

**EVALUACION Y ANALISIS DEL DESEMPEÑO A NIVEL FISICO DE UN  
SISTEMA DE COMUNICACIÓN DE DATOS PUNTO A PUNTO EN 2.4 GHz  
BASADO EN ZIGBEE®**



**LUIS MIGUEL ANAYA BENAVIDES  
RICARDO ANDRES CORDOBA SOLIS**

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Línea de investigación: Gestión Integrada de Redes, Servicios y  
Arquitecturas de Telecomunicaciones  
Popayán  
2012**

**EVALUACION Y ANALISIS DEL DESEMPEÑO A NIVEL FISICO DE UN  
SISTEMA DE COMUNICACIÓN DE DATOS PUNTO A PUNTO EN 2.4 GHz  
BASADO EN ZIGBEE®**



**LUIS MIGUEL ANAYA BENAVIDES  
RICARDO ANDRES CORDOBA SOLIS**

Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en  
Electrónica y Telecomunicaciones

**Directora  
Claudia Milena Hernández Bonilla**

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Línea de investigación: Gestión Integrada de Redes, Servicios y  
Arquitecturas de Telecomunicaciones  
Popayán  
2012**

# TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. JUSTIFICACIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.2.1. Objetivo General .....	2
1.2.2. Objetivos Específicos.....	2
1.3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO .....	3
CAPÍTULO 2. ZIGBEE®.....	4
2.1. CARACTERÍSTICAS DE ZIGBEE®.....	4
2.1.1. Definición de la Tecnología ZigBee® .....	4
2.1.2. Tipos de Dispositivos ZigBee®.....	5
2.1.3. Topologías Definidas para ZigBee®.....	6
2.2. NIVEL FÍSICO.....	8
2.2.1. Requerimientos Generales y Definiciones .....	8
2.2.2. Frecuencias de Operación.....	9
2.2.3. Especificaciones de los Servicios del Nivel Físico .....	10
2.2.4. Canalización.....	11
2.2.5. Formato de la Unidad de Datos de Protocolo del Nivel Físico (PPDU).....	12
2.3. ESPECIFICACIONES DEL NIVEL FÍSICO EN 2400 MHz.....	14
2.3.1. Velocidad de Transmisión de Datos .....	15
2.3.2. Modulación y Transmisión .....	15
2.3.3. Diagrama del Modulador.....	15
2.4. TRANSMISIÓN DEL SISTEMA ZIGBEE®.....	16
CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES .....	20
3.1. DIAGRAMA EN BLOQUES DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES.....	20
3.1.1. Transmisor.....	21
3.1.2. Canal .....	22
3.1.3. Receptor .....	22
3.1.4. Bloques de Medición.....	23
3.2. PLAN DE PRUEBAS .....	23
3.2.1. Potencia de Recepción .....	23
3.2.2. Frecuencia de Operación y Estabilidad en Frecuencia.....	24
3.2.3. Ancho de Banda.....	25
3.2.4. Tasa de Error de Bit del Sistema.....	25
3.2.5. Modelo de Propagación de Pendiente Única .....	27
3.2.6. Interferencia.....	28
3.3. RED ZIGBEE® Y ESCENARIOS DE PRUEBAS .....	28
3.3.1. Transmisión y Recepción de paquetes.....	29
3.3.2. Simulación.....	30
3.3.3. Potencia, Estabilidad en Frecuencia y Ancho de Banda .....	31
3.3.4. Medidas de Interferencia.....	32
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	33
4.1. SIMULACIONES DE COBERTURA CON <i>WIRELESS INSITE</i> ®.....	33
4.1.1. Escenario de Exteriores con <i>Wireless Insite</i> ®.....	33
4.1.2. Escenario de Interiores en <i>Wireless Insite</i> ®.....	37
4.2. EXPERIMENTACIÓN EN INTERIORES.....	45

4.2.1.	Atenuación en Recepción .....	45
4.2.2.	Potencia y Pérdidas Básicas .....	49
4.2.3.	Modelo de Propagación de Pendiente Única .....	50
4.3.	DESEMPEÑO DEL SISTEMA.....	54
4.3.1.	Desempeño en Interiores.....	54
4.3.2.	Desempeño en Exteriores.....	57
4.3.3.	Simulación en Matlab®.....	60
4.4.	ANÁLISIS DE FRECUENCIA .....	66
4.4.1.	Ancho de Banda.....	66
4.4.2.	Estabilidad en Frecuencia.....	74
4.5.	ANÁLISIS DE INTERFERENCIA .....	75
4.5.1.	Espectro de la Señal .....	75
4.5.2.	Transmisión de Datos .....	78
4.5.3.	Relación Portadora a Interferencia .....	83
CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....		86
5.1.	Conclusiones.....	86
5.2.	Trabajos Futuros.....	87
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....		89

# INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 Estructura de los niveles de ZigBee® .....	5
Figura 2.2 Topología en estrella .....	6
Figura 2.3 Topología en malla.....	7
Figura 2.4 Topología punto a punto.....	7
Figura 2.5 Topología en árbol .....	8
Figura 2.6 Modelo de referencia del nivel físico de ZigBee®.....	10
Figura 2.7 Distribución de canales en ZigBee®.....	11
Figura 2.8 Formato de la PPDU.....	13
Figura 2.9 Diagrama en bloques para la modulación .....	15
Figura 2.10 Proceso de ensanchamiento y modulación para el estándar IEEE 802.15.4 .....	17
Figura 2.11 Diagrama en bloques del modulador OQPSK.....	18
Figura 2.12 Diagrama en bloques del demodulador OQPSK .....	19
Figura 3.1 Diagrama en bloques del sistema de comunicaciones .....	20
Figura 3.2 Fuente de datos.....	21
Figura 3.3 Ensanchamiento de la señal.....	21
Figura 3.4 Configuración para la medición de la potencia de recepción.....	24
Figura 3.5 Configuración para la medición del espectro de frecuencia.....	24
Figura 3.6 Configuración para la medición de la estabilidad en frecuencia.....	24
Figura 3.7 Configuración para la medición del ancho de banda .....	25
Figura 3.8 Configuración para la medición de la potencia de recepción.....	27
Figura 3.9 Red punto a punto ZigBee® .....	29
Figura 4.1 Escenario de exteriores.....	33
Figura 4.2 Ruta de receptores en exteriores.....	34
Figura 4.3 Potencia de recepción vs distancia.....	35

Figura 4.4	Potencia de recepción de la ruta en exteriores .....	35
Figura 4.5	Potencia de recepción en la grilla de exteriores .....	36
Figura 4.6	(a) Ganancia de trayecto .....	37
Figura 4.6	(b) Pérdidas de trayecto .....	37
Figura 4.7	Plano del escenario de interiores .....	38
Figura 4.8	Pasillo segundo piso FIET .....	38
Figura 4.9	Ruta de receptores ZigBee® .....	39
Figura 4.10	Potencia recibida en interiores .....	41
Figura 4.11	Potencia de recepción y distancia.....	41
Figura 4.12	Ganancia de trayecto y distancia (Interiores) .....	42
Figura 4.13	Pérdidas de trayecto vs distancia (Interiores) .....	42
Figura 4.14	Grilla de receptores en interiores .....	43
Figura 4.15	Potencia de recepción en una grilla en interiores .....	44
Figura 4.16	(a) Ganancia de trayecto.....	44
Figura 4.16	(b) Pérdidas de trayecto .....	44
Figura 4.17	Atenuación vs distancia .....	46
Figura 4.18	Atenuación vs distancia en interiores .....	47
Figura 4.19	Atenuación real vs atenuación simulada (PTx = 2 dBm) .....	48
Figura 4.20	Atenuación real vs atenuación simulada (PTx = 20 dBm) .....	48
Figura 4.21	Pérdidas básicas medidas vs modelo de propagación (PTx = 2 dBm).....	51
Figura 4.22	Pérdidas básicas medidas vs modelo de propagación (PTx = 20 dBm) .....	52
Figura 4.23	Pérdidas básicas simuladas vs modelo de propagación .....	53
Figura 4.24	Estimación de pérdidas básicas de propagación en el pasillo .....	54
Figura 4.25	BER vs distancia (interiores).....	55
Figura 4.26	Desempeño del sistema en interiores (BER vs Eb/No) .....	56
Figura 4.27	PER vs distancia (exteriores) .....	58

Figura 4.28 BER vs distancia (exteriores) .....	58
Figura 4.29 Desempeño del sistema en exteriores (BER vs Eb/No) .....	60
Figura 4.30 Bloques de simulación ZigBee® en <i>Matlab</i> ®.....	60
Figura 4.31 Desempeño del sistema de la simulación en <i>Matlab</i> ®.....	63
Figura 4.32 Configuración de BERTool®.....	63
Figura 4.33 Configuración para el análisis teórico.....	64
Figura 4.34 Resultados del análisis teórico con la BERTool®.....	65
Figura 4.35 Configuración para el análisis semi-analitico.....	65
Figura 4.36 Resultados del análisis semi-analitico con la BERTool®.....	66
Figura 4.37 Ancho de banda de la señal .....	67
Figura 4.38 Mascara de densidad espectral de potencia .....	69
Figura 4.39 Mascara de densidad espectral de potencia y ancho de banda de la señal...69	
Figura 4.40 Relación de frecuencia y potencia .....	70
Figura 4.41 Relación de frecuencia y densidad espectral de potencia.....	71
Figura 4.42 Ancho de banda de la señal a 3 dB.....	71
Figura 4.43 Ancho de banda de la señal a 20 dB.....	72
Figura 4.44 Ancho de banda de la señal a 30 dB.....	73
Figura 4.45 Espectro de la señal, dispositivo transmisor a 25° C .....	74
Figura 4.46 Espectro de la señal, dispositivo transmisor a 66° C .....	75
Figura 4.47 Espectro de la señal sin interferencia PTx =20 dBm.....	76
Figura 4.48 Espectro de la señal de interferencia .....	76
Figura 4.49 Espectro de la señal transmitida por el transceptor más interferencia PTX = 2 dBm .....	77
Figura 4.50 Espectro de la señal transmitida por el transceptor más interferencia PTx = 20 dBm .....	78
Figura 4.51 Configuración del sistema de comunicaciones para la prueba 1 .....	78

Figura 4.52 Prueba de alcance con generador de interferencia entre transceptores.....	79
Figura 4.53 (a) Configuración con el generador de interferencia al lado del transmisor....	79
Figura 4.53 (b) Configuración con el generador de interferencia al lado del receptor.....	79
Figura 4.54 Prueba de alcance con generador de interferencia en los extremos de la comunicación .....	80
Figura 4.55 Ubicación de los dispositivos.....	80
Figura 4.56 Prueba de alcance con generador de interferencia fuera del trayecto del enlace $P_{tx} = 20$ dBm.....	81
Figura 4.57 Prueba de alcance con generador de interferencia fuera del trayecto del enlace $P_{Tx} = 2$ dBm.....	81
Figura 4.58 Prueba de alcance con generador de interferencia en un punto distante del enlace $P_{tx} = 20$ dBm.....	82
Figura 4.59 Prueba de alcance con generador de interferencia en un punto distante del enlace $P_{tx} = 2$ dBm .....	83
Figura 4.60 Enlace de radio y variación del dispositivo interferente .....	83
Figura 4.61 C/I vs BER.....	85

# INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1 Frecuencias de operación y velocidad de transmisión de datos.....	9
Tabla 2.2 Paginación y numeración de canal .....	12
Tabla 2.3 Tamaño del preámbulo .....	13
Tabla 2.4 Tamaño de SFD.....	14
Tabla 2.5 Formato del delimitador de inicio de trama .....	14
Tabla 2.6 Tipo de carga útil y tamaño de trama .....	14
Tabla 2.7 Mapeo de símbolo a chip.....	16
Tabla 3.1 Exponentes de pérdidas de propagación típicos para el modelo de pendiente única.....	28
Tabla 4.1 Parámetros del modelo de espacio libre .....	34
Tabla 4.2 Características de las antenas.....	39
Tabla 4.3 Parámetros del modelo <i>Full 3D</i> .....	40
Tabla 4.4 Valores de atenuación y potencia de recepción.....	45
Tabla 4.5 Pérdidas básicas para las medidas reales.....	49
Tabla 4.6 Pérdidas básicas para las medidas simuladas.....	49
Tabla 4.7 Pérdidas básicas de propagación para medidas reales.....	50
Tabla 4.8 Pérdidas básicas de propagación para medidas simuladas.....	51
Tabla 4.9 Resultado de la prueba de transmisión de paquetes en interiores.....	55
Tabla 4.10 Desempeño en interiores.....	55
Tabla 4.11 Potencia de recepción en interiores.....	56
Tabla 4.12 Resultado de la prueba de transmisión de paquetes en exteriores.....	57
Tabla 4.13 Potencia de recepción para exteriores en <i>Wireless Insite</i> ®.....	59
Tabla 4.14 Desempeño en exteriores .....	59
Tabla 4.15 Parámetros de configuración de la simulación .....	62

Tabla 4.16 Mascara de Potencia Espectral de Potencia .....	68
Tabla 4.17 Pérdidas básicas para el escenario de interferencia .....	84
Tabla 4.18 Potencia de Recepción para el escenario de interferencia.....	85
Tabla 4.19 Desempeño del sistema frente a interferencia .....	85

## INDICE DE ACRÓNIMOS

<b>ASK:</b>	Modulación por Desplazamiento de Amplitud ( <i>Amplitude Shift Keying</i> )
<b>AWGN:</b>	Ruido Blanco Aditivo Gaussiano ( <i>Additive White Gaussian Noise</i> )
<b>BER:</b>	Tasa de Error de Bit ( <i>Bit Error Rate</i> )
<b>BPSK</b>	Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria ( <i>Binary Phase Shift Keying</i> )
<b>CCA:</b>	Aseguramiento del Canal Libre ( <i>Clear Channel Assesment</i> )
<b>CSMA/CA:</b>	Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisiones ( <i>Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance</i> )
<b>DSSS:</b>	Espectro Ensanchado por Secuencia Directa ( <i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> )
<b>ED:</b>	Detección de Energía ( <i>Energy Detection</i> )
<b>FFD:</b>	Dispositivo de Funcionalidad Completa ( <i>Full Funtion-Device</i> )
<b>FHSS:</b>	Espectro Ensanchado por Saltos en Frecuencia ( <i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i> )
<b>IEEE:</b>	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos ( <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> )
<b>ISM:</b>	Industrial, Científica y Médica ( <i>Industrial, Scientific and Medical</i> )
<b>LQI:</b>	Indicador de la Calidad del Enlace ( <i>Link Quality Indicator</i> )
<b>LSB:</b>	Bit Menos Significativo ( <i>Least Significant Bit</i> )
<b>MAC:</b>	Control de Acceso al Medio ( <i>Medium Access Control</i> )
<b>MPDU:</b>	Unidad de Datos de Protocolo del Subnivel de Control de Acceso al Medio Control de Acceso al Medio ( <i>MAC Protocol Data Unit</i> )
<b>MPSK:</b>	Modulación por Desplazamiento de Fase Multinivel ( <i>M-ary Phase Shift Keying</i> )
<b>MSB:</b>	Bit Más Significativo ( <i>Most Significant Bit</i> )

<b>OQPSK:</b>	Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura con Desplazamiento Temporal ( <i>Offset Quadrature Phase Shift Keying</i> )
<b>OSI:</b>	Interconexión de Sistemas Abiertos ( <i>Open Systems Interconnection</i> )
<b>PAN</b>	Red de Área Personal (Personal Area Network)
<b>PER:</b>	Tasa de Error de Paquetes ( <i>Packet Error Rate</i> )
<b>PIB:</b>	Base de Información de la Red de Área Personal ( <i>PAN Information Base</i> )
<b>PHR:</b>	Encabezado de Nivel Físico ( <i>Physical Header</i> )
<b>PLME:</b>	Entidad de Gestión de Nivel Físico ( <i>Physical Layer Management Entity</i> )
<b>PLME-SAP:</b>	Punto de Acceso de Servicio de la Entidad de Gestión de Nivel Físico ( <i>Physical Layer Management Entity Service Access Point</i> )
<b>PN:</b>	Pseudo Ruido ( <i>Pseudo Noise</i> )
<b>PPDU:</b>	Unidad de Datos de Protocolo de Nivel Físico ( <i>Physical Protocol Data Unit</i> )
<b>PSDU:</b>	Unidad de Datos de Servicio de Nivel Físico ( <i>Physical Service Data Unit</i> )
<b>PSK:</b>	Modulación por Desplazamiento de Fase ( <i>Phase Shift Keying</i> )
<b>QPSK:</b>	Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura ( <i>Quadrature Phase Shift Keying</i> )
<b>RF:</b>	Radio Frecuencia ( <i>Radio Frequency</i> )
<b>RFD:</b>	Dispositivo de Funcionalidad Reducida ( <i>Reduced -Function Device</i> )
<b>SBR:</b>	Disparo y Rebote de Rayo ( <i>Shooting and Bouncing Ray</i> )
<b>SFD:</b>	Inicio de Delimitador de Trama ( <i>Start of Frame Delimeter</i> )
<b>SHR:</b>	Encabezado de Sincronización ( <i>Synchronization Header</i> )
<b>WPAN:</b>	Red de Área Personal Inalámbrica ( <i>Wireless Personal Area Network</i> )

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Para satisfacer la necesidad de los usuarios de compartir y transferir información de manera fácil, confiable y efectiva, el campo de las telecomunicaciones ha experimentado grandes avances y desarrollos causando un gran impacto en la evolución de la humanidad. Dentro de estos desarrollos se encuentran las tecnologías de comunicaciones inalámbricas, las cuales durante la última década han ganado popularidad en el mercado ya que han permitido la creación de redes que ofrecen ventajas en cuanto a movilidad, flexibilidad, escalabilidad y bajo costo de implementación, lo cual ha incrementado la productividad en las actividades laborales, académicas y domésticas. No obstante presentan algunas desventajas en cuanto a la disponibilidad espectral para la transmisión de señales, y debido a que emplean medios no guiados, son sensibles al desvanecimiento por multitrayectoria y efectos de los fenómenos como el ruido y la interferencia [1].

Entre las tecnologías inalámbricas que permiten aumentar la eficiencia de los recursos de la red, reducir costos y minimizar errores en la transmisión de datos se encuentra ZigBee®, la cual está basada en el estándar IEEE 802.15.4 para Redes de Área Personal Inalámbricas (WPAN, *Wireless Personal Area Network*). A diferencia de otras tecnologías como *Bluetooth* o *USB* inalámbricos, los dispositivos ZigBee® tienen la capacidad de crear una red en forma de malla y pueden contar con más de 65.000 nodos (Dispositivos Activos). Esta técnica permite que el corto alcance de uno de sus dispositivos pueda ser ampliado y multiplicado cubriendo un área mayor, además de un bajo consumo de energía y baterías de larga duración [2].

## 1.1. JUSTIFICACIÓN

ZigBee® es una tecnología de comunicaciones inalámbricas de corto alcance, lo que permite la transmisión de datos con un bajo consumo de energía y maneja requerimientos poco exigentes de tráfico, al emplear un protocolo simple y flexible [3]. Es de interés desde el punto de vista de la ingeniería de telecomunicaciones estudiar, evaluar y analizar el rendimiento de diferentes tecnologías de telecomunicaciones. Estos aspectos son fundamentales para la formación de

nuevos profesionales de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.

El análisis del sistema de comunicación de datos se realizó en distintos escenarios, utilizando el kit de desarrollo ZB2430 *Wireless Modules* de la tecnología ZigBee® fabricado por Laird Technologies® [4] llamado en el documento como kit ZB2430; adquirido como parte del proyecto interno titulado: “Prototipo de Comunicación de Datos Multipropósito vía Radio de corto alcance en 2.4 GHz”<sup>1</sup>, se eligió este kit ya que sus características técnicas permiten cumplir con los objetivos del trabajo de grado

Para el desarrollo del trabajo de grado se propusieron diferentes escenarios de prueba: un escenario de exteriores donde se observaron los efectos de atenuación en las señales transmitidas a diferentes distancias; un escenario de interiores, donde se analizó el efecto del multitrayecto; y un escenario con interferencia.

El trabajo comprende el análisis del desempeño del sistema de comunicación de datos, el efecto del ruido del canal en la señal, y la interferencia generada por dispositivos que operan en la misma banda de frecuencias. Estos resultados son de gran relevancia, ya que permiten determinar las condiciones necesarias para garantizar una comunicación punto a punto entre dispositivos ZigBee®.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivo General

Evaluar y analizar el desempeño a nivel físico de un sistema de comunicación de datos punto a punto en 2.4 GHz basado en ZigBee®.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Implementar un sistema de comunicación de datos punto a punto en 2.4 GHz basado en ZigBee®.
- Evaluar y analizar el desempeño a nivel físico del sistema de comunicación implementado en diferentes escenarios: espacio libre (exteriores) e interiores.

---

<sup>1</sup> Proyecto que lleva a cabo el Grupo de Radio e Inalámbricas (GRIAL) en conjunto con el Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT) del departamento de Telecomunicaciones de la facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, con el apoyo de la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Cauca.

- Evaluar y analizar el desempeño del sistema de comunicación ante interferencia.

### 1.3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO

El trabajo de grado está organizado de la siguiente manera:

En el capítulo 2, se describen las generalidades de la tecnología ZigBee®, su topología, el tipo de dispositivos y su funcionamiento, además se presentan los aspectos del nivel físico descritos por el estándar IEEE 802.15.4 y la modulación digital empleada.

En el capítulo 3, se presenta el diseño del sistema de comunicación de datos, donde se analizan aspectos como la definición del sistema y el plan de pruebas, presentando los diagramas de bloques y los escenarios de desarrollo del trabajo de grado.

En el capítulo 4, se realiza el análisis de los resultados de las simulaciones con el software *Wireless Insite*® y de las pruebas realizadas con el kit ZB2430 en distintos escenarios.

Por último en el capítulo 5, se presentan las conclusiones y trabajos futuros.

# CAPÍTULO 2. ZIGBEE®

En este capítulo se analizan las características generales de la tecnología ZigBee®, y se presentan las capacidades del estándar IEEE 802.15.4 a nivel físico en la banda de 2400 MHz.

## 2.1. CARACTERÍSTICAS DE ZIGBEE®

ZigBee® está conformado por un conjunto de protocolos de alto nivel, que permite implementar un sistema de comunicaciones de bajo costo y ahorro de energía. Esta tecnología se emplea para aplicaciones con requerimientos poco exigentes de tráfico de datos.

### 2.1.1. Definición de la Tecnología ZigBee®

ZigBee® es una tecnología de comunicaciones inalámbricas diseñada por *ZigBee Alliance®*, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN, *Wireless Personal Area Network*), el cual define un conjunto de protocolos para la comunicación inalámbrica. Comprende velocidades de transmisión de datos entre 20 y 250 Kbps, y su rango de alcance es de 10 a 75 m. Los dispositivos ZigBee® trabajan en las bandas de frecuencia para aplicaciones Industriales, Científicas y Médicas (ISM, *Industrial, Scientific and Medical*) las cuales se definen para ZigBee® así: 2400 MHz (a nivel Mundial), 868 MHz (Europa) y 915 MHz (Estados Unidos) [5].

Una red ZigBee® se encuentra conformada por nodos, cuya cantidad teórica puede alcanzar los 655.536 nodos agrupados en subredes de 255, que permanecen la mayor parte del tiempo en modo de hibernación o ahorro de energía, así los dispositivos de red pueden estar alimentados con una batería por un largo periodo de vida útil.

Como se observa en la figura 2.1 [5], la estructura del modelo ZigBee® sigue el estándar del modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, *Open Systems Interconnection*). El estándar IEEE 802.15.4 define el nivel físico y el subnivel de

Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*), los niveles superiores son definidos por la *ZigBee Alliance*®.

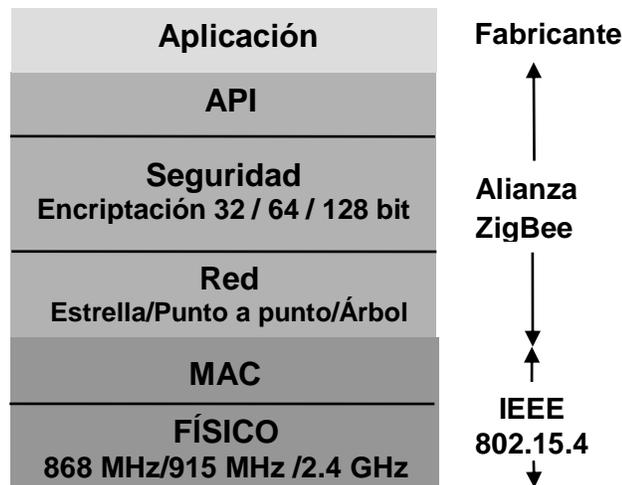


Figura 2.1 Estructura de los niveles de ZigBee®

### 2.1.2. Tipos de Dispositivos ZigBee®

Los dispositivos ZigBee® pueden ser definidos dependiendo de su función en la red, en:

- *Dispositivo de Funcionalidad Completa (FFD, Full Function Device)*: es el nodo activo de la red, capaz de recibir tramas, y puede funcionar como Coordinador o *Router ZigBee®*, o puede ser usado en dispositivos de red que interactúen con los usuarios.
- *Dispositivo de Funcionalidad Reducida (RFD, Reduced Function Device)*: es el nodo pasivo de la red, de capacidad y funcionalidad limitada con el objetivo de tener un bajo costo. Básicamente son los dispositivos finales de la red.

Un nodo ZigBee® (tanto activo como pasivo) reduce su consumo de energía gracias a que puede permanecer inactivo la mayor parte del tiempo. Cuando requiere iniciar una comunicación, el nodo ZigBee® es capaz de despertar en un tiempo muy corto, aproximadamente de 15 ms [6].

Los dispositivos también pueden ser clasificados según el papel que desempeñan en la red ZigBee®. Se definen tres tipos de dispositivos:

- *Router*: dispositivo capaz de almacenar paquetes para otros dispositivos, los entrega en el momento en el que estos dejen su estado de ahorro de energía y lo contacten. Un *Router* es un Dispositivo de Funcionalidad Completa (FFD) y como tal puede realizar el papel de un coordinador para los Dispositivos de Funcionalidad Reducida (RFD). Dentro de sus funciones está el proceso de enrutamiento, para que al recibir un paquete que no se encuentra destinado para el *Router* local, sean capaces de enviarlo a otro dispositivo en la red, el cual podría ser el destinatario final u otro *Router*.
- *Coordinador*: este dispositivo tiene como función controlar la red y las rutas que deben seguir los paquetes para comunicar los dispositivos pertenecientes a la red, requiere de memoria y capacidad de procesamiento; debe existir uno por red.
- *Dispositivo final*: es un Dispositivo de Funcionalidad Reducida (RFD), permanece en modo de ahorro de energía la mayor parte del tiempo, extendiendo la duración de su batería. Estos dispositivos no poseen la funcionalidad de enrutamiento de paquetes, por lo que necesitan de un nodo padre (un *Router* o el Coordinador de la red ZigBee®), el cual almacena los paquetes esperando que los dispositivos finales salgan de su estado de ahorro de energía para entregar dichas tramas [7].

### 2.1.3. Topologías Definidas para ZigBee®

Una red ZigBee® puede tener diferentes topologías: estrella, árbol, punto a punto, rejilla (malla).

En la topología en estrella, como se puede observar en la figura 2.2, un Dispositivo de Funcionalidad Completa (FFD) asume el papel de coordinador de red y es responsable de inicializar y mantener la red. Los dispositivos finales se comunican con el coordinador al cual se encuentran asociados.

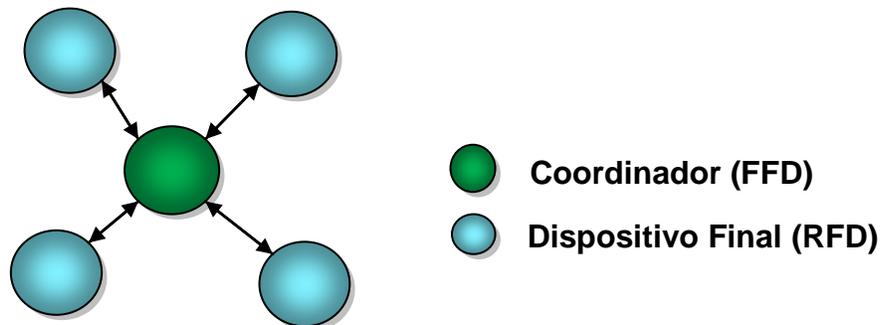


Figura 2.2 Topología en estrella

En la topología en malla, el coordinador ZigBee® es el responsable de inicializar la red, la cual puede ser ampliada a través del uso de *Routers* ZigBee®, como se puede apreciar en la figura 2.3. Para eliminar rutas que no sean óptimas, se utiliza un protocolo de pregunta-respuesta (*request-response*). La red puede tener hasta 254 nodos. Utilizando el direccionamiento local, se puede configurar teóricamente una red de más de 65.000 nodos.

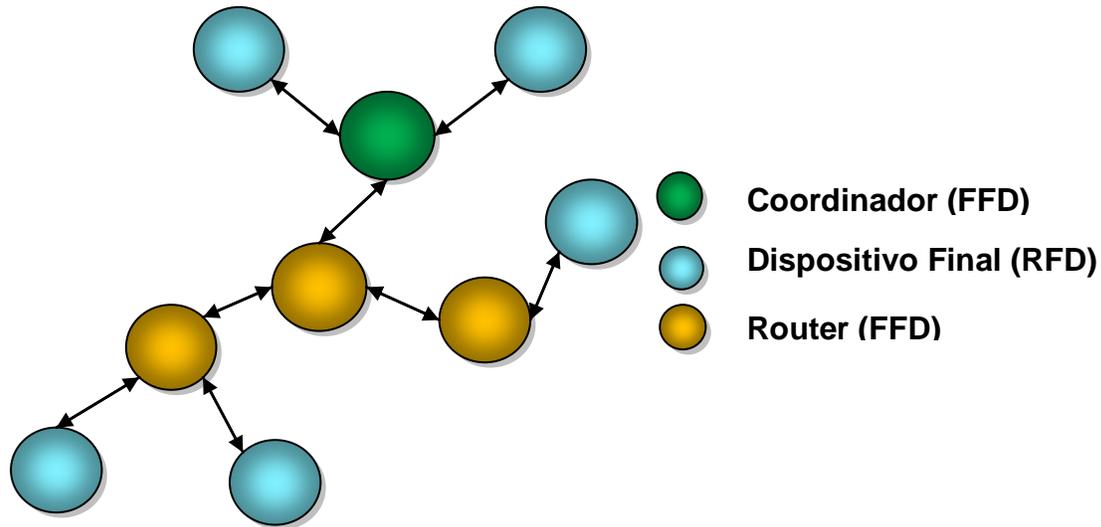


Figura 2.3 Topología en malla

Para la topología punto a punto, existe un solo Dispositivo de Funcionalidad Completa (FFD) que actúa como Coordinador. A diferencia de la topología en estrella, cualquier dispositivo puede comunicarse con otro siempre y cuando estén en el mismo rango de alcance, como se muestra en la figura 2.4.

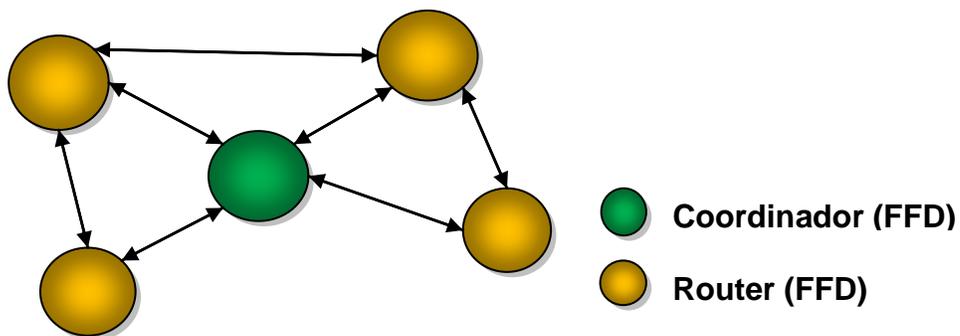


Figura 2.4 Topología punto a punto

En la figura 2.5 se observa la topología en árbol, la cual es un caso especial de la conexión punto a punto, en la cual muchos dispositivos son de Funcionalidad Completa (FFD) y los Dispositivos de Funcionalidad Reducida (RFD) pueden conectarse como un nodo único al final de la red [8].

