

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DE LA TECNOLOGÍA ZIGBEE® EN LA BANDA DE 900 MHZ.



**Luis Eduardo Bastidas Muñoz
Jessica Nández Balcázar**

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas-GRIAL
Línea de Investigación en Señales y Sistemas de Acceso
y Difusión Basados en Radio
Popayán, Mayo de 2013**

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DE LA TECNOLOGÍA ZIGBEE® EN LA BANDA DE 900 MHZ.



**Luis Eduardo Bastidas Muñoz
Jessica Ñañez Balcázar**

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

Director
Víctor Manuel Quintero Flórez.

Universidad del Cauca
**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas-GRIAL
Línea de Investigación en Señales y Sistemas de Acceso y
Difusión Basados en Radio
Popayán, Mayo de 2013**

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. ZIGBEE®	2
1.1 ARQUITECTURA	2
1.2 NIVEL DE APLICACIÓN	3
1.3 NIVEL DE RED	4
1.3.1 Tipos de Dispositivos	4
1.3.2 Topologías de Red	5
1.4 NIVEL DE CONTROL DE ACCESO AL MEDIO	6
1.4.1 Acceso Múltiple por Detección de Portadora y Evasión de Colisiones (CSMA-CA)	6
1.4.2 Intervalos de Tiempo Garantizado	7
1.4.3 Asociación y Disociación de Dispositivos	7
1.5 NIVEL FÍSICO (PHY)	7
1.5.1 Frecuencias de Operación y Velocidades de Transmisión de Datos	8
1.5.2 Asignación de Canales	9
1.5.3 Formato de Paquetes del Nivel Físico	11
1.5.4 Especificaciones del Nivel Físico (PHY) para la Banda de 900 MHz	12
CAPÍTULO 2. HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN	18
2.1 KIT DE DESARROLLO ModFLEX™ SiFLEX02	18
2.1.1 Bloques Funcionales Módulo SiFLEX02	19
2.1.2 Tarjeta de Evaluación ModFLEX™	23
2.2 ModFLEX TEST TOOL SUITE	24

2.2.1	Conexión	25
2.2.2	Características de Radio Frecuencia (<i>RF Settings</i>)	25
2.2.3	Datos de Radio Frecuencia (<i>RF Data</i>)	27
2.2.4	Opciones (<i>Options</i>)	28
2.2.5	Estadísticas (<i>Statistics</i>)	29
2.2.6	Escáner de Energía (<i>Energy Scan</i>)	30
2.2.7	PERT	31
2.2.8	Prueba de Rango (<i>Range Test</i>)	32
2.2.9	Ventana de Mensajes	33
<u>CAPÍTULO 3. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</u>		35
3.1	ANÁLISIS DE COBERTURA CON LA HERRAMIENTA <i>WIRELESS INSITE</i>®	35
3.1.1	Exteriores	35
3.1.2	Interiores	43
3.2	ANÁLISIS DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN CON LA HERRAMIENTA <i>SIMULINK</i>® DE <i>MATLAB</i>®	54
3.2.1	Diagramas de Constelación	54
3.2.2	Respuesta en Frecuencia	55
3.2.3	Respuesta en el Tiempo	56
3.2.4	Tasa de Error de Bit con la Herramienta BERTool	58
3.3	ANÁLISIS PRÁCTICO DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN	58
3.3.1	Plan de Pruebas	59
3.3.2	Ejecución del Plan de Pruebas	61
<u>CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</u>		87

4.1 CONCLUSIONES	87
4.2 TRABAJOS FUTUROS	88

ANEXOS

ANEXO A	Resultados Teóricos
ANEXO B	Implementación de un Sistema de Comunicaciones Zigbee® en Simulink de Matlab®

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Frecuencias de Operación IEEE 802.15.4	8
Tabla 1.2 Pagina de canal y número de canal	10
Tabla 1.3 Límites densidad espectral de potencia (PSD) estándar IEEE 802.15.4	10
Tabla 1.4 Mapeo de bit a chip	13
Tabla 1.5 Mapeo de bit a chip.	16
Tabla 2.1 Consumo de energía.	20
Tabla 2.2 Características de transmisión y recepción	21
Tabla 2.3 Especificaciones antena dipolo 900 MHz	22
Tabla 3.1 Parámetros configurados para exteriores	37
Tabla 3.2 Parámetros configurados para el análisis de cobertura en exteriores	42
Tabla 3.3 Parámetros de configuración en interiores	45
Tabla 3.4 Parámetros configurados para el análisis de cobertura en interiores	51
Tabla 3.5 Niveles de potencia del kit de desarrollo ModFLEX™	60
Tabla 3.6 Potencia de transmisión en los escenarios de prueba	61
Tabla 3.7 Potencias de ruido a la entrada y salida del receptor	69

Tabla 3.8 Pérdidas en exteriores	77
Tabla 3.9 Pérdidas en interiores	79
Tabla 3.10 Resultados de desempeño del sistema de comunicación bajo condiciones de interferencia	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Arquitectura ZigBee®	3
Figura 1.2 Topología en estrella	5
Figura 1.3 Topología en árbol	5
Figura 1.4 Topología en malla	6
Figura 1.5 Distribución de canales en IEEE 802.15.4. Tomada de [3]	9
Figura 1.6 Límites PSD IEEE 802.15.4 para la banda de 900 MHz	11
Figura 1.7 Formato PPDU	11
Figura 1.8 Funciones de modulación y ensanchamiento con BPSK y DSSS	12
Figura 1.9 Funciones de modulación y ensanchamiento con DSSS	14
Figura 1.10 Mapeo de símbolo a chip – PSSS	15
Figura 1.11 Funciones de modulación y ensanchamiento con OQPSK y DSSS	16
Figura 2.1 Kit de Desarrollo SiFLEX02 de <i>LS RESEARCH</i> ®	19
Figura 2.2 Diagrama en bloques funcionales del módulo SiFLEX02	19
Figura 2.3 Antena Dipolo de 900 MHz	22
Figura 2.4 Tarjeta de Evaluación ModFLEX™. Adaptada de [21]	23
Figura 2.5 Esquema de Transmisión entre ModFLEX™ Test Tool y SiFLEX02	25
Figura 2.6 Ventana de conexión - ModFLEX Test Tool	25
Figura 2.7 Ventana características de Radio Frecuencia (RF)	27

Figura 2.8 Ventana datos de Radio Frecuencia (RF)	28
Figura 2.9 Ventana de opciones	29
Figura 2.10 Ventana de estadísticas	30
Figura 2.11 Ventana escáner de energía	31
Figura 2.12 Ventana prueba de PER	32
Figura 2.13 Ventana prueba de rango	33
Figura 2.14 Ventana de mensajes	34
Figura 3.1 Escenario de Exteriores - CDU	36
Figura 3.2 Escenario en exteriores	36
Figura 3.3 Área de estudio - Espacio libre	38
Figura 3.4 Niveles de potencia en recepción	38
Figura 3.5 Potencia recibida vs Distancia en espacio libre	39
Figura 3.6 Área de estudio Exteriores - FULL 3D	40
Figura 3.7 Potencia recibida vs Distancia en exteriores con FULL3D	41
Figura 3.8 Trayectos de propagación en exteriores con FULL 3D – SBR	41
Figura 3.9 Área de cobertura en exteriores	43
Figura 3.10 Escenario en Interiores – Tercer Piso FIET	43
Figura 3.11 Escenario 3D en interiores	44
Figura 3.12 Escenario en interiores	45
Figura 3.13 Área de estudio – Interiores	46
Figura 3.14 Potencia recibida vs Distancia en interiores con FULL 3D – SBR	47
Figura 3.15 Trayectos de propagación con FULL 3D – SBR en interiores	48
Figura 3.16 Potencia vs Retardo por receptor	49

Figura 3.17	Dispersión del retardo vs Distancia	50
Figura 3.18	Área de cobertura en interiores	52
Figura 3.19	Potencia recibida vs Distancia	53
Figura 3.20	Trayectos de propagación	53
Figura 3.21	Constelación O-QPSK	54
Figura 3.22	Constelación O-QPSK para $E_b/N_0=5\text{dB}$	55
Figura 3.23	Espectro en frecuencia de la señal de información	56
Figura 3.24	Espectro en frecuencia de la señal ensanchada	56
Figura 3.25	Formas de la señal en las diferentes etapas del sistema	57
Figura 3.26	E_b/N_0 vs BER con BERTool	58
Figura 3.27	Configuración del sistema de comunicación	59
Figura 3.28	LQI vs Distancia en exteriores	62
Figura 3.29	LQI vs Distancia en interiores	63
Figura 3.30	PER vs LQI. Adaptada de [19]	64
Figura 3.31	Potencia recibida asociada vs LQI	64
Figura 3.32	Potencia recibida en exteriores	65
Figura 3.33	Potencia recibida en interiores	66
Figura 3.34	Relación de potencia de ruido a la entrada y salida del receptor	68
Figura 3.35	PER vs E_b/N_0 en exteriores	69
Figura 3.36	BER vs E_b/N_0 en exteriores	70
Figura 3.37	PER vs E_b/N_0 en interiores	71
Figura 3.38	BER vs E_b/N_0 en interiores	71
Figura 3.39	Ancho de Banda de 20 dB para BPSK	73

Figura 3.40 Ancho de Banda de 20 dB para O-QPSK	74
Figura 3.41 Pérdidas de propagación vs Modelo dependiente única ($P_{tx} = -16$ dBm)	76
Figura 3.42 Pérdidas de propagación vs Modelo de pendiente única ($P_{tx} = -6.1$ dBm)	77
Figura 3.43 Pérdidas de propagación vs Modelo de pendiente única para interiores	78
Figura 3.44 Configuración del sistema para la evaluación de desempeño bajo efectos de interferencia	79
Figura 3.45 Relación portadora interferencia vs PER	81
Figura 3.46 Relación portadora interferencia vs BER	82
Figura 3.47 Espectro de la señal bajo efectos de interferencia	83
Figura 3.48 Medida de corriente en el sistema de comunicación	84
Figura 3.49 Consumo de corriente vs tiempo para diferentes eventos	85

LISTA DE ACRÓNIMOS

ACK	<i>Acknowledgment</i> , Acuse de Recibo.
ALU	<i>Arithmetic Logic Unit</i> , Unidad Lógica Aritmética.
APL	<i>Application Layer</i> , Nivel de Aplicación.
APS	<i>Application Support Sublayer</i> , Subnivel de Soporte de Aplicación.
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Amplitud.
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i> , Ruido Blanco Aditivo Gaussiano.
BER	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit.
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria.
BW	<i>BandWidth</i> , Ancho de Banda.
C/I	<i>Carrier to Interference Ratio</i> , Relación Portadora a Interferencia
CCA	<i>Clear Channel Assesment</i> , Aseguramiento de Canal Libre.
CS	<i>Carrier Sense</i> , Deteccion de Portadora.
CSMA-CA	<i>Carrier Sense Multiple Access – Collision Avoidance</i> , Acceso Múltiple por Detección de Portadora y Evasión de Colisiones.
CPU	<i>Central Processing Unit</i> , Unidad Central de Procesamiento.
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> , Espectro Ensanchado por Secuencia Directa.
ED	<i>Energy Detection</i> , Detección de Energía.
FFD	<i>Full Function Device</i> , Dispositivo de Funcionalidad Completa
GTS	<i>Guaranteed Time Slot</i> , Intervalos de Tiempo Garantizados.

ISI	<i>Intersymbol Interference</i> , Interferencia Intersimbólica.
ISM	<i>Industrial Scientific and Medical</i> , Industrial, Científica y Médica.
LED	<i>Light Emitting Diode</i> , Diodo Emisor de Luz
LQI	<i>Link Quality Indicator</i> , Indicador de Calidad del Enlace.
LSB	<i>Less Significant Bit</i> , Bit Menos Significativo.
MAC	<i>Medium Access Control</i> , Control de Acceso al Medio.
MIPS	<i>Million Instructions per Second</i> , Millón de Instrucciones por Segundo.
MSB	<i>Most Significant Bit</i> , Bit Más Significativo.
NWK	<i>Network Layer</i> , Nivel de Red.
OCDM	<i>Orthogonal Code Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Códigos Ortogonales.
O-QPSK	<i>Offset Quadrature Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura con Desplazamiento Temporal.
OSI	<i>Open System Interconnection</i> , Interconexión de Sistemas Abiertos.
PAN ID	<i>Personal Area Network Identifier</i> , Identificador de Red de Área Personal
PER	<i>Packet Error Rate</i> , Tasa de Error de Paquete.
PPDU	<i>PHY Protocol Data Unit</i> , Unidad de Datos de Protocolo del Nivel Físico.
PHR	<i>PHY Header</i> , Encabezado de Nivel Físico.
PHY	<i>Physical Layer</i> , Nivel Físico.
PSD	<i>Power Spectral Density</i> , Densidad Espectral de Potencia.
PSDU	<i>PHY Service Data Unit</i> , Unidad de Datos de Servicio de Nivel Físico.

PSSS	<i>Parallel Sequence Spread Spectrum</i> , Espectro Ensanchado por Secuencia Paralela.
RF	<i>Radio Frequency</i> , Radio Frecuencia.
RFD	<i>Reduced Function Device</i> , Dispositivo de Funcionalidad Reducida.
RISC	<i>Reduced Instructions Set Computing</i> , Conjunto de Instrucciones Reducidas.
RP-SMA	<i>Reverse Polarity SMA</i> , SMA de Polaridad Inversa.
SBR	<i>Shooting and Bouncing Ray</i> , Disparo y Rebote de Rayos.
SF	<i>Spreading Factor</i> , Factor de Ensanchamiento.
SFD	<i>Start of Frame Delimiter</i> , Delimitador de Inicio de Trama.
SHR	<i>Synchronization Header</i> , Encabezado de Sincronización.
SM	<i>Spectral Mask</i> , Máscara Espectral.
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i> , Memoria Estática de Acceso Aleatorio.
SSP	<i>Security Service Provider</i> , Proveedor de Servicios de Seguridad.
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i> , Transmisor/Receptor asíncrono universal.
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> , Redes de Área Local Inalámbrica
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i> , Red de Área Personal Inalámbrica.
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i> , Red de Sensores Inalámbrica.
XOR	<i>eXclusive OR</i> , OR exclusivo.
ZC	<i>ZigBee Coordinator</i> , Coordinador ZigBee®.

ZDE	<i>ZigBee End Device</i> , Dispositivo Final ZigBee®.
ZDO	<i>ZigBee Device Object</i> , Objeto de Dispositivo ZigBee®.
ZR	<i>ZigBee Router</i> , Enrutador ZigBee®.

INTRODUCCIÓN

Una Red de Sensores Inalámbrica (WSN, *Wireless Sensor Network*) está formada por un conjunto de dispositivos que se caracterizan por su facilidad de despliegue y autoconfiguración, convirtiéndose en una herramienta precisa para la gestión y control de datos en múltiples aplicaciones. Actualmente, existen estándares de corto alcance como IEEE 802.11 o Redes de Área Local Inalámbrica (WLAN, *Wireless Local Area Network*) e IEEE 802.15.1 (Bluetooth), que brindan altas y medias velocidades de transmisión de datos, sin embargo, no cuentan con características tales como baja latencia y bajo consumo de energía para satisfacer las principales necesidades de una red de sensores inalámbrica (WSN). Por otro lado, la tecnología ZigBee® se caracteriza por su bajo consumo de energía, bajo costo y un Ancho de Banda (BW, *BandWidth*) reducido, lo cual la convierte en el estándar global para las redes de sensores.

Existe un gran número de protocolos propietarios para la implementación de redes de sensores inalámbricas (WSN), originando grandes problemas de interoperabilidad entre dispositivos de diferentes proveedores. Así, *ZigBee Alliance*®¹ surgió en 2002 como un grupo de compañías que trabajan en conjunto, con el fin de brindar productos para el monitoreo y control en redes inalámbricas de bajo consumo y bajo costo basados en un estándar abierto.

En el presente trabajo de grado, se presenta el análisis de desempeño a nivel físico de un sistema de comunicación punto a punto basado en la tecnología ZigBee en la banda de 900 MHz.

Este documento se divide en cuatro capítulos estructurados de la siguiente manera:

Capítulo 1. Introducción y conceptos fundamentales relacionados con la tecnología ZigBee®.

Capítulo 2. Características y funciones más relevantes del kit de desarrollo *ModFLEX*™ de *LS Research*®.

Capítulo 3. Pruebas y parámetros evaluados por medio del sistema de comunicación punto a punto implementado con el kit de desarrollo *ModFLEX*™ y las herramientas de simulación *Wireless InSite*® y *Simulink*® de *Matlab*®, junto con el análisis de los resultados obtenidos.

Capítulo 4. Se exponen las conclusiones y los trabajos futuros.

¹*ZigBee Alliance*® es un grupo de compañías encargado de desarrollar soluciones inalámbricas confiables, productos de monitoreo y control basados en ZigBee®. Disponible en: <http://www.zigbee.org>.

CAPÍTULO 1. ZIGBEE®

ZigBee® fue diseñado para aplicaciones que requieren bajas velocidades de transmisión de datos y maximización de la vida útil de las baterías [1]. La velocidad de transmisión de datos está limitada a 250 Kbps, opera en las bandas de 868 MHz, 900 MHz y 2.4 GHz, reservadas internacionalmente para uso no comercial en las áreas Industrial, Científica y Médica (ISM, *Industrial, Scientific and Medical*). Los dispositivos ZigBee® permanecen la mayor parte del tiempo en modo de hibernación o ahorro de energía, lo cual les permite operar por largo tiempo sin necesidad de reemplazar sus baterías [2].

ZigBee® hace parte de un gran número de productos y aplicaciones, cuyo objetivo es brindar al usuario final flexibilidad, movilidad y facilidad de uso, incorporando un sistema inteligente e inalámbrico en los dispositivos de uso diario [3].

1.1 ARQUITECTURA

La arquitectura de la tecnología ZigBee® está basada en el modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, *Open System Interconnection*), donde cada nivel es independiente y cumple con un conjunto específico de servicios para el nivel inmediatamente superior [2].

ZigBee® es un estándar de comunicaciones inalámbrico de bajo costo y bajo consumo de energía desarrollado por *ZigBee Alliance®* y basado en el estándar IEEE 802.15.4 de Redes de Área Personal Inalámbrica (WPAN, *Wireless Personal Area Network*), el cual especifica los Niveles Físico (PHY, *Physical Layer*) y Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*), mientras que *ZigBee Alliance®* especifica los Niveles de Red (NWK, *Network Layer*) y Aplicación (APL, *Application Layer*) [4]. En la Figura 1.1 se observan los diferentes niveles que conforman la arquitectura de la tecnología ZigBee®, los cuales son descritos en esta sección.

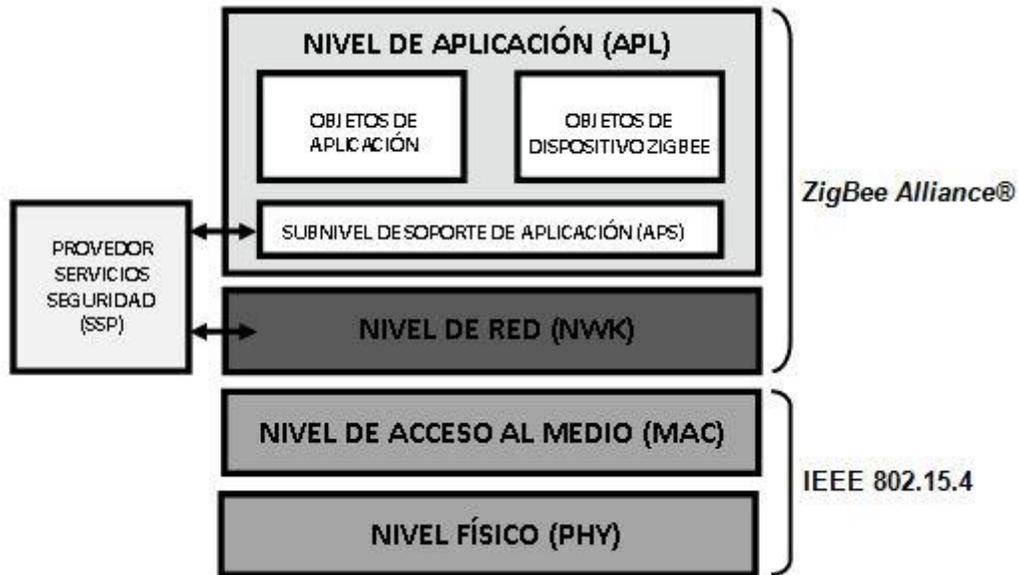


Figura 1.1 Arquitectura ZigBee®

1.2 NIVEL DE APLICACIÓN

El nivel de aplicación (APL) es el nivel más alto en la arquitectura de la tecnología ZigBee® y consiste de tres subniveles [5]:

- **Subnivel de Soporte de Aplicación (APS, *Application Support Sublayer*):** provee una interfaz entre los niveles de red (NWK) y de aplicación (APL) por medio de un conjunto general de servicios usados por el Objeto de Dispositivo ZigBee (ZDO, *ZigBee Device Object*) y los objetos de aplicación. Así mismo este subnivel soporta servicios de información y administración [6].
- **Objeto de dispositivo ZigBee (ZDO):** responsable de inicializar el subnivel de soporte de aplicación (APS), el nivel de red (NWK) y el Proveedor de Servicios de Seguridad (SSP, *Security Service Provider*). Los ZDO cuentan con un perfil que contiene la descripción de los dispositivos y un mensaje de aplicación definido para cada uno de ellos. De manera adicional, funciona como interfaz entre el subnivel de soporte de aplicación (APS) y los objetos de aplicación [2] [6].
- **Objetos de aplicación:** controlan y gestionan los diferentes niveles de la arquitectura y sus protocolos en un dispositivo ZigBee. Los objetos de aplicación son personalizados por los fabricantes para diferentes aplicaciones y un solo dispositivo puede contar hasta con 240 objetos de aplicación. Una dirección única con valores entre 1 y 240, representa a cada objeto de aplicación y permite a múltiples dispositivos compartir el mismo canal [2].

1.3 NIVEL DE RED

El nivel de red (NWK) es responsable de la gestión y formación de la red. Se encarga de asignar direcciones a los dispositivos y definir la topología de la misma. El nivel de red (NWK) selecciona la mejor ruta para el envío de mensajes a un dispositivo final, basándose en el descubrimiento y mantenimiento de rutas [5].

1.3.1 Tipos de Dispositivos

El estándar IEEE 802.15.4 define dos tipos de dispositivos de acuerdo a su función en la red [7]:

- **Dispositivo de Funcionalidad Completa (FFD, *Full Function Device*):** también conocido como nodo activo. Es capaz de funcionar como coordinador o enrutador (*router*) debido a su capacidad de procesamiento y memoria adicional. Además, opera como interfaz con los usuarios y mantiene comunicación con Dispositivos de Funcionalidad Reducida (RFD, *Reduced Function Device*) o de funcionalidad completa (FFD) [2] [8].
- **Dispositivo de funcionalidad reducida (RFD):** se conoce también como dispositivo pasivo y sólo puede comunicarse con dispositivos de funcionalidad completa (FDD). Se caracteriza por su baja capacidad de procesamiento y funcionalidad limitada, lo cual representa un bajo costo y gran simplicidad [7] [8].

Por otro lado, los tipos de dispositivos son determinados por el rol que desempeñan en una red ZigBee® [5]:

- **Coordinador ZigBee (ZC, *ZigBee Coordinator*):** dispositivo que actúa como enrutador (*Router*) o administrador del enlace dependiendo de la topología de red, descubre y mantiene las rutas que siguen los mensajes y asigna direcciones de red a los Dispositivos Finales ZigBee (ZED, *ZigBee End Device*). A diferencia del Enrutador ZigBee (ZR, *ZigBee Router*) es el único capaz de conformar la red y responsable de la asociación y disociación de dispositivos [9].
- **Enrutador ZigBee (ZR):** dispositivo de funcionalidad completa (FFD) que se encuentra siempre alerta, permitiendo el intercambio de información entre los diferentes dispositivos de la red. De manera adicional ofrece un nivel de aplicación para la ejecución de código de usuario. Es importante resaltar que es necesario que el enrutador ZigBee (ZR) tenga información acerca de las rutas posibles para hacer la entrega de los mensajes a otros dispositivos de la red [7] [9].
- **Dispositivo final ZigBee (ZED):** dispositivo de funcionalidad reducida (RFD) que se encuentra asociado a un enrutador ZigBee (ZR) o coordinador para la recepción y transmisión de mensajes [9]. Pasa la mayor parte del tiempo en reposo o bajo consumo de energía.

1.3.2 Topologías de Red

Una de las características más importantes de ZigBee® es la capacidad de soportar diferentes topologías de red: en estrella, árbol y malla [5].

En la topología en estrella, como se observa en la Figura 1.2, la red es controlada por un solo dispositivo, el coordinador ZigBee (ZC), el cual es responsable de la asociación y mantenimiento de los dispositivos en la red. Todos los dispositivos finales se comunican directamente con el coordinador ZigBee (ZC) [2] [7].

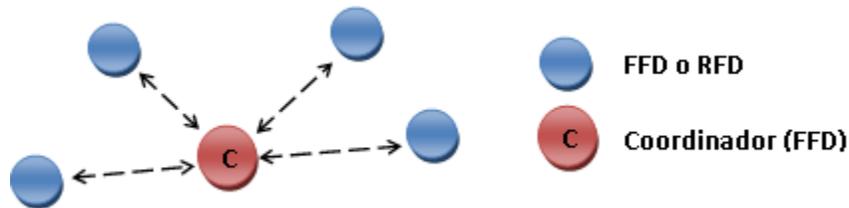


Figura 1.2 Topología en estrella

La topología en árbol consiste de un coordinador ZigBee (ZC), múltiples enrutadores ZigBee (ZR) y dispositivos finales, como se observa en la Figura 1.3. La función del enrutador es ampliar el área de cobertura de la red y transferir mensajes de datos y control usando una estrategia de enrutamiento jerárquico [2] [7].

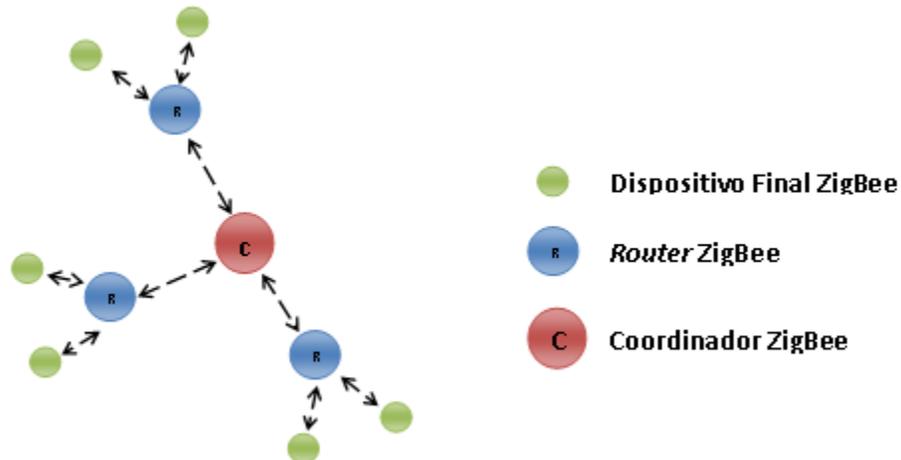


Figura 1.3 Topología en árbol

En la Figura 1.4 se observa una red en malla, la cual permite una completa comunicación *peer to peer*. Se caracteriza por ser una red multisalto, si un enlace falla, el nodo encontrará un enlace alternativo para alcanzar el destino. Los dispositivos se pueden comunicar directamente si se encuentran lo suficientemente cerca para establecer un enlace de comunicación exitoso, lo cual implica un menor consumo de energía [2] [7].

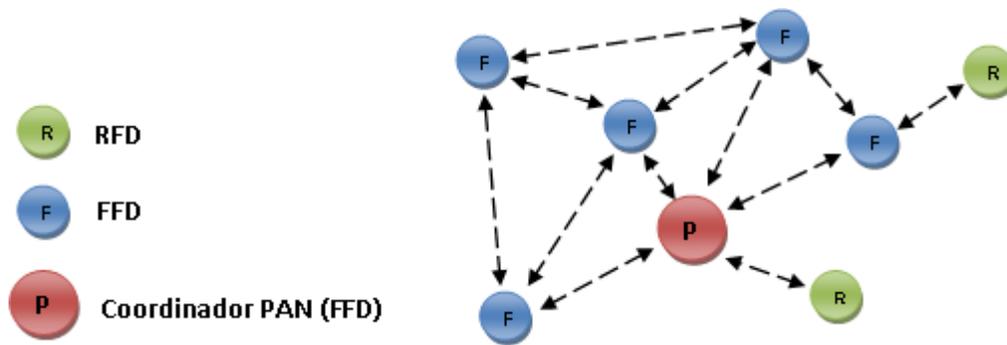


Figura 1.4 Topología en malla

1.4 NIVEL DE CONTROL DE ACCESO AL MEDIO

El nivel de control de acceso al medio (MAC) es el responsable del acceso al canal radio y de las siguientes funciones generales [7]:

- Generación de balizas² si el dispositivo es coordinador de la red.
- Sincronización de dispositivos.
- Asociación y disociación de dispositivos.
- Uso de Acceso Múltiple por Detección de Portadora y Evasión de Colisiones (CSMA-CA, *Carrier Sense Multiple Access-Collision Avoidance*) para acceso al canal.
- Generación y Mantenimiento de Intervalos de Tiempo Garantizado (GTS, *Guaranteed Time Slot*).
- Establecimiento de un enlace confiable entre dos entidades pares.

1.4.1 Acceso Múltiple por Detección de Portadora y Evasión de Colisiones (CSMA-CA)

Método de acceso aleatorio al medio, el cual permite que varios dispositivos usen el mismo canal para la transmisión de información de control y facilita el intercambio de información de usuario. Si un dispositivo desea transmitir, inicialmente debe realizar una valoración del canal con el fin de garantizar que no esté en uso por otro dispositivo, de este modo, se determina si el canal está libre basándose en la medida de energía en el canal de interés, o por la detección de la señal que está haciendo uso del canal.

² Baliza (*beacon*): Mensaje con formato específico usado para sincronizar los relojes de los nodos en la red.

Cuando el dispositivo desea transmitir, inicialmente entra en modo de recepción y determina la energía de señal en el canal deseado, procedimiento denominado Detección de Energía (ED, *Energy Detection*). El receptor no decodifica la señal para verificar si pertenece o no al estándar IEEE 802.15.4, sólo estima su nivel de energía.

Una alternativa para determinar que el canal de frecuencia está libre u ocupado es por medio de la Detección de Portadora (CS, *Carrier Sense*). A diferencia de la detección de energía (ED), verifica el tipo de señal y de esta manera garantiza el estado del canal de forma más eficiente. Si el canal no está libre, el dispositivo espera un tiempo aleatorio para intentar transmitir [2] [7].

1.4.2 Intervalos de Tiempo Garantizado

Se denomina intervalo de tiempo garantizado (GTS), al método de acceso al medio que permite al coordinador de la red asignar un intervalo de tiempo específico a un solo dispositivo, durante el cual puede transmitir sin hacer uso previo de acceso múltiple por detección de portadora y evasión de colisiones (CSMA-CA).

Para asignar un intervalo de tiempo garantizado (GTS), es necesario que todos los dispositivos en la red estén sincronizados, además, el período de vida de la batería en una red con baliza, puede ser considerablemente menor que en una red sin baliza, debido a que los dispositivos deben activarse constantemente solamente para el proceso de sincronización [2] [10].

1.4.3 Asociación y Disociación de Dispositivos

Funciones del nivel de control de acceso al medio (MAC) que permiten a los dispositivos unirse o dejar una red. Para unirse a una red, se envía una petición de asociación al coordinador, el cual puede aceptarla o rechazarla. La disociación permite notificar al coordinador el intento de abandonar la red [2].

1.5 NIVEL FÍSICO (PHY)

Las siguientes son funciones generales del nivel físico (PHY) [7]:

- Activación y desactivación del transceptor radio.
- Detección de energía (ED) en el canal.
- Indicador de Calidad del Enlace (LQI, *Link Quality Indicator*).
- Aseguramiento de Canal Libre (CCA, *Clear Channel Assesment*) para acceso múltiple por detección de portadora y evasión de colisiones (CSMA-CA).

- Selección de la frecuencia del canal.
- Transmisión y recepción de datos.

El estándar IEEE 802.15.4 – 2006 define cuatro especificaciones para el nivel físico (PHY), de acuerdo al esquema de modulación y la técnica de transmisión empleada en cada banda de frecuencia [7]:

- Especificación para las bandas de 868 MHz y 900 MHz empleando Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*) y Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria (BPSK, *Binary Phase Shift Keying*).
- Especificación para las bandas de 868 MHz y 900 MHz empleando espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS) y Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura con Desplazamiento Temporal (O-QPSK, *Offset QuadraturePhaseShiftKeying*).
- Especificación para las bandas de 868 MHz y 900 MHz empleando Espectro Ensanchado por Secuencia Paralela (PSSS, *Parallel Sequence Spread Spectrum*) y Modulación por Desplazamiento de Amplitud (ASK, *Amplitude Shift Keying*).
- Especificación para la banda de 2.4 GHz empleando espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS) y modulación por desplazamiento de fase en cuadratura con desplazamiento temporal (O-QPSK).

1.5.1 Frecuencias de Operación y Velocidades de Transmisión de Datos

En la Tabla 1.1 se observan las diferentes especificaciones para el nivel físico (PHY), con su respectivo esquema de modulación y método de ensanchamiento [2] [7].

Tabla 1.1 Frecuencias de Operación IEEE 802.15.4

Frecuencia (MHz)	Modulación	Número de Bits por Símbolo ³	Velocidad de Bit (Kbps)	Velocidad de Símbolo (Ksps)	Velocidad de Chip (Kcps)	Método Ensanchamiento
868–868.6	BPSK	1	20	20	300	DSSS Binario
902-928	BPSK	1	40	40	600	DSSS Binario
868–868.6	ASK	20	250	12.5	400	PSSS 20-bit
902-928	ASK	5	250	50	1600	PSSS 5-bit
868–868.6	O-QPSK	4	100	25	400	Ortogonal 16-Ario
902-928	O-QPSK	4	250	62.5	1000	Ortogonal 16-Ario
2400–2483.5	O-QPSK	4	250	62.5	2000	Ortogonal 16-Ario

³ Agrupación de bits

En 2006, se introdujeron dos especificaciones opcionales a las descritas en IEEE 802.15.4 – 2003 para las bandas de 868 MHz y 900 MHz con modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK), que ofrecen velocidades de transmisión de datos de 20 Kbps en 868 MHz y 40 Kbps en 900 MHz, especificaciones que proporcionan un equilibrio entre complejidad y velocidad de transmisión de datos.

La especificación que implementa modulación por desplazamiento de amplitud (ASK) brinda una velocidad de transmisión de datos de 250 Kbps para ambas bandas. Con el esquema de modulación por desplazamiento de fase en cuadratura con desplazamiento temporal (O-QPSK), la banda de 900 MHz al igual que la de 2.4 GHz ofrece una velocidad de transmisión de datos de 250 Kbps y 100 Kbps para la banda de 868 MHz [2].

1.5.2 Asignación de Canales

El estándar IEEE 802.15.4 – 2003 define 27 canales de frecuencia en las tres bandas, numerados de 0 a 26 y representados por 32 bits, donde los 5 Bits Más Significativos (MSB, *Most Significant Bit*) son reservados y fijados en 0, mientras los 27 Bits Menos Significativos (LSB, *Less Significant Bit*) indican el estado (1 = disponible, 0 = ocupado) de cada canal [11].

Los canales están numerados de 0 a 26, iniciando desde la banda más baja. La banda de 868 MHz tiene asignado un solo canal entre 868 MHz y 868.6 MHz. La banda de 900 MHz soporta 10 canales entre 902 MHz y 928 MHz con un espaciamiento entre canales y ancho de banda (BW) de 2 MHz. La banda de 2.4 GHz cuenta con 16 canales entre 2.4 GHz y 2.4835 GHz, con un espaciamiento entre canales de 5 MHz como se observa en la Figura 1.5 [11].

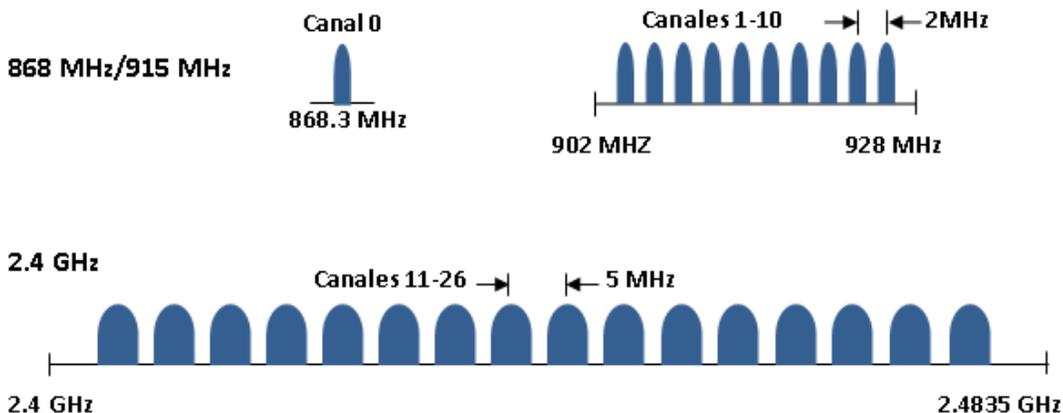


Figura 1.5 Distribución de canales en IEEE 802.15.4. Tomada de [3]

La introducción de las especificaciones opcionales para el nivel físico (PHY) en 2006 incrementó el número de canales a 49, excediendo el campo designado para su numeración definido en IEEE 802.15.4 - 2003. De esta manera, la asignación de canal

se definió a través de una combinación de número de canal y una nueva variable denominada página de canal⁴.

Los 5 bits más significativos del mapa de 32 bits son usados como un valor entero para especificar 32 posibles páginas de canal, por otro lado, los 27 bits menos significativos son usados como una máscara para especificar números de canal dentro de una página de canal.

Un total de 27 canales numerados de 0 a 26 están disponibles por página de canal. La página 0 soporta los canales definidos por IEEE 802.15.4 – 2003. Para las páginas 1 y 2, 11 canales numerados de 0 a 10 están disponibles para las especificaciones opcionales con modulación por desplazamiento de amplitud (ASK) y modulación por desplazamiento de fase en cuadratura con desplazamiento temporal (O-QPSK) respectivamente como se muestra en la Tabla 1.2 [7].

Tabla 1.2 Pagina de canal y número de canal

Página de Canal (Decimal)	Página de Canal (Binario)	Número de Canal	Descripción
0	00000	0	868 MHz (BPSK)
		1-10	900 MHz (BPSK)
		11-26	2.4 GHz (O-QPSK)
1	00001	0	868 MHz (ASK)
		1-10	900 MHz (ASK)
		11-26	Reservado
2	00010	0	868 MHz (O-QPSK)
		1-10	900 MHz (O-QPSK)
		11-26	Reservado
3 – 31	00011-11111	Reservado	Reservado

La Densidad Espectral de Potencia (PSD, *Power Spectral Density*) indica cómo está distribuida la potencia de una señal sobre un rango de frecuencia [12]. Esta medida es utilizada para asegurar que el transmisor opere dentro de los límites especificados para la Máscara Espectral (SM, *Spectral Mask*) en el estándar IEEE 802.15.4, con el fin de evitar efectos de interferencia con canales adyacentes [7] [2].

Los límites especificados por el estándar IEEE 802.15.4 para la máscara espectral (SM) se muestran en la Tabla 1.3. Para los límites relativo y absoluto, la potencia espectral promedio debe ser medida usando un ancho de banda (BW) de resolución igual a 100 KHz [2].

Tabla 1.3 Límites densidad espectral de potencia (PSD) estándar IEEE 802.15.4

Banda de Frecuencia	Desplazamiento de Frecuencia	Límite Relativo	Límite Absoluto
2.4 GHz	$ f - f_c > 3.5 \text{ MHz}$	-20 dB	-30 dBm
915 MHz	$ f - f_c > 1.2 \text{ MHz}$	-20 dB	-20 dBm
868 MHz	N/A	N/A	N/A

⁴ Concepto adicionado en la revisión del estándar IEEE 802.15.4 – 2006 para diferenciar las especificaciones del nivel físico.

La máscara espectral (SM) para la banda de 2.4 GHz requiere que la señal sea al menos 30 dB más débil en una diferencia de +/-3.5 MHz respecto a la frecuencia central. Para la banda de 900 MHz los límites de la máscara espectral (SM) requieren que la señal sea al menos 20 dB más débil en una diferencia de +/- 1.2 MHz respecto a la frecuencia central. En la Figura 1.6 se observa la densidad espectral de potencia (PSD) de una señal sobre el canal 2, comparada con los límites definidos para la máscara espectral (SM) [5] [13].

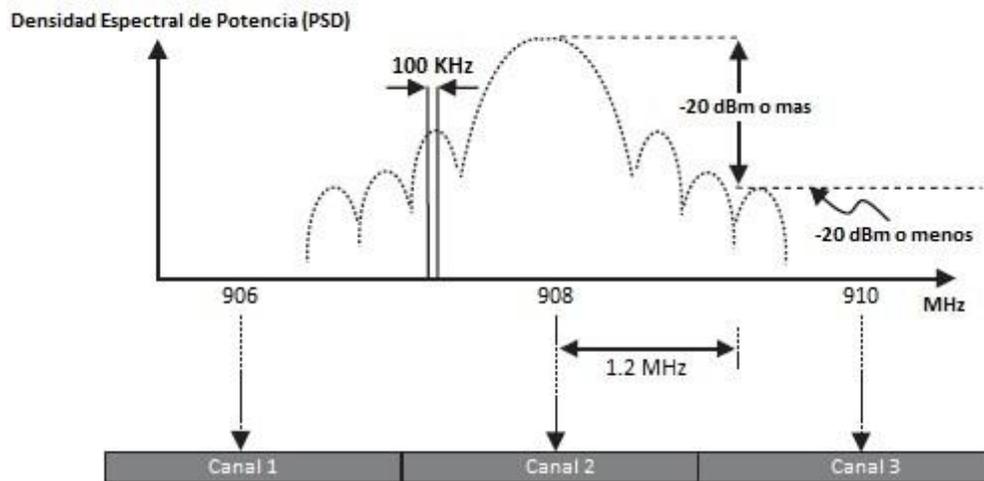


Figura 1.6 Límites PSD IEEE 802.15.4 para la banda de 900 MHz

1.5.3 Formato de Paquetes del Nivel Físico

La Unidad de Datos de Protocolo del Nivel Físico (PPDU, *PHY Protocol Data Unit*) está conformada por: el Encabezado de Sincronización (SHR, *Synchronization Header*), el cual permite a un dispositivo receptor sincronizarse y aceptar el flujo de datos; el Encabezado del Nivel Físico (PHR, *PHY Header*) con información de longitud de trama; y una carga útil de longitud variable que contiene la trama del nivel de acceso al medio (MAC). El formato de la unidad de datos de protocolo del nivel físico (PPDU) se observa en la Figura 1.7 [7].

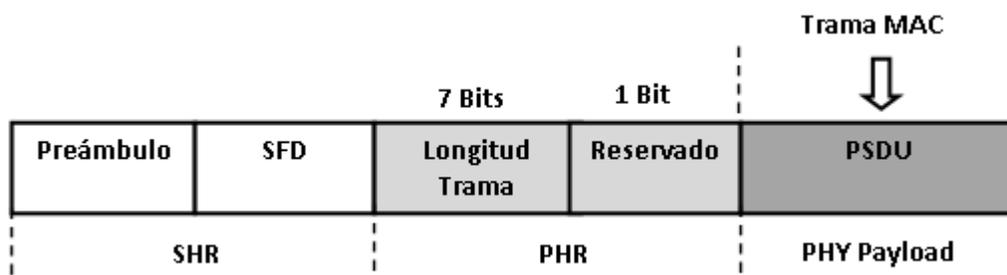


Figura 1.7 Formato PPDU

El encabezado de sincronización (SHR) está compuesto por: el campo preámbulo que es usado por el transceptor para obtener símbolos de sincronización con un mensaje recibido, su longitud es variable de acuerdo a la especificación del nivel físico (PHY) y el Delimitador de Inicio de Trama (SFD, *Start of Frame Delimiter*), es el campo que indica el final del encabezado y el inicio del paquete de datos. Longitud de trama es un campo de 7 bits que determina el número total de octetos de la Unidad de Datos de Servicio del Nivel Físico (PSDU, *PHY Service Data Unit*) [2] [7].

1.5.4 Especificaciones del Nivel Físico (PHY) para la Banda de 900 MHz

El estándar IEEE 802.15.4 define tres especificaciones para la banda de 900 MHz, de acuerdo al esquema de modulación y la técnica de transmisión. A continuación se definen sus características básicas [7].

1.5.4.1 Espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS) empleando modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK).

La velocidad de transmisión de datos en la banda de 900 MHz con modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK) es 40 Kbps, empleando espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS) y codificación diferencial [7].

Diagrama de bloques funcionales.

Cada bit perteneciente a la unidad de datos de protocolo del nivel físico (PPDU) debe ser procesado a través de todos los bloques funcionales mostrados en la Figura 1.8, empezando por el campo preámbulo y terminando con el último octeto de la unidad de datos de servicio del nivel físico (PSDU) [7].



Figura 1.8 Funciones de modulación y ensanchamiento con BPSK y DSSS

Codificación Diferencial.

Se genera a partir de un sumador módulo 2 o una operación OR exclusivo (XOR, *eXclusive OR*). Cada dígito en la secuencia codificada se obtiene al comparar el bit de entrada actual con el bit codificado anteriormente. Este procedimiento es usado para eliminar cualquier ambigüedad de fase entre la señal con modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK) y la señal recibida, debido a una posible inversión de polaridad, generada por los diferentes componentes del sistema de comunicación. La polaridad de la forma de onda codificada diferencialmente puede invertirse sin afectar los datos decodificados [14] [2].

Mapeo de bit a chip.

El mapeo de bit a chip se realiza mediante la técnica de espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS), la cual realiza una expansión en frecuencia de la señal de información a un valor mucho mayor que el requerido para transmitir la señal en banda base. Este proceso es conocido como ensanchamiento y se realiza mediante la combinación de una señal de baja velocidad con una secuencia pseudoaleatoria de alta velocidad, conformada por símbolos de corta duración denominados chips. En el extremo receptor, la señal recibida se combina de manera sincronizada con una réplica exacta de la secuencia pseudoaleatoria para recuperar la información original. La relación entre el Ancho de Banda (BW, *BandWidth*) de la señal de información y el ancho de banda (BW) de la secuencia pseudoaleatoria se denomina Factor de Ensanchamiento (SF, *Spreading Factor*) y define el número de chips a los que corresponde un bit de información [15] [16].

Cada uno de los bits de datos codificados son mapeados en una secuencia pseudoaleatoria de 15 chips como es especificado en Tabla 1.4, obteniendo un factor de ensanchamiento (SF) igual a 15 [7].

Tabla 1.4 Mapeo de bit a chip

Bit de Entrada	Valores de Chip ($C_0 C_1 \dots C_{14}$)
0	1 1 1 1 0 1 0 1 1 0 0 1 0 0 0
1	0 0 0 0 1 0 1 0 0 1 1 0 1 1 1

Modulación

Las secuencias de chips son moduladas por desplazamiento de fase binaria (BPSK) con conformación de pulsos de coseno alzado, con el fin de generar canales limitados en banda y reducir los efectos de la Interferencia Intersimbólica (ISI, *Intersymbol Interference*). Un valor de chip igual a uno corresponde a un pulso positivo y un valor de chip de cero es representado por un pulso negativo.

1.5.4.2 Espectro ensanchado por secuencia paralela (PSSS) empleando modulación por desplazamiento de amplitud (ASK).

Esta especificación opcional emplea modulación por desplazamiento de amplitud (ASK), brindando una velocidad de transmisión de datos de 250 Kbps. Emplea una técnica de modulación multicódigo denominada espectro ensanchado por secuencia paralela (PSSS) o Multiplexación por División de Códigos Ortogonales (OCDM, *Orthogonal Code Division Multiplexing*) [7].

Diagrama de bloques funcionales

Cada octeto de la unidad de datos de protocolo del nivel físico (PPDU) es procesado secuencialmente a través de las funciones de ensanchamiento y modulación. El

encabezado de sincronización (SHR) es modulado por desplazamiento de fase binaria (BPSK), mientras el encabezado del nivel físico (PHR) y la unidad de datos de servicio del nivel físico (PSDU) utilizan modulación por desplazamiento de amplitud (ASK) como se observa en la Figura 1.9 [7].

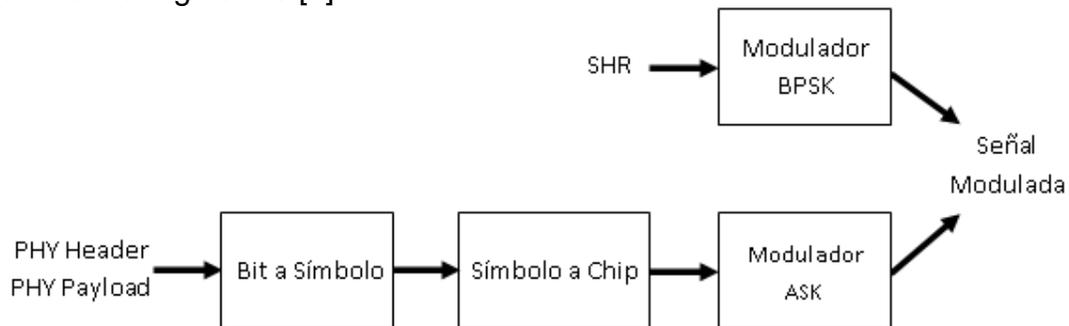


Figura 1.9 Funciones de modulación y ensanchamiento con DSSS

Mapeo de bit a símbolo.

Un símbolo corresponde a 5 bits de información y el mapeo inicia con los cinco bits menos significativos (LSB) del primer octeto del encabezado del nivel físico (PHR). De esta manera se continúa hasta el final de la unidad de datos de protocolo del nivel físico (PPDU), hasta que todos los octetos del encabezado del nivel físico (PHR) y la unidad de datos de servicio del nivel físico (PSDU) hayan sido mapeados en símbolos [7].

Mapeo de símbolo a chip

El mapeo de símbolo a chip se realiza mediante la técnica de espectro ensanchado por secuencia paralela (PSSS), la cual se basa en secuencias casi ortogonales para ensanchar la señal antes de transmitirla. A diferencia de espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS), que transmite una sola secuencia, se envía una superposición de múltiples secuencias ortogonales en paralelo. Durante cada periodo de símbolo, 5 bits de información son multiplicados independientemente por una secuencia pseudoaleatoria de 32 chips. El resultado de la multiplicación es una tabla de códigos con 5 filas y 32 columnas, en donde todas las filas son sumadas linealmente para crear un símbolo multinivel de 32 chips. Luego se realiza un proceso de pre codificación, en donde se adiciona un valor constante al símbolo obtenido para asegurar que el máximo y el mínimo sean simétricos respecto a 0. La secuencia pre codificada es modula por desplazamiento de amplitud (ASK) [2] [7].

En la Figura 1.10 se observa el procedimiento para realizar el mapeo de símbolo a chip, mediante la técnica de espectro ensanchado por secuencia paralela (PSSS).

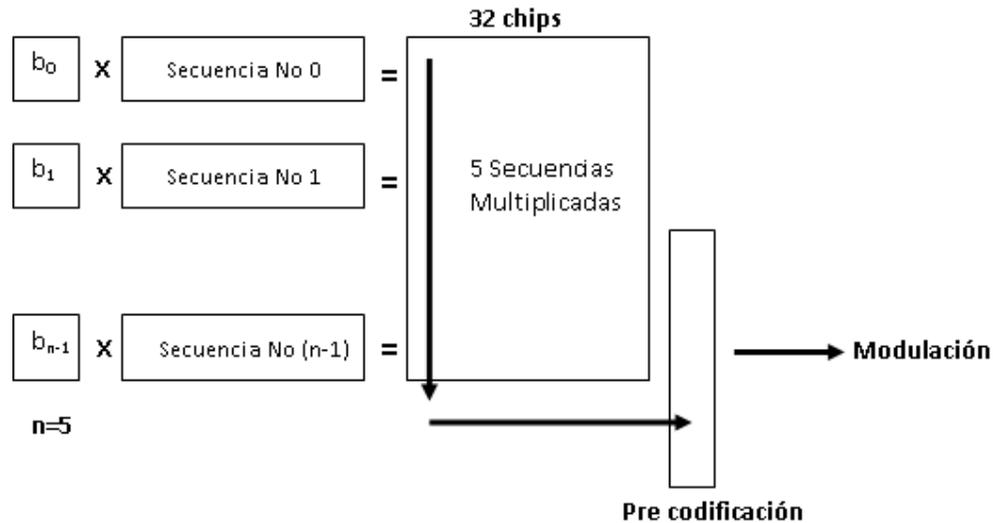


Figura 1.10 Mapeo de símbolo a chip – PSSS

El mapeo de símbolo a chip para el encabezado de sincronización (SHR) es diferente. El preámbulo es generado repitiendo 6 veces la secuencia número 0, mientras que el delimitador de inicio de trama (SFD) es la misma secuencia pero invertida [7].

Modulación.

La secuencia de chips que representa cada símbolo del encabezado del nivel físico (PHR) y la unidad de datos de servicio del nivel físico (PSDU), es modulada por desplazamiento de amplitud (ASK), mientras el encabezado de sincronización (SHR) es modulado por desplazamiento de fase binaria (BPSK). Para ambos esquemas de modulación se emplean filtros de conformación de pulso de raíz cuadrada de coseno alzado [7].

1.5.4.3 Espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS) empleando modulación por desplazamiento de fase en cuadratura con desplazamiento temporal (O-QPSK).

La velocidad de transmisión de datos en la banda de 900 MHz para esta especificación opcional, empleado modulación por desplazamiento de fase en cuadratura con desplazamiento temporal (O-QPSK) es de 250 Kbps [7].

Diagrama de bloques funcionales

Al igual que las especificaciones anteriores cada bit de la unidad de datos de protocolo del nivel físico (PPDU), es procesado a través de cada uno de los bloques funcionales especificados en la Figura 1.11.

Las funciones de modulación y ensanchamiento empleando la modulación por desplazamiento de fase en cuadratura con desplazamiento temporal (O-QPSK) y la

técnica de espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS) al igual que lo descrito anteriormente, está compuesto por un bloque de mapeo de bit a símbolo y de símbolo a chip, enfatizando que la diferencia en estos bloques radica en el modulador O-QPSK [7].

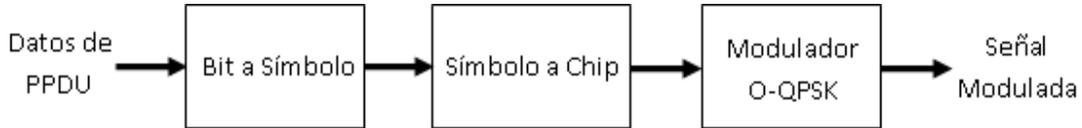


Figura 1.11 Funciones de modulación y ensanchamiento con OQPSK y DSSS

Mapeo de Bit a Símbolo

Los cuatro bits menos significativos (LSB) de cada octeto se mapean en un símbolo, mientras los cuatro bits más significativos (MSB) se mapearán en el símbolo de información siguiente.

A través de las funciones de modulación y ensanchamiento se procesa secuencialmente cada octeto de la unidad de datos de protocolo del nivel físico (PPDU), iniciando desde el campo preámbulo hasta el último octeto de la unidad de datos de servicio del nivel físico (PSDU), siempre procesando primero los bits menos significativos de cada octeto [7].

Mapeo de Símbolo a Chip

Durante el periodo de cada símbolo, cuatro bits de información son usados para determinar una de las dieciséis secuencias pseudoaleatorias casi ortogonales de dieciséis chips descritas en la Tabla 1.5, haciendo uso de la técnica de espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS), obteniendo un factor de ensanchamiento (SF) igual a 4 [7].

Tabla 1.5 Mapeo de bit a chip.

Símbolo de Datos (Decimal)	Símbolo de Datos (Binario)	Valores de Chip (C ₀ C ₁ ... C ₁₅)
0	0000	0 0 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 0 0 1 0 1
1	0001	0 1 0 0 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 0 0 1
2	0010	0 1 0 1 0 0 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 0
3	0011	1 0 0 1 0 1 0 0 1 1 1 1 1 1 0 0 0
4	0100	0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 1 1 1 1 1 0
5	0101	1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 1 1 1 1
6	0110	1 1 1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 1 1
7	0111	1 1 1 1 1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 1 0
8	1000	0 1 1 0 1 0 1 1 0 1 1 1 1 0 0 0 0
9	1001	0 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0
10	1010	0 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 0 1 1 1
11	1011	1 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 1 0 1 1
12	1100	0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1
13	1101	1 1 0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1
14	1110	1 0 1 1 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 0
15	1111	1 0 1 0 1 1 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1

Modulación.

Las secuencias de dieciséis chips que representan cada símbolo de información son moduladas por desplazamiento de fase en cuadratura con desplazamiento temporal (O-QPSK) por medio de la conformación de pulsos de media onda. Los chips pares de la secuencia son modulados en el canal en fase (I) y los impares sobre el canal en cuadratura (Q), el cual cuenta con un retardo equivalente a medio periodo de símbolo respecto al canal I, pero para ZigBee® es tomado como con un periodo de chip [7].

CAPÍTULO 2. HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN

ZigBee® es un estándar inalámbrico de bajo costo y bajo consumo de energía diseñado para el monitoreo y control de redes de sensores inalámbricas (WSN). ZigBee® permite implementar aplicaciones que brindan libertad, flexibilidad y desempeño confiable en el control de actividades diarias: automatización de edificios; control remoto; uso eficiente de la energía entre otros [2] [3].

ZigBee Alliance® es una organización formada por diferentes compañías privadas y miembros gubernamentales que contribuyen a la innovación en cada una de las aplicaciones de ZigBee®, desarrollando un trabajo colaborativo para mejorar las condiciones de vida y permitir un mayor control del entorno. Como resultado de la diversidad de miembros, *ZigBee Alliance*® se ha convertido en un gran ecosistema de organizaciones que ofrece múltiples equipos y dispositivos de acuerdo a las necesidades de cada cliente. Con el fin de cumplir con los objetivos propuestos en este trabajado de grado, fue necesario seleccionar una herramienta de evaluación que permitiera implementar un sistema de comunicación inalámbrico punto a punto basado en la tecnología ZigBee® operando en la banda de 900 MHz, de esta manera se eligió el kit de desarrollo *ModFLEX*™ con el módulo *SiFLEX02* de *LS Research*®⁵ [3] [4].

2.1 KIT DE DESARROLLO *ModFLEX*™ *SiFLEX02*

El kit de desarrollo con módulo *SiFLEX02* pertenece a la familia de productos *ModFLEX*™ desarrollados por *LS Research*®. *SiFLEX02* es un módulo de alto desempeño y bajo costo, diseñado para la implementación de aplicaciones de seguridad, control de iluminación, redes de sensores y automatización industrial que opera en la banda de 900 MHz y está compuesto por un microcontrolador y un transceptor radio especialmente diseñado para el estándar IEEE 802.15.4 y ZigBee®. El kit está compuesto por dos tarjetas de desarrollo *ModFLEX*™ con módulos *SiFLEX02*, antenas tipo látigo de lambda cuartos con una impedancia de 50 Ω , dos cables *USB*, baterías *AA* y una guía de inicio rápido, como se observa en la Figura 2.1 [17].

⁵.Miembro adoptante de *ZigBee Alliance*®. <http://www.lsr.com/>



Figura 2.1 Kit de Desarrollo SiFLEX02 de LS RESEARCH®

2.1.1 Bloques Funcionales Módulo SiFLEX02

El módulo SiFLEX02 está compuesto por un microcontrolador ATXMEGA256A3 y un transceptor radio IEEE 802.15.4 AT86RF212 desarrollados por la empresa Atmel®⁶, un amplificador de Radio Frecuencia (RF, *Radio Frequency*) y la antena. El diagrama general que muestra los bloques funcionales que hacen parte del módulo se observa en la Figura 2.2 [17].

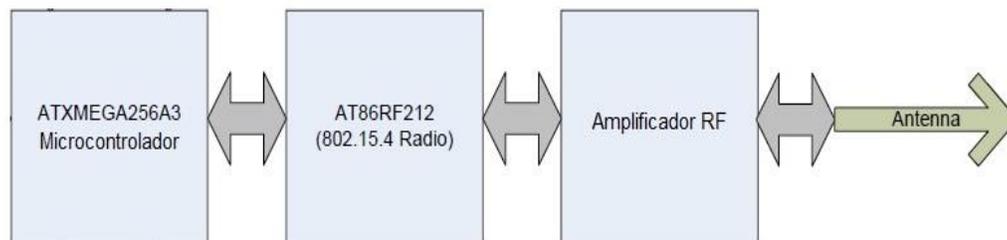


Figura 2.2 Diagrama en bloques funcionales del módulo SiFLEX02

2.1.1.1 Microcontrolador ATXMEGA256A3.

Atmel XMEGA A3 es una familia de microcontroladores de bajo consumo de energía y alto desempeño basados en la arquitectura AVR®⁷. Gracias a su potente capacidad de ejecución de instrucciones en un ciclo de reloj, los XMEGA® A3 logran ejecutar

⁶ Corporación líder en diseño y fabricación de microcontroladores, componentes de Radio Frecuencia (RF), y memorias no volátiles entre otros productos. Disponible en <http://www.atmel.com/>

⁷ Arquitectura propietaria desarrollada por ATMEL a partir de un Conjunto de Instrucciones Reducidas (RISC, *Reduce Instruction Set Computing*). Disponible en: <http://www.atmel.com/products/microcontrollers/avr/default.aspx>

aproximadamente un Millón de Instrucciones por Segundo (MIPS, *Million Instructions per Second*) por MHz permitiendo optimizar el consumo de energía contra la velocidad de procesamiento [18].

La Unidad Central de Procesamiento (CPU, *Central Processing Unit*) AVR combina un conjunto de instrucciones complejas con 32 registros de propósito general. Los 32 registros están directamente conectados a la Unidad Lógica Aritmética (ALU, *Arithmetic Logic Unit*), permitiendo que dos registros independientes sean accedidos con una sola instrucción y ejecutados en un ciclo de reloj. La arquitectura resultante alcanza velocidades de procesamiento mucho mayores que los microcontroladores basados en arquitectura CISC® [18].

En la Tabla 2.1 se describe el consumo de energía para los diferentes modos de operación.

Tabla 2.1 Consumo de energía.

MODO	MIN	PROMEDIO	MAX	UNIDAD
Transmisión	270	283	300	mA
Recepción	27	30	33	mA
Reposo		2	5	µA

Los XMEGA® A3 cuentan con cinco modos de ahorro de energía, que pueden ser ejecutados en cualquier momento desde el modo activo. La unidad central de procesamiento (CPU) ejecuta el código de aplicación y decide qué modo activar y el momento apropiado para hacerlo[18]. Los siguientes son los modos de ahorro de energía:

- **Modo Idle.** Detiene la unidad central de procesamiento (CPU) mientras permite que la Memoria Estática de Acceso Aleatorio (SRAM, *Static Random Access Memory*), el controlador de interrupciones y todos los periféricos continúen funcionando.
- **Modo Power Down.** Almacena la información contenida en la memoria estática de acceso aleatorio (SRAM) y detiene los osciladores del sistema, deshabilitando todas las funciones hasta la próxima interrupción o reinicio.
- **Modo Power Save.** El temporizador asíncrono continúa funcionando, mientras el resto del dispositivo está suspendido.
- **Modo Standby.** El oscilador de cristal continúa funcionando, mientras el resto del dispositivo está suspendido.
- **Modo Extended Standby.** El oscilador principal y el temporizador asíncrono continúan funcionando, mientras el resto del dispositivo está suspendido.

⁸La arquitectura *Complex Instruction Set Computing* contiene un gran número de instrucciones que permite a los microprocesadores realizar cálculos complejos de manera más eficiente por medio de pequeñas instrucciones. Disponible en <http://www.techterms.com/definition/cisc>

2.1.1.2 Transceptor radio AT86RF212.

Atmel AT86RF212 es un transceptor de baja potencia que opera en la banda ISM de 900 MHz, especialmente diseñado para aplicaciones de bajo costo basadas en IEEE 802.15.4 y ZigBee®. La comunicación entre transmisor y receptor está basada en espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS) con diferentes esquemas de modulación y factores de ensanchamiento. En la Tabla 2.2 se presentan las características generales de transmisión y recepción del transceptor radio [17] [19].

Tabla 2.2 Características de transmisión y recepción

PARÁMETRO	MIN	MAX	UNIDAD
Potencia de transmisión nominal	5	10	dBm
Rango de frecuencia	906	924	MHz
Velocidad de transmisión de datos	40	1000	Kbps
Sensibilidad del receptor	-108 (BPSK 40 Kbps)	-101 (O-QPSK 250 Kbps)	dBm

El transceptor radio AT86RF212 implementa todas las especificaciones del nivel físico (PHY) del estándar IEEE 802.15.4, soportando velocidades de transmisión de datos de 40 Kbps con modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK) y 250 Kbps con modulación por desplazamiento de fase en cuadratura con desplazamiento temporal (O-QPSK). El transceptor radio puede emplear modos de operación propietarios que le permiten alcanzar hasta 1000 Kbps modificando en un factor de 2 o 4 la longitud de los códigos de ensanchamiento, obteniendo una reducción en la sensibilidad del receptor. La modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK) es usada por defecto para la transmisión de datos, sin embargo la modulación por desplazamiento de fase en cuadratura con desplazamiento temporal (O-QPSK) puede ser configurada de manera opcional por el usuario [19].

2.1.1.3 Amplificador de Radio Frecuencia (RF).

El módulo SiFLEX02 logra una potencia de transmisión de hasta 24 dBm (250 mW). El amplificador de radiofrecuencia permite obtener una potencia de salida que varía entre 22 y 24 dBm dependiendo de la potencia de la señal proveniente del transceptor radio [17]

2.1.1.4 Antena.

El kit de desarrollo ofrece diferentes opciones de antena dependiendo de la necesidad o características que se desean implementar. Para el desarrollo del presente trabajo de grado, se eligió la antena dipolo con conector SMA de Polaridad Inversa (RP-SMA, *Reverse Polarity SMA*) y una antena $\lambda/4$ tipo látigo integrada, teniendo en cuenta su ganancia, impedancia y el rango de frecuencias de operación [20].

- **Dipolo de 900 MHz.** Con el fin de cumplir los objetivos del trabajo de grado, se usó la antena dipolo de 900 MHz que ofrece *LS Research*® en transmisión, a la cual se adaptó varios atenuadores para limitar la potencia de transmisión en las pruebas de desempeño. La antena se muestra en la Figura 2.3.

En la Tabla 2.3 se encuentran las especificaciones eléctricas y mecánicas de la antena dipolo de 900 MHz.

Tabla 2.3 Especificaciones antena dipolo 900 MHz

PARÁMETRO	VALOR
Ganancia	+2 dBi
Impedancia	50 Ω
Tipo	Dipolo
Polarización	Lineal Vertical
Frecuencia	902 – 928 MHz centrada en 915 MHz
Peso	13 gr
Tamaño	210 mm x 10 mm
VSWR	≤ 2.5 : 1

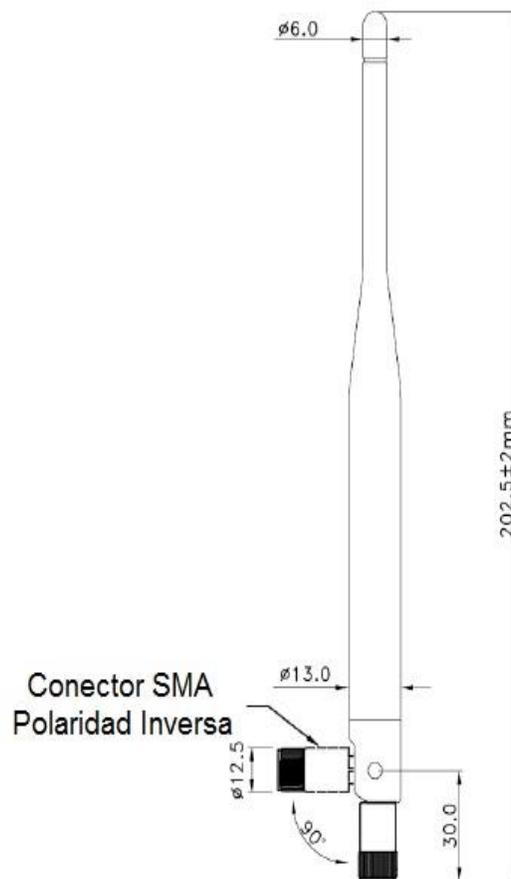


Figura 2.3 Antena Dipolo de 900 MHz

- **Látigo $\lambda/4$.** Antena por defecto del kit de desarrollo ModFLEX™ con módulo SiFLEX02. Esta antena cuenta con una impedancia de 50Ω y se usó en recepción.

2.1.2 Tarjeta de Evaluación ModFLEX™

La tarjeta de evaluación cuenta con una interfaz de conexión *USB* para realizar el intercambio de información entre el módulo y la herramienta software *ModFLEX Test Tool*. La tarjeta de evaluación permite monitorear continuamente su operación mediante los Diodos Emisores de Luz (LED, *Light Emitting Diode*) ubicados en su lado izquierdo. y seleccionar la fuente de alimentación por medio de un *jumper*. A continuación se describen los componentes más importantes de la tarjeta de evaluación.

En la Figura 2.4 se observa la tarjeta de evaluación ModFLEX™ de *LS Research*®.

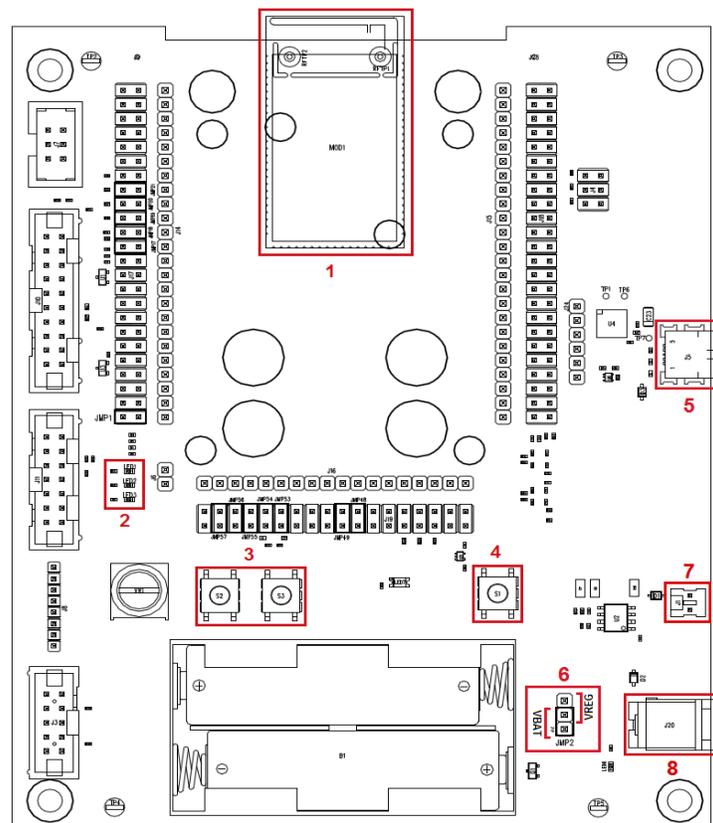


Figura 2.4 Tarjeta de Evaluación ModFLEX™. Adaptada de [21]

Los siguientes son los elementos más importantes de la tarjeta de evaluación:

1. Conector del módulo SiFLEX02: espacio de la tarjeta empleado para la conexión del módulo SiFLEX02 de *LS Research*®.

2. Tres *Leds* que permiten verificar la operación de la tarjeta e indican las siguientes actividades:
 - verde: actividad del microcontrolador.
 - amarillo: actividad serial del anfitrión.
 - rojo: actividad de radio frecuencia (RF).
3. Botones para la configuración de la tarjeta como maestro o esclavo.
4. Boton *RESET*.
5. Socket mini *USB* tipo B de 5 pines para la conexión de la tarjeta de evaluación con el computador.
6. *Jumper* de alimentación. La configuración de la fuente de alimentación de la tarjeta de evaluación se establece mediante la posición de este *jumper*.
 - *VREG*: cuando el *jumper* se encuentra en esta posición, la tarjeta puede tomar la alimentación del puerto *USB*, un adaptador *AC* no incluido en el kit o una fuente de alimentación.
 - *VBAT*: en esta posición del *jumper*, la tarjeta de evaluación es directamente alimentada por baterías AA.
7. Socket destinado para la conexión de la fuente de alimentación.
8. Socket empleado para la conexión del adaptador *AC*.

2.2 ModFLEX TEST TOOL SUITE

El intercambio de información con el módulo SiFLEX02 se realiza a través del Transmisor/Receptor Asíncrono Universal (UART, *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*), encargado de convertir los datos de forma paralela a serial y viceversa como se observa en la Figura 2.5 [22].

La herramienta software *ModFLEX Test Tool* permite el envío y recepción de información, evaluación de desempeño, cambio de canales, selección de esquemas de modulación y otras opciones adicionales de manera sencilla y eficiente mediante una interfaz gráfica como se podrá observar en las siguientes secciones [17].

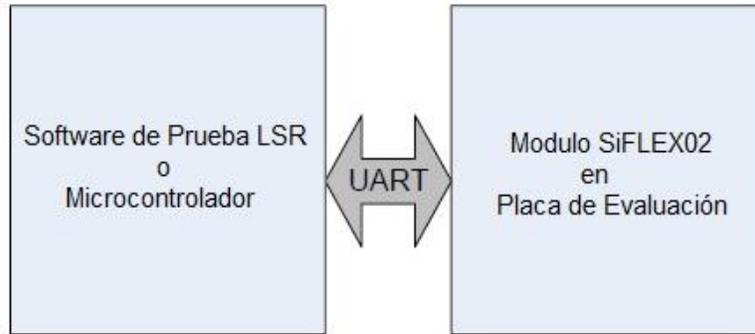


Figura 2.5 Esquema de Transmisión entre ModFLEX™ Test Tool y SiFLEX02

2.2.1 Conexión

La conexión de la tarjeta de evaluación con el computador, se realiza mediante una interfaz *USB* y debido a que el dispositivo aparece como un puerto COM adicional en el computador, es necesario instalar un controlador⁹ que permite acceder al dispositivo *USB* de la misma manera como lo haría un puerto COM estándar. Una vez configurado el puerto, se abre la herramienta software *ModFLEX Test Tool Suite* que despliega una ventana de conexión como se observa en la Figura 2.6, a continuación se elige la opción *USB* y se presiona el botón *Connect* para desplegar la interfaz de la herramienta con la que se trabajará.

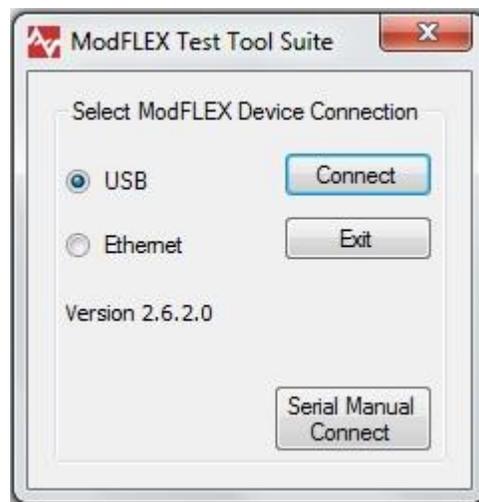


Figura 2.6 Ventana de conexión - ModFLEX Test Tool

2.2.2 Características de Radio Frecuencia (*RF Settings*)

En esta ventana se definen las características básicas de radiofrecuencia del dispositivo para la transmisión y recepción de información, como se observa en la

⁹Controlador de Puerto COM virtual. Disponible en: <http://www.ftdichip.com>

Figura 2.7. A continuación se realiza una breve descripción de los parámetros contenidos en esta ventana

- *Short Address*: este campo especifica una dirección única para cada dispositivo y tiene una longitud de 16 bits. El rango válido para esta dirección es entre 0 y 65534. Al conectar la tarjeta de evaluación, los dos valores por defecto que configura para cada dispositivo es 1 y 3714.
- *Long Address*: a diferencia del campo anterior, especifica una dirección con longitud de 64 bits, en un rango válido entre 0x0000000000000001 y 0xFFFFFFFFFFFFFFFE. Para usar esta dirección, es necesario configurar la dirección corta con un valor de 65534.
- Identificador de Red de Área Personal (PAN ID, *Personal Area Network Identifier*): campo de 16 bits de longitud que identifica una red de otra. Para que los dispositivos de una misma red puedan comunicarse, es necesario que tengan configurado el mismo PAN ID.
- *RF Channel*: campo que permite definir uno de los 10 canales posibles para la transmisión y recepción de información.
- *Transmit Power*: usado para especificar la potencia de transmisión del módulo, la cual se define en 22 niveles diferentes que varían entre 0 (-8 dBm) y 21 (24 dBm) [17].
- *Set Basic RF Settings*: botón que permite configurar todas las características descritas anteriormente en el módulo.
- *Query Basic RF Settings*: este botón realiza una petición al módulo, con el fin de recuperar los valores previamente definidos de las características mencionadas anteriormente.

Figura 2.7 Ventana características de Radio Frecuencia (RF)

2.2.3 Datos de Radio Frecuencia (RF Data)

En esta ventana se configuran los parámetros necesarios para el envío de mensajes de un módulo a otro como se observa en la Figura 2.8. De esta manera, se presenta una breve descripción de los parámetros que serán empleados en las pruebas a realizar.

- *Destination Short Address*: campo usado para especificar la dirección corta que identifica al dispositivo receptor.
- *Packet ID*: campo que permite identificar el paquete, el cual se incrementa consecutivamente a medida que los paquetes son enviados al receptor.
- *TX Options*: el módulo cuenta con las siguientes opciones de transmisión: *Retries Enable*, *Send Secured Packet*¹⁰, *Disable CCA*¹¹, de las cuales solo se seleccionó la primera opción, debido a que permite recibir mensajes de acuse de recibo (ACK, *Acknowledgement*) con el fin de confirmar la correcta llegada de los mismos.

¹⁰*Send Secured Packet*, permite la activación de seguridad para el envío de paquetes.

¹¹*Disable CCA*, desactiva la opción de aseguramiento de canal libre.

- *Send Repeated Simple RF Message Short Addressing*: este botón permite enviar una secuencia indefinida de mensajes con un formato establecido por los parámetros definidos anteriormente.
- *Send Simple RF Message Short Addressing*: este botón envía un solo mensaje con los parámetros definidos anteriormente.

The screenshot shows the 'RF Message' configuration window with the 'Beacon Options' tab selected. The window is divided into several sections:

- Destination Short Address:** Input field with value '1'.
- Destination Long Address:** Input field with value '00:00:00:00:00:00:01'.
- Destination PAN ID:** Input field with value '100'.
- Packet ID:** Input field with value '1'.
- Times to Send:** Radio buttons for 'Disable' (selected) and 'Enable'.
- Number of Times to Repeat:** Input field with value '100'.
- Address Mode:** Radio buttons for 'Short' (selected) and 'Long'.
- Data Format:** Radio buttons for 'HEX' and 'ASCII' (selected).
- Source Route:** Input field for 'Hops' with value '1' and a table below it.

Hop	Address
1	0
- RF Message Type:** Radio buttons for 'Simple' (selected), 'Advanced', 'Simple Repeated', and 'Source Routed'.
- TX Options:** Checkboxes for 'Retries Enabled', 'Send Secured Packet', and 'Disable CCA'.
- RF Data:** 'Bytes: 10', 'Max Bytes: 112', and a text field containing '1234567890'.
- Start Delay After Ack Received:** Checked checkbox.
- Repeat Delay (mS):** Input field with value '10'.
- Buttons:** 'Send Repeated Simple RF Message Short Addressing' and 'Send Simple RF Message Short Addressing'.

Figura 2.8 Ventana datos de Radio Frecuencia (RF)

2.2.4 Opciones (Options)

Dentro de esta ventana se selecciona el esquema de modulación que se va a emplear para realizar la transmisión. El módulo permite elegir entre BPSK y O-QPSK, esquemas de modulación definidas en el estándar IEEE 802.15.4 para la banda de 900 MHz y un esquema de modulación O-QPSK opcional, con una velocidad de transmisión de datos definida por el fabricante como se observa en la Figura 2.9.

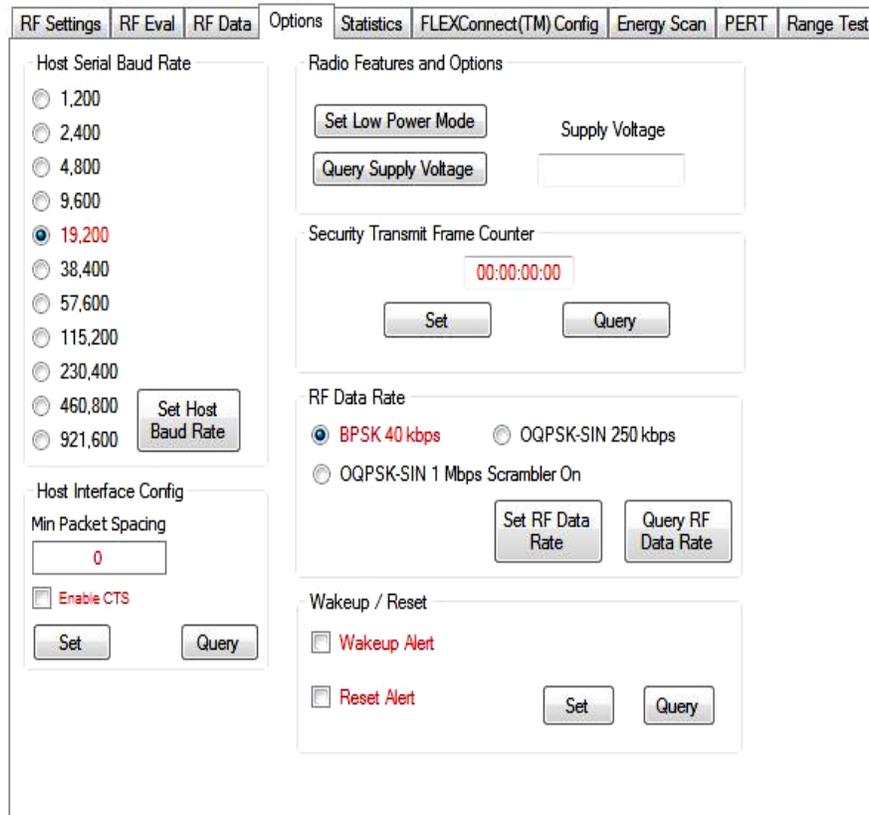


Figura 2.9 Ventana de opciones

2.2.5 Estadísticas (*Statistics*)

Esta ventana permite obtener el número de paquetes enviados, mensajes ACK recibidos, paquetes recibidos y mensajes de difusión recibidos, dependiendo si el módulo se encuentra configurado en transmisión o recepción como se observa en la Figura 2.10.

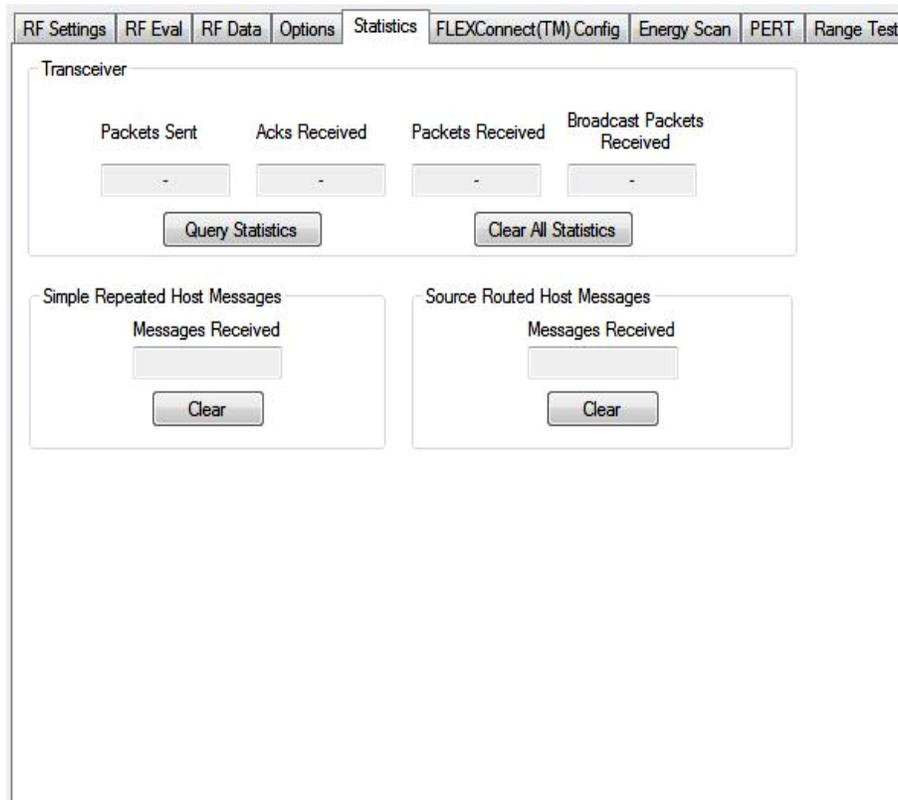


Figura 2.10 Ventana de estadísticas

2.2.6 Escáner de Energía (*Energy Scan*)

Por medio de esta opción, es posible estimar un valor de intensidad de potencia recibida dentro del ancho de banda de los 10 canales definidos por IEEE 802.15.4, para la banda de 900 MHz, como se observa en la Figura 2.11. De esta manera, se puede determinar que canales se encuentran libres de interferencia y son las mejores opciones para realizar la comunicación.

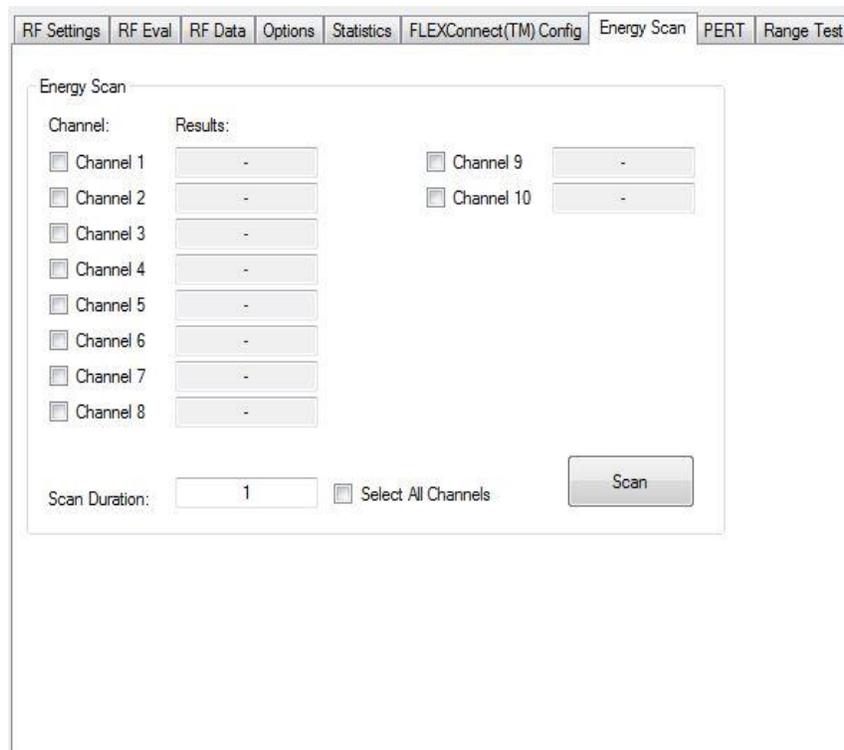


Figura 2.11 Ventana escáner de energía

2.2.7 PERT

Esta ventana de prueba permite obtener el porcentaje de paquetes errados en transmisión como se observa en la Figura 2.12, teniendo en cuenta lo siguiente:

- *Test Mode*: en este campo se debe especificar si el módulo es transmisor o receptor.
- *Dest Transceiver Address*: campo en el que se configura la dirección corta del nodo receptor.
- *Number of Packets to Tx*: campo en el que se configura el número de paquetes que se van a transmitir. Para un correcto intercambio de información es necesario que este número sea igual en el módulo receptor.
- *Ticks Between Packets (5ms/Ticks)*: tiempo desde que se completa la transmisión e inicia la nueva en 5 ms.
- *Number of Bytes to Tx*: Número de *Bytes* que se desea transmitir

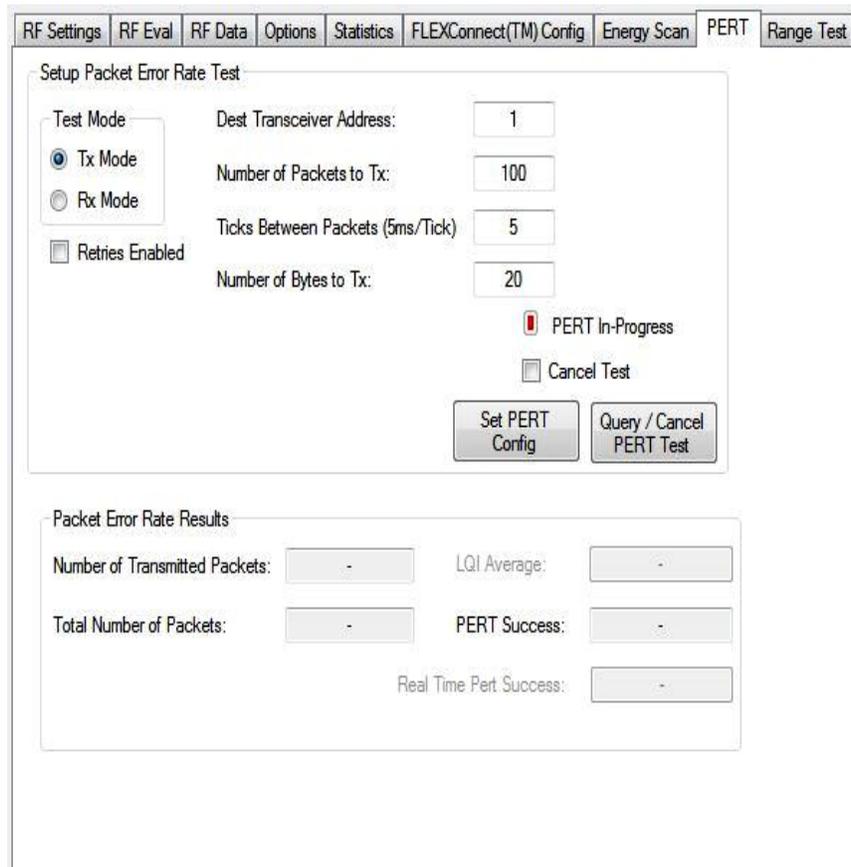


Figura 2.12 Ventana prueba de PER

2.2.8 Prueba de Rango (*Range Test*)

La ventana de Prueba de Rango permite elegir uno de los canales para la transmisión de mensajes al igual que la elección del módulo que trabajará como esclavo y el que será el maestro, como se observa en la Figura 2.13. Con esta prueba se determinará el número de paquetes exitosos que se reciben y su respectivo LQI.

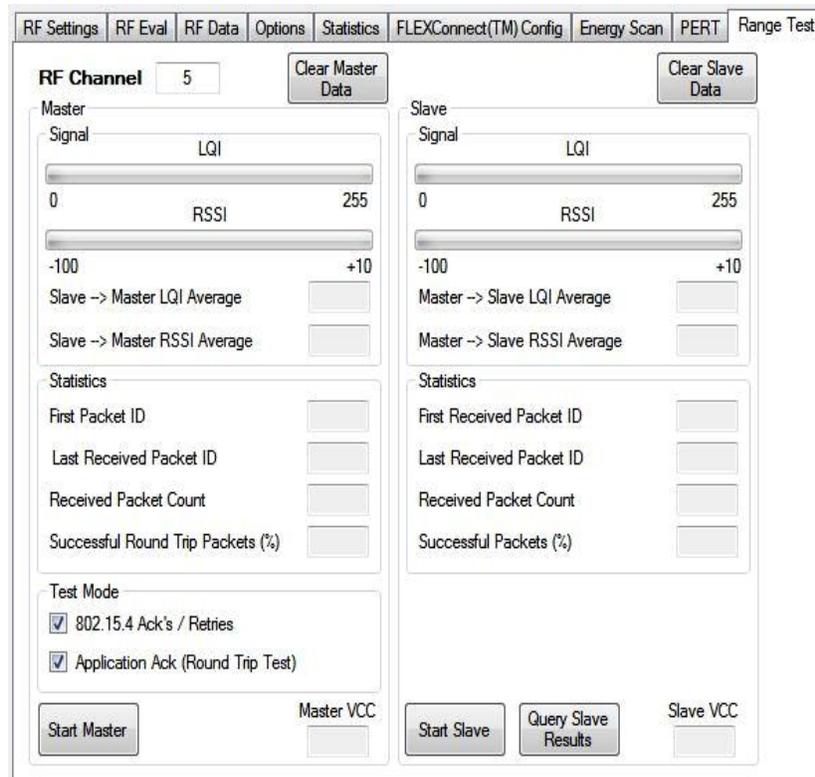


Figura 2.13 Ventana prueba de rango

2.2.9 Ventana de Mensajes

En esta ventana se observan los mensajes que despliega el módulo cuando se realizan diferentes operaciones en el mismo, permitiendo tener un registro de los mensajes que se intercambian entre transmisor y receptor, como se observa en la Figura 2.14. La explicación detallada de los mensajes de protocolo que se muestran en la ventana, se encuentran en la guía de descripción del protocolo [22]

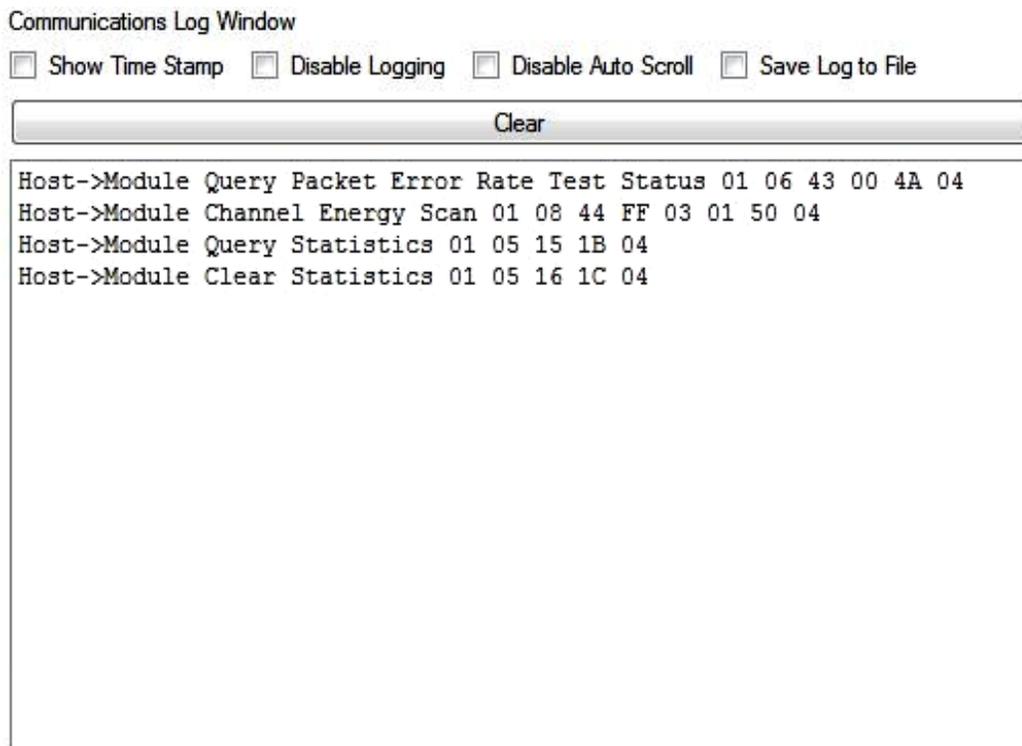


Figura 2.14 Ventana de mensajes

CAPÍTULO 3. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el fin de analizar el desempeño a nivel físico de la tecnología ZigBee® en la banda de 900 MHz, se eligieron dos escenarios que serán usados para la realización de pruebas reales por medio del kit seleccionado y a nivel de simulación con las siguientes herramientas: *Wireless InSite*®¹² que permitió el análisis de predicción de cobertura y efectos de multitrayectoria, y Simulink® de Matlab®, en el que se implementó un modelo teórico del sistema de comunicación, como base para la comparación de desempeño en términos de Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*). Se utilizó además, el kit de desarrollo ModFLEX™ de *LS Research*®, para comparar y analizar los resultados adquiridos de forma práctica, teórica y mediante herramientas de simulación.

3.1 ANÁLISIS DE COBERTURA CON LA HERRAMIENTA *WIRELESS INSITE*®

Wireless InSite® es una poderosa herramienta de simulación, usada para la predicción de los efectos en la propagación de las ondas electromagnéticas y observar el impacto del entorno físico en el desempeño de los sistemas de comunicaciones inalámbricos [23].

Es una herramienta que permite modelar un entorno real, abstrayendo detalles de la realidad tales como árboles, edificios, entre otros, los cuales afectan las características de la señal transmitida. La herramienta facilita la ubicación de diferentes tipos de transmisores y receptores dependiendo de las necesidades de cada caso de estudio, permitiendo configurar dentro de los transceptores el tipo de señal con el que se va a trabajar y el tipo de antenas para el sistema de comunicación. Entre el gran número de utilidades que tiene el software, es importante resaltar la configuración de las áreas de estudio, para las cuales se define un modelo de propagación para los cálculos en diferentes porciones del terreno y a su vez, proporciona una representación visual de resultados, permitiendo la superposición de datos para la comparación rápida de mediciones anteriores [24].

Por lo anterior, *Wireless InSite*® fue la herramienta seleccionada en el presente trabajo para la estimación de cobertura tanto en interiores como en exteriores.

3.1.1 Exteriores

Teniendo en cuenta los espacios que tiene la Universidad del Cauca, la cancha de fútbol del Centro Deportivo Universitario (CDU) ilustrada en la Figura 3.1, fue el escenario seleccionado para la realización de las pruebas en exteriores, ya que cuenta con un espacio amplio, libre de obstáculos y con condiciones ideales para la obtención

¹²<http://www.remcom.com/wireless-insite>

de resultados óptimos para su análisis. La cancha tiene aproximadamente 110 m de largo y 70 m de ancho, cuenta con una pista atlética de 6 m de ancho a su alrededor, una zona de 6 m de ancho de gradería y árboles a cada lado.



Figura 3.1 Escenario de Exteriores - CDU

El escenario diseñado en la herramienta de simulación, fue un campo abierto con las mismas dimensiones del Centro Deportivo Universitario (CDU), descritas anteriormente. Este escenario está compuesto por: un terreno en tierra húmeda, follaje tipo césped para representar el área de la cancha, bosque de pino denso con 100 m de largo, 2 m de ancho por 15 m de alto y una gradería de 6 m de ancho con una altura máxima de 3 m en concreto. En la Figura 3.2 se observa este escenario con la ubicación del transmisor y la ruta de receptores ubicados a largo de 100 m de la cancha de fútbol. La distancia entre receptores es configurada por el usuario, para este caso específico fue 5 m, lo equivalente a 20 receptores. La distancia entre el transmisor y el primer receptor es de 7 m.

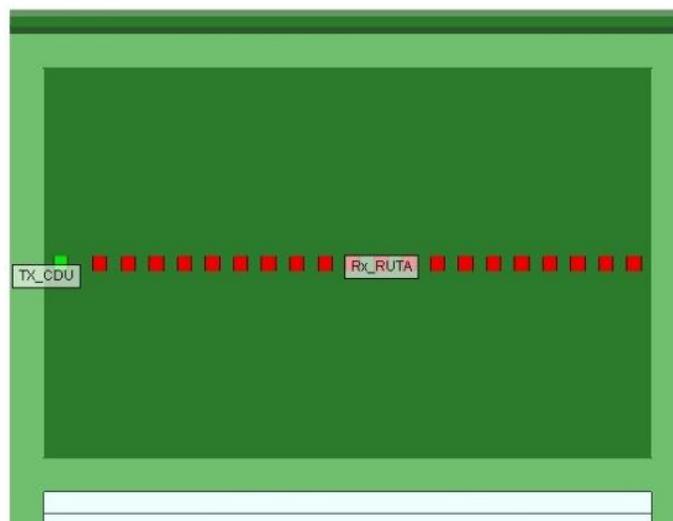


Figura 3.2 Escenario en exteriores

Después de realizar el diseño del escenario de simulación, se configuraron los parámetros necesarios para modelar el sistema de comunicación. Se definió una señal sinusoidal con una frecuencia central de 908 MHz y un ancho de banda (BW) de 2 MHz que corresponde al canal 2 definido en IEEE 802.15.4 – 2003 [11]. Una vez definida la señal, se creó una antena dipolo lambda medios con ganancia de 2 dBi para el transmisor y un monopolo lambda cuartos para los receptores, ambas con polarización vertical y ubicadas a una altura de 0.5 m del suelo, las cuales corresponden a las antenas del sistema real. Finalmente, se especificó una potencia de 0 dBm para el transmisor.

En la Tabla 3.1, se observan los parámetros configurados en la herramienta de simulación *Wireless InSite®* para exteriores:

Tabla 3.1 Parámetros configurados para exteriores

Descripción	Datos
Potencia de transmisión (dBm)	0
Frecuencia de operación (MHz)	908
Ancho de banda del canal (MHz)	2
Altura de antenas Tx- Rx (m)	0.5
Tipo de antena de Tx	Dipolo $\lambda/2$
Tipo de antena de Rx	Monopolo $\lambda/4$
Polarización antena de Tx	Vertical
Ganancia de antena de Tx (dBi)	2
Polarización antena de Rx	NA
Ganancia de antena de Rx (dBi)	2
Método de Predicción	Espacio Libre FULL3D-SBR

3.1.1.1 Espacio libre.

Con el fin de analizar el comportamiento del sistema en un ambiente libre de obstáculos y evaluar el efecto de las pérdidas de propagación en espacio libre, se definió un área de estudio que no tiene en cuenta la zona de árboles ni gradería, la cual se puede observar levemente delineada en color amarillo en la Figura 3.3.

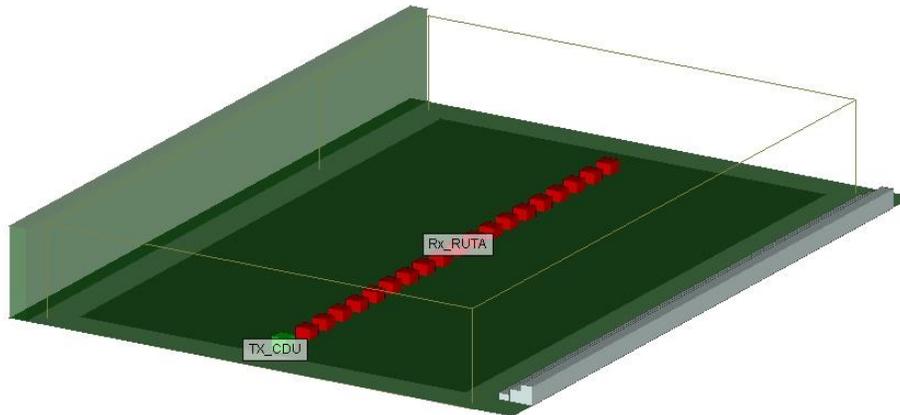


Figura 3.3 Área de estudio - Espacio libre

A. Potencia recibida en espacio libre

A medida que la distancia aumenta los niveles de potencia en recepción van disminuyendo debido a los efectos de atenuación del medio. En la Figura 3.4 se observan los niveles de potencia obtenidos en la ruta de receptores representados en una escala de colores, donde el color rojo corresponde a un valor de potencia igual a -44.4 dBm y el color violeta a un valor igual a -67.5 dBm.



Figura 3.4 Niveles de potencia en recepción

En la Figura 3.5 se observa la relación inversamente proporcional que existe entre la potencia recibida y la distancia, el primer valor registrado a 10 m, corresponde al primer receptor y es el que obtiene el nivel de potencia más elevado, por el contrario el último receptor, ubicado a 100 m del transmisor, registra un nivel de potencia mínimo.

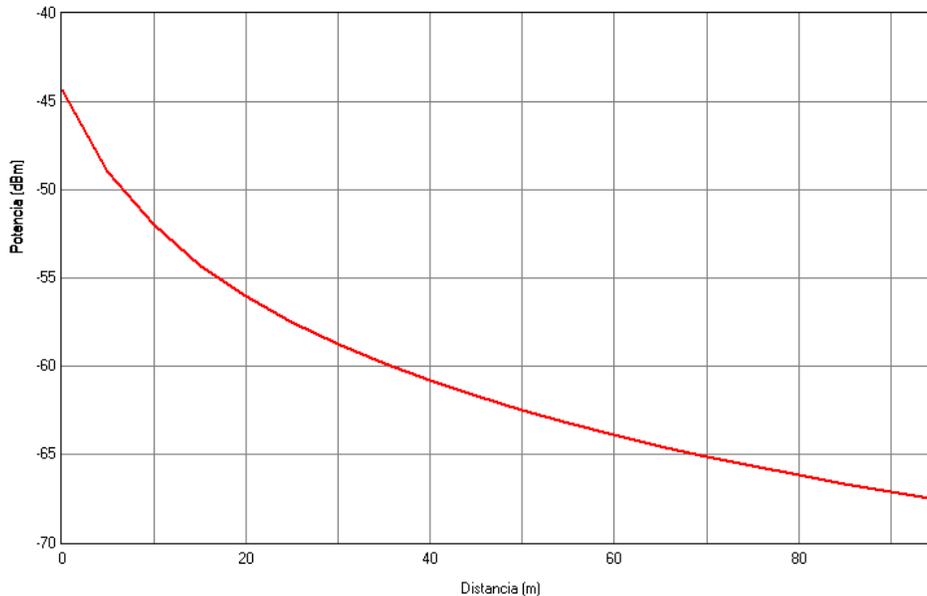


Figura 3.5 Potencia recibida vs Distancia en espacio libre

B. Pérdidas de propagación en espacio libre

El modelo de propagación de espacio libre brinda una buena aproximación a las pérdidas reales de propagación y expresa la relación entre la Potencia de Recepción (P_{RX}), la Potencia entregada por el Transmisor (P_{TX}), las diferentes ganancias y las pérdidas de espacio libre presentes en el sistema de comunicación, expresadas en la ecuación 3.1.

$$P_{RX}[dBm] = P_{TX}[dBm] + G_T[dB] + G_R[dB] - L_S [dB] \quad (3.1)$$

Dónde:

G_T : Ganancia de la Antena Transmisora

G_R : Ganancia de la Antena Receptora

L_S : Pérdidas de Espacio Libre

Cuando una onda electromagnética viaja en el espacio libre, el trayecto se describe como un rayo de conexión directo entre transmisor y receptor. Con el fin de calcular las pérdidas de propagación, es posible usar la ecuación 3.2 descrita por Friis [25].

$$p_{rx}/p_{tx} = g_t * g_r * \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \quad (3.2)$$

Dónde:

p_{rx}/p_{tx} : Relación pérdidas de Propagación

$\lambda = c/f$: Longitud de Onda

R : Distancia entre transmisor y receptor

Transformando la ecuación 3.2 en unidades logarítmicas, se obtiene la ecuación 3.3 que se usó para comparar los datos obtenidos de la simulación con los teóricos. (Ver sección A1 del Anexo A).

$$L[dB] = G_T[dB] + G_R[dB] + 22 + 20 \log \left(\frac{R(m)}{\lambda(m)} \right) \quad (3.3)$$

A diferencia de la potencia, las pérdidas de propagación presentan una relación directamente proporcional con la distancia, creciendo con el aumento de la distancia.

3.1.1.2 Full 3D – SBR y Eigenray.

Con el objetivo de analizar el trayecto de propagación de los rayos emitidos por el transmisor y su interacción con el medio, se realizó la simulación usando el modelo de propagación FULL 3D. Este es un modelo de propagación basado en el método de Trazado de Rayos (*Ray Tracing*), el cual puede ser empleado en exteriores e interiores, debido a que es independiente de la geometría de los obstáculos presentes en el escenario. Cuenta con los métodos de Disparo y Rebote de Rayos (SBR, *Shooting and Bouncing Ray*) y *Eigenray*, para la evaluación de los efectos de reflexión, difracción y dispersión.

Esta prueba se realizó únicamente con el método de disparo y rebote de rayos (SBR), además se tuvieron en cuenta el bosque de pinos y la gradería dentro del área de estudio como se observa en la Figura 3.6.

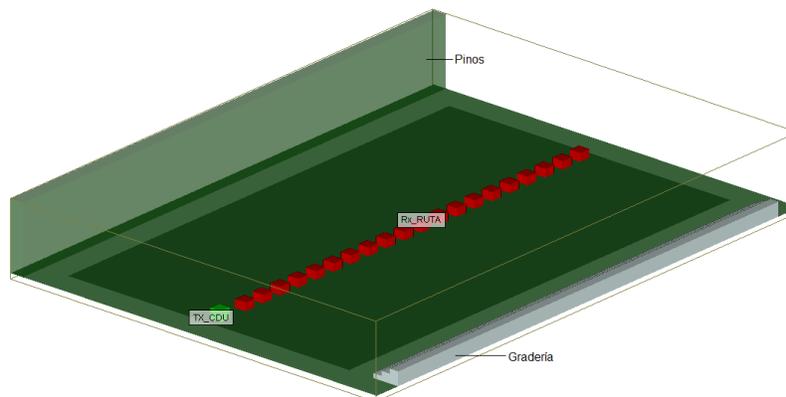


Figura 3.6 Área de estudio Exteriores - FULL 3D

A. Potencia recibida en exteriores con FULL 3D – SBR

En la Figura 3.7, se observa la variación de los niveles de potencia a lo largo de la ruta de receptores. Con el aumento de la distancia, la potencia recibida disminuye, presentando variaciones debido a los efectos de multitrayectoria producidos por los elementos presentes en el escenario.

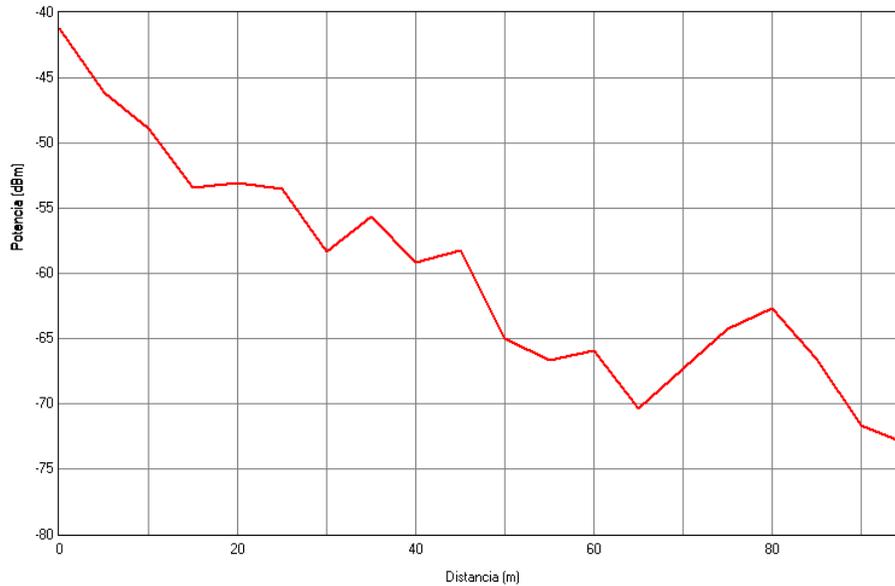


Figura 3.7 Potencia recibida vs Distancia en exteriores con FULL3D

B. Trayectos de Propagación en exteriores con FULL 3D – SBR

Los trayectos de propagación que se observan en la Figura 3.8 presentan colores que varían dependiendo de la intensidad con que llegan desde el transmisor a cada receptor. Según el material de los obstáculos en el escenario, se presenta mayor o menor absorción de energía. De acuerdo a lo anterior, se puede visualizar que los rayos de color verde reflejados en la gradería, llegan con un nivel de potencia mayor que los rayos azules reflejados en el bosque de pino denso. Los rayos que salen directamente desde el transmisor al receptor, son los rayos de color rojo y naranja, los cuales presentan un nivel de potencia más elevado y no se ven afectados por los fenómenos de propagación [26].

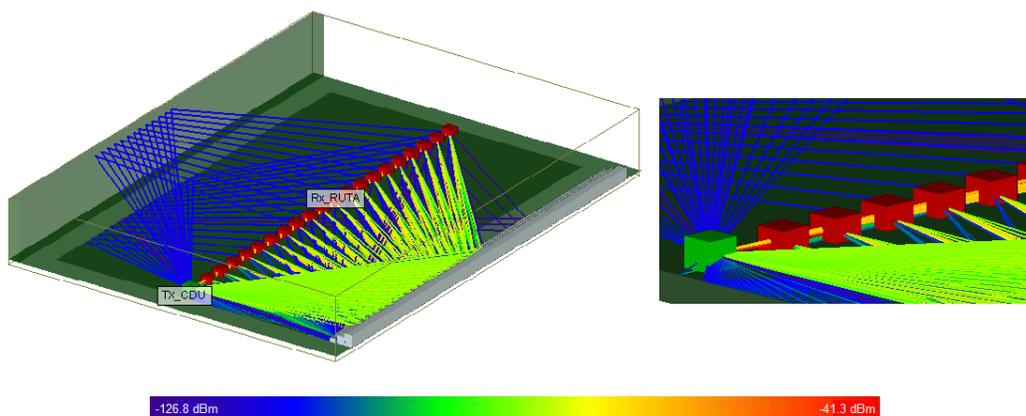


Figura 3.8 Trayectos de propagación en exteriores con FULL 3D – SBR

C. Área de Cobertura en exteriores

Con el fin de observar la cobertura del sistema implementado sobre la cancha de fútbol, se configuró una grilla de 6111 receptores, con una separación de 1 m entre ellos, a una altura de 0.5 m del suelo. La grilla se ubicó dentro de la cancha de fútbol y, el área de estudio tiene en cuenta la gradería y el bosque de pinos. El modelo de propagación que se usó para la predicción del área de cobertura, fue el modelo FULL 3D con el método de trazado de rayos SBR.

En la Tabla 3.2 se observan los parámetros configurados en *Wireless InSite*® para realizar el análisis de cobertura en exteriores.

Tabla 3.2 Parámetros configurados para el análisis de cobertura en exteriores

Descripción	Datos
Potencia de transmisión (dBm)	0
Frecuencia de operación (MHz)	908
Ancho de banda del canal (MHz)	2
Altura de antenas Tx- Rx (m)	0.5
Espaciamiento entre Rx (m)	1
Tipo de antena de Tx	Dipolo $\lambda/2$
Tipo de antena de Rx	Monopolo $\lambda/4$
Polarización antena de Tx	Vertical
Ganancia de antena de Tx (dBi)	2
Polarización antena de Rx	NA
Ganancia de antena de Rx (dBi)	2
Método de Predicción	FULL3D-SBR

Los niveles de potencia recibida sobre la grilla de receptores se observan en la Figura 3.9. La escala de colores que varía de rojo a violeta representa valores de potencia entre - 40 dBm y - 87.3 dBm. Los receptores ubicados más cerca del transmisor, presentan un nivel de potencia mayor que los ubicados al final de la cancha. Adicionalmente, se observan puntos azules sobre la grilla, donde la intensidad de potencia es mínima, debido a la interferencia destructiva ocasionada por la multitrayectoria

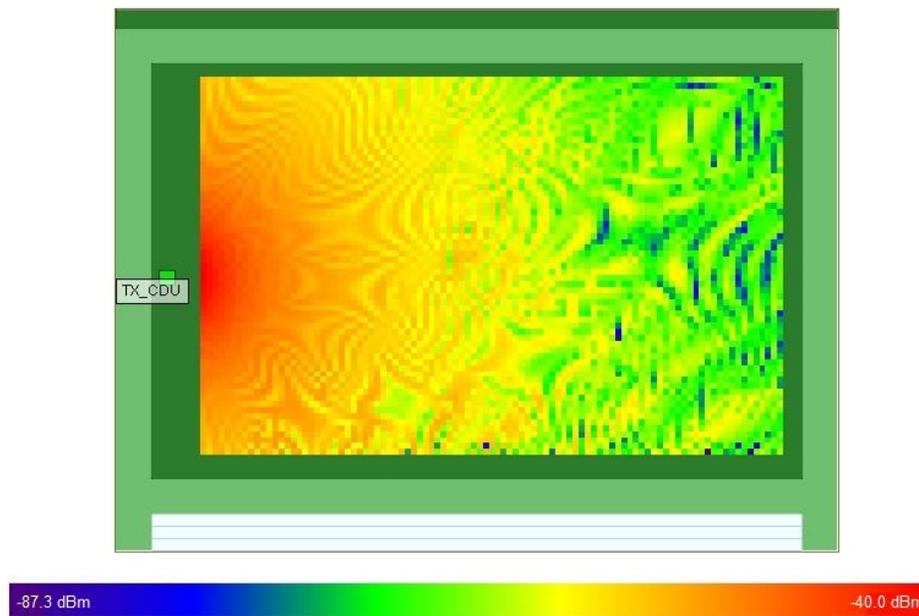


Figura 3.9 Área de cobertura en exteriores

3.1.2 Interiores

El pasillo del tercer piso de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca fue el escenario elegido para realizar el análisis de cobertura del sistema de comunicación en interiores [27]. Cuenta con un pasillo principal de aproximadamente 69 m de largo por 2 m de ancho y un pasillo secundario de 17 m de largo por 4 m de ancho. Como se observa en la Figura 3.10, el escenario cuenta con un gran número de salones, ventanas y puertas, lo que lo hace ideal para realizar un análisis completo de los diferentes fenómenos presentes en interiores.

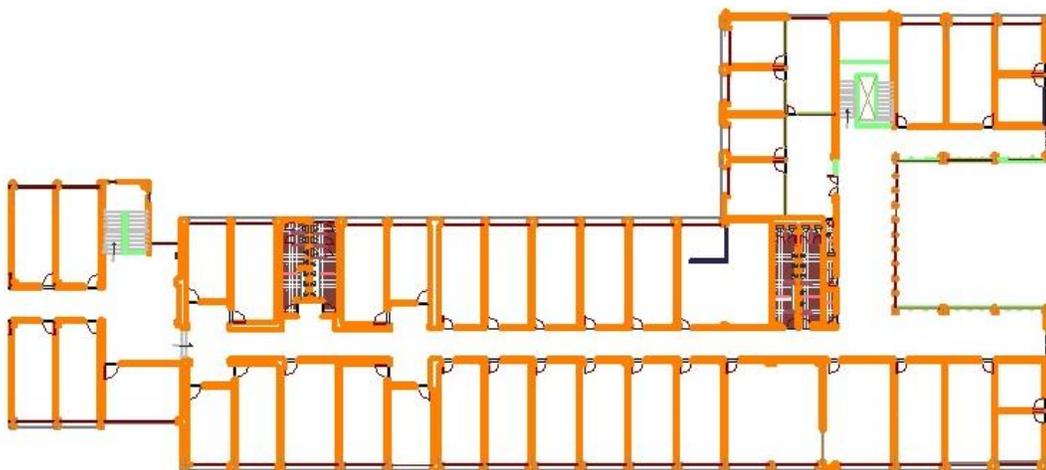


Figura 3.10 Escenario en Interiores – Tercer Piso FIET

El escenario fue diseñado con la herramienta de edición de *Wireless InSite®*, basado en el anterior plano [27]. En el diseño del escenario se tuvieron en cuenta las dimensiones reales del pasillo, la correcta distribución de oficinas, puertas y ventanas, obteniendo como resultado el modelo en 3D que se observa en la Figura 3.11.

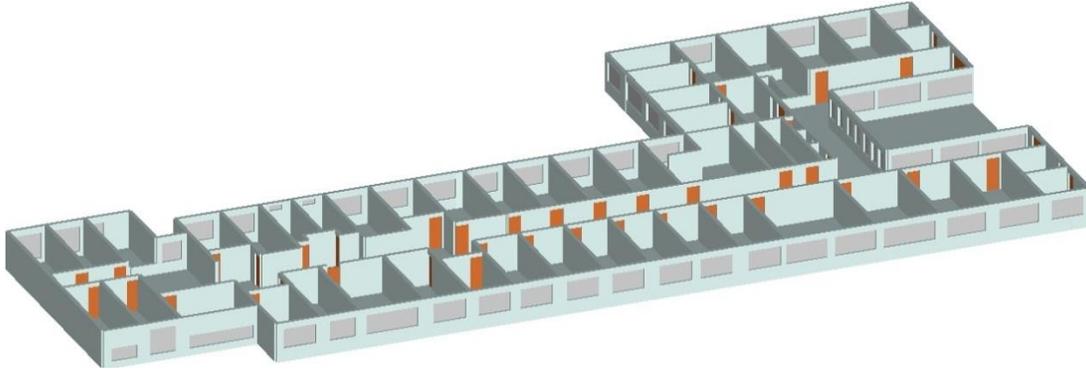


Figura 3.11 Escenario 3D en interiores

Una vez diseñado el escenario, se definió un punto transmisor con las mismas características de la simulación para exteriores y una ruta de receptores a lo largo del pasillo. Con el fin de observar los efectos de multitrayectoria que se presentan a cortas distancias, es necesario ubicar por lo menos 5 receptores por cada longitud de onda (λ). Teniendo en cuenta la velocidad de la luz (c) y la frecuencia de operación (f) del sistema, mediante la ecuación 3.4 se obtiene el valor de longitud de onda (λ).

$$\lambda (m) = \frac{c [m/s]}{f [Hz]} \quad (3.4)$$

Para:

$$\begin{aligned} c &= 3 \times 10^8 \\ f &= 908 \times 10^6 \end{aligned}$$

Reemplazando en la ecuación 3.4 se obtiene que la longitud de onda (λ) tiene un valor de 0.33 m.

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 m/s}{908 \times 10^6 Hz} = 0.33 m$$

Según el valor de longitud de onda (λ).obtenido, se definió una ruta de 858 receptores con una separación de 0.07 m entre ellos, ubicados a lo largo de 60 m del pasillo y a una distancia de 3.5 m del transmisor. En la Figura 3.12 se observa la distribución del transmisor y la ruta de receptores sobre el pasillo.

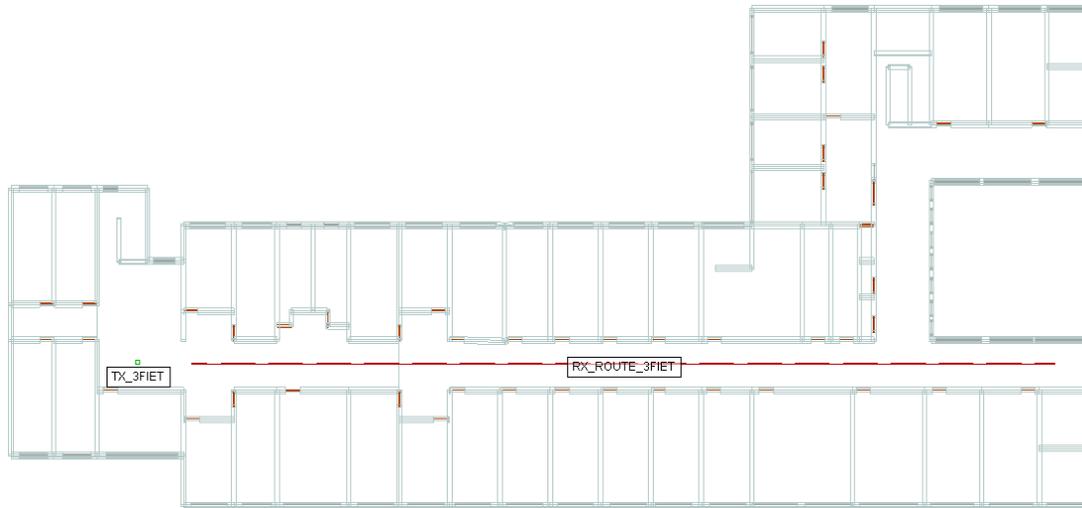


Figura 3.12 Escenario en interiores

Según la descripción de los modelos de propagación disponibles en *Wireless InSite*®, el modelo basado en trazado de rayos FULL 3D es el más usado para el análisis de todo tipo de escenarios. Sin embargo, *Wireless InSite*® cuenta con un modelo denominado *Wall Count* que permite analizar en interiores el efecto de los rayos que atraviesan las paredes, dándoles un valor de 3 dB de pérdida por cada obstáculo que atraviesan. Debido al tipo de licencia con la que cuenta la Universidad del Cauca, este último modelo de propagación no se encuentra disponible, razón por la cual el análisis del escenario en interiores, se realizará haciendo uso del modelo FULL 3D y sus dos métodos, disparo y rebote de rayos (SBR) y *Eigenray* [24] [23].

En la Tabla 3.3 se encuentran detallados los parámetros configurados en *Wireless InSite*® en interiores

Tabla 3.3 Parámetros de configuración en interiores

Descripción	Datos
Potencia de transmisión (dBm)	0
Frecuencia de operación (MHz)	908
Ancho de banda del canal (MHz)	2
Altura de antenas Tx- Rx (m)	0.5
Espaciamiento entre Rx (m)	0.5
Tipo de antena de Tx	Dipolo $\lambda/2$
Tipo de antena de Rx	Monopolo $\lambda/4$
Polarización antena de Tx	Vertical

Descripción	Datos
Ganancia de antena de Tx (dBi)	2
Polarización antena de Rx	NA
Ganancia de antena de Rx (dBi)	2
Método de Predicción	FULL3D-SBR FULL3D-EIGENRAY

3.1.2.1 FULL 3D – SBR en Interiores.

Para el análisis en interiores, se definió el área de estudio de manera automática y se puede observar delimitada en color amarillo en la Figura 3.13.

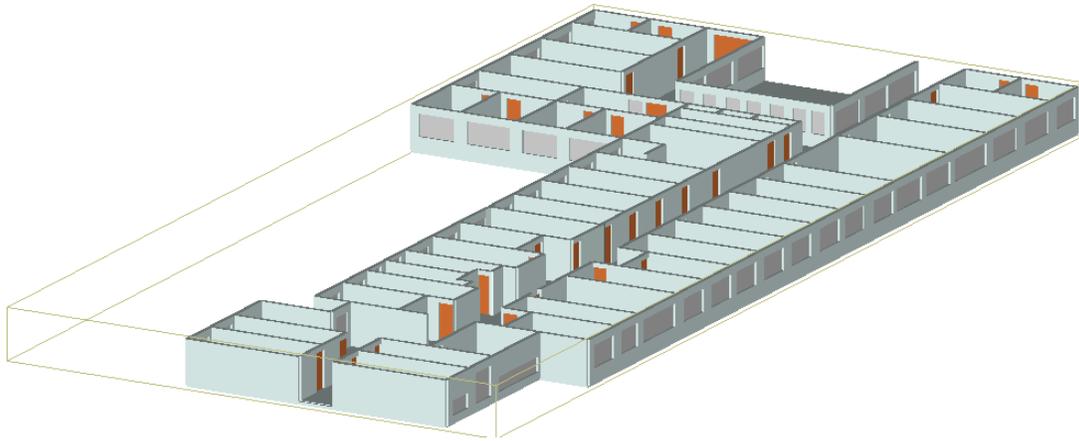


Figura 3.13 Área de estudio – Interiores

A. Potencia recibida en interiores con FULL 3D – SBR

En la Figura 3.14 se observan los niveles de potencia recibidos a lo largo del pasillo. Debido al elevado número de obstáculos y el confinamiento de la señal, se presenta desvanecimiento profundo. Se puede evidenciar, que entre los 19 m y 26 m la intensidad de potencia recibida es menor que al final de la ruta, a causa de la interferencia destructiva ocasionada por la presencia de multitrayectoria. Según los resultados obtenidos, se puede resaltar que la potencia recibida en interiores es mayor que la recibida en exteriores.

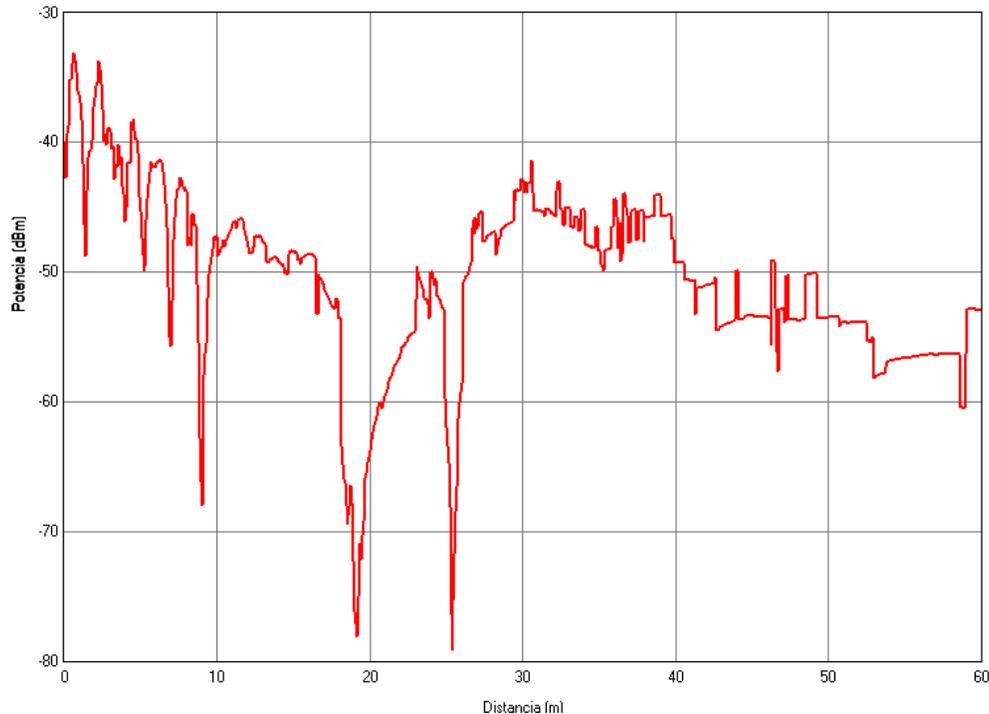


Figura 3.14 Potencia recibida vs Distancia en interiores con FULL 3D – SBR

B. Pérdidas de Propagación en interiores con FULL 3D – SBR

Los diferentes rayos generados por el transmisor, son afectados por los obstáculos presentes en el medio, ocasionando multitrayectoria y la variación de las pérdidas de propagación. Aproximadamente entre los 19 m y 26 m se encuentra el valor de pérdidas de propagación más elevado, equivalente a 86.2 dB, correspondiendo con el nivel de potencia más bajo presentado en la Figura 3.14.

C. Trayectos de Propagación con FULL 3D – SBR en interiores

Los trayectos de propagación que se observan en la Figura 3.15, muestran los rayos reflejados en interiores. En comparación con los resultados obtenidos en exteriores, la presencia de paredes, puertas y ventanas a lo largo del escenario, genera un número mayor de reflexiones de la señal y de esta forma la aparición de multitrayectoria. Los colores de los rayos, representan la diferencia entre los niveles de potencia que llega a cada receptor, los de color naranja poseen mayor intensidad de potencia, los de color verde y azul son los rayos afectados por los efectos de multitrayectoria, por lo tanto recorren mayores distancias y son recibidos con niveles más bajos de potencia.

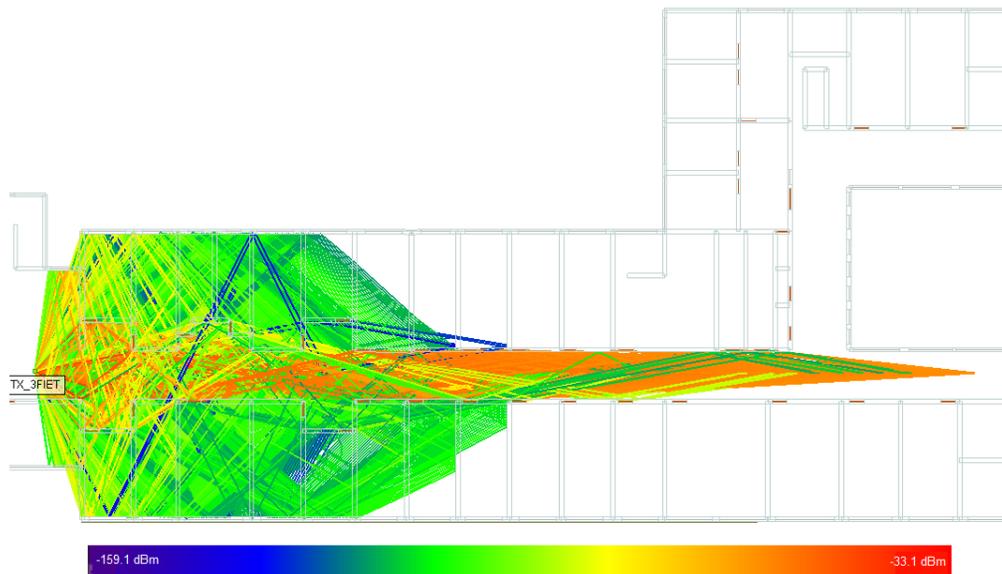


Figura 3.15 Trayectos de propagación con FULL 3D – SBR en interiores

D. Dispersión del Retardo

La dispersión del retardo se define como un conjunto de valores que representa la diferencia de tiempos de llegada de todos los rayos, respecto al primero. En sistemas de comunicación digital y a nivel de la señal banda base, la superposición de las réplicas, ocasiona el traslape de símbolos adyacentes conocido como Interferencia Intersimbólica (ISI), la cual provoca pérdida total o parcial de la información y el incremento de la tasa de error de bit (BER) si las señales se encuentran en contrafase [28] [25].

Se eligieron 5 receptores (1, 210, 444, 605 y 858) ubicados a lo largo de la ruta, con el fin de analizar la variación del retardo causada por la multitrayectoria. En la Figura 3.16, se observa la potencia recibida de los rayos obtenidos en cada receptor en función del tiempo de llegada. A cada receptor llega un rayo directo con mayor potencia respecto a las múltiples réplicas recibidas en diferentes instantes de tiempo.

En los primeros metros del escenario, se presenta mayor interacción de la señal con los elementos de la estructura y un mayor número de rayos que contribuyen con la potencia recibida. Para los receptores ubicados de la mitad en adelante, los rayos se encuentran confinados entre las paredes principales del pasillo, como se observa en la Figura 3.16, presentando una dispersión del retardo menor.

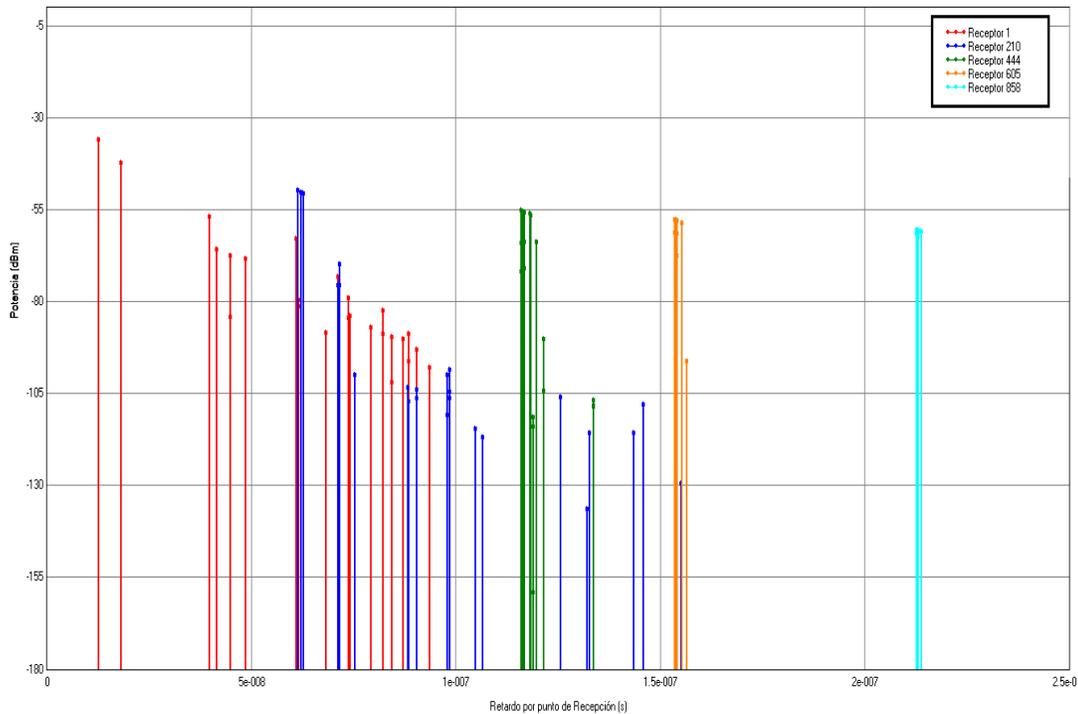


Figura 3.16 Potencia vs Retardo por receptor

La dispersión del retardo es uno de los mejores indicadores de desempeño en interiores, debido a que tiene en cuenta los niveles de potencia recibida y el tiempo de llegada de los rayos. Los valores típicos para sistemas de comunicaciones en interiores se encuentran en el orden de los nanosegundos [29].

En la Figura 3.17 se observa que la dispersión del retardo a lo largo del pasillo varía entre 0.5 ns y 6 ns. A medida que aumenta la distancia, el exceso de retardo conocido como la diferencia de tiempo de llegada de un rayo respecto al primero, empieza a disminuir, debido a la menor cantidad de rayos que llegan a cada receptor por la atenuación generada en las paredes del escenario.

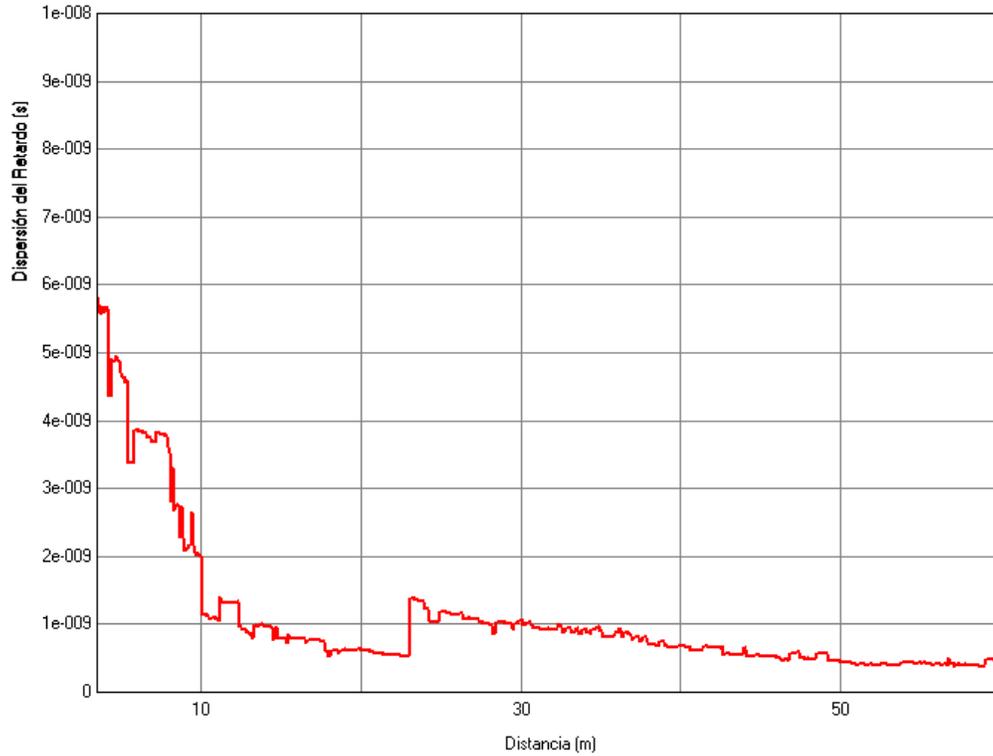


Figura 3.17 Dispersión del retardo vs Distancia

La dispersión del retardo produce distorsión sobre la señal recibida en el dominio del tiempo y desvanecimiento selectivo en frecuencia para sistemas de banda ancha. El tipo de desvanecimiento selectivo en frecuencia se define por medio del ancho de banda de coherencia (B_c) y se calcula a partir del mayor valor de dispersión del retardo como se indica en la ecuación 3.5.

$$B_c [Hz] = \frac{1}{2\pi D[s]} \quad (3.5)$$

Dónde:

D : Corresponde a la mayor dispersión del retardo hasta llegar a un punto de la ruta

De la Figura 3.17, se obtiene que la mayor dispersión del retardo es equivalente a 5.66 nanosegundos. Reemplazando en la ecuación 3.5, se halló que el ancho de banda de coherencia (B_c) es igual a 28.12 MHz y se sabe que el ancho de banda de la señal transmitida (B_w) es 2 MHz, por lo tanto, se cumple que el ancho de banda de coherencia, es mayor al ancho de banda de la señal transmitida ($B_c > B_w$). El canal puede ser considerado constante si el ancho de banda (B_w) de la señal transmitida es menor que el ancho de banda de coherencia (B_c), además, las componentes de la señal presentan un desvanecimiento correlacionado.

Por otra parte, si el ancho de banda de la señal transmitida (B_w) es mayor que el ancho de banda de coherencia (B_c), aparece el desvanecimiento selectivo en frecuencia, lo

que implica que las componentes espectrales de la señal presenten un desvanecimiento no correlacionado.

E. Área de Cobertura en interiores con FULL 3D – SBR

Con el fin de observar la cobertura del transmisor sobre el pasillo del tercer piso de la Facultad de Ingeniería Electrónica, se configuró una grilla de 30924 receptores a lo largo del pasillo principal, con una separación de 0.07 m entre ellos, a una altura de 0.5 m del suelo, cubriendo una longitud de 60 m de largo y 2.5 m de ancho.

El modelo FULL 3D con el método de trazado de rayos SBR fue utilizado para la predicción del área de cobertura, al igual que para el análisis en exteriores.

En la Tabla 3.4 se encuentran descritos los parámetros configurados en *Wireless InSite®* para el análisis de cobertura en interiores.

Tabla 3.4 Parámetros configurados para el análisis de cobertura en interiores

Descripción	Datos
Potencia de transmisión (dBm)	0
Frecuencia de operación (MHz)	908
Ancho de banda del canal (MHz)	2
Altura de antenas Tx- Rx (m)	0.5
Espaciamiento entre Rx (m)	0.07
Tipo de antena de Tx	Dipolo $\lambda/2$
Tipo de antena de Rx	Monopolo $\lambda/4$
Polarización antena de Tx	Vertical
Ganancia de antena de Tx (dBi)	2
Polarización antena de Rx	NA
Ganancia de antena de Rx (dBi)	2
Método de Predicción	FULL3D-SBR

En la Figura 3.18, se observa la potencia recibida en cada receptor. A medida que la distancia aumenta, los niveles de potencia recibida son menores, lo cual se puede evidenciar alrededor de los 60 m. Debido a los efectos de multitrayectoria, se presenta superposición de las réplicas de la señal cuando se encuentran en contrafase, en el peor de los casos se cancelan y ocasionan puntos de color azul oscuro a lo largo de la grilla, los cuales representan niveles bajos de potencia recibida.

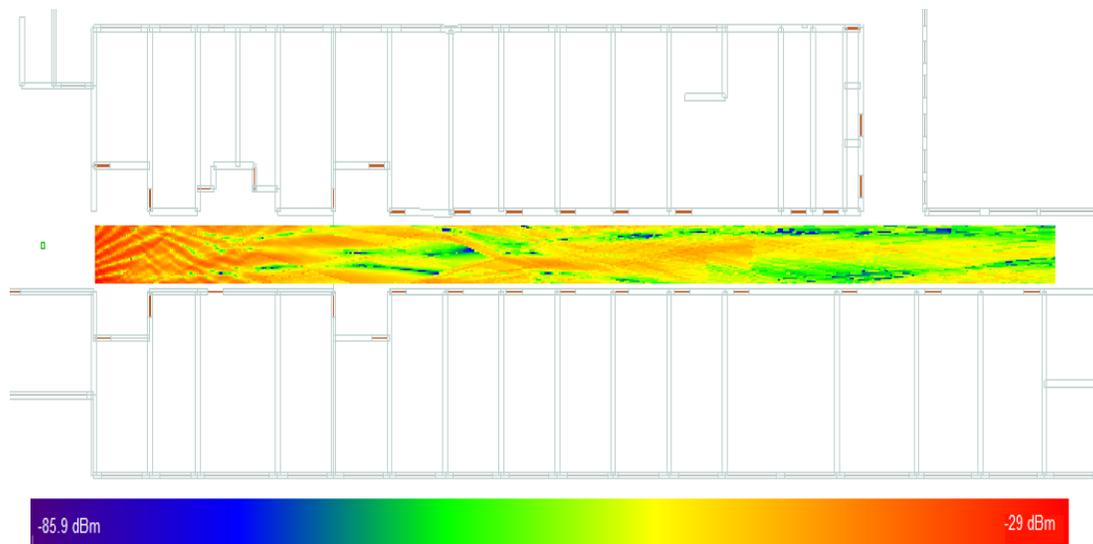


Figura 3.18 Área de cobertura en interiores

3.1.2.2 FULL3D – EIGENRAY.

Para comparar los resultados obtenidos con el método de disparo y rebote de rayos (SBR), se simuló el escenario con las mismas características anteriores usando el método *Eigenray*.

Eigenray limita el número de trayectorias y las construye a partir del principio de *Fermat*, el cual afirma que la trayectoria correcta es la que toma menor tiempo en llegar al receptor sin incluir refracciones.

A. Comparación de la potencia recibida con *SBR* y *Eigenray*

Los niveles de potencia obtenidos con *Eigenray* son menores que los obtenidos con el método de disparo y rebote de rayos (SBR), y las variaciones son menores debido a la limitación del número de trayectorias. En la Figura 3.19 se observa la superposición de los niveles de potencia recibida estimada con ambos métodos. La potencia recibida en cada receptor con el método de disparo y rebote de rayos (SBR) es el aporte de un mayor número réplicas de la señal, razón por la cual siempre es mayor que con *Eigenray*.

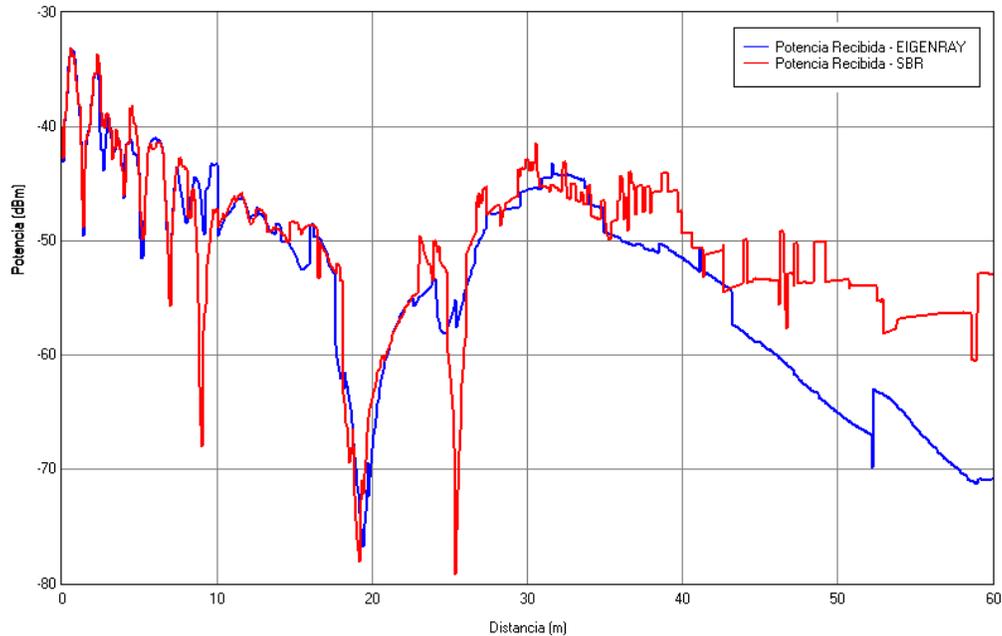


Figura 3.19 Potencia recibida vs Distancia

B. Trayectos de Propagación con *Eigenray*

El número de rayos está limitado, según el principio que sigue el método *Eigenray*. Se obtienen niveles de potencia entre - 33.4 dBm y - 171.5 dBm como se observa en la Figura 3.20, donde la escala de colores representa la variación de la potencia recibida, a lo largo del escenario.

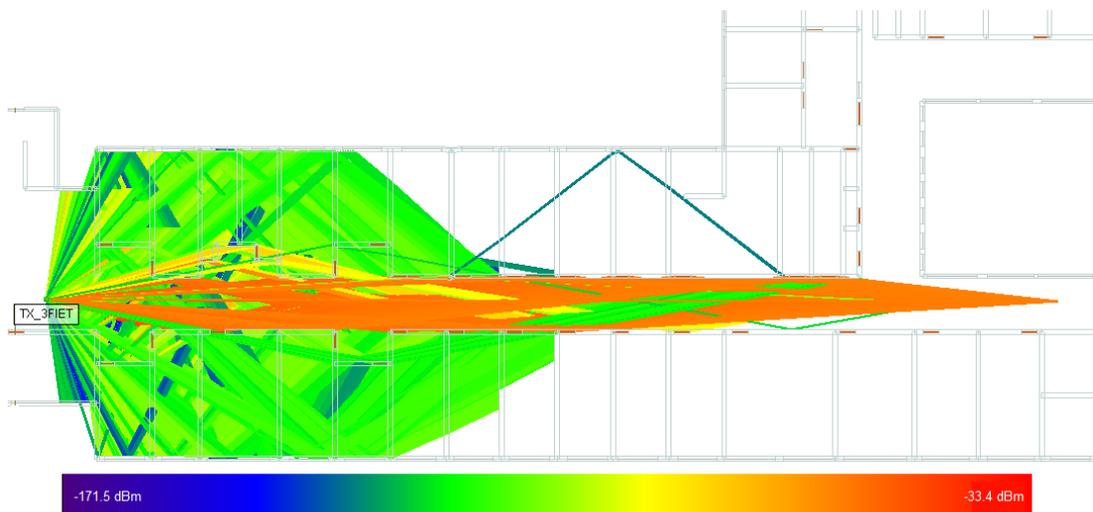


Figura 3.20 Trayectos de propagación

3.2 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN CON LA HERRAMIENTA SIMULINK® DE MATLAB®

Por medio de la herramienta Simulink® de MATLAB®, se diseñó un sistema de comunicación basado en la tecnología ZigBee® a nivel de banda base, con el fin de evaluar y analizar su desempeño en términos de tasa de error de bit (BER), respuesta en frecuencia y el comportamiento de la señal a través del sistema.

El sistema utiliza la técnica de espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS) y modulación por desplazamiento de fase en cuadratura con desplazamiento temporal (O-QPSK), con una velocidad de transmisión de datos de 250 Kbps (Ver los detalles de la simulación del sistema en el Anexo B).

3.2.1 Diagramas de Constelación

Los diagramas de constelación permiten observar en un plano complejo, los símbolos en términos de amplitud y fase para la señal modulada empleando O-QPSK [30].

En la Figura 3.21 se observa una constelación ideal, a la salida del transmisor, ya que la señal no ha sido afectada por el Ruido Blanco Aditivo Gaussiano (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*) presente en el canal.

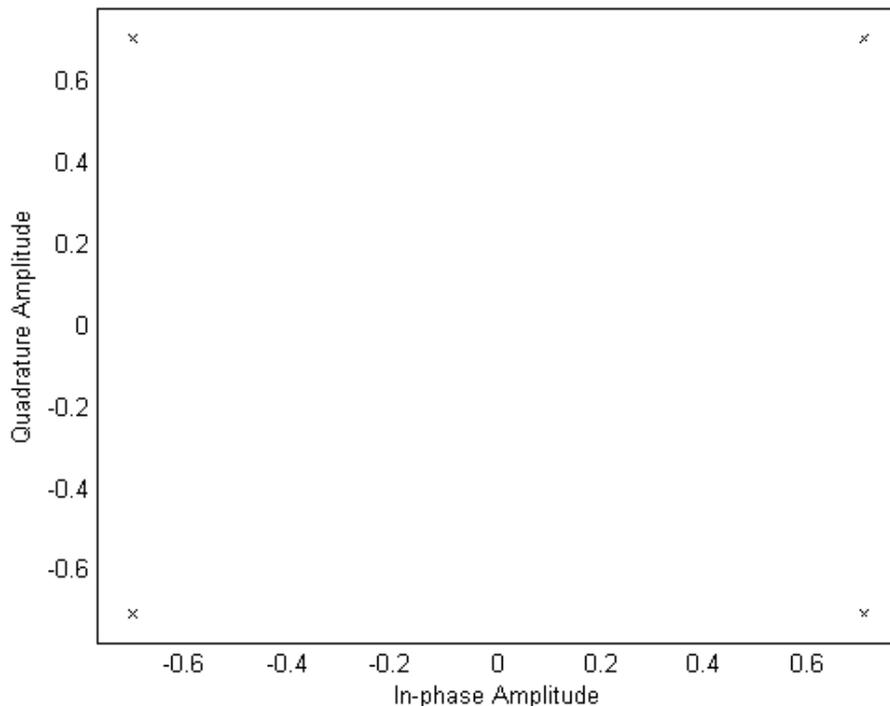


Figura 3.21 Constelación O-QPSK

Las variaciones en el diagrama de constelación, están en función de las condiciones del canal y la relación energía de bit a densidad espectral de potencia de ruido (E_b/N_0). En recepción, el demodulador analiza el símbolo recibido y determina a qué símbolo del diagrama de constelación ideal corresponde.

En la Figura 3.22 se observa el diagrama de constelación para un valor de E_b/N_0 igual a 5 dB. La mayoría de símbolos recibidos se encuentran dispersos y superan el umbral de decisión, generando un número elevado de errores.

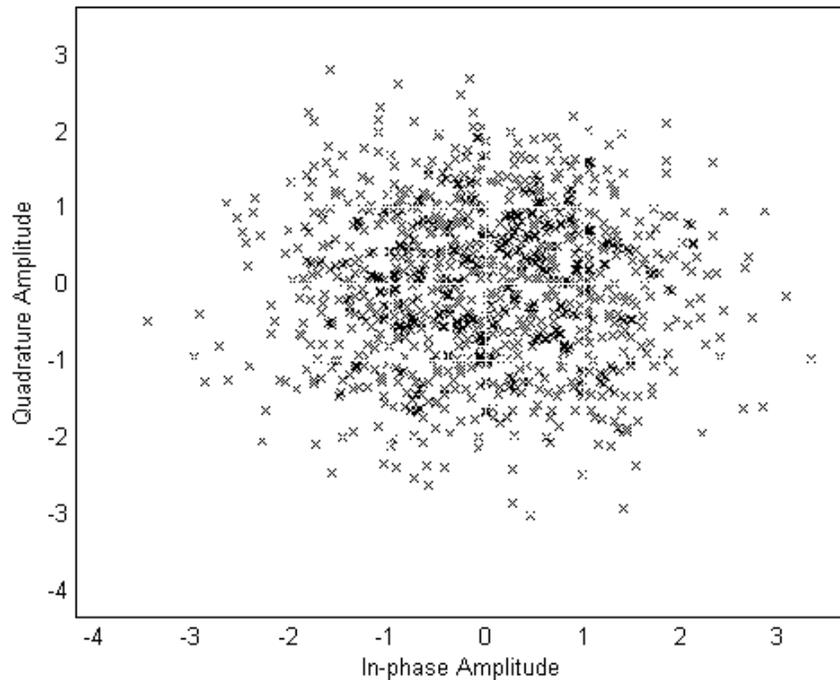


Figura 3.22 Constelación O-QPSK para $E_b/N_0=5\text{dB}$

3.2.2 Respuesta en Frecuencia

Con el fin de analizar el efecto de la técnica de espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS), se obtuvo el espectro en frecuencia de la señal a la salida del generador de información y después de la etapa de ensanchamiento.

En la simulación se empleó un factor de ensanchamiento (SF) igual a 4, de acuerdo a la especificación del estándar IEEE 802.15.4. El sistema cuenta con una velocidad de transmisión de datos de 250 Kbps y cada grupo de 4 bits transmitidos, son convertidos en una secuencia de 16 chips [7].

En la Figura 3.23 se observa el espectro en frecuencia de la señal de información. El primer mínimo aparece aproximadamente a los 250 KHz ya que se está transmitiendo con una velocidad de transmisión de datos de 250 Kbps.

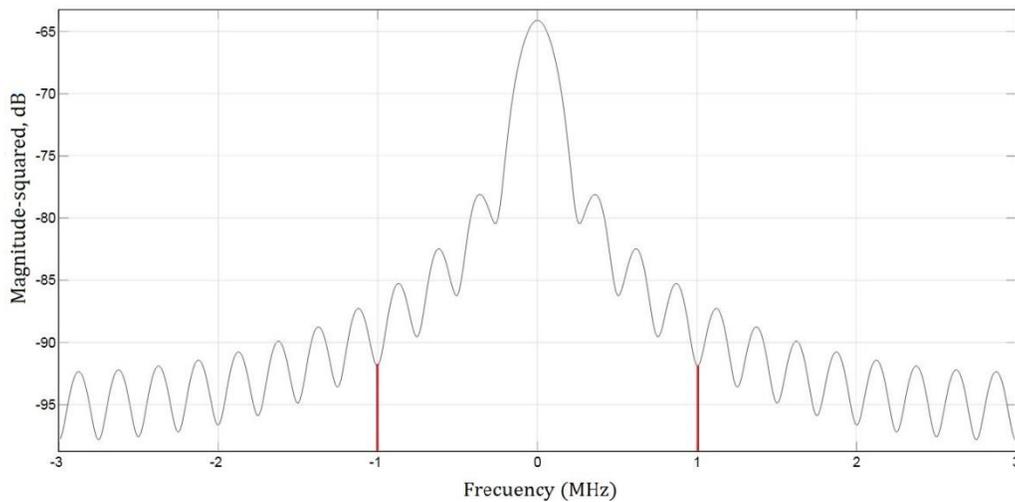


Figura 3.23 Espectro en frecuencia de la señal de información

La velocidad de chip es de 1Mbps, por lo tanto el primer mínimo de la señal ensanchada se encuentra en 1 MHz, como se observa en la Figura 3.24. Es posible verificar el factor de ensanchamiento (SF), comparando el número de mínimos de la señal de información con el primer mínimo de la señal ensanchada, debido a que deben existir 4 por cada mínimo de la señal ensanchada.

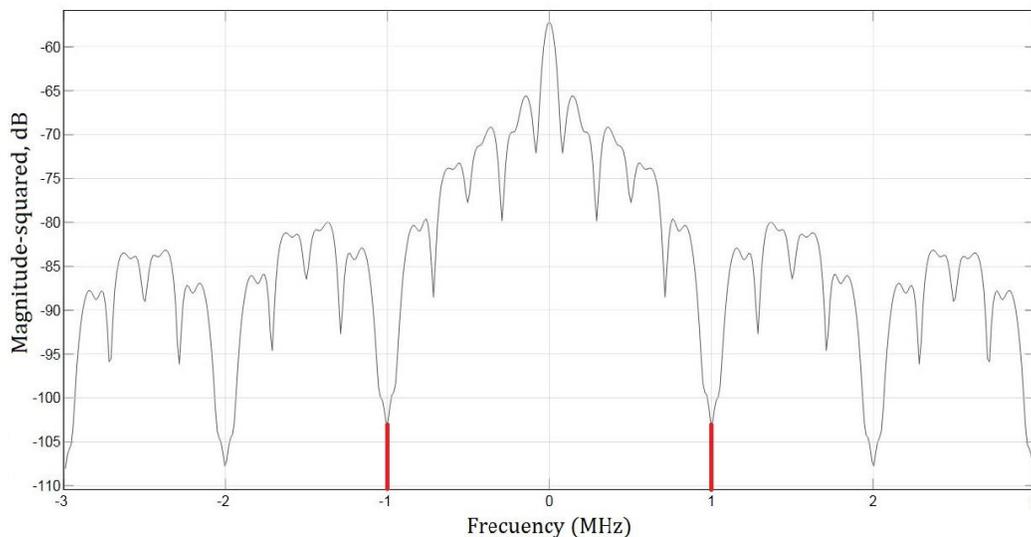


Figura 3.24 Espectro en frecuencia de la señal ensanchada

3.2.3 Respuesta en el Tiempo

En la Figura 3.25 se observa el comportamiento de la señal en las diferentes etapas del sistema. Inicialmente se observa la señal de información original como un tren de pulsos de diferente duración, la cual al pasar por el proceso de ensanchamiento se

convierte en una señal de alta velocidad, representada con pulsos de menor duración. Finalmente en recepción, se obtiene la misma señal transmitida pero desplazada en el tiempo.

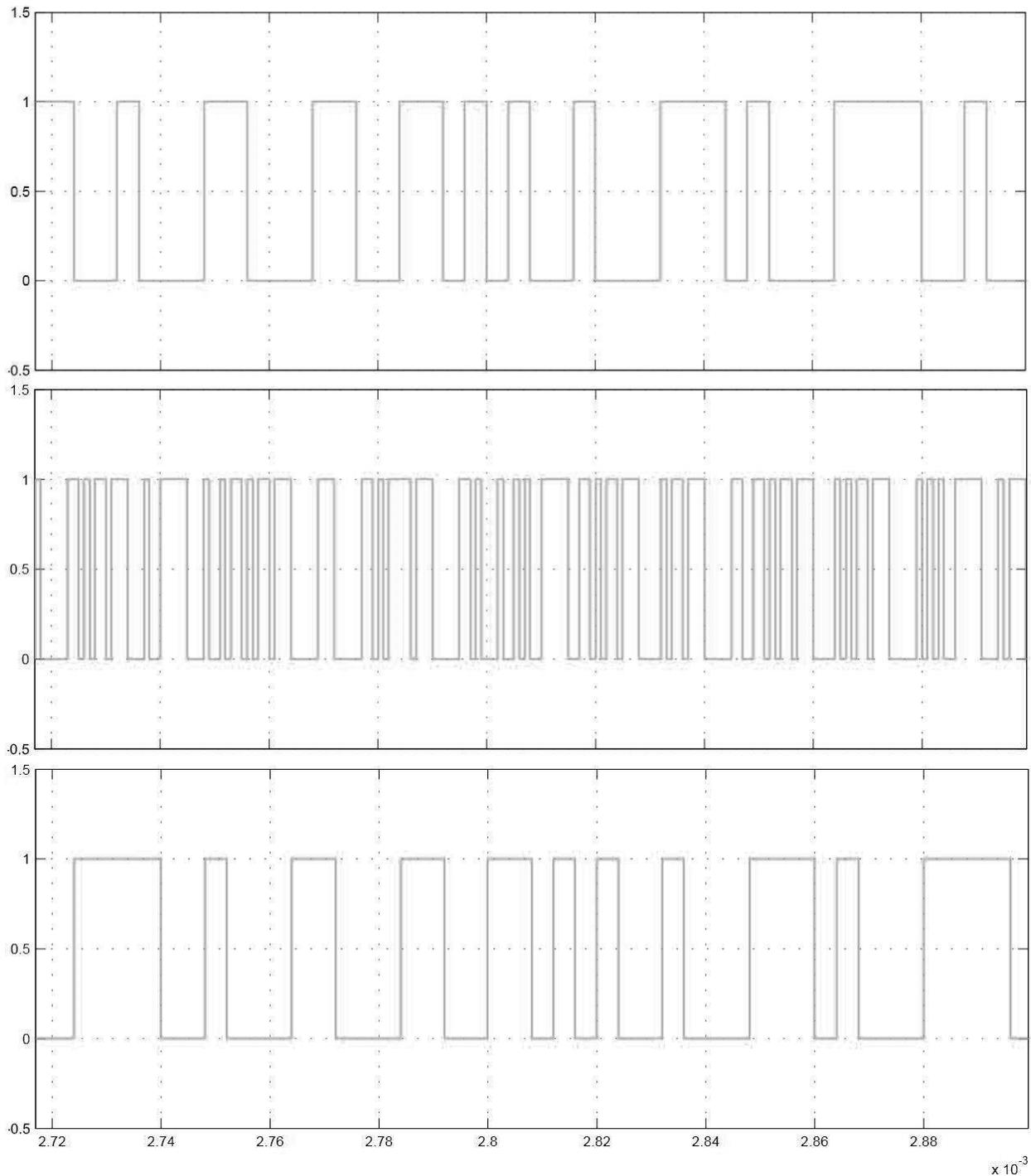


Figura 3.25 Formas de la señal en las diferentes etapas del sistema

3.2.4 Tasa de Error de Bit con la Herramienta BERTool

BERTool es una herramienta para la evaluación de desempeño de sistemas de comunicación en términos de la tasa de error de bit (BER), basado en expresiones teóricas o la evaluación de modelos creados en *Simulink* [31].

Para analizar el comportamiento del sistema de comunicación implementado, bajo diferentes condiciones de canal, se varió E_b/N_0 de 0 dB a 20 dB en pasos de 1 dB, obteniendo como resultado la curva azul mostrada en la Figura 3.26. En comparación con la curva teórica de color verde, se tienen valores de BER superiores para el mismo valor de E_b/N_0 , esto se debe a que el modelo del sistema diseñado presenta un comportamiento más cercano a la realidad.

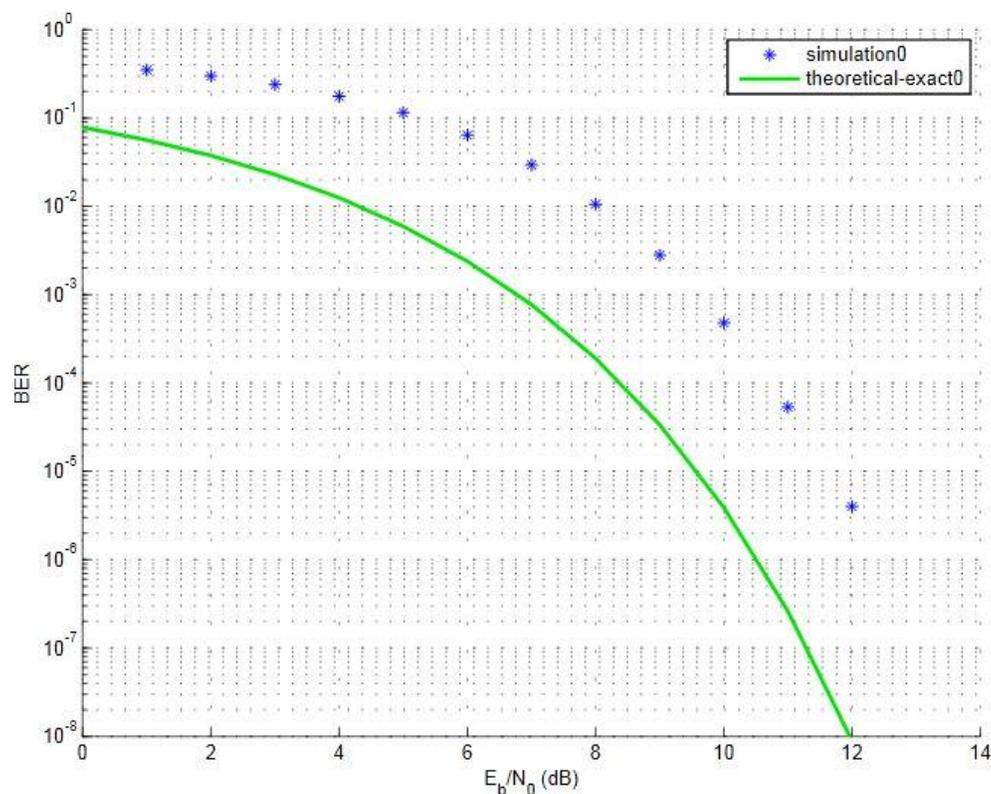


Figura 3.26 E_b/N_0 vs BER con BERTool

3.3 ANÁLISIS PRÁCTICO DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN

Para el análisis del desempeño de la Tecnología ZigBee® en la banda de 900 MHz, se implementó un sistema de comunicación punto a punto con el kit de desarrollo ModFLEX™ de *LS Research*®, que cuenta con el módulo SiFLEX02. De las dos tarjetas de evaluación con las que cuenta el kit, una fue configurada como transmisor y otra como receptor, con el fin de controlarlas, monitorearlas y hacer el

intercambio de información por medio de la herramienta software *ModFLEX Test Tool* instalada en dos computadores diferentes. En la Figura 3.27 se observa un esquema del sistema implementado.

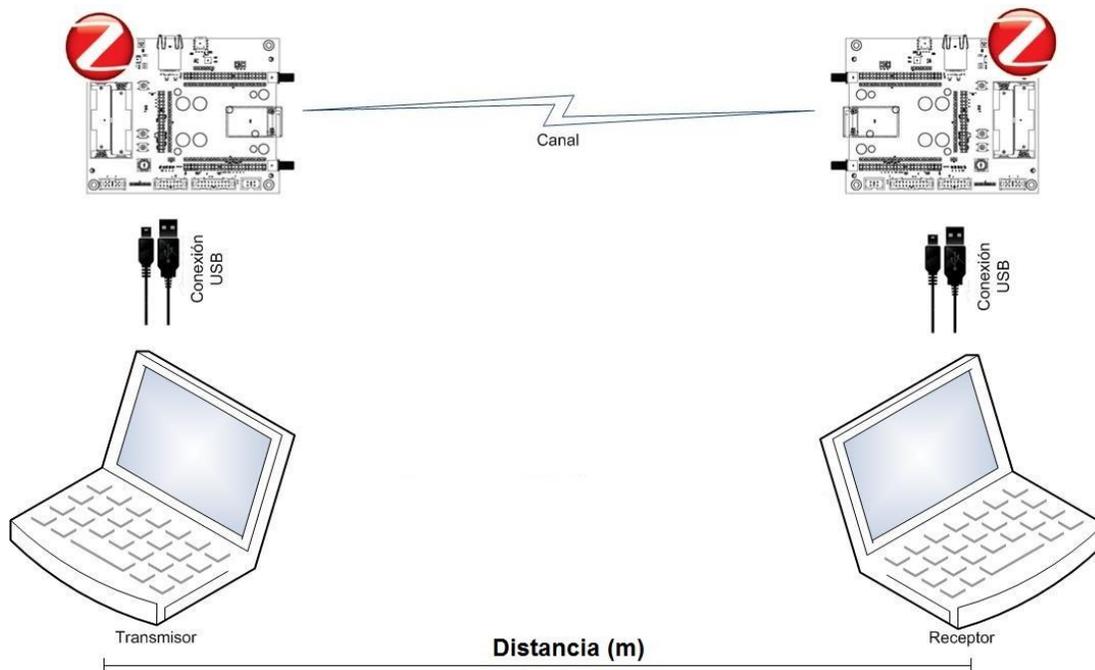


Figura 3.27 Configuración del sistema de comunicación

3.3.1 Plan de Pruebas

En la realización de las pruebas del sistema de comunicaciones, tanto en exteriores como en interiores, el transmisor permaneció fijo mientras el receptor se desplazó linealmente a lo largo del escenario. La cantidad de paquetes enviados en cada transmisión, se definió de acuerdo a los resultados obtenidos en múltiples pruebas realizadas previamente, con el fin de determinar un número estadísticamente aceptable y que ofreciera un tiempo de ejecución mínimo. Inicialmente se realizaron transmisiones de 100, 250, 500, 1000, 1500, 2000, 3000 y 5000 paquetes, para observar la relación de los resultados obtenidos en cada caso. A través de la comparación de las medidas de éxito y error para cada ejecución, se determinó que los resultados eran muy aproximados entre sí, por lo tanto, se fija un número de 1000 paquetes a transmitir.

Por medio de la herramienta software *ModFLEX Test Tool*, se eligió el esquema de modulación entre BPSK y O-QPSK para cada prueba, los cuales brindan velocidades de transmisión de datos de 40 Kbps y 250 Kbps respectivamente.

Debido a la necesidad de limitar el rango de operación del sistema, se atenuó en 30 dB la potencia de transmisión y se configuró en uno de los 22 niveles que se observa en la Tabla 3.5, de acuerdo a las características de cada escenario.

Tabla 3.5 Niveles de potencia del kit de desarrollo ModFLEX™

Niveles de potencia	Potencia de Transmisión con BPSK (dBm)	Potencia de Transmisión con OQPSK (dBm)
0	-8	-9
1	-6	-7
2	-4	-5
3	-1.5	-3
4	1	0
5	4.5	2.5
6	7	5
7	9	8
8	12	10.5
9	14	13
10	15.6	15
11	16.2	16
12	17.6	17.5
13	18.6	18.5
14	19.5	19.5
15	20	20
16	20.7	20.7
17	21.8	22
18	23	23.5
19	23.4	24
20	23.8	24.3
21	23.9	24.4

El sistema de comunicaciones punto a punto implementado con el kit de desarrollo ModFLEX™ de *LS Research*, fue probado para determinar y analizar el desempeño de la tecnología ZigBee® en la banda de 900 MHz, en función de la potencia recibida, el indicador de calidad del enlace (LQI), la tasa de error de paquete (PER), la tasa de error de bit (BER) y el ancho de banda (BW), sobre tres escenarios descritos a continuación:

- Exterior: con el fin de analizar el desempeño de la tecnología en un escenario libre de obstáculos y determinar el efecto de las pérdidas de propagación en espacio libre, se eligió la cancha de fútbol del centro deportivo universitario (CDU). En este escenario de prueba, se ubicó el transmisor en un extremo de la cancha, el receptor se situó inicialmente a 7 m de distancia y se fue desplazando linealmente cada 5 m. Para la prueba basada en BPSK, se configuró un nivel de potencia igual a 9 (- 16 dBm), mientras en O-QPSK se definió un nivel de potencia igual a 21 (- 6.1 dBm).
- Interior: con el propósito de evaluar los efectos generados por la multitrayectoria en espacios cerrados, se eligió el pasillo del tercer piso de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca. En este escenario, se ubicó el transmisor en un extremo del pasillo y el receptor se desplazó de manera lineal cada 0.5 m, con un nivel de potencia de 6 (- 23 dBm) tanto para BPSK como para O-QPSK.

- **Interferencia:** con el objetivo de observar el desempeño de la tecnología bajo condiciones de interferencia, se usó un inhibidor de señales de radiofrecuencia (RF) conocido como jammer con una potencia de transmisión de 30 dBm [32] [33]. El transmisor y el receptor se ubicaron a una distancia fija de 5 m y el *jammer* fue desplazado en pasos de 30 cm en una distancia de 0 a 5 m con la intención de aumentar la potencia de interferencia y así analizar los efectos de la misma sobre el sistema de comunicación. Se estableció una potencia de transmisión en el kit igual a 7 dBm y BPSK como el esquema de modulación elegido para realizar la prueba.
- **Consumo de corriente:** una de las características más importantes de ZigBee® es el bajo consumo de energía, lo cual garantiza una prolongada duración de las baterías. Usando un amperímetro se comprobó el consumo de corriente del kit de desarrollo ModFLEX™, cambiando la configuración para los diferentes modos de operación.

El rango de operación del sistema, no solo se limitó con el uso de atenuadores, fue necesario configurar potencias de transmisión diferentes para cada escenario, como se observa en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Potencia de transmisión en los escenarios de prueba

	Potencia de Transmisión (dBm)			
	Exteriores	Interiores	Interferencia	Consumo de Corriente
BPSK	-16	-23	7	-6.1
O-QPSK	-6.1	-23	-	-5.6

3.3.2 Ejecución del Plan de Pruebas

3.3.2.1 Indicador de calidad del enlace (LQI).

El kit de desarrollo *ModFLEX SiFLEX02*, brinda información sobre la calidad de cada paquete recibido, basado en el indicador de calidad del enlace (LQI), el cual es representado por un valor entre 0 y 255, por medio de la detección de energía (ED), la estimación de la Relación Señal a Ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*) o una combinación de ambos métodos [7].

De acuerdo al estándar IEEE 802.15.4, los valores bajos del indicador de calidad del enlace (LQI), son asociados a un bajo nivel de potencia recibida o altas distorsiones en la señal, causadas principalmente por interferencia o fenómenos de multitrayectoria [7].

A. Indicador de calidad del enlace (LQI) en exteriores

En la Figura 3.28 se observa que la calidad del enlace disminuye a medida que la distancia aumenta. Según el fabricante, un valor menor a 30 representa un enlace de baja calidad, tal como se aprecia en distancias mayores a 60 m empleando BPSK y 40

m con O-QPSK. Es posible determinar que el esquema de modulación BPSK brinda una mejor calidad del enlace frente al ruido y a efectos indeseables en el canal.

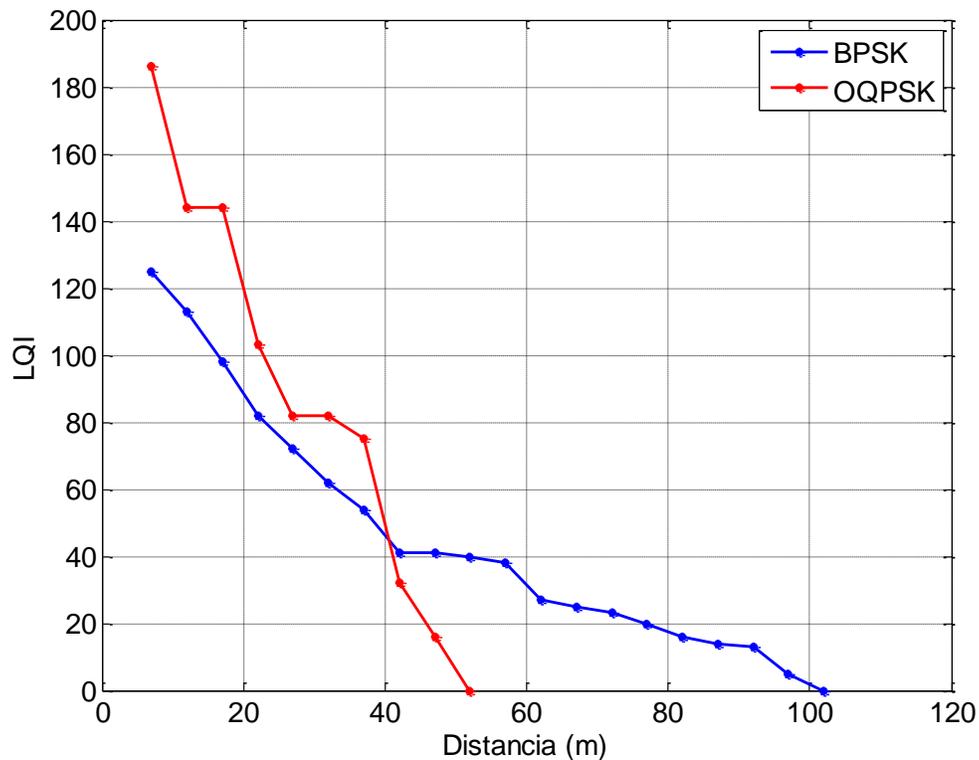


Figura 3.28 LQI vs Distancia en exteriores

B. Indicador de calidad del enlace (LQI) en interiores

El comportamiento del indicador de calidad del enlace (LQI) en interiores, sigue una tendencia descendente a medida que la distancia aumenta, presentando variaciones debido a los efectos de multitrayectoria. Para los primeros 25 m de distancia, la calidad del enlace es comparable para ambos esquemas de modulación, pero BPSK alcanza aproximadamente el doble de distancia respecto a O-QPSK como se observa en la Figura 3.29. Estos resultados muestran que el esquema de modulación BPSK es más robusto que O-QPSK frente al ruido, por lo tanto para distancias mayores a 20 m presenta valores de indicador de calidad del enlace (LQI) superiores.

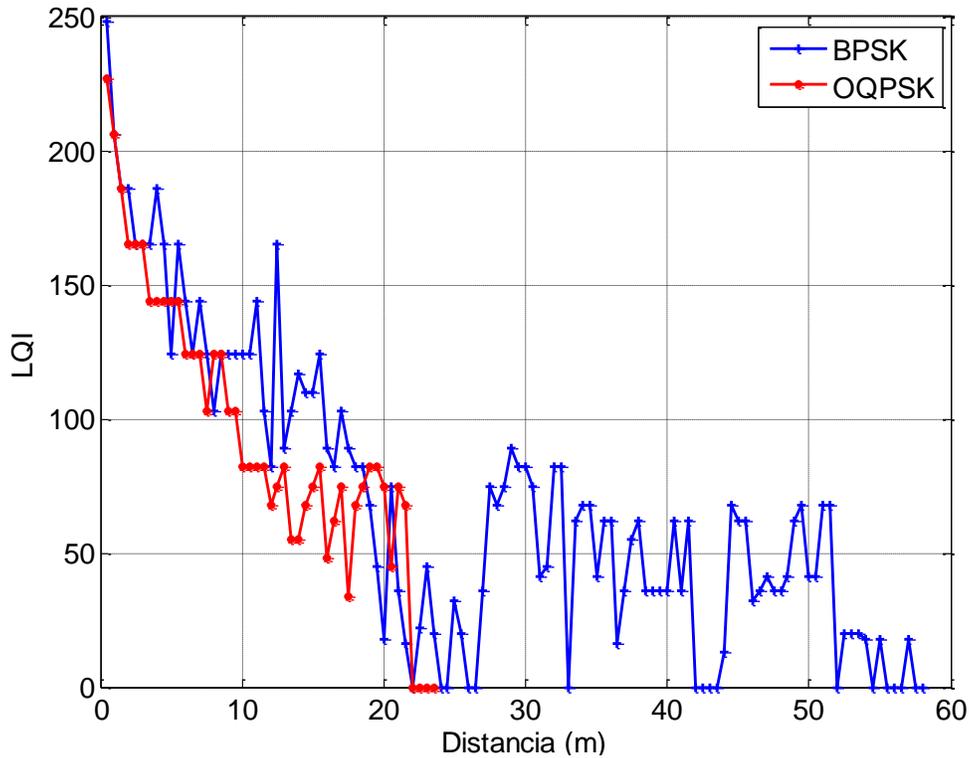


Figura 3.29 LQI vs Distancia en interiores

C. Tasa de error de paquete (PER) en función del indicador de calidad del enlace (LQI).

El indicador de calidad del enlace (LQI), puede ser asociado a la tasa de error de paquete (PER), este parámetro se define como la relación entre el número de paquetes recibidos con errores y el número total de paquetes transmitidos como se indica en la ecuación 3.6. Un valor de la tasa de error de paquete (PER) igual a 0 indica que todos los paquetes fueron recibidos exitosamente, mientras que un valor de 1 significa que ningún paquete fue recibido correctamente [34].

$$PER = \frac{\text{Número de paquetes errados}}{\text{Número de paquetes transmitidos}} \quad (3.6)$$

En la Figura 3.30(a) se observa el comportamiento de la tasa de error de paquete (PER) en función del indicador de calidad del enlace (LQI) según el fabricante, evidenciando que con el aumento del indicador de calidad del enlace (LQI), la tasa de error de paquete (PER) disminuye. Para valores del indicador menores a 30, se obtienen tasas de error de paquete (PER) muy cercanas a 1, lo cual corresponde a la clasificación del fabricante de un enlace de baja calidad. Las pruebas realizadas proporcionaron resultados muy cercanos a los obtenidos por el fabricante, manteniendo una tendencia similar para ambos esquemas de modulación, como se aprecia en la Figura 3.30(b).

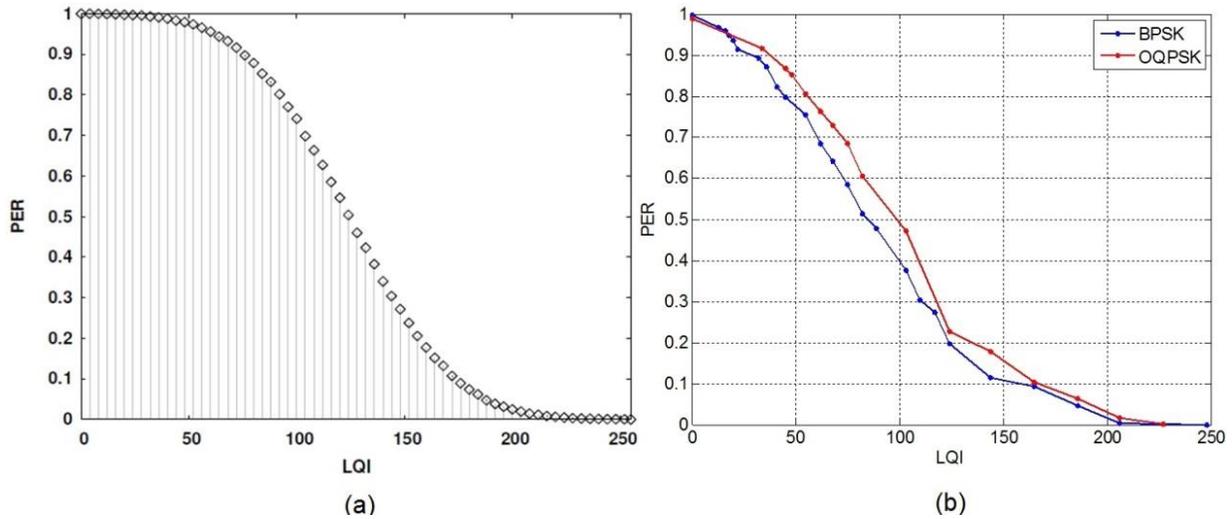


Figura 3.30 PER vs LQI. Adaptada de [19]

3.3.2.2 Potencia recibida.

Debido a las limitaciones del kit de desarrollo para medir la potencia recibida, se estableció un modelo para determinar su relación con el indicador de calidad del enlace (LQI) [30]. Los valores de sensibilidad de - 102 dBm y potencia de saturación del receptor de - 2 dBm, fueron asociados al valor máximo y mínimo del indicador de calidad del enlace (LQI), mientras que su diferencia se distribuyó y asoció linealmente entre los 254 valores restantes, como se observa en la Figura 3.31.

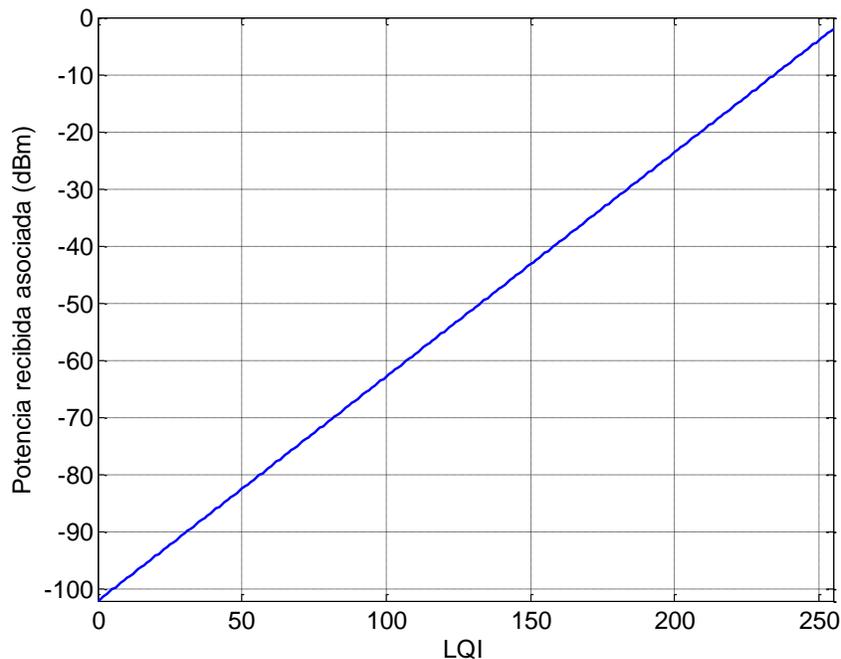


Figura 3.31 Potencia recibida asociada vs LQI

Se obtuvieron valores de indicador de calidad del enlace (LQI) en exteriores e interiores para diferentes valores de distancia y esquemas de modulación. En cada punto se transmitieron 1000 paquetes y se generaron resultados para cada paquete recibido. A través del análisis estadístico de los datos, se tomó el valor obtenido con mayor frecuencia y se asoció a un valor de potencia recibida de acuerdo al modelo establecido.

A diferencia de los resultados esperados y según la definición de indicador de calidad del enlace (LQI), este no depende únicamente de la potencia recibida, por lo tanto, los resultados brindados por la herramienta de simulación *Wireless InSite®* y el modelo de pendiente única, presentan gran diferencia con los basados en el indicador de calidad del enlace (LQI), razón por la cual, el análisis de desempeño del sistema de comunicaciones se realizó con los valores de potencia recibida obtenidos en *Wireless InSite®* para exteriores e interiores.

A. Potencia recibida en exteriores

Debido a la necesidad de realizar las pruebas de manera controlada y limitar el rango del sistema de comunicación en la cancha de fútbol, se emplearon valores de potencia de transmisión diferentes para cada esquema de modulación.

En la Figura 3.32, se observa el comportamiento de la potencia de recepción obtenida con la herramienta de simulación *Wireless InSite®*, en función de la distancia para la prueba realizada en la cancha del centro deportivo universitario (CDU) y, se evidencia que independientemente de la potencia de transmisión, a medida que aumenta la distancia la potencia de recepción disminuye.

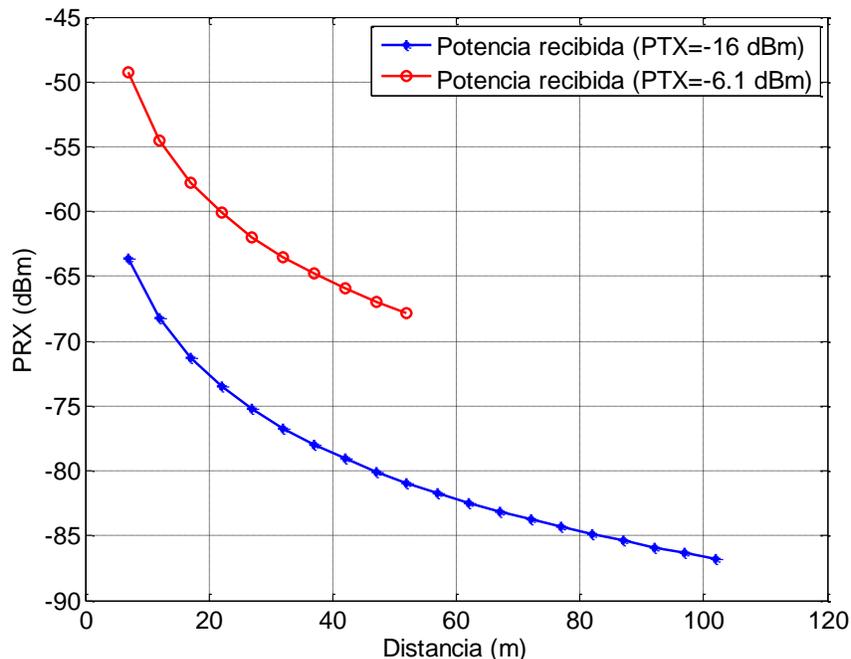


Figura 3.32 Potencia recibida en exteriores

B. Potencia recibida en interiores

Los niveles de potencia recibida para el escenario de interiores crecen y decrecen con la distancia, debido a que la señal se encuentra confinada a lo largo del pasillo, experimentando efectos de interferencia constructiva y destructiva como resultado de la multitrayectoria. En la Figura 3.33 se observa que a los 20 m se presenta el nivel más bajo de potencia equivalente a - 98 dBm, hasta llegar un nivel de - 80 dBm al final del pasillo.

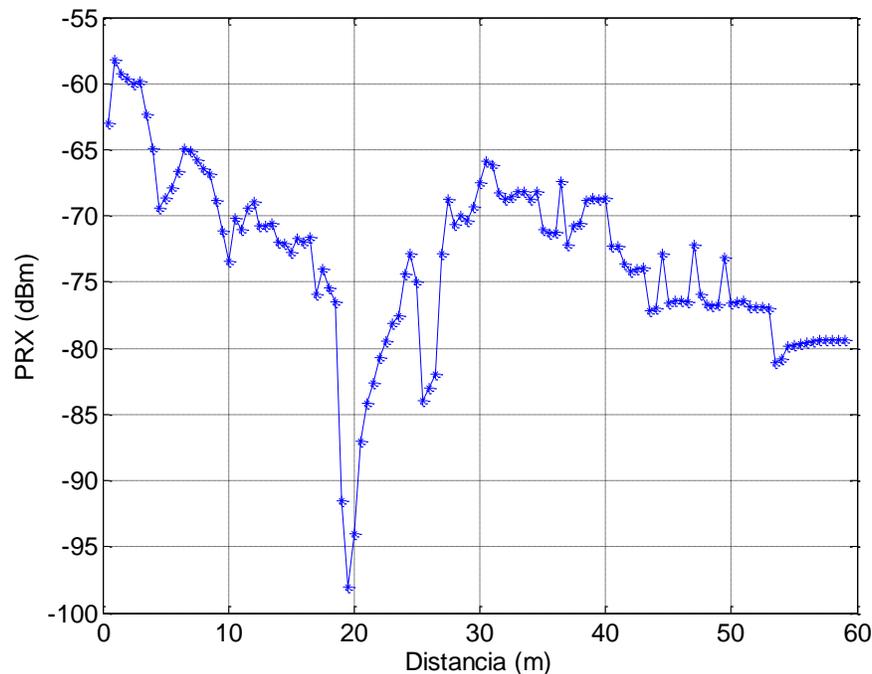


Figura 3.33 Potencia recibida en interiores

3.3.2.3 Tasa de error de bit.

Uno de los parámetros más importantes y usados para analizar el desempeño en un sistema de comunicación, es la tasa de error de bit (BER). Se define como la probabilidad de que un bit transmitido sea recibido con error y se calcula por medio de la ecuación 3.7 [35].

$$BER = \frac{\text{Número de bits errados}}{\text{Número de bits transmitidos}} \quad (3.7)$$

Las señales transmitidas por un sistema de comunicación son afectadas por fenómenos como ruido, dispersión, multitrayectoria y pérdidas básicas de propagación, los cuales afectan su integridad y el desempeño del sistema, así, la tasa de error de bit (BER) es un parámetro que permite evaluar el desempeño del sistema de comunicación.

El estándar IEEE 802.15.4 no soporta medidas de tasa de error de bit (BER), debido a que todo es basado en paquetes, por consiguiente el kit de desarrollo emplea la tasa de error de paquete (PER) como medida de desempeño del sistema.

Un paquete es considerado erróneo si al menos uno de sus bits es incorrecto. Si los errores en los bits son eventos independientemente distribuidos, existe una relación entre la tasa de error de paquete (PER), tasa de error de bit (BER) y el número de bits por paquete, como se indica en la ecuación 3.8 [34].

$$PER = 1 - (1 - BER)^n \quad (3.8)$$

Dónde:

n : Número de bits por paquete.

La ecuación 3.8 expresa que el valor de la tasa de error de paquete (PER) está dada por la probabilidad de que un paquete de n bits sea erróneo.

Por medio de la herramienta software *ModFLEX Test Tool* se obtuvo la tasa de error de paquete (PER) de las pruebas realizadas en cada escenario y fue posible obtener los valores de la tasa de error de bit (BER) a partir de la ecuación 3.8 y expresarla como se muestra en la ecuación 3.9.

$$BER = 1 - 10^{\frac{\log_{10}(1-PER)}{n}} \quad (3.9)$$

Con el fin de realizar el análisis de desempeño del sistema de comunicación, es necesario determinar la relación energía de bit a densidad espectral de potencia de ruido (E_b/N_o) y el comportamiento de la tasa de error de bit (BER) en función de esta.

La relación energía de bit a densidad espectral de potencia de ruido (E_b/N_o) es una medida a la salida del receptor y usada como un parámetro básico para determinar la intensidad de la señal. El cálculo de la energía de bit (E_b) se obtiene dividiendo la potencia de recepción sobre la velocidad de transmisión de datos, como se indica en las ecuaciones 3.10 y 3.11.

$$e_b[mW/Hz] = \frac{prx[mW]}{R[Hz]} \quad (3.10)$$

$$E_b[dBm/Hz] = Prx[dBm] - 10 \log R [Hz] \quad (3.11)$$

Dónde:

E_b : Energía de bit

Prx : Potencia de recepción

R : Velocidad de transmisión de datos.

Para determinar la densidad espectral de potencia de ruido (N_o), inicialmente se calcula la potencia de ruido a la salida del receptor definida por la ecuación 3.12, considerando una ganancia unitaria.

$$P_n(dBm) = P_n'(dBm) + NF (dB) \quad (3.12)$$

Dónde:

P_n : Potencia de ruido a la salida del receptor.

P_n' : Potencia de ruido a la entrada del receptor.

NF : Figura de ruido.

En la Figura 3.34 se observa la relación de potencias de ruido a la entrada y salida del receptor, en función de la figura de ruido (NF).

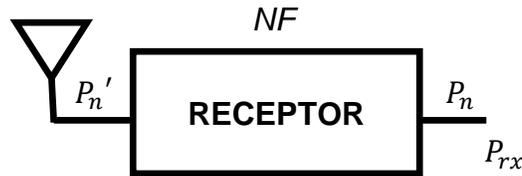


Figura 3.34 Relación de potencia de ruido a la entrada y salida del receptor

El valor de potencia de ruido a la entrada del receptor, se asume como la sensibilidad del equipo suministrada por el fabricante.

La figura de ruido (NF) representa la degradación de la relación señal a ruido (SNR) en el receptor. Según el fabricante el valor de la figura de ruido (NF) es 7 dB . Reemplazando los valores de potencia de ruido a la entrada del receptor y figura de ruido (NF) en la ecuación 3.12, se obtienen los valores de potencia de ruido a la salida del receptor para ambos esquemas de modulación. En la Tabla 3.7 se observan los valores de potencia de ruido a la entrada y salida del receptor para cada esquema de modulación.

La densidad espectral de potencia de ruido (N_o) relaciona la potencia total de ruido y el ancho de banda (BW) de la señal, como se indica en la ecuación 3.13 y 3.14.

$$n_o[mW/Hz] = \frac{p_n[mW]}{BW[Hz]} \quad (3.13)$$

$$N_o = P_n[dBm] - 10 \log BW [Hz] \quad (3.14)$$

Reemplazando los valores de potencia de ruido a la salida del receptor y considerando un ancho de banda de 2 MHz en la ecuación 3.14, se obtienen los valores de densidad espectral de potencia de ruido (N_o), indicados en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Potencias de ruido a la entrada y salida del receptor

	Potencia de Ruido (dBm)		Densidad espectral de potencia de ruido (N_o) (dBm)
	Entrada del receptor (p_n')	Salida del receptor (p_n)	
BPSK	-108	-101	-164
O-QPSK	-101	-96	-159

Finalmente la relación energía de bit a densidad espectral de potencia de ruido (E_b/N_o) se define por medio de las ecuaciones 3.15 y 3.16.

$$\frac{e_b}{n_o} = \frac{prx [mW]}{r[bps]n_o[mW/Hz]} \quad (3.15)$$

$$\frac{E_b}{N_o} [dB] = E_b[dBm/Hz] - N_o[dBm/Hz] \quad (3.16)$$

A. Tasa de error de bit del sistema de comunicación en exteriores

En exteriores, la tasa de error de paquete (PER) aumenta con el incremento de la distancia entre transmisor y receptor, debido a la disminución de la relación energía de bit a densidad espectral de potencia de ruido (E_b/N_o), como se observa en la Figura 3.35 para BPSK y O-QPSK. Se observa que BPSK tiene mejor desempeño frente al ruido, al presentar menor pérdida de paquetes para un mismo valor de E_b/N_o .

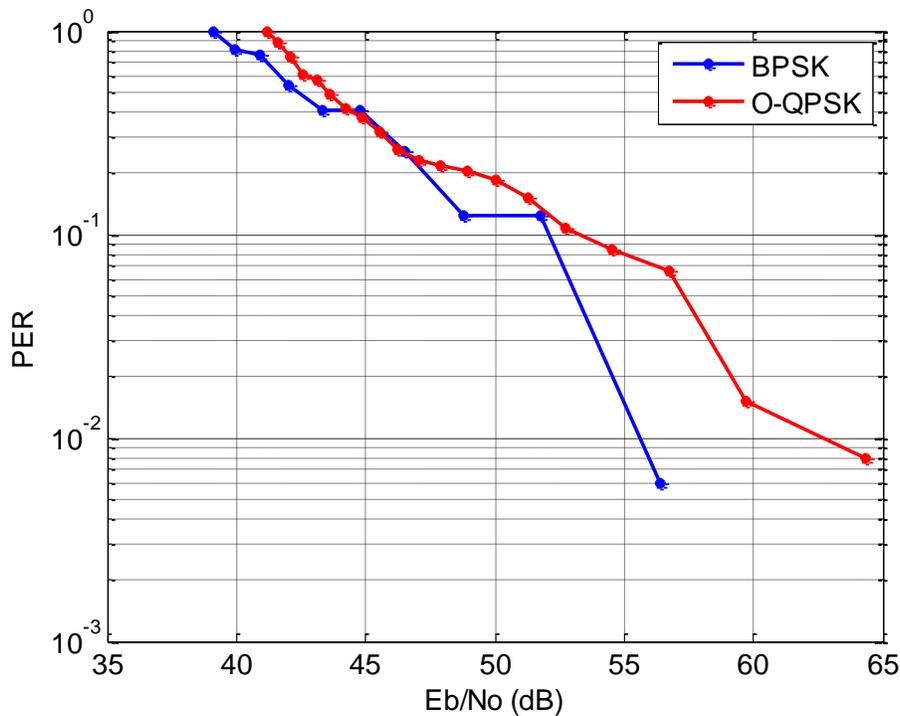


Figura 3.35 PER vs E_b/N_o en exteriores

Al igual que la tasa de error de paquete (PER), la tasa de error de bit (BER) disminuye con el incremento de la relación energía de bit a densidad espectral de potencia de ruido (E_b/N_o) como se observa en la Figura 3.36. Según los resultados obtenidos en [36] la tasa de error de bit (BER) objetivo es alrededor de 10^{-3} . Es posible evidenciar que para obtener una tasa de error de bit (BER) menor a 10^{-3} es necesario tener valores de E_b/N_o mayores a 40 dB para BPSK y 50 dB para O-QPSK.

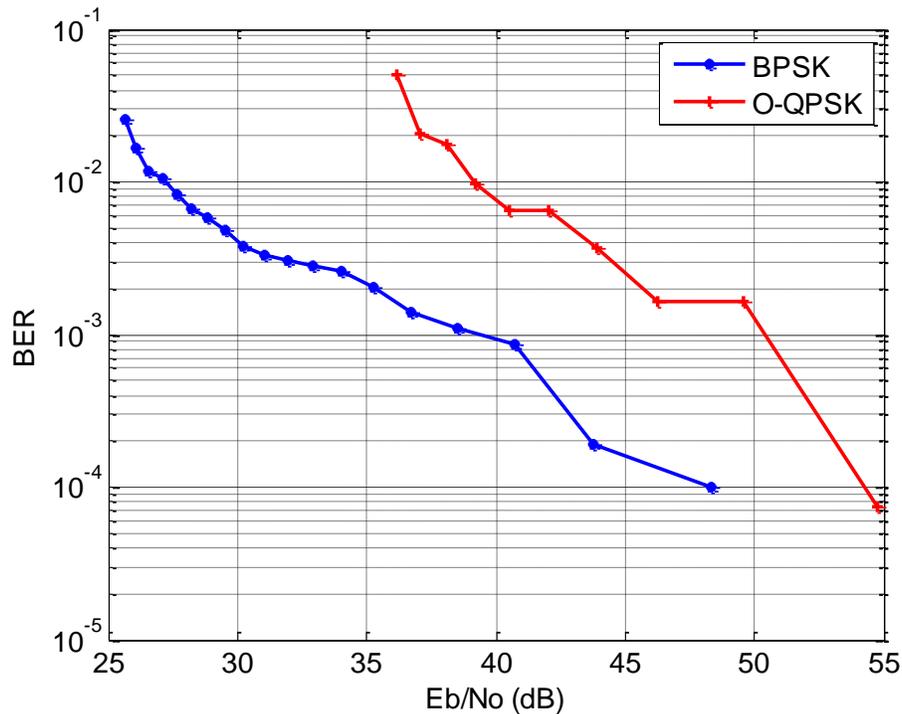


Figura 3.36 BER vs E_b/N_o en exteriores

B. Tasa de error de bit del sistema de comunicación en interiores

En la Figura 3.37 se observa la tasa de error de paquete (PER) en función de la relación energía de bit a densidad espectral de potencia de ruido (E_b/N_o) para interiores. Al igual que en exteriores la probabilidad de paquetes errados en recepción tiende a disminuir para valores mayores de E_b/N_o . Se puede evidenciar que BPSK presenta mejor desempeño frente al ruido que O-QPSK para un mismo valor de E_b/N_o .

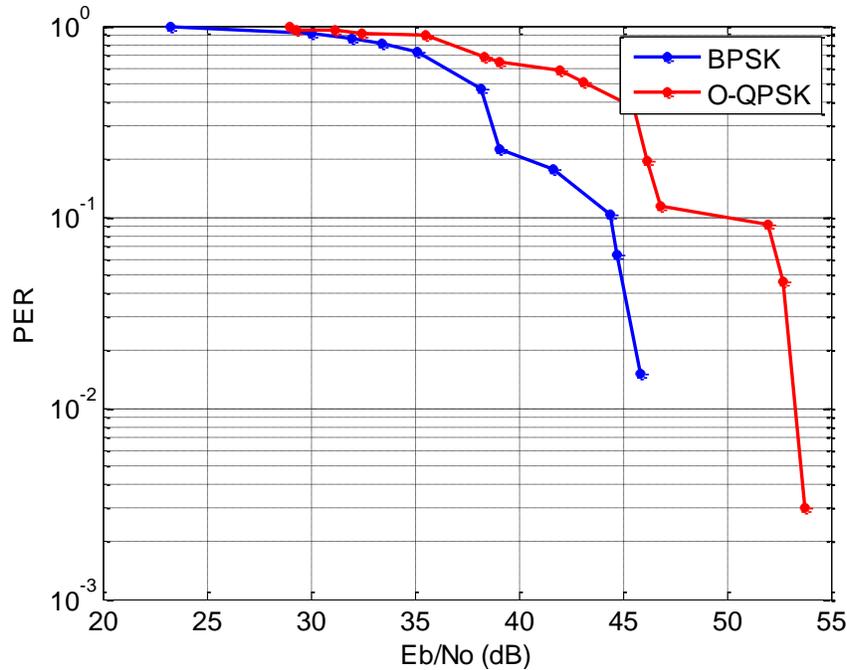


Figura 3.37 PER vs E_b/N_0 en interiores

En interiores la tasa de error de paquete (BER) presenta el mismo comportamiento que en exteriores, siguiendo una tendencia descendente con el aumento de E_b/N_0 como se observa en la Figura 3.38. Para alcanzar una BER de 10^{-3} se necesitan valores de E_b/N_0 mayores a 45 dB para BPSK y 53 dB para O-QPSK.

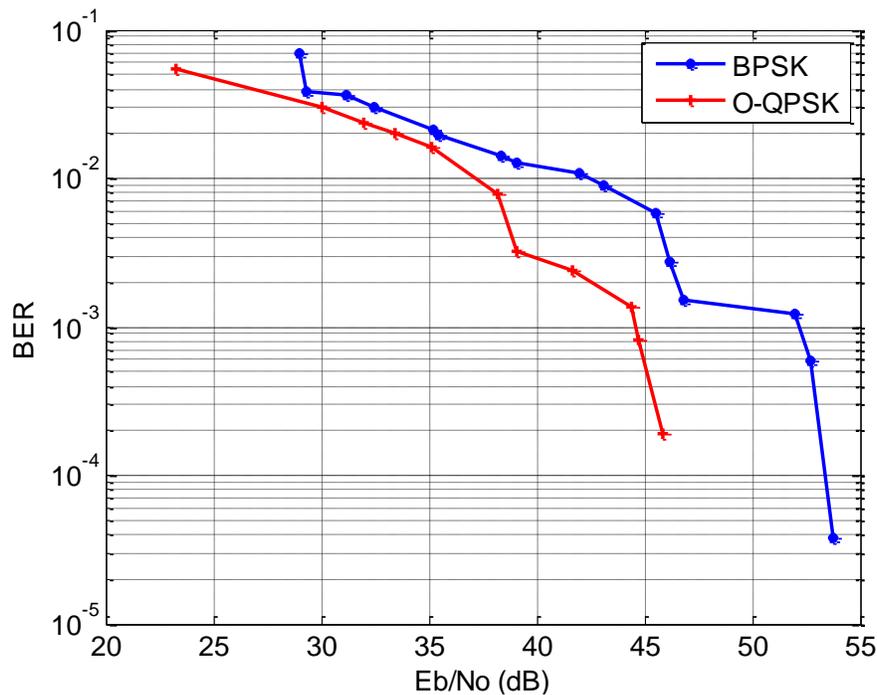


Figura 3.38 BER vs E_b/N_0 en interiores

Según los resultados obtenidos, es posible observar que en exteriores se obtienen tasas de error de bit (BER) menores que en interiores para un mismo valor de E_b/N_0 , debido que exteriores se considera un escenario libre de obstáculos.

3.3.2.4 Ancho de banda del canal.

El analizador de redes vectorial ZLV6 de la empresa *Rohde & Schwarz*¹³, es un instrumento que permite analizar redes, observar espectros y medir la potencia de sistemas que trabajen en un rango de frecuencias de 9 KHz a 6 GHz [37]. Con la ayuda de este equipo, se determinó el ancho de banda (BW) del sistema como se describe en el siguiente apartado.

Con el objetivo de determinar el ancho de banda (BW) del sistema, se configuró el kit para realizar la transmisión en el canal 2 con una frecuencia central equivalente a 908 MHz.

A. Ancho de banda con modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK).

Según las especificaciones definidas en el estándar IEEE 802.15.4 – 2006 para la banda de 900 MHz y las características del kit de desarrollo ModFLEX™, se espera que el ancho de banda sea igual a 2 MHz. En la Figura 3.39, se observa que el marcador M1 está ubicado en un valor de 907.984 MHz correspondiente a la frecuencia central del canal sobre el que se transmitió, mientras la diferencia entre los marcadores M3 y M2 desplazados a la izquierda y a la derecha respectivamente, es igual a 1.693 MHz equivalente al ancho de banda de 20 dB aproximadamente.

La máscara espectral (SM) asegura que el transmisor opere dentro de los límites permitidos, los cuales son especificados en la Tabla 1.3 para la banda de 900 MHz. En la Figura 3.39 se observa que el sistema cumple con las especificaciones de la máscara espectral, ya que aproximadamente en una diferencia de +/- 1.2 MHz respecto a la frecuencia central la señal es 20 dB más débil.

¹³http://www.rohde-schwarz.com/en/home_48230.html

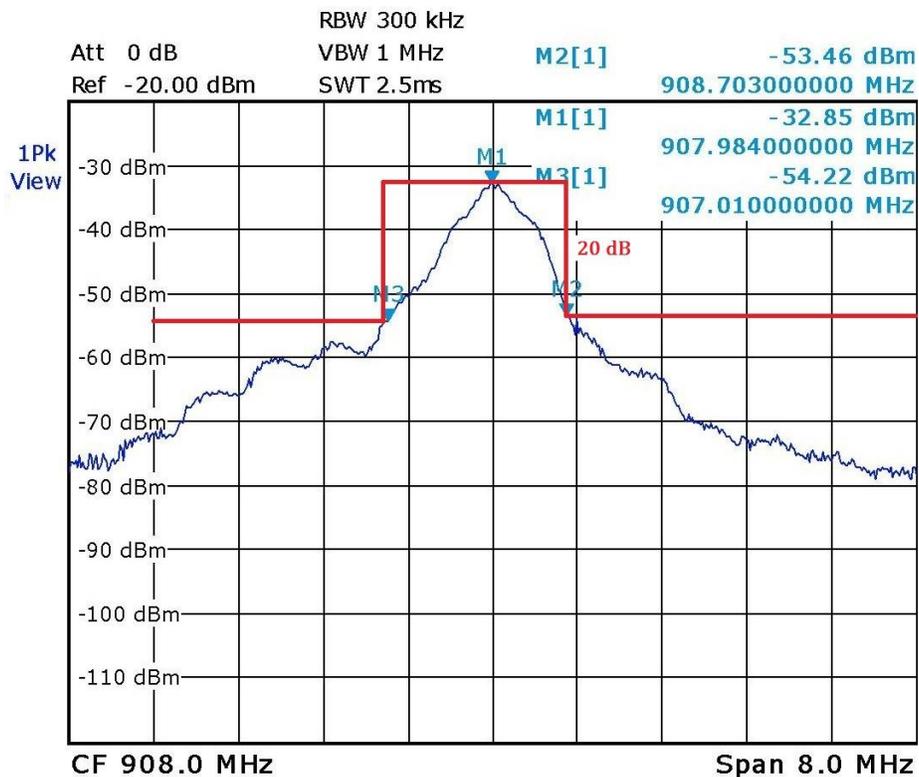


Figura 3.39 Ancho de Banda de 20 dB para BPSK

B. Ancho de banda con modulación por desplazamiento de fase en cuadratura con desplazamiento temporal (O-QPSK)

Al igual que para BPSK; se espera un ancho de banda de 2 MHz para el esquema de modulación O-QPSK. En la Figura 3.40, se observa que el marcador M1 está ubicado en la frecuencia central del canal igual a 908 MHz, mientras que la diferencia entre los marcadores M3 y M2 es igual a 2.3 MHz, cumpliendo con las especificaciones de máscara espectral (SM) en la banda de 900 MHz.

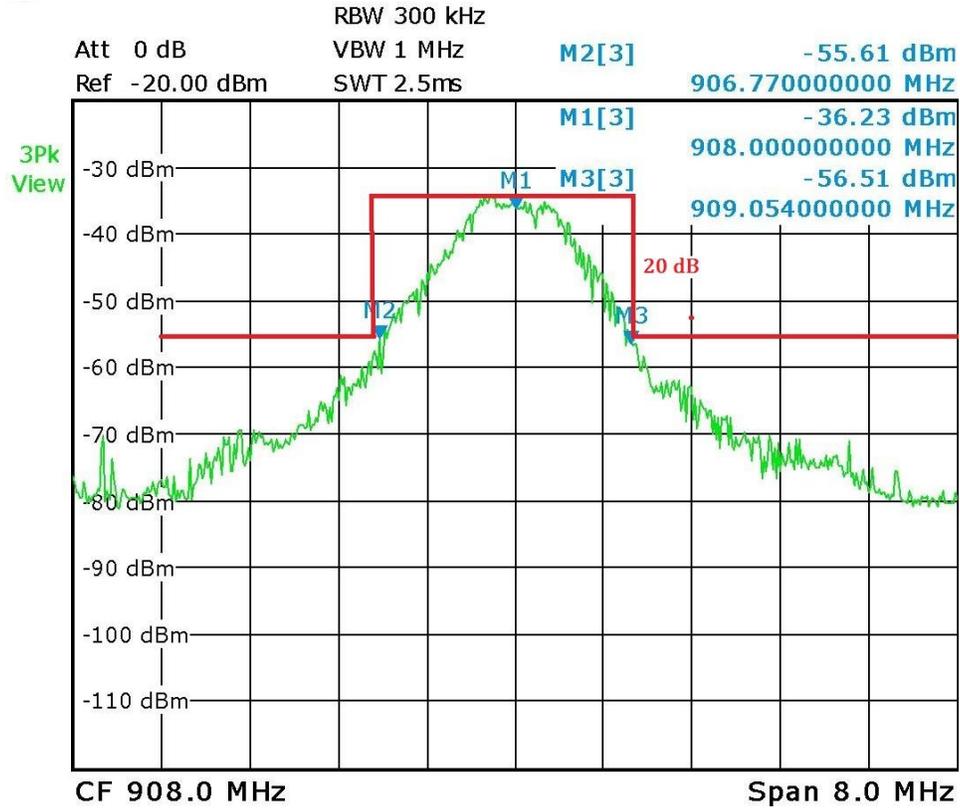


Figura 3.40 Ancho de Banda de 20 dB para O-QPSK

3.3.2.5 Pérdidas de propagación.

Con el objetivo de comparar las pérdidas de propagación del sistema de comunicaciones obtenidas con *Wireless InSite*®, con las pérdidas teóricas, se usó el modelo de propagación de pendiente única descrito en la ecuación 3.17 [38].

$$L[dB] = K[dB] + 10n \log_{10} \left[\frac{d(m)}{d_0(m)} \right] \quad (3.17)$$

Dónde:

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

n: Exponente de propagación

*d*₀: Distancia de referencia

Para la aplicación del modelo de pendiente única, se obtuvo el valor de la constante *k* a partir de la ecuación 3.17, reemplazando los valores de pérdidas básicas obtenidos con *Wireless InSite*® en las distancias de referencia iguales 0.5 m y 7 m para interiores y exteriores respectivamente. El valor del exponente de propagación (*n*) se estimó mediante ensayo y error para cada prueba.

Las pérdidas de propagación obtenidas con *Wireless InSite*®, se caracterizan por medio de la ecuación 3.18, la cual describe el balance del enlace radio del sistema de comunicación.

$$L_b(dB) = P_{tx}(dBm) - P_{rx}(dBm) + G_a(dBi) \quad (3.18)$$

Dónde:

L_b: Pérdidas de propagación

P_{tx}: Potencia de transmisión

P_{rx}: Potencia de recepción

G_a: Ganancia de las antenas

Para encontrar las pérdidas de propagación, se debe tener en cuenta que la potencia de transmisión se varió para los diferentes escenarios y esquemas de modulación implementados en cada prueba, de acuerdo a los valores registrados en la Tabla 3.6.

A. Exteriores

Con el fin de comparar el modelo de propagación de pendiente única, se determinaron los valores de pérdidas de propagación (*L_b*) para cada distancia, teniendo en cuenta la potencia de recepción obtenida en *Wireless InSite*®.

De acuerdo a la diferencia en la potencia de transmisión configurada para cada prueba en exteriores, se tienen pérdidas de propagación (*L_b*) diferentes en base a la ecuación 3.18. Según lo anterior se definen dos valores de *K* para determinar las pérdidas (*L*) en base al modelo de propagación de pendiente única.

Para determinar los valores del modelo de pendiente única que mejor se ajusten a las pérdidas de propagación (*L_b*) para la potencia de transmisión de - 16 dBm, se varió el exponente de propagación (*n*), como se observa en la Figura 3.41. Finalmente, con un valor de *n* = 2 se obtiene los valores del modelo de pendiente única que mejor se ajustan a los obtenidos con el balance del enlace radio.

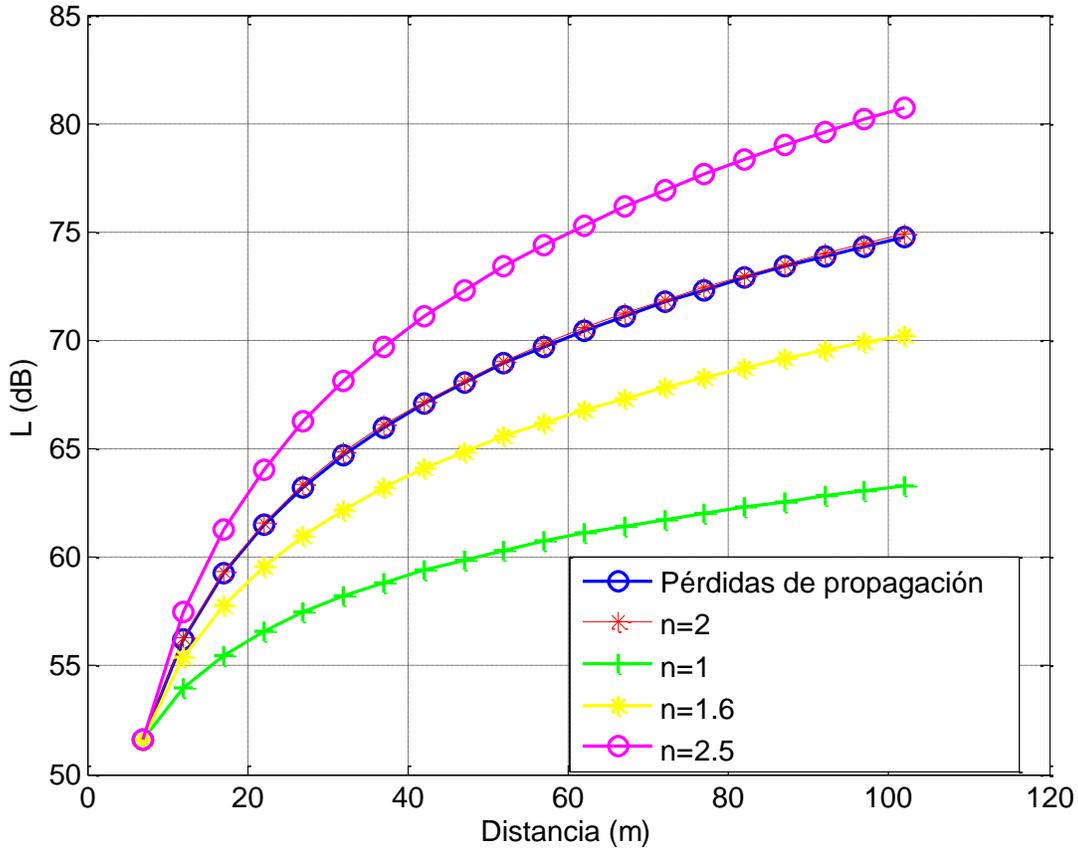


Figura 3.41 Pérdidas de propagación vs Modelo dependiente única ($P_{tx} = -16$ dBm)

Realizando el mismo procedimiento anterior, se encontraron valores del modelo de pendiente única para diferentes valores de n , basados en los resultados de *Wireless InSite*® para una potencia de transmisión de -6.1 dBm, como se observa en la Figura 3.42. Es posible observar que para un exponente de propagación (n) igual a 2.2, el modelo de pendiente única se ajusta a las pérdidas de propagación (L_b) hasta los 27 metros aproximadamente, mientras que para los últimos metros se tiene una diferencia máxima de 0.5 dB.

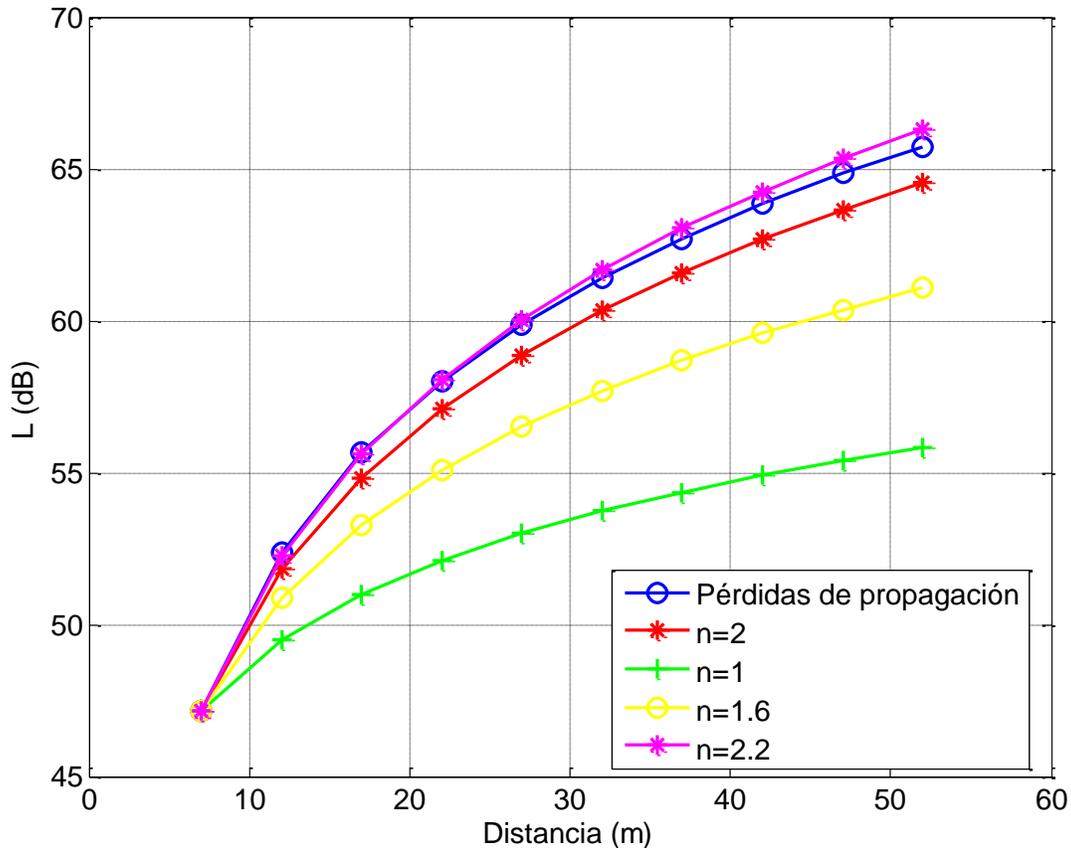


Figura 3.42 Pérdidas de propagación vs Modelo de pendiente única ($P_{tx} = -6.1$ dBm)

En la Tabla 3.8 se describen los valores de pérdidas de propagación obtenidas a partir del balance del enlace radio y el modelo de propagación de pendiente única para exteriores (Ver Anexo A, sección A3).

Tabla 3.8 Pérdidas en exteriores

Distancia (m)	$P_{tx} = -16$ dBm y $n = 2$			$P_{tx} = -6.1$ dBm y $n = 2.2$		
	P_{rx} (dBm)	L_b (dB)	L (dB)	P_{rx} (dBm)	L_b (dB)	L (dB)
7	-63.63	51.63	51.63	-49.23	47.13	47.13
12	-68.24	56.24	56.31	-54.48	52.38	52.28
22	-73.48	61.48	61.58	-60.12	58.02	58.07
32	-76.72	64.72	64.83	-63.51	61.41	61.65
42	-79.08	67.08	67.19	-65.94	63.84	64.25
52	-80.94	68.94	69.05	-67.84	65.74	66.29
62	-82.46	70.46	70.58	-	-	-
72	-83.76	71.76	71.87	-	-	-
82	-84.89	72.89	73	-	-	-
92	-85.89	73.89	74	-	-	-
102	-86.79	74.79	74.9	-	-	-

B. Interiores

Al igual que para exteriores, se determinaron los valores del modelo de pendiente única y las pérdidas de propagación (L_b) en base a los resultados de *Wireless InSite*® para una potencia de transmisión igual a -23 dBm.

Es importante resaltar que el sistema haciendo uso de BPSK cubre una distancia de 57 m, mientras haciendo uso de O-QPSK alcanza una distancia máxima de 23.5 m, debido a que este último esquema de modulación, es más vulnerable y menos robusto frente al ruido, presentando mayor pérdida de paquetes.

En interiores, las pérdidas de propagación (L_b) varían a lo largo del pasillo debido al confinamiento de la señal y a la presencia de multitrayectoria como se observa en la Figura 3.43. Se define la distancia de referencia (d_0) como 0.5 m y se encuentra que el valor de K es igual a 39.19 dB en base a los resultados obtenidos con *Wireless InSite*®. Mediante ensayo y error, se determinó que un exponente de propagación (n) igual a 1.4, presenta la mejor aproximación del modelo de pendiente única a las pérdidas de propagación (L_b). La diferencia máxima entre las curvas es de 27.15 dB a una distancia de 19.5 m, punto en el que se presentó el mayor número de pérdidas de propagación.

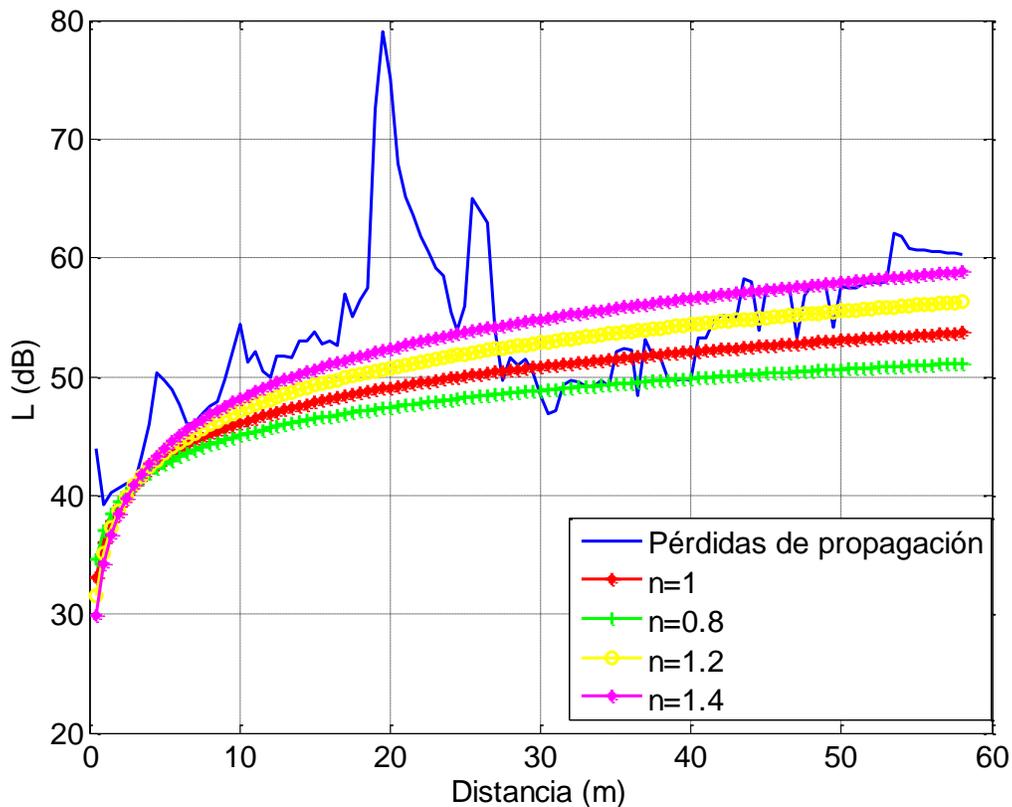


Figura 3.43 Pérdidas de propagación vs Modelo de pendiente única para interiores

En la Tabla 3.9 se observan los valores de pérdidas de propagación obtenidas por medio del balance del enlace radio y el modelo de pendiente única para interiores (Ver Anexo A, sección A3)

Tabla 3.9 Pérdidas en interiores

Pt = - 23 dBm y n = 1.4			
Distancia (m)	P _{rx} (dBm)	L _b (dB)	L (dB)
0.5	-62.99	43.99	39.19
1	-58.19	39.19	42.2
5	-68.63	49.63	49.19
10	-73.43	54.43	52.2
15	-72.76	53.76	54.1
20	-94.06	75.06	55.21
25	-74.96	55.96	56.18
30	-67.45	48.45	56.97
35	-71.08	52.08	57.64
40	-68.62	49.62	58.22
45	-76.55	57.55	58.73
50	-76.57	57.57	59.19
55	-79.72	60.72	59.6
58	-79.33	60.33	59.83

3.3.2.6 Interferencia.

Interferencia se conoce como el fenómeno en el que dos o más señales interactúan entre sí, bien sea de manera constructiva o destructiva, provocando pérdida de información y degradación de la señal. En la Figura 3.44, se observa el sistema implementado para realizar la prueba descrita anteriormente.

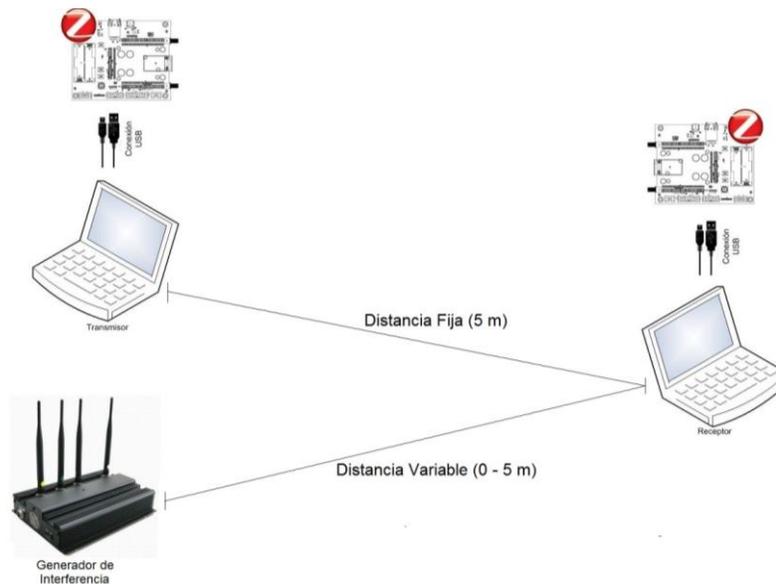


Figura 3.44 Configuración del sistema para la evaluación de desempeño bajo efectos de interferencia

Por medio de la herramienta de simulación *Wireless InSite*®, se encontraron de manera independiente los valores de potencia de recepción libre de efectos de interferencia (P_{RXS}) y potencia de recepción interferente (P_{RXI}).

$$P_{RXS} = -22.97 \text{ dBm}$$

Por medio de la ecuación 3.19, se encontró el valor de la relación Portadora a Interferencia (C/I, *Carrier to Interference ratio*), como la diferencia ente la potencia de recepción de la señal y la potencia de recepción de la señal interferente.

$$C/I [dB] = P_{RXS} [dBm] - P_{RXI} [dBm] \quad (3.19)$$

Dónde:

C/I : Relación portadora a interferencia

P_{RXS} : Potencia de recepción de la señal

P_{RXI} : Potencia de recepción de la señal interferente

En la Tabla 3.10 se muestra la variación de la potencia interferente, la relación portadora a interferencia (C/I), los valores de tasa de error de paquete (PER) y tasa de error de bit (BER) obtenidos en esta prueba.

Tabla 3.10 Resultados de desempeño del sistema de comunicación bajo condiciones de interferencia

Potencia de interferencia (dBm)	C/I (dB)	PER	BER
-16.93	-6.04	0	0.00E+00
-16.45	-6.52	0.01	1.26E-04
-15.94	-7.03	0.06	7.73E-04
-15.4	-7.57	0.1	1.32E-03
-14.82	-8.15	0.12	1.60E-03
-14.2	-8.77	0.18	2.48E-03
-13.54	-9.43	0.39	6.16E-03
-12.82	-10.15	0.48	8.14E-03
-12.04	-10.93	0.56	1.02E-02
-11.81	-11.16	0.67	1.38E-02
-10.23	-12.74	0.8	1.99E-02
-9.16	-13.81	0.82	2.12E-02
-7.95	-15.02	0.95	3.68E-02
-6.56	-16.41	0.97	4.29E-02

A partir de los datos contenidos en la tabla anterior y con la ayuda de Matlab®, se realizaron las gráficas de la tasa de error de paquete (PER) y tasa de error de bit (BER) en función de la relación portadora a interferencia (C/I), con el objetivo de analizar el desempeño del sistema frente a interferencia.

En la Figura 3.45 se observa el comportamiento de la tasa de error de paquete (PER) en función de la relación portadora a interferencia (C/I). La tasa de error de paquete (PER) aumenta debido al incremento de la potencia de interferencia, por lo tanto el número de paquetes recibidos correctamente o sin errores es menor a medida que la relación portadora a interferencia disminuye.

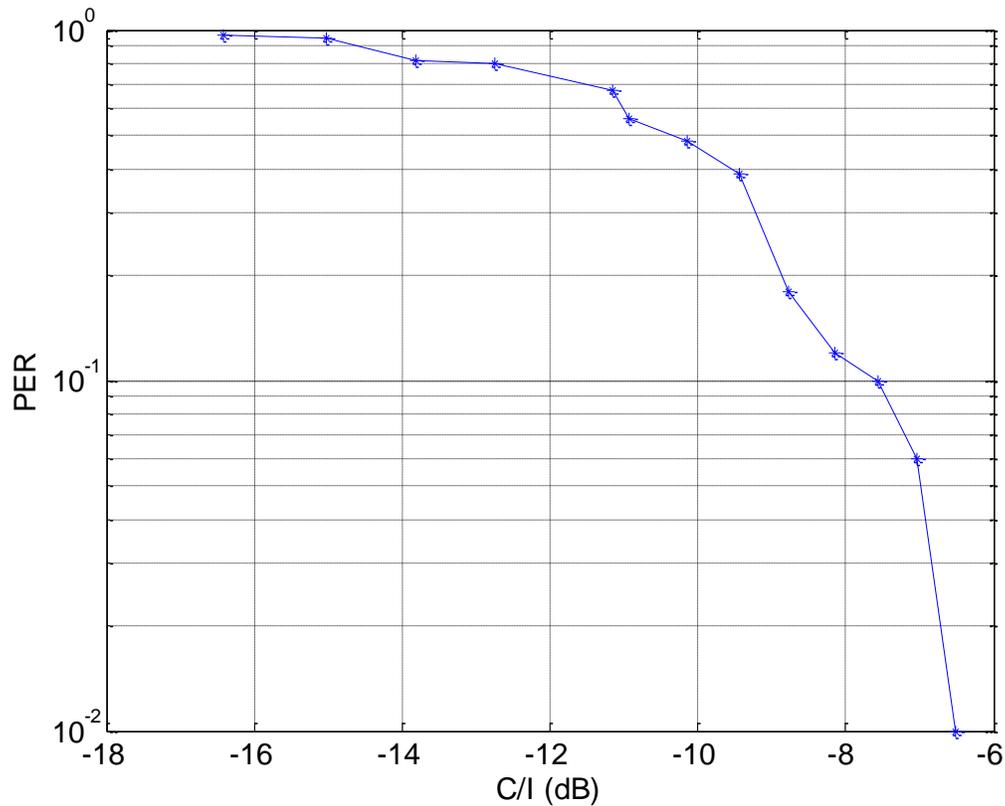


Figura 3.45 Relación portadora interferencia vs PER

A medida que la potencia de interferencia aumenta, la relación portadora a interferencia disminuye y así, el desempeño del sistema empieza a decaer, como se observa en la Figura 3.46.

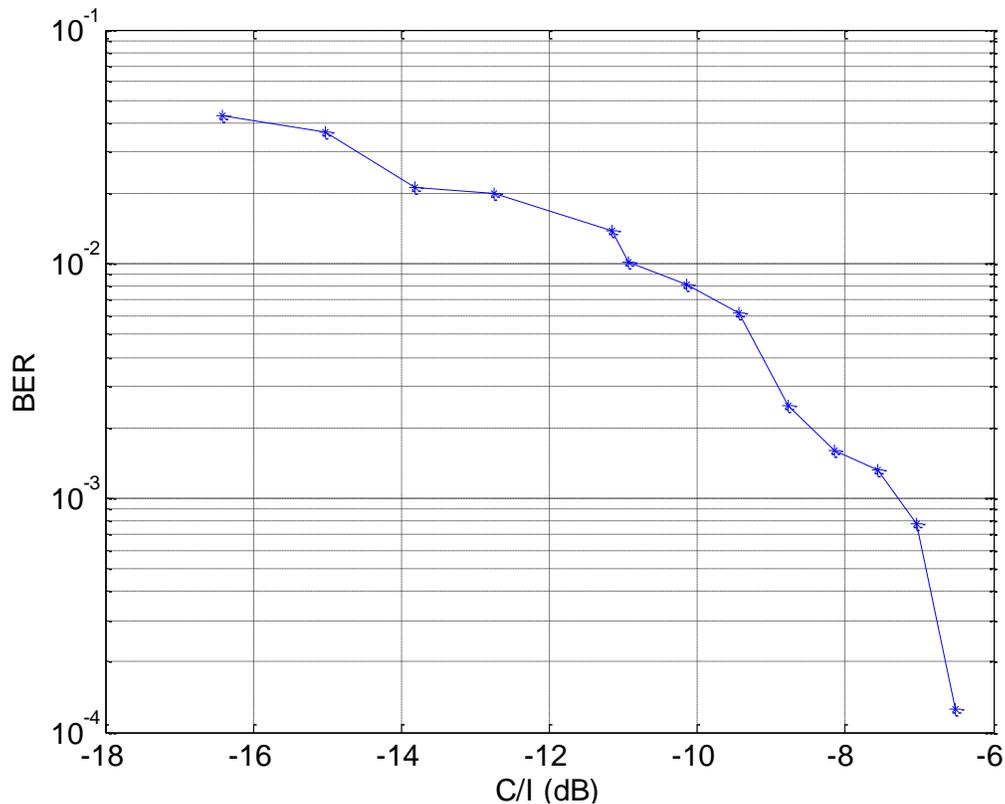


Figura 3.46 Relación portadora interferencia vs BER

Con el analizador de redes vectorial ZVL6 de *Rohde & Schwarz*®, se observó el espectro de la señal transmitida y el efecto de la señal interferente, como se aprecia en la Figura 3.47. Inicialmente se capturó el espectro de la señal sin interferencia representada en color rojo, a medida que el inhibidor de señal se fue acercando al receptor, los espectros capturados mostraron cómo progresivamente el nivel del piso de ruido fue aumentando. El espectro representado en color morado, muestra que la señal interferente cubre completamente la transmitida, demostrando así, que la presencia de interferencia en los sistemas de comunicación, degrada la señal y produce pérdida parcial o total de la información.

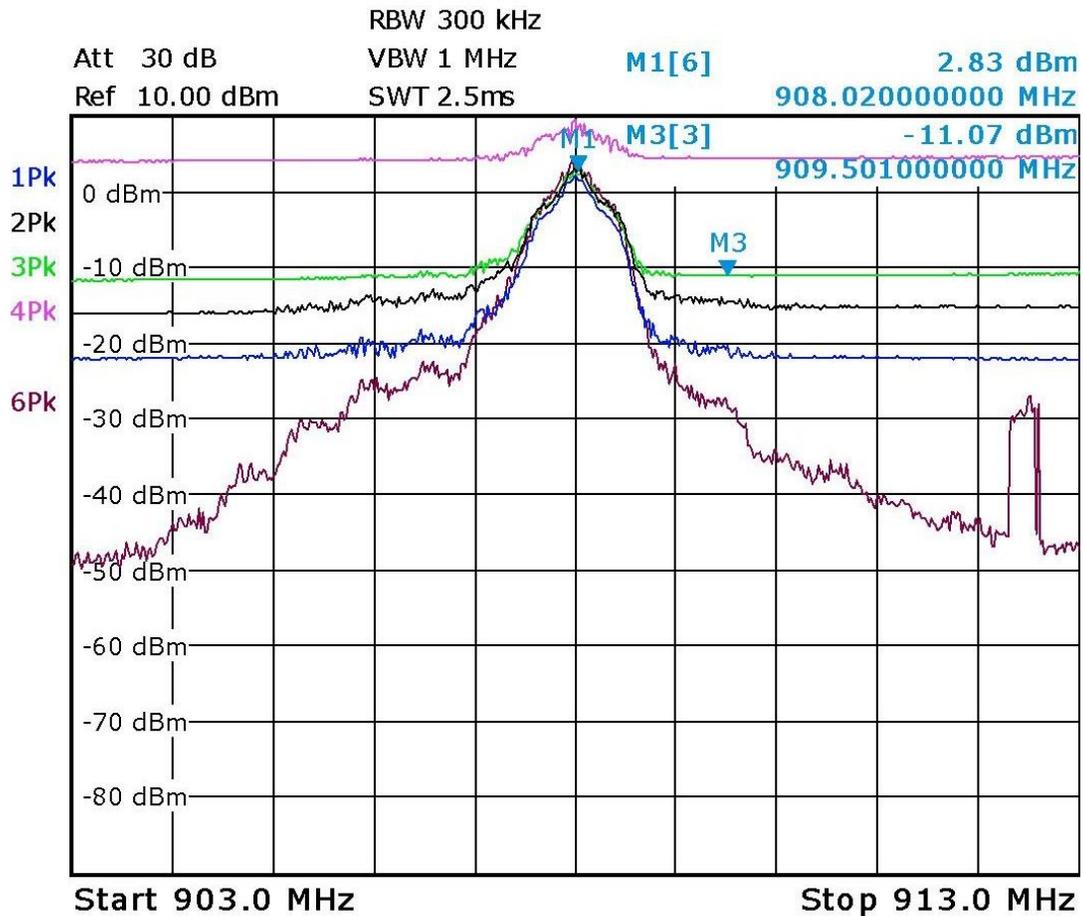


Figura 3.47 Espectro de la señal bajo efectos de interferencia

3.3.2.7 Consumo de corriente.

El consumo de corriente fue monitoreado por medio de un amperímetro, en función de la respuesta del kit de desarrollo frente a cambios realizados en las características de operación. Se modificó el sistema de comunicación, con el fin de conectar el amperímetro en el Pin 26 de la tarjeta de evaluación, como se observa en la Figura 3.48.

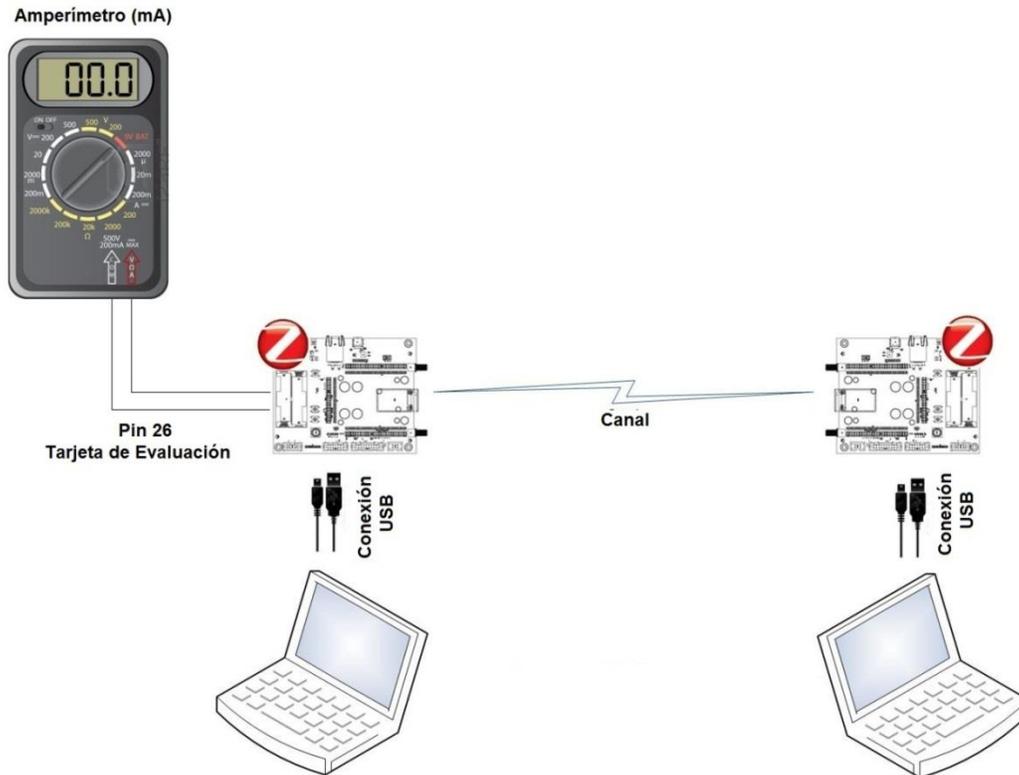


Figura 3.48 Medida de corriente en el sistema de comunicación

En la Figura 3.49, se observa la variación del consumo de corriente durante 2 minutos aproximadamente. Dentro de esta variación, se destacan los siguientes eventos:

1. Modo de espera: estado en el cual el módulo se encuentra a la espera de órdenes de transmisión o cambios en la configuración de las características. El consumo de corriente aproximado en este modo es de 238 mA.
2. Recepción: muestra el consumo de corriente igual a 27 mA cuando la tarjeta recibe los mensajes enviados desde el otro módulo.
3. Transmisión con BPSK: envío de 250 mensajes, donde el consumo de corriente es 265 mA aproximadamente.
4. Transmisión con O-QPSK: consumo de corriente de 280 mA durante el envío de 250 mensajes.
5. Modo de bajo consumo: en este modo, el módulo deshabilita las funciones de transmisión y recepción de información, disminuyendo el consumo de corriente de 238 mA a 17 uA.

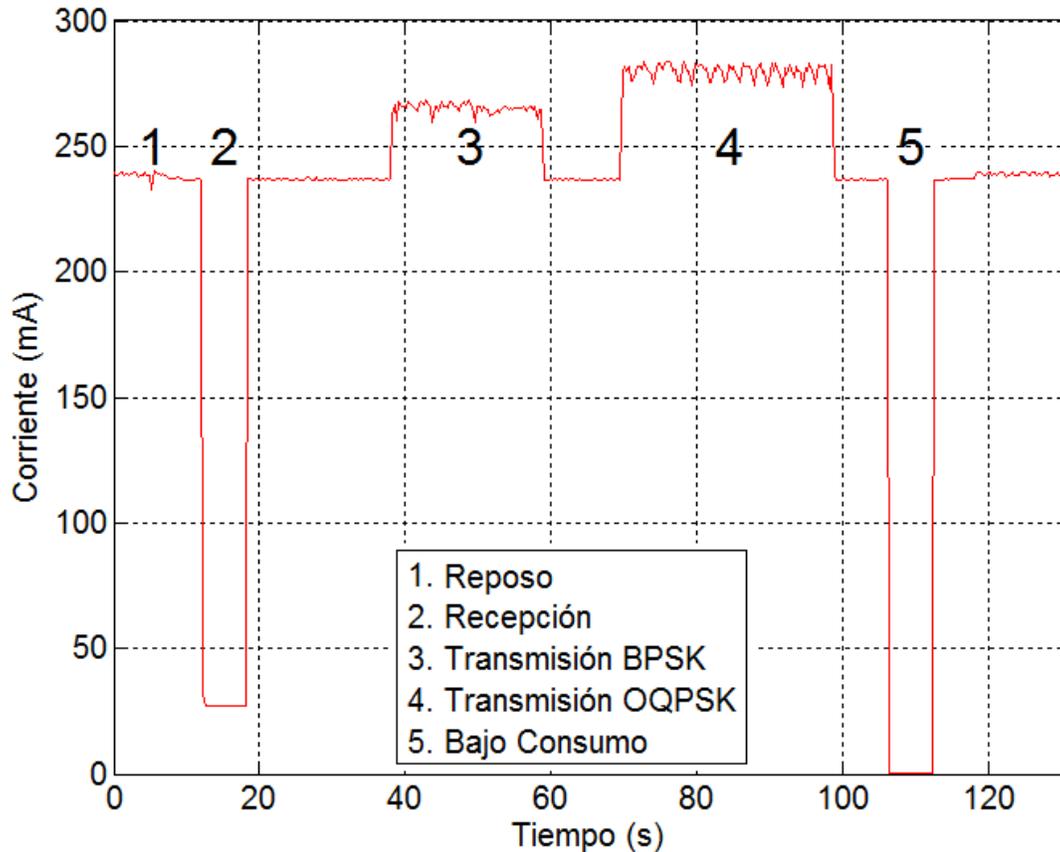


Figura 3.49 Consumo de corriente vs tiempo para diferentes eventos

A. Vida útil de las baterías

Para prolongar el tiempo de vida de las baterías de los nodos ZigBee, es necesario reducir el consumo de energía de los mismos, el cual depende de los modos de operación y las tareas que esté llevando a cabo cada módulo. Con el fin de observar la vida útil del dispositivo a partir del consumo de corriente, se usó la ecuación 3.20, que determina la relación de corriente promedio (I_p) y la capacidad de la batería para cada una de las cinco tareas realizadas. Para el caso de las baterías tipo AA alcalinas, los valores típicos del fabricante varían entre 2700 y 2900 mAh, para el caso de estudio, se usó 2800 mAh como valor de referencia [39].

$$Vida\ útil\ (h) = \frac{Capacidad\ de\ la\ batería\ (mAh)}{I_p\ (mA)} \quad (3.20)$$

Para cada evento se obtuvo un conjunto de valores de consumo de corriente en función del tiempo, dichos valores fueron promediados con el fin de determinar el valor de consumo de corriente promedio (I_p) y así, hallar la vida útil de las baterías correspondiente a cada una de las tareas realizadas. A continuación, se calculó la vida útil para los modos: espera, recepción, transmisión con BPSK, transmisión con O-QPSK y finalmente reposo.

- Modo de espera:

$$Vida \text{ Útil } (h) = \frac{2800 \text{ mAh}}{238 \text{ mA}} = 11.76 \text{ h}$$

- Recepción:

$$Vida \text{ Útil } (h) = \frac{2800 \text{ mAh}}{27 \text{ mA}} = 103.7 \text{ h}$$

- Transmisión con BPSK:

$$Vida \text{ Útil } (h) = \frac{2800 \text{ mAh}}{265 \text{ mA}} = 10.56 \text{ h}$$

- Transmisión con O-QPSK:

$$Vida \text{ Útil } (h) = \frac{2800 \text{ mAh}}{280 \text{ mA}} = 10 \text{ h}$$

- Bajo consumo:

$$Vida \text{ Útil } (h) = \frac{2800 \text{ mAh}}{17 \mu\text{A}} = 164705.8 \text{ h}$$

Observando los anteriores resultados, se evidencia que la configuración en bajo consumo, presenta duración más prolongada de las baterías, sin embargo, limita la transmisión y recepción de información.

Las pruebas de transmisión, demuestran que la duración de las baterías depende del esquema de modulación seleccionado, sin embargo, la diferencia de la vida útil de la batería con ambos esquemas, no presenta una diferencia muy considerable por lo que la selección del esquema de modulación, no se debe basar solo en la duración de la vida útil de las baterías.

En recepción, el consumo de corriente es pequeño y garantiza 100 horas más de vida útil de las baterías, en comparación con los estados de reposo y transmisión. Sin embargo, la vida útil de las baterías en bajo consumo, tiene una duración prolongada debido a las funciones que son deshabilitadas en el módulo.

Los dispositivos de las redes ZigBee®, funcionan la mayor parte del tiempo en el modo de bajo consumo, lo que nos lleva a suponer una duración de años de la vida útil de las baterías. ZigBee® en comparación con Bluetooth™, ofrece un máximo de 1000 días de duración de sus baterías, mientras Bluetooth™ se limita tan solo a 7 [40].

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos con el kit de desarrollo *ModFLEX™* se consideran limitados, ya que se basan principalmente en el indicador de calidad del enlace (LQI) y no entregan valores de intensidad de potencia recibida, mientras los resultados obtenidos con la herramienta de simulación *Wireless InSite®* brindaron una buena estimación de los valores de potencia recibida y pérdidas de propagación para el análisis de desempeño del sistema de comunicación implementado en exteriores e interiores.

Los resultados obtenidos con el kit de desarrollo *ModFLEX™* y representados en las curvas de desempeño a nivel de tasa de error de bit (BER), difieren de los valores registrados para un sistema de comunicación ideal basado en la tecnología ZigBee®, pero las curvas siguen la misma tendencia disminuyendo la tasa de error de bit (BER) con el aumento de la relación energía de bit a densidad espectral de potencia de ruido (E_b/N_o).

Gracias a los valores estimados por la herramienta de simulación *Wireless InSite®* basada en el método de trazado de rayos, se encontraron los valores de la relación energía de bit a densidad espectral de potencia (E_b/N_o) asociados a los valores de PER obtenidos para cada escenario.

El sistema de comunicación implementado por medio de Simulink® de MATLAB®, permitió observar y analizar el comportamiento de una señal IEEE 802.15.4 a nivel de banda base, además de evaluar su desempeño con el fin de obtener una base teórica para la comparación de resultados.

En interiores la tasa de error de bit (BER) es mayor que en exteriores ya que la señal se encuentra confinada a lo largo del pasillo, experimentando efectos de interferencia constructiva y destructiva como resultado de la multitrayectoria, lo cual no se presenta en exteriores al considerarse libre de obstáculos.

El estándar IEEE 802.15.4 no establece ninguna relación entre el indicador de calidad del enlace (LQI) y la potencia recibida, ya que se obtiene por medio de la detección de energía (ED), la estimación de la relación señal a ruido (SNR) o una combinación de ambos métodos.

Según el estudio realizado, se pudo determinar que la vida útil de las baterías es la esperada para los dispositivos ZigBee®, ya que ofrecen una duración de las baterías entre 100 y 1000 días, considerando que estos dispositivos se mantienen en el modo de bajo consumo la mayor parte del tiempo.

El desempeño a nivel físico (PHY) de la tecnología ZigBee en la banda de 900 MHz se ve afectado principalmente por el esquema de modulación, los elementos presentes en los diferentes escenarios y la distancia entre transmisor y receptor.

4.2 TRABAJOS FUTUROS

Evaluación y análisis de desempeño a nivel físico de un sistema de comunicación de datos punto a multipunto en la banda de 900 MHz empleando la tecnología ZigBee®.

Implementación de un sistema de comunicación que permita el análisis y evaluación de la característica *FLEXConnect*¹⁴ incluida en los kit de desarrollo *ModFLEX™* de *LS Research*.

Evaluación y análisis de desempeño del kit de desarrollo *ModFLEX™ SiFLEX02* en un entorno de movilidad.

¹⁴*FLEXConnect* permite implementar una red malla usando más de dos dispositivos de la familia *ModFLEX™* de *LS Research*, con el objetivo de soportar aplicaciones que requieran una ampliación de la red inalámbrica. <http://www.lsr.com/products-wiki?topic=ModFLEX+FLEXConnect>

REFERENCIAS

- [1] Maneweck, K., "ZigBee Standard Gaining Acceptance," ed, 2004.
- [2] Shahin, F., *ZigBee wireless networks and transceivers*: Newnes, 2008
- [3] Alliance, Z. (2008). "Zigbee Alliance Home Page" [Online]. Available: <http://www.zigbee.org/>, [February 21].
- [4] Ahamed, S. S. R., "The role of zigbee technology in future data communication system," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 5, p. 129, 2009.
- [5] Specification, Z. B., "ZigBee Standards Organization," *Document 053474r17, Jan*, vol. 17, 2008.
- [6] Alliance, Z., "ZigBee RF4CE Specification Version 1.01," ed. 2400 Camino Ramon, Suite 375, San Ramon, CA 94583, USA, 2010, pp. 1-106.
- [7] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, I., "IEEE Standar for Information Technology Local and metropolitan area networks — Specific requirements," in *Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS)*, ed. 3 Park Avenue New York, NY 10016-5997, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2006, pp. 1-320.
- [8] Ergen, S. C., "ZigBee/IEEE 802.15. 4 Summary," ed, 2004.
- [9] Olivares, J. L. C., "Modelo de Cobertura para Redes linalámbricas de Interiores," Trabajo de Grado, Universidad de Sevilla, Sevilla, 2009.
- [10] Chaari, L. and Kamoun, L., "Performance analysis of IEEE 802.15. 4/Zigbee standard under real time constraints," *International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC) Vol*, vol. 3, 2011.
- [11] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, I., "IEEE Standar for Information Technology Telecommunications and information exchange between systems— Local and metropolitan area networks Specific requirements," in *Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS)*, ed. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2003, pp. 1-670.
- [12] Xiong, F., *Digital modulation techniques*: Artech House Telecommunications Library, 2006
- [13] Instruments, N., "The Basics of ZigBee Transmitter Testing," ed, 2009.
- [14] Il, L. W. C., *Sistemas de Comunicación digitales y Analógicos*, 7 ed.: Prentice Hall, 2008,786.
- [15] Matituy, Y. E. N., *et al.*, "ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DE DA-TOS DE CORTO ALCANCE VÍA RADIO EN 2.4 GHZ BASADO EN ESPECTRO ENSANCHADO POR SECUENCIA DIRECTA (DSSS)."
- [16] Alliance, Z. B., "Zigbee and wireless radio frequency coexistence," *Document 075026r02. May*, 2007.
- [17] Research, L., "Integrated Transceiver Modules for ZigBee / 802.15.4 (900 MHz). Development kit," L. Research, Ed., ed. DIGIKEY.

- [18] ATMEL, "8/16-bit AVR XMEGA A3 Microcontroller," AVR, Ed., ed: ATMEL.
- [19] ATMEL, "Low Power 700/800/900 MHz Transceiver for IEEE 802.15.4-2006, IEEE 802.15.4c-2009, ZigBee, 6LoWPAN, and ISM Applications," AVR, Ed., ed: ATMEL.
- [20] Research, L., "902 MHz - 928 MHz Dipole 2dBi Antenna for Reverse Polarity SMA," L. Research, Ed., ed: DIGIKEY.
- [21] Kinney, P., "ZigBee technology: wireless control that simply works ", ed, 2003.
- [22] Research, L., "SiFLEX02 Transceiver Module - Host Protocol Guide," L. Research, Ed., ed.
- [23] Remcom. (2013). "Wireless InSite" [Online]. Available: <http://www.remcom.com/wireless-insite>, [March 22].
- [24] Remcom, "The Wireless InSite Users Manual, Release 2.5.11," in *Radio Propagation Prediction Software*, ed, 2009.
- [25] Tse, D. and Viswanath, P., *Fundamