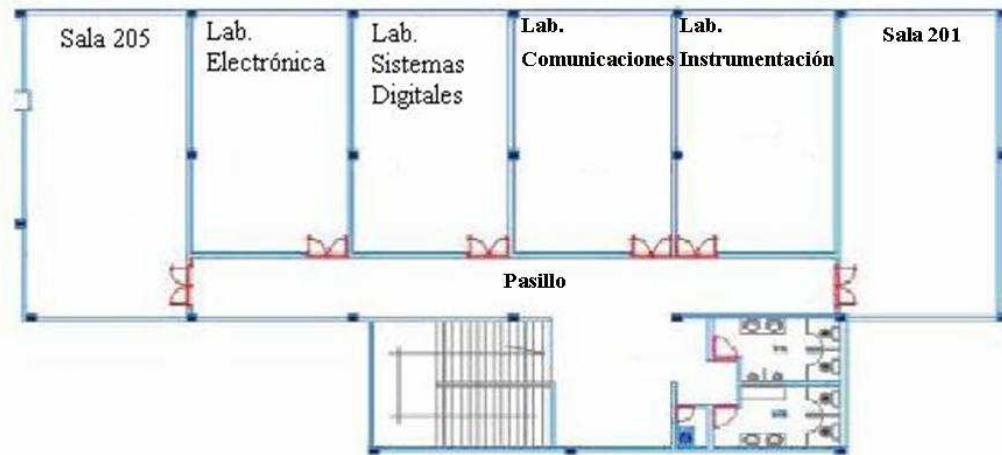
EQUIPO PRUEBAS INDOOR		
ITEM	CANTIDAD	UTILIDAD
Mote IV - Tmote Sky	1	Transmisor
Crossbow - Telos B	1	Transmisor
Chipcon Packet Sniffer	1	Receptor
Laptop con Software Chipcon Packet Sniffer	1	Monitorización de la Información
Bases de Madera y PVC	2	Ubicación de los transmisores y receptor
Baterías AA 1.5 v	12	Fuentes de Energía
Metro	1	Ubicación de los puntos de medición

Fuente: Autor

2.2.1 Diseño y Desarrollo de las pruebas

Se eligió como escenario de pruebas el segundo piso del edificio de Alta Tensión de la UIS. En la figura 25 se observa un plano del lugar con los nombres de los espacios en donde se localizan los puntos de transmisión y recepción.

Figura 25. Segundo piso edificio de alta tensión

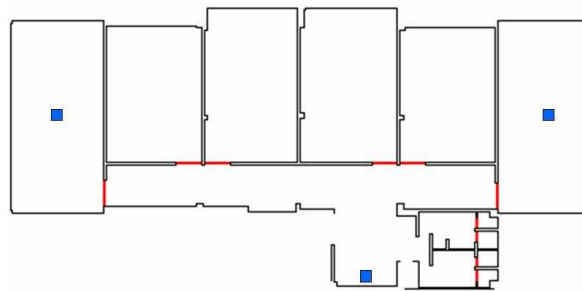


Fuente: [20]

Se seleccionaron tres puntos de transmisión (figura 26) y varios puntos de recepción. Al igual que en las pruebas outdoor, los *notes* estaban a cargo de la transmisión de los paquetes y el sniffer de la recepción.

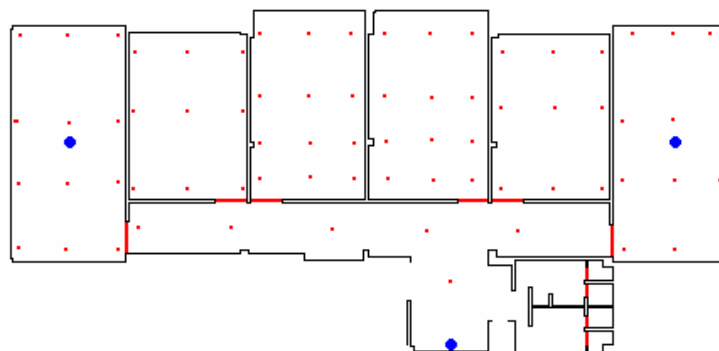
Se trazó una cuadrícula sobre el plano de la sala de manera que los puntos de recepción formasen una matriz (figura 27).

Figura 26. Puntos de transmisión indoor



Fuente: Autor

Figura 27. Puntos de transmisión y recepción indoor



Fuente: Autor

Con esta práctica se busca:

- Contrastar los niveles de potencia y el radio de cobertura obtenidos en la práctica con la información de las hojas de datos de los *notes* y la bibliografía del estándar IEEE 802.15.4 y la especificación ZigBee.
- Comparar los resultados obtenidos en las pruebas indoor y outdoor para observar las variaciones producidas por la presencia de obstáculos como puertas, paredes y muebles.
- Analizar el nivel de coincidencia entre los resultados obtenidos al usar software de procesamiento de datos experimentales (MATLAB) con los obtenidos del software de simulación (MATINDOOR).

2.2.2 Análisis y procesamiento de la información obtenida

2.2.2.1 Resultados y Distribuciones gráficas

Las medidas se tomaron desplazando el sniffer alrededor del área registrando paquetes en cada punto durante un minuto aproximadamente. Los registros se guardaron y los valores de RSSI de cada paquete se consignaban en una hoja de Excel para obtener el promedio de cada punto.

La tabla 8 contiene los valores promedio de RSSI para cada punto de recepción. Se repitió el mismo proceso para los tres puntos de transmisión.

Con los valores de la tabla 8 se construyeron en Excel tres matrices de 39 x 108, una para cada punto de transmisión, que contienen la distribución de los niveles de RSSI en el plano del segundo piso. La figura 28 muestra parte de una de las matrices. El valor resaltado corresponde al punto f1 de la tabla 8. Los puntos donde no se tomaron medidas se llenan con 900 (gris) para que exista una gran diferencia con los puntos de medición (blanco).

En Matlab se escriben los códigos que generan un resultado gráfico de la distribución de potencia del área para cada punto de transmisión. Los resultados se observan en las figuras 29, 30 y 31. En la parte derecha de cada una se encuentra la barra de colores que indica los niveles de potencia en dBm de cada punto.

Tabla 8 Resultados de las pruebas indoor

Punto	Distancia x [cm]		Distancia Y [cm]		POTENCIA (promedio) RX [dBm]		
	Real	Plano	Real	Plano	TX 201	TX 205	TX Pasillo
SALA 201							
f1	70,0	0,538	15,0	0,115	-62.3	-92.25	-90.9
f2	281,5	2,165	15,0	0,115	-56.4	-91.85	-87.4
f3	493,0	3,792	15,0	0,115	-62.2	-95.15	-87.55
f4	23,0	0,177	461,0	3,546	-43.9	-90.95	-87.95
f5	281,5	2,165	461,0	3,546	-41.3	-82.5	-92.4
f6	540,0	4,154	461,0	3,546	-53.4	-84.01	-87.5
f7	23,0	0,177	719,5	5,535	-49.7	-91.8	-92.65
f8	281,5	2,165	719,5	5,535	-48.25	-93.4	-87.75
f9	540,0	4,154	719,5	5,535	-55.75	-92.15	-88.3
f10	23,0	0,177	1142,5	8,788	-63.6	-88.35	-83.85
f11	281,5	2,165	1142,5	8,788	-57.8	-89.9	-83.85
f12	540,0	4,154	1142,5	8,788	-56.85	-94.95	-92.9
LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN							
e1	23,5	0,181	110,0	0,846	-56.8	-88.75	-84.95
e2	305,5	2,350	86,0	0,662	-60.7	-81.8	-76.85
e3	564,0	4,338	86,0	0,662	-54.3	-89.7	-79.85
e4	23,5	0,181	368,0	2,831	-66.1	-83.7	-80.5
e5	305,5	2,350	368,0	2,831	-61.55	-80.5	-89.5
e6	564,0	4,338	368,0	2,831	-55.01	-92.35	-75.9
e7	23,5	0,181	767,5	5,904	-68.05	-86.45	-62.55
e8	305,5	2,350	767,5	5,904	-64.15	-93.4	-90.65
e9	564,0	4,338	767,5	5,904	-62.6	-93.6	-79.15
LABORATORIO DE COMUNICACIONES							
d1	42,5	0,327	100,5	0,773	-65.4	-84.8	-73.55
d2	277,5	2,135	100,5	0,773	-73.01	-82.85	-73.2
d3	489,0	3,762	100,5	0,773	-75.7	-78.6	-80.01
d4	42,5	0,327	406,0	3,123	-70.9	-83.01	-75.9
d5	277,5	2,135	406,0	3,123	-76.55	-78.35	-80.45
d6	489,0	3,762	406,0	3,123	-66.65	-81.55	-85.3
d7	42,5	0,327	641,0	4,931	-80.6	-76.75	-81.55
d8	277,5	2,135	641,0	4,931	-65.25	-76.1	-70.55
d9	489,0	3,762	641,0	4,931	-66.25	-76.35	-67.8
d10	42,5	0,327	829,0	6,377	-72.35	-81.25	-80.01
d11	277,5	2,135	829,0	6,377	-71.85	-77.95	-79.2
d12	489,0	3,762	829,0	6,377	-74.05	-82.25	-73.5
LABORATORIO DE SISTEMAS DIGITALES							
c1	42,5	0,327	100,5	0,773	-82.5	-76.35	-81.45
c2	277,5	2,135	100,5	0,773	-79.1	-69.35	-84.85
c3	489,0	3,762	100,5	0,773	-80.1	-68.35	-79.75
c4	42,5	0,327	406,0	3,123	-79.25	-64.05	-78.75
c5	277,5	2,135	406,0	3,123	-71.95	-71.01	-76.95
c6	489,0	3,762	406,0	3,123	-86.45	-68.3	-75.7
c7	42,5	0,327	641,0	4,931	-80.25	-60.15	-79.85
c8	277,5	2,135	641,0	4,931	-82.55	-80.75	-76.2
c9	489,0	3,762	641,0	4,931	-78.9	-72.05	-76.8
c10	42,5	0,327	829,0	6,377	-82.55	-64.8	-76.25
c11	277,5	2,135	829,0	6,377	-76.6	-62.55	-84.1
c12	489,0	3,762	829,0	6,377	-78.95	-68.45	-76.05
LABORATORIO DE ELECTRONICA							
b1	23,5	0,181	110,0	0,846	-84.01	-60.5	-78.4
b2	305,5	2,350	86,0	0,662	-90.65	-66.6	-84.35
b3	564,0	4,338	86,0	0,662	-94.85	-68.8	-76.6
b4	23,5	0,181	368,0	2,831	-89.1	-63.01	-91.7
b5	305,5	2,350	368,0	2,831	-82.01	-68.85	-82.1
b6	564,0	4,338	368,0	2,831	-87.9	-82.65	-82.01
b7	23,5	0,181	767,5	5,904	-91.35	-56.6	-86.3
b8	305,5	2,350	767,5	5,904	-83.9	-61.25	-87.05
b9	564,0	4,338	767,5	5,904	-92.45	-70.55	-83.1
SALA 205							
a1	31,5	0,242	35,0	0,269	-92.6	-57.85	-93.2
a2	290,0	2,231	35,0	0,269	-87.8	-64.6	-85.45
a3	548,5	4,219	35,0	0,269	-89.6	-55.32	-81.15
a4	31,5	0,242	481,5	3,704	-87.85	-44.01	-90.3
a5	290,0	2,231	481,5	3,704	-90.65	-40.85	-76.1
a6	548,5	4,219	481,5	3,704	-93.95	-48.8	-78.05
a7	31,5	0,242	787,0	6,054	-89.05	-54.65	-80.35
a8	290,0	2,231	787,0	6,054	-82.95	-44.7	-80.85
a9	548,5	4,219	787,0	6,054	-89.7	-54.75	-78.6
a10	31,5	0,242	1116,0	8,585	-83.15	-63.05	-93.55
a11	290,0	2,231	1116,0	8,585	-92.55	-59.5	-82.9
a12	548,5	4,219	1116,0	8,585	-83.65	-56.45	-68.8
PASILLO SEGUNDO PISO							
g1	452,3	3,479	100,5	0,773	-62.25	-80.25	-75.4
g2	921,2	7,096	100,5	0,773	-70.2	-78.01	-54.05
g3	1390,3	10,695	100,5	0,773	-83.3	-79.35	-57.2
g4	1859,2	14,302	100,5	0,773	-80.6	-64.1	-73.35
g5	2328,2	17,909	100,5	0,773	-89.5	-56.9	-72.25
g6	804,0	6,185	390,0	3,000	-82.15	-88.01	-54.5

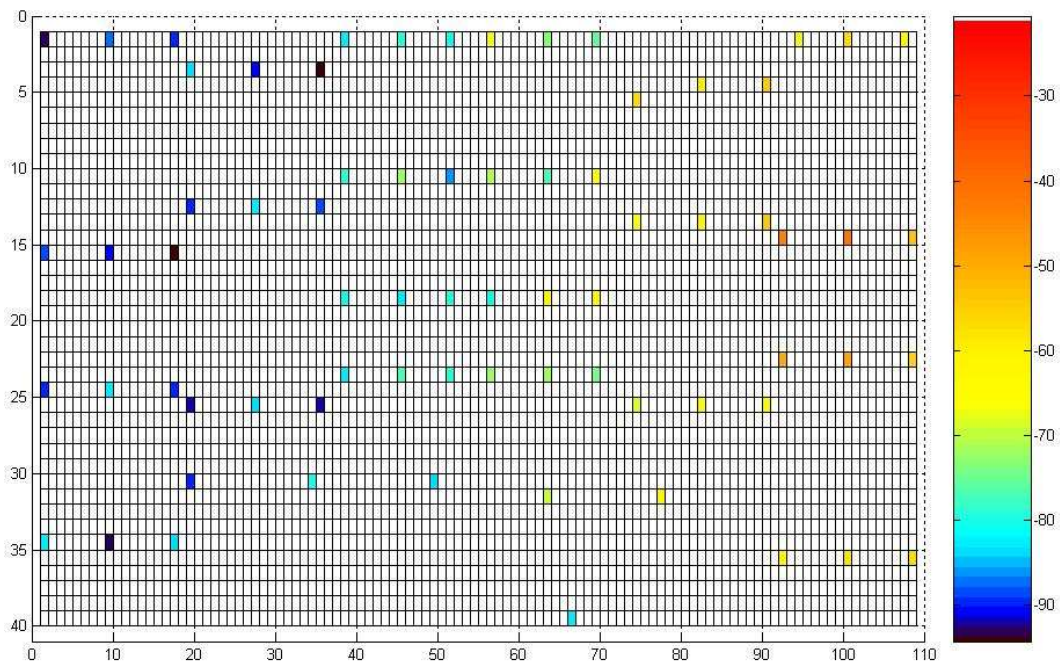
Fuente: Autor

Figura 28. Matriz en Excel de la potencia medida por puntos.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	-82.6	900	900	900	900	900	900	900	-87.8	900	900	900	900	900	900	900	-84.6	900	900
2	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
3	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	-84.01
4	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
5	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
6	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
7	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
8	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
9	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
10	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
11	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
12	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	-89.1
13	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
14	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
15	-87.05	900	900	900	900	900	900	900	-90.65	900	900	900	900	900	900	900	-83.95	900	900
16	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
17	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
18	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
19	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
20	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
21	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
22	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
23	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
24	-84.05	900	900	900	900	900	900	900	-82.95	900	900	900	900	900	900	900	-89.7	900	900
25	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	-81.35
26	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
27	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
28	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
29	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
30	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	-89.5
31	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
32	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
33	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
34	-83.15	900	900	900	900	900	900	900	-82.55	900	900	900	900	900	900	900	-82.45	900	900
35	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
36	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
37	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
38	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
39	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900

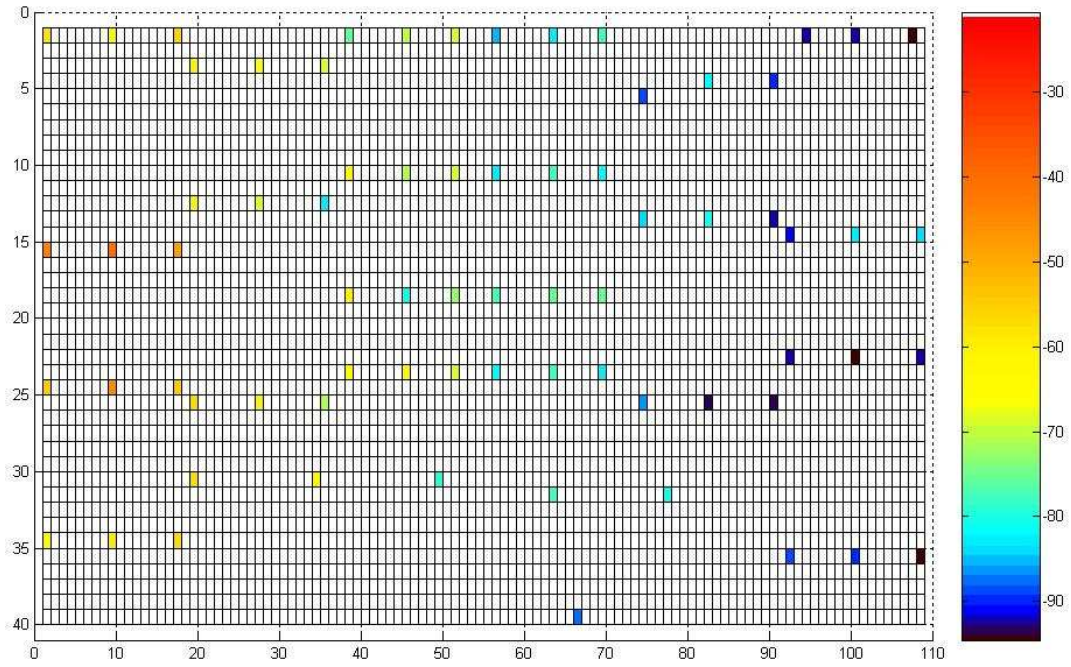
Fuente: Autor

Figura 29. Tx 201-Distribución de la potencia medida



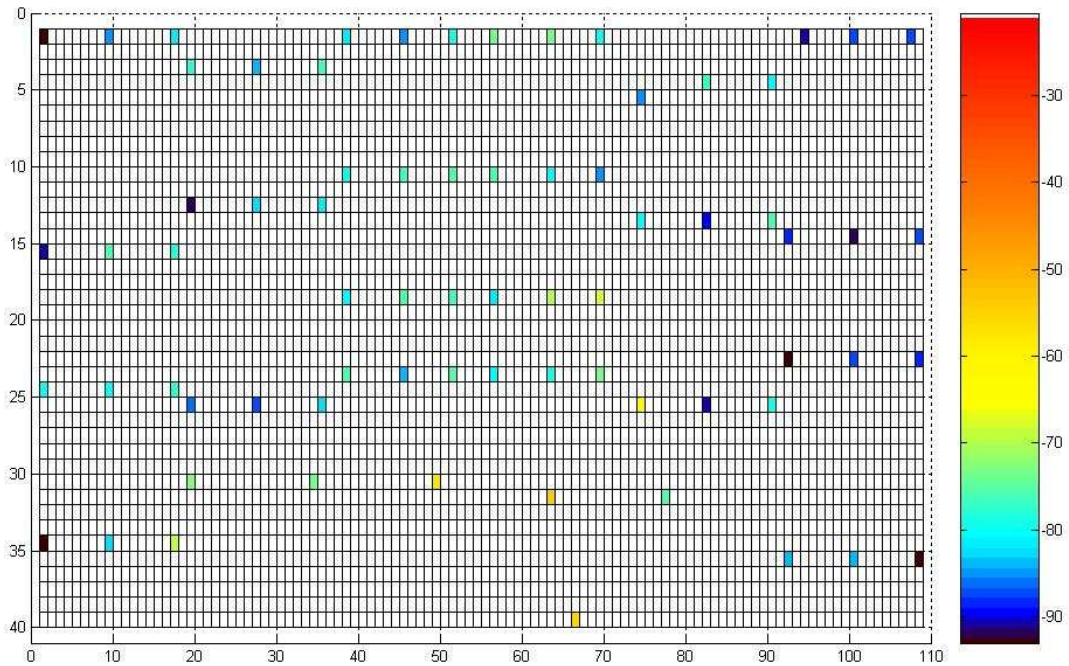
Fuente: Autor

Figura 30. Tx 205-Distribución de la potencia medida.



Fuente: Autor

Figura 31. Tx Pasillo-Distribución de la potencia medida.



Fuente: Autor

2.2.2.2 Comparación entre los resultados experimentales y simulaciones

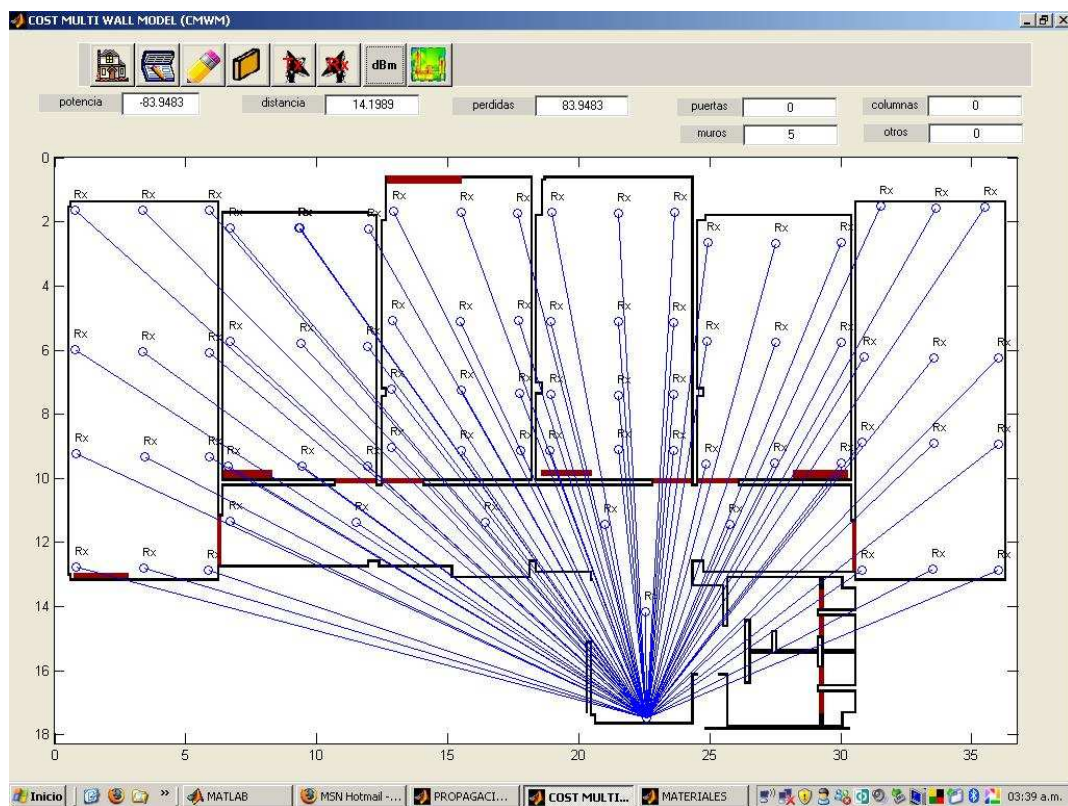
Estos resultados se compararon con la simulación de la distribución de potencia que se lograba usando el software MATINDOOR.

Los datos de entrada para realizar la simulación fueron:

- Potencia de Transmisión: 0 dBm
- Frecuencia: 2400 MHz
- Ganancia de la antena transmisora: 1.7 dBm
- Ganancia de la antena receptora: 4.1 dBi
- Atenuación de un muro⁹: 6 dB [20]
- Atenuación de una puerta¹⁰: 3 dB [20]

El software realiza el cálculo del nivel de RSSI punto por punto, calculando la distancia entre transmisor y receptor (Figura 32).

Figura 32. Simulación MATINDOOR punto por punto. Tx Pasillo



Fuente: Autor

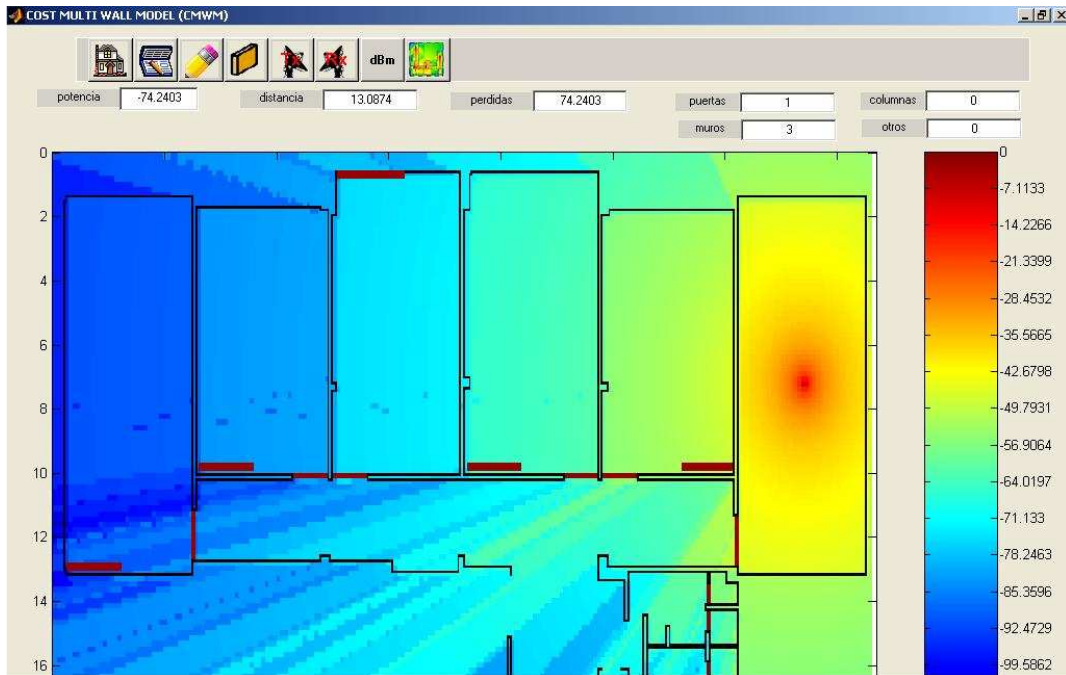
Después de hacer los cálculos para cada punto, MATINDOOR hace un dibujo de la distribución de potencia en toda el área. En las figuras 33, 34 y 35 se muestran los resultados

⁹ Tomado de un proyecto de pregrado del grupo CPS

¹⁰ Tomado de un proyecto de pregrado del grupo CPS

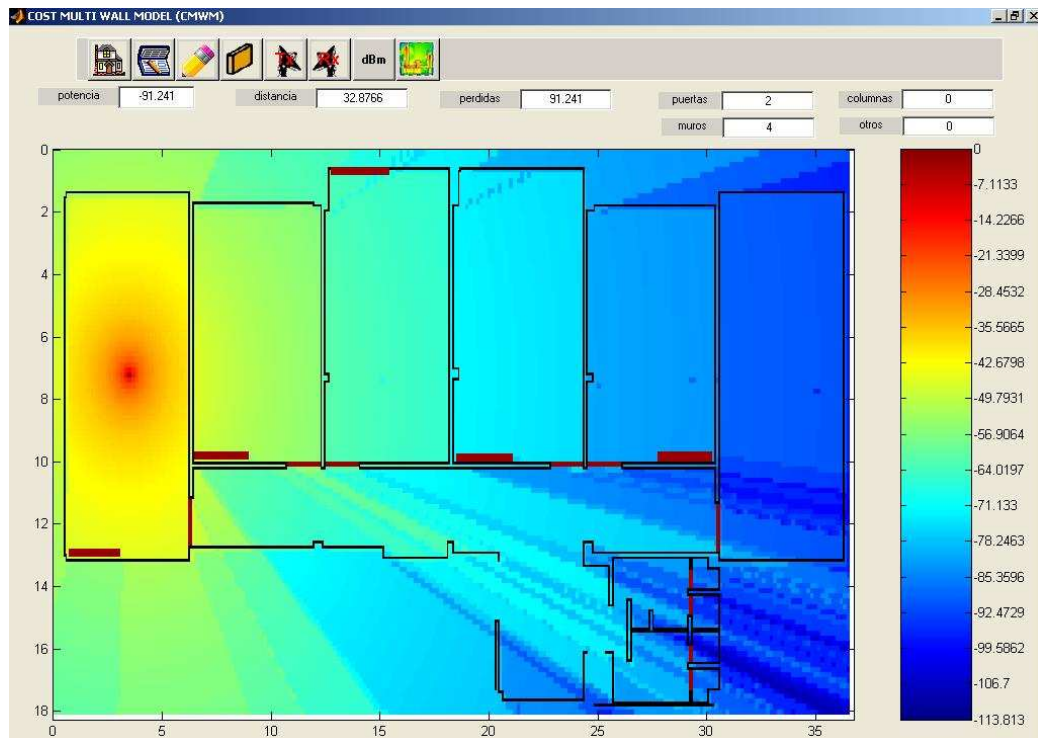
simulados. En la tabla 9 se realiza una comparación entre los valores simulados y experimentales, también se muestra la diferencia entre ellos para cada punto.

Figura 33. Distribución de potencia simulada – Tx201



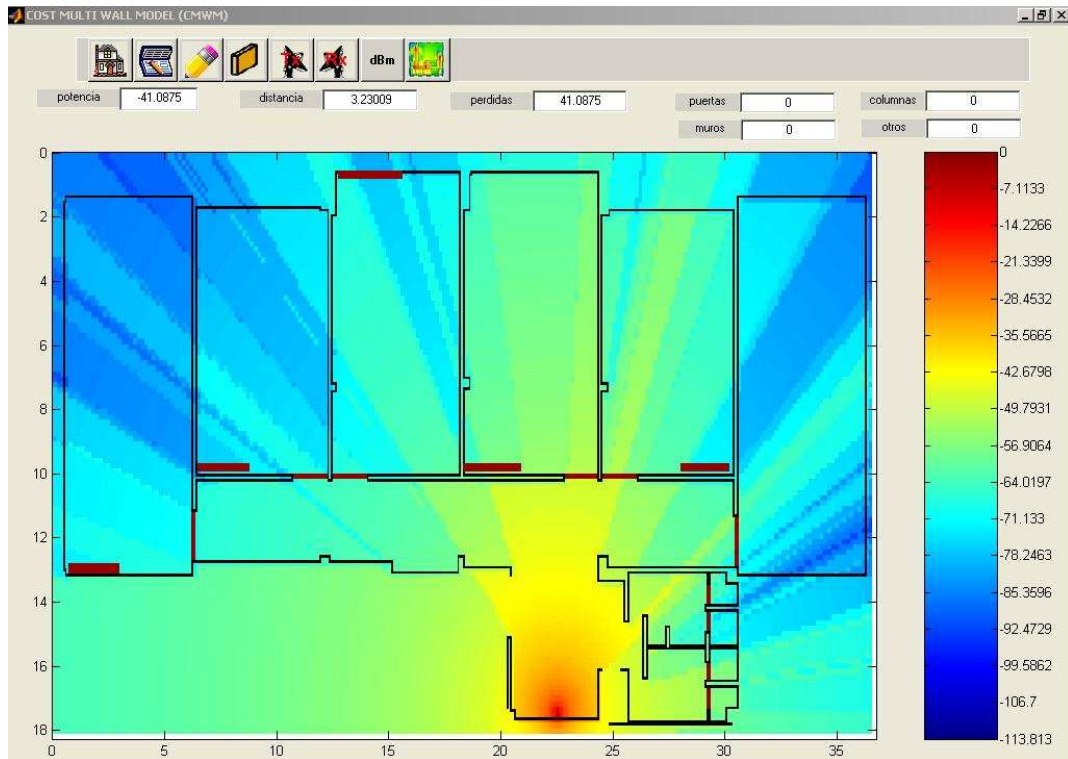
Fuente: Autor

Figura 34. Distribución de potencia simulada – Tx201



Fuente: Autor

Figura 35. Distribución de potencia simulada – Tx201



Fuente: Autor

Con esta comparación se quería saber si era posible encontrar el factor de corrección para el modelo Cost-Multi Wall que usa MATINDOOR aplicado a redes IEEE 802.15.4/ZigBe; de tal modo que al incluirlo en el código de programación del software se lograran unos valores más cercanos a los experimentales.

De los resultados de la tabla 9 se puede concluir que no hay un valor de la diferencia que pueda ser empleado como factor de corrección ya que los niveles oscilan demasiado y no se lograría el ajuste para la totalidad de los puntos.

Tabla 9. Cálculo de la diferencia entre valores

a. Transmisión sala 201

Punto	Medicion [dBm]	Simulación		Diferencia [dBm]	Distancia [m]
		MATINDOOR [dBm]			
a1	-92,60	-91,35	-1,25	33,28	
a2	-87,80	-90,62	2,82	30,61	
a3	-89,60	-89,91	0,31	26,19	
a4	-87,85	-91,22	3,37	32,80	
a5	-90,65	-90,49	-0,16	30,14	
a6	-93,95	-89,74	4,21	27,68	
a7	-89,05	-91,22	2,17	32,92	
a8	-82,95	-90,52	7,57	30,26	
a9	-89,70	-89,75	0,05	27,69	
a10	-83,15	-88,35	5,20	33,27	
a11	-92,55	-90,64	-1,91	30,69	
a12	-83,65	-83,90	0,25	28,16	
b1	-84,00	-83,59	-0,41	27,20	
b2	-90,65	-82,73	-7,92	24,62	
b3	-94,85	-81,76	-13,09	22,01	
b4	-89,10	-83,48	-5,62	26,85	
b5	-82,00	-82,57	0,57	24,16	
b6	-87,90	-81,57	-6,33	21,54	
b7	-91,35	-83,47	-7,88	26,83	
b8	-83,90	-82,58	-1,32	24,22	
b9	-92,45	-81,56	-10,89	21,53	
c1	-82,50	-75,49	-7,01	21,36	
c2	-79,10	-74,43	-4,67	18,91	
c3	-80,10	-73,34	-6,76	16,67	
c4	-79,25	-75,24	-4,01	20,74	
c5	-71,95	-74,15	2,20	18,29	
c6	-86,45	-72,97	-13,48	15,98	
c7	-80,25	-75,15	-5,10	20,54	
c8	-82,55	-74,04	-8,51	18,07	
c9	-78,90	-72,84	-6,06	15,73	
c10	-82,55	-75,18	-7,37	20,61	
c11	-76,60	-74,11	-2,49	18,20	
c12	-78,95	-72,91	-6,04	15,87	
d1	-65,40	-66,78	1,38	15,64	
d2	-73,00	-65,40	-7,60	13,31	
d3	-75,70	-63,86	-11,84	11,17	
d4	-70,90	-66,38	-4,52	14,93	
d5	-76,55	-64,76	-11,79	12,42	
d6	-66,65	-62,96	-3,69	10,07	
d7	-80,60	-66,22	-14,38	14,66	
d8	-65,25	-64,57	-0,68	12,12	
d9	-66,25	-62,66	-3,59	9,73	
d10	-72,35	-66,31	-6,04	14,80	
d11	-71,85	-64,67	-7,18	12,25	
d12	-74,05	-62,83	-11,22	9,92	
e1	-56,80	-56,78	-0,02	9,86	
e2	-60,70	-54,31	-6,39	7,42	
e3	-54,30	-52,49	-1,81	6,01	
e4	-66,10	-55,70	-10,40	8,71	
e5	-61,55	-52,75	-8,80	6,20	
e6	-55,00	-48,32	-6,68	3,72	
e7	-68,05	-55,97	-12,08	8,98	
e8	-64,15	-53,40	-10,75	6,68	
e9	-62,60	-49,50	-13,10	4,26	
f1	-62,30	-46,35	-15,95	5,92	
f2	-56,40	-46,04	-10,36	5,71	
f3	-62,20	-46,33	-15,87	5,91	
f4	-43,90	-40,76	-3,14	3,11	
f5	-41,30	-34,37	-6,93	1,48	
f6	-53,40	-39,45	-13,95	2,67	
f7	-49,70	-47,33	-2,37	3,33	
f8	-48,25	-34,10	-14,15	1,45	
f9	-55,75	-40,47	-15,28	3,01	
f10	-63,60	-46,73	-16,87	6,18	
f11	-57,80	-46,08	-11,72	5,74	
f12	-56,85	-46,73	-10,12	6,19	
g1	-89,50	-86,61	-2,89	27,26	
g2	-80,60	-84,91	4,31	22,40	
g3	-83,30	-73,95	-9,35	17,87	
g4	-70,20	-68,36	-1,84	13,27	
g5	-82,15	-64,97	-17,18	8,99	
g6	-62,25	-74,43	12,18	13,37	

b. Transmisión sala 205

Punto	Medicion [dBm]	Simulación		Distancia [m]
		MATINDOOR [dBm]	Diferencia [dBm]	
a1	-57,85	-46,6	-11,25	6,09
a2	-64,60	-45,69	-18,91	5,48
a3	-55,32	-46,87	-8,45	6,01
a4	-44,00	-39,93	-4,07	2,83
a5	-40,85	-32,49	-8,36	1,2
a6	-48,80	-39,38	-9,42	2,66
a7	-54,65	-41,01	-13,64	3,2
a8	-44,70	-36,70	-8,00	1,96
a9	-54,75	-40,75	-14,00	3,11
a10	-63,05	-46,30	-16,75	5,88
a11	-59,50	-45,32	-14,18	5,26
a12	-56,45	-46,20	-10,25	5,82
b1	-60,50	-52,16	-8,34	5,79
b2	-66,60	-54,42	-12,18	7,51
b3	-68,80	-56,60	-12,20	9,65
b4	-91,70	-48,42	-43,28	3,76
b5	-68,85	-52,56	-16,29	6,07
b6	-82,65	-55,54	-27,11	8,54
b7	-56,60	-49,31	-7,29	4,17
b8	-61,25	-52,87	-8,38	6,29
b9	-70,55	-55,66	-14,89	8,67
c1	-76,35	-63,79	-12,56	11,07
c2	-69,35	-65,30	-4,05	13,17
c3	-68,35	-66,55	-1,80	15,22
c4	-64,05	-62,75	-1,30	9,83
c5	-71,00	-64,64	-6,36	12,21
c6	-68,30	-66,04	-2,26	14,36
c7	-60,15	-62,52	2,37	9,57
c8	-80,75	-64,45	-16,30	11,96
c9	-72,05	-65,96	-6,09	14,22
c10	-64,80	-62,80	-2,00	9,89
c11	-62,55	-64,60	2,05	12,15
c12	-68,45	-66,04	-2,41	14,35
d1	-84,80	-79,27	-5,53	16,52
d2	-82,85	-74,38	-8,47	18,79
d3	-78,60	-75,36	-3,24	20,31
d4	-83,00	-72,84	-10,16	15,74
d5	-78,35	-74,04	-4,31	18,07
d6	-81,55	-75,12	-6,43	20,47
d7	-76,75	-72,73	-4,02	15,54
d8	-76,10	-74,00	-2,10	17,99
d9	-76,35	-75,05	-1,30	20,30
d10	-81,25	-72,81	-8,44	15,68
d11	-77,95	-74,05	-3,90	18,13
d12	-82,25	-75,10	-7,15	20,42
e1	-88,75	-81,75	-7,00	22,62
e2	-81,80	-82,68	0,88	24,48
e3	-89,70	-83,56	-6,14	27,10
e4	-83,70	-81,55	-2,15	21,50
e5	-80,50	-82,53	2,03	24,08
e6	-92,35	-83,46	-8,89	26,77
e7	-86,45	-81,58	-4,87	21,59
e8	-93,40	-82,58	-10,82	24,20
e9	-93,60	-83,48	-10,12	26,85
f1	-92,25	-90,04	-2,21	28,82
f2	-91,85	-90,65	-1,20	30,71
f3	-95,15	-91,21	-3,94	32,76
f4	-90,95	-89,67	-1,28	27,43
f5	-82,50	-90,50	8,00	30,21
f6	-84,00	-91,10	7,10	32,36
f7	-91,80	-89,69	-2,11	27,05
f8	-95,10	-90,50	-4,60	30,21
f9	-92,15	-91,11	-1,04	32,39
f10	-88,35	-80,86	-7,49	28,06
f11	-89,90	-90,64	0,74	30,68
f12	-94,95	-91,24	-3,71	32,87
g1	-56,90	-51,56	-5,34	5,40
g2	-64,01	-65,05	1,04	9,07
g3	-79,35	-68,72	-10,63	13,84
g4	-78,00	-74,24	-3,76	18,49
g5	-80,25	-84,97	4,72	22,57
g6	-88,00	-78,06	-9,94	20,32

c. Transmisión pasillo

Punto	Medicion [dBm]	Simulación		Diferencia [dBm]	Distancia [m]
		MATINDOOR [dBm]			
a1	-93,20	-83,51		-9,69	26,96
a2	-85,45	-85,83		0,38	24,92
a3	-81,15	-88,14		6,99	23,01
a4	-90,30	-85,74		-4,56	24,65
a5	-76,10	-81,90		5,8	22,37
a6	-78,05	-78,01		-0,04	20,21
a7	-80,35	-73,24		-7,11	23,28
a8	-80,50	-75,27		-5,23	20,81
a9	-78,60	-83,28		4,68	18,57
a10	-93,55	-72,86		-20,69	22,27
a11	-82,90	-68,81		-14,09	19,75
a12	-68,80	-67,68		-1,12	17,35
b1	-78,40	-81,77		3,37	22,05
b2	-84,35	-81,01		-3,34	20,22
b3	-76,60	-74,28		-2,32	18,58
b4	-91,70	-77,82		-13,88	19,76
b5	-82,10	-79,86		-2,24	17,62
b6	-82,00	-78,84		-3,16	15,74
b7	-86,30	-76,91		-9,39	17,8
b8	-87,05	-72,60		-14,45	15,32
b9	-83,10	-74,33		-8,77	13,23
c1	-81,85	-68,26		-13,59	18,53
c2	-84,85	-76,66		-8,19	17,29
c3	-79,75	-70,25		-9,5	16,5
c4	-78,75	-66,84		-11,91	15,74
c5	-76,95	-65,99		-10,96	14,27
c6	-75,70	-74,40		-1,3	13,33
c7	-79,85	-71,91		-7,94	14,14
c8	-76,20	-64,76		-11,44	12,43
c9	-76,80	-72,91		-3,89	11,23
c10	-76,25	-68,10		-8,15	12,88
c11	-84,10	-63,68		-20,42	10,94
c12	-76,05	-62,57		-13,48	9,63
d1	-73,55	-61,09		-12,46	16,19
d2	-73,20	-60,87		-12,33	15,78
d3	-80,00	-57,88		-22,12	15,81
d4	-75,90	-62,11		-13,79	12,9
d5	-80,45	-58,78		-21,67	15,81
d6	-85,30	-55,75		-29,55	12,38
d7	-81,55	-60,52		-21,03	10,74
d8	-70,55	-57,01		-13,54	10,12
d9	-67,80	-54,03		-13,77	10,15
d10	-80,00	-65,10		-14,9	9,13
d11	-79,20	-55,43		-23,77	8,44
d12	-73,50	-52,40		-21,1	8,4
e1	-84,95	-63,44		-21,51	15,02
e2	-76,85	-57,77		-19,08	15,6
e3	-79,85	-67,30		-12,55	16,6
e4	-80,50	-61,47		-19,03	11,98
e5	-89,50	-61,98		-27,52	12,71
e6	-75,90	-65,75		-10,15	13,87
e7	-62,55	-55,22		-7,33	8,24
e8	-90,65	-62,31		-28,34	9,34
e9	-79,15	-72,64		-6,51	10,88
f1	-90,90	-74,16		-16,74	18,31
f2	-87,40	-74,65		-12,75	19,37
f3	-87,55	-84,14		-3,41	20,51
f4	-87,95	-71,82		-16,13	14
f5	-91,40	-81,82		-9,58	15,7
f6	-87,50	-73,77		-13,73	17,51
f7	-92,65	-79,42		-13,23	11,9
f8	-87,85	-65,77		-22,08	13,91
f9	-88,30	-75,94		-12,36	15,92
f10	-83,85	-74,39		-9,46	9,43
f11	-83,85	-91,39		7,54	11,87
f12	-92,90	-83,94		-8,96	14,19
g1	-72,25	-67,53		-4,72	17,04
g2	-73,35	-64,95		-8,4	12,65
g3	-57,2	-61,66		4,46	8,67
g4	-54,50	-46,81		-7,69	6,24
g5	-75,40	-53,58		-21,82	6,82
g6	-54,05	-41,30		-12,75	3,31

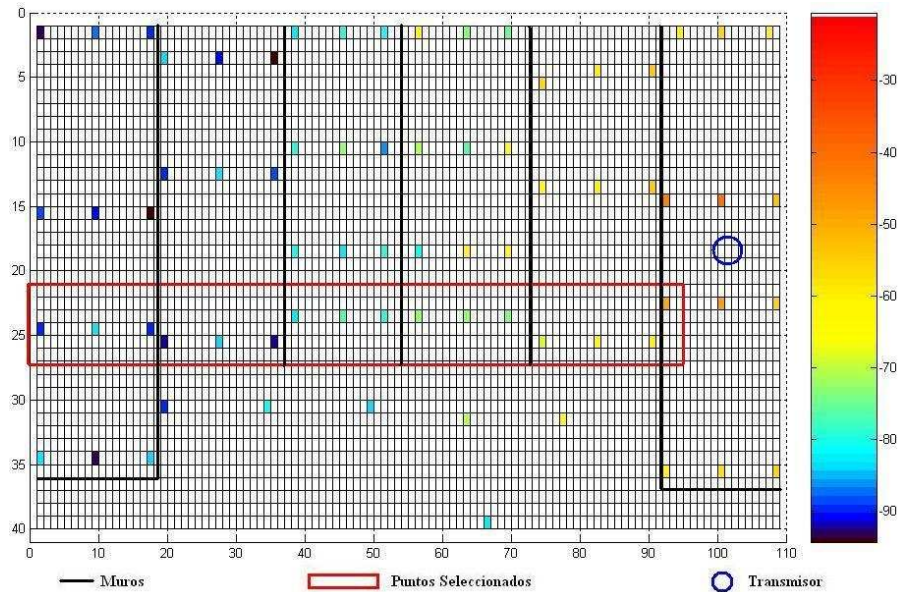
Fuente: Autor

2.2.2.3 Comparación entre resultados INDOOR – OUTDOOR

De los puntos evaluados se seleccionaron 16 que estaban ubicados sobre la misma línea para comparar los resultados con las gráficas obtenidas para escenarios outdoor.

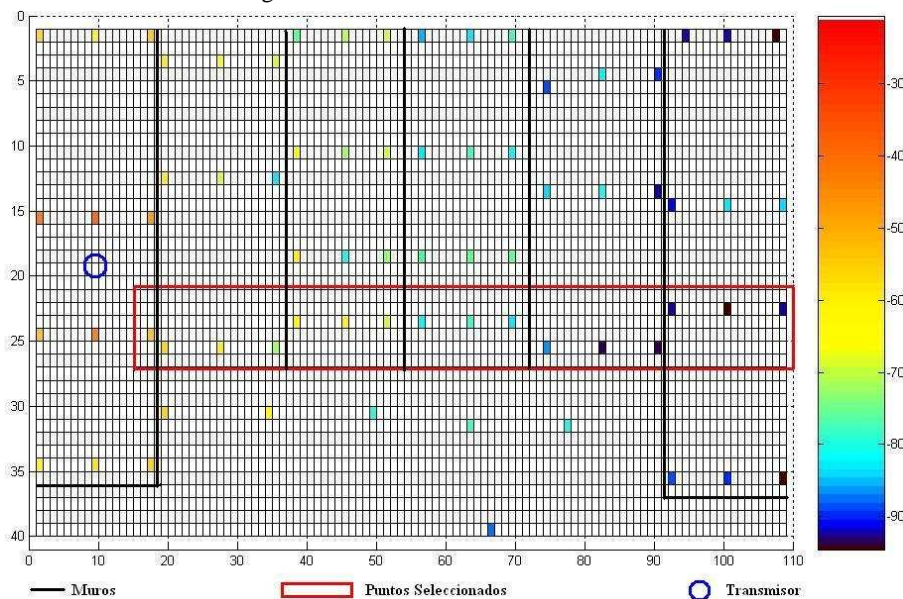
Como la transmisión desde la sala 201 se realizó con un *Tmote sky* y la de la sala 205 con un *Telos B*, se seleccionaron los puntos remarcados en las figuras 36 y 37.

Figura 36. Puntos seleccionados – Tx201



Fuente: Autor

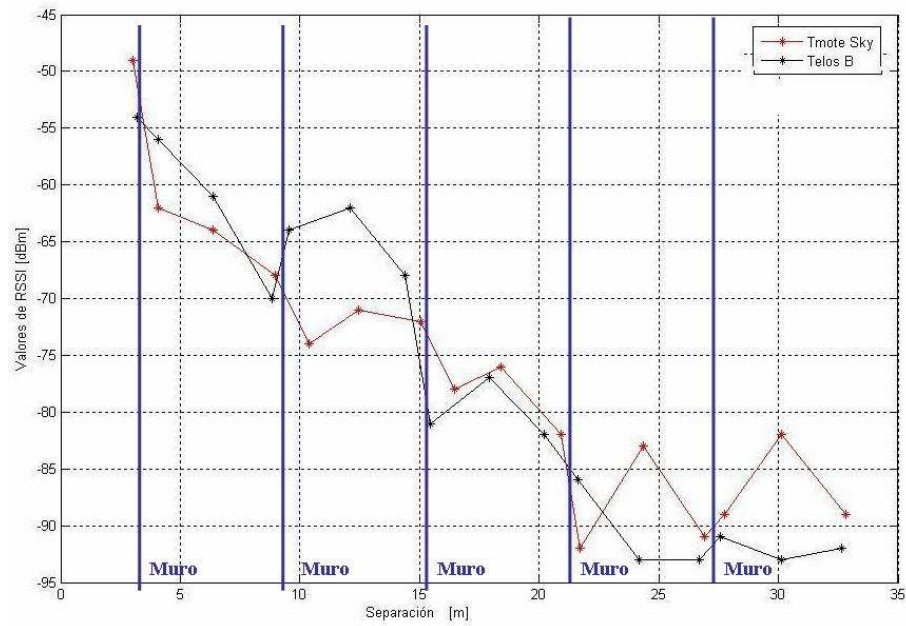
Figura 37. Puntos seleccionados – Tx205



Fuente: Autor

Las gráficas obtenidas mediante Matlab se muestran en la figura 38. En ella se indica la cantidad de muros atravesados y la distancia a la que se ubican.

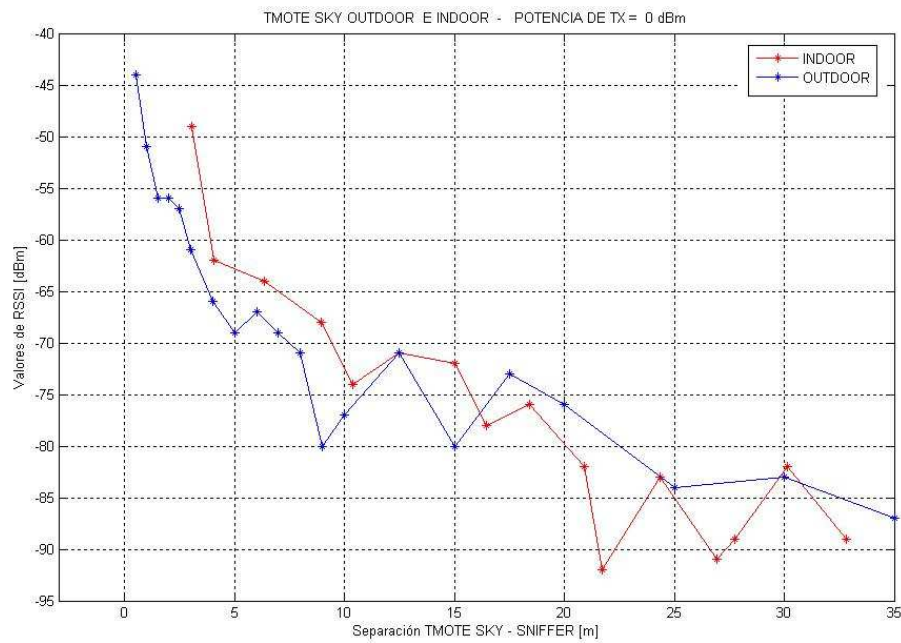
Figura 38. *Telos B* y *Tmote Sky* indoor



Fuente: Autor

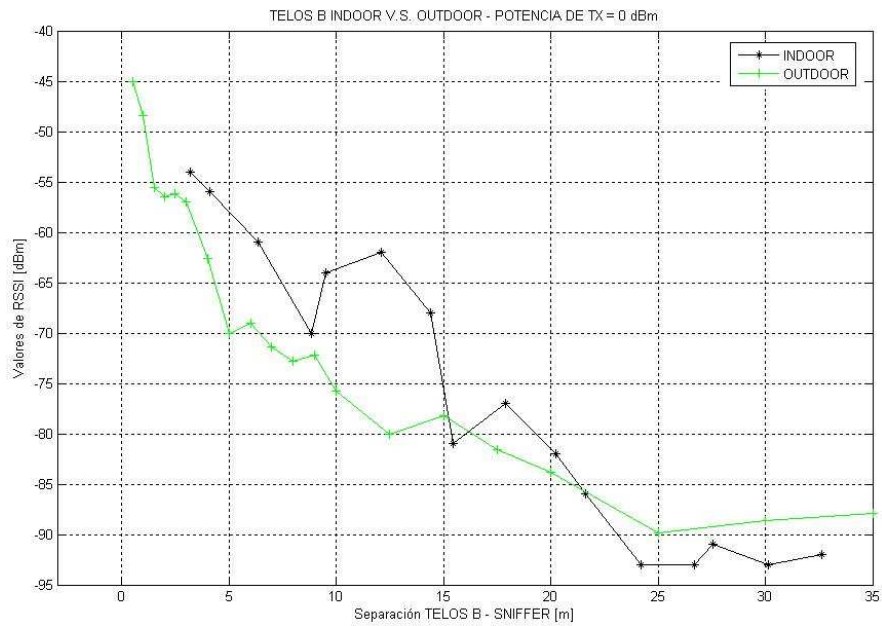
En las figuras 39 y 40 se hace la comparación de las curvas de potencia indoor contra Outdoor para ambos *notes*.

Figura 39. *Tmote Sky* indoor y outdoor



Fuente: Autor

Figura 40. *Telos B* indoor y outdoor



Fuente: Autor

De las anteriores tres figuras se puede concluir lo siguiente:

- En la figura 38 se observa que el mote presenta una caída de potencia considerable entre dos puntos separados por un muro. Este valor es menor para el *Telos B*.
- Los diferentes fenómenos de reflexión, difracción y dispersión producen picos más altos en la curvas indoor que los que se presentaron en outdoor donde estos fenómenos no son tan marcados debido a la ausencia de obstáculos.

Capítulo 3

Parámetros Indicadores de Calidad del Servicio (LQI - PER - PRR)

3.1 Conceptos Generales

3.1.1 Indicador de calidad del enlace – LQI

El indicador de calidad del enlace mide el nivel de potencia de la señal y el valor de la relación señal a ruido de cada paquete recibido. Cuando se combinan estos dos parámetros, se puede determinar cuando un paquete no es exitoso debido a un bajo nivel de señal o a un alto nivel de la potencia del ruido [23].

3.1.2 Tasa de error de paquetes - PER y Porcentaje de paquetes recibidos – PRR.

El PER es el valor porcentual de los paquetes que no son recibidos correctamente con respecto a los paquetes enviados. Es una medida derivada de la tasa de error de bits (BER) y varía de acuerdo al tamaño del paquete.

En teoría se espera que la PER sea muy baja debido al esquema de modulación O-QPSK con DSSS usado por IEEE 802.15.4/ZigBee. Su valor debe ser prácticamente cero mientras exista línea de vista (FLOS) entre emisor y receptor (outdoor) y debe ir incrementándose a medida que se alcanza una distancia de separación en la que es imposible establecer una comunicación o en la que se supera el límite de sensibilidad [19].

Por esta razón se decidió realizar el análisis en un escenario indoor, en donde se espera que las puertas y muros generen diferentes fenómenos de propagación y hagan variar en mayor medida los valores LQI y PER

El procedimiento matemático para calcular el BER, según la especificación IEEE 802.15.4, se realiza a partir de la relación señal a ruido SINR (Signal Input Noise Ratio) del canal, como se expresa en la ecuación 3.1 [23].

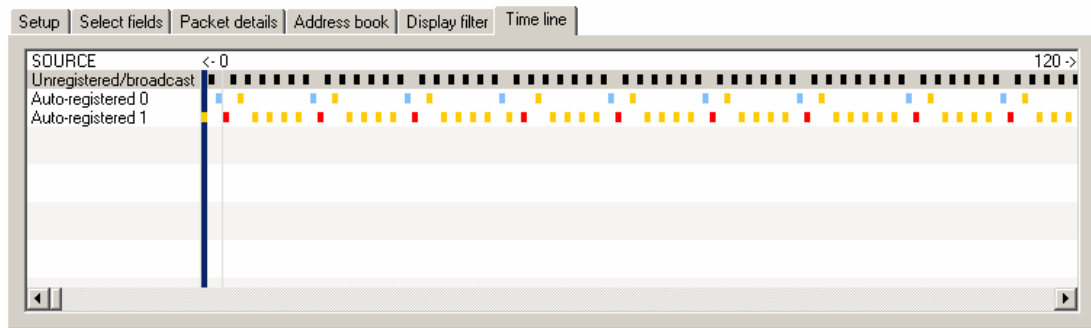
$$BER = \frac{8}{15} \times \frac{1}{16} \times \sum_{k=2}^{16} -1^k \binom{16}{k} e^{\left(20 \times SINR \times \left(\frac{1}{k} - 1\right)\right)} \quad (3.1)$$

3.2 Configuración de las pruebas

Actualmente no se cuenta con un analizador de espectros para la banda de los 2.4 GHz que permita calcular la potencia de la señal y la potencia del ruido en un canal 802.15.4. Por tal motivo se usó el software de Chipcon para lograr una aproximación a los valores LQI y PER en lugar de desarrollar los cálculos de la ecuación 3.1.

La figura 41 muestra el campo *Time line* de la interfaz de usuario del software Chipcon Packet Sniffer CC2420. En este campo se ordenan horizontalmente los paquetes recibidos de acuerdo al tiempo en que van llegando. El software calcula el LQI para cada paquete y lo muestra en su interfaz, seleccionando la opción *LQI* en el campo *Select fields*.

Figura 41. Campo Time Line



Fuente: [17]

Se seleccionaron tres niveles de potencia de transmisión (Anexo D): máxima (0 dBm), mínima (-25 dBm) y una intermedia (-10 dBm). El escenario, al igual que las pruebas de cobertura, fue el segundo piso del edificio de eléctrica antigua, ubicando el sniffer receptor en un mismo lugar para las los tres niveles de potencia y desplazando el *mote* transmisor sobre diferentes puntos de medición (ver figuras 42, 43 y 44).

Para cada nivel de potencia se programó el *mote* con la aplicación *CntToLedsAndRfm* variando la frecuencia de transmisión de manera que se transmitiese un paquete cada dos segundos. Con el uso de un cronómetro se daba inicio a la captura durante dos minutos. Durante este intervalo el *mote* transmitía aproximadamente 60 paquetes. El objetivo de la prueba era contabilizar los paquetes captados por el sniffer durante dos minutos para establecer la relación entre los paquetes que con toda seguridad estaban siendo transmitidos y los paquetes que se recibían, de modo que:

$$PRR(\text{aprox}) = \frac{\text{Paquetes Capturados}}{\text{Paquetes Transmitidos}} \quad (3.2)$$

La ecuación anterior es una aproximación del porcentaje de recepción de paquetes (Packet Reception Ratio).

El porcentaje de error de paquetes (PER) aproximado es:

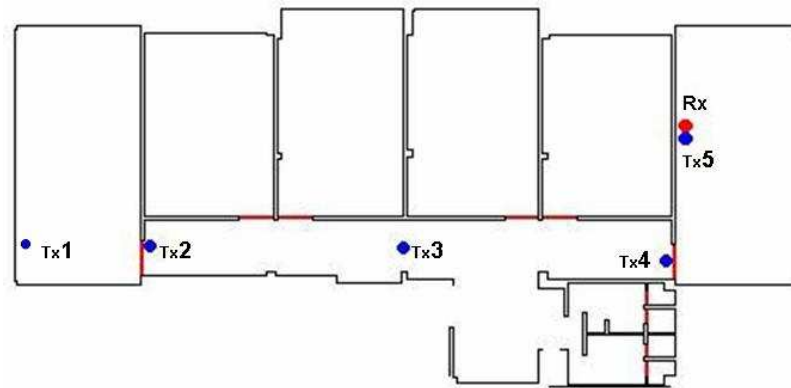
$$PER(aprox) = 1 - \frac{PaquetesCapturados}{PaquetesTransmitidos} \quad (3.3)$$

Es decir,

$$PER = 1 - PRR \quad (3.4)$$

Las configuraciones usadas para las mediciones se ilustran en las tres figuras siguientes:

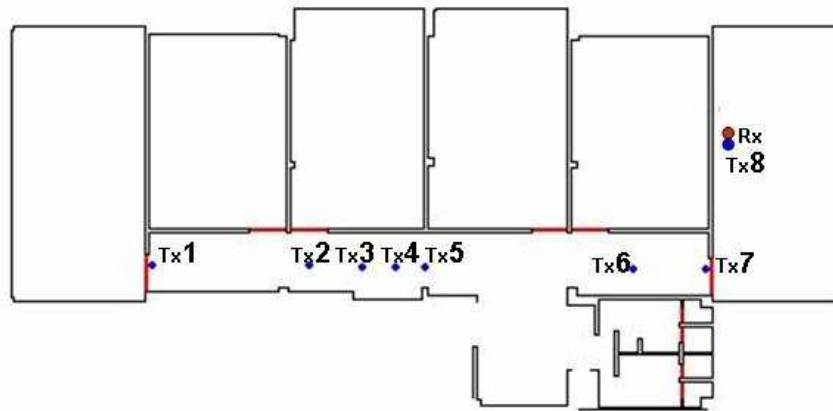
Figura 42. Configuración Máxima Potencia



	Sniffer
	Mote Transmisor
Aplicación Mote	CntToLedsAndRfm
Potencia de Tx	0 dBm
Frecuencia de Tx	1 paquete cada 2 segundos

Fuente: Autor

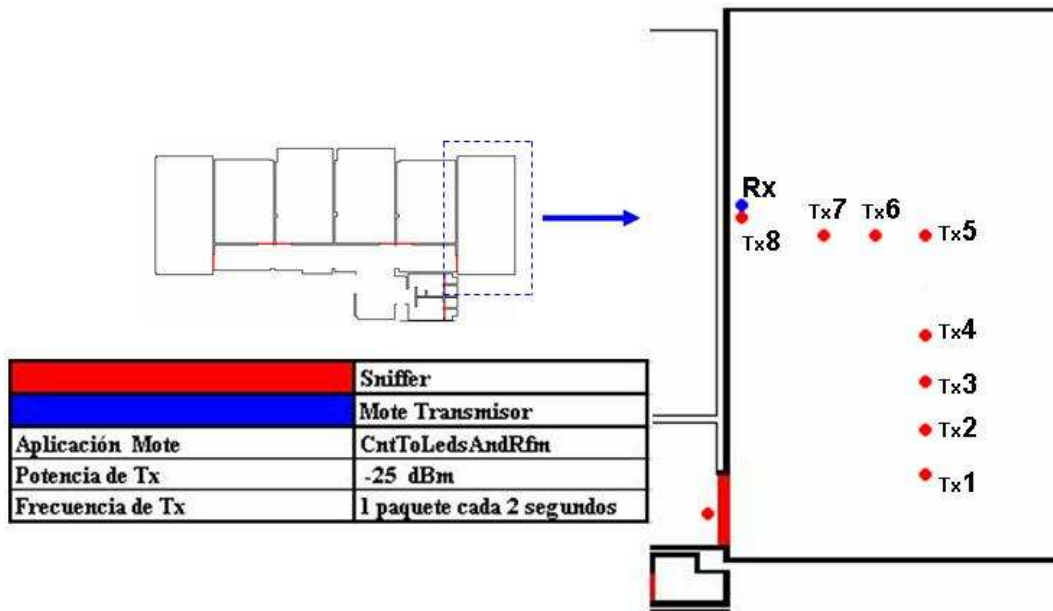
Figura 43. Configuración Potencia Intermedia



	Sniffer
	Mote Transmisor
Aplicación Mote	CntToLedsAndRfm
Potencia de Tx	-10 dBm
Frecuencia de Tx	1 paquete cada 2 segundos

Fuente: Autor

Figura 44. Configuración Mínima Potencia



	Sniffer
	Mote Transmisor
Aplicación Mote	CntToLedsAndRfm
Potencia de Tx	-25 dBm
Frecuencia de Tx	1 paquete cada 2 segundos

Fuente: Autor

3.3 Resultados Obtenidos

De acuerdo a la especificación IEEE 802.15.4 [23], la sensibilidad del receptor se define como el umbral de potencia recibida en dBm para el cual PER<1% [23].

La siguiente tabla esta tomada de la hoja de datos del radio-transceiver CC2420, en donde se especifican los valores mínimo y nominal de su sensibilidad: -90 y -94 dBm, los cuales sobrepasan el valor establecido por el estándar, es decir -85 dBm [23].

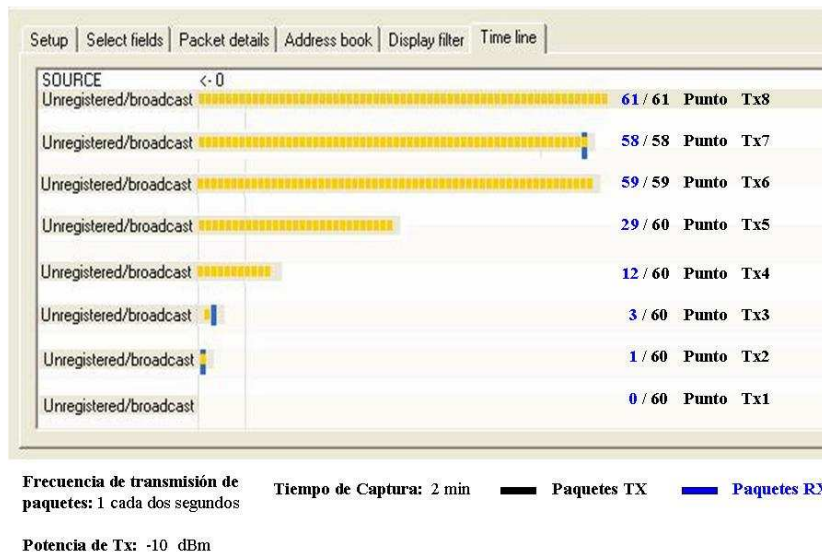
Tabla 10. Sensibilidad del CC2420

	MIN	NOM	MAX	UNIT
Supply voltage during radio operation (Vreg on)	2.1		3.6	V
Operating free air temperature	-40		85	°C
RF frequency range	2400		2483.5	MHz
Transmit bit rate	250		250	kbps
Nominal output power	-3	0		dBm
Programmable output power range		40		dBm
Receiver sensitivity	-90	-94		dBm
Current consumption: Radio transmitting at 0 dBm		17.4		mA
Current consumption: Radio receiving		19.7		mA
Current consumption: Radio on, Oscillator on		365		µA
Current consumption: Idle mode, Oscillator off		20		µA
Current consumption: Power Down mode, Vreg off			1	µA
Voltage regulator current draw	13	20	29	µA
Radio oscillator startup time		580	860	µs

Fuente: [17]

La figura 45 muestra el porcentaje de paquetes recibidos para cada punto, registrados en el campo *Time line*¹¹ al transmitir a -10 dBm. Resultados similares se obtuvieron para las otras dos potencias de transmisión.

Figura 45. Paquetes Recibidos por el Sniffer para P = -10 dBm



Fuente: Autor

¹¹ La imagen es una superposición. En el campo time line solo se puede observar la captura para un punto a la vez cuando existe un solo transmisor.

La tabla 11 contiene toda la información acerca de los resultados de las mediciones, incluyendo los valores promedio de RSSI y LQI para cada punto, la distancia entre el *mote* y sniffer, así como la cantidad de paquetes enviados y recibidos.

Tabla 11 Resultados de las Pruebas de Calidad del Enlace

POTENCIA DE TRANSMISION	PARAMETRO	PUNTOS DE TRANSMISION							
		tx1	tx2	tx3	tx4	tx5	tx6	tx7	tx8
0 dBm	Distancia [m]*	30,91	25,28	14,31	7	0,2			
	Paquetes Enviados **	60	60	62	63	61			
	Paquetes Recibidos	26	49	62	63	61			
	RSSI Promedio [dBm]	-96,4	-94,1	-92,9	-84,7	-43,9			
	LQI Promedio	0	0	0	2,73	159,7			
-10 dBm	Distancia [m]*	25,28	18,89	16,9	15,37	14,31	7,64	7	0,2
	Paquetes Enviados **	60	60	60	60	60	59	58	61
	Paquetes Recibidos	0	1	3	12	29	59	58	61
	RSSI Promedio [dBm]	-99,5	-99	-96,7	-95,4	-95,1	-91,2	-89,4	-57
	LQI Promedio	0	0	0	0	0	0	0	104
-25 dBm	Distancia [m]*	6,63	5,7	4,8	3,9	2,97	1,84	0,7	0,2
	Paquetes Enviados **	60	60	60	66	67	64	64	61
	Paquetes Recibidos	3	24	60	66	67	64	64	61
	RSSI Promedio [dBm]	-95	-94	-93,38	-91,11	-92,8	-90,6	-92	-72,92
	LQI Promedio	0	0	0	0	0	0	0	40,32

* Línea recta entre Transmisor (MOTE) y Receptor (SNIFFER)

** Frecuencia de Tx = 1 paquete cada 2 segundos

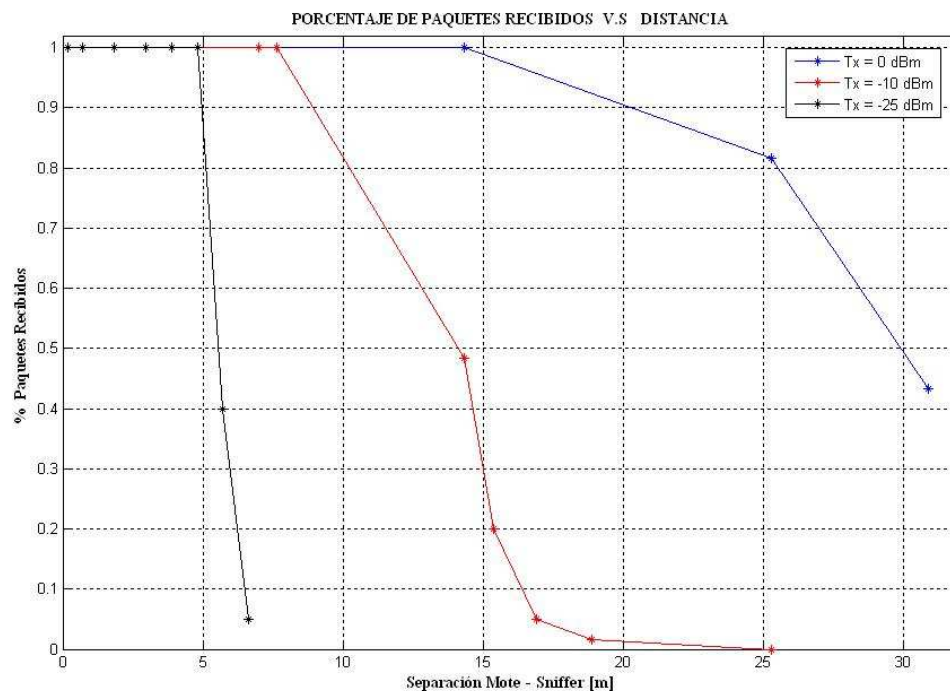
Fuente: Autor

Las casillas marcadas con naranja, corresponden a los niveles de potencia mínimos para los cuales se reciben la totalidad de los paquetes enviados. Las casillas marcadas con verde indican los valores RSSI para los cuales LQI se vuelve cero. De la tabla 11 se generan dos conclusiones importantes:

- Los valores para los cuales PER=0 o PER<1% se encuentran dentro de los valores mínimo y nominal de sensibilidad establecidos por el fabricante del CC2420. Sin embargo para las transmisiones de máxima y mínima potencia se tiene un PER de $(1 - 49/60) = 18.33\%$ y de $(1 - 24/60) = 60\%$ para unos valores de RSSI de -94.1 y -94.00 dBm respectivamente (ver figura 48). Esto indica que el límite de sensibilidad real se encuentra un par de dBm arriba de -94, entre -92 y -93 dBm aproximadamente.
- A pesar de que se siguen recibiendo la totalidad de los paquetes enviados, el LQI se hace cero cuando se supera el límite de sensibilidad establecido por el estándar IEEE 802.15.4 para la banda de los 2.4 GHz, es decir -85 dBm.

El análisis y procesamiento de los datos contenidos en la tabla 11 produjo las siguientes gráficas que sirven para tener una idea mas clara de lo que se ha dicho hasta el momento.

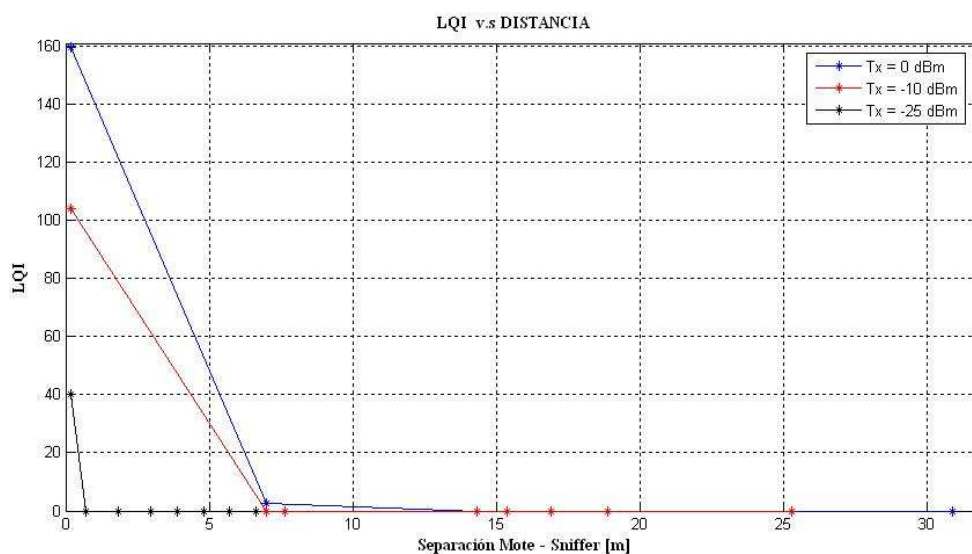
Figura 46. PRR versus distancia entre emisor y receptor en escenario indoor



Fuente: Autor

La figura 46 muestra que, transmitiendo a la máxima potencia, se puede alcanzar una distancia máxima de 20 metros entre emisor y receptor manteniendo un PER<1%. Para una potencia de transmisión de -10 dBm y -25 dBm se alcanza un máximo de separación de 8.5m y 5m respectivamente¹².

Figura 47. LQI versus distancia entre emisor y receptor en escenario indoor

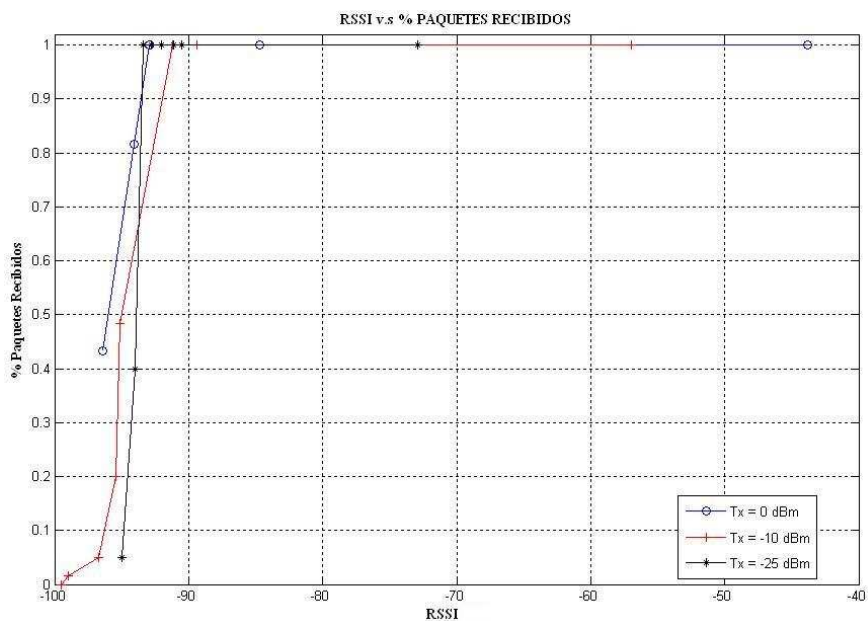


Fuente: Autor

¹² Estos resultados no deben ser interpretados como regla general, se dan para este escenario en particular.

En la figura 47 se observa que el valor de LQI decrece muy rápidamente y antes de los 4 metros de separación ya ha experimentado una caída del 50% con relación a una distancia de separación de 20 cm. Al transmitir a la mínima potencia el LQI es cero antes de que se alcance un metro de separación.

Figura 48. RSSI versus PRR

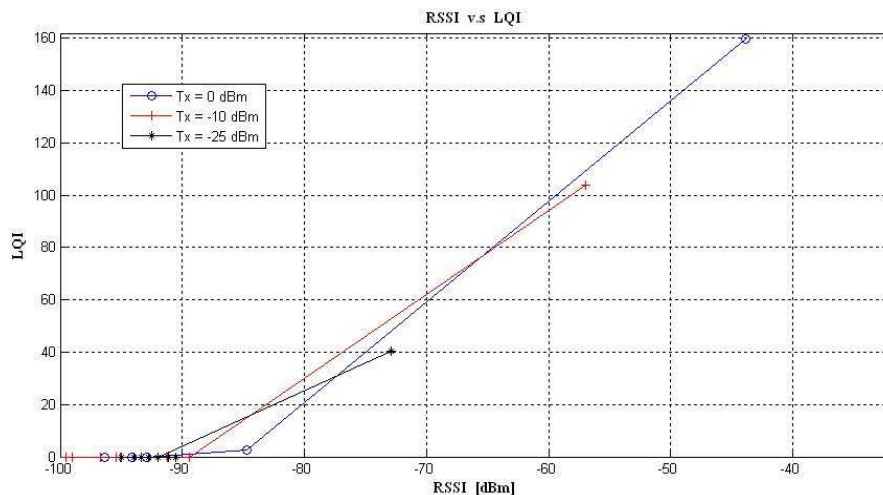


Fuente: Autor

En la figura 48 se observa claramente el umbral de potencia que garantiza la recepción de al menos el 90% de los paquetes enviados, tal como se mencionó en las conclusiones de la tabla de resultados.

Finalmente la figura 49 muestra que el LQI es cero al superar los -85 dBm que establece el estándar.

Figura 49. RSSI versus LQI



Fuente: Autor

Capítulo 4

Latencia

La latencia está definida como el tiempo transcurrido desde el envío de una orden en el *mote* emisor hasta su ejecución por parte del *mote* receptor.

En varias aplicaciones de redes de sensores inalámbricos, la evaluación de este parámetro es determinante para medir el tiempo que tardan los datos en ir desde su origen hasta su destino. Un caso particular puede ser una red de monitoreo en tiempo real de una variable que presenta un cambio muy rápido; si se tiene en cuenta el número de saltos que deben transitar los datos hasta llegar a un nodo administrador, una latencia elevada puede producir pérdidas de información importantes.

Cada paquete en este sistema de comunicación debe recorrer la pila de capas IEEE 802.15.4/ZigBee antes de realizar la transmisión vía radio. La señal transmitida es captada por el radio del nodo receptor y luego debe recorrer el mismo camino en sentido contrario hasta llegar a la capa apropiada en donde se ejecuta la operación.

4.1 Diseño de las pruebas

4.1.1 Esquema General

Se determinó que la mejor manera de observar estas diferencias de tiempos era registrar los momentos justos en que la instrucción es transmitida por el emisor y ejecutada por el receptor. El sistema operativo TinyOS 1.1 tiene dos aplicaciones ideales para esta prueba. Ver Anexo C.

- *TOSBase*: Se encarga de comunicar el puerto USB del PC con el radio del *mote* que está conectado a él.
- *SimpleCmd*: Procesa comandos enviados desde el PC a través del *mote* que actúa como estación base.

TOSBase se programa en el *mote* que se conecta al PC operando como gateway y estableciendo una comunicación bidireccional a través del puerto USB entre la consola de operaciones de TinyOS (*Cygwin*) y los demás *mot*es de la red. Los demás *mot*es de la red se programan con *SimpleCmd*, la cuál responde a las siguientes instrucciones enviadas desde el PC:

- *led_on*: Enciende el LED que representa el bit más significativo (azul)
- *led_off*: Apaga el LED que representa el bit más significativo (azul)

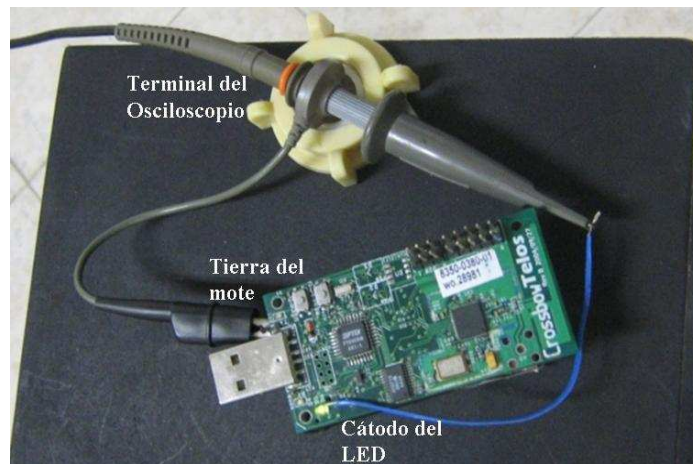
Cuando el *mote* receptor enciende o apaga su LED Azul (D6), se produce un cambio en el nivel de tensión que puede ser medido. En el gateway, se ilumina el LED rojo (D4) cuando se transmite un mensaje desde el puerto USB hacia el radio. Este cambio de voltaje en los terminales también puede ser registrado (figura 50).

La descripción detallada del proceso de programación de los *motest* se encuentra en el Anexo B.

Para el monitoreo de las señales se usó un osciloscopio digital TEKTRONIX TDS5020C.

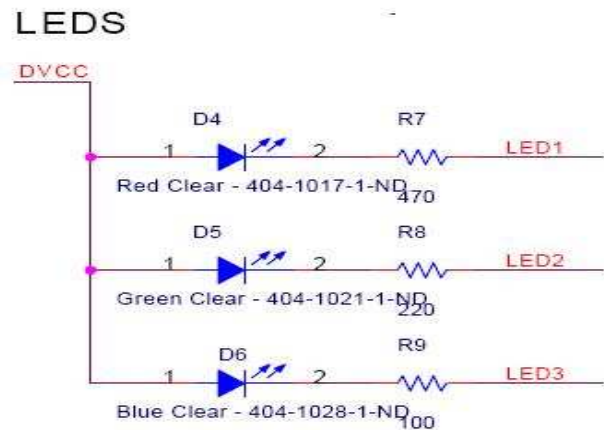
Las puntas del osciloscopio se conectan a los cátodos de los LEDs. Si el emisor es el gateway, la entrada número uno del osciloscopio se conecta al LED D4; si el emisor es un nodo retransmisor, la entrada se conecta al LED D6. Para cualquier receptor la entrada número 2 del osciloscopio se conecta al LED D6. (figura 51) [24]. El diagrama general de las pruebas de latencia se muestra en la figura 52.

Figura 50. Registro del voltaje en el cátodo del LED



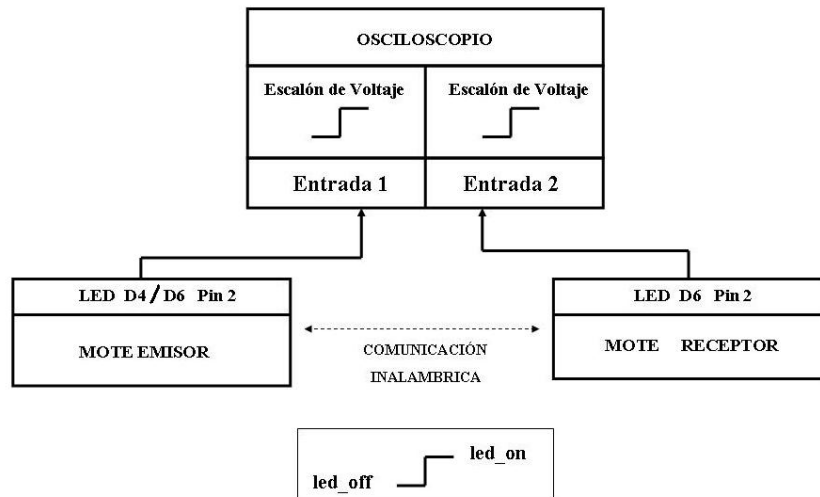
Fuente. [Autor]

Figura 51. Puntos de los *motes* donde se mide el escalón de voltaje.



Fuente: [24]

Figura 52. Diagrama General de las Pruebas de Latencia



Fuente: Autor

La latencia registrada en estas pruebas no es producida únicamente por el tiempo transcurrido entre la transmisión y la recepción de un paquete. Los sistemas inalámbricos como ZigBee tienen una pila de software donde se procesa la instrucción antes de enviarla al chip radio-transceiver. Después de realizar el proceso de modulación y de ser transmitida por la antena, la información es enviada como una señal de RF y al ser recibida por el destinatario es enviada a la pila de software que procesa la información y la envía a la capa apropiada. El retardo real no puede ser calculado mediante software. Debe ser medido a nivel de hardware ya que la instrucción se ejecuta a nivel de la capa de aplicación, enviando señales de encendido y apagado a un dispositivo periférico [19].

La figura 53 muestra un diagrama del proceso que se desarrolla durante el tiempo de latencia.

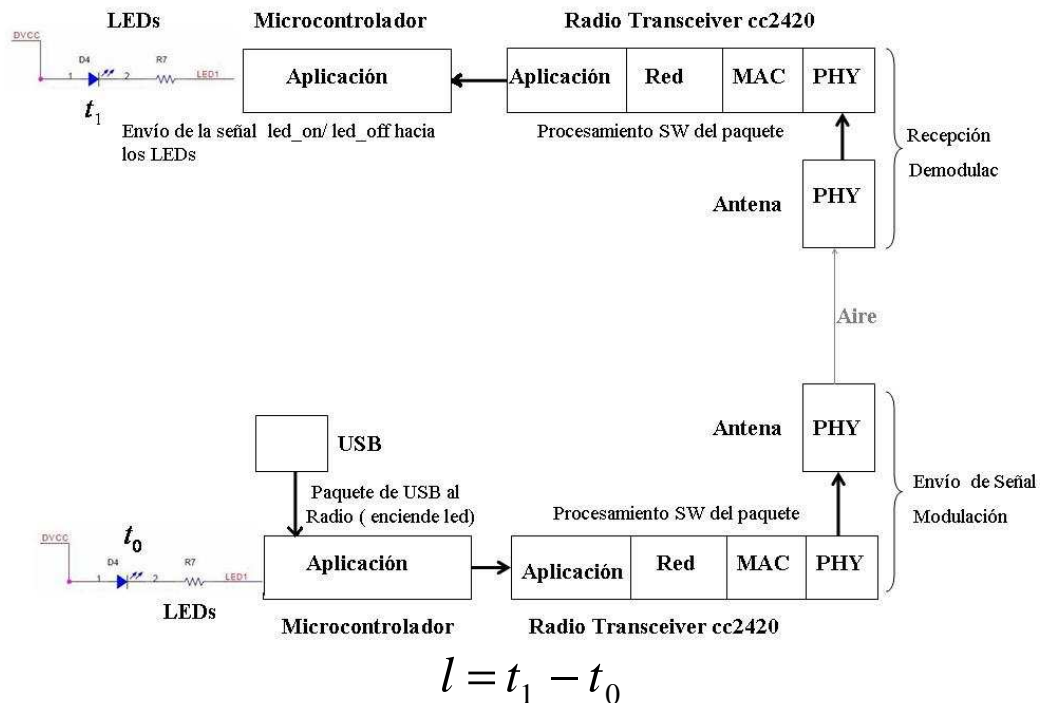
4.1.2 Tipos de Pruebas

Con el fin de realizar una caracterización completa, se eligieron tres pruebas diferentes para registrar el incremento de la latencia a medida que se aumenta el número de *motes* en una red. Como escenario de pruebas se usó el segundo piso del edificio de eléctrica antigua.

4.1.2.1 Prueba 1. Transmisión P2P entre emisor y receptor. Sin saltos

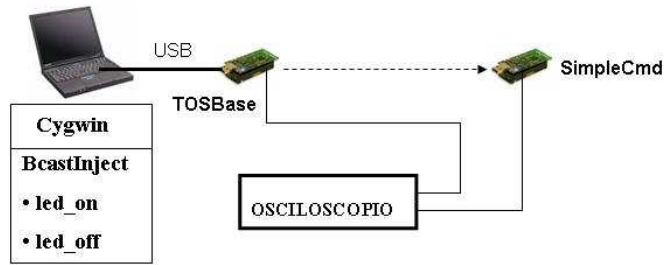
Se registra el tiempo que tarda una instrucción desde que la envía el *mote* base, hasta que es ejecutada por un *mote* receptor. La configuración se observa en la figura 54.

Figura 53. Proceso generador de latencia



Fuente: Autor

Figura 54. Latencia entre un emisor y un receptor

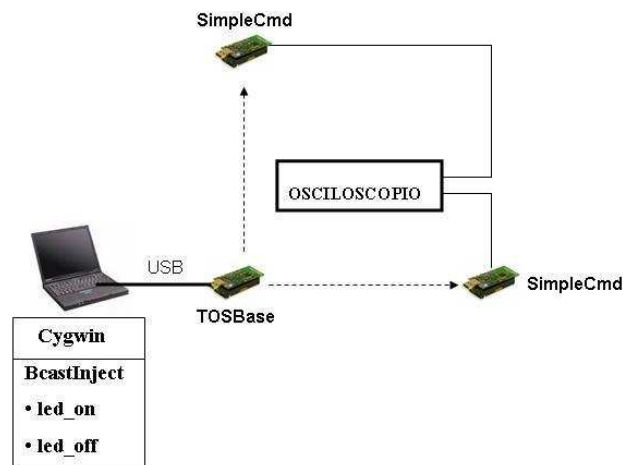


Fuente: Autor

4.1.2.2 Prueba 2. Comparación entre dos enlaces P2P sin saltos. Un emisor y dos receptores

Los dos receptores se ubican a la misma distancia del emisor y se mide la diferencia de tiempo que tardan en encender sus LEDs. Se espera que sea cero porque ambos tienen enlace directo con el *mote* base y reciben la instrucción al mismo tiempo. La configuración se muestra en la figura 55.

Figura 55. Comparación de latencia entre dos receptores (un emisor)



Fuente: Autor

4.1.2.3 Prueba 3. Latencia entre dos saltos consecutivos

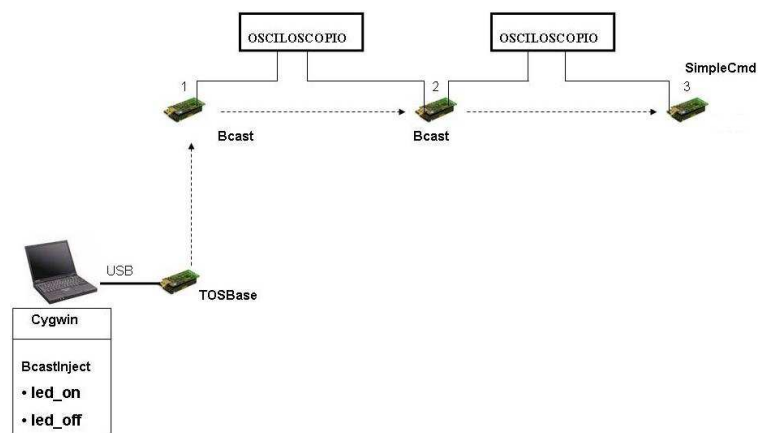
La aplicación *SimpleCmd* tiene dos opciones de configuración:

- SimpleCmd: El *mote* actúa como dispositivo final, recibe y ejecuta las instrucciones
- Bcast: El *mote* hace lo mismo que SimpleCmd, pero además retransmite la instrucción.

La prueba consiste en sumar dos *mot*es más a la configuración de la prueba 1 (figura 54). En la figura 56 se observa que los *mot*es 1 y 2 están programados en modo Bcast, es decir, ejecutan la instrucción y la retransmiten al siguiente salto. El *mote* 3 está programado en modo SimpleCmd, es decir recibe la instrucción del *mote* 2 y la ejecuta sin retransmitirla.

Primero se mide la latencia entre el salto 1 y el salto 2 y después entre el salto 2 y el salto 3. Se espera que los valores sean iguales ya que la distancia de separación es igual.

Figura 56. Latencia entre saltos consecutivos



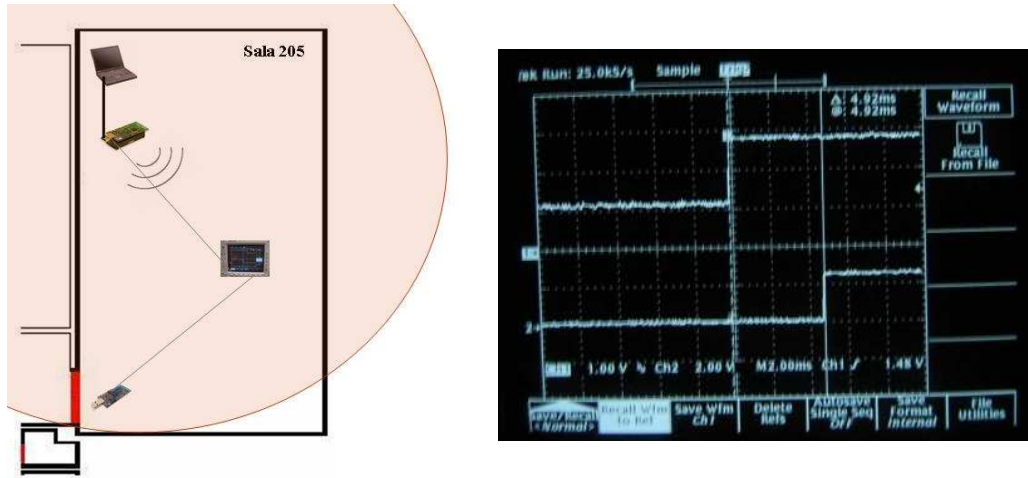
Fuente: Autor

4.2 Resultados de las pruebas

Para que los resultados fueran válidos, se debía garantizar que cada *mote* recibiera la instrucción exclusivamente del *mote* anterior, para esto fue necesario ubicarlos a una distancia de separación como la que se muestra en las figuras 57 a 60. Al lado de cada una se muestra una de las capturas registradas para la prueba. Las regiones sombreadas de las figuras de la izquierda representan el área de cobertura de cada *mote*.

4.2.4 Prueba 1

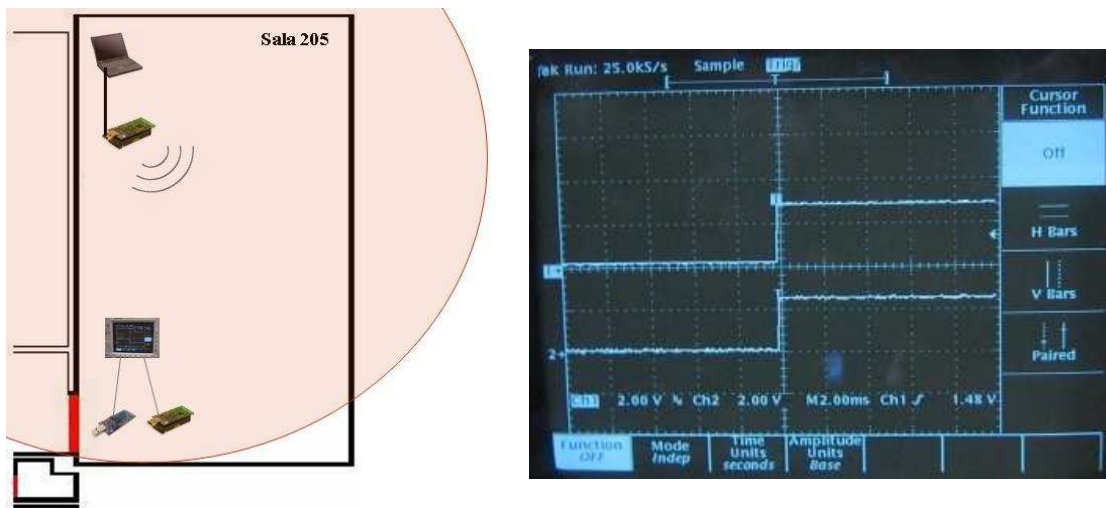
Figura 57. Resultado Prueba 1



Fuente: Autor

4.2.2 Prueba 2

Figura 58. Resultado Prueba 2

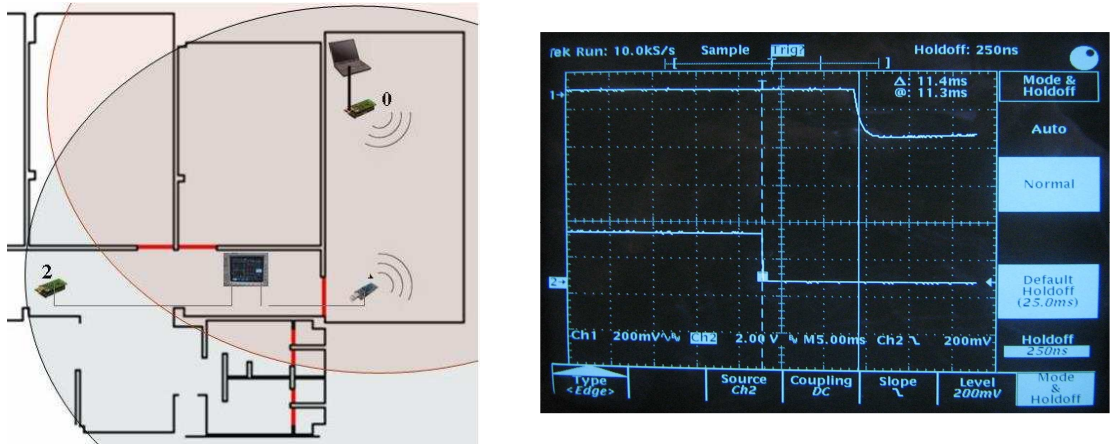


Fuente: Autor

4.2.3 Prueba 3

4.2.3.1 Hop1- Hop2

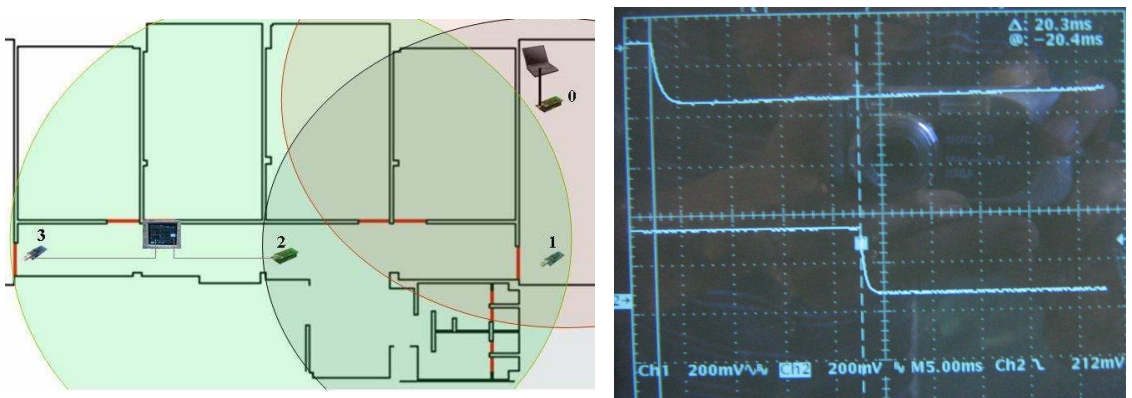
Figura 59. Latencia entre saltos consecutivos



Fuente: Autor

4.2.3.2 Hop2 - Hop3

Figura 60. Latencia entre saltos consecutivos



Fuente: Autor

Los resultados completos y sus promedios están consignados en la tabla 12.

Tabla 12. Resultados totales de la prueba de latencia

PRUEBA	CALCULO DE LATENCIA						
1. Gateway - Hop1 (SimpleCmd)	Captura	1	2	3	4	5	Promedio
	latencia [ms]	4,92	5,44	5,48	5,45	5,42	5,342
2. Hop1 (SimpleCmd) - Hop2 (SimpleCmd)	Captura	1	2	3	4	5	Promedio
	latencia [ms]	0	0	0	0	0	0
3a. Hop1 (Broadcast) - Hop2 (Broadcast)	Captura	1	2	3	4	5	Promedio
	latencia [ms]	11,4	8,4	8,9	8,9	8,8	9,28
3b. Hop2 (Broadcast) - Hop3 (SimpleCmd)	Captura	1	2	3	4	5	Promedio
	latencia [ms]	19,8	20,3	21,2	20,2	21,3	20,56

Fuente: Autor

De los resultados se generaron las siguientes observaciones:

- En la prueba 2 los resultados se dieron como se esperaba, la latencia es igual para ambos *notes*.
- La latencia del enlace gateway-nodo0 es diferente a la del enlace nodo1–nodo2 y nodo2-nodo3 porque en el primero los dos *notes* realizan tareas diferentes.
- Se esperaba que la latencia entre saltos consecutivos fuese igual para el enlace nodo1-nodo2 y el enlace nodo2-nodo3, sin embargo la latencia de este último fue mas del doble. No hay conclusión acerca de este hecho. Se recomienda para próximos proyectos relacionados con el tema, repetir el mismo procedimiento para un mayor número de nodos y observar si se repite esta situación.

Capítulo 5

Consumo de Energía

El manejo del consumo de energía es un tema crítico en redes de sensores inalámbricos. Si no se hace adecuadamente, la vida útil de las baterías de un nodo de red se puede reducir a solo algunas semanas o incluso días, dependiendo del tipo de aplicación que esté ejecutando y el tipo de baterías que usa. Con un manejo apropiado del consumo de energía, el mismo nodo, ejecutando el mismo programa, puede operar durante meses e incluso años con el mismo par de baterías [25].

El consumo de energía de un *mote* es una característica que depende del microcontrolador, de la aplicación y del estado activo o inactivo del radio Transceiver, y en menor medida de los LEDs, el módulo de sensores y el sistema de almacenamiento de información.

En esta práctica se registran los valores experimentales de la corriente consumida por los *motes* cuando se usa el radio para recibir y transmitir información, cuando usa sus LEDs para mostrar información y cuando el microcontrolador realiza algunos cálculos básicos.

Como no es posible medir la corriente para cada bloque por separado (Radio, LEDs, sensores, memoria, microcontrolador), se programaron los *motes* con diferentes aplicaciones que realizan algunas de las acciones mencionadas. Al medir la corriente total que el *mote* toma de las baterías se obtiene un valor aproximado del consumo de corriente de cada módulo.

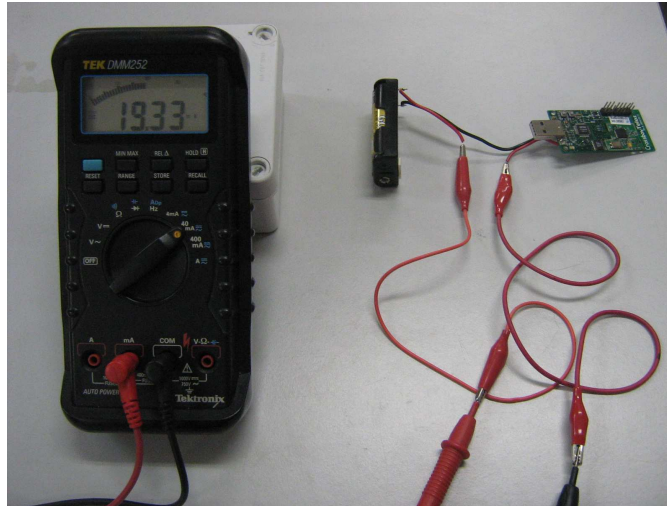
La configuración física de las pruebas consiste en conectar un amperímetro entre las baterías y los terminales de entrada de los *motes* (figura 61).

5.1 Consumo de corriente del Radio Transceiver CC2420 y los LEDs

En la primera prueba se realiza una evaluación de la corriente consumida por el radio Chipcon CC2420 y también de la corriente que se requiere para encender los 3 LEDs representando los ocho números binarios posibles (0-7).

Para este procedimiento se usaron las siguientes tres aplicaciones que se encuentran incorporadas en el software TinyOS (Anexo C).

Figura 61. Configuración física de las pruebas de consumo de energía



Fuente: Autor

- CntToLedsAndRfm: Inicia un contador con una frecuencia de 4Hz y muestra los tres bits menos significativos de los valores en sus LEDs. Envía cada valor del conteo en un paquete a través del radio.
- CntToLeds: Realiza el mismo proceso anterior pero no transmite la información (Radio Off).
- RfmToLeds: Muestra en sus LEDs los tres bits menos significativos del valor contenido en cada paquete que recibe en su módulo de RF.

Inicialmente, los valores de corriente que se registran en el amperímetro cambiaban muy rápidamente y se hacía difícil registrarlos. Esto pasaba porque la aplicación trae predeterminada una frecuencia de operación de 4Hz que incrementa el contador cada 250 ms. Para poder hacer una lectura de los ocho diferentes valores de corriente fue necesario disminuir la frecuencia a 0.167 Hz, cambiando el valor del periodo a 6000 ms en el código de la aplicación. Los detalles de este procedimiento se encuentran en el Anexo F.

Una vez modificada la frecuencia de operación, se programa el *mote* con la aplicación *CntToLedsAndRfm* para registrar la corriente I_1 que es la suma de las corrientes consumidas al iluminar los LEDs y al transmitir el conteo vía radio. Es decir:

$$I_1 = I_2(LEDS) + I_3(RadioTX) \quad (5.1)$$

De manera que $I_3 = I_1 - I_2$ (5.2) es la corriente consumida por el CC2420 al transmitir a 0 dBm.

En la tabla 13 se observa que para cada valor del conteo registrado en los LEDs se tomaron 10 mediciones y se promediaron para obtener los valores definitivos de I_1 .

Tabla 13. Consumo de corriente al ejecutar la aplicación CntToLedsAndRfm

CntToLedsAndRfm (Potencia TX = 0 dBm)													
LEDs			I1 [mA]										
D6	D5	D4	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	Promedio
0	0	0	19,37	19,36	19,37	19,37	19,40	19,40	19,40	19,40	19,40	19,40	19,39
0	0	1	21,13	21,08	21,13	21,13	21,13	21,13	21,13	21,13	21,13	21,13	21,13
0	1	0	21,66	21,66	21,66	21,66	21,66	21,66	21,66	21,66	21,66	21,66	21,66
0	1	1	23,19	23,21	23,22	23,23	23,22	23,23	23,22	23,23	23,23	23,23	23,23
1	0	0	19,63	19,63	19,63	19,63	19,63	19,64	19,63	19,63	19,63	19,64	19,63
1	0	1	21,28	21,29	21,22	21,23	21,23	21,23	21,25	21,24	21,23	21,23	21,24
1	1	0	21,73	21,74	21,74	21,74	21,75	21,75	21,75	21,75	21,74	21,73	21,74
1	1	1	23,26	23,28	23,23	23,25	23,23	23,24	23,24	23,24	23,24	23,24	23,25

Fuente: Autor

Después se programó el *mote* con la aplicación *CntToLeds* para obtener los valores de la corriente que se consume solo al encender los LEDs. Ver tabla 14.

Tabla 14. Consumo de corriente al ejecutar la aplicación CntToLeds

CntToLeds													
LEDs			I2 [mA]										
D6	D5	D4	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Med 6	Med 7	Med 8	Med 9	Med 10	Promedio
0	0	0	0,14	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,19
0	0	1	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60
0	1	0	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60
0	1	1	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80	5,70	5,70	5,80	5,80	5,70	5,77
1	0	0	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90
1	0	1	4,00	4,10	4,10	4,10	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,10	4,04
1	1	0	5,20	5,00	5,00	5,00	4,90	4,90	4,90	4,90	4,90	4,90	4,96
1	1	1	6,90	6,90	6,90	6,90	6,80	6,80	6,70	6,60	6,70	6,80	6,80

Fuente: Autor

Finalmente se realizan las restas para cada valor y se obtiene la corriente consumida por el radio CC2420 al transmitir a su máxima potencia. Ver tabla 15

Tabla 15. Cálculo de la corriente I_3

Corriente consumida por el CC2420 al transmitir a 0 dBm (I_3)						
LEDs			Corrientes [mA]			
D6	D5	D4	I1 Promedio	I2 Promedio	I3 = I1 Prom - I2 Prom	
0	0	0	19,39	0,19	19,2	
0	0	1	21,13	2,60	18,53	
0	1	0	21,66	3,60	18,06	
0	1	1	23,23	5,77	17,43	
1	0	0	19,63	1,90	17,74	
1	0	1	21,24	4,04	17,25	
1	1	0	21,74	4,96	17,75	
1	1	1	23,25	6,80	16,44	
					17,8	I3 Prom

Fuente: Autor

El valor experimental promedio es de 17.8 mA. Comparado con el valor de la hoja de datos del Radio Chipcon CC2420 [17], que es de 17.4 mA, se concluye que la prueba produce resultados muy acertados.

Para calcular el valor de la corriente consumida por el radio cuando opera como receptor, se cambió la aplicación programada en el *mote* a *RfmToLeds*. Un segundo *mote* programado con la aplicación *CntToLedsAndRfm* se encargaba de la transmisión del conteo. Cada vez que el *mote* receptor captaba un paquete, iluminaba sus LEDs de acuerdo al valor que este contenía, generando ocho diferentes lecturas de corriente I_4 que se encuentran consignadas en la tabla 16.

Tabla 16. Consumo de corriente al ejecutar la aplicación RfmToLeds

RfmToLeds													
LEDs			I4 [mA]										
D6	D5	D4	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Med 6	Med 7	Med 8	Med 9	Med 10	Promedio
0	0	0	19,30	19,30	19,30	19,30	19,30	19,30	19,30	19,30	19,30	19,30	19,30
0	0	1	21,40	21,50	21,40	21,40	21,40	21,40	21,40	21,40	21,40	21,40	21,41
0	1	0	22,30	22,30	22,30	22,30	22,30	22,30	22,30	22,30	22,30	22,30	22,30
0	1	1	24,30	24,30	24,30	24,30	24,30	24,30	24,30	24,30	24,30	24,30	24,30
1	0	0	20,30	20,30	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40	20,30	20,37
1	0	1	22,40	22,40	22,40	22,40	22,40	22,40	22,40	22,40	22,40	22,40	22,40
1	1	0	23,20	23,20	23,20	23,20	23,20	23,20	23,20	23,20	23,20	23,20	23,20
1	1	1	25,10	25,10	25,10	25,10	25,10	25,10	25,10	25,10	25,10	25,10	25,10

Fuente: Autor

De la misma forma como se calculó la corriente I_3 , la corriente I_5 que consume el CC2420 al recibir paquetes se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$I_4 = I_2(LEDS) + I_5(RadioRX) \quad (5.3)$$

De (5.3) se obtiene: $I_5 = I_4 - I_2$ (5.4)

Tabla 17. Cálculo de la corriente I_5

Corriente consumida por el radio CC2420 al operar como receptor (I5)					
LEDs			Corrientes [mA]		
D6	D5	D4	I4 Promedio	I2 Promedio	I5 = I4 Promedio - I2 Promedio
0	0	0	19,3	0,2	19,1
0	0	1	21,41	2,3	19,1
0	1	0	22,3	3,6	18,7
0	1	1	24,3	5,8	18,5
1	0	0	20,37	1,9	18,4
1	0	1	22,4	4	18,4
1	1	0	23,2	4,9	18,3
1	1	1	25,1	6,8	18,3
					18,6
					I5 Promedio

Fuente: Autor

En la tabla 17 se calcula el promedio de la corriente I_5 que resulta en 18.6 mA. Comparado con el valor de la hoja de datos del Radio Chipcon CC2420 [17], 18.8 mA, se puede concluir que esta prueba también genera resultados confiables. Ver tabla 18.

Tabla 18. Porcentajes de Error del Consumo de Corriente del CC2420

Consumo de Corriente del Radio CC2420			
Descripción	Hoja de datos	Pruebas	% Error
Corriente Tx @ 0 dBm [mA]	17,4	17,8	2,29%
Corriente Rx @ 0 dBm [mA]	18,8	18,6	1,06%

Fuente: Autor

5.2 Corriente consumida al leer los sensores (acceso a la memoria flash)

Se programó un *Telos B* con la aplicación *OscilloscopeRF* que lee los datos de la memoria flash que han sido registrados por el sensor de intensidad luminosa, para después transmitirlos vía radio. El valor registrado en el amperímetro fue de $I_{osc} = 22.4$ mA.

Considerando los resultados de las pruebas anteriores se asume que la corriente registrada es aproximadamente:

$$I_{osc} = I_{Sensores} + I_{LEDs} + I_{RadioTX} \quad (5.5)$$

Durante el todo el tiempo de transmisión, los LEDs se iluminan conmutando entre los niveles 100 y 101 que representan $I_{LEDs} = 1.9$ mA y $I_{LEDs} = 4.4$ mA respectivamente (Ver tabla 15).

De las pruebas anteriores se tiene que $I_{RadioTX} = 17.8$ mA, de modo que:

$$I_{Sensores(\min)} = 22.4mA - (4.4 + 17.8) = 0.2mA$$

$$I_{Sensores(\max)} = 22.4mA - (1.9 + 17.8) = 2.7mA \quad (5.6)$$

Para evaluar la confiabilidad de estos resultados, se programó el mismo *Telos B* con otra aplicación, *Sense*, que también lee el sensor de intensidad luminosa y muestra en sus LEDs los tres bits menos significativos del valor, pero no usa el radio para transmitir.

Durante el tiempo que duró la prueba, se registraron dos valores en los LEDs: 100 y 010. De la tabla 14 se sabe que $I_{LEDs}(100) = 1.9mA$ y $I_{LEDs}(010) = 3.6 mA$.

Para 100, $I_{sense} = 1.02 mA$ y para 010 $I_{sense} = 3.33 mA$.

La corriente registrada en el amperímetro se asume como:

$$I_{sense} = I_{Sensores} + I_{LEDs} \quad (5.7)$$

Entonces,

$$I_{Sensores} = I_{sense} - I_{LEDs} \quad (5.8)$$

En ambos casos las corrientes medidas son menores a las que se habían calculado previamente para los LEDs. Como resultado, no se cumple la ecuación 5.8.

En conclusión, esta prueba no es adecuada para estimar el valor de la corriente que se consume al leer los sensores.

5.3 Consumo de corriente al ejecutar operaciones matemáticas

Se programó el *mote* con la aplicación *SenseTask* que calcula el valor promedio de las lecturas que periódicamente toma de los sensores y muestra en los LEDs los tres bits más significativos de dicho valor promedio.

Similar al la prueba anterior, el valor de la corriente registrada por el amperímetro se estima como la suma de la corriente consumida por los LEDs, la consumida al acceder a los sensores y la consumida por el microcontrolador al calcular el promedio.

Los valores registrados fueron $I_{SenseTask} = 5.35 mA$ cuando los LEDs muestran el número 011 y $I_{SenseTask} = 3.25 mA$ cuando el número es 101. Al observar la tabla 14 se puede concluir que esta prueba tampoco produce resultados coherentes ya que los valores de

corriente I_{LEDs} para los números 011 y 101, 5.7mA y 4.04 mA respectivamente, son mayores que las corrientes medidas $I_{SenseTask}$, de manera que no cumplen con la relación:

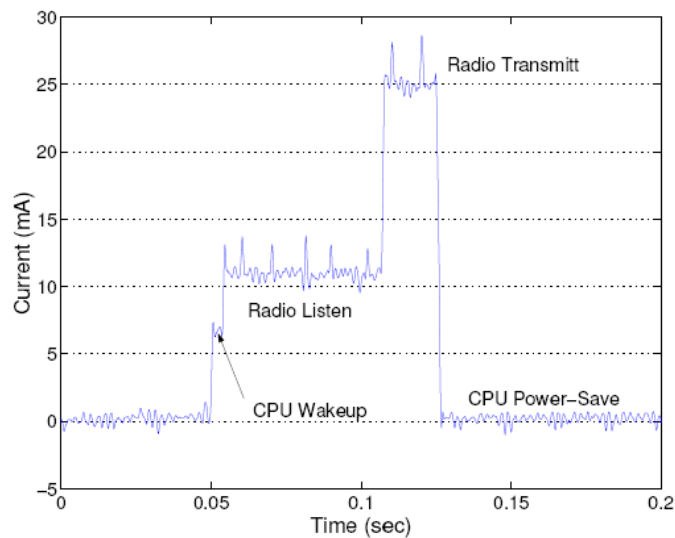
$$I_{SenseTask} = I_{sensores} + I_{LEDs} + I_{Operaciones} \quad (5.9)$$

5.4 Evaluación del Ciclo Útil de Operación (Duty Cycle).

El consumo de energía no depende exclusivamente de la corriente consumida por un *mote* al transmitir y/o recibir paquetes. Existe un parámetro más determinante a la hora de maximizar la vida de las baterías como lo es el intervalo de tiempo en que el *mote* mantiene encendidos su CPU y su Radio-Transceiver para escuchar el canal y saber si tiene que recibir y/o transmitir algún paquete. Lo anterior se conoce como ciclo útil.

En la figura 62 se observa que antes de 50 ms, el *mote* se encuentra en un estado de ahorro de energía donde el consumo de corriente no supera 1 μ A, después tarda menos de 10 μ s en despertar y pasar a un estado de escucha del canal. Si recibe paquetes inicia la comunicación y si no recibe, regresa a su estado de baja energía y así se mantiene hasta el siguiente ciclo.

Figura 62. Grafica del ciclo útil de operación de un *mote* IEEE 802.15.4 / ZigBee¹³



Fuente: [26]

El ciclo útil se hace menor al reducir el tiempo en el que el radio está encendido escuchando el canal lo cual a su vez, reduce el consumo de corriente. El ciclo útil es configurable para el *Telos B* y el *Tmote Sky* por medio del comando **lowpower**.

Antes de programar una aplicación se escribe en la línea de comandos de Cygwin:

```
make telosb/tmote lowpower
```

¹³ No necesariamente *Telos B* o *Tmote Sky*.

El ciclo útil se puede seleccionar escribiendo el porcentaje después del comando. Por ejemplo, el comando: **make telosb/tmote lowpower, 2** establece un ciclo útil de 2%.

Esto significa que durante un periodo de 1 segundo, el radio estará activo durante 20 milisegundos. Cuando no se escribe ningún número, el sistema operativo establece un ciclo útil por defecto del 5%.

La prueba realizada consistió en programar un *Tmote sky* con la aplicación *Delta* (Anexo C) que toma los datos de su sensor de temperatura interno y lo transmite vía radio a un segundo *Tmote Sky*, también programado con *Delta*, que actúa como estación base conectado a un PC el cual recibe la información mediante una interfaz Java.

Al usar el amperímetro como en la figura 61 para medir la corriente total en el *mote*, los valores que se alcanzan a observar son:

- **Lowpower 5%** $I = 20.9 \text{ mA}$
- **Lowpower 2%** $I = 20.9 \text{ mA}$

El multímetro no alcanza a percibir los cambios de estado que ocurren en unos pocos milisegundos y algunos en microsegundos.

Tal como se esperaba, no se observa ninguna variación en los valores de corriente al cambiar el ciclo útil de operación, puesto que lo que tiene que cambiar son los tiempos de duración de cada estado.

Finalmente se concluye que no es posible obtener una curva como la de la figura 62 para el *Tmote sky* porque no se cuenta con el equipo adecuado.

5.5 Inconvenientes Presentados

- Por razones desconocidas hasta la fecha de redacción del presente documento, se obtuvieron los mismos valores de corriente consumida por el radio al operar con potencias inferiores a 0 dBm. Se esperaba que a medida que bajase el nivel de potencia, se consumiera menos corriente, sin embargo esto no se dio en la práctica. Por esta razón todas las demás pruebas de este capítulo se hicieron a una potencia de transmisión máxima (0 dBm).
- Con el uso de un Multímetro no es posible observar los tiempos en los que el *mote* permanece en cada uno de los estados de su ciclo útil. La gráfica de la figura 62 corresponde a una simulación.

5.6 Conclusiones

- Por tratarse de los niveles más altos (decenas de mA), las corrientes de transmisión y recepción al operar a la máxima potencia coinciden al menos en un 98% con los valores de las hojas de datos de los *motes* y el radio CC2420. De manera que esta prueba se puede repetir para otros dispositivos de similares características y sus resultados se pueden considerar como válidos dentro de una planeación de redes de sensores inalámbricos.
- La vida útil de una batería depende de la potencia de transmisión, del ciclo útil de operación con el que se programan los *motes* y de la cantidad de veces que debe transmitir y/o recibir datos. Esto último representa el mayor consumo de potencia.

Capítulo 6

Otras Pruebas Básicas de Caracterización

6.1 Interferencia entre canales

Se programó la aplicación *CntToLedsAndRfm* en dos *motes* y la aplicación *RfmToLeds* en un tercer *mote* de manera que se tuvieran dos emisores y un receptor.

Tal como se ha descrito en las pruebas anteriores, el receptor debe mostrar en sus LEDs los tres bits menos significativos de los valores del contador recibidos en cada paquete. Al captar simultáneamente la información de dos emisores diferentes no es posible ver la secuencia binaria de 0 a 7 en los LEDs del *mote* receptor, ya que este intenta iluminar sus LEDs con los valores que recibe en su antena sin importar de donde provengan, y por esta razón, solo se observan valores sin ningún orden y con una frecuencia superior a la de la transmisión debido a los retardos y a la pérdida de paquetes que se produce cuando los emisores actúan como interferentes entre sí.

Cuando se programa una aplicación en un *mote*, este queda configurado por defecto en el canal 11, es decir, en el primero de los 16 canales asignados a la banda de 2.4 GHz (canales 11 a 26). Para seleccionar otro canal simplemente se cambia el registro `#define CC2420_DEF_CHANNEL` del archivo *CC2420Const* (`cygwin\opt\tinyos-1.x\tos\lib\CC2420Radio`) por el número del canal deseado y así se pueden establecer dos redes independientes dentro del mismo rango de cobertura sin que genere interferencia entre ellas (figura 63).

Figura 63. Selección del canal en el archivo CC2420Const

```
/**
 * @author Joe Polastre
 * @author Alan Broad
 */

#ifndef _CC2420CONST_H
#define _CC2420CONST_H

// times for the CC2420 in microseconds
enum {
    CC2420_TIME_BIT = 4,
    CC2420_TIME_BYTE = CC2420_TIME_BIT << 3,
    CC2420_TIME_SYMBOL = 16
};

#ifndef CC2420_DEF_RFPOWER
#define CC2420_DEF_RFPOWER    0x1F
#endif

#define CC2420_DEF_CHANNEL
#define CC2420_DEF_CHANNEL    11 //channel select
#endif

// added for post-compile frequency changing
uint8_t CC2420_CHANNEL =    CC2420_DEF_CHANNEL;
uint8_t CC2420_RFPOWER =    CC2420_DEF_RFPOWER;

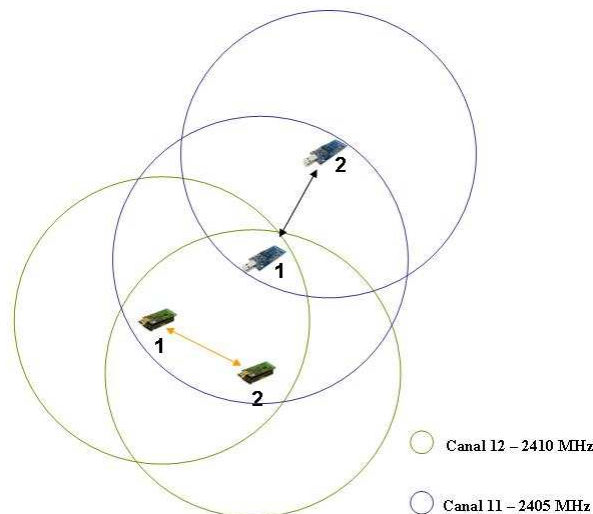
enum {
    CC2420_MIN_CHANNEL =    11,
    CC2420_MAX_CHANNEL =    26
};
};
```

Fuente: Autor

Para comprobar que este cambio en el valor del registro efectivamente permite establecer dos redes que no se superponen, se programaron dos emisores y dos receptores con las mismas aplicaciones anteriores pero cada pareja emisor-receptor en un canal diferente. Los canales elegidos fueron 11 y 12 por ser adyacentes.

Como resultado, en ambos receptores se podía observar la secuencia de valores de 0 hasta 7 con toda claridad, sin alteraciones de la frecuencia y sin valores interferentes (figura 64).

Figura 64. Configuración de dos redes no interferentes entre sí



Fuente: Autor

A partir de este resultado se puede concluir que es posible establecer dos o más¹⁴ redes ZigBee de sensores inalámbricos independientes dentro de una misma región de cobertura, usando *motes Telos B* y *Tmote Sky*, sin que exista interferencia entre las mismas. Un ejemplo de este caso se puede dar cuando existe la necesidad de monitorear un gran número de variables dentro de una misma región, de manera que cada red se encarga de ciertas variables en particular.

Aunque puede resultar obvio, no está de más aclarar que en la configuración de una red de sensores inalámbricos, un *mote* en determinado momento puede recibir información de varios *motes* vecinos¹⁵ a la vez, lo cual no se considera interferencia teniendo en cuenta que toda la red comparte el mismo canal y los dispositivos realizan un proceso de evaluación de disponibilidad del mismo (CSMA/CA) antes de establecer una comunicación.

Como trabajo relacionado con el uso de los canales, se propone para futuros proyectos, realizar una caracterización del espectro de salida de los dispositivos *Telos B* y *Tmote Sky*,

¹⁴ Aunque la prueba se realizó solo para dos redes, se espera que se puedan configurar 16 redes independientes ya que los resultados muestran que no existe interferencia entre dos canales adyacentes, por lo cual, en teoría, no se debería presentar ningún inconveniente. Sin embargo, el uso de todos los canales en el marco de un área en particular es un trabajo que se propone desarrollar en proyectos futuros.

¹⁵ Pertenecientes a la misma red.

para tener un concepto más consistente acerca de la distribución de potencia dentro del ancho de banda y del nivel de potencia de canales adyacentes. Un ejemplo de un análisis similar desarrollado por La Universidad Linköpings de Suecia en 2006, para otros tipos de dispositivos IEEE 802.15.4, se muestra en la figura 65 [19].

Figura 65. Distribución de potencia en el ancho de banda de un canal IEEE 802.15.4



Fuente: [19]

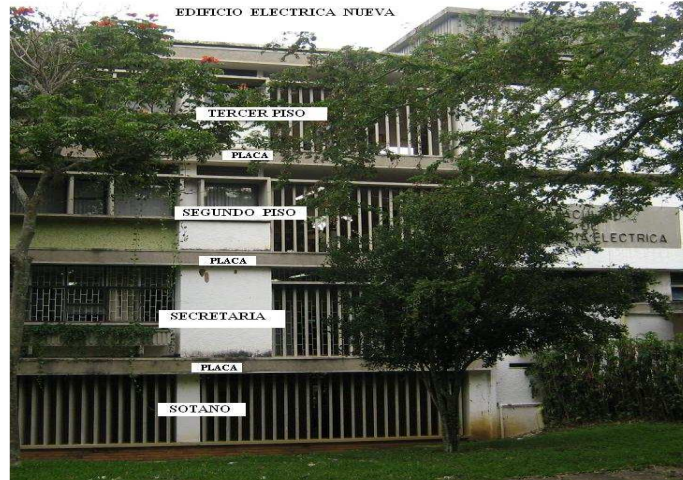
6.2 Atenuación por placas (Cobertura entre Pisos)

Después de evaluar los efectos de atenuación de la señal que se presentan al atravesar puertas y muros, resultaba conveniente observar las pérdidas en el nivel de señal que se producían cuando emisor y receptor se ubican en plantas diferentes dentro de un edificio.

La realización de esta prueba esta enfocada dentro de un marco muy específico en donde se seleccionaron dos edificios de la Universidad Industrial de Santander. En los resultados de las pruebas se especifican las alturas de cada piso y el grosor de las placas. Los *notes* transmiten a su máxima potencia.

En las figuras 66 y 67 se observa el primer edificio conocido como “Eléctrica Nueva”, en donde se realiza la primera y segunda parte de la prueba.

Figura 66. Plantas de la parte izquierda del edificio de Eléctrica Nueva



Fuente: Autor

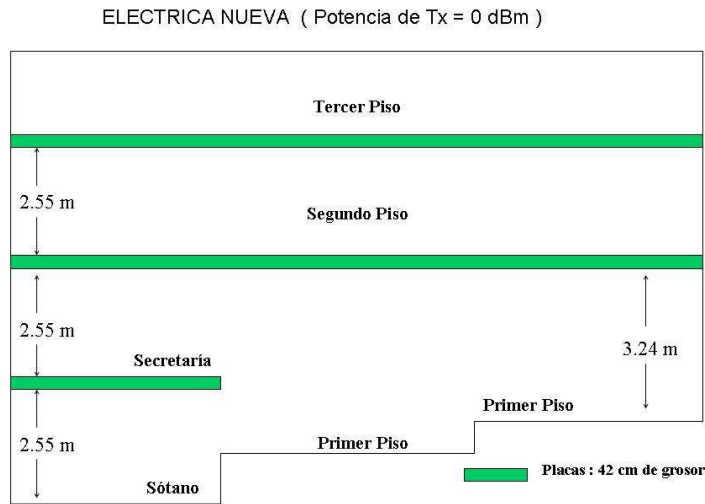
Figura 67. Plantas de la parte derecha del edificio de Eléctrica Nueva



Fuente: Autor

El desarrollo de la prueba fue simple, se ubicó el sniffer en la planta mas baja y se registraron los paquetes provenientes del *mote* emisor que transmitía desde cada una de las plantas superiores. La siguiente figura muestra los detalles del escenario de las pruebas 1 y 2. La atenuación de la señal, como es obvio, está determinada por la distancia y por el número de placas de concreto que deba atravesar (42 cm de grosor cada una).

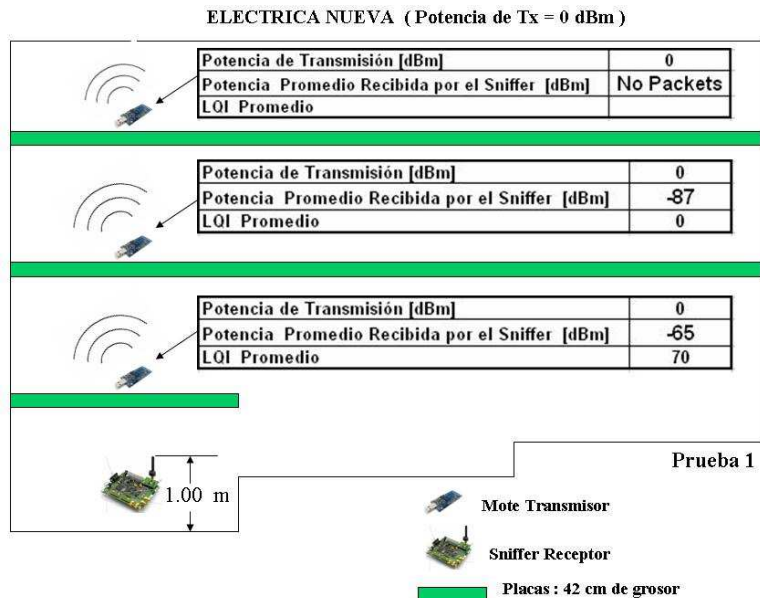
Figura 68. Configuración del escenario. Pruebas 1 y 2



Fuente: Autor

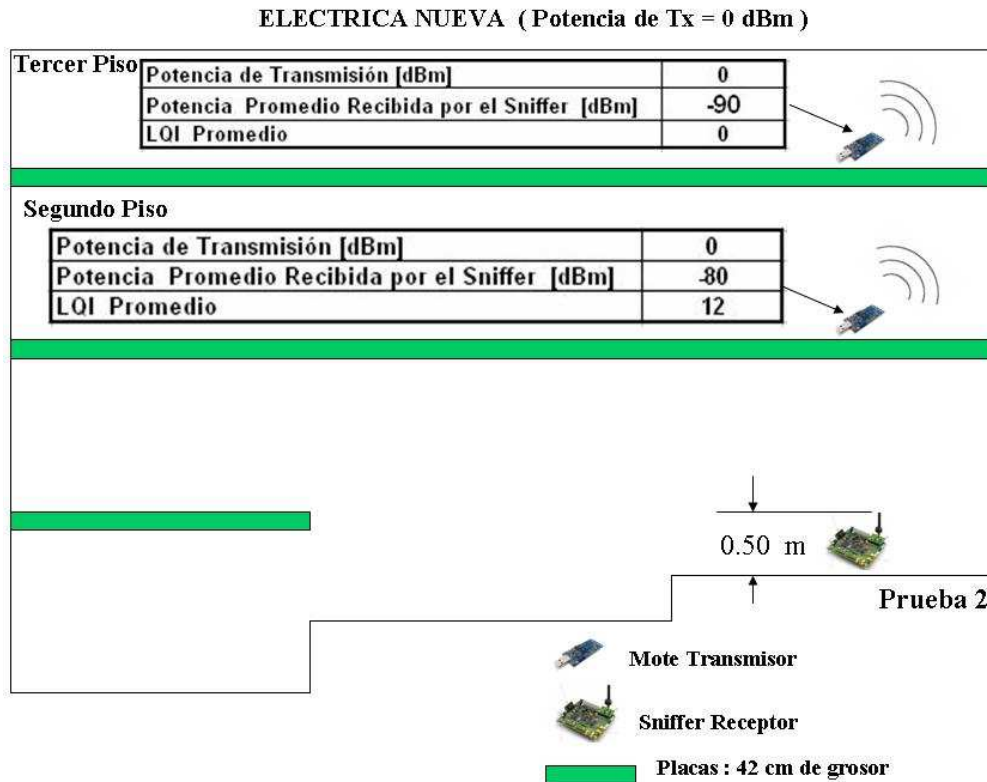
Los resultados de las pruebas se observan en las figuras 69 y 70 Para cada punto de transmisión se capturaron cerca de 40 paquetes, de los cuales se calcularon los valores de RSSI y LQI Promedio.

Figura 69. Resultados de las mediciones. Prueba 1



Fuente: Autor

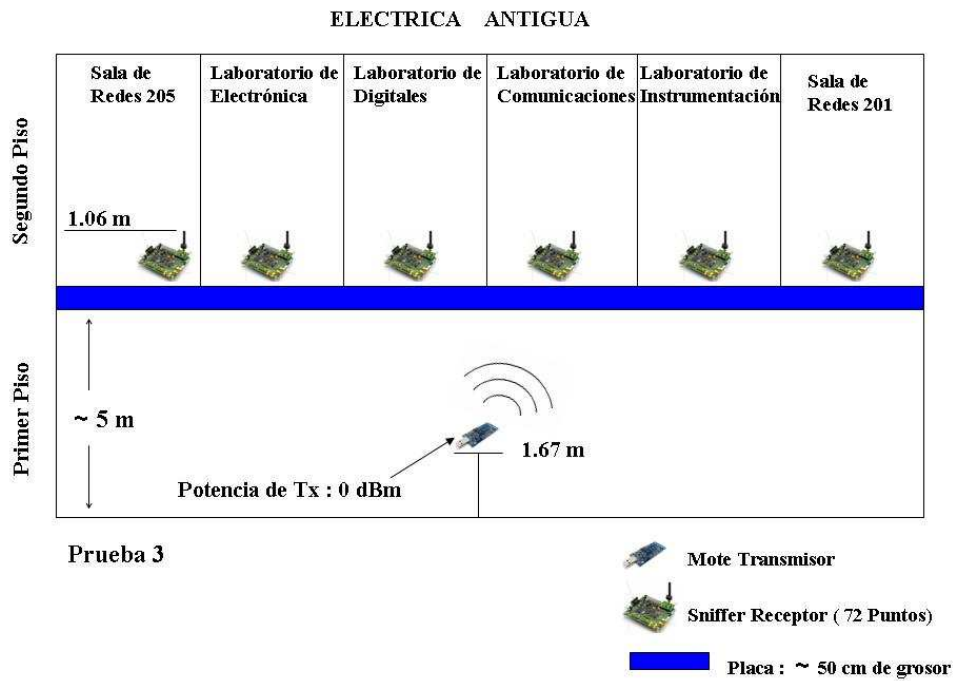
Figura 70. Resultados de las mediciones. Prueba 2



Fuente: Autor

La tercera parte de esta prueba está asociada a las mediciones de cobertura indoor que se realizaron en el segundo piso del edificio de Alta Tensión de la UIS. Se aprovechó la misma grilla de puntos receptores que se eligieron para los tres puntos de transmisión ubicados en el segundo piso. Una vez terminado aquel procedimiento se eligió una cuarta ubicación del *mote* transmisor, pero esta vez en el primer piso del edificio, justo debajo del punto medio del pasillo del segundo piso; de tal manera que se pudiera obtener información acerca de los valores de la atenuación producida por la placa y por la distancia. La configuración del escenario y los dispositivos se puede ver en la figura 71.

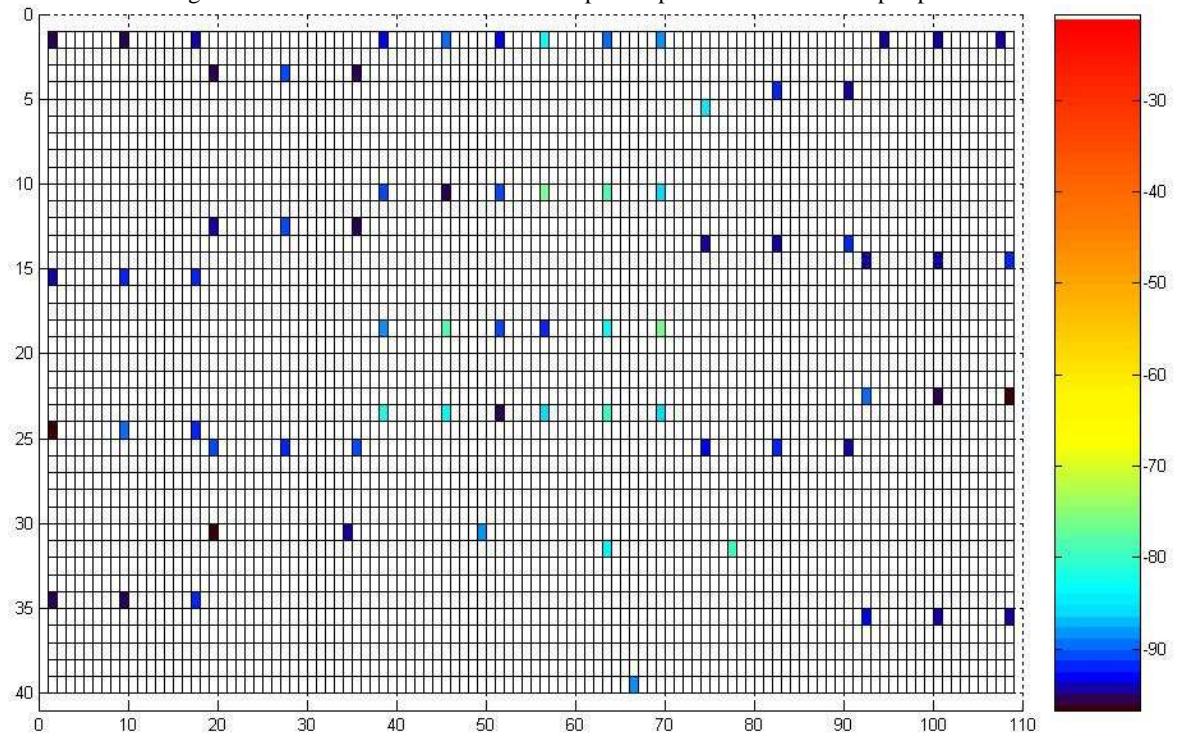
Figura 71. Configuración del escenario. Prueba 3



Fuente: Autor

La información acerca del valor RSSI para cada punto se consignó en una tabla de Excel que posteriormente se exportó a un código de MATLAB para generar la figura 72 que ilustra el valor de potencia promedio recibido en cada uno de los 72 puntos del segundo piso. La barra de colores de la derecha indica los valores de RSSI en dBm.

Figura 72. Valores Promedio de RSSI para la prueba de atenuación por placas



Fuente: Autor

A partir de la figura anterior, el lector puede apreciar del grado de atenuación producida por la placa que separa el primer y segundo piso del edificio. Claramente se observa que para la mayoría de puntos el nivel de señal decrece hasta un valor muy cercano e incluso superior al límite de sensibilidad establecido por el fabricante del radio CC2420 (-95 dBm). Para algunos puntos ubicados justo arriba del emisor, los valores oscilan entre los -72 y -85 dBm con lo cual se alcanza un LQI diferente de cero, aunque no muy alto.

Las conclusiones para las tres pruebas que resultan de analizar la información obtenida son¹⁶:

- A partir de las pruebas 1 y 2 se puede concluir que para un edificio de hormigón armado que tenga plantas de una altura cercana a los dos metros y medio y cuyas placas no superen el medio metro de grosor, se puede establecer una comunicación entre dos *Telos B* y/o *Tmote Sky* atravesando un máximo de dos placas; siempre y cuando la transmisión se realice a la máxima potencia y se usen antenas con ganancia de 1.7 y 4.1 para emisor y receptor respectivamente.
- Cuando las plantas superan una altura de 3 metros (Prueba 2), solamente se puede establecer una comunicación entre dos plantas, alcanzando unos valores de RSSI aproximadamente de 10 a 15 dBm por debajo del límite de sensibilidad y valores de LQI superiores a 10. Estos resultados se garantizan si se realiza la transmisión a la

¹⁶ Estas conclusiones están definidas para este escenario en particular y no deben interpretarse como concepto general

máxima potencia y se emplean las mismas antenas con las que se ha trabajado a lo largo del proyecto.

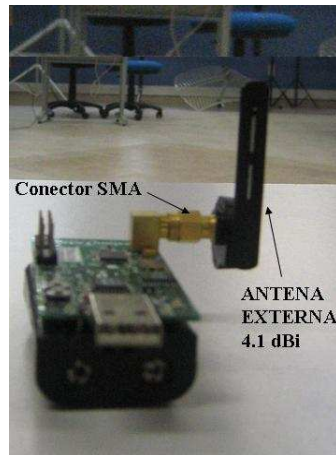
- A pesar de que en algunos puntos de la prueba 3 se reciben niveles de señal que se pueden considerar aceptables para el establecimiento de una red; para la mayoría de puntos el nivel es muy cercano al límite de sensibilidad y no se puede garantizar una calidad de enlace óptima teniendo en cuenta los resultados en las pruebas de porcentaje de paquetes recibidos y los valores tan bajos de LQI. Estos valores están condicionados en gran medida por la altura del primer piso, la cual es superior a las alturas del edificio de eléctrica nueva.
- Para cualquier red de sensores inalámbricos que use *Tmote Sky* y/o *Telos B* y realice un monitoreo de variables a través de 2 o más¹⁷ pisos de un edificio, se recomienda que el enlace entre las sub-redes de cada planta se haga solo a través de dos enrutadores que se encuentren ubicados justo uno arriba del otro, de modo que la calidad de la señal sea aceptable para establecer una comunicación confiable entre todos los dispositivos de la red y el administrador pueda realizar con éxito el monitoreo de todos los puntos de la red.
- Es importante tener en cuenta que en un escenario real puede existir un entorno dinámico producido por la gente que esta en constante movimiento, lo cual en determinados momentos puede introducir atenuaciones adicionales y generar problemas en la comunicación. Por esta razón no es buena idea establecer un enlace entre nodos con niveles de atenuación y distancias demasiado cercanos a los límites encontrados en las pruebas. Se recomienda contar con un margen más amplio que garantice la calidad del enlace en caso de presentarse estas situaciones.

6.3 Tipos de antenas

Hasta este punto se habían realizado las pruebas de rango de cobertura, porcentaje de error de paquetes y latencia en entorno *indoor* usando la antena impresa de 1.7 dBi de los *motes*. En esta sección se tiene en cuenta la opción que ofrece el dispositivo para usar una antena externa con una ganancia superior, adherida al *mote* a través de un conector SMA (figura 73). Para esta práctica se usó una antena de 4.1 dBi igual a la que usa el *sniffer* para la recepción.

¹⁷ En caso de ser posible.

Figura 73. *Telos B* con antena externa

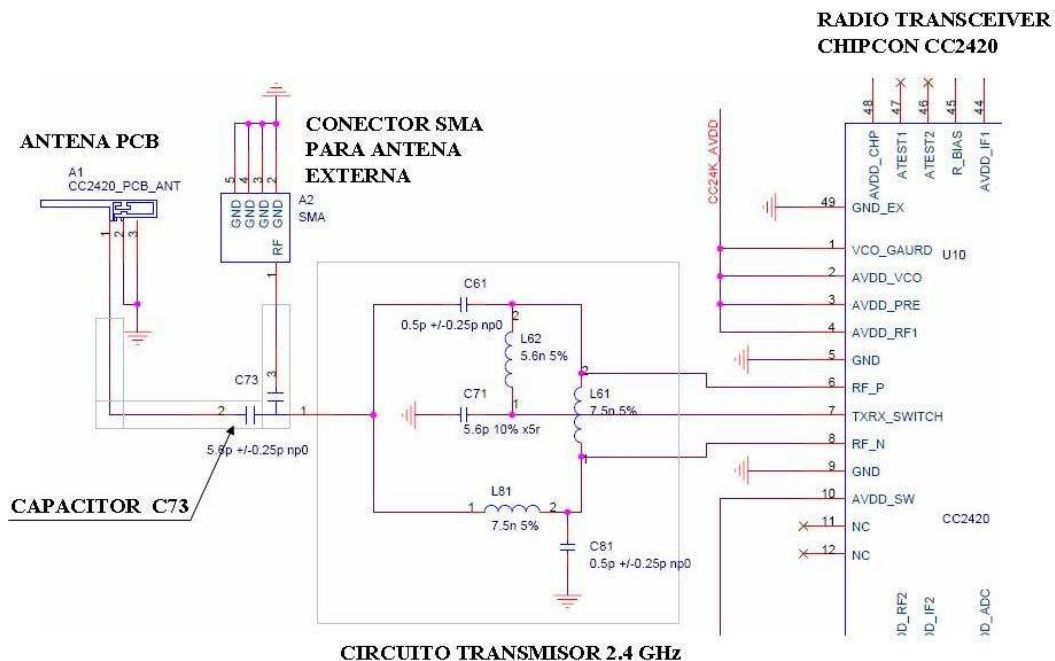


Fuente: Autor

El objetivo de esta práctica es comparar los valores de RSSI y LQI obtenidos al transmitir a la máxima y mínima potencia dentro del mismo escenario indoor en donde se habían desarrollado las prácticas anteriores (sala 201).

Para seleccionar una u otra antena en el *mote* es necesario intercambiar la conexión del condensador C73 de manera que una de ellas quede conectada al radio y la otra quede aislada. El cambio de ubicación del condensador se realiza removiéndolo de su ubicación original (antena PCB) y soldándolo a la vía que lleva al conector SMA (figura 74). Para más detalles del esquema, ver la hoja de datos del *Tmote Sky* [24].

Figura 74. Esquema de la configuración de las antenas PCB y externa

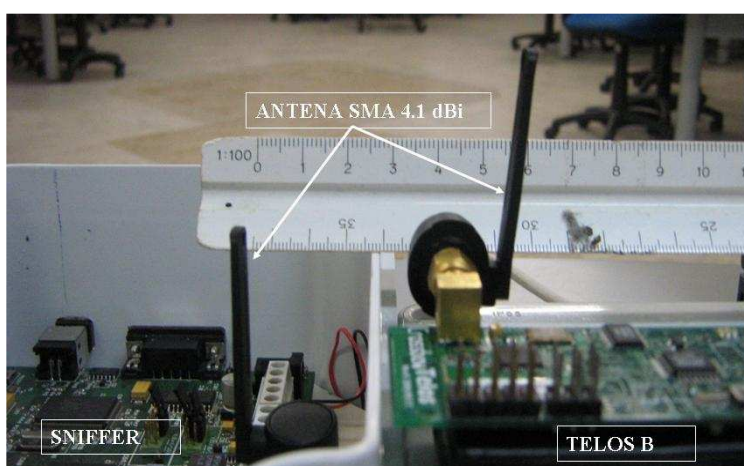


Fuente [24]

Para simplificar el proceso, se eligieron solo dos puntos de captura de datos

- Punto 1: 5cm entre emisor y receptor (figura 75).
- Punto 2: 7.52 metros entre emisor y receptor

Figura 75. Antenas SMA para emisor y receptor



Fuente: Autor

Para ambos puntos de transmisión se capturaron los datos al usar un *mote* con antena externa SMA y otro a la misma potencia pero usando la antena impresa con el fin de realizar una comparación entre las dos situaciones. Este procedimiento se repitió ambos niveles de potencia. La información obtenida se encuentra en la tabla 19.

Tabla 19. Resultados de las pruebas de tipos de antenas

POTENCIA MAXIMA DE TRANSMISION (0 dBm)					
ANTENA	GANANCIA	Distancia Emisor -receptor			
		5 cm		7,52 m	
Antena PCB	1,7	Paquetes Recibidos	150	Paquetes Recibidos	358
		RSSI Promedio [dBm]	-32	RSSI Promedio [dBm]	-72
		LQI Promedio	200	LQI Promedio	48
Antena externa SMA	4,1	Paquetes Recibidos	200	Paquetes Recibidos	360
		RSSI Promedio	-27	RSSI Promedio	-67
		LQI Promedio	224	LQI Promedio	60
POTENCIA MINIMA DE TRANSMISION (-25 dBm)					
ANTENA	GANANCIA	Distancia Emisor -receptor			
		5 cm		7,52 m	
Antena PCB	1,7	Paquetes Recibidos	200	Paquetes Recibidos	27
		RSSI Promedio	-60	RSSI Promedio	-95
		LQI Promedio	92	LQI Promedio	0
Antena externa SMA	4,1	Paquetes Recibidos	150	Paquetes Recibidos	150
		RSSI Promedio	-54	RSSI Promedio	-85
		LQI Promedio	116	LQI Promedio	32

Fuente: Autor

De los resultados presentados en la tabla anterior se pueden sacar las siguientes conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros en el tema.

- Al transmitir a la máxima potencia para ambos puntos de transmisión, el nivel de señal con la antena externa se eleva 5 dBm respecto al alcanzado con la antena impresa. Los indicadores de la calidad de enlace también presentan una mejora de 24 y 12 para las separaciones de 5 cm y 7.52 m respectivamente.
- Para ambas antenas, el valor de LQI a una distancia de 7.52 disminuye aproximadamente en un 75 % con respecto al valor que alcanza a 5 cm del receptor.
- Para ambas antenas transmitiendo a la máxima potencia, el nivel de señal se atenúa 40 dBm a una distancia de 7.52 entre emisor y transmisor.
- Al transmitir a la mínima potencia la mejora en el valor RSSI de la señal recibida es de 6 y 10 dbm para 5cm y 7.52 cm respectivamente. Esto demuestra que el factor de aumento de la señal, al incorporar una antena con mayor ganancia, es más estable cuando la potencia de transmisión es mayor.
- Con el fin de realizar una caracterización completa, se recomienda realizar una prueba similar para distancias de separación mas grandes, en escenarios *outdoor* y para los demás niveles de potencia de transmisión que manejan estos *notes*.
- Se debe tener en cuenta que si se realiza la misma prueba en un escenario abierto, es de esperar que los valores cambien debido a que no se presentan tantos fenómenos de reflexión como los que se dan en la sala debido a las paredes.

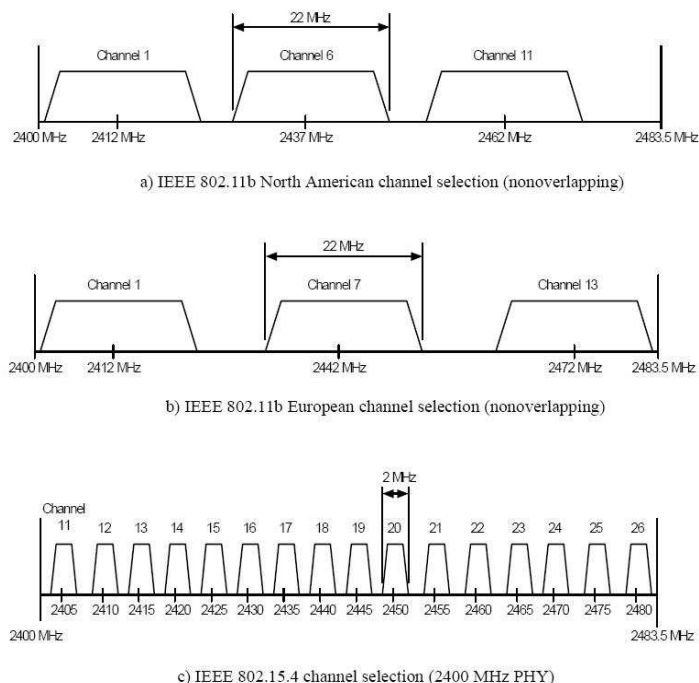
6.4 Coexistencia entre las redes IEEE 802.15.4/ZigBee y Wi-Fi - IEEE 802.11b.

La banda de radio frecuencia de 2400 a 2500 Mhz para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ISM) fue originalmente definida y reservada a nivel internacional por la ITU-R, entre otras¹⁸, para el uso de diferentes tipos de redes inalámbricas tales como IEEE 802.11 (WiFi), IEEE 802.15.3 (Bluetooth) y por supuesto IEEE 802.15.4. Este alto grado de libertad en el acceso a esta banda deja expuestas a las redes de sensores inalámbricos a experimentar ciertos niveles de interferencia [11].

A pesar de que IEEE 802.15.4/ZigBee y WiFi han sido creadas con diferentes propósitos y deberían coexistir mutuamente dentro un mismo rango de comunicación; algunos estudios recientes [11], [27], [28] aseguran que la calidad del enlace puede verse seriamente comprometida debido a la interferencia de un red WLAN y por eso realizan un estudio del impacto en la comunicación, específicamente en el porcentaje de error de paquetes recibidos (PER).

¹⁸ Teléfonos inalámbricos, equipos de medicina, hornos microondas.

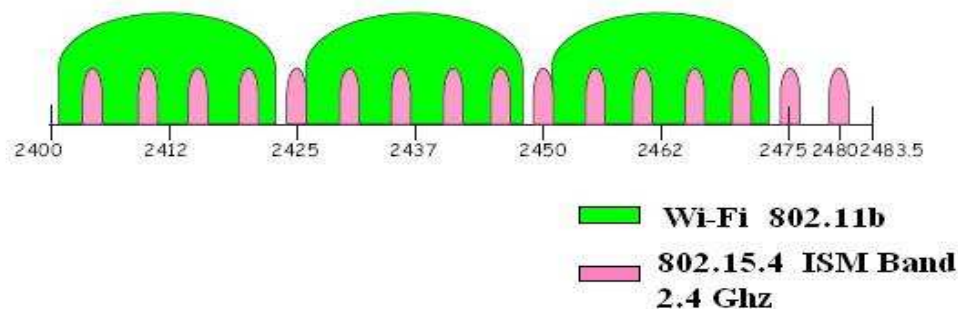
Figura 76. Canales IEEE 802.15.4 (2.4 GHz) e IEEE 802.11b (Europa y Norte América)



Fuente: [23]

Para prevenir la interferencia, el estándar IEEE 802.15.4 recomienda usar los canales 15, 20, 25 y 26 ubicados entre las bandas IEEE 802.11b (figura 77) en donde la energía, si bien no es igual a cero, si se reduce considerablemente. Esta solución propuesta, sin embargo, resultaría insuficiente en caso de que se desee tener más de 4 redes independientes [11].

Figura 77. Selección de Canales IEEE 802.15.4 (2.4 GHz) para minimizar los efectos de la interferencia de IEEE 802.11b



Fuente: [11]

Dentro del marco de este trabajo, se realizó una prueba básica para observar el efecto de la interferencia en la comunicación entre un *mote* transmisor y el sniffer receptor ubicados en la sala 201 del edificio de Eléctrica antigua, que está destinada para la Especialización en Telecomunicaciones y para los laboratorios de redes de computadores. Dentro de la sala está conectado un Access Point de la empresa D-Link con referencia **AIR PLUS G+ 2.4GHz**

ACCESS POINT IEEE 802.11b que funciona como una extensión de la red LAN de la sala, para brindar cobertura a gran parte del edificio.

Antes de esta prueba, los radio-transceivers CC2420 de los *notes* y el sniffer se habían configurado para operar en los canales 11 y 12 en las pruebas de latencia, y en el canal 11 para las demás, mientras que el access point de la sala 201 operaba en el canal 6 del estándar 802.11b, por lo tanto nunca actuó como interferente en aquellas ocasiones.

Para realizar esta práctica correctamente, se cambió el canal del access point del 6 al 1, de modo que su ancho de banda interfiriese con los canales IEEE 802.15.4 del 11 al 14.

La prueba consistió sencillamente en repetir el procedimiento de la sección anterior (tipos de antenas). La distancia entre emisor y receptor seleccionada dentro de la sala 201 fue de 7.52 metros transmitiendo a la mínima potencia con la antena externa SMA.

En aquella prueba sin la incidencia de la red Wi-Fi, para la misma configuración, se alcanzó un valor promedio de -85 dBm en los paquetes recibidos con un LQI promedio de 32. La varianza en los valores de RSSI recibidos para cada punto fue prácticamente despreciable (tabla 19).

Al repetir el anterior procedimiento pero ya con el access point funcionando y con 3 computadores portátiles usando la red Wi-Fi, se obtuvieron resultados del registro realizado durante mas de 2 minutos (figuras 78, 79, y 80).

En las figura 78 se observan paquetes recibidos que presentan pérdida de información útil (payload) y errores en los campos de direccionamiento y control

Figura 78. Interferencia Wi-Fi -1

Time (us)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	MAC payload	LQI	FCS
+0 =0	6	Type Sec Pnd Ack req Intra PAN DATA 0 0 0 0	0xAF	0xCDFF	0x002E	Negative payload length!	0	ERR
+1221508 =1221508	14	Type Sec Pnd Ack req Intra PAN DATA 0 0 0 0	0x54	0xF1FF	0xFFFF	MAC payload 04 DD ED 01 A1	0	ERR
+8297414 =9518922	15	Type Sec Pnd Ack req Intra PAN DATA 0 0 1 0	0xD6	0xEFFF	0xFF2F	MAC payload 04 7D A6 C1 01 00	0	ERR
+6348351 =15867273	15	Type Sec Pnd Ack req Intra PAN R111 0 0 0 1	0xF0	0xE4FF	0x06F331F07D04FFFF		0	ERR
+11155200 =27022473	24	Type Sec Pnd Ack req Intra PAN CMD 0 0 0 1	0x77	0x703A	0x4BB40E54610A4587	Unknown command	0	ERR
+7643357 =34665830	5	Type Sec Pnd Ack req Intra PAN BCN 0 0 0 0	0x3D	0x28CC	0x4587	Superframe specification BO SO F.CAP BLE Coord Assoc	4	0
+484857 =35150687	15	Type Sec Pnd Ack req Intra PAN DATA 0 0 0 0	0x3F	0xFFFF	0xFFFF	MAC payload 04 7D 3F 02 01 00	0	OK

Fuente: Autor

La siguiente imagen pertenece a la misma captura anterior. En ella se observan paquetes detectados por el sniffer que presentan un LQI de cero (potencia recibida menor a -85 dBm) pero en algunos de ellos el campo FCS es OK y en otros ERROR.

Figura 79. Interferencia Wi-Fi -2

Time (us)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	MAC payload	LQI	FCS
+1219920 =67373622	15	Type Sec Pnd Ack req Intra PAN DATA 0 0 0 0	0xC3	0xFFFF	0xFFFF	04 7D C3 02 01 00	0	OK
+2230647 =69604269	124	Type Sec Pnd Ack req Intra PAN ACK 1 0 0 0	0x2E	0x4C17	0x5A35		0	ERR
+3138164 =72742433	15	Type Sec Pnd Ack req Intra PAN DATA 0 0 0 0	0xD9	0xFFFF	0xFFFF	04 7D D9 02 01 00	0	OK
+733600 =73476033	15	Type Sec Pnd Ack req Intra PAN DATA 0 0 0 0	0xDC	0xF5FF	0xFFFA	04 7D DC 02 41 00	0	ERR
+1464546 =74940579	15	Type Sec Pnd Ack req Intra PAN DATA 0 0 0 0	0xE2	0xFFFF	0xFFFF	0x7D04 0xAB6C3ECE000102E2	Negative payload length!	0 ERR
+488914 =75429493	15	Type Sec Pnd Ack req Intra PAN DATA 0 0 0 0	0xE4	0xFFFF	0xFFFF	04 7D E4 02 01 00	0	OK
+730427 =76159920	15	Type Sec Pnd Ack req Intra PAN DATA 0 0 0 0	0xE7	0xFFFF	0xFFFF	04 7D E7 02 01 00	0	OK

Fuente: Autor

En la siguiente imagen, también correspondiente al mismo registro, se observa una variación del nivel de RSSI desde -72 dBm (aceptable para el establecimiento de un enlace) hasta -96 dBm, el cuál es un nivel que supera el límite de sensibilidad y presenta un LQI igual a cero.

Figura 80. Interferencia Wi-Fi-3

Time (us)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	MAC payload	RSSI (dBm)	FCS
+242520 =105943012	15	Type Sec Pnd Ack req Intra PAN DATA 0 0 0 0	0x61	0xFFFF	0xFFFF	04 7D 61 03 01 00	-72	OK
+244411 =106187423	15	Type Sec Pnd Ack req Intra PAN DATA 0 0 0 0	0x62	0xFFFF	0xFFFF	04 7D 62 03 01 00	-74	OK
+246242 =106433665	15	Type Sec Pnd Ack req Intra PAN DATA 0 0 0 0	0x63	0xFFFF	0xFFFF	04 7D 64 07 01 60	-94	ERR
+242031 =106675696	15	Type Sec Pnd Ack req Intra PAN DATA 0 0 0 0	0x64	0xFFFF	0xFFFF	04 7D 64 03 01 00	-95	OK
+1953157 =108628853	15	Type Sec Pnd Ack req Intra PAN R100 1 0 0 0	0x6C	0xFFFF1	0xFFFF		-96	ERR
+1463966 =110092819	15	Type Sec Pnd Ack req Intra PAN DATA 0 0 0 0	0x72	0xFFFF	0x3FFF	Source PAN 02 53 04 7D 54 01 00	-96	ERR
+1219921 =111312740	15	Type Sec Pnd Ack req Intra PAN DATA 0 0 0 0	0x77	0xFFFF	0xFFFF	04 7D 77 03 01 00	-92	OK

Fuente: Autor

A continuación se listan las conclusiones y recomendaciones generadas a partir de los resultados de la prueba.

- Las imágenes muestran que la interferencia de la red IEEE 802.11b produce un efecto negativo en la calidad de la comunicación de una red IEEE 802.15.4/ZigBee, ya que en ausencia de la primera, los niveles de RSSI tienden a estabilizarse después de que transcurre cierto tiempo de iniciada la recepción de paquetes.
- El grado de interferencia depende del ancho de banda del canal 802.11b que está siendo usado en un determinado momento. Se propone para proyectos futuros realizar mediciones similares pero con diferentes tipos de tráfico en una red WiFi para poder generar una conclusión mejor acerca de este tema.
- Comparando los resultados cualitativos de esta prueba con el análisis de PER realizado en la Universidad Nacional de Seoul, Corea [11], se propone como desarrollo futuro para la E3T y el grupo CPS, realizar un estudio relacionado con el tema, en donde se cuente con los equipos adecuados¹⁹ para calcular la tasa de error de paquetes a partir de la relación señal a ruido y del tiempo de colisión que se obtiene gracias a la evaluación de la densidad espectral de energía de los canales de ambas redes. De esta manera se podrían obtener resultados cuantitativos acerca de los efectos de la interferencia en la calidad del enlace en una red de sensores inalámbricos. Este procedimiento también sería muy útil para alcanzar mejores resultados en las pruebas de PER que se desarrollaron en este proyecto.

¹⁹ Analizador de espectros para 2.4 GHz. A la fecha, los equipos de la Universidad funcionaban para frecuencias menores a 1GHz.

Capítulo 7

Conclusiones Finales

En términos generales, los resultados experimentales son cercanos a las especificaciones dadas por los fabricantes, sin embargo se observó que los valores mostrados en las hojas de datos de los *motes* no deben ser interpretados como absolutos, ya que dependen de las condiciones de operación del dispositivo (potencia de transmisión, tipo de antena, aplicación programada, tarea desarrollada) y de las condiciones del entorno (Cantidad de obstáculos, atenuación por obstáculo, tipo de terreno, fenómenos de propagación, interferencia de otras redes en 2.4 Ghz).

La figura 81 es un resumen general que muestra el contraste entre la información especificada en las hojas de datos de los *motes* y los valores encontrados en las pruebas de caracterización, cuando se transmite a la máxima potencia. En términos generales se puede afirmar que los radios de cobertura y la sensibilidad son un tanto menores en la práctica, mientras que el consumo de corriente experimental, dentro de lo que fue posible medir, es muy cercano a los valores esperados²⁰.

Figura 81. Resumen Final

PARAMETRO	Hojas de datos		Puebas de Caracterización	
	Telos B	Tmote Sky	Telos B	Tmote Sky
Alcance máximo Outdoor (antena impresa)	75 - 100 m	125 m	100 m	100 m
Alcance máximo Indoor (antena impresa)	20 - 30 m	50 m	20 m	20 m
Sensibilidad	-90 dBm (mín) / -94 dBm (dBm)	-90 dBm (mín) / -94 dBm (dBm)	-92 dBm	-92 dBm
Consumo de Corriente	Transmisión (0dBm)	20mA.	19.5 - 21 mA	22,4 mA
	Recepción	23 mA.	21.8 - 23 mA	18.6 (solo CC2420)
	sleep	1µA	5.1µA	x
	Radio On (idle)	365µA	365µA	x

Fuente: Autor

En algunos capítulos de este documento se generaron algunas conclusiones que se escribieron al final de cada uno. A continuación se encuentran algunas nuevas y otras que representan un resumen de las conclusiones de cada capítulo.

- En escenario outdoor, con los *motes* transmitiendo a su máxima potencia, el sniffer puede recibir paquetes a una distancia superior a 100 metros, sin embargo los niveles de RSSI de los paquetes recibidos se encuentran por debajo del límite de sensibilidad, por lo que se recomienda que dos *motes* vecinos en una red no se encuentren a más de 100 metros de separación.
- En un entorno outdoor como el de la cancha de fútbol. De 10 metros en adelante los valores de RSSI del *Telos B* son menores que los del *Tmote Sky* en 5 dBm. Esto se presenta porque el *Tmote Sky* tiene un recubrimiento de aluminio en su circuito generador de ondas de radio frecuencia que lo aísla de señales interferentes. El *Telos*

²⁰ Las hojas de datos de los dispositivos no dan información acerca de los tiempos de latencia.

B no trae ese recubrimiento. A pesar de eso en la figura 19 se observa que la curva obtenida es muy similar, y que ambos logran un alcance máximo de 100 metros.

- En las curvas de potencia indoor también se observa que los niveles de RSSI del *Telos B* son un tanto menores que los del *Tmote Sky*, la diferencia en la mayoría de los puntos es muy cercana a los 5dBm. Esto valida la conclusión anterior
- No fue posible determinar un factor único de corrección para la herramienta MATINDOOR que se ajustara a la totalidad de los puntos de medida indoor, debido a que la diferencia entre los datos experimentales y los producidos por la simulación oscilaba desde 28.3 hasta 0.04 dBm.
- El nivel de RSSI que determina el límite de sensibilidad de los *motes* en escenarios indoor no son exactamente los -95 dBm que indica la hoja de datos de los *motes*. El valor para el cual se mantiene un PER<1% esta entre -92 y -94 dBm.
- Las características de las hojas de datos de los *motes* indican que los *motes* manejan un margen de sensibilidad mejorado con respecto al que establece el estándar, es decir -85 dBm. Esto quedó comprobado ya que cuando la potencia cae por debajo de los -85 dBm, aún se siguen recibiendo el 100% de los paquetes enviados.
- El software de chipcon muestra que al caer por debajo de los -85dBm el LQI se hace 0. De acuerdo a la teoría esto indica que la potencia de ruido para ese paquete es muy alta y el paquete no es exitoso. Para comprobar esto se usó un *mote* receptor ubicado al lado del sniffer que recibía la secuencia del contador y se comprobó que a pesar de que el software calcula un LQI = 0, la información se recibe correctamente.
- La figura 45 muestra que la distancia máxima que se puede alcanzar en un entorno indoor de similares características, con el mismo número de obstáculos al transmitir con la máxima potencia es de 20 m. en ese punto PER = 1%.
- Al transmitir a la mínima potencia dentro de una sala, solo se alcanzan 5 metros. Si se compara este resultado con los 2.7 metros que se alcanzan en outdoor para la mínima potencia, se puede decir que el efecto de reflexión de las ondas ocasionado por las paredes hace que el nivel de señal varíe.
- El software de chipcon usado para evaluar la tasa de error de paquetes maneja valores a nivel de capa de aplicación. Para observar el comportamiento de las señales a nivel de capa física, es necesario contar con los equipos adecuados que permitan visualizar el comportamiento en el canal de radio para calcular la relación señal a ruido y aplicar el modelo matemático para hallar la tasa error de bits real.
- Pese a lo anterior, los resultados de las pruebas de indicadores de calidad del enlace produjeron resultados muy cercanos a los esperados. De manera que se puede considerar como una buena aproximación.
- A pesar de que solo se pudo evaluar para la máxima potencia de transmisión, se comprobó que los valores del consumo de corriente debido al uso del radio en los *motes* es muy cercano a los especificados para el radio CC2420. Desafortunadamente,

la medición de la corriente total del *mote* no produce resultados concluyentes acerca del consumo de corriente al acceder a memoria, al realizar cálculos y al usar los sensores; sin embargo, el mayor consumo de corriente que se da en una transmisión es debido al uso del radio, lo cual representa casi el 80% del total de la corriente consumida por un nodo en una red de sensores inalámbricos. Para futuros proyectos relacionados con el tema se propone realizar el mismo experimento usando nuevas aplicaciones que vienen con la versión 2.0 de TinyOS.

- Se comprobó que cuando se tiene una red IEEE 802.15.4/ZigBee operando en presencia de una red WI-FI configurada en canales interferentes, se presentan fenómenos como pérdida de paquetes y alteraciones en los niveles de RSSI.

Capítulo 8

Recomendaciones

- Teniendo en cuenta los resultados de las pruebas de potencia e indicadores de calidad del enlace, no se recomienda el uso de una potencia de transmisión inferior a -10 dBm para ninguno de los dos *motes* ya que no se garantiza un enlace de calidad.
- Se recomienda realizar la simulación de la prueba de potencia indoor usando diferentes herramientas software para comparar los resultados con los obtenidos al usar MATINDOOR y poder determinar si es adecuado usar esta herramienta en la planeación de redes de sensores inalámbricos.
- Para el desarrollo de proyectos futuros relacionados con el tema, es de alta necesidad contar con un analizador de espectros para la banda de los 2.4Ghz. De esta manera se pueden obtener resultados más precisos. Sería interesante hacer la comparación de los resultados de este proyecto con los resultados producidos al usar un analizador de espectros para tener una idea acerca de la confiabilidad de los datos obtenidos con las herramientas software de este proyecto.
- En el establecimiento de una red de sensores inalámbricos es conveniente usar un margen de seguridad en cuanto a la calidad del enlace. Es decir, es preferible usar una potencia de transmisión un poco más alta para lograr un radio mayor de cobertura y así evitar que los enlaces queden en los límites y no se arriesgue la calidad de la comunicación. El precio que se pagaría en este caso sería un aumento en el consumo de corriente y por lo tanto en la vida útil de las baterías.
- Es muy importante obtener la curva del ciclo útil para los *Telos B* y *Tmote Sky* similar a la mostrada en la figura 62.
- Se recomienda realizar un estudio con mas profundización acerca de la interferencia de redes IEEE 802.15.4 y redes IEEE 802.11 y 802.3, así como los efectos que producen otras fuentes de interferencia para la banda de 2.4 Ghz. Como punto de partida se recomienda remitirse al estudio realizado por la Universidad Nacional de Corea que se encuentra en la Bibliografía [11].

Bibliografía

- [1] Alagappan S, Hogya Z, AeroComm Inc. *Is ZigBee Ready For Industrial Networks?* The annual RF & microwave solutions update. www.rfglobalnet.com
- [2] Olivares T, Orozco L, López V, Bermejo P, Pedrón P. *Redes Inalámbricas de Sensores Ambientales*. Departamento de Informática, Universidad de Castilla – La Mancha, Campus Universitario s/n 02071 Albacete.
- [3] Rugeles Uribe J. *Redes De Sensores Inalámbricos: Diseño, Implementación Y Caracterización De Un Prototipo De Red Zigbee En Ambientes Indoor Y Outdoor*. Propuesta para tesis de maestría. Área electrónica. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.2006
- [4] Lönn J, Olsson J. *ZigBee for Wireless Networking*. Department of Science and Technology. Linkopings Universitet. Sweden. 03-15-2005.
- [5] Römer, Kay; Friedemann Mattern (December 2004). "[The Design Space of Wireless Sensor Networks](#)". *IEEE Wireless Communications* .
- [6] Thomas Haenselmann (2006-04-05). "[Sensornetworks](#)". GFDL Wireless Sensor Network textbook. Retrieved on [2006-08-29](#).
- [7] Mote IV Corporation. "*Tmote Connect, Wireless Gateway Appliance Software. Access Tmote wireless sensor modules through Ethernet with MoteIV's tmote connect gateway software*". Datasheet. 2/6/2006. <http://www.moteiv.com/products-tmoteconnect.php>
- [8] Akyildiz I, Wang X, Wang W. "*Wireless mesh networks: a survey*". School of Electrical and Computer Engineering. Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, USA. December 20 – 2004.
- [9] Universidad de Clarson, New York. Proyecto de monitoreo de puentes <http://blog.moteiv.com/archives/applications/>
- [10] Aplicaciones de Redes de Sensores Inalámbricos. Proyecto FIRE. <http://www.sensorsmag.com/sensors/article/articleDetail.jsp?id=375570>
- [11] Soo Young Shin, Hong Seong Park, Sunghyun Choi, Wook Hyun Kwon. "*Packet Error Rate Analysis of IEEE 802.15.4 under IEEE 802.11b Interference*". School of Engineering & Computer Science. Seoul National University. Seoul, Korea.
- [12] M. Petrova, J. Riihijärvi, P. Mähönen and S. Labella. "*Performance Study of IEEE 802.15.4 Using Measurements and simulations*". Department of Wireless Networks. RWTH Aachen University. Aachen, Germany.

- [13] Lönn J, Olsson J. “ZigBee™ for Wireless Networking”. Department of Science and Technology. Linkopings Universitet. Sweden. 03-15-2005.
- [14] ZigBee™ Alliance web site <http://www.ZigBee™.org/en/index.asp>
- [15] ZigBee™ Alliance. “ZigBee™ Specification. Last Updated December 2006” Document 053474r13. <http://www.ZigBee™.org>
- [16] W.Craig. “ZigBee™: Wireless Control That Simply Works”. Program Manager Wireless Communications. ZMD America, Inc.
- [17] Chipcon Products from Texas Instruments. CC2420 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver. Hoja de datos. http://www.chipcon.com/files/CC2420_Data_Sheet_1_4.pdf
- [18] Weinberg D, Zhang J. " WIRELESS SENSOR NETWORK" Final Report. Advanced Computer Architecture. Dr. Yan Luo Teaching. University Of Massachusetts Lowell. USA. Pág. 3 - 12
- [19] Ramazanali H. “ Characterization and Evaluation of ZigBee modules ” Department of Science and Technology. Linkpings Universitet. SE-601 74 Norrkping, Sweden. 2006 – 02-17.
- [20] De Luque L, Díaz I, Vásquez S. “PREDICCIÓN DEL NIVEL DE SEÑAL RECIBIDA (RSSI) EN UNA RED INALÁMBRICA (WLAN 802.11b) MEDIANTE UN MODELO NEURONAL”. Proyecto para optar al título de Ingeniero Electrónico. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Santander, Colombia. 2005. Capítulo 3. Pág. 48
- [21] Beutel J. “ METRICS FOR SENSOR NETWORKS PLATFORMS”. Swiss Federal Institute of Technology (ETH). Zurich 8092, Zurich, Switzerland. Pág. 4 – 5. 2006.
- [22] Polastre J, Szewczyk R, Culler D. Computer Science Department. University of California, Berkeley. “TELOS: ENABLING ULTRA-LOW POWER WIRELESS RESEARCH”. Mote IV Corporation. Application Note 002. Abril 2005. Pág. 2 – 6.
- [23] 802.15.4™.IEEE Standard for Information Technology. Telecommunications and Information Exchange Between Systems. Local and Metropolitan Networks Specific Requirements. Part 15.4: Wireless Medium Access Control and Physical Layer Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks. PDF. IEEE Computer Society 2003. Anexo E, Páginas 637 – 648.
- [24] Mote IV Corporation. “Tmote Sky, Low Power Wireless Sensor Module. Ultra low power IEEE 802.15.4 compliant wireless sensor module. Humidity, light, and temperature sensors with USB”. Datasheet. 2/6/2006. <http://www.moteiv.com/products-tmotesky.php>

- [25] Tutorial TinyOS 2.0. *Lesson 16. Writing Low Power Sensing Applications*.
<http://www.tinyos.net/tinyos-2.x/doc/html/tutorial/lesson16.html>
- [26] Shnayder V, Hempstead M, Chen B, Allen G, Welsh M. “*Simulating the Power Consumption of Large-Scale Sensor Networks Applications*”. Division of Engineering and Applied Sciences. Harvard University.2004.
- [27] A. Sikora, “Coexistence of IEEE802.15.4 (Zig-Bee) with IEEE802.11 (WLAN), Bluetooth, and Microwave Ovens in 2.4 GHz ISM-Band,” *web document*, <http://www.ba-loerrach.de/stzedn/>, 2004.
- [28] I. Howitt and J.A. Gutierrez, “IEEE 802.15.4 low rate - wireless personal area network coexistence issues,” *IEEE Wireless Communications and Networking*, vol. 3, pp. 1481 – 1486, 2003.
- [29] Web Site de la empresa Mote IV <http://www.moteiv.com/>
- [30] Crossbow Technology Inc. Web Site: <http://www.xbow.com>
- [31] Web Site Tiny OS Open Forum <http://www.tinyos.net>
- [32] Castellanos E, Talero J, Rugeles J. Ortega H. “*Análisis de Propagación Electromagnética en Espacios Cerrados: Herramienta Software en Matlab para Predicción y simulación*”.Grupo RadioGIS. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia.

Anexos

Anexo A. Herramientas Java usadas por TinyOS

Las herramientas Java son líneas de comando usadas por las aplicaciones TinyOS para establecer una comunicación entre el computador donde se encuentra instalada la interfaz de usuario y la red inalámbrica a través de un *mote* que se instala en el puerto USB. Las herramientas usadas en este proyecto fueron:

1. Habilitar un puerto USB para transmitir información

```
export MOTECOM=serial@<serial_port>:<mote_platform>
```

2. Iniciar el Osciloscopio

```
Java net.tinyos.oscope.oscilloscope
```

3. Envío de instrucciones

```
Java net.tinyos.tools.BcastInject <command>
```

4. Recepción de datos provenientes de un *mote*

```
Java net.tinyos.tools.Listen
```

5. Inicio de transmisión serie de datos a través de un puerto

```
java net.tinyos.sf.SerialForwarder -com serial@<serial_port>:  
<mote_platform>
```

6. Visualización de la red de sensores: TRAWLER

```
MOTECOM=serial@<serial_port>:<mote_platform> java  
com.moteiv.trawler.Trawler
```

Para más información acerca de estas herramientas, remitirse al tutorial de TinyOS 1.1

La versión del sistema operativo TinyOS usada en este trabajo tiene asociado el nombre de los dispositivos con la tasa de transferencia a la que operan, de modo que en la variable `<serial_port>` se puede escribir la tasa de transferencia a la que operan.

Para el *Telos B* y el *Tmote Sky* el software establece una tasa de 57600 baudios.

Anexo B. Programación de los *motes*

1. Programación de una aplicación

Para programar una aplicación en un *mote*, este se conecta al puerto USB del computador donde está instalado el Sistema Operativo TinyOS. Después se selecciona la aplicación ingresando a la carpeta que contiene su código por medio de CygWin. Por ejemplo, la ruta para ingresar a la aplicación *CntToLeds* es:

```
C:\cygwin\opt\tinyos-1.x\apps\CntToLeds
```

Una vez dentro, se escriben las siguientes líneas de comandos

```
make <mote_platform>
```

después,

```
make <mote_platform> reinstall, <address>
```

En el espacio `<mote_platform>` se escribe **tmote** o **telosb** de acuerdo al *mote* que se está usando, en el espacio `<address>` se escribe un número decimal que indica la dirección del *mote* en la red. Si no se escribe nada, el *mote* es programado por defecto con la dirección 0.

2. Retransmisión de Paquetes

En el Capítulo 4 se necesita que algunos nodos ejecuten y retransmitan la instrucción recibida, y en otros que solo ejecuten la orden sin retransmitir.

Al igual que en el de todas las aplicaciones de TinyOS, en el directorio de *SimpleCmd* se encuentra el archivo *Makefile* en cuyo registro COMPONENT está contenida la opción que permite configurar el *mote* para que retransmita el paquete después de procesarlo.

Para retransmitir el paquete se configura el *Makefile* de la siguiente manera:

```
#PLATFORMS=mica mica2 mica2dot micaz pc
#COMPONENT=SimpleCmd
COMPONENT=Bcast
include ../Makerules
```

Para solo recibir sin retransmitir:

```
#PLATFORMS=mica mica2 mica2dot micaz pc
#COMPONENT=SimpleCmd
COMPONENT= SimpleCmd
include ../Makerules
```

3. Envío de instrucciones desde el PC hasta un nodo de red

En el Capítulo 4 se usa un *mote* programado con la aplicación TOSBase que actúa como gateway entre la red inalámbrica y la interfaz de usuario Windows del PC al cuál se conecta el *mote* a través del puerto USB. A continuación se describe el proceso de que incluye la programación de la aplicación en el *mote* y del establecimiento de la comunicación usando algunas herramientas Java.

Programación del *mote* gateway de la prueba de latencia

INICIO: como TOSBase va a quedar en un *tmote*, se debe entrar a la carpeta de aplicaciones para MOTEIV

```
CPS31@LABELE36 /opt
$ cd moteiv
```

```
CPS31@LABELE36 /opt/moteiv
$ dir
apps doc tinyos-1.x tools tos
```

```
CPS31@LABELE36 /opt/moteiv
$ cd apps
```

```
CPS31@LABELE36 /opt/moteiv/apps
$ cd TOSBase
```

SE INSTALA EL TOSBASE EN EL *TMOTE SKY*

```
CPS31@LABELE36 /opt/moteiv/apps/TOSBase
$ make tmote
```

```
mkdir -p build/tmote
  compiled TOSBase to build/tmote/main.exe
      14148 bytes in ROM
      3893 bytes in RAM
msp430-objcopy --output-target=ihex build/tmote/main.exe
build/tmote/main.ihex
  writing TOS image
```

```
CPS31@LABELE36 /opt/moteiv/apps/TOSBase
```

```
$ make tmote reinstall
cp build/tmote/main.ihex build/tmote/main.ihex.out
  installing tmote bootloader with application using bsl
tmote-bsl -c auto -e -p
C:/cygwin/opt/moteiv/tos/lib/Deluge/TOSBoot/build/tmote/
main.ihex -p build/tmote/main.ihex.out -r --telosb
Using mote M4AA770S on port COM4.
Mass erase.
Program image
C:/cygwin/opt/moteiv/tos/lib/Deluge/TOSBoot/build/tmote/main.ihex,
  1774 bytes.
Invoking BSL.
BSL version 1.61, MCU device id f16c.
Changing to 38400 baud.
Program.
Programmed 1774 bytes.
Program image build/tmote/main.ihex.out, 14148 bytes.
```

```

Program.
Programmed 14180 bytes.
Reset
rm -f build/tmote/main.exe.out build/tmote/main.ihex.out

A CONTINUACION SE BUSCA LA CARPETA DE JAVA EN TINYOS PARA ACTIVAR LA
TRANSMISION SERIAL DE LOS DATOS
CPS31@LABELE36 /opt
$ cd tinyos-1.x

CPS31@LABELE36 /opt/tinyos-1.x
$ cd tools

CPS31@LABELE36 /opt/tinyos-1.x/tools
$ cd java

CPS31@LABELE36 /opt/tinyos-1.x/tools/java
$ cd net

CPS31@LABELE36 /opt/tinyos-1.x/tools/java/net
$ cd tinyos

CPS31@LABELE36 /opt/tinyos-1.x/tools/java/net/tinyos
$ cd tools

CPS31@LABELE36 /opt/tinyos-1.x/tools/java/net/tinyos/tools
$ dir
BcastInject.class ListenRaw.class MsgReader.java SimpleCmdMsg.class
BcastInject.java ListenRaw.java PrintDiagMsgs.class SimpleCmdMsg.java
Deluge.class LogMsg.class PrintDiagMsgs.java bcast.properties
Deluge.java LogMsg.java README
Listen.class Makefile Send.class
Listen.java MsgReader.class Send.java

UNA VEZ UBICADOS EN LA CARPETA SE ACTIVA LA TRANSMISION SERIAL DE LOS DATOS
A TRAVES DEL PUERTO AL QUE ESTA CONECTADO EL MOTE , EN ESTE CASO EL COM4
CPS31@LABELE36 /opt/tinyos-1.x/tools/java/net/tinyos/tools
$ export MOTECOM=serial@COM4:tmote sky

POR ULTIMO SE EJECUTA LA INSTRUCCION JAVA BCASTINJECT DEFINIENDO LA ORDEN
PARA ENCENDER O APAGAR EL LED
CPS31@LABELE36 /opt/tinyos-1.x/tools/java/net/tinyos/tools
$ java net.tinyos.tools.BcastInject led_on
Sending payload: b 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
serial@COM4:57600: resynchronising

CPS31@LABELE36 /opt/tinyos-1.x/tools/java/net/tinyos/tools
$ java net.tinyos.tools.BcastInject led_off
Sending payload: c 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0
serial@COM4:57600: resynchronising

CPS31@LABELE36 /opt/tinyos-1.x/tools/java/net/tinyos/tools
$ java net.tinyos.tools.BcastInject led_on
Sending payload: d 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
serial@COM4:57600: resynchronising

CPS31@LABELE36 /opt/tinyos-1.x/tools/java/net/tinyos/tools
$

```

Anexo C. Aplicaciones TinyOS usadas en el proyecto

Estas son las aplicaciones que se programaron en los *motes* durante del proyecto. Están tomadas directamente de las librerías de TinyOS 1.1. Para ver la descripción de las demás aplicaciones es necesario entrar a la carpeta de cada una de ellas y abrir el archivo *Readme* con un editor de texto como WORDPAD.

CntToLeds
README for CntToLeds Author/Contact: tinyos-help@millennium.berkeley.edu
Description: CntToLeds maintains a counter on a 4Hz timer and displays the lowest three bits of the counter value. The red LED is the least significant of the bits, while the yellow is the most significant.
Tools: None.
Known bugs/limitations: None.

CntToLedsAndRfm
README for CntToLedsAndRfm Author/Contact: tinyos-help@millennium.berkeley.edu
Description: CntToLedsAndRfm maintains a counter on a 4Hz timer; it displays the lowest three bits of the counter value on its LEDs. The red LED is the least significant of the bits, while the yellow is the most significant. It also sends out each counter value in an IntMsg AM packet.
Tools: None.
Known bugs/limitations: None.

CntToRfm

README for CntToRfm

Author/Contact: tinuos-help@millennium.berkeley.edu

Description:

CntToLeds maintains a counter on a 4Hz timer and sends out the value of the counter in an IntMsg AM packet on each increment.

Tools:

None.

Known bugs/limitations:

None.

RfmToLeds

README for RfmToLeds

Author/Contact: tinuos-help@millennium.berkeley.edu

Description:

RfmToLeds listens for messages of type IntMsg. When it receives one, it sets its LEDs to the lowest three bits of the received value. Combined with CntToRfm or CntToLedsAndRfm, this is a simple test of TinyOS networking.

Tools:

None.

Known bugs/limitations:

None.

SimpleCmd and Bcast

README for SimpleCmd and Bcast
Author/Contact: tinyos-help@millennium.berkeley.edu

Description:

This directory contains two Tiny OS applications: SimpleCmd and Bcast.

SimpleCmd --- handles AM message type 8. This type of message is typically

a command from a PC that is connected to the base station.

Currently SimpleCmd only support command 4 commands:

- led_on --- turn the yellow LED on
- led_off -- turn the yellow LED off
- radio_quieter --- decrease the input to RFM.
- radio_louder --- increase the input to RFM

Bcast --- can process a command as SimpleCmd does and forward a new command over RFM to other *notes*.

This application is part of Tiny OS tutorial.

Tools:

`net.tinyos.sf.SerialForward`
`net.tinyos.tools.BcastInject`

These PC tools are used to inject a Am message wich contains a command to the SimpleCmd module

Known bugs/limitations:

Only 4 commands as described above are supported.

TOSBase

README for TOSBase
Author/Contact: tinyos-help@millennium.berkeley.edu

Description:

TOSBase is an application that acts as a simple bridge between the serial and radio links.

TOSBase will copy its compiled-in group ID to messages moving from the serial link to the radio, and will filter out incoming radio messages that do not contain that group ID.

TOSBase includes queues in both directions, with a guarantee that once a message enters a queue, it will eventually leave on the other interface. The queues allow the TOSBase to handle load spikes more gracefully.

TOSBase acknowledges a message arriving over the serial link only if

that message was successfully enqueued for delivery to the radio link.

The LEDES are programmed to toggle as follows:

RED Toggle - Message bridged from serial to radio
GREEN Toggle - Message bridged from radio to serial
YELLOW/BLUE Toggle - Dropped message due to queue overflow
 in either direction

Tools:

tools/java/net/tinyos/sf/SerialForwarder.

See doc/serialcomm/index.html for more information using these tools.

Known bugs/limitations:

As always, a task post failure somewhere in the serial or radio stacks may cause the TOSBase to hang. The chance of this is lessened by including the CFLAGS += -DTOSH_MAX_TASKS_LOG2=8 line in the TOSBase Makefile, incleasing the size of the task queue to 256.

Sense

README for Sense

Author/Contact: tinyos-help@millennium.berkeley.edu

Description:

Sense is an application used in Lesson 2 in tutorial. It periodically samples the photo sensor and displays the highest 3 bits of the raw ADC light reading to the LEDs, with RED being the most significant bit and YELLOW being the least significant bit.

Tools:

None

Known bugs/limitations:

None

SenseTask

README for SenseTask
Author/Contact: tinyos-help@millennium.berkeley.edu

Description:

SenseTask is an application in Lesson 3 of the tutorial. It periodically samples the photo sensor, posts a task to compute the average of recent raw samples, and displays the highest 3 bits of the average to the LEDs, with RED being the most significant bit and YELLOW being the least significant bit.

Tools:

None

Known bugs/limitations:None

OscilloscopeRF

README for Moteiv's OscilloscopeRF application on Tmote Sky modules
Author/Contact: support@moteiv.com

Description:

The Oscilloscope TmoteSky application senses all of the sensors on Moteiv's Tmote Sky modules and communicates the sensor values over the radio to a base station running the TOSBase application.

Supported sensors:

- Sensirion Relative Humidity Sensor
- Sensirion Temperature Sensor
- Hamamatsu Photosynthetically Active Radiation Light Sensor
- Hamamatsu Total Solar Radiation Light Sensor
- TI MSP430 Internal Temperature Sensor
- TI MSP430 Internal Voltage Sensor

Oscilloscope channel assignments:

- 0: Humidity
- 1: Temperature
- 2: TSR
- 3: PAR
- 4: InternalTemperature
- 5: InternalVoltage

Usage:

Install one mote with the Oscilloscope application.

Type: make tmote install,#

Where # is the address of the mote

Install a second mote (connected to the PC) with TOSBase.

Go to directory apps/TOSBase

Type: make tmote install

Run: java net.tinyos.oscope.oscilloscope.

If TOSBase is connected to COM3 (check using the motelist command)

then run:

MOTECOM=serial@COM3:tmote java

com.moteiv.oscope.oscilloscope

If no readings can be seen:

- check the "scrolling" checkbox
- click the "zoom out y" button to see values > 1024

Converting Tmote Sky sensor readings to SI units:

Lets start with channels 4 and 5 because they use the internal ADC.

The Internal ADC is 12-bits, so to convert the raw value to its corresponding voltage, you do:

(1) $\text{value}/4096 * V_{\text{ref}}$
where $V_{\text{ref}} = 1.5\text{V}$

Converting the internal temperature voltage to degrees is described in the Moteiv datasheet available from moteiv.com.

The internal voltage is reported in millivolts (mV), so no conversion is necessary.

The TSR and PAR sensors are also measured using the microcontrollers 12-bit ADC with $V_{\text{ref}}=1.5\text{V}$. The photodiodes create a current through a 100kOhm resistor. By calculating the raw voltage using equation (1) above,

convert the voltage into a current using $V=IR$:

(2) $I = V_{\text{sensor}} / 100,000$

where V_{sensor} is the voltage calculated with the raw value and converted

using equation (1). The Moteiv datasheet includes curves for converting the photodiode's current into light values (Lux).

Humidity and Temperature sensors are located in the external Sensirion sensor. Their readings can be converted to SI units as follows:

For Temperature, Oscilloscope returns a 14-bit value that can be converted to degrees Celsius (oC):

(3) $\text{temperature} = -39.60 + 0.01 * S_{\text{ot}}$

where S_{ot} is the raw output of the sensor.

Humidity is a 12-bit value that is not temperature compensated.

(4) $\text{humidity} = -4 + 0.0405 * S_{\text{Orh}} + (-2.8 * 10^{-6}) * (S_{\text{Orh}}^2)$

where S_{Orh} is the raw output of the relative humidity sensor

Using this calculation and the temperature measurement, you can correct the humidity measurement with temperature compensation:

(5) $\text{humidity_true} = (T_{\text{c}} - 25) * (0.01 + 0.00008 * S_{\text{Orh}}) + \text{humidity}$

where T_{c} is the temperature measured in oC from equation (3),

S_{Orh} is the raw output of the relative humidity sensor,

and humidity is the uncompensated value calculated in equation (4).

Tools:

moteiv/tools/java/com/moteiv/oscope

Known bugs/limitations:

None

This configuration describes the Oscilloscope application, a simple TinyOS app that periodically takes sensor readings and sends a group of readings over the radio. The default sensor used is the Photo component. This application uses the AM_OSCOPEMSG AM handler.

Delta

README for Delta, Moteiv's data collection multihop application
Author/Contact: support@moteiv.com

Description:

The Delta application is an example of a multihop data collection system.

By installing Delta on Moteiv's motes, the devices will sample their internal temperature sensor and report readings using a Multihop/Mesh topology. Compile and install using:

```
make tmote
make tmote install
```

Delta supports Tmote Sky and Tmote Invent. Compile for Tmote Invent using:

```
make tmoteinvent
make tmoteinvent install
```

Delta also supports low power operation using Moteiv's low power synchronization software. The default duty cycle of Moteiv's low power networks is 5%. To compile Delta with low power duty cycling, use the following command:

```
make tmote lowpower
```

The duty cycle for Delta is configurable at compile time. By specifying a value to the lowpower option, you can change the duty cycle. For example, to specify a duty cycle of 2%, compile with:

```
make tmote lowpower,2
```

After installing Delta on Moteiv motes, you have two options for the base station mote.

Option 1:

The base station is installed with address 0 using the following command:

```
make tmote reinstall,0
```

Any node with address 0 automatically configures itself to be the base station.

You can run any application to acquire data from node 0, such as Trawler (described below) or Listen (java net.tinyos.tools.Listen).

Option 2:

Any node with USB may be used as the base station, but it must first be informed by the PC that it is a base station. This procedure is completed by the Trawler java application. If your mote is connected on communications port COM5, start the Trawler application with the command:

```
MOTECOM=serial@COM5:tmote java com.moteiv.trawler.Trawler
```

Trawler will start, communicate with the mote connected to the PC, and start building the Multihop network.

NOTE: For nodes with addresses that are not 0, they will cease acting as the base station as soon as the Trawler application is closed or terminated.

Tools:

```
moteiv/tools/java/com/moteiv/trawler
```

Known bugs/limitations:

None

Anexo D. Programación del nivel de potencia del Radio CC2420

Como se mencionó en el Capítulo 1, la potencia del Radio-Transceiver Chipcon CC2420 es programable en 8 valores diferentes (Tabla D1).

Tabla D1. Niveles de Potencia Programable

PA_LEVEL	TXCTRL register	Output Power [dBm]	Current Consumption [mA]
31	0xA0FF	0	17.4
27	0xA0FB	-1	16.5
23	0xA0F7	-3	15.2
19	0xA0F3	-5	13.9
15	0xA0EF	-7	12.5
11	0xA0EB	-10	11.2
7	0xA0E7	-15	9.9
3	0xA0E3	-25	8.5

Fuente [17]

Para seleccionar uno de estos niveles hay que abrir el archivo de constantes *CC2420Const.h* con un editor de texto como WORDPAD. El archivo esta ubicado en la ruta:

C:\cygwin\opt\tinyos-1.x\tos\lib\CC2420Radio

En la tabla D1 se ve que cada nivel de potencia tiene asignado un numero decimal PA_LEVEL. Ese es el número que se ingresar en el archivo *CC2420Const.h*. Por ejemplo, para configurar el mote con una potencia de transmisión de 0 dBm, se escribe el número 31 en hexadecimal es decir 0x1F. Si se desea usar la mínima potencia, se escribe 3 en hexadecimal, o sea 0x03. A continuación se muestra la parte del código en donde se cambia el registro.

```
CC2420Const.h
* @author Joe Polastre
* @author Alan Broad
*/

#ifndef _CC2420CONST_H
#define _CC2420CONST_H

// times for the CC2420 in microseconds
enum {
    CC2420_TIME_BIT = 4,
    CC2420_TIME_BYTE = CC2420_TIME_BIT << 3,
    CC2420_TIME_SYMBOL = 16
};

#ifndef CC2420_DEF_RFPOWER
#define CC2420_DEF_RFPOWER      0x1F
#endif

#ifndef CC2420_DEF_CHANNEL
#define CC2420_DEF_CHANNEL      11 //channel select
#endif

// added for post-compile frequency changing
uint8_t CC2420_CHANNEL =      CC2420_DEF_CHANNEL;
uint8_t CC2420_RFPOWER =      CC2420_DEF_RFPOWER;
```

Anexo E. Cambio de frecuencia de un contador

En la sección 5.1 se habla de un cambio de frecuencia de envío de paquetes para las aplicaciones `CntToLedsAndRfm`, `CntToLeds` y `CntToRfm`. El proceso se describe a continuación.

Estas aplicaciones contienen un archivo llamado *Makefile* que consta de los siguientes campos:

Makefile
<pre>COMPONENT=CntToLedsAndRfm / CntToLeds / RfmToLeds PFLAGS += -I%T/lib/Counters include ../Makerules</pre>

De modo que cada aplicación se encuentra asociada a una interfase llamada *Counters* ubicada en la ruta:

`cygwin\opt\tinyos-1.x\tos\lib\Counters`.

Dentro de la carpeta *Counters* se encuentra un módulo llamado *Counters.nc* el cual contiene un registro para indicar el tiempo en milisegundos que debe transcurrir entre un valor del contador y el siguiente.

Counters.nc
<pre>* @author Jason Hill * @author David Gay * @author Philip Levis */ module Counter { provides { interface StdControl; } uses { interface Timer; interface IntOutput; } } implementation { int state; command result_t StdControl.init() { state = 1; return SUCCESS; } command result_t StdControl.start() { return call Timer.start(TIMER_REPEAT, 250); } }</pre>

```

command result_t StdControl.stop()
{
    return call Timer.stop();
}

event result_t Timer.fired()
{
    if (call IntOutput.output(state))
        state++;
    return SUCCESS;
}

event result_t IntOutput.outputComplete(result_t success)
{
    if(success == 0) state --;
    return SUCCESS;
}
}

```

Lo que se debe hacer es cambiar el valor 250 (preestablecido) de manera que se genere una nueva frecuencia de conteo y envío de paquetes.

Después de realizada esta operación, se guardan los cambios y queda todo listo para programar los *motes* con la aplicación.

Anexo F. Manual de programación TinyOS 2.0

Aunque en este trabajo se usó la versión 1.1, desde el 2006 está disponible la versión 2.0 de este sistema operativo, la cual presenta nuevas y mejores aplicaciones que serían de gran utilidad en futuros proyectos y ayudarían a mejorar los resultados de este proyecto.

El manual completo de programación en TinyOS 2.0 puede ser descargado ingresando a esta dirección:

<http://www.tinyos.net/tinyos-2.x/doc/pdf/tinyos-programming.pdf>

Anexo G. Formatos de las tramas de datos

Figura G1. Formato de un paquete de datos IEEE 802.15.4

Octets				2	1	4 to 20	n	2
MAC sublayer				Frame control	Data sequence number	Address information	Data payload	FCS
Octets	4	1	1	5+(4 to 20) + n				
PHY layer	Preamble sequence	State of frame delimiter	Frame length					

Figura G2. Formato general de una trama ZigBee. Capa de Red

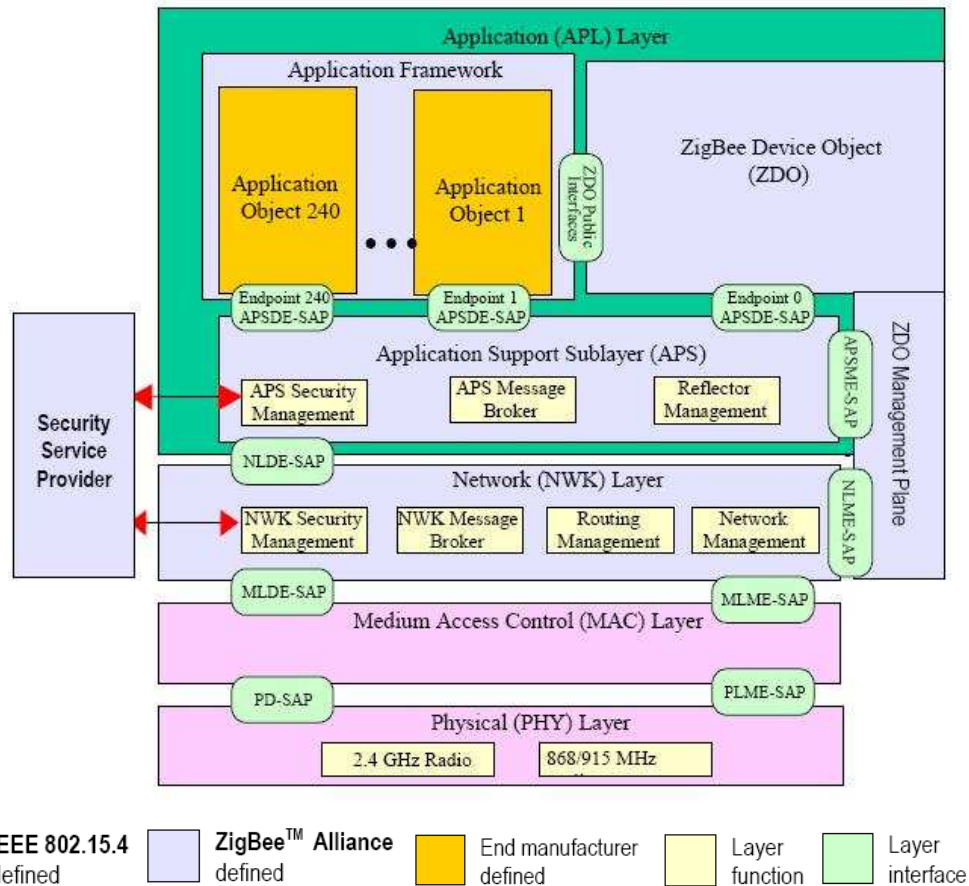
Octets: 2	2	2	1	1	Variable
Frame control	Destination Address	Source Address	Radius	Sequence Number	Frame Payload
Routing Fields					
NWK Header					NWK Payload

Figura G3. Formato general de una trama ZigBee. Capa de Aplicación

Octets: 2	0/1	0/1	0/2	0/1	Variable
Frame control	Destination end-point	Cluster Identifier	Profile Identifier	Source endpoint	Frame Payload
Addressing fields					
APS Header					APS payload

Anexo H. Estructura de las capas ZigBee

Figura H1. Estructura de las capas ZigBee.



La figura H1 muestra la estructura para la capa de aplicación conformada por:

- Sub-Capa de soporte de aplicaciones (APS)
- Objetos de dispositivos ZigBee™ (ZDO)
- Marco de aplicaciones.

Las responsabilidades de la sub capa APS incluyen:

- Mantener tablas de enlaces, definidas como la habilidad de juntar dos dispositivos basados en sus servicios y sus necesidades.
- Intercambiar mensajes entre dispositivos enlazados.

Las responsabilidades de los ZDO incluyen:

- Definir el rol del dispositivo dentro de la red (coordinador, router, dispositivo final).
- Iniciar las respuestas a las peticiones de enlace.
- Establecer una relación segura entre dispositivos de red.
- Descubrir dispositivos en la red y determinar cual servicio de aplicación ofrecen.