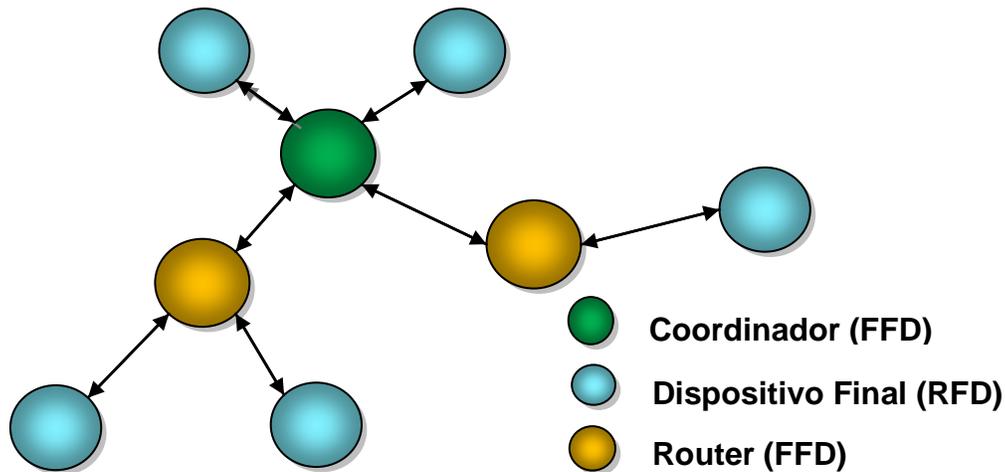


Figura 2.5 Topología en árbol

## 2.2. NIVEL FÍSICO

### 2.2.1. Requerimientos Generales y Definiciones

El nivel físico es responsable de las siguientes tareas:

- Activación y desactivación del transceptor de radio.
- Detección de Energía (ED, *Energy Detection*) dentro del canal.
- Aseguramiento del estado del enlace a través del Indicador de Calidad del Enlace (LQI, *Link Quality Indicator*) para paquetes recibidos.
- Aseguramiento del Canal Libre (CCA, *Clear Channel Assessment*) para el Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisiones (CSMA/CA, *Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*).
- Selección de frecuencias de canales.
- Transmisión y recepción de datos.

En el nivel físico se definen los diferentes esquemas de modulación y las técnicas de transmisión para cada banda de frecuencias del estándar IEEE 802.15.4. Se tienen cuatro niveles físicos diferenciados por la técnica de transmisión empleada, tres de estos están basados en la técnica de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS), en las bandas de 868 MHz y 915 MHz con Modulación por

Desplazamiento en Fase Binaria (BPSK, *Binary Phase Shift Keying*) y Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura con Desplazamiento Temporal (OQPSK, *Offset Quadrature Phase Shift Keying*) y en la banda de 2400 MHz donde se usa la Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura con Desplazamiento Temporal (OQPSK). Para la técnica de Espectro Ensanchado por Secuencia Paralela no secuencial (PSSS, *Parallel Sequence Spread Spectrum*), se define un nivel físico en las bandas de 868 MHz y 915 MHz con Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria (BPSK) y Modulación por Desplazamiento de Amplitud (ASK, *Amplitude Shift Keying*).

Los niveles físicos de ZigBee® tienen diferentes esquemas de modulación y el ancho de banda no es él mismo para los canales de cada banda, por esto la velocidad de transmisión de datos es distinta, en la banda de 2400 MHz la velocidad es de 250 Kbps, mientras que para las bandas 868 y 915 MHz la velocidad es de 20 y 40 Kbps respectivamente [3].

## 2.2.2. Frecuencias de Operación

A nivel físico el estándar IEEE 802.15.4 especifica cuatro bandas de frecuencia, con sus modulaciones y factores de ensanchamiento, las cuales se presentan en la tabla 2.1 [3].

Frecuencia (MHz)	Banda de frecuencia (MHz)	Parámetros de propagación		Parámetros de datos		
		Velocidad de chip (Kcps)	Modulación	Velocidad de bit (Kbps)	Velocidad de símbolo (Ksps)	Símbolos
868/915	868–868.6	300	BPSK	20	20	Binario
	902-928	600	BPSK	40	40	Binario
868/915 (Opcional)	868–868.6	400	ASK	250	12.5	20-bit PSSS
	902-928	1600	ASK	250	50	5 bit PSSS
868/915 (Opcional)	868–868.6	400	OQPSK	100	25	16-ario Ortogonal <sup>2</sup> DSSS
	902-928	1000	OQPSK	250	62.5	16-ario Ortogonal DSSS
2400	2400-2483.5	2000	OQPSK	250	62.5	16-ario Ortogonal DSSS

**Tabla 2.1 Frecuencias de operación y velocidad de transmisión de datos**

La publicación del estándar en 2003 definió las bandas obligatorias, en 2006 la revisión añadió las bandas opcionales con nuevas modulaciones y factores de ensanchamiento. Las bandas de frecuencia disponibles se regulan a nivel regional y en general, la banda de 2400 MHz es la única disponible a nivel mundial sin

<sup>2</sup> Un símbolo 16-ario puede transmitir la información de cuatro dígitos binarios. Ortogonal se refiere a la correlación de las secuencias de Pseudo Ruido (PN) empleadas en el proceso de ensanchamiento de la señal.

necesidad de licencias, ni limitaciones de aplicación o ciclos de trabajo<sup>3</sup>; estas consideraciones la han llevado ser considerada como la banda principal de ZigBee® [3].

### 2.2.3. Especificaciones de los Servicios del Nivel Físico

El nivel físico es la interfaz entre el subnivel de Control de Acceso al Medio (MAC) y el radiocanal físico, a través del *firmware* de Radiofrecuencia (RF, *Radio Frequency*) y el *hardware* de Radiofrecuencia (RF). Conceptualmente tiene una Entidad de Gestión de Nivel Físico (PLME, *Physical Layer Management Entity*), la cual proporciona las interfaces de gestión a nivel de servicios para que las funciones de gestión puedan ser invocadas. La Entidad de Gestión de Nivel Físico (PLME) es responsable del mantenimiento de la base de datos de objetos pertenecientes al nivel físico, está se encuentra inmersa en la Base de Información de la Red de Área Personal de Nivel Físico (PIB, *PAN Information Base*) [3].

La figura 2.6 describe los componentes e interfaces del nivel físico definido para ZigBee® [3].

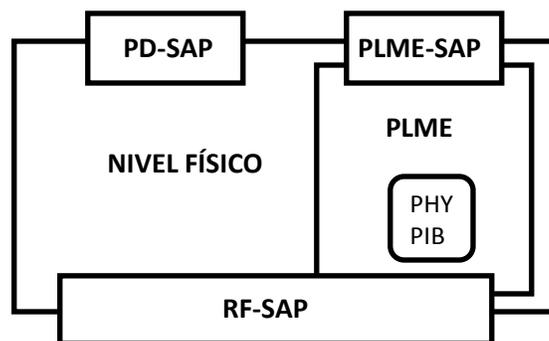


Figura 2.6 Modelo de referencia del nivel físico de ZigBee®

El nivel físico ofrece dos servicios: el servicio de datos de nivel físico el cual habilita la transmisión y la recepción de la Unidad de Datos de Protocolo de Nivel Físico (PPDU, *Physical Protocol Data Unit*) a través del radiocanal, y el servicio de gestión de nivel físico que realiza interconexión con el Punto de Acceso al Servicio de la Entidad de Gestión de Nivel Físico (PLME-SAP, *Physical Layer Management Entity Service Access Point*) [3].

Para los servicios del nivel físico se mantienen primitivas de servicio así:

---

<sup>3</sup> La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) estableció en las regulaciones de Radio las bandas ISM las cuales son de uso libre. Colombia como miembro de la Comisión Interamericana de Comunicaciones (CITEL) acogió estas medidas regulatorias a través de la resolución 689 del 21 de Abril de 2004 del Ministerio de Comunicaciones; el artículo 5 de esta resolución define a la banda (2400-2485 MHz) de uso sin licencia en Colombia.

- *Physical Data Service*: servicio de datos del nivel físico.
  - *PD-DATA*: recibe y envía paquetes entre el subnivel de Control de Acceso al Medio (MAC) y el nivel físico.
- *Physical Management Service*: servicio de gestión del nivel físico.
  - *PLME-CCA*: asegura el estado del canal.
  - *PLME-ED*: detecta la energía.
  - *PLME-GET/SET*: configura y recupera parámetros.
  - *PLME-TRX-ENABLE*: habilita y deshabilita el transmisor.

#### 2.2.4. Canalización

El estándar IEEE 802.15.4 define 27 canales repartidos entre las distintas bandas de frecuencia. Para la banda de 868 solo tiene asignado un canal entre 868 y 868.6 MHz, la banda de 915 MHz tiene 10 canales entre 902 y 928 MHz, finalmente en la banda de 2400 MHz están definidos 16 canales entre 2405 y 2480 MHz [3]. Los canales están numerados del 0 al 26 y la numeración comienza desde la banda más baja. En la figura 2.7 se observa la distribución de los canales para las bandas de frecuencias [9].

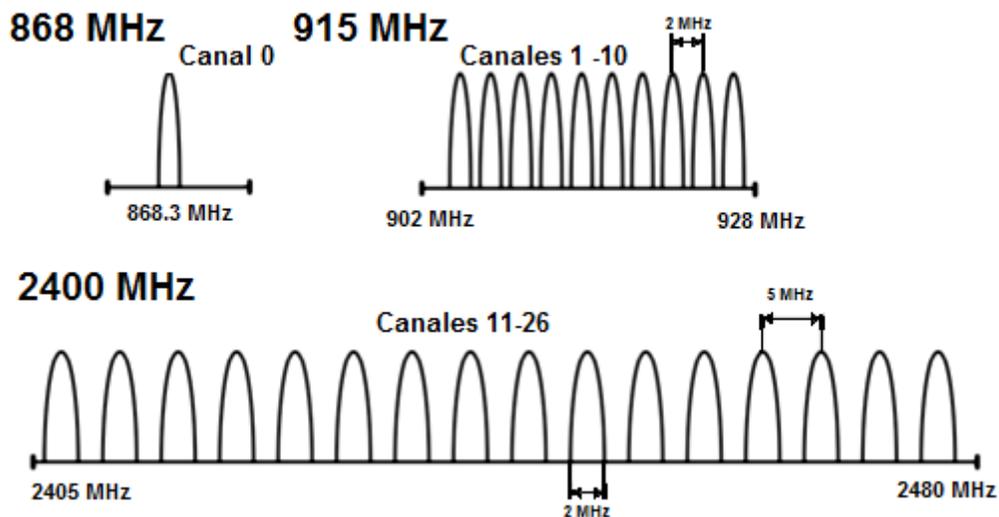


Figura 2.7 Distribución de canales en ZigBee®

La revisión del 2006 añadió nuevos canales en las bandas opcionales así, los canales 0-10 en las bandas 868/915 MHz usando la Modulación por

Desplazamiento en Amplitud (ASK) y los canales 0-10 en las bandas 868/915 MHz usando la Modulación por Desplazamiento Fase en Cuadratura con Desplazamiento Temporal (OQPSK) alcanzando un total de 49 canales [3]. Con los nuevos canales se excedía la capacidad del campo designado para la numeración de canales (32 bits) definido en la revisión del Estándar IEEE 802.15.4 del 2003, para superar esta limitación, se definió una nueva variable que designa la “pagina” (*Channel Page*), la cual al combinarse con el número de canal (*Logical Channel*) especifica el canal utilizado.

Los 5 Bits Más Significativos (MSB, *Most Significant Bit*) del mapa de 32 bits se utilizan como un valor entero para especificar 32 páginas de canal posibles. Los siguientes 27 bits del mapa se utilizan como una máscara para especificar los números de canal dentro de una página.

Las páginas de canal y número de canal asociado se muestran en la tabla 2.2, para el valor de pagina de canal igual a 0 (decimal) están asociados los canales originalmente estipulados en el estándar del 2003, para la pagina de canal 1 y 2 (decimal) están especificados los nuevos canales añadidos en la revisión del estándar del 2006.

Página de canal (decimal)	Página de canal (binario) ( $b_{31}, b_{30}, b_{29}, b_{28}, b_{27}$ )	Número de canal (decimal)	Descripción del número de canal
0	00000	0	Canal 0 está en la banda 868 MHz usando BPSK
		1 -10	Canal 1-10 está en la banda 915 MHz usando BPSK
		11-26	Canal 11-26 está en la banda 2400 MHz usando OQPSK
1	00001	0	Canal 0 está en la banda 868 MHz usando ASK
		1-10	Canal 1-10 está en la banda 915 MHz usando ASK
		11-26	Reservado
2	00010	0	Canal 0 está en la banda 868 MHz usando OQPSK
		1-10	Canal 1-10 está en la banda 915 MHz usando OQPSK
		11-26	Reservado
3-31	00011-11111	Reservado	Reservado

Tabla 2.2 Paginación y numeración de canal

### 2.2.5. Formato de la Unidad de Datos de Protocolo del Nivel Físico (PPDU)

Cada trama de Unidad de Datos de Protocolo del Nivel Físico (PPDU) consta de los siguientes elementos:

- Un Encabezado de Sincronización (SHR, *Synchronization Header*), el cual permite a un dispositivo receptor sincronizarse y acoplarse al flujo de datos.
- Un Encabezado de Nivel Físico (PHR, *Physical Header*).
- Una carga útil con un tamaño variable, la cual contiene la información de la trama del subnivel de Control de Acceso al Medio (MAC).

La estructura de la trama de Unidad de Datos de Protocolo del Nivel Físico se presenta en la figura 2.8.

Octetos				
4	1	1		Variable
Preámbulo	SFD	Tamaño de trama (7 bits)	Reservado	PSDU
SHR		PHR		Carga útil del nivel físico

Figura 2.8 Formato de la PPDU

### 2.2.5.1. Preámbulo

Es una secuencia de 32 ceros binarios usada por el transceptor para obtener sincronización de chip y sincronización de símbolo con una trama entrante. Su tamaño para la banda de 2400 MHz se presenta en la tabla 2.3.

PHY	Tamaño		Duración
2400-2483.5 MHz OQPSK	4 octetos	8 símbolos	128µs

Tabla 2.3 Tamaño del preámbulo

### 2.2.5.2. El delimitador de inicio de trama

El Delimitador de Inicio de Trama (SFD, *Start of Frame Delimeter*) indica el final del Encabezado de Sincronización (SHR) y el inicio de la trama de datos que contiene una secuencia específica de unos y ceros como se presenta en la tabla 2.4 (solo es válido para los niveles físicos que no utilizan la Modulación por Desplazamiento de Amplitud (ASK) descritas en el estándar) [3].

Bits: 0	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	0	0	1	0	1

Tabla 2.4 Formato del SFD

El tamaño del Delimitador de Inicio de Trama (SFD) es de un octeto de bits como se presenta en la tabla 2.5.

Frecuencia	Tamaño de SFD
2400-2483.5 MHz OQPSK	1 octeto

Tabla 2.5 Tamaño de SFD

### 2.2.5.3. Tamaño de trama

Campo de 7 bits que describe el número de octetos contenidos en la Unidad de Datos de Servicio del Nivel Físico (PSDU, *Physical Service Data Unit*). El valor de este campo está entre 0 y el valor máximo descrito por la variable “aMaxPHYPacketSize” contenida en la Base de Información de la Red de Área Personal de Nivel Físico (PIB). La tabla 2.6 presenta el tipo de carga útil y el valor del tamaño de trama [3].

Valores de tamaño de trama	Carga útil
0-4	Reservado
5	Unidad de Datos de Protocolo del Nivel de Control de Acceso al Medio (MPDU, <i>MAC Protocol Unit Data</i> ). Unidad de datos de Reconocimiento.
6-8	Reservado
9 – aMaxPHYPacketSize	Unidad de Datos de Protocolo del Nivel Control de Acceso al Medio (MPDU)

Tabla 2.6 Tipo de carga útil y valores de tamaño de trama

### 2.2.5.4. Unidad de datos de servicio del nivel físico

Tiene tamaño variable y lleva los datos de la trama del nivel físico [3].

## 2.3. ESPECIFICACIONES DEL NIVEL FÍSICO EN 2400 MHz

A continuación se definen las características básicas del estándar IEEE 802.15.4 en la banda de 2400 MHz [3].

### 2.3.1. Velocidad de Transmisión de Datos

La velocidad de transmisión de datos que se establece en el estándar IEEE 802.15.4 es de 250 Kbps.

### 2.3.2. Modulación y Transmisión

En 2400 MHz se utiliza una técnica de transmisión cuasi ortogonal de 16 niveles denominada Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS). Durante cada periodo de símbolo, 4 bits de información se usan para especificar una de las 16 secuencias pseudo-aleatorias o de Pseudo Ruido (PN, *Pseudo Noise*) también denominada chip. El chip resultante se modula empleando la técnica de Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura con Desplazamiento Temporal (OQPSK).

### 2.3.3. Diagrama del Modulador

El diagrama de referencia de los procesos que se siguen, durante el ensanchamiento de la señal y la modulación digital de datos en la tecnología ZigBee®, específicamente en la banda de 2400 MHz, se muestra en la figura 2.9 [3].

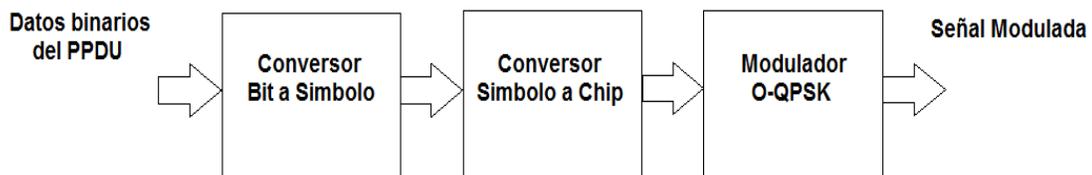


Figura 2.9 Diagrama en bloques para la modulación

#### 2.3.3.1. Mapeo de bit a símbolo

Del octeto se toman los 4 Bits Menos Significativos (LSB, *Least Significant Bits*) se mapean en un símbolo y los 4 Bits Más Significativos (MSB, *Most Significant Bits*) en el siguiente símbolo. Cada octeto de la Unidad de Datos de Protocolo del Nivel Físico (PPDU) se procesa secuencialmente a través de las funciones del diagrama en bloques visto en la figura 2.9. Se inicia en el campo preámbulo y termina con el último octeto de la trama de Unidad de Datos de Servicio del Nivel Físico (PSDU).

### 2.3.3.2. Mapeo de símbolo a chip

Cada símbolo de datos se mapea en una secuencia de Pseudo Ruido (PN) de 32 chips, estas secuencias se presentan en la tabla 2.7.

Símbolo de datos (Decimal)	Símbolo de datos (Binario) ( $b_0, b_1, b_2, b_3$ )	Valores de Chip ( $C_0, C_1, \dots, C_{30}, C_{31}$ )
0	0000	11011001110000110101001000101110
1	0001	11101101100111000011010100100010
2	0010	00101110110110011100001101010010
3	0011	00100010111011011001110000110101
4	0100	01010010001011101101100111000011
5	0101	00110101001000101110110110011100
6	0110	11000011010100100010111011011001
7	0111	10011100001101010010001011101101
8	1000	10001100100101100000011101111011
9	1001	10111000110010010110000001110111
10	1010	01111011100011001001011000000111
11	1011	01110111101110001100100101100000
12	1100	00000111011110111000110010010110
13	1101	01100000011101111011100011001001
14	1110	10010110000001110111101110001100
15	1111	11001001011000000111011110111000

Tabla 2.7 Mapeo de símbolo a chip

## 2.4. TRANSMISIÓN DEL SISTEMA ZIGBEE®

La tecnología ZigBee® emplea la técnica de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS), la cual consiste en multiplicar la señal por una secuencia pseudo-aleatoria de mayor velocidad lo cual produce un ensanchamiento en el margen de frecuencias ocupado por la señal. Y se cuenta con la Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura Con Desplazamiento Temporal (OQPSK) que se encarga del procesamiento en Radiofrecuencia (RF) para la transmisión de la señal en el canal de radio.

Los sistemas con espectro ensanchado se emplean para reducir el efecto de interferencia y dificultan la interceptación de las señales por usuarios no autorizados, brindan capacidades de múltiple acceso al canal, y se adaptan a trabajar en escenarios con desvanecimiento. Los métodos más utilizados son: la técnica de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS) y Espectro Ensanchado por Saltos en Frecuencia (FHSS, *Frequency Hopping Spread Spectrum*).

El Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS) genera una señal binaria aparentemente aleatoria con un mayor ancho de banda, el incremento del ancho

de banda depende de la velocidad de transmisión de datos de la secuencia pseudo-aleatoria. El desensanchamiento se efectúa en el receptor donde la señal recibida se compara de manera sincronizada con las secuencias pseudo-aleatorias presentadas en la tabla 2.7, al final de este proceso se recupera la señal original [9].

La ventaja de las Modulaciones por Desplazamiento de Fase (PSK, *Phase Shift Keying*) es que la potencia de todos los símbolos es la misma, por lo que se simplifica el diseño de los amplificadores y etapas receptoras, dado que la potencia de la fuente es constante [10].

La Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura con Desplazamiento Temporal (OQPSK), es una Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK, *Quadrature Phase Shift Keying*) de pulsos rectangulares, en la que se limita la máxima variación de fase instantánea a  $90^\circ$ . QPSK es un tipo de Modulación por Desplazamiento de Fase Múltiple (MPSK, *M-ary Phase Shift Keying*) en la que se tienen 4 niveles ( $M = 4$ ), es decir, la señal portadora de frecuencia  $\omega_c$  puede tener cuatro fases, y los datos de entrada binarios están compuestos por grupos de dos bits que reciben el nombre de dibit y producen cuatro posibles combinaciones: 00, 01, 10 y 11 [11].

Para los dispositivos de la tecnología ZigBee® que emplean la Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura con Desplazamiento Temporal (OQPSK), se tienen en cuenta la señal proveniente del ensanchador, donde cada chip tiene una duración de  $T_c$ , en el modulador las señales entran a los dos canales con una duración de  $2T_c$ , en el canal Q se presenta un retardo de la duración de chip ( $T_c$ ) respecto al chip del canal I, esto se muestra en la figura 2.10 [12].

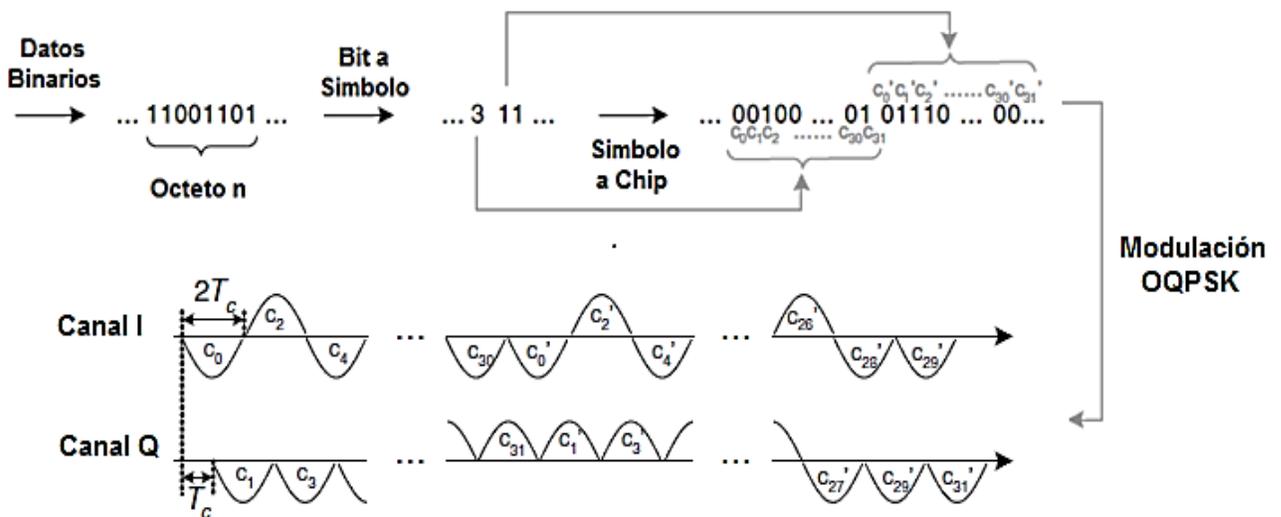


Figura 2.10 Proceso de ensanchamiento y modulación para el estándar IEEE 802.15.4

Una de las ventajas de emplear la Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura con Desplazamiento Temporal (OQPSK) es que el código dibit que entra al modulador no presenta cambios de 00 a 11 o de 10 a 01 y viceversa, limitando la máxima variación de fase de salida a  $90^\circ$ , el ancho de banda mínimo de esta modulación es el mismo ancho de banda mínimo de la Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK).

La figura 2.11 muestra un diagrama en bloques del modulador para la Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura con Desplazamiento Temporal (OQPSK). Al conversor serie paralelo se introduce en forma serial dos chips, donde salen simultáneamente los chips con el doble de duración ( $2T_c$ ), uno de ellos se dirige al canal I el cual modula una portadora en fase con el oscilador de referencia ( $\text{Cos}(W_c t)$ ), y el otro chip al canal Q, el cual modula una portadora que está desplazada en fase  $90^\circ$  ( $\text{Sen}(W_c t)$ ), y tiene un retardo de tiempo de medio periodo de la duración de un chip ( $T_c$ ) con la portadora de referencia, las señales resultantes pasan a un sumador lineal que combina las señales obtenidas y la señal resultante va a un filtro pasa banda [13].

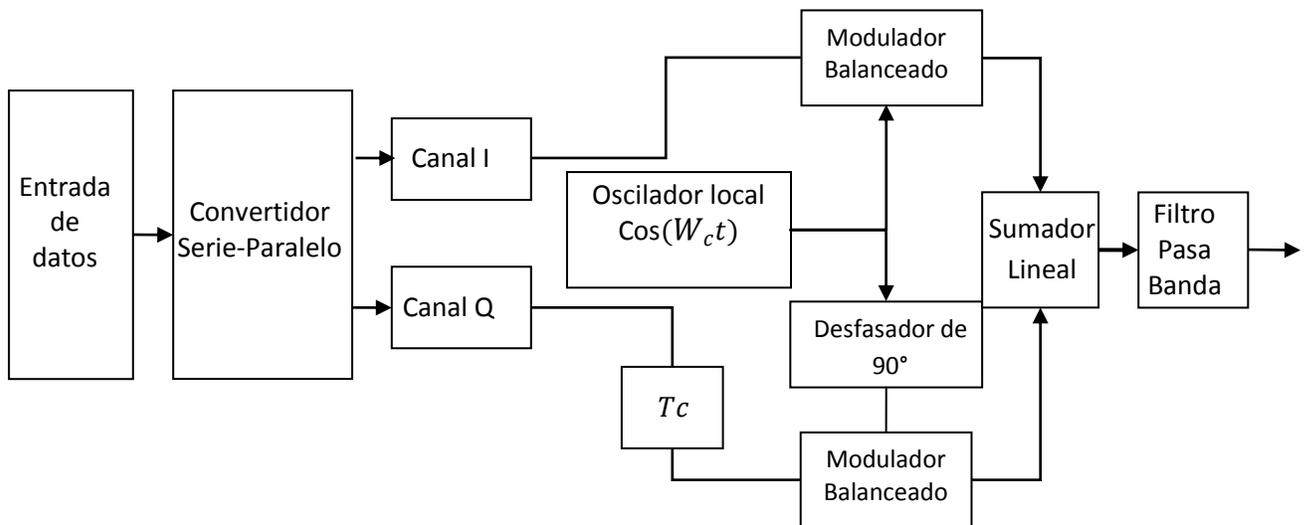


Figura 2.11 Diagrama en bloques del modulador OQPSK

El diagrama en bloques de la figura 2.12 representa el demodulador para la Modulación por Desplazamiento en Cuadratura con Desplazamiento Temporal (OQPSK). La señal de entrada es filtrada y se dirige al derivador de potencia, las señales resultantes se dirigen a los canales I y Q donde está el circuito de recuperación de la portadora, este reproduce la señal original del oscilador de la portadora de transmisión, para la sincronización correcta la señal en el canal I se retarda el periodo de duración de chip ( $T_c$ ), debido a que en la etapa de modulación la señal del canal Q fue retardada el mismo periodo de tiempo, las salidas de los canales I y Q se combinan para generar un flujo de datos binario.

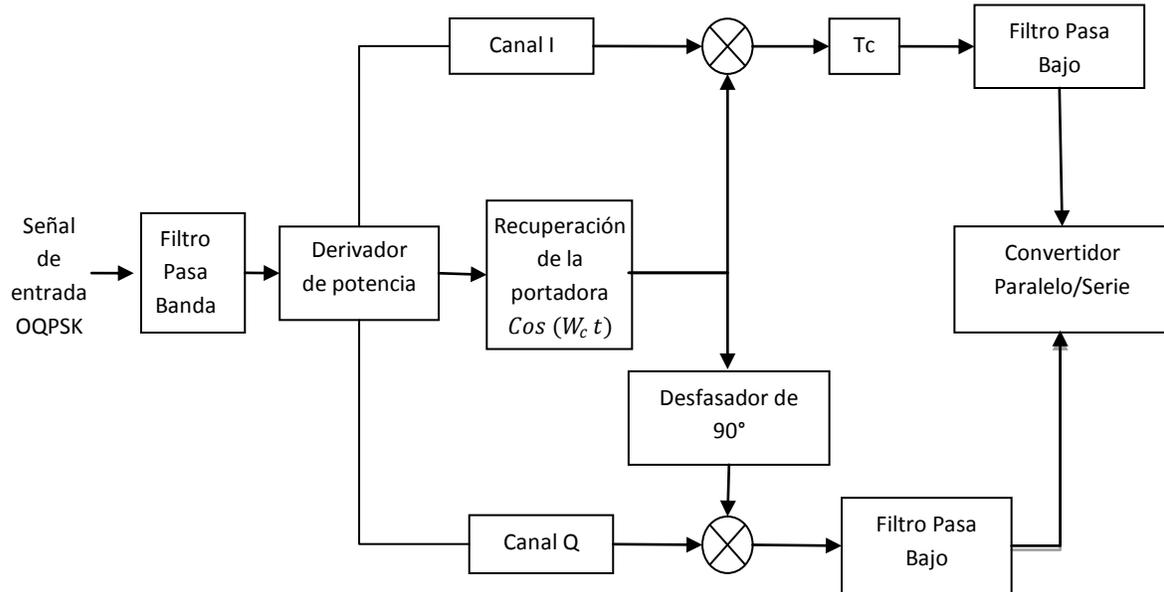


Figura 2.12 Diagrama en bloques del demodulador OQPSK

# CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES

Este capítulo presenta el diseño del sistema de comunicaciones en la banda de 2400 MHz utilizando el kit ZB2430 basado en ZigBee®, y el plan de pruebas ejecutado.

## 3.1. DIAGRAMA EN BLOQUES DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES

La figura 3.1 contiene el diagrama en bloques del sistema de comunicaciones que se utilizó para la transmisión de datos, empleando el kit ZB2430. En el diagrama existen dos procesos, la transmisión de los datos desde el origen y la recepción de datos en el dispositivo de destino, donde se involucra el canal y los dispositivos de medición.

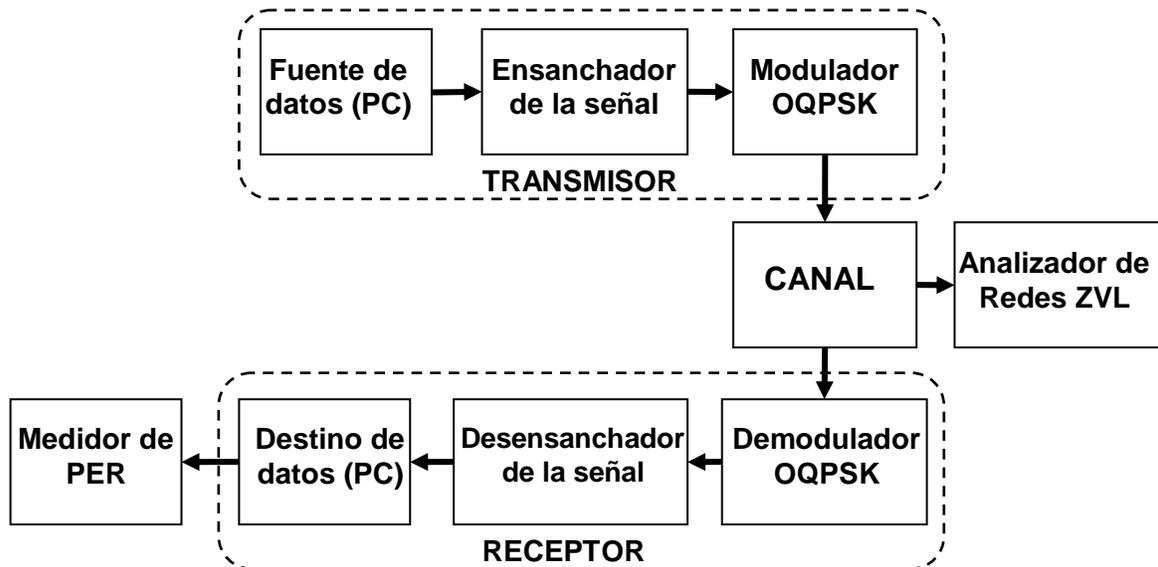


Figura 3.1 Diagrama en bloques del sistema de comunicaciones

En los siguientes numerales se realiza una descripción detallada de los bloques de la figura 3.1

### 3.1.1. Transmisor

A continuación se describen los bloques que hacen parte del proceso de transmisión de datos, siguiendo la secuencia descrita en la figura 3.1.

#### 3.1.1.1. Fuente de datos

Consta de dos partes, el generador de información y el generador de tramas, como se muestra en la figura 3.2.

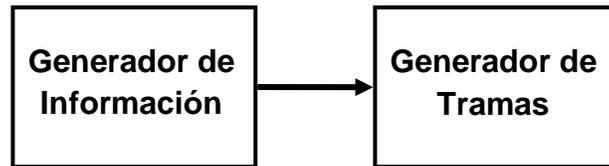


Figura 3.2 Fuente de datos

El generador de información es el dispositivo que inicia la transmisión y está conectado directamente al dispositivo ZigBee® (puede ser un tipo de sensor o un computador), el cual crea la información que se va transmitir a través del enlace. El generador del tramas es parte del equipo ZigBee®, el cual recibe la información, interpreta los datos y los convierte en tramas del nivel físico.

#### 3.1.1.2. Ensanchador de la Señal

Este bloque se divide en dos partes, un convertor de bit a símbolo y uno de símbolo a chip. Estos procesos se encargan de realizar el ensanchamiento de la señal, como se observa la figura 3.3 [3].

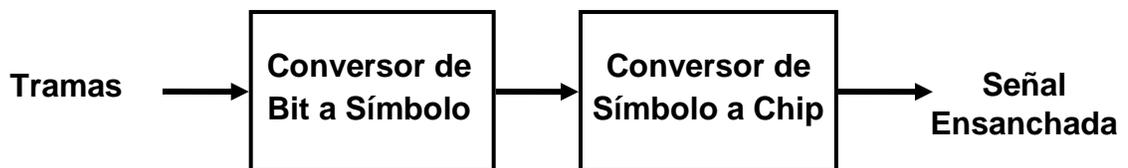


Figura 3.3 Ensanchamiento de la señal

### **3.1.1.3. Modulador por Desplazamiento de Fase en Cuadratura con Desplazamiento Temporal (OQPSK)**

Este bloque representa el esquema de modulación empleado por los dispositivos ZigBee®, en este caso es la Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura con Desplazamiento Temporal (OQPSK).

### **3.1.2. Canal**

En la implementación del sistema el aire es el medio de transmisión, por lo cual se emplean antenas para la transmisión y recepción de datos, la comunicación realizada a través de estos medios tiene ciertos inconvenientes provocados por la reflexión que sufre la señal en los obstáculos en el escenario. Además se debe considerar el espectro de frecuencias designado para cada tipo de comunicación y los dispositivos empleados; para la tecnología ZigBee® se tiene el rango de frecuencia de 2400 MHz.

### **3.1.3. Receptor**

En los siguientes numerales se explican los bloques correspondientes a la recepción de los datos provenientes del canal.

#### **3.1.3.1. Demodulador por Desplazamiento de Fase en Cuadratura con Desplazamiento Temporal (OQPSK)**

Bloque que permite recuperar la señal del canal, un filtro en la entrada del receptor reduce el ruido adicionado por el medio de transmisión, y la señal analógica se convierte en una señal de bits de información.

#### **3.1.3.2. Desensanchador de canal**

Bloque que recibe la señal demodulada, e inicia el desensanchamiento donde cada 32 chips recibidos son comparados con las 16 posibles secuencias pseudo-aleatorias utilizando la tabla 2.7, la secuencia con mayor similitud se utiliza para reconstruir las tramas de información.

#### **3.1.3.3. Destino de los datos**

Bloque que analiza y despliega los datos que recibe desde el desensanchador.

### 3.1.4. Bloques de Medición

Bloques que miden los parámetros del sistema de comunicaciones: potencia de recepción, espectro de la señal, y la Tasa de Error de Paquetes (PER, *Packet Error Rate*) de las transmisiones. A continuación se describen los elementos empleados para dichas mediciones.

#### 3.1.4.1. Analizador de redes ZVL R&S®

Equipo llamado en el documento analizador de redes, el cual muestra el espectro y mide la potencia en las componentes de frecuencias de la señal transmitida por el transceptor ZigBee®.

#### 3.1.4.2. Medidor de la Tasa de Error de Paquetes

En el receptor, el software que controla la comunicación de los dispositivos del kit, permite el conteo de paquetes erróneos. Con estos datos se obtiene la Tasa de Error de Paquetes (PER).

## 3.2. PLAN DE PRUEBAS

Las medidas realizadas en el sistema de comunicaciones son: potencia de recepción, espectro de la señal en condiciones de temperatura ambiente y frente a variaciones de temperatura, Tasa de Error de Paquete (PER), y desempeño del sistema frente a interferencia. En esta sección se describen dichas pruebas.

### 3.2.1. Potencia de Recepción

Las medidas de potencia de recepción se realizaron utilizando el sensor R&SNRP-Z22 conectado al analizador de redes, el cual trabaja en un rango de frecuencias entre 10 MHz y 18 GHz, y tiene un rango dinámico para la potencia en recepción entre -57 dBm y 33 dBm (2nW a 2W). Este dispositivo mide la potencia de la señal y muestra el valor en la pantalla del analizador de redes, teniendo en cuenta que la potencia de transmisión máxima del transceptor es de 20 dBm y la frecuencia central del canal utilizado es 2405 MHz (valores teóricos), la configuración de los dispositivos se muestra en la figura 3.4.

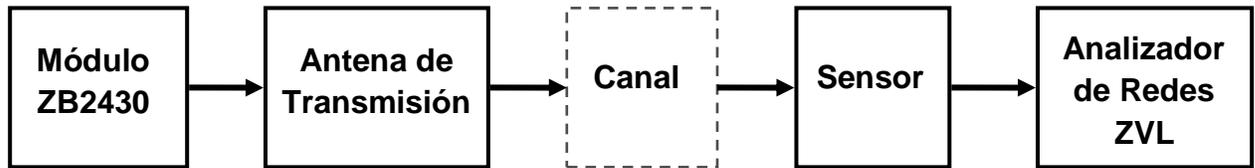


Figura 3.4 Configuración para la medición de la potencia de recepción

### 3.2.2. Frecuencia de Operación y Estabilidad en Frecuencia

Empleando el analizador de redes se visualiza el espectro de la señal. En este caso se analiza el canal 11 cuya frecuencia central está en 2405 MHz. El equipo debe ser configurado de tal forma que el rango de lectura sea adecuado para desplegar la señal en pantalla, la configuración de los dispositivos se presenta en la figura 3.5.

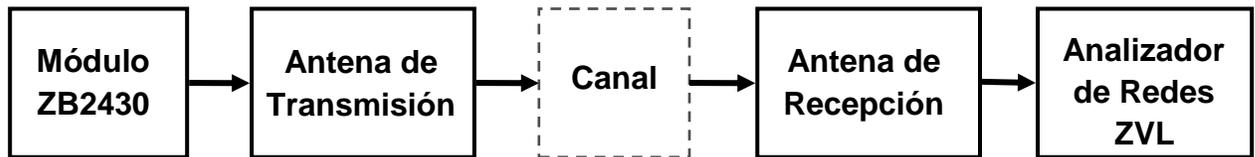


Figura 3.5 Configuración para la medición de la frecuencia de operación

Para determinar la estabilidad en frecuencia frente a la variación de temperatura, se ubica el transmisor de forma fija a una distancia adecuada para que el analizador de redes reciba la señal transmitida.

Para la variación de temperatura del transmisor se utilizó un equipo externo que alteró la temperatura del dispositivo. El incremento en temperatura se verificó utilizando comandos AT en el *software* de los dispositivos. Los elementos utilizados para la medición se presentan en la figura 3.6.

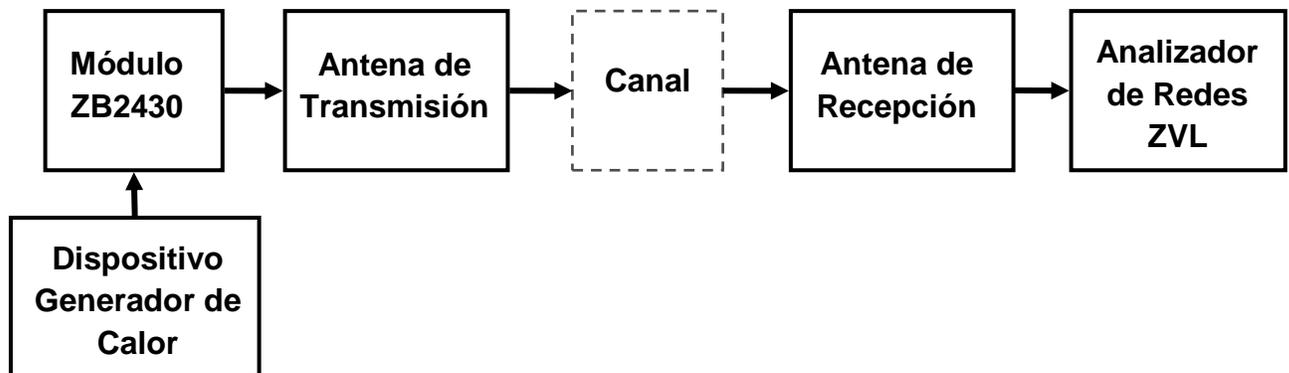


Figura 3.6 Configuración para la medición de la estabilidad en frecuencia

### 3.2.3. Ancho de Banda

Con el analizador de redes se determina el ancho de banda de la señal, cuya medida fue comparada con el ancho de banda teórico y el estipulado por el fabricante. La configuración en la figura 3.7 define los módulos utilizados para esta medición.

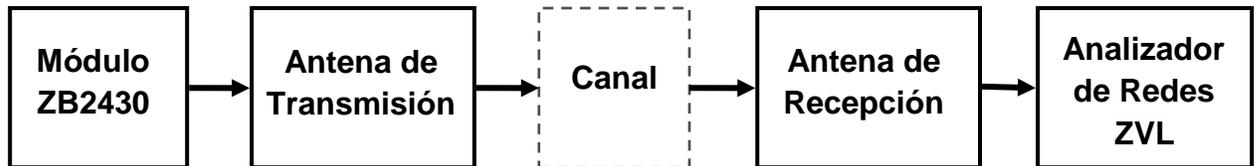


Figura 3.7 Configuración para la medición del ancho de banda

### 3.2.4. Tasa de Error de Bit del Sistema

La Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*) es uno de los parámetros más importantes en un sistema de comunicaciones. Este parámetro indica el número total de bits errados en recepción, como se expresa en la ecuación 3.1.

$$BER = \frac{\text{Número de bits errados}}{\text{Número de bits transmitidos}} \quad (3.1)$$

La herramienta *software* sirve para monitorear la integridad de los paquetes y despliega la cantidad de paquetes errados. Con este parámetro se obtiene la Tasa de Error de Paquete (PER), como se expresa en la ecuación 3.2.

$$PER = \frac{\text{Número de paquetes errados}}{\text{Número de paquetes transmitidos}} \quad (3.2)$$

La probabilidad de detectar correctamente un bit es igual a  $(1 - BER)$ . Dado que un paquete de datos contiene  $N$  bits, la probabilidad de paquete exitoso es  $(1 - BER)^n$ . Por lo tanto, la probabilidad de un paquete errado es  $1 - (1 - BER)^n$  como se expresa en la ecuación 3.3.

$$PER = 1 - (1 - BER)^n \quad (3.3)$$

Donde,  $n$  es el número de bits del paquete.

La Tasa de Error de Bit (BER) se obtiene de la ecuación 3.3 y se expresa como se indica en la ecuación 3.4.

$$\text{BER} = 1 - 10^{\frac{\log(1 - \text{PER})}{n}} \quad (3.4)$$

Para realizar un análisis completo del desempeño del sistema de comunicaciones es necesario calcular la Relación Energía de Bit a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_o$ ). Para lo cual se procede a calcular inicialmente el valor de ruido en ausencia de portadora, como se expresa en la ecuación 3.5.

$$N_o' = K \times T \quad (3.5)$$

Dónde:

$K = 1.380650 \times 10^{-23} \left[ \frac{\text{J}}{\text{K}} \right]$ ; Constante de Boltzmann.

$T = 290^\circ \text{ [K]}$ ; Temperatura efectiva.

Remplazando los valores en la ecuación 3.5.

$$N_o' = (1.38050 \times 10^{-23} \left[ \frac{\text{J}}{\text{K}} \right]) \times 290^\circ \text{ [K]}$$

$$N_o' = 4 \times 10^{-21} \left[ \frac{\text{W}}{\text{Hz}} \right] = 4 \times 10^{-18} \left[ \frac{\text{mW}}{\text{Hz}} \right]$$

$$N_o' \text{ [dB]} = -174 \left[ \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} \right] \quad (3.6)$$

La densidad de potencia de ruido a la salida del receptor está dada por la ecuación 3.7.

$$N_o = N_o' + NF \quad (3.7)$$

En unidades logarítmicas la densidad de potencia de ruido está dada por la ecuación 3.8.

$$N_o = N_o' \left[ \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} \right] + NF \text{ [dB]} \quad (3.8)$$

Donde  $NF$  es la figura de ruido del receptor y esta se toma como 7 dB (valor típico para este tipo de módulos). Remplazando los valores en la ecuación 3.8.

$$N_o = -174 \left[ \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} \right] + 7 \text{ [dB]}$$

$$N_o = -167 \text{ [dB]}$$

Para medir la potencia de recepción de la componente central de frecuencia de la señal, se emplea el analizador de redes, en la configuración que se muestra en la figura 3.7.

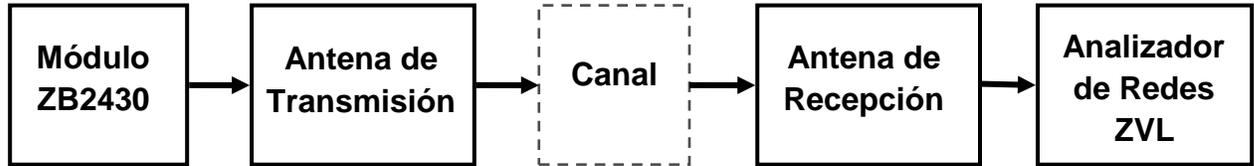


Figura 3.8 Configuración para la medición de la potencia de recepción

El valor de la Energía de Bit  $E_b$  se obtuvo a partir de la ecuación 3.9, donde se expresa la relación entre la potencia de recepción  $P_{Rx}$  y la velocidad de transmisión de datos  $R_b$ . Esta velocidad fue obtenida del *software* del kit ZB2430.

$$E_b \left[ \frac{\text{mW}}{\text{Hz}} \right] = \frac{P_{Rx} \left[ \text{mW} \right]}{R_b \left[ \frac{\text{bps}}{\text{Hz}} \right]} \quad (3.9)$$

$$E_b [\text{dB}] = P_{Rx} [\text{dBm}] - 10 \log(R_b) [\text{dB}] \quad (3.10)$$

De esta forma el valor de  $E_b/N_o$  se obtiene de acuerdo a la ecuación 3.11.

$$E_b/N_o [\text{dB}] = E_b [\text{dB}] - N_o [\text{dB}] \quad (3.11)$$

### 3.2.5. Modelo de Propagación de Pendiente Única

El análisis del sistema se realizó con un modelo de propagación empírico, el cual permitió de forma simple entender el comportamiento de la señales transmitidas, por eso se utilizó el modelo de propagación de pendiente única, descrito en la ecuación 3.12 [13].

$$L_b = K \times \left( \frac{d_o[m]}{d[m]} \right)^n \quad (3.12)$$

En unidades logarítmicas la ecuación 3.12 se convierte en la ecuación 3.13.

$$L_b [\text{dB}] = 10 \log(K) + 10n \log \left( \frac{d[m]}{d_o[m]} \right) \quad (3.13)$$

Dónde:

$K$ : Constante sin unidades que depende del terreno, la frecuencia y la altura de las antenas.

$n$ : Exponente de pérdidas de propagación.

$d$ : Distancia en m.

$d_0$ : Distancia de referencia en m.

El valor de  $n$  corresponde a las características específicas de los escenarios y se presenta en la Tabla 3.1 [15].

Escenario	Rango de $n$
Espacio libre	2
Urbano	2.7-3.5
Urbano con grandes edificios	3-5
Interior de edificios	1.6-1.8
Interior de edificios con sombras	2-3
Entorno suburbano	2-3
Zonas industriales	2.2

Tabla 3.1 Exponentes de pérdidas de propagación típicos para el modelo de pendiente única

### 3.2.6. Interferencia

Estas pruebas se realizaron en un ambiente aislado, debido a que el dispositivo interferente afectó las bandas de frecuencia entre los 850 MHz y los 2400 MHz, se observaron los resultados en frecuencia empleando un transceptor, un dispositivo interferente y el analizador de redes para observar el espectro, sus componentes y los niveles de potencia de las señales. Se realizaron pruebas de transmisión entre transceptores para determinar el efecto del generador de interferencia sobre los paquetes en recepción cuando se varía su posición respecto a los módulos.

### 3.3. RED ZIGBEE® Y ESCENARIOS DE PRUEBAS

Para las pruebas se implementó una red punto a punto entre el coordinador y el enrutador. Ambos dispositivos se conectaron a diferentes computadores por medio de un cable USB A-B y un cable serial, como se puede apreciar en la figura 3.9.

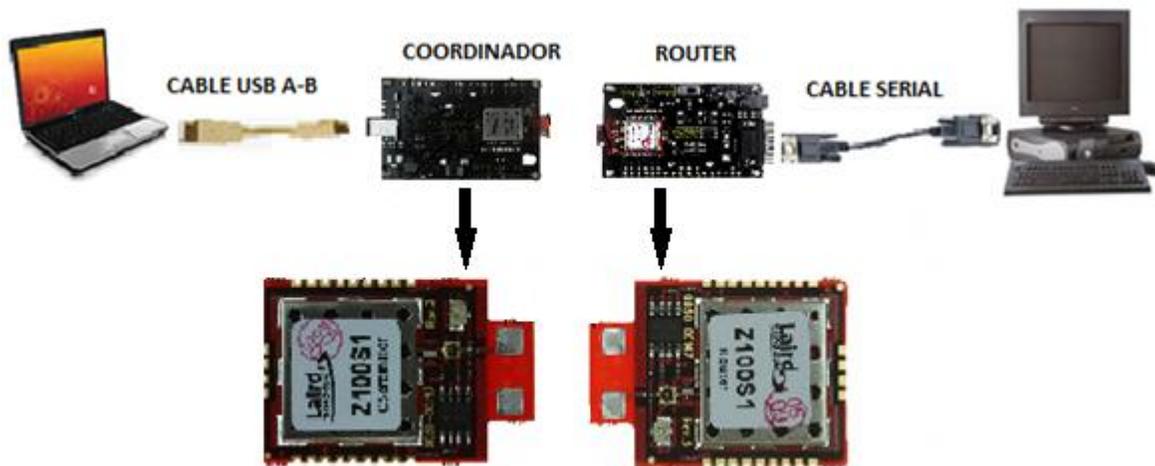


Figura 3.9 Red punto a punto ZigBee®

### 3.3.1. Transmisión y Recepción de paquetes

A continuación se describen los escenarios en los que se midió la Tasa de Error de Paquete (PER).

#### 3.3.1.1. Escenario 1: Exteriores

Para este escenario se buscó un espacio donde se pudiera realizar las pruebas, libre de obstáculos o algún tipo de interferencia. Para ello se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- La realización de las pruebas en un canal con mínima interferencia de redes inalámbricas locales que trabajen en la misma frecuencia del kit ZB2430.
- La existencia de línea de vista entre las tarjetas a una distancia aproximada de 200 m.

Se ubicó el coordinador ZigBee® en un punto de referencia y el dispositivo de recepción con una separación inicial de 20 m, luego se varió la distancia cada 20 m hasta alcanzar 200 m (siempre teniendo línea de vista entre los dispositivos). Posteriormente se enviaron 500 paquetes, este proceso se repitió 10 veces en cada punto. Los dispositivos se ubicaron a una altura de 1.9 m del suelo y la transmisión se realizó con la mínima potencia (2 dBm).

### 3.3.1.2. Escenario 2: Interiores

En este escenario se analizó el comportamiento del sistema en un lugar cerrado, para el cual se debió cumplir el siguiente criterio:

- Línea de vista entre los dos dispositivos a lo largo del pasillo.

Se ubicó el coordinador ZigBee® en un extremo del pasillo y el receptor a una distancia inicial de 5 m con una variación constante de 5 m hasta llegar al final del pasillo, siempre contando con línea de vista entre dispositivos. Se enviaron 500 paquetes, y se repitió la transmisión 10 veces en cada punto. Los dispositivos se ubicaron a 50 cm del piso y las transmisiones se realizaron con la mínima potencia del coordinador ZigBee® (2 dBm).

### 3.3.2. Simulación

Se planteó la realización de simulaciones con el *software Wireless Insite®*, que es una herramienta de predicción de propagación de ondas electromagnéticas que proporciona una representación del comportamiento de las señales y algunos resultados, como la distribución de potencia respecto al escenario modelado, y las pérdidas de trayecto, entre otros [16].

Las simulaciones se realizaron modelando los escenarios donde se ejecutaron las pruebas reales tales como:

- Exteriores (Loma del tablazo).
- Interiores (Pasillo del segundo piso de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones).

Para comparar resultados del enlace de una red ZigBee® se implementó una simulación en Matlab® que representó el sistema de comunicación de forma ideal.

#### 3.3.2.1. Escenario 3: Exteriores en *Wireless Insite®*

Se modeló una zona verde plana y abierta de aproximadamente 500 m<sup>2</sup>. Se configuró el software con las características de los dispositivos del kit ZB2430, y se creó una ruta con una separación de 20 m entre cada receptor trabajando con la potencia más baja del kit (2dBm) y el modelo de espacio libre que es el modelo idóneo que se adapta a las condiciones que se quieren simular. Además se creó una grilla de puntos para observar el comportamiento de la señal a través de este escenario.

### 3.3.2.2. Escenario 4: Pasillo del segundo piso de la FIET con *Wireless Insite*®

El *software Wireless Insite*® permitió recrear un ambiente real de forma aproximada para realizar predicciones de cobertura. Se utilizó el plano en AutoCAD® de las instalaciones del pasillo del segundo piso de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones facilitando el modelado correcto de sus características físicas en 3D. Debido que el software no cuenta con una antena que cumpla con las características de la antena de los dispositivos del kit ZB2430, se creó una antena que cumpliera con estas.

En este escenario se analizó la cobertura de la señal a través del pasillo, para lo cual se trazó una ruta a lo largo de este. Se configuró el software con la potencia más baja del kit (2dBm), el modelo *Full 3D* y el método de trazado de Disparo y Rebote de Rayos (SBR, *Shooting and Bouncing Ray*) [16]. Además se utilizó una grilla de receptores a lo largo del pasillo, la cual permitió visualizar el comportamiento de la señal.

### 3.3.2.3. Escenario 5: Simulación en Matlab®

Se diseñó en Matlab® con la extensión Simulink® una representación de los módulos ZigBee® a nivel Físico, y se utilizó un canal de Ruido Blanco Gaussiano Aditivo (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*) para simular un enlace punto a punto. Con esto se tuvo un referente teórico de los valores de la Tasa de Error de Bit (BER) y los efectos del canal en las señales transmitidas.

## 3.3.3. Potencia, Estabilidad en Frecuencia y Ancho de Banda

Debido a las restricciones para el uso del equipo de laboratorio (analizador de redes ZVL), las medidas de potencia y de frecuencia se tomaron en el escenario de interiores como se describe a continuación, debido a estas restricciones se modeló el escenario de exteriores y se usaron las medidas de potencia de recepción entregadas por el *software Wireless Insite*®.

### 3.3.3.1. Escenario 6: Interiores

Pasillo de 50 m de largo donde se llevan a cabo las medidas de potencia en recepción<sup>4</sup>, se emplea el analizador de redes que está fijo en el punto de inicio del pasillo, mientras el coordinador ZigBee® varía su distancia de 1 m hasta los 10 m.

---

<sup>4</sup>La sensibilidad de la antena conectado al analizador de redes ZVL R&S® limita el rango de alcance de las medidas, por esto se empleó el modelo de predicción de propagación de pendiente única [13].

Para las medidas de frecuencia se utilizó el analizador de redes en su función de analizador de espectro y un módulo transmisor. Para las pruebas de estabilidad en frecuencia se procedió a aumentar la temperatura del transmisor, y a capturar el espectro de la señal.

#### **3.3.4. Medidas de Interferencia**

Se buscó un lugar aislado dentro de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones para que el generador no afectara otros sistemas de comunicaciones, por esto se empleó un espacio en la oficina 409 en el cuarto piso de la FIET.

Para las medidas del espectro de la señal el generador de interferencia se colocó a una distancia aproximada de 60 cm del dispositivo transmisor, se varió la potencia de transmisión entre la máxima (20 dBm) y la mínima (2 dBm), se enviaron 500 paquetes de manera continua en cada prueba.

Debido al espacio reducido del escenario se tomó una distancia fija entre los dispositivos (transmisor y receptor) de 3.6 m, en la primera prueba se ubicó el generador de interferencia en la mitad del trayecto entre los dispositivos a 1.8 m., para la siguiente prueba se situó el generador de interferencia al lado del receptor tomando este punto de referencia de 0 m, y al lado del transmisor a un lado del transmisor a 3.6 m del receptor, finalmente se posicionó el dispositivo interferente en puntos fuera del camino de la transmisión.

# CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Este capítulo presenta los resultados de las simulaciones y experimentación del sistema de comunicación de datos realizada con el kit ZB2430 de ZigBee®.

## 4.1. SIMULACIONES DE COBERTURA CON *WIRELESS INSITE*®

Para las simulaciones en interiores y en exteriores se tuvieron en cuenta los modelos de los escenarios, con las mismas dimensiones y materiales.

### 4.1.1. Escenario de Exteriores con *Wireless Insite*®

#### 4.1.1.1. Descripción del escenario

Para la simulación del escenario de exteriores, se tomó como referencia un lugar al norte de la ciudad el cual cuenta con las características necesarias para la realización de las pruebas, como se observa en la figura 4.1.



Figura 4.1 Escenario de exteriores

En el software *Wireless Insite*® se seleccionó un plano con las características del terreno, se ubicó la antena transmisora y se colocaron los receptores tipo ruta a una distancia inicial de 20 m, tomando una variación de la distancia de 20 m entre cada punto hasta alcanzar 200 m, la altura de las antenas es de 1.90 m, dicho escenario se muestra en la figura 4.2.

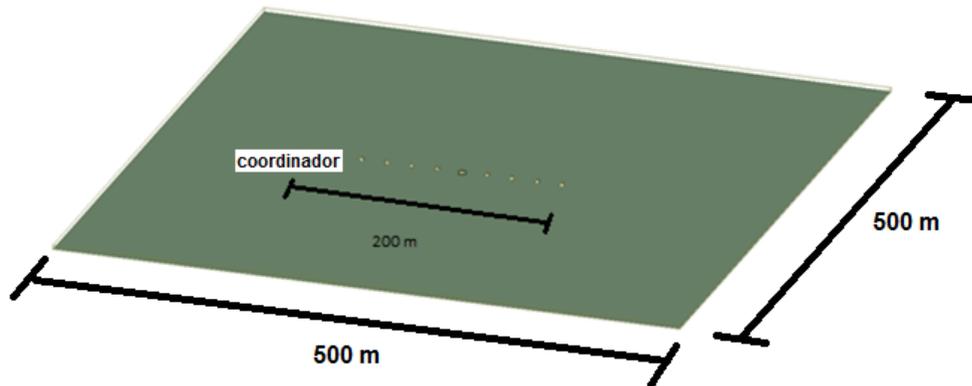


Figura 4.2 Ruta de receptores en exteriores

Para la configuración del *software* se utilizó el modelo de espacio libre, el cual se aplica a cualquier sistema radioeléctrico, no tiene en cuenta obstáculos, y además no contempla las pérdidas asociadas a los fenómenos de difracción, refracción y reflexión que se presentan entre la antena transmisora y la receptora [16]. Se considera adecuada la utilización de este modelo ya que tiene en cuenta las condiciones del terreno del espacio libre del escenario en el que se realizaron las pruebas con los dispositivos ZigBee®.

En la tabla 4.1 se presentan los parámetros del modelo de espacio libre.

Descripción	Datos
Numero de Reflexiones Máximas	No Aplica
Numero de Transmisiones Máximas	No Aplica
Numero de Difracciones Máximas	No Aplica
Terreno	No Aplica
Interiores	No Aplica
Objetos	No Aplica
Urbano	No Aplica
Escenarios	Todos
Follaje	No Aplica
Alcance	Ilimitado
Altura de Antenas	Todas
Tipos de Antena	Todos
Trazado de Rayos	Un solo rayo del Transmisor al receptor
Frecuencia mínima	Depende de la Aplicación
Frecuencia máxima	Depende de la Aplicación

Tabla 4.1 Parámetros del modelo de espacio libre

#### 4.1.1.2. Resultados de la simulación

##### a. Potencia recibida

De acuerdo a la figura 4.3, la potencia de recepción experimentó una disminución a medida que aumentó la distancia, debido a los efectos de dispersión que afectaron la señal.

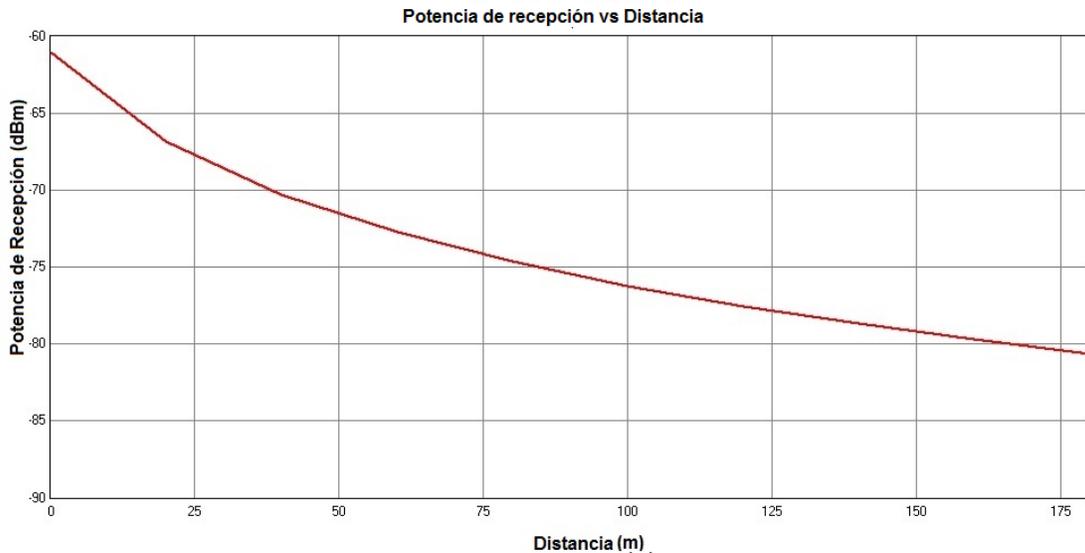


Figura 4.3 Potencia de recepción vs distancia

En la figura 4.4 se observa la disminución de la potencia en la ruta de receptores que está entre -61.1 dBm y -80.6 dBm mostrada por la variación de colores. Los resultados de esta figura son equivalentes a los valores de la curva 4.13.

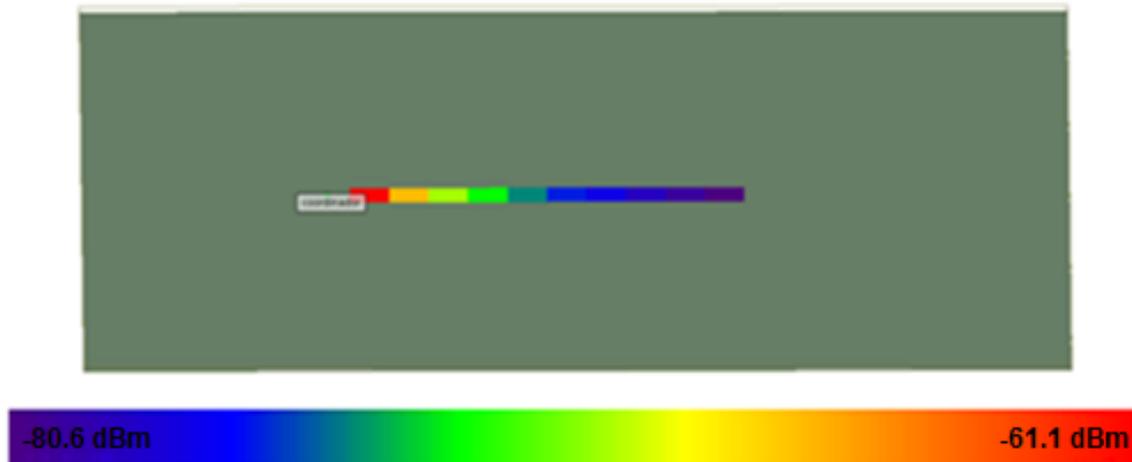


Figura 4.4 Potencia de recepción de la ruta en exteriores

## b. Grilla de receptores

Para observar el comportamiento del sistema en exteriores se ubicaron receptores de tipo grilla.

En la figura 4.5 se observa el comportamiento de la potencia en una grilla de 860 receptores, ubicados con una separación de 5 m, en un área de 150 m de ancho y 240 m de largo.

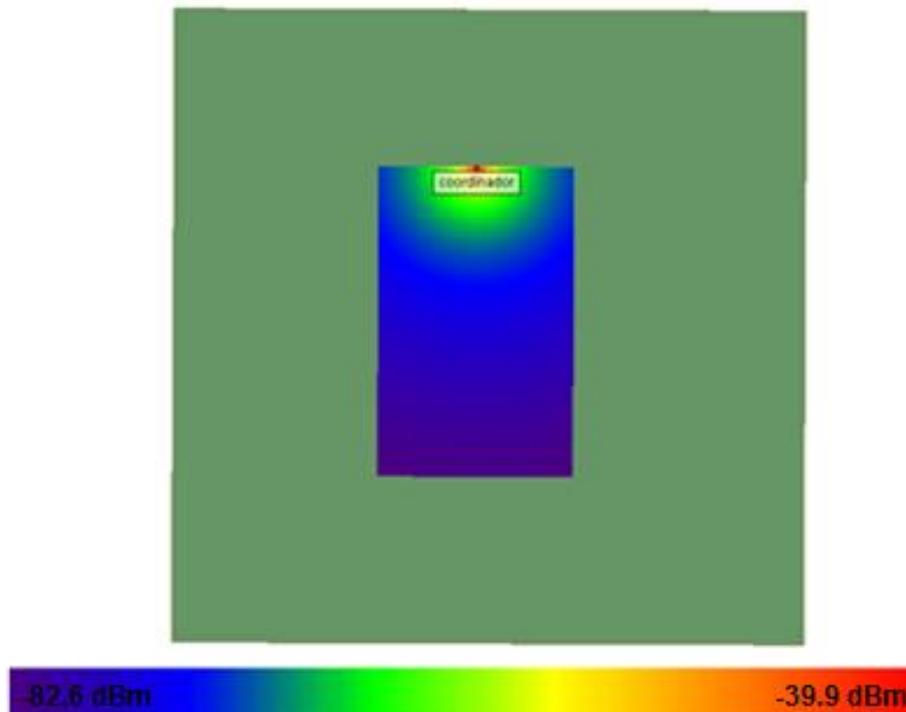


Figura 4.5 Potencia de recepción en la grilla de exteriores

Las figuras 4.6 (a) y 4.6 (b) representan las ganancias y las pérdidas de trayecto, las cuales muestran la incidencia de la distancia en la comunicación y el efecto de dispersión en el escenario.

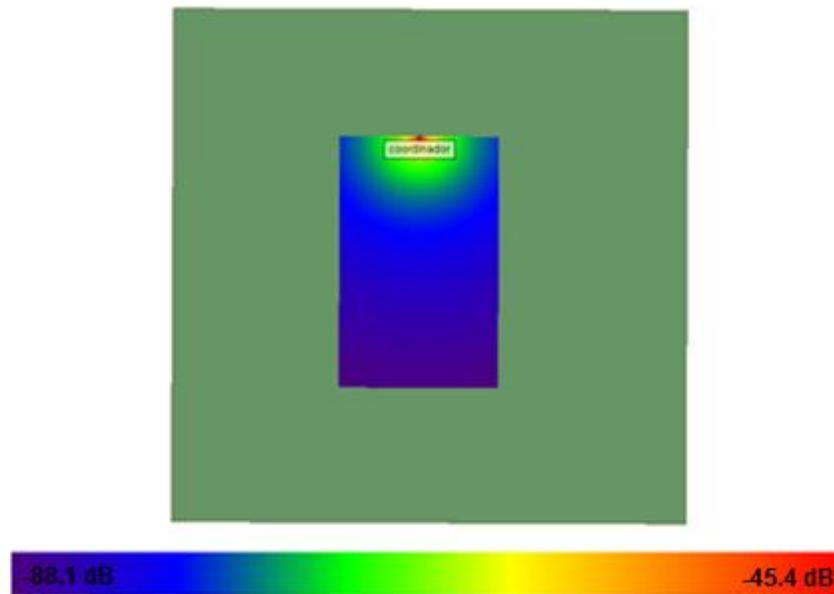


Figura 4.6 (a) Ganancia de trayecto

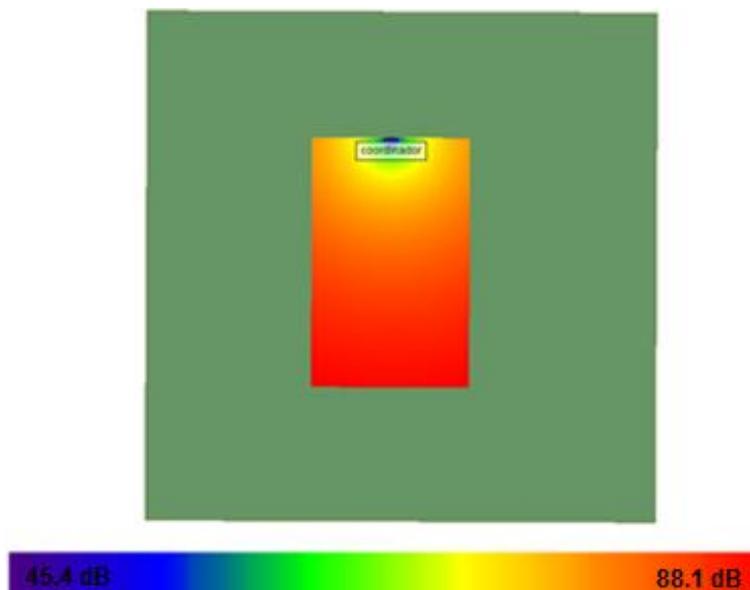


Figura 4.6 (b) Pérdidas de trayecto

#### 4.1.2. Escenario de Interiores en *Wireless Insite*®

##### 4.1.2.1. Descripción del escenario

Para esta simulación se usó como referencia el plano en la herramienta AutoCAD® del pasillo del segundo piso de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, como se muestra en la figura 4.7.

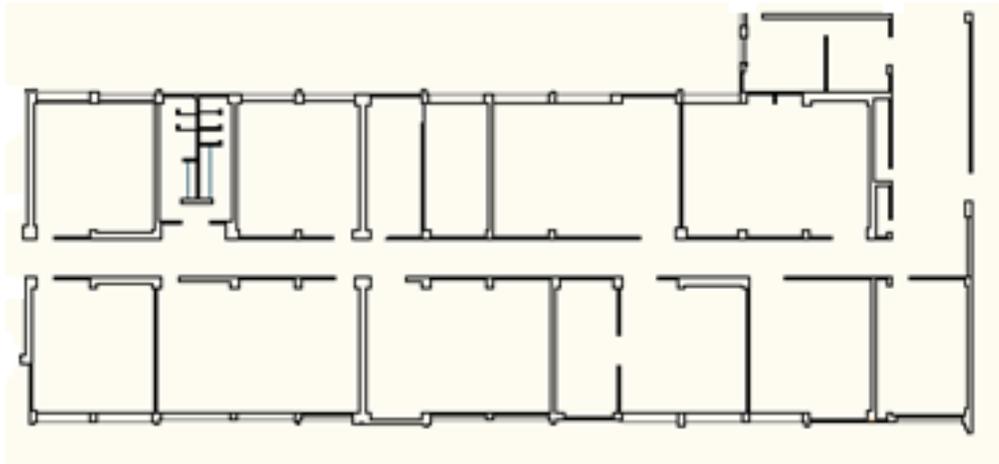


Figura 4.7 Plano del escenario de interiores

Teniendo en cuenta las dimensiones y los materiales se realizó la configuración y el modelado en la herramienta *Wireless Insite®*, teniendo como resultado un plano en 3D con las características necesarias para observar los diferentes efectos que se producen en el escenario, considerando las limitaciones del *software*, como se muestra en la figura 4.8.

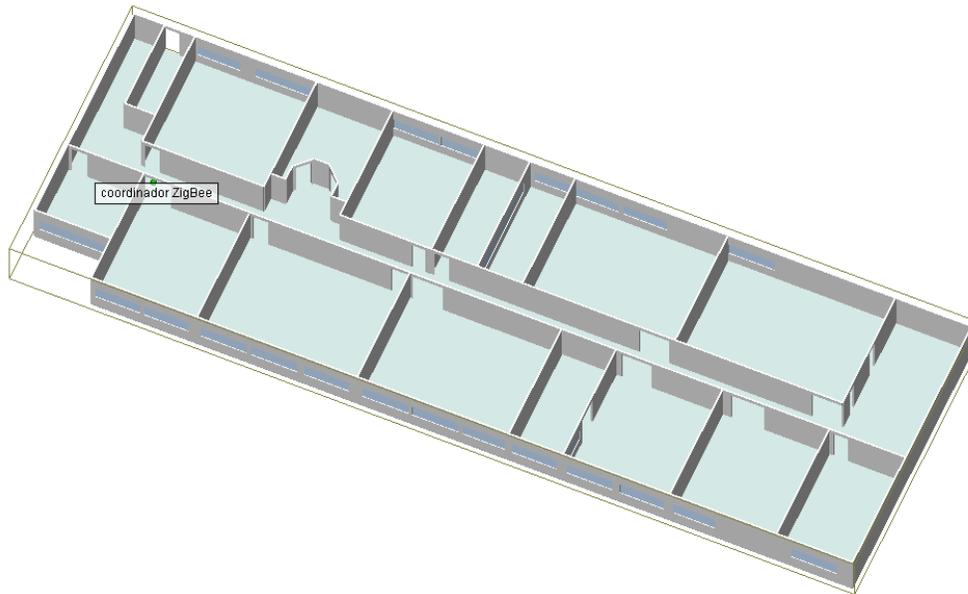


Figura 4.8 Pasillo segundo piso FIET

Para realizar la simulación se tomó un punto en un extremo del pasillo donde se ubicó la antena transmisora a 0.50 m del suelo, con potencia de 2 dBm y la polarización vertical con el nombre de coordinador ZigBee®, la cual cuenta con las

características de acuerdo a las especificaciones del kit ZB2430, como se presenta en la tabla 4.2.

Descripción	Datos
Ganancia	2 dBi
Frecuencia de Operación	2405 MHz
Ancho de banda	3 MHz
Patrón de Radiación	Omnidireccional
Polarización	Vertical

Tabla 4.2 Características de las antenas

Para la ubicación de los receptores se utilizó una ruta de receptores, la cual permitió ubicar de manera uniforme los diferentes puntos a lo largo de una línea recta. En la figura 4.9 se observa la ruta como una línea recta a la largo del pasillo.

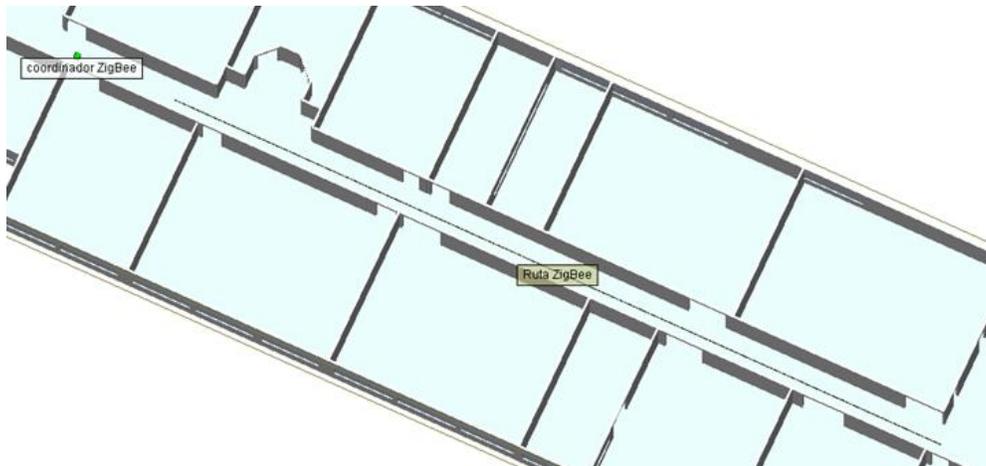


Figura 4.9 Ruta de receptores ZigBee®

Debido a que el multitrayecto se presenta en cortas distancias, para observar sus efectos, se ubicaron 5 receptores por cada longitud de onda ( $\lambda$ ). Para este caso la frecuencia de operación es 2405 MHz, con la ecuación 4.1 se obtiene el valor de  $\lambda$ .

$$\lambda = \frac{c \left[ \frac{m}{s} \right]}{f [Hz]} \quad (4.1)$$

Dónde,

$c = 3 \times 10^8 \left[ \frac{m}{s} \right]$ ; Velocidad de la luz.

$f = 2405 \times 10^6 [Hz]$ ; Frecuencia de operación.

Remplazando los valores en la ecuación 4.1 se obtuvo el valor de  $\lambda = 0.12 \text{ m}$ , para esta ruta se trabajó con 1.865 receptores con una separación de 2.4 cm entre cada uno. La ruta inició en el punto donde está ubicado el transmisor y terminó en el final del pasillo.

Los receptores de la ruta emplearon el mismo tipo de antena del dispositivo transmisor, las características con la que se configuró el software se muestran en la tabla 4.2.

En este escenario se realizó la predicción de propagación de las señales usando el modelo *Full 3D*, el cual se basa en la técnica de trazado de rayos. Este modelo se caracteriza por considerar objetos con todo tipo de irregularidades, tiene en cuenta las reflexiones en las paredes, pisos y techo, además considera las transmisiones a través de las superficies de los objetos, lo que hace que sea uno de los más completos para el análisis en escenarios interiores [16]. En la tabla 4.3 se presentan los parámetros del modelo *Full 3D*.

Descripción	Datos
Numero de Reflexiones Máximas	30, Asumiendo que no hay transmisiones
Numero de Transmisiones Máximas	30, Asumiendo que no hay reflexiones
Numero de Difracciones Máximas	4 (SBR)
Terreno	Todos
Interiores	Todos
Objetos	Todos
Escenarios	Todos
Alcance	Varía de acuerdo a la aplicación
Altura de Antenas	Todas
Tipos de Antena	Todos
Trazado de Rayos	SBR
Frecuencia mínima	100 MHz
Frecuencia máxima	Depende de la aplicación

Tabla 4.3 Parámetros del modelo *Full 3D*

#### 4.1.1.2. Resultados de la simulación

##### a. Potencia en recepción

En la figura 4.10 se observan los diferentes niveles de potencia de recepción en la ruta, representados mediante una distribución de colores, en donde el primer receptor de la ruta, el cual se encuentra más cerca del transmisor tiene una mayor potencia; a medida que se recorre el pasillo la potencia del receptor sufre una disminución, el rango de potencia en recepción está entre -13.5 dBm y -89.0 dBm.

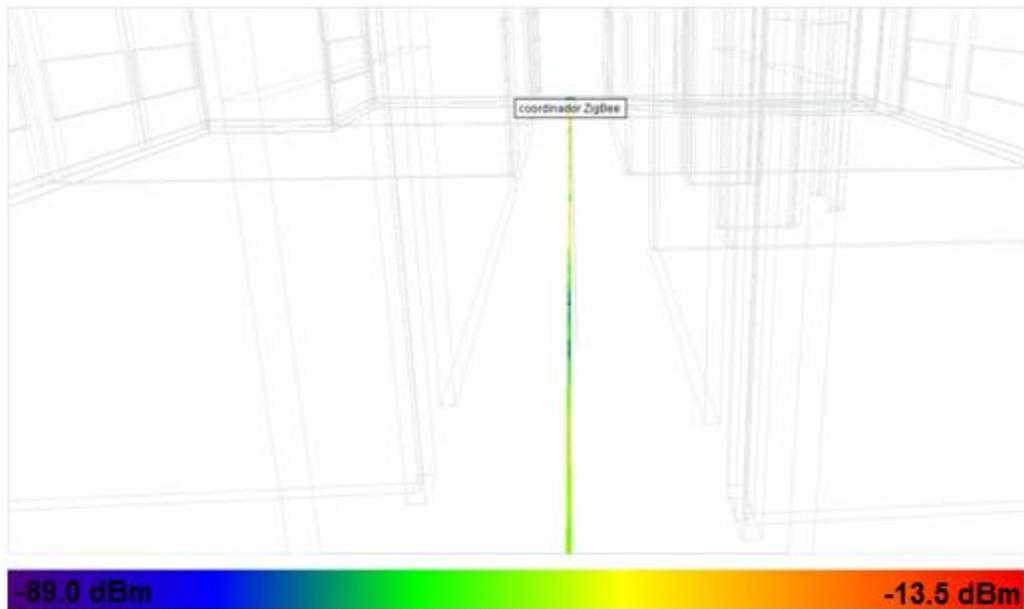


Figura 4.10 Potencia recibida en interiores

En la figura 4.11 se observa la curva de potencia recibida a lo largo del pasillo. El valor de potencia para el primer punto corresponde al valor máximo de potencia de la curva de la figura 4.4 de -13.5 dBm. A medida que la señal recorre la ruta la curva presenta picos de aumento y decremento en los valores de potencia debido al efecto de multitrayecto.

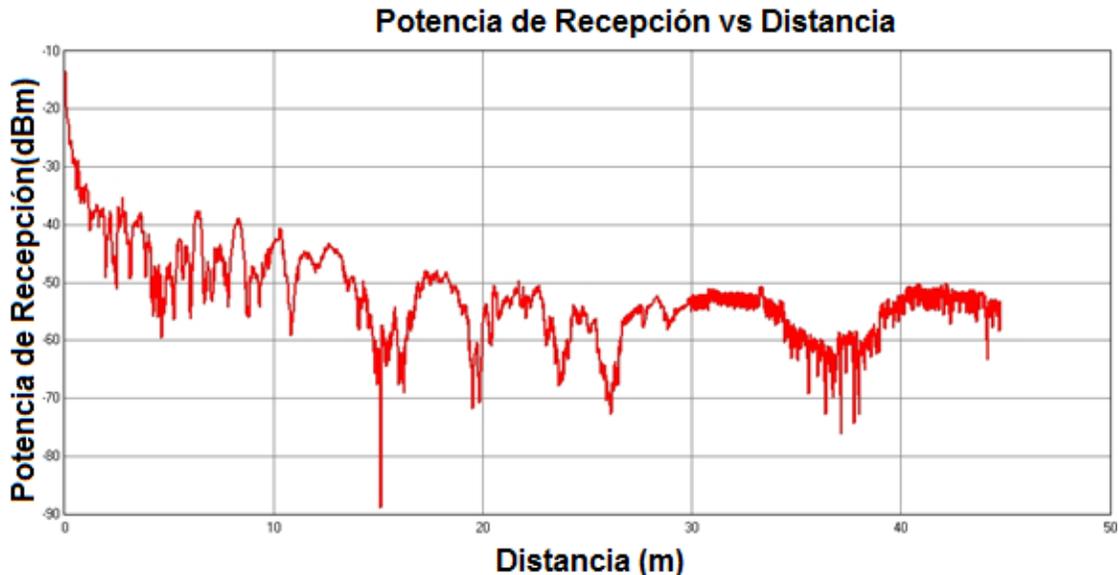
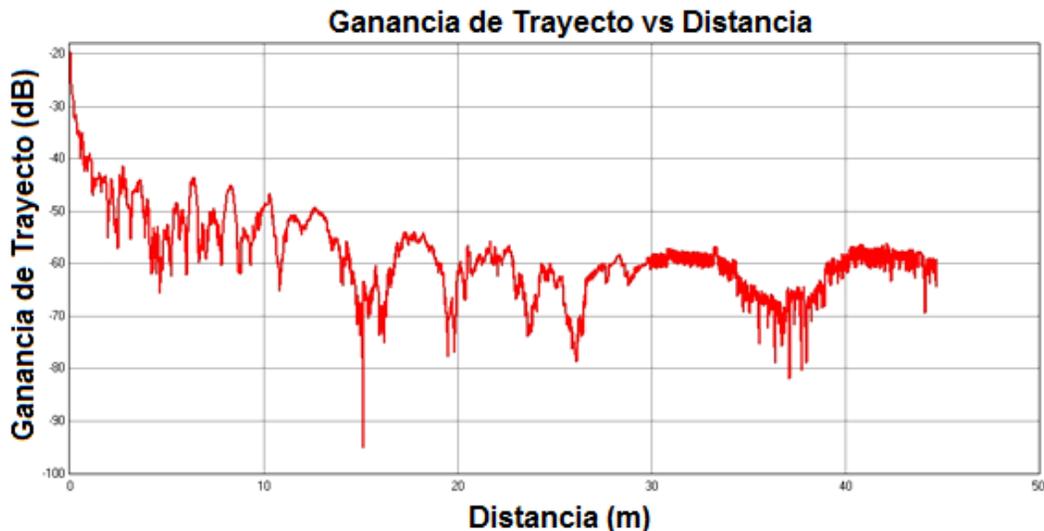


Figura 4.11 Potencia de recepción y distancia

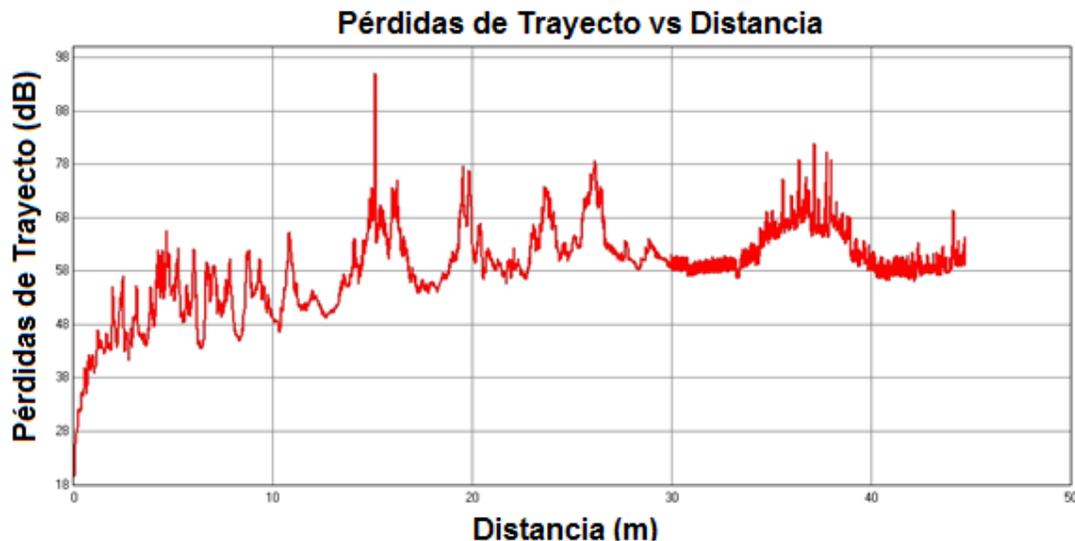
**b. Ganancia y pérdidas de trayecto**

La figura 4.12 presenta la curva de ganancia de trayecto la cual es similar a la curva de potencia de recepción, donde se observa en algunos puntos valores de picos que se presentan por el efecto de multitrayecto y la cantidad de receptores en la ruta.



**Figura 4.12 Ganancia de trayecto y distancia (Interiores)**

La curva de pérdidas de trayecto en la figura 4.13, muestra que a medida que se aumenta la distancia se presentan variaciones en las pérdidas por efectos del multitrayecto.



**Figura 4.13 Pérdidas de trayecto vs distancia (Interiores)**

De lo anterior, se puede afirmar que la curva de ganancia de trayecto es exactamente complementaria a la curva de las pérdidas de propagación y se define como se muestra en la ecuación 4.2 [17].

$$G_{\text{Trayecto}} [\text{dB}] = -L_{\text{Trayecto}} [\text{dB}] \quad (4.2)$$

### c. Grilla de receptores

Se trabajó con receptores tipo grilla en la herramienta *Wireless Insite®*, esta se modeló y configuró en el pasillo principal del segundo piso de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, como se observa en la figura 4.14.

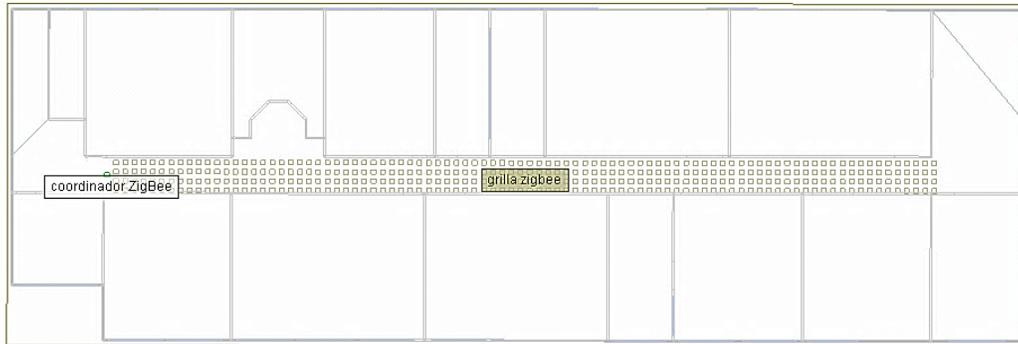


Figura 4.14 Grilla de receptores en interiores

La configuración de las antenas siguió los parámetros de la tabla 4.2, con una separación entre cada receptor de 0.50 m, para un total de 360 receptores a lo largo del pasillo.

En la figura 4.15 se observa la gráfica de potencia de recepción para la grilla en interiores con un decrecimiento a lo largo del pasillo, mostrado por una variación de colores donde la tonalidad roja representa mayor potencia, y la tonalidad violeta menor potencia. El rango de potencia varía entre -28.8 dBm y -57.6 dBm. Debido a que la potencia mínima no supera la sensibilidad de los dispositivos receptores, no existieron pérdidas de paquetes en las transmisiones del sistema de comunicación de datos.

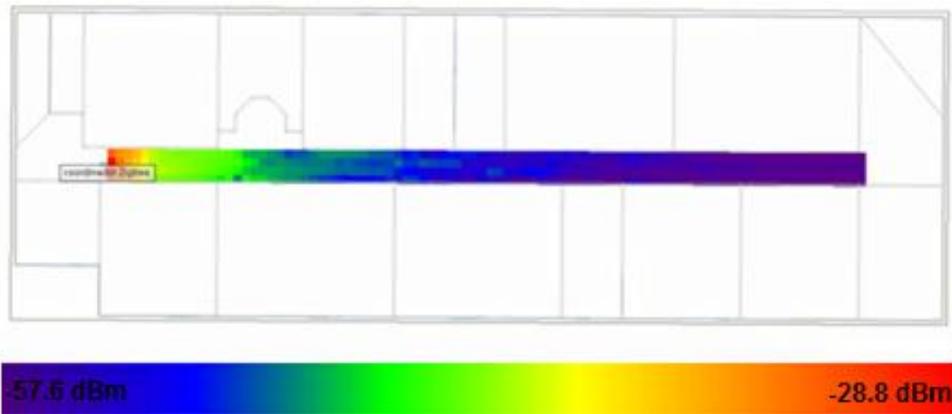


Figura 4.15 Potencia de recepción en una grilla en interiores

La figura 4.16 (a) presenta la ganancia de trayecto que decrece a través del escenario desde -34.3 dB a -63.1 dB. En la figura 4.16 (b) se tienen las pérdidas de trayecto que crecen y van desde -63.1 dB a -34.4 dB, con estos resultados se puede analizar que el alcance de los dispositivos se encuentra dentro del rango propuesto teóricamente por el fabricante para interiores de 0 m a 75 m.

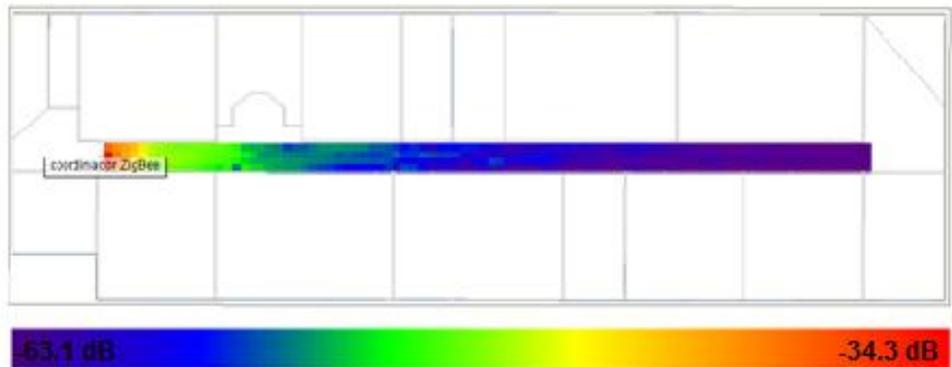


Figura 4.16 (a) Ganancia de trayecto

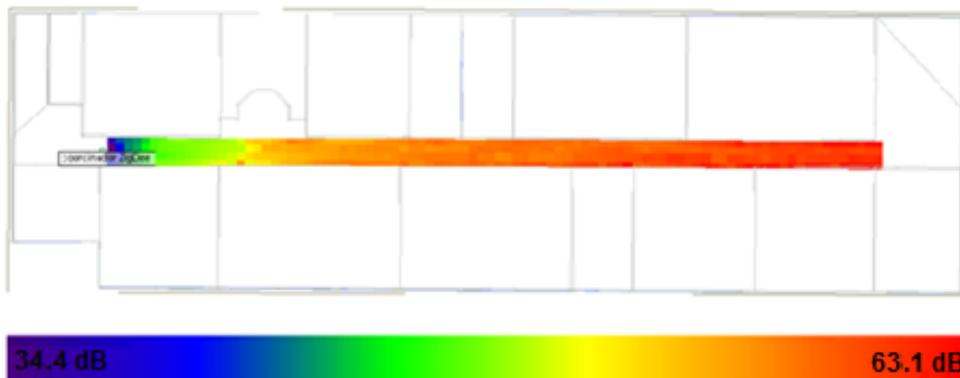


Figura 4.16 (b) Pérdidas de trayecto

## 4.2. EXPERIMENTACIÓN EN INTERIORES

En interiores se utilizó el analizador de redes para las mediciones de potencia, debido a que el software de configuración y control de pruebas del kit ZB2430 no muestra los valores de potencia en recepción.

### 4.2.1. Atenuación en Recepción

El kit ZB2430 tiene una potencia máxima de 20 dBm y una potencia mínima de 2 dBm, con el analizador de redes se midió la potencia de recepción en una componente de frecuencia específica, también se midió la potencia de un canal con el sensor de potencia, pero estas medidas solo se tomaron a cortas distancias por la baja sensibilidad del sensor.

#### 4.2.1.1. Atenuación en las medidas reales

Se analizó la potencia de recepción de la señal empleando el analizador de redes y el sensor R&SNRP-Z22, y la potencia de recepción en la componente central del canal 11 (B) de ZigBee® (2405 MHz) con la antena externa y el analizador de redes en su función de analizador de espectro.

La tabla 4.4 presenta la potencia dada por el analizador de espectro, el sensor de potencia y los valores de atenuación para cada caso, cuando la potencia máxima de transmisión es igual a 20 dBm.

Distancia (m)	Potencia de recepción en 2405 MHz (dBm)	Atenuación en 2405 MHz (dB)	Potencia de recepción con el sensor (dBm)	Atenuación con el sensor (dB)
0.00	-7.15	0.00	2.40	0.00
0.15	-27.11	19.96	-18.91	21.31
0.30	-30.18	23.03	-23.68	26.08
0.45	-36.94	29.79	-26.00	28.40
0.60	-37.89	30.74	-23.55	25.95
0.75	-37.41	30.26	-30.49	32.89
0.90	-40.85	33.70	-31.14	33.54
1.00	-42.83	35.68	-27.92	30.32
1.20	-42.10	34.95	-31.24	33.64
1.50	-44.83	37.68	-31.90	34.30
2.00	-47.15	40.00	-34.45	36.85
2.50	-46.99	39.84	-34.13	36.53

Tabla 4.4 Valores de atenuación y potencia de recepción

La potencia medida con el sensor es mayor debido a que representa la potencia de la señal, mientras que la potencia de la frecuencia central solo representa la potencia de una componente de la señal.

Los resultados de la atenuación se despliegan en la figura 4.17, en general los valores medidos en la componente de frecuencia de 2405 MHz son mayores a los valores medidos de la señal con el analizador, teniendo así una diferencia máxima de 5.36 dB a 1 m y un mínimo de 0.16 dB a 0.9 m, se observa entonces que la trayectoria de las curvas sigue la misma tendencia, por lo tanto el nivel de atenuación en el canal es semejante al nivel de atenuación de la componente central de la señal.

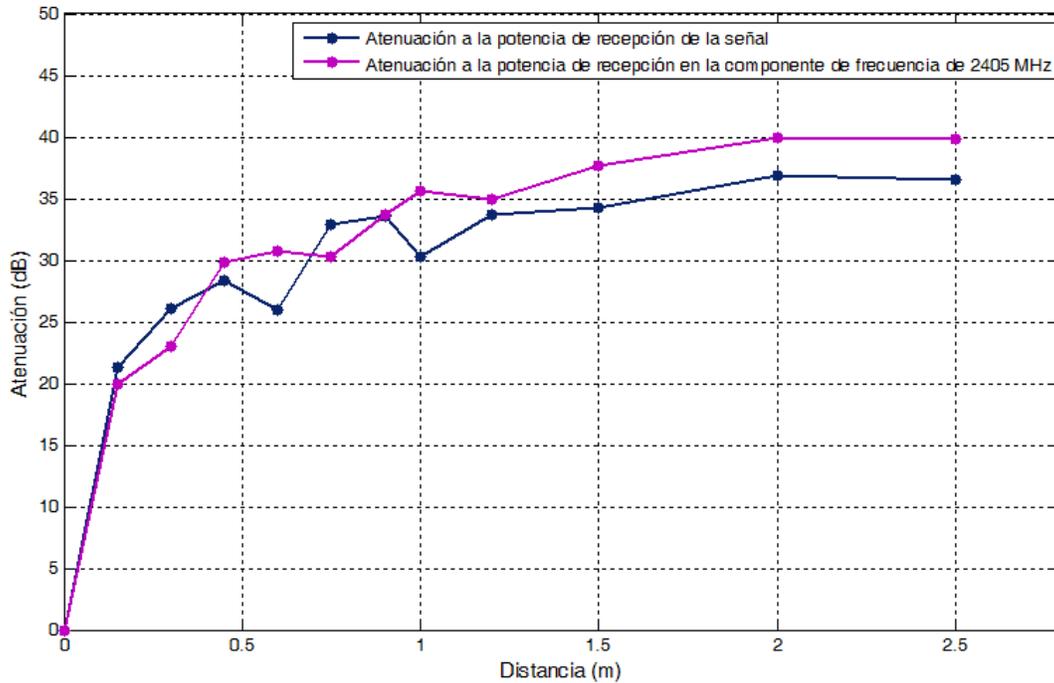


Figura 4.17 Atenuación vs distancia

La figura 4.18 representa la atenuación de la potencia de recepción en la componente de frecuencia de 2405 MHz, para las potencias de transmisión de 2 y 20 dBm. El nivel de atenuación para las dos casos de potencia es similar hasta 5 m, con una variación máxima de 0.69 dB; a partir de los 6 m para la curva de atenuación con potencia de transmisión a 20 dBm se incrementan los valores, alcanzando una diferencia máxima de 4.14 dB a 8 m respecto a la curva de atenuación con potencia de transmisión a 2 dBm, esto se debe a que se presentan mayor número de reflexiones de la señal cuando el nivel de potencia es más alto.

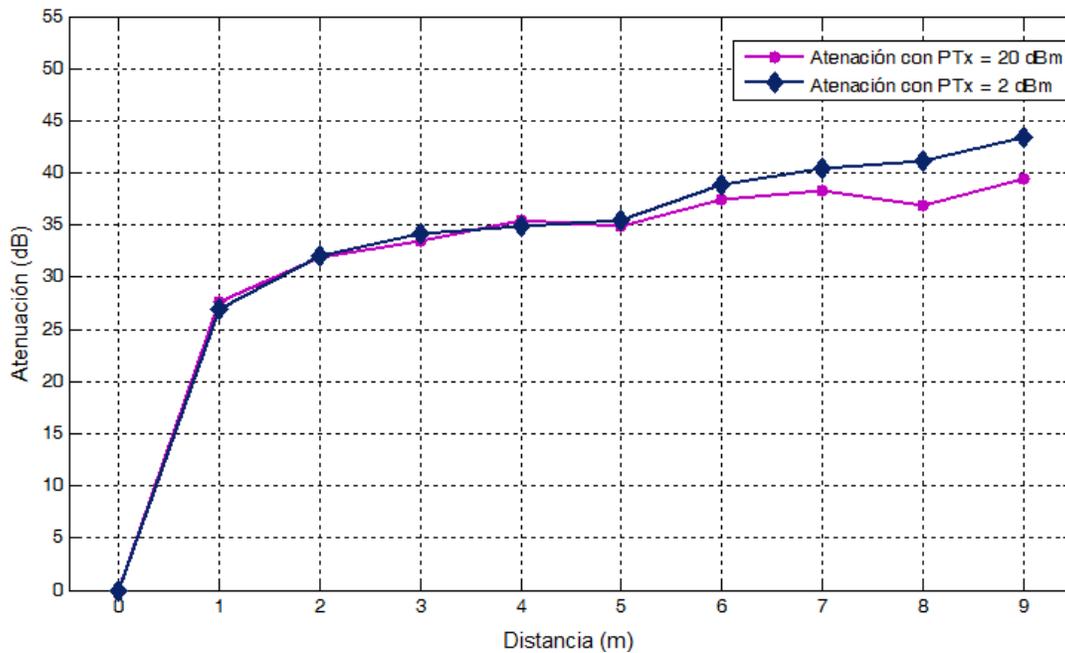


Figura 4.18 Atenuación vs distancia en interiores

#### 4.2.1.2. Comparación atenuación real y simulada

La figura 4.19 representa la comparación de los niveles de atenuación de las medidas reales con las medidas simuladas, cuando la potencia de transmisión es de 2 dBm, se observa que el nivel de atenuación de la señal real es mayor al de la señal simulada, esta ultima presentando variaciones en algunos puntos. La diferencia máxima entre las curvas es de 6.38 dB a 1 m y mínima de 0.14 dB a 5 m. Los resultados reales se analizaron solo para la componente central de frecuencia, mientras que los resultados de la simulación toman la potencia total de la señal, dando como resultado que la potencia de la experimentación es menor a la simulada a medida que aumenta la distancia.

Existen factores como la configuración de las reflexiones en *Wireless Insite*® y la similitud de los escenarios, los cuales afectaron de forma directa las medidas, sin embargo, comparando las curvas se observa que siguen la misma trayectoria.

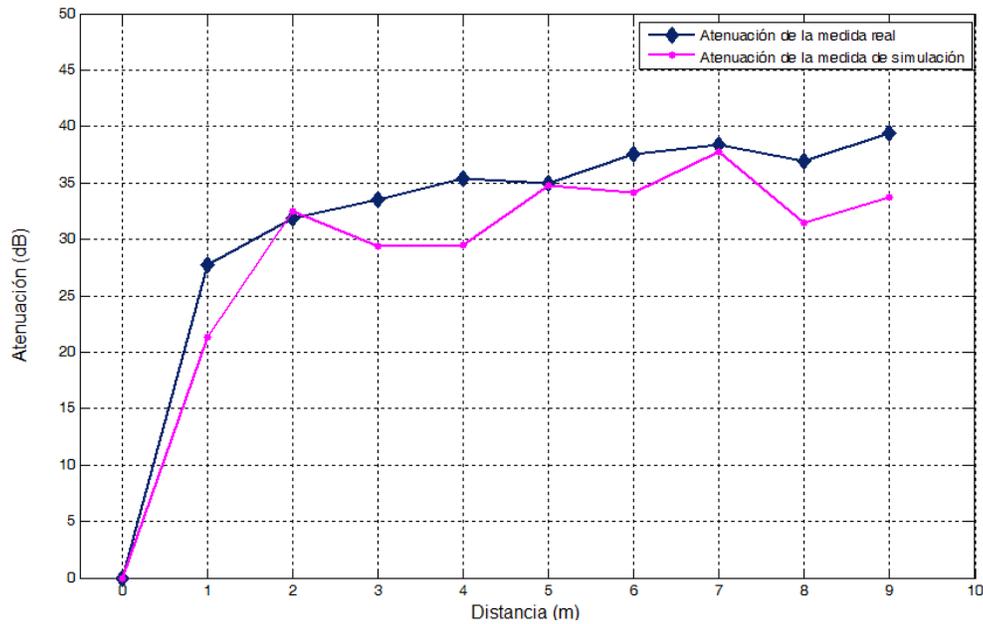


Figura 4.19 Atenuación real vs atenuación simulada (PTx = 2 dBm)

La figura 4.20 representa la comparación de los niveles de atenuación medidos con los simulados, con potencia de transmisión a 20 dBm. Se observa que el nivel de la atenuación simulada en la mayoría de los puntos estuvo por debajo de los valores reales con una diferencia máxima de 9.75 dB a 9 m y mínima de 0 dB a 2 m, esta desigualdad se presentó dado que del *software* no es capaz de recrear todas las características físicas que influyen en un escenario real.

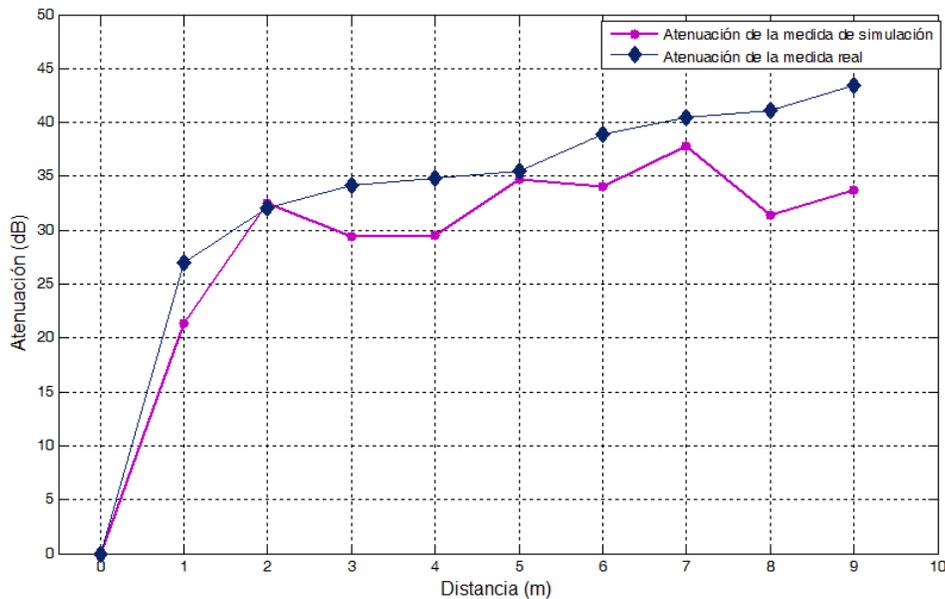


Figura 4.20 Atenuación real vs atenuación simulada (PTx = 20 dBm)

#### 4.2.2. Potencia y Pérdidas Básicas

Se obtuvieron las pérdidas básicas con los valores de potencia de recepción en la componente de frecuencia central del canal B, 2405 MHz y la ecuación 4.3, que representa las pérdidas básicas en el radioenlace donde no se tienen las ganancias de antena ya que el fabricante las considera en los valores dados.

$$L_b[\text{dB}] = P_{\text{Tx}}[\text{dBm}] - P_{\text{Rx}}[\text{dBm}] + G_a[\text{dBi}] \quad (4.3)$$

Para cada distancia se obtuvo una medida de pérdidas básicas como se presenta en la tabla 4.5, para estos resultados se consideró que por la disposición del b escenario las señales sufrieron de múltiples reflexiones, con la potencia de transmisión máxima las señales llegaron al destino sin sufrir pérdidas significativas, mientras que las señales transmitidas con la potencia mínima fueron atenuadas en mayor proporción antes de llegar al destino, estos resultados son de utilidad para el análisis al emplear el modelo de pérdidas básicas.

Distancia (m)	Pérdidas Básicas Lb a PTx = 2 dBm (medidas reales) (dB)	Pérdidas Básicas Lb a PTx = 20 dBm (medidas reales) (dB)
1	49.87	52.69
2	54.07	57.77
3	55.71	59.80
4	57.60	60.52
5	57.11	61.18
6	59.69	64.62
7	60.53	66.11
8	61.12	66.77
9	61.60	67.00

Tabla 4.5 Pérdidas básicas para las medidas reales

Con los valores de potencia de recepción simulados, se obtuvieron las pérdidas básicas, como se presenta en la tabla 4.6, los resultados para las potencias de transmisión son los mismos con una variación 0.13 dB a 9 m.

Distancia (m)	Pérdidas Básicas Lb PTx = 2 dBm (medidas de simulación) (dB)	Pérdidas Básicas Lb PTx= 20 dBm (medidas de simulación) (dB)
1	36.20	36.20
2	41.50	41.50
3	43.13	43.13
4	43.54	43.62
5	44.74	44.74
6	45.74	45.74
7	46.49	46.49
8	47.00	47.00
9	48.36	48.49

Tabla 4.6 Pérdidas básicas para las medidas simuladas

Debido a que la potencia de recepción en la simulación fue mayor a la experimental, las pérdidas básicas simuladas son menores a las pérdidas básicas reales.

#### 4.2.3. Modelo de Propagación de Pendiente Única

Para la aplicación del modelo de propagación de pendiente única, se obtuvo el valor de la constante  $k$  despejando de la ecuación 3.13 y reemplazando el valor de pérdidas básicas a 1 m que es el valor de  $d_0$  para este caso. Como se expresa en la ecuación 4.4.

$$L_b[\text{dB}] = K[\text{dB}] + 10\log(d[\text{m}])[\text{dB}] - 10\log(d_0[\text{m}])[\text{dB}]$$

$$K[\text{dB}] = L_{b(1\text{m})}[\text{dB}] + 10\log(1) - 10\log(1)$$

$$K[\text{dB}] = L_{b(1\text{m})}[\text{dB}] \quad (4.4)$$

Con la ecuación 4.4 y empleando el valor de pérdidas básicas calculados a 1 m descritos en la tabla 4.5 y 4.6, se obtuvieron los valores de la constante  $k$  para las medidas experimentales, teniendo en cuenta que se realizaron pruebas con diferentes potencia de transmisión resultando así:  $K_1 = 49.87 \text{ dB}$ ,  $K_2 = 52.69 \text{ dB}$  y  $K_3 = 34.77 \text{ dB}$ , para las transmisiones con  $PTx = 2 \text{ dBm}$ ,  $PTx = 20 \text{ dBm}$  y los valores de simulación respectivamente.

Se estimó el valor del exponente de pérdidas de propagación  $n$ , mediante un proceso de ensayo y error, para los dos casos de potencia  $n = 1.6$ .

Los valores teóricos de las pérdidas básicas se presentan en la tabla 4.7.

Distancia (m)	Pérdidas Básicas teóricas PTx = 2 dBm (dB)	Pérdidas Básicas teóricas PTx = 20 dBm (dB)
1	49.87	52.69
2	54.69	57.51
3	57.50	60.32
4	59.50	62.32
5	61.05	63.87
6	62.32	65.14
7	63.30	66.21
8	64.32	67.14
9	65.14	67.96

Tabla 4.7 Pérdidas básicas para medidas reales

Para la simulación, se obtuvieron los valores presentados en la tabla 4.8.

Distancia (m)	Pérdidas Básicas teóricas (dB)
1	34.77
2	39.5864799
3	42.4039401
4	44.4029599
5	45.9535201
6	47.22042
7	48.2915686
8	49.2194398
9	50.0378802
10	50.77

Tabla 4.8 Pérdidas básicas para medidas simuladas

Al aplicar y comparar el modelo de propagación de pendiente única con los resultados experimentales y de simulación, estos difieren en 16.49 dB. Los valores de la simulación son menores que los valores reales, siendo consistente con los valores de pérdidas básicas calculados anteriormente.

La figura 4.21 muestra las pérdidas básicas y los valores obtenidos del modelo de propagación, cuando se transmite con una potencia de 2 dBm, existe una diferencia máxima de 3.94 dB a 5 m y mínima de 0.62 dB a 2 m. El modelo es una aproximación de la realidad y tiene un comportamiento ideal, mientras que en los resultados reales se observa disminución en las pérdidas básicas en algunos puntos del trayecto, con la ecuación 4.3 y sabiendo que la potencia de transmisión es fija, se deduce que en esos puntos aumentó la potencia de recepción de la señal.

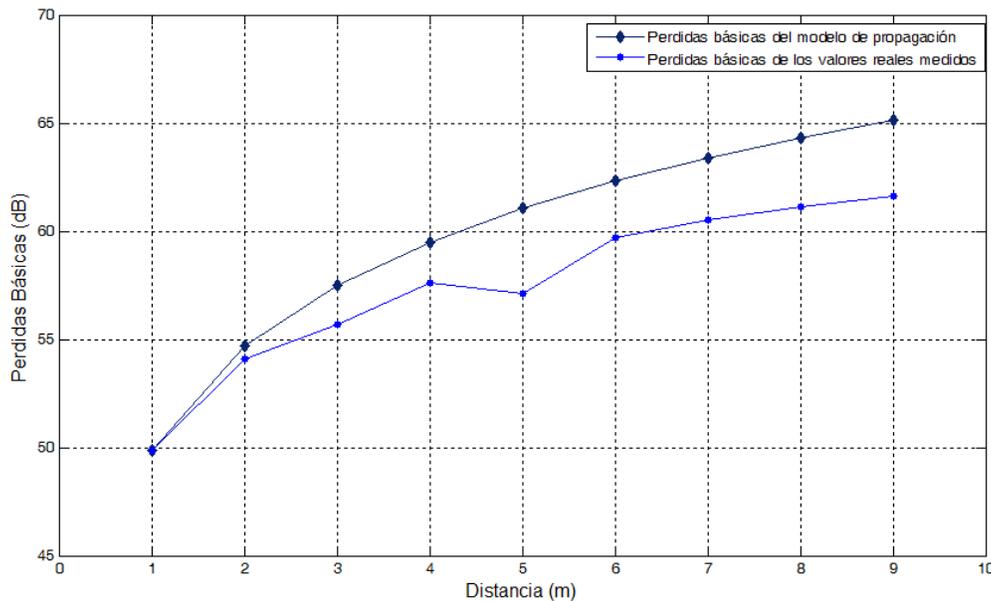


Figura 4.21 Pérdidas básicas medidas vs modelo de propagación (PTx = 2 dBm)

En la figura 4.22 se presentan las pérdidas básicas para el escenario de interiores, para los valores experimentales y del modelo.

La curva de los resultados para el modelo de propagación de pendiente única tiene un comportamiento ideal, mientras que para los valores reales presenta pequeñas variaciones en algunos puntos. La diferencia máxima entre las curvas es de 2.69 dB a los 5 m, esto se debe a las características del escenario que hacen que la potencia disminuya o aumente.

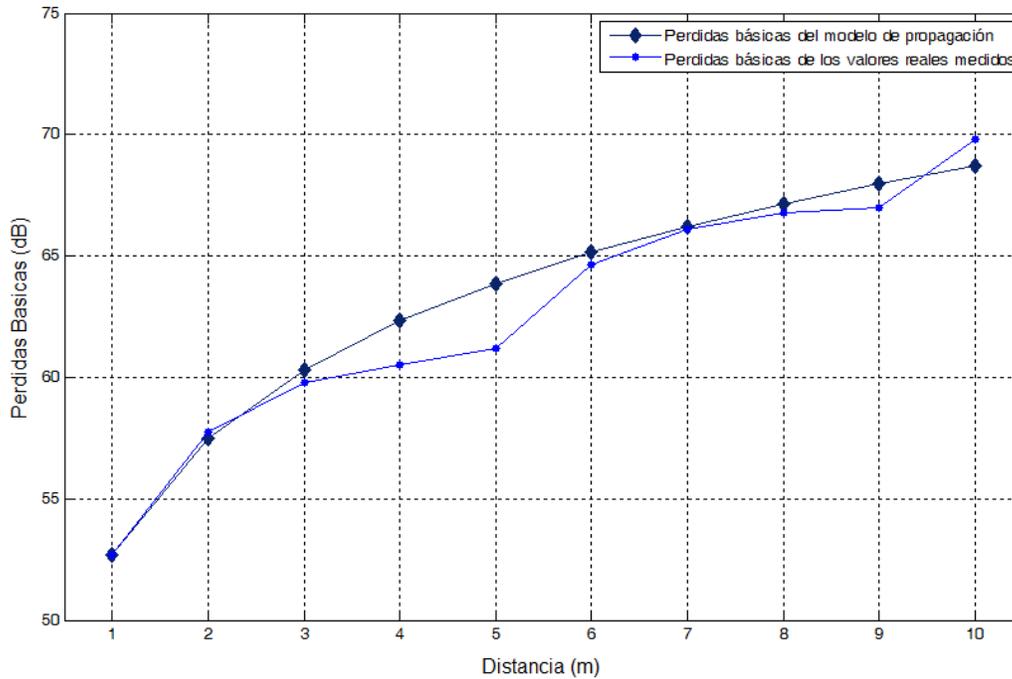


Figura 4.22 Pérdidas básicas medidas vs modelo de propagación (PTx = 20 dBm)

La figura 4.23 muestra la comparación entre las pérdidas básicas para las medidas simuladas y las pérdidas básicas del modelo de propagación de pendiente única, debido al fenómeno de multitrayecto presente en la simulación se puede observar que la curva tiene variaciones en los niveles de atenuación a medida que aumenta la distancia, y la curva que representa las pérdidas básicas del modelo de propagación sigue un comportamiento ideal.

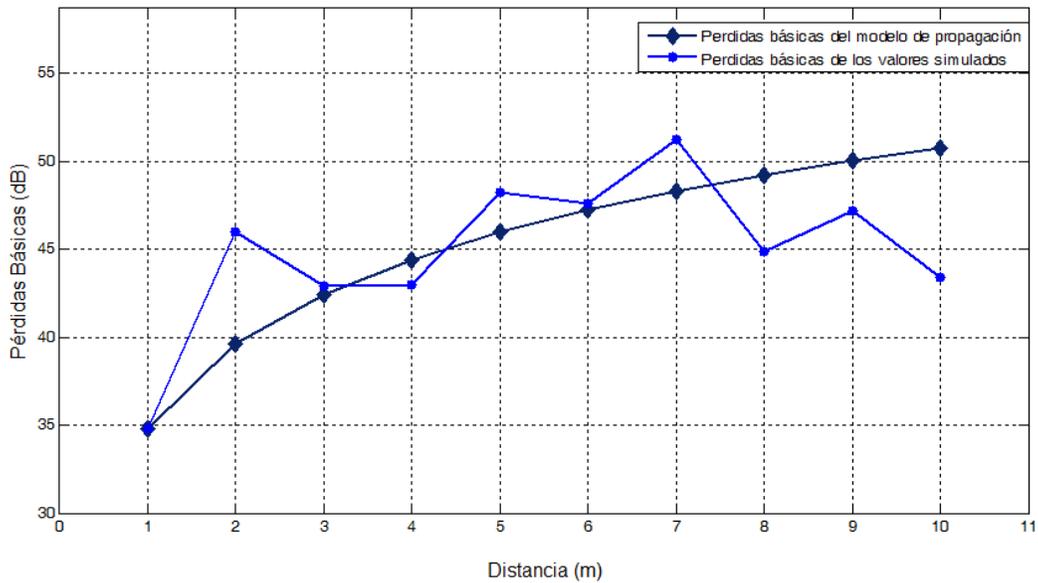


Figura 4.23 Pérdidas básicas simuladas vs modelo de propagación

Para las potencias de transmisión (2 dBm y 20 dBm), se realizó la estimación de las pérdidas básicas en el pasillo con la ecuación del modelo propagación de pendiente única, con las constantes  $n = 1.6$ ,  $K_1 = 49.87 \text{ dB}$ ,  $K_2 = 52.69 \text{ dB}$  y los valores de distancia. Los resultados tienen un incremento constante debido a que el modelo de propagación no tiene en cuenta las características físicas del escenario.

La figura 4.24 representa la estimación de las pérdidas básicas a través del pasillo al emplear el modelo de propagación de pendiente única, donde a medida que aumenta la distancia se incrementa el valor de las pérdidas, para la potencia de transmisión de 20 dBm al final del pasillo las pérdidas son de 79.87 dB y para la potencia de transmisión de 2 dBm fueron de 77.05 dB, en todos los puntos de las curvas la diferencia es de 2.82 dB.

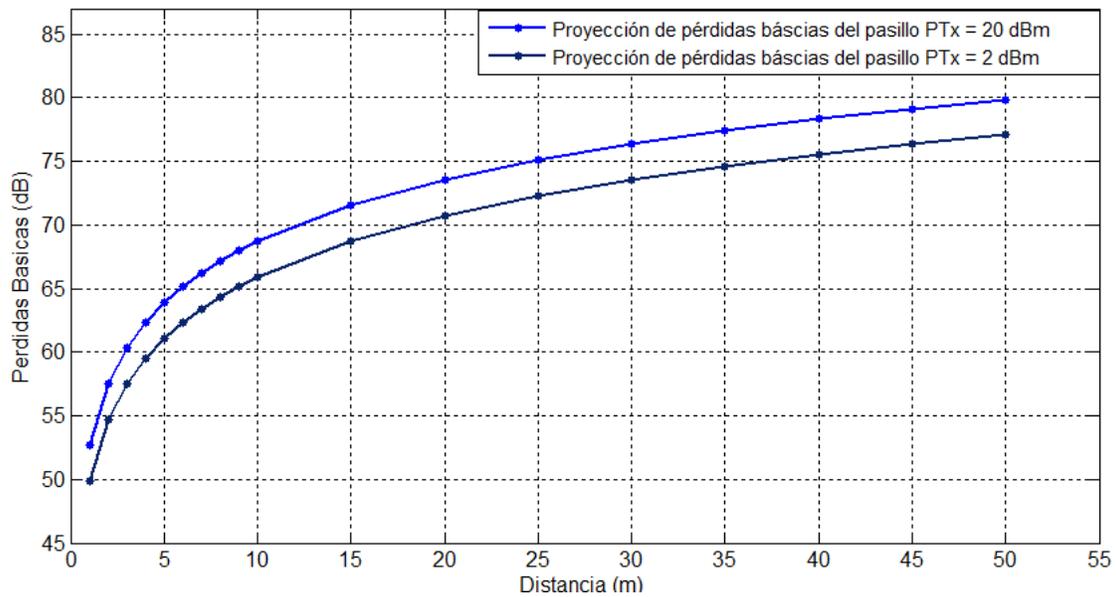


Figura 4.24 Estimación de pérdidas básicas de propagación en el pasillo

### 4.3. DESEMPEÑO DEL SISTEMA

Para este análisis, se utilizaron las ecuaciones descritas en la sección 3.2.5, y se usaron los datos provistos por la herramienta *software* del kit ZB2430.

El *software* considera un paquete erróneo si uno de los bits en el paquete está incorrecto. En ese caso se desecha el paquete completo y se considera como error de datos (*Data Error*). Si no llega el paquete en el tiempo de espera configurado en el equipo receptor, se considera un descarte de datos por tiempo de espera (*Data Time Out*). En los resultados no se discrimina el tipo de error debido a que los transceptores de la red durante las pruebas están sincronizados y los errores se presentan por el desvanecimiento de la señal, no por falta de sincronización con el dispositivo transmisor.

#### 4.3.1. Desempeño en Interiores

Para interiores las pruebas se realizaron con la potencia de transmisión a 2 dBm y se tomaron los datos de recepción de la herramienta *software* del kit ZB2430 como se presenta la tabla 4.9.

Distancia (m)	Numero de paquetes enviados	Tamaño del paquete (bits)	Paquetes Errados	Porcentaje de éxito (%)	Troughput (bps)	Paquetes recibidos con éxito
5	500	2048	0	100	3602.0	500
10	500	2048	0	100	3627.0	500
15	500	2048	0	100	3648.0	500
20	500	2048	0	100	3555.0	500
25	500	2048	0	100	3647.9	500
30	500	2048	0	100	3603.0	500
35	500	2048	0	100	3646.7	500
40	500	2048	0	100	3499.9	500
45	500	2048	0	100	3596.9	500
50	500	2048	0	100	3453.0	500

Tabla 4.9 Resultado de la prueba de transmisión de paquetes en interiores

Se calculó la Tasa de Error de Paquete (PER) empleando la ecuación 3.2, en las transmisiones se utilizó un paquete de tamaño definido (256 bytes = 2048 bits), en la tabla 4.10 se presenta la Tasa de Error de Bit (BER).

Distancia (m)	Tasa de Error de Paquete (PER)	Tasa de Error de Bit (BER)
5	0	0
10	0	0
15	0	0
20	0	0
25	0	0
30	0	0
35	0	0
40	0	0
45	0	0
50	0	0

Tabla 4.10 Desempeño en interiores

La figura 4.25 representa el desempeño en interiores, por el alcance de los dispositivos y el efecto de guía de onda que se presentó en el pasillo, no hay pérdidas de paquetes, por lo tanto la Tasa de Error de Bit (BER) se presenta como una línea recta a través de la distancia total del pasillo.

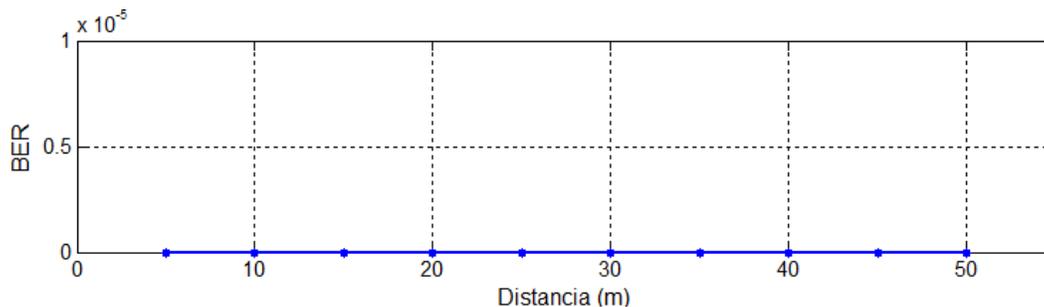


Figura 4.25 BER vs distancia (interiores)

Se obtuvo la potencia de recepción con la ecuación 4.4.

$$P_{Rx} [\text{dBm}] = P_{Tx} [\text{dBm}] - L_b [\text{dB}] + G_a [\text{dBi}] \quad (4.4)$$

Estos resultados se presentan en la tabla 4.11.

Distancia (m)	Potencia de recepción obtenida (dBm)
5	-59.05
10	-63.87
15	-66.69
20	-68.69
25	-70.24
30	-71.50
35	-72.58
40	-73.50
45	-74.32

Tabla 4.11 Potencia de recepción en interiores

Para la evaluación del sistema se encontró el valor de  $E_b/N_o$  con la ecuación 3.11.

La figura 4.26 representa los resultados del desempeño del sistema, en el escenario de interiores no existieron puntos en los que se presentaran pérdidas de bits, aun si configurando la potencia mínima de transmisión, dado que la potencia en recepción no estuvo por debajo de la sensibilidad de los dispositivos, equivalente a -100 dBm.

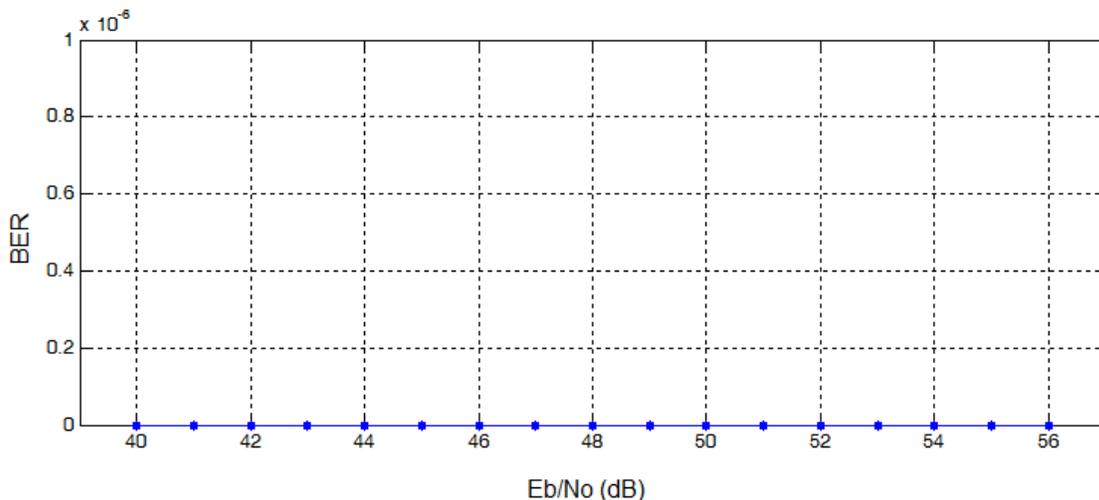


Figura 4.26 Desempeño del sistema en interiores (BER vs Eb/No)

### 4.3.2. Desempeño en Exteriores

Para las pruebas se empleó la potencia mínima de transmisión, y se varió la distancia cada 20 m hasta llegar a 200 m, la tabla 4.12 presenta los resultados obtenidos.

Distancia (m)	Paquetes enviados	Tamaño del paquete (bits)	Paquetes Errados	Porcentaje de éxito (%)	Troughput (bps)	Paquetes recibidos con éxito	PER
10	500	2048	0	100	3646.0	500	0
20	500	2048	0	100	3525.0	500	0
40	500	2048	0	100	3647.5	500	0
60	500	2048	0	100	3245.0	500	0
80	500	2048	0	100	3100.2	500	0
100	500	2048	0	100	3384.8	500	0
120	500	2048	0	100	3588.9	500	0
140	500	2048	28	94.4	3483.5	472	0.056
160	500	2048	72	85.6	3233.1	428	0.144
180	500	2048	128	74.4	3628.0	372	0.256
200	500	2048	236	52.8	3155.7	264	0.472

Tabla 4.12 Resultado de la prueba de transmisión de paquetes en exteriores

Para los módulos transceptores del kit ZB2430 el alcance en exteriores es teóricamente de  $440 \text{ pies} = 134.112 \text{ m}$  empleando la potencia mínima [4], para tomar estas medidas se ubicaron las antenas en línea de vista entre el transmisor y el receptor.

La figura 4.27 presenta los valores de la Tasa de Error de Paquete (PER) respecto a la distancia. Desde los 140 m se incrementan las pérdidas de paquetes, las medidas se tomaron hasta 200 m, esto se debe a que la potencia de las señales sufre por los efectos dispersivos del escenario y el receptor descarta dichos paquetes, aun así los dispositivos en exteriores tuvieron un gran alcance, dado que a 200 m se siguieron recibiendo paquetes, aunque las pérdidas de paquetes fueron significativas, y no se garantizó un buen desempeño durante la transmisión de datos.

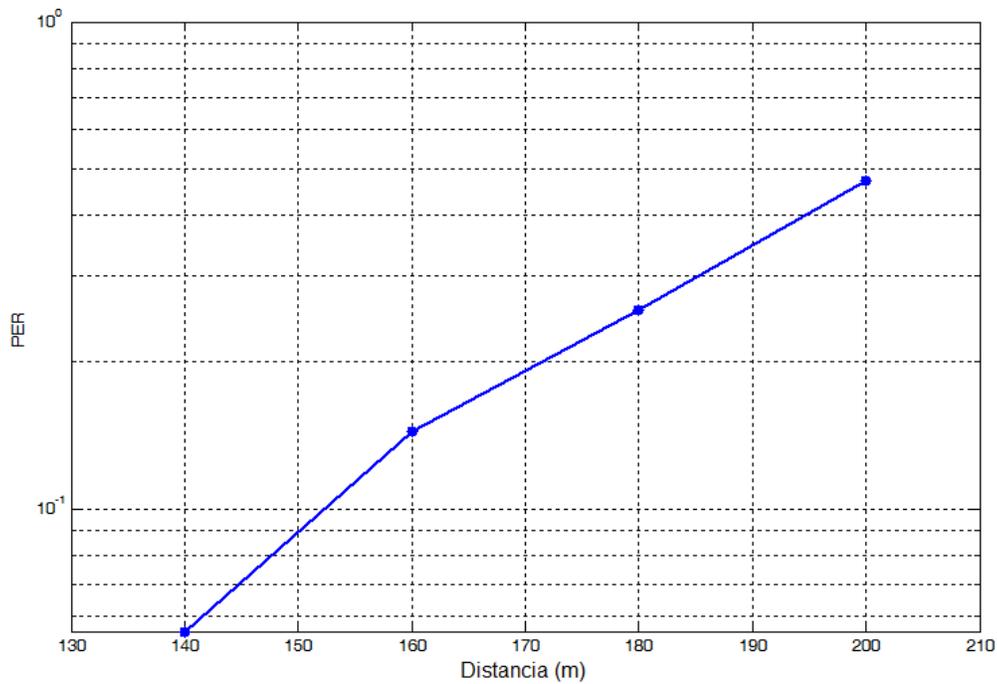


Figura 4.27 PER vs distancia (exteriores)

La figura 4.28 representa a la Tasa de Errores de Bit (BER) en comparación con la distancia, donde se aprecia que a partir de los 140 m la Tasa de Error de Bit (BER) se incrementa por la disminución del nivel de potencia en recepción debido al efecto dispersivo presente en el escenario.

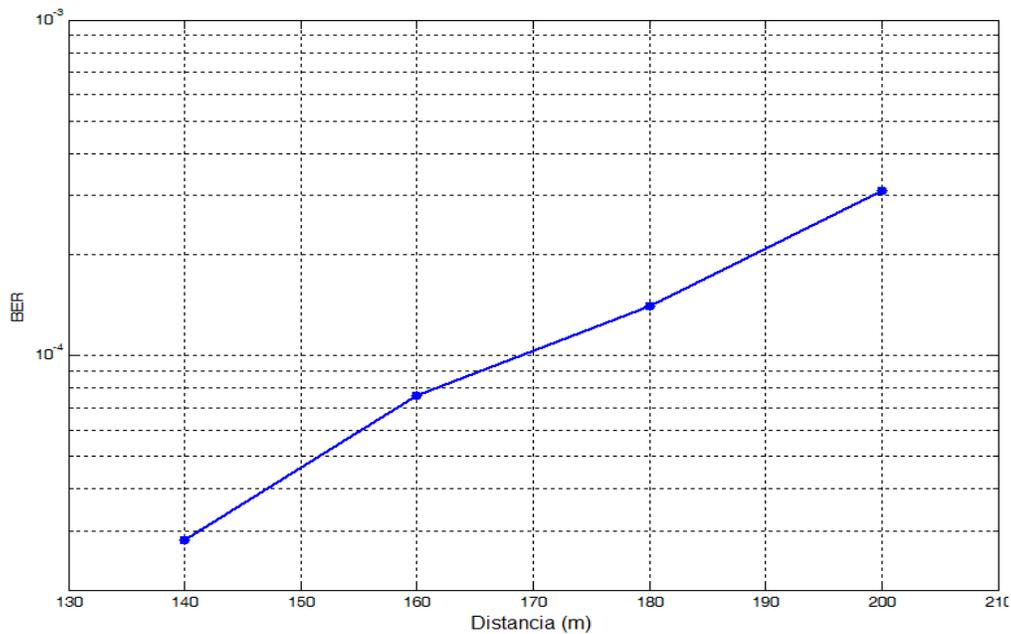


Figura 4.28 BER vs distancia (exteriores)

Para el escenario de exteriores no se tuvieron los equipos para realizar medidas de potencia de recepción, por esa razón, se utilizaron los datos obtenidos de la simulación en *Wireless Insite*® presentados en la tabla 4.13.

Distancia (m)	Potencia de recepción en exteriores(dBm)
20	-61.10
40	-66.86
60	-70.29
80	-72.75
100	-74.66
120	-76.22
140	-77.55
160	-78.70
180	-79.72
200	-80.62

Tabla 4.13 Potencia de recepción para exteriores en *Wireless Insite*®

La tabla 4.14 presenta los valores del desempeño del sistema de comunicación de datos para exteriores.

Eb/No	BER
34.52	0.00031
35.42	0.00014
36.44	0.000076
37.59	0.00002814
38.92	0
40.48	0
42.39	0
44.85	0
48.28	0
54.04	0

Tabla 4.14 Desempeño en exteriores

La figura 4.29 representa los resultados del desempeño del sistema para el escenario de exteriores.

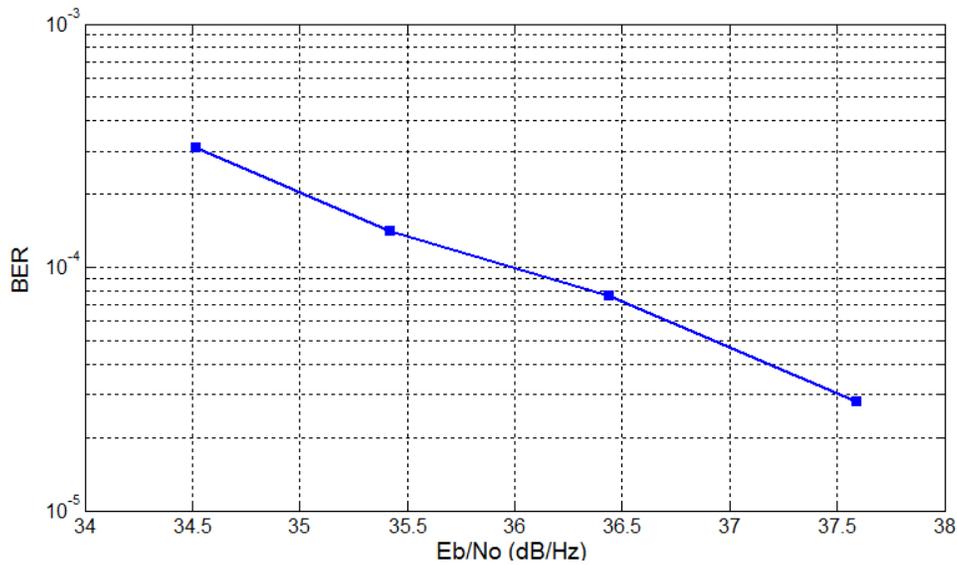


Figura 4.29 Desempeño del sistema en exteriores (BER vs  $E_b/N_0$ )

A través del trayecto los niveles de potencia de la señal en recepción decaen a medida que aumenta la distancia, para los puntos donde la relación de Energía de Bit a Densidad de Ruido es baja existen mayores pérdidas de bits.

### 4.3.3. Simulación en Matlab®

Se representó el nivel físico de la tecnología ZigBee® con la herramienta Simulink® como se observa en la figura 4.30. Se diseñó un transmisor y un receptor con la técnica de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS) y la Modulación por Desplazamiento Compensado de Fase en Cuadratura con Desplazamiento Temporal (OQPSK), y se trabajó con un canal de Ruido Blanco Gaussiano Aditivo (AWGN).

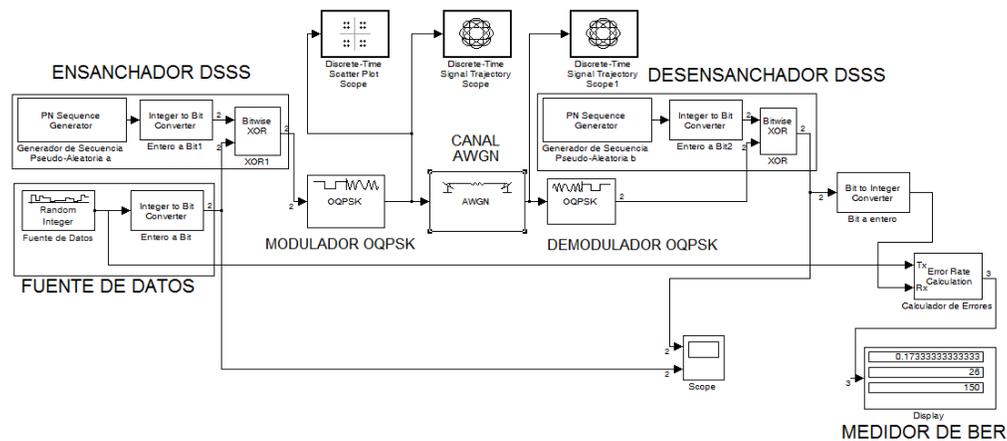


Figura 4.30 Bloques de simulación ZigBee® en Matlab®

#### 4.3.3.1. Bloques de la simulación

Para la simulación se tuvo en cuenta el diseño del sistema de comunicación descrito, y se empleó la misma lógica en el simulador para implementar el nivel físico de la tecnología ZigBee®.

##### a) Ensanchamiento y Desensanchamiento de la señal

Se empleó un bloque de generación de secuencias pseudo-aleatorias, y un bloque que de una compuerta O Exclusiva (XOR, *Exclusive OR*) para simular la técnica de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS). Donde la compuerta O Exclusiva (XOR) combinó la señal del generador de datos con la señal proveniente del generador de secuencias [18]. El bloque de generación de datos se programó para crear conjuntos de bits cada 4  $\mu$ s, esto representa la velocidad de 250 Kbps, y el generador de secuencias pseudo-aleatorias se configuró para generar datos cada 0.5  $\mu$ s que representa la velocidad de la secuencia de chip, de 2 Mbps [19].

En el proceso de desensanchamiento se tomó la configuración del bloque de secuencia pseudo-aleatoria de ensanchamiento, para recuperar los datos provenientes del demodulador.

##### b) Modulación y Demodulación

Para la modulación y demodulación se utilizaron los bloques en banda base para la Modulación por Desplazamiento Fase en Cuadratura con Desplazamiento Temporal (OQPSK). Se configuraron los parámetros acordes con los datos de entrada y de salida. En este caso los bloques del sistema emplearon el tipo de datos uint8 que es un entero sin signo que ocupa 8 bits [20].

##### c) Canal

En las simulaciones se usó el canal de Ruido Gaussiano Blanco Aditivo (AWGN), se establecieron los parámetros como el número de bits por símbolo, el periodo de los símbolos, la potencia de entrada al canal de las señales, y la relación señal de Energía de Bit a Densidad de Ruido.

#### 4.3.3.2. Parámetros de la simulación

La tabla 4.15 presenta los parámetros configurados de la simulación.

**Evaluación y Análisis de Desempeño de un Sistema de Comunicaciones Punto a Punto en 2.4 GHz  
Basado en ZigBee**

Bloque	Parámetros	Datos
Generador de bits	Probabilidad de un cero	0.5
	Número m-ario	4
	Semilla inicial ( <i>initial seed</i> )	0
	Tiempo de muestreo ( <i>sample time</i> )	4 μseg (250 Kbps)
	Tipo de datos de salida ( <i>output data type</i> )	Uin8 (entero sin signo que ocupa 8 bits)
Generador de Secuencia Pseudo-aleatoria	Generador de polinomios ( <i>Generator polynomial</i> )	$x^7 + x^3 + x^2 + x^1$
	Estado inicial ( <i>Initial states</i> )	1
	Tiempo de muestreo	0.5 μs (2 Mbps)
	Mascara del vector de salida ( <i>Output mask vector</i> )	1 (valor entero)
Modulador OQPSK	Tipo de datos de entrada	Entero
	Tipo de dato de salida	Inherente a la vía de propagación
	Compensación de Fase	0
Canal AWGN	Semilla inicial	0
	Modo	Relación Señal a Ruido (Eb/No)
	Eb/No	Varía entre -38dBm – 56 dBm
	Número de bits por símbolo	16 bits
	Potencia de entrada de las señales	1 W (potencia normalizada)
	Periodo de símbolo	8 μs (duración de un bit del símbolo) (2/250 kbps))
Demodulador OQPSK	Tipo de salida	Entero
	Salida	Uin8 (entero sin signo que ocupa 8 bits)
	Configuración básicas	Por defecto
	Compensación de Fase	0
Generador de Secuencia Pseudo-aleatoria (1)	Generador de polinomio ( <i>Generator polynomial</i> )	$x^7 + x^3 + x^2 + x^1$
	Estado inicial ( <i>Initial states</i> )	1
	Tiempo de muestreo ( <i>sample time</i> )	0.5 μs (2 Mbps)
	Mascara del vector de salida ( <i>Output mask vector</i> )	1 (valor entero)

**Tabla 4.15 Parámetros de configuración de la simulación**

#### 4.3.3.3. Resultados de la simulación

Con la configuración de los módulos descrita en la tabla 4.15 se obtuvieron los resultados de la figura 4.31 que representa los resultados de desempeño del sistema de comunicaciones.

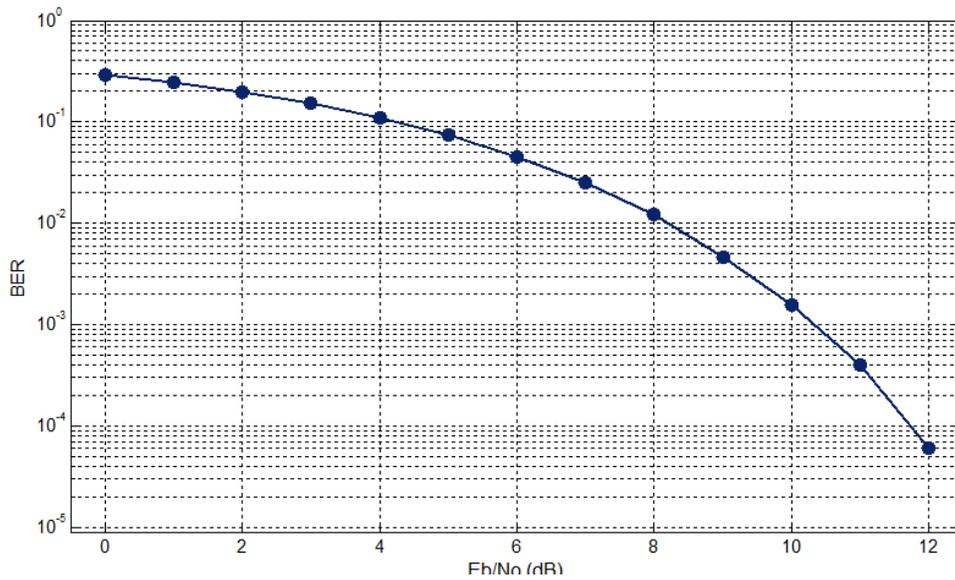


Figura 4.31 Desempeño del sistema de la simulación en Matlab®

En la figura 4.31, se muestra que para los valores de la Relación Energía de Bit a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ) en el rango de 0 dB y 12 dB, la Tasa de Error de Bit (BER) está entre  $2.9 \times 10^{-1}$  a  $6 \times 10^{-5}$  en escala logarítmica, estos niveles no pueden ser alcanzados experimentalmente dado que los parámetros de potencia de transmisión y sensibilidad de los módulos del kit ZB2430 están en un rango mayor a los resultados de la simulación.

También se realizó el análisis empleando la herramienta BERTool® de Matlab®, cargando el archivo de Simulink® que contiene el modelo de la simulación siguiendo la configuración de la figura 4.32.

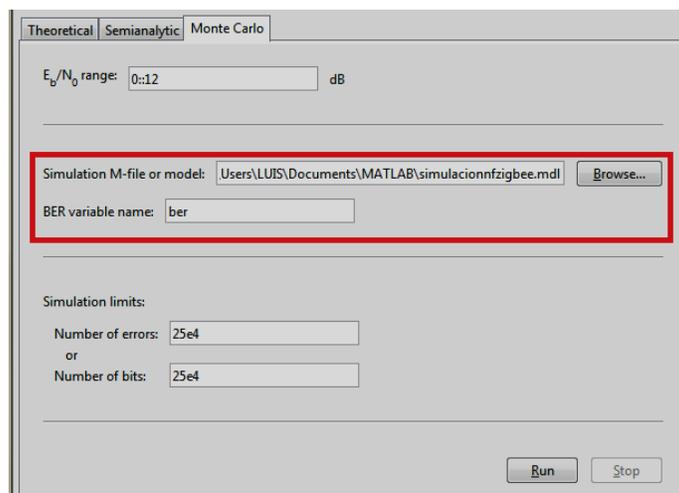


Figura 4.32 Configuración de BERTool®

Para el análisis teórico se emplea la configuración de la figura 4.33, donde se define la modulación, el canal, el rango de valores para la Relación Energía de Bit a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ) y otros parámetros que se tomaron por defecto.

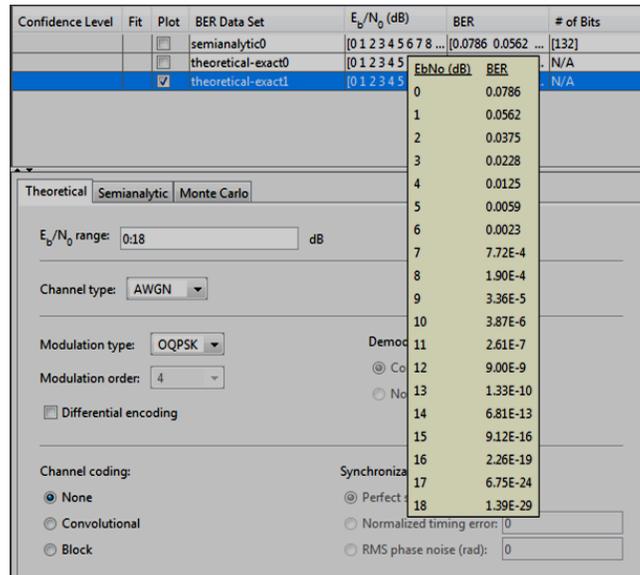


Figura 4.33 Configuración para el análisis teórico

La figura 4.34 presenta los resultados del análisis teórico de la herramienta BERTool® y los resultados obtenidos del modelo en Simulink, donde a medida que se incrementa la relación señal a ruido ( $E_b/N_0$ ) disminuye considerablemente la BER, cuando la Relación Energía de Bit a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ) se tuvo una diferencia máxima en la BER de 0.212758 a 0 dB y mínima de de  $6 \times 10^{-5}$  dB a 12 dB. Esto quiere decir que para el análisis teórico se tiene un desempeño prácticamente ideal en estos puntos, sin embargo la curva del análisis teórico sigue presentando pérdidas mientras aumenta la Relación Energía de Bit a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ), mientras que para la simulación del nivel físico no existen pérdidas de bits para estos valores.

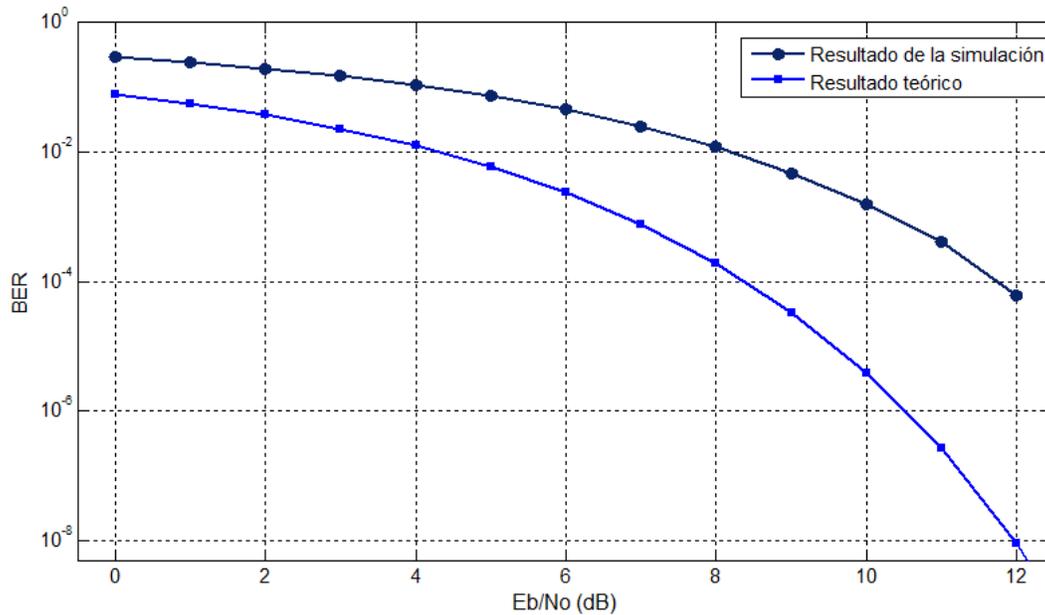


Figura 4.34 Resultados del análisis teórico vs resultado simulado (BERTool®)

Para el análisis semi-analítico utiliza la configuración de la figura 4.35.

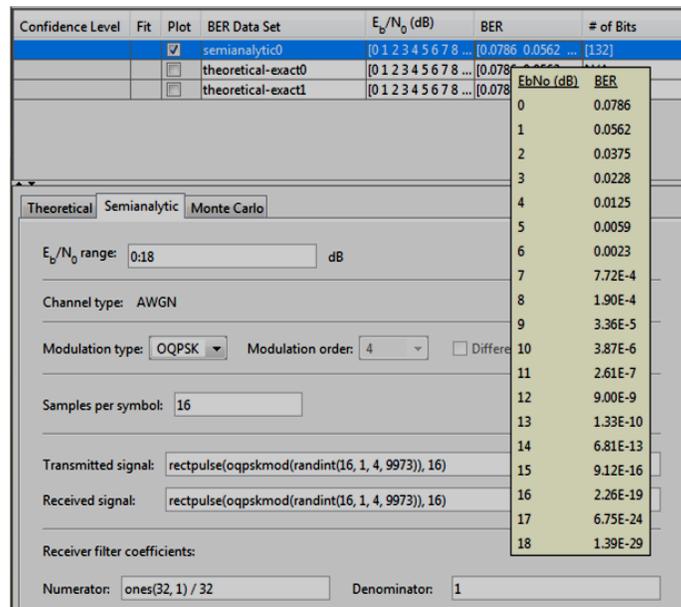


Figura 4.35 Configuración para el análisis semi-analítico

Para el análisis semi-analítico se obtuvieron los resultados de la figura 4.36, estos son equivalentes a los resultados del análisis teórico mostrado en la figura 4.34.

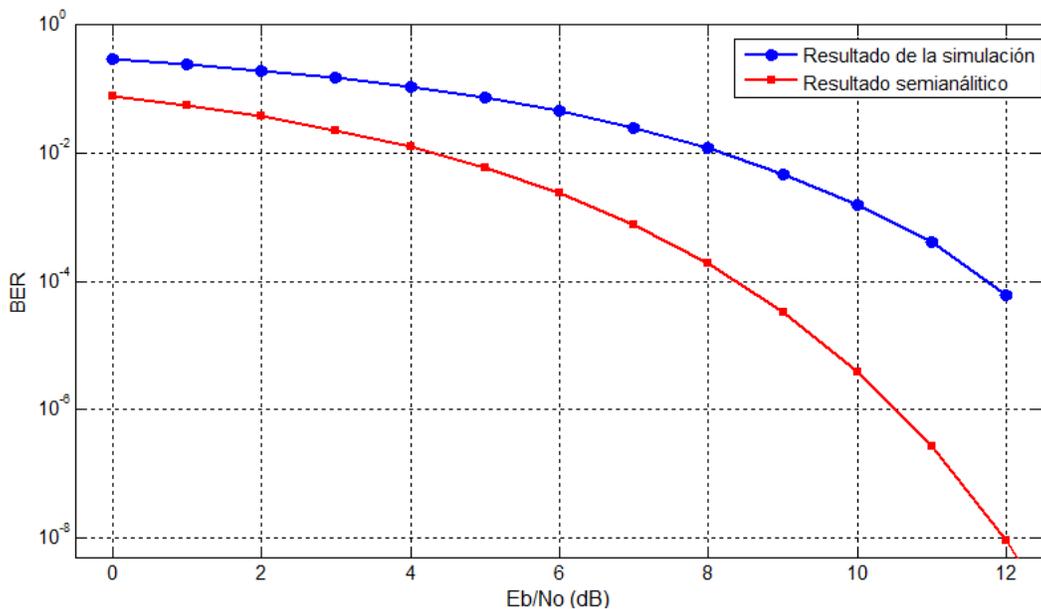


Figura 4.36 Resultados del análisis semi-analítico vs resultado simulado (BERTool®)

Con el análisis de la BERTool® tuvo en cuenta el tipo de modulación, y las muestras por símbolo, los resultados obtenidos presentaron pérdidas de bits para ciertos valores de la Relación Energía de Bit a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ), al comparar estos valores con los resultados obtenidos para la simulación del nivel físico, el desempeño entregado por la BERTool® es mejor considerando que las pérdidas de bits se presentan para valores de  $E_b/N_0$  entre 0 y 12 dB son menores a los obtenidos en el mismo rango por la simulación realizada en Simulink®, sin embargo para valores mayores de la Relación Energía de Bit a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ) no existen pérdidas de bits mientras que con la BERTool® siempre se presentan pérdidas de bits, esto se presenta debido a que el nivel físico de ZigBee® modelado tuvo en cuenta la técnica de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS) y los parámetros de entrada de la señal al canal.

#### 4.4. ANÁLISIS DE FRECUENCIA

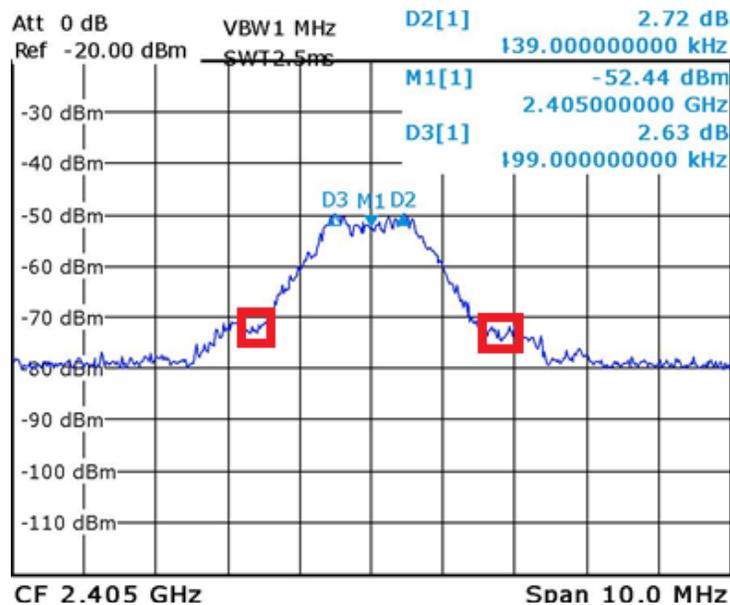
En esta sección se realizó el análisis del ancho de banda del sistema y la estabilidad en frecuencia frente a variaciones de temperatura.

##### 4.4.1. Ancho de Banda

Se comparó el ancho de banda obtenido del analizador de redes con la especificación de ancho de banda del fabricante, y el ancho de banda teórico de acuerdo al tipo de modulación.

**a. Ancho de banda medido y ancho de banda teórico**

El ancho de banda especificado por el fabricante para los dispositivos del kit ZB2430 es de 3 MHz. En la figura 4.37 se observa el espectro de la señal recibida en el analizador de redes, dicho espectro inicia su ascenso en una frecuencia de 2403.5 MHz, la frecuencia central está en 2405 MHz, y el espectro finaliza en 2406.75 MHz aproximadamente.



**Figura 4.37 Ancho de banda de la señal**

El ancho de banda medido experimentalmente se obtiene con la ecuación 4.5.

$$Bw_{\text{medido}} = f_{\text{parada}} - f_{\text{inicio}} \quad (4.5)$$

Reemplazando los valores se obtuvo el valor del ancho de banda medido:

$$Bw_{\text{medido}} = 2406.75 \text{ MHz} - 2403.5 \text{ MHz}$$

El ancho de banda teórico depende del factor de ensanchamiento dado por la técnica de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa. Se denomina Factor de Ensanchamiento (SF, *Spreading Factor*) o Ganancia de Procesamiento (PG, *Processing Gain*) a la relación que existe entre el ancho de banda de la información y el ancho de banda de la secuencia de ensanchamiento, y consiste en el número entero de *chips* que existen por cada símbolo o bit de información, se representa mediante la ecuación 4.6 [21].

$$SF = \frac{T_b}{T_c} = \frac{Bw_c [\text{MHz}]}{Bw_b [\text{MHz}]} = \frac{R_c [\text{cps}]}{R_b [\text{bps}]} \quad (4.6)$$

Donde:

$Bw_c$ : Ancho de banda de la secuencia pseudo-aleatoria.

$Bw_b$ : Ancho de banda de la señal de datos.

$R_c$ : Velocidad de transmisión de la secuencia pseudo-aleatoria.

$R_b$ : Velocidad de transmisión de datos.

Reemplazando los valores de velocidad de la secuencia pseudo-aleatoria o chip y la velocidad de transmisión de datos del sistema se obtiene que:

$$SF = \frac{2 \times 10^6 [\text{cps}]}{250 \times 10^3 [\text{bps}]} = 8$$

Con el valor del factor de ensanchamiento  $SF$  y sabiendo que el valor de ancho de banda de la señal es  $Bw_i = 250 \text{ KHz} = 0.250 \text{ MHz}$  se obtiene que el ancho de banda de la señal después del proceso de ensanchamiento es:

$$Bw_{\text{señalensanchada}} = SF \times Bw_i = 8 \times 0.250 \text{ MHz} = 2 \text{ MHz}$$

Para la Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura Con Desplazamiento Temporal (OQPSK) el ancho de banda se representa mediante la ecuación 4.7 [22].

$$Bw_{\text{OQPSK}} = Bw_{\text{señalensanchada}} \quad (4.7)$$

El valor obtenido corresponde al ancho de banda teórico es  $Bw_{\text{teórico}} = 2 \text{ MHz}$ , de acuerdo a las especificaciones dadas por el estándar IEEE 802.15.4 [3]. Sin embargo, de acuerdo a las especificaciones del fabricante el ancho de banda del canal es de 3 MHz por lo tanto la tecnología no cumple con lo propuesto teóricamente por el estándar.

La densidad Espectral de Potencia es una medida que describe como está distribuida la potencia sobre un rango de frecuencia, el estándar IEEE 802.15.4 define la Máscara Espectral de Densidad de Potencia de Ruido, esta asegura que el transmisor opere dentro los límites permitidos, presentados en la tabla 4.16.

Frecuencia (MHz)	Limite Relativo (dB)	Limite Absoluto (dBm)
$ f-f_c  > 3.5$	-20	-30

Tabla 4.16 Máscara de Potencia Espectral de Potencia

Gráficamente para un canal del estándar IEEE 802.15.4 la Máscara de Densidad Espectral de Potencia, debe ser como la mostrada en la figura 4.38.

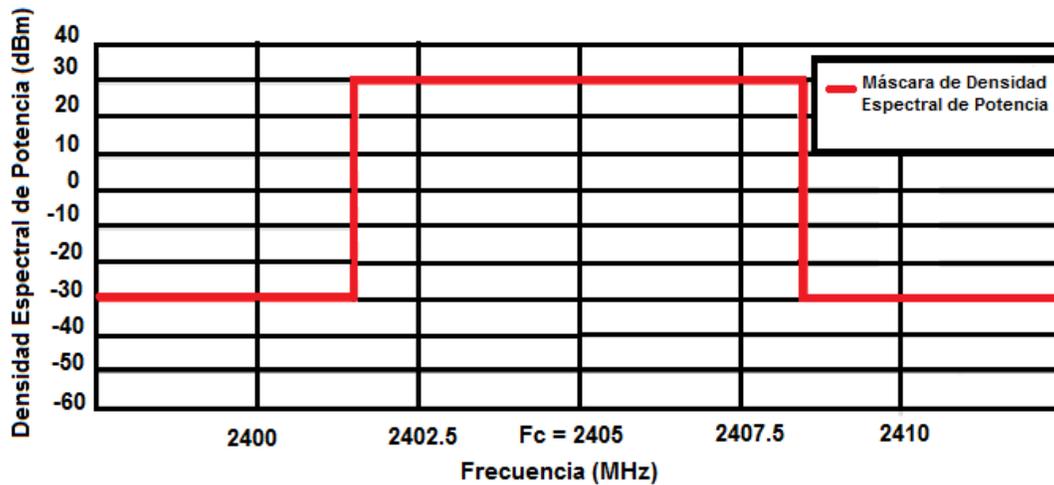


Figura 4.38 Mascara de densidad espectral de potencia

De acuerdo al resultado obtenido en la figura 4.39, el sistema cumple con la transmisión de Densidad Espectral de Potencia al usar el ancho de banda de 3 MHz en las señales, pues está contenido dentro de la Máscara de Densidad Espectral de Potencia.

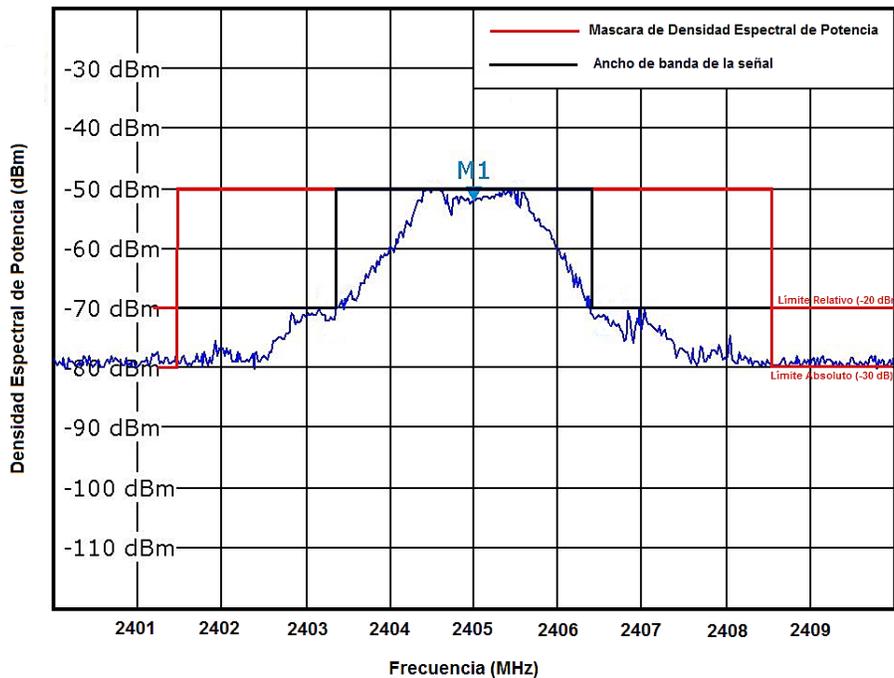


Figura 4.39 Mascara de densidad espectral de potencia y ancho de banda de la señal

Realizando la comparación del ancho de banda medido y el suministrado por el fabricante, se tiene:

$$Bw_{\text{medido}} = 3.5 \text{ MHz} \approx Bw_{\text{fabricante}} = 3 \text{ MHz}$$

Esto demuestra coherencia entre el valor del ancho de banda medido y el suministrado por el fabricante con una diferencia de 0.25 MHz, por lo que se considera que el sistema cumple con los requerimientos de ancho de banda descritos para los módulos del kit ZB2430 [4].

### b. Ancho de banda de la señal a 3 dB

Se determina teóricamente el ancho de banda del valor de potencia mitad, la figura 4.40 representa los puntos de potencia máxima de la señal y los puntos de potencia mitad.

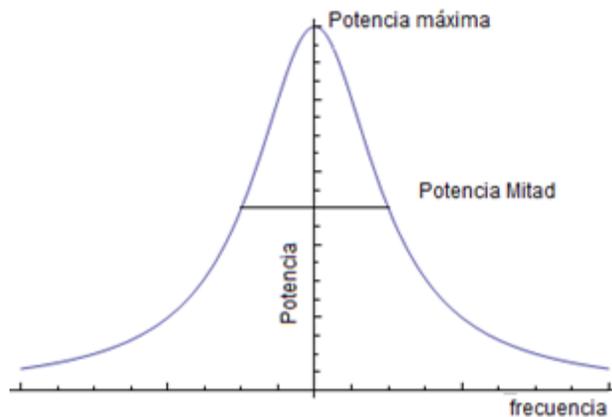


Figura 4.40 Relación de frecuencia y potencia

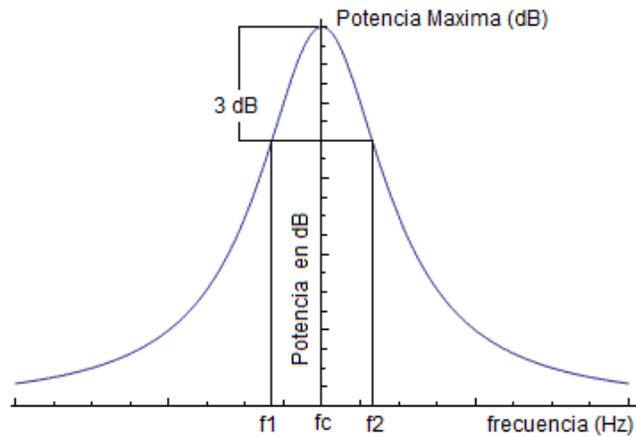
La ecuación 4.8 representa el valor de la potencia mitad en veces de un sistema.

$$Pot_{\text{mitad}} = \frac{Pot_{\text{máx}}}{2} \quad (4.8)$$

Pasando la ecuación 4.8 a unidades logarítmicas se obtuvo la ecuación 4.9.

$$Pot_{\text{mitad}} [\text{dBm}] = 10 \log Pot_{\text{máx}} - 3 [\text{dB}] \quad (4.9)$$

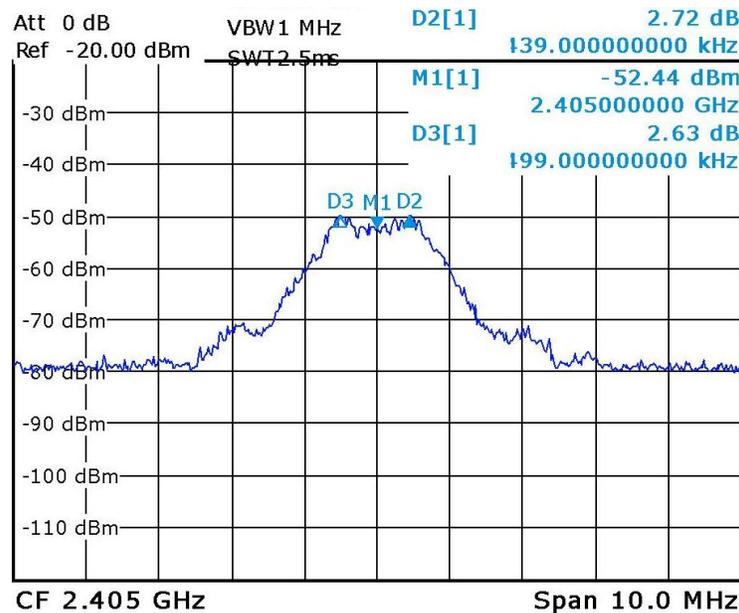
La ecuación 4.9 representa la potencia mitad en dB, esto se ilustra en la figura 4.41.



**Figura 4.41 Relación de frecuencia y densidad espectral de potencia**

El ancho de banda a 3 dB de la potencia máxima representa los puntos donde la potencia ha caído a la mitad. En general para los sistemas de comunicaciones, el ancho de banda a potencia mitad representa el ancho de banda del sistema [23].

En la figura 4.42 se observa el ancho de banda de la señal recibida. Con el analizador de redes se ubicaron marcas de referencia a 3 dB (potencia mitad) del nivel de potencia de la componente central de frecuencia de la señal.



**Figura 4.42 Ancho de banda de la señal a 3 dB**

La separación de las marcas (D1 y D2) desde la componente central de frecuencia, se expresan a continuación:

$$D1_{(3dB)} = 439 \text{ KHz} = 0.439 \text{ MHz}$$

$$D2_{(3dB)} = 499 \text{ KHz} = 0.499 \text{ MHz}$$

El ancho de banda a 3 dB se obtuvo con la suma de los valores de separación de las marcas se obtuvo:

$$Bw_{\text{potmitad}} = D1_{(3dB)} + D2_{(3dB)} = 0.439 + 0.499 = 0.938 \text{ MHz}$$

Para los dispositivos ZigBee® el ancho de banda dado por la separación a 3 dB de la potencia de la frecuencia central es 0.938 MHz y no corresponde al ancho de banda de la señal esperado que es de 3 MHz.

### c. Ancho de banda de la señal a 20 dB

Se analizó el ancho de banda comprendido entre las marcas ubicadas aproximadamente 20 dB por debajo del nivel de potencia de la frecuencia central de la señal, como se expresa en la figura 4.43.

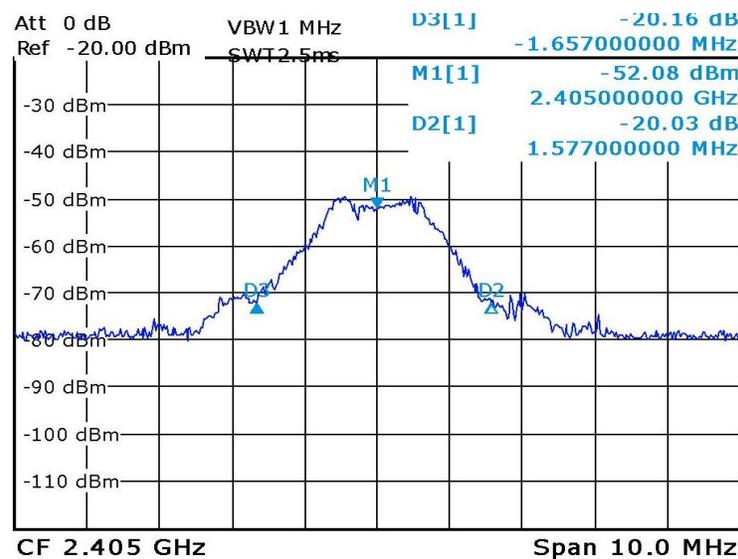


Figura 4.43 Ancho de banda de la señal a 20 dB

La separación de las marcas (D1 y D2) a 20 dB por debajo del nivel de potencia en la frecuencia central de la señal, se expresan a continuación:

$$D1_{(20dB)} = 1.657 \text{ MHz}$$

$$D2_{(20dB)} = 1.577 \text{ MHz}$$

El ancho de banda a 20 dB de atenuación de la frecuencia central del canal es:

$$Bw_{(20dB)} = D1_{(20dB)} + D2_{(20dB)} = 1.657 + 1.577 = 3.234 \text{ MHz}$$

El valor del ancho de banda a 20 dB de la frecuencia central,  $Bw_{20 \text{ dB}} = 3.234 \text{ MHz}$  corresponde aproximadamente al ancho de banda medido  $Bw_{medido} = 3.25 \text{ MHz}$ , esto representa que el ancho de banda a 20 dB de atenuación es el 99.50% del ancho de banda de la señal medido.

#### d. Ancho de banda de la señal a 30 dB

Para el análisis del ancho de banda se tomaron los puntos comprendidos aproximadamente 30 dB por debajo del nivel de potencia de la frecuencia central de la señal, como se ilustra en la figura 4.44.

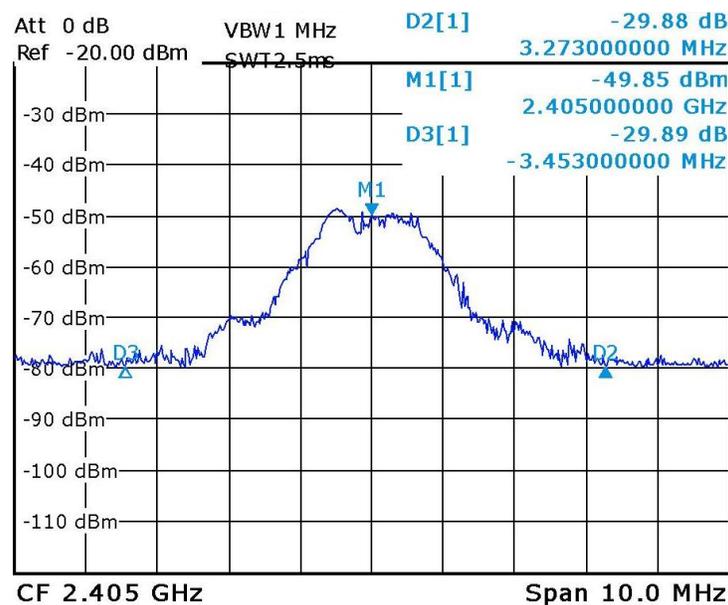


Figura 4.44 Ancho de banda de la señal a 30 dB

Se obtuvieron los siguientes valores:

$$D1_{(30dB)} = 3.273 \text{ MHz}$$

$$D2_{(30dB)} = 3.543 \text{ MHz}$$

El ancho de banda a 30 dB se calculó así:

$$Bw_{(30dB)} = D1_{(30dB)} + D2_{(30dB)} = 3.273 + 3.453 = 6.726 \text{ MHz}$$

La posición de las marcas deltas (D1 y D2) a 30 dB por debajo de la potencia de la frecuencia central se encuentran ubicadas en el piso de ruido de la señal y no representaron una medida válida para el análisis, debido a que en esos puntos no hubo presencia de la señal transmitida y el valor de ancho de banda teórico superó el valor esperado para los módulos ZigBee®.

#### 4.4.2. Estabilidad en Frecuencia

Se verificó la frecuencia del canal y la estabilidad del espectro cuando se elevó la temperatura del módulo transmisor.

La figura 4.45 corresponde al espectro de la señal cuando la temperatura del transmisor es 25° C. Esta medida sirvió de referencia para analizar las variaciones en frecuencia cuando se incrementó la temperatura del módulo emisor.

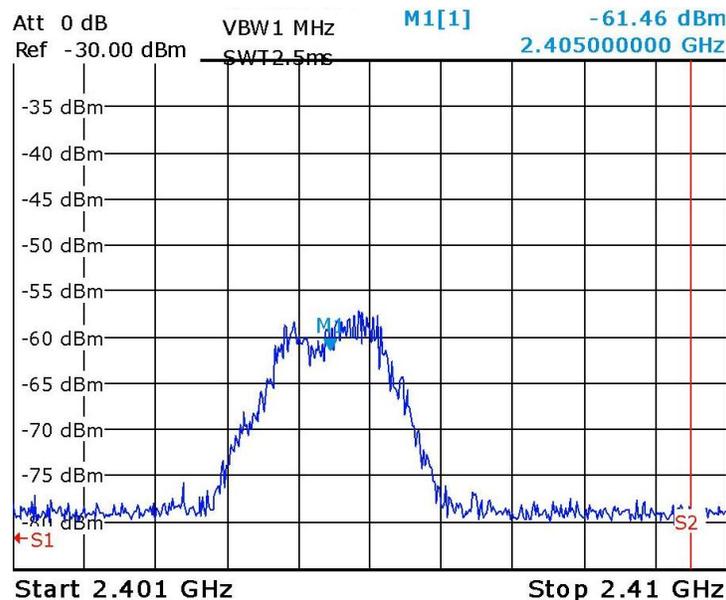


Figura 4.45 Espectro de la señal, dispositivo transmisor a 25° C

En la figura 4.45 el ancho de banda de la señal es  $Bw_{medido} = 3.25 \text{ MHz}$ . No se observaron perturbaciones en el espectro, ni corrimientos en frecuencia en el canal.

La figura 4.46 representa el espectro cuando la temperatura del dispositivo fue de 66° C, no hubo corrimientos en la frecuencia central de la señal, ni alteración en el ancho de banda.

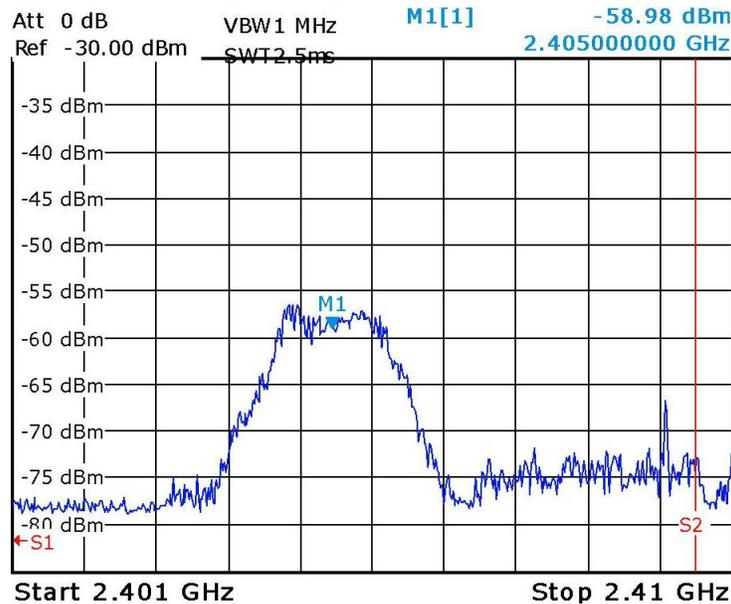


Figura 4.46 Espectro de la señal, dispositivo transmisor a 66° C

Al incrementar la temperatura del módulo no se observaron variaciones en la forma del espectro de la señal, no existieron corrimientos en la frecuencia central de la señal, y el ancho de banda se mantuvo constante. Teóricamente los módulos transceptores pueden trabajar a 85° C [4], sin embargo, experimentalmente no se logró incrementar la temperatura a más de 66° C.

En la figura 4.46 se presentan perturbaciones en el espectro fuera del rango del canal, generadas por una fuente desconocida, que no afectaron el desempeño del sistema de comunicaciones, por consiguiente el sistema cumplió con lo propuesto por el fabricante al trabajar en altas temperaturas.

## 4.5. ANÁLISIS DE INTERFERENCIA

Para las pruebas del sistema de comunicaciones ante interferencia, se empleó el generador de interferencia, este dispositivo trabaja en el rango de 850 MHz a 2400 MHz [24].

### 4.5.1. Espectro de la Señal

En la figura 4.47 se observa el ancho de banda de la señal en una transmisión sin interferencia con la potencia mínima, se aprecia que el piso de ruido está

aproximadamente en -49 dBm, la frecuencia central de la señal (2405 MHz) tiene un valor de -17.96 dBm, y el ancho de banda equivale a 3.25 MHz.

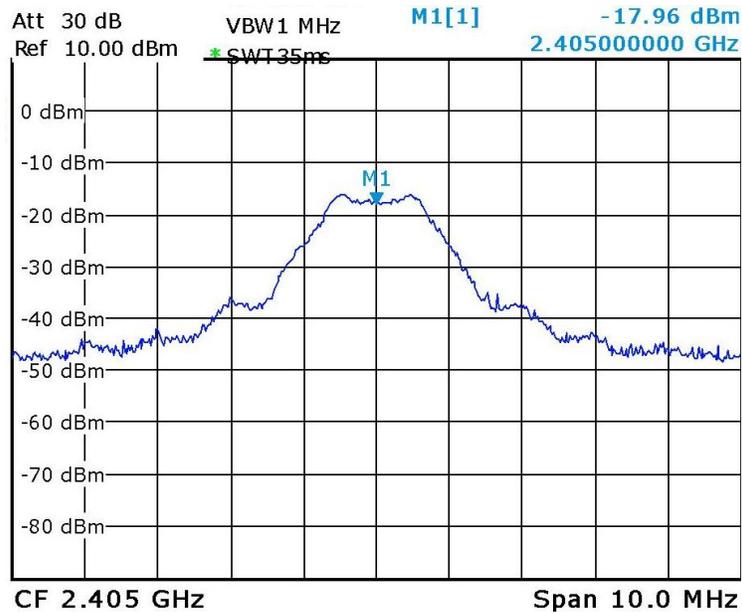


Figura 4.47 Espectro de la señal sin interferencia PTx =20 dBm

En la figura 4.48 se visualiza el nivel de potencia del dispositivo generador de interferencia sin tener otra fuente de transmisión activa. El nivel de interferencia alcanzó un valor de -33.12 dBm, y este efecto se mantiene constante desde los 850 MHz hasta 2400 MHz.

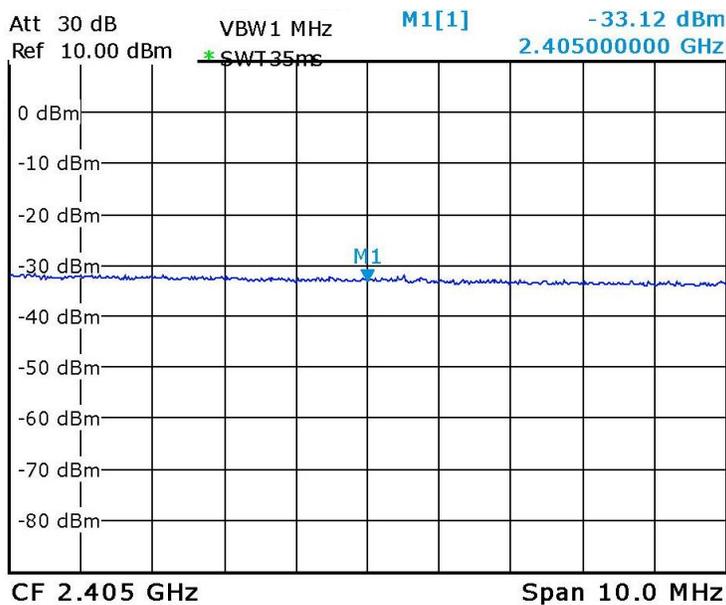
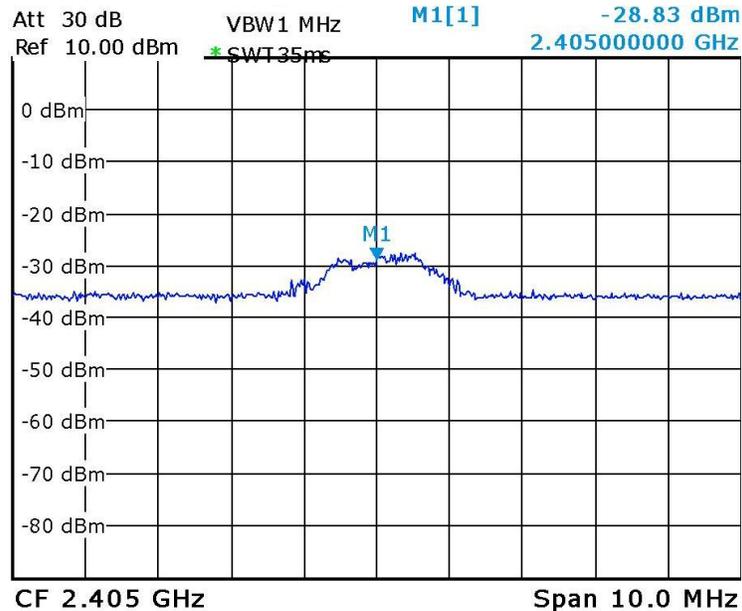


Figura 4.48 Espectro de la señal de interferencia

En la figura 4.49 se observa el espectro de la señal para una transmisión con la potencia mínima y un tiempo de espera entre paquetes de 0s. La potencia en la componente central de frecuencia de la señal es -28.83 dBm y el nivel de potencia de la señal interferente se encuentra alrededor de -35 dBm, ocasionando un bloqueo en las señales transmitidas, lo que genera incremento en la pérdida de paquetes en recepción.



**Figura 4.49 Espectro de la señal transmitida por el transceptor con PTX = 2 dBm más interferencia**

La figura 4.50 muestra la señal transmitida del generador de interferencia y del dispositivo ZigBee®, cuando la potencia de transmisión es 20 dBm. El dispositivo transmisor ZigBee® se ubico a 60 cm del generador de interferencia y a 0 cm del analizador de redes, con un tiempo de espera entre paquetes de 500 ms, el nivel de interferencia estuvo alrededor de -35 dBm y la potencia en la frecuencia central fue -27.24 dBm, la pérdida de paquetes en la recepción superó el 50 % del total de paquetes, afectando el desempeño del enlace.

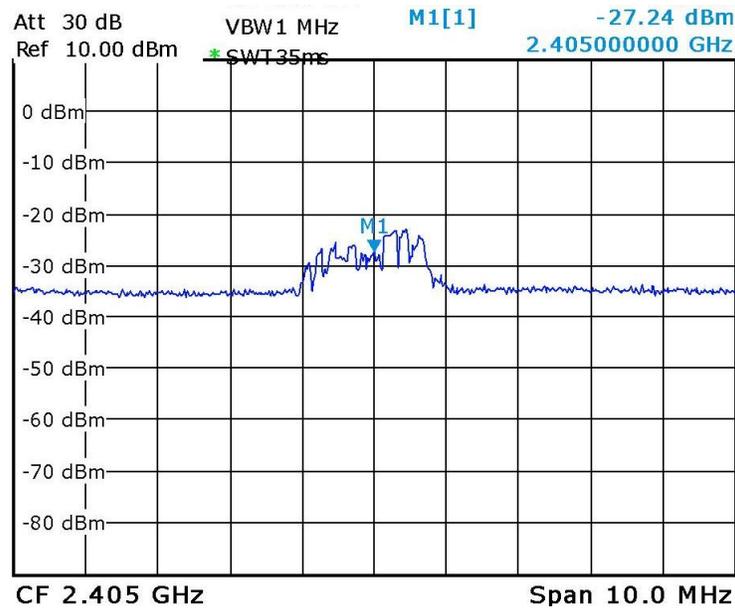


Figura 4.50 Espectro de la señal transmitida por el transceptor con  $PT_x = 20$  dBm más interferencia

## 4.5.2. Transmisión de Datos

### a. Prueba 1

En la figura 4.51 se observa la configuración del sistema de comunicaciones donde el dispositivo interferente se ubicó entre los módulos transceptores, utilizando la potencia de transmisión a 20 dBm.

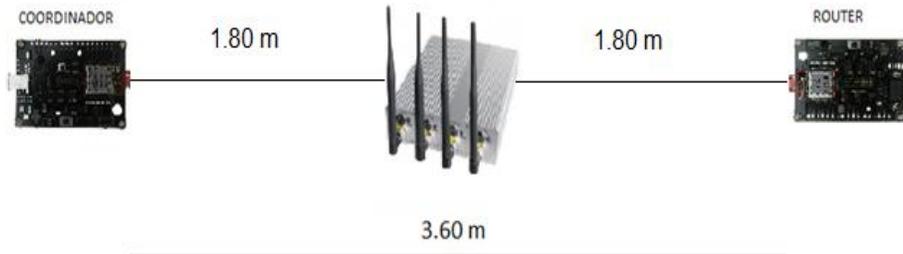


Figura 4.51 Configuración del sistema de comunicaciones para la prueba 1

Donde, existe una pérdida de paquetes del 91.2% equivalente a 456 paquetes errados, debido a la incidencia del generador de interferencia en la señal transmitida, como se puede apreciar en la figura 4.52.

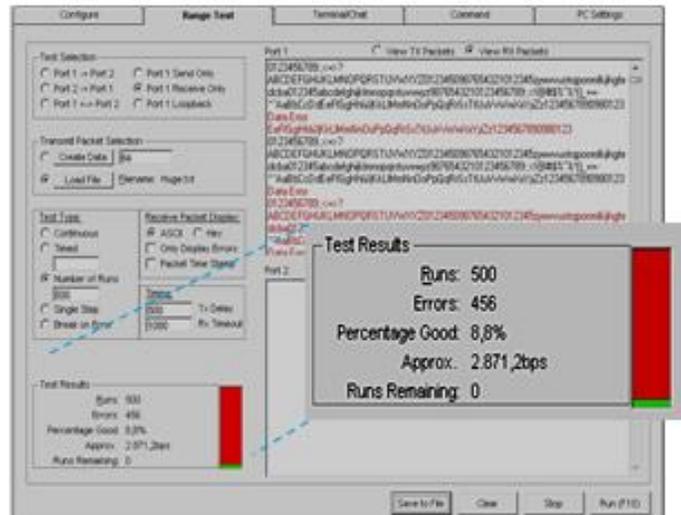


Figura 4.52 Prueba de alcance con generador de interferencia entre transceptores

## b. Prueba 2

En la figura 4.53 se observa la configuración del sistema de comunicaciones para el escenario de prueba 2, donde se ubicó el generador de interferencia al lado del transmisor en la figura 4.53 (a) y al lado del receptor en la figura 4.53 (b), con el fin de observar el efecto de interferencia en recepción.

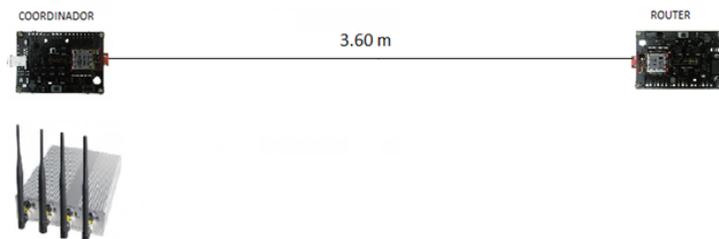


Figura 4.53 (a) Configuración con el generador de interferencia al lado del transmisor

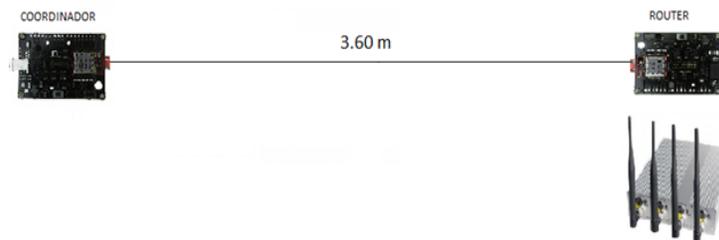


Figura 4.53 (b) Configuración con el generador de interferencia al lado del receptor

Debido a la mayor incidencia del nivel de la señal de interferencia en las señales recibidas por el módulo ZigBee®, se tuvo una pérdida total de paquetes alcanzando un valor de  $PER = 1$ , como se puede apreciar en la figura 4.54.

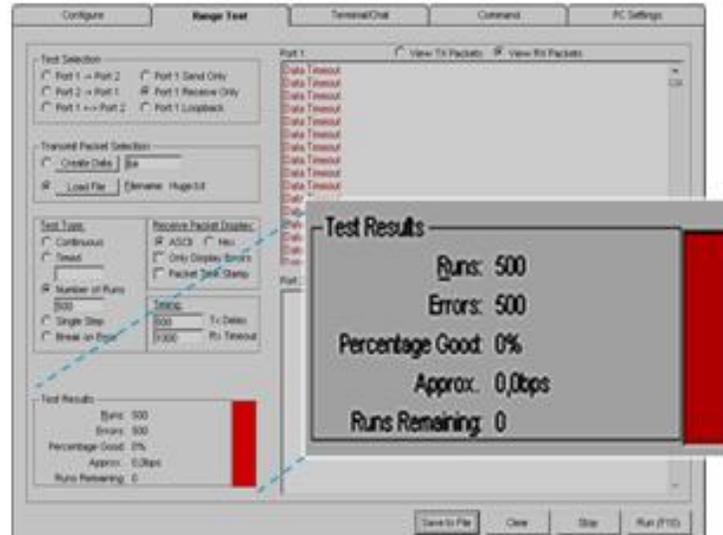


Figura 4.54 Prueba de alcance con generador de interferencia en los extremos de la comunicación

### c. Prueba 3

Se ubicó el generador de interferencia entre los dispositivos como se observa en la figura 4.55, se empleó la potencia de transmisión igual a 20 dBm.

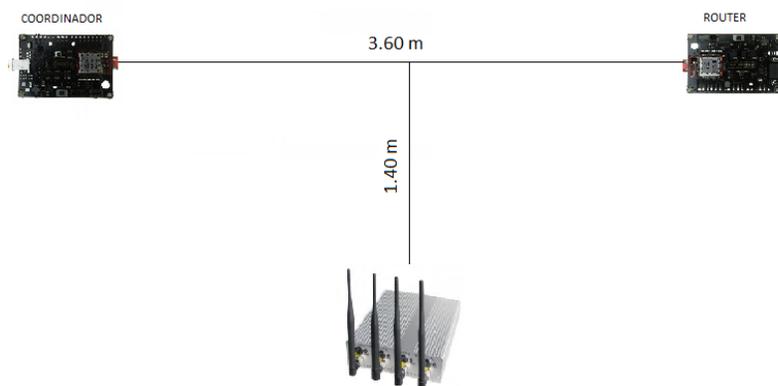


Figura 4.55 Ubicación de los dispositivos

La figura 4.56 muestra una pérdida de 269 paquetes equivalente a una Tasa de Error de Paquete (PER) de 0.538 y una  $BER = 3.77 \times 10^{-4}$ . El enlace bajo estas

condiciones no es recomendable debido a la pérdida de paquetes por los altos niveles de interferencia sobre las señales.

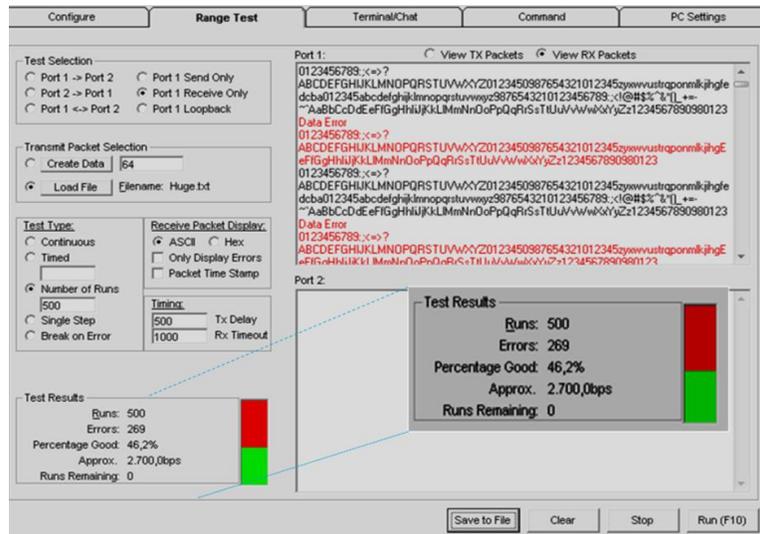


Figura 4.56 Prueba de alcance con generador de interferencia fuera del trayecto del enlace  
Ptx = 20 dBm

En la figura 4.57 se representa el resultado con la potencia de transmisión igual a 2 dBm, donde la pérdida de paquetes es total, por lo que no es recomendable emplear en los dispositivos transceptores la potencia mínima de transmisión (2dBm) cuando existan altos niveles de interferencia.

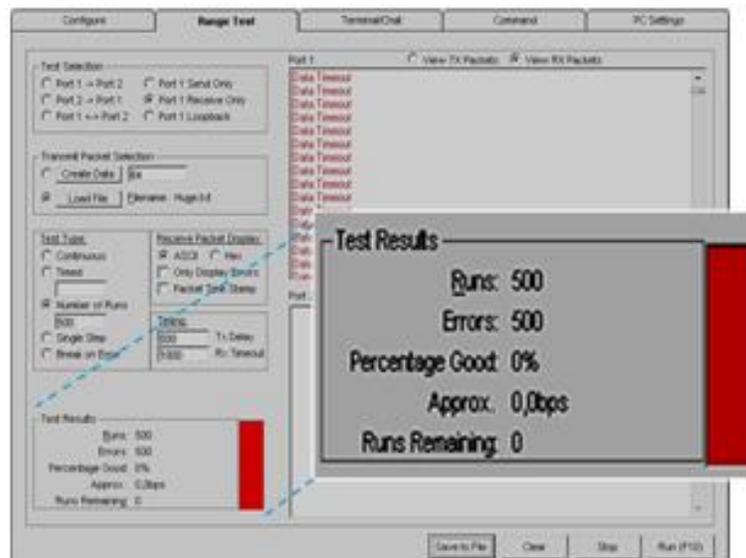


Figura 4.57 Prueba de alcance con generador de interferencia fuera del trayecto del enlace  
PTx = 2 dBm

#### d. Prueba 4

El dispositivo interferente se ubicó 3.3 m atrás del módulo transmisor, con la potencia máxima en transmisión se obtuvo el resultado de la figura 4.58, el efecto de interferencia no afectó el enlace, y todos los paquetes transmitidos llegaron correctamente al destino.

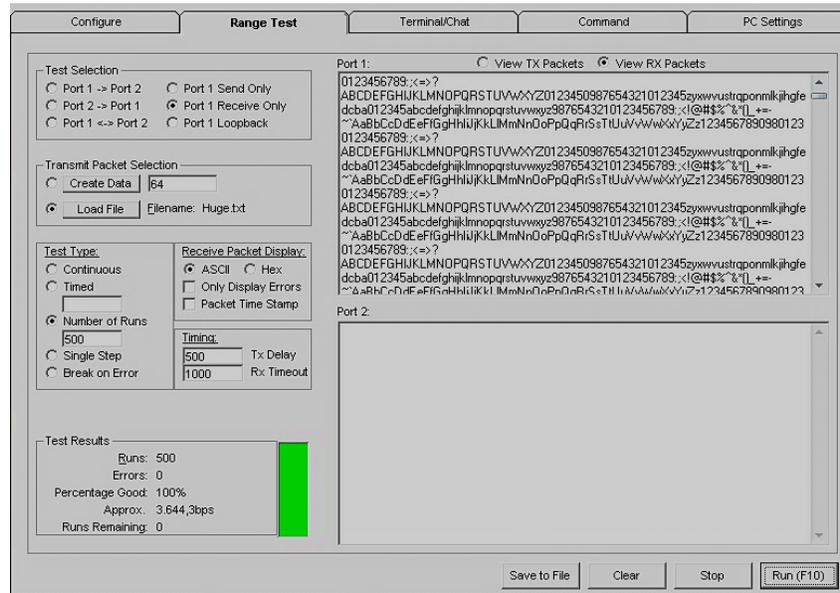


Figura 4.58 Prueba de alcance con generador de interferencia en un punto distante del enlace  $P_{tx} = 20$  dBm

En la prueba con la potencia mínima se hizo evidente el efecto de interferencia como se muestra en la figura 4.59, en este caso se tuvieron 203 errores que equivalen a una  $PER = 0.406$  lo que implica que aproximadamente el 60 % de paquetes transmitidos están siendo entregados correctamente, sin embargo es un desempeño bajo dado el alcance que logran los dispositivos sin fuentes interferentes cerca.

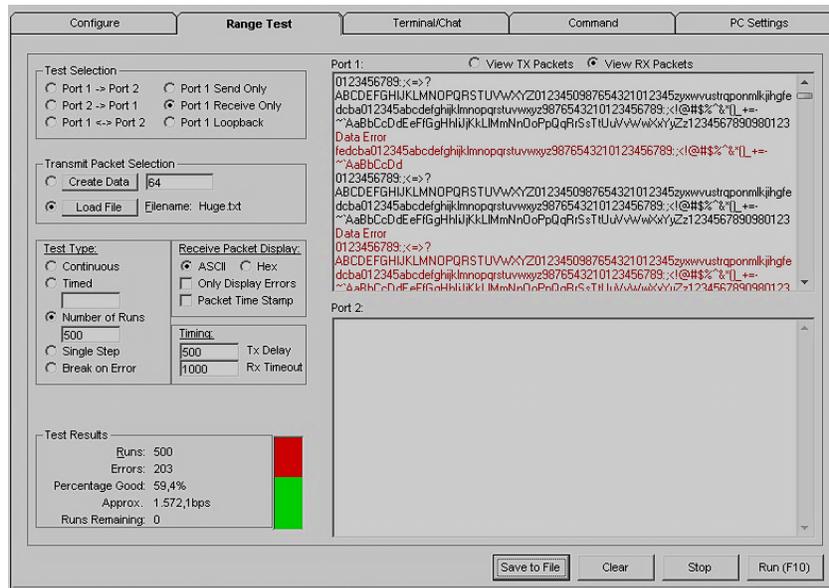


Figura 4.59 Prueba de alcance con generador de interferencia en un punto distante del enlace  $P_{tx} = 2 \text{ dBm}$

### 4.5.3. Relación Portadora a Interferencia

Para el análisis de la Relación de la portadora-interferencia, se calcularán los datos de potencia de recepción con la estimación que permite realizar el modelo de propagación única, la figura 4.60 describe el enlace de los dispositivos y la variación del dispositivo interferente.

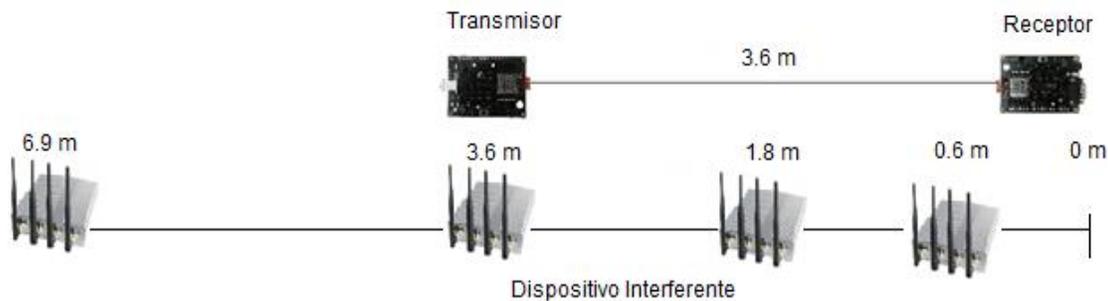


Figura 4.60 Enlace de radio y variación del dispositivo interferente

Para esto se emplean los valores de potencia encontrados en las secciones anteriores, para la potencia de recepción en recepción cuando  $P_{Txs} = 20 \text{ dBm}$  y la potencia de interferencia en recepción sabiendo que la potencia del generador de interferencia es de  $P_{Txi} = 30 \text{ dBm}$ , si se encuentran a 60 cm del analizador de redes, se tiene:

$$P_{Rxs} = -23.55 \text{ dBm}$$

$$P_{Rxi} = -32.12 \text{ dBm}$$

Con estos valores se obtuvieron las pérdidas básicas con los valores de potencia de recepción y la ecuación 4.3, que representa las pérdidas básicas en el radioenlace, para los resultados de interferencia se toma la ganancia de antena de 2 dBi.

$$Lb_{\text{señal}} [\text{dB}] = 20\text{dBm} - (-23.55 \text{ dBm}) = 43.55 \text{ dB}$$

$$Lb_{\text{int}} [\text{dB}] = 30 \text{ dBm} - (-33.12 \text{ dBm}) + 2 \text{ dB} = 71.12 \text{ dB}$$

Para la aplicación del modelo de propagación de pendiente única, se obtuvo el valor de la constante  $k$  despejando de la ecuación 3.13 reemplazando el valor de pérdidas básicas a 0.60 m que es el valor de  $d_0$  para este caso y como se muestra a continuación:

$$K [\text{dB}] = Lb_{(0.6\text{m})} [\text{dB}] + \log(1)$$

$$K_{\text{señal}} [\text{dB}] = Lb_{\text{señal}(0.6 \text{ m})} [\text{dB}] = 43.55 \text{ dB}$$

$$K_{\text{int}} [\text{dB}] = Lb_{\text{int}(0.6\text{m})} [\text{dB}] = 71.12 \text{ dB}$$

Para las pérdidas de propagación de la señal deseada se hace la estimación a 3.6 m, dando como resultado:

$$Lb_{\text{señal}(3.6\text{m})} [\text{dB}] = 56.00042 \text{ dB}$$

Para las pérdidas de propagación de la señal interferente se realizó la estimación para los valores de distancia del enlace empleando el valor de  $n = 1.6$  como se presenta en la tabla 4.17.

Distancia (m)	Pérdidas de propagación para la interferencia $Lb_{\text{int}}(\text{dB})$
0.6	71.12
1.8	78.754
3.6	83.57

Tabla 4.17 Pérdidas básicas para el escenario de interferencia

Con estos valores, y la ecuación 4.4 se calcula el valor de potencia en recepción presentados en la tabla 4.18.

Distancia (m)	Potencia de recepción obtenida para la interferencia $P_{rxi}(dBm)$	Potencia de recepción obtenida para los módulos $P_{rxs}(dBm)$
0.6	-33.12	-
1.8	-40.7539401	-
3.6	-45.57042	-36.00042
6.9	-50.0911654	

Tabla 4.18 Potencia de Recepción para el escenario de interferencia

Con estos valores se calcula los valores de la Relación de Portadora-Interferencia con la ecuación 4.10, dejando la potencia de la señal fija.

$$C/I[dB] = P_{Rxs} [dBm] - P_{Rxi} [dBm]$$

Con los resultados y relacionándolos con los respectivos resultados de PER y BER en cada punto se presenta en la tabla 4.19.

Relación Portadora-Interferencia $C/I$ (dB)	Tasa de Error de Paquetes (PER)	Tasa de Error de Bit (BER)
-2.88	1	0.5
4.75	1	0.5
9.57	1	0.5
14.1	0	0

Tabla 4.19 Desempeño del sistema frente a interferencia

Con esto se obtiene la figura 4.61 donde a medida que disminuye la Relación Portadora-Interferencia (C/I), el desempeño del sistema decae.

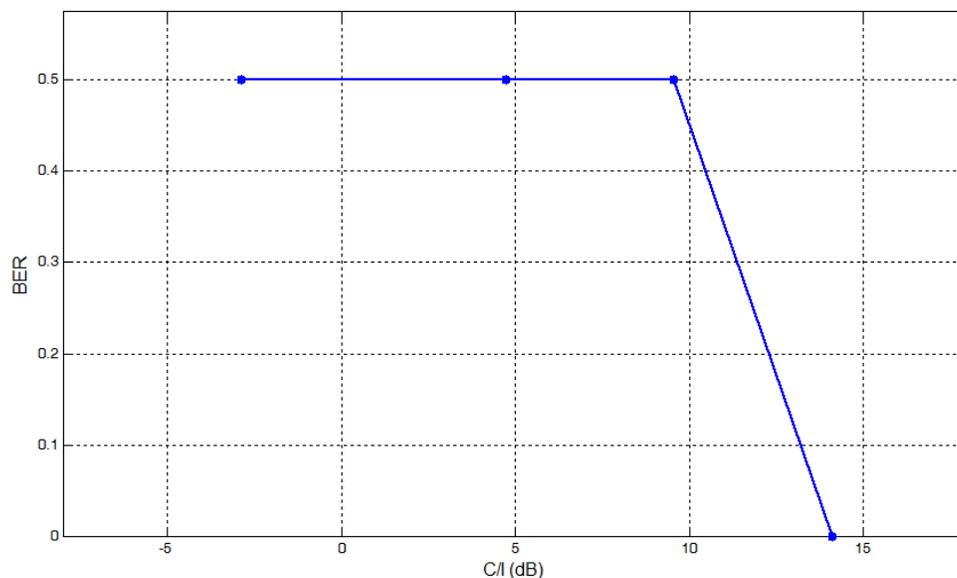


Figura 4.61 C/I vs BER

# CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones del trabajo de grado.

## 5.1. Conclusiones

- Los resultados de la herramienta de predicción de cobertura *Wireless Insite®* brindaron una estimación de las medidas de la potencia de recepción y las pérdidas de trayecto, además permitió observar de forma más clara el comportamiento de las señales en los escenarios de interiores y exteriores considerados para el desarrollo de este trabajo de grado.
- Las pruebas iniciales permitieron evaluar los niveles de potencia de recepción y el alcance del kit en diferentes escenarios. En interiores, al estar confinada la energía y por el rango de potencia de los transmisores hay menores pérdidas de propagación en este escenario. Por tal razón se considera el desempeño del kit en interiores es bueno cuando los dispositivos del sistema de comunicaciones tienen línea de vista.
- En exteriores, aunque se logró un alcance considerable de 120 m, el efecto de dispersión que se presentó en exteriores generó una disminución en la potencia de recepción, a partir de los 140 m se presentaron pérdidas de paquetes. Se aprecia que el kit ZB2430 es óptimo para un enlace punto a punto al alcanzar una cobertura superior a la especificada por el fabricante.
- El modelo de propagación de pendiente única es de gran utilidad y brinda una buena aproximación para predecir las pérdidas básicas en interiores puesto que el análisis de exteriores emplea valores de simulación debido a que no se contó con las herramientas para medir valores de potencia en este escenario. Los valores de variación de potencia obtenidos en la práctica se asemejan a los esperados, por tanto se considera apropiado para su utilización ya que los resultados se aproximan a los obtenidos

experimentalmente.

- En interiores no existen pérdidas de paquetes debido al alcance de los módulos del kit ZB2430 y el efecto de guía de onda, brindando así un buen funcionamiento a lo largo del pasillo. Para exteriores se analizó la potencia con los resultados de la simulación, se presentaron pérdidas de paquetes y se obtuvieron valores de Tasa de Error de Bit (BER) mayores a los resultados obtenidos en interiores.
- Se demostró que la medida experimental a 20 dB por debajo de la potencia en la frecuencia central de la señal corresponde al 99.50 % del ancho de banda de la señal, aunque estos valores difieren del ancho de banda teórico, estos valores cumplen con la máscara de densidad de espectral de potencia descrita en el estándar IEEE 802.15.4.
- El kit ZB2430 tiene grandes capacidades para trabajar en altas temperaturas, se pudo observar la estabilidad en frecuencia que presentó el dispositivo al no existir corrimiento en la frecuencia de trabajo de la señal sin mostrar alteraciones en la forma del espectro de la señal.
- Al ubicar el generador de interferencia en la ruta de línea de vista o cercano a los módulos del kit ZB2430, se presentó una pérdida total de paquetes, sin importar la potencia de transmisión. Se evaluó el desempeño del sistema al ubicar la fuente de interferencia fuera del camino de línea de vista de los módulos, con esto se obtuvo que la interferencia no afectó la señal y las transmisiones fueron exitosas, es decir a medida que la fuente interferente se aleja el desempeño mejoró.
- Debido a las características y el alcance de los dispositivos del kit ZB2430 al desarrollar la experimentación en interiores, el efecto de desvanecimiento que genera el multitrayecto no se hace evidente en los resultados.

## 5.2. Trabajos Futuros

Los resultados obtenidos y las capacidades del kit ZB2430 basado en ZigBee®, abren la oportunidad de plantear algunos trabajos a futuro:

- Analizar y evaluar a nivel físico el desempeño de una red punto a multipunto en la banda de 2400 MHz empleando el kit ZB2430
- Analizar el comportamiento del kit ZB2430, para evaluar el desempeño a nivel de enlace para una red Punto a Punto.

- Analizar y evaluar el desempeño una red ZigBee® a nivel de Red, evaluando los protocolos de red en una topología punto a punto y punto multipunto en 2.4 GHz.
- Evaluar el desempeño de los módulos del kit ZB2430 en un ambiente de movilidad
- Analizar y evaluar el desempeño de una red ZigBee® a nivel físico en un escenario mayores dimensiones empleando la máxima potencia de los dispositivos<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> Debido a que el alcance de los dispositivos en exteriores alcanzó una distancia máxima de 200 m con la potencia mínima de transmisión (2 dBm), se propone hacer el análisis para un escenario con mayores dimensiones, y se recomienda el uso de la potencia de transmisión máxima de los dispositivos de 20 dBm.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] J. Andreu, “Redes Locales”, Primera ed. Madrid, España: EDITEX, 2011
- [2] S. J. Montebeller, “Sensores semfios Avaliação e Empregon a Automação de Sistemas Prediais”, Primera ed. Sao Paulo, Brasil: Biblioteca 24 Horas, 2011.
- [3] IEEE Std. 802.15.4-2006 Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) IEEE Computer Society. Revision of IEEE Std. 802.15.4-2003. ISBN 0-7381-4996-9. Septiembre 2006.
- [4] Laird technologies, Online Catalog “ZB2430 Wireless Modules” Disponible en: <http://lairdtech.thomasnet.com/viewitems/zigbee-radio-modules/zb2430-wireless-modules?> [Consultado en Febrero 2012].
- [5] S. Junstrand, X. Passaret, D. Vasquez, “Domótica Y Hogar”, Primera ed. Madrid, España: Thompson Ediciones Spain, 2005.
- [6] C. A. Ortega, D. S. Roque, L. E. Úbeda, “ZigBee: El nuevo estándar global para la Domótica e Inmótica”, Nicaragua: Universidad Nacional de Ingeniería, 2008.
- [7] S. R. Caprile, “Equisbí: desarrollo de aplicaciones con comunicación remota basadas en módulos ZigBee y 802.15.4”, Primera ed. Buenos Aires, Argentina: Gran Aldea Editores, 2009.
- [8] G. Areitio, A. Areitio, “Información, Informática e Internet: del ordenador personal a la empresa 2.0”, Primera ed. España: Visión Libros, 2009.
- [9] K. Fazel and S. Kaiser, “*Multi-Carrier and Spread Spectrum Systems*”, England: John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [10] J. L. Rodríguez, S. C. Suero “Modulación de Señales Digitales”, Sevilla, España: Universidad de Sevilla, 1995.
- [11] M. F. Zanuy, “Sistemas de Comunicaciones”, Barcelona, España: Boixareu Editores, 2001.

- [12] G. Aggelou, “*Wireless Mesh Networking With 802.16, 802.11 and ZigBEE*”, Primera ed. New York, Estados Unidos: McGraw-Hill Companies, Inc., 2009
- [13] M. Cabrera “Modulaciones Digitales Paso Banda COMII ETSETB-UPC”, 2009.
- [14] J. M. Hernando Rábanos, “*Transmisión por Radio*”, Sexta ed. Madrid, España: Universitaria Ramón Areces, 2008.
- [15] A. Goldsmith, “*Wireless Communications*”, Primera ed. Cambridge New York, Estados Unidos: Cambridge University Press, 2005.
- [16] Remcom, "The *Wireless Insite R User Manual*," 2009.[En línea]. Disponible: [http:// www.remcom.com](http://www.remcom.com) [Consultado: Enero, 2012].
- [17] D. I. Garcia, L. F. Navarro, “Evaluación y Análisis del Desempeño de un Sistema de Comunicación de Datos Vía Radio en la Banda de 900 MHz basado en Espectro Ensanchado por Saltos de Frecuencia utilizando el Modelo Peer to Peer” Trabajo de grado, Universidad del Cauca, Colombia, 2011.
- [18] H. Córdova, P. Chávez, “Estudio, Modelamiento y Simulación de Sistemas de Espectro Ensanchado Secuencia Directa y Salto De Frecuencia”, Revista Tecnológica ESPOL, Vol. 18, No1, pag1-8.
- [19] R. Kanna, “Design of ZigBee Transceiver for IEEE 802.15.4 Using *MATLAB/Simulink*”, Tesis de Master, National Institute of Technology, India, 2011.
- [20] The MathWorks Inc, “Product Documentation - *MATLAB*”. [En línea] Disponible: <http://www.mathworks.com/help/techdoc/ref/uint8.html> [Consultado: Febrero 2012].
- [21] Y. E. Narvaez, A.F. Ordoñez, “Evaluación Y Análisis del Desempeño a Nivel Físico de un Sistema de Comunicación de Datos de Corto Alcance Vía Radio En 2.4 GHZ Basado en Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS)”, Trabajo de grado, Universidad del Cauca, Colombia, 2012.
- [22] W. Tomasi, “*Electronics Communication Systems*” Quinta ed. Pearson/Prentice Hall, 2004.
- [23] C. Pérez, J. M. Zamanillo, A. Casanueva, “*Sistemas de Telecomunicación*”, Primera ed. Santander, España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria, 2007.

- [24] Tangreat Technology, Online Catalog “TG-101B-PRO”. [En línea] Disponible: <http://www.tangreat.com/en/product-detail-46.html> [Consultado: Febrero 2012].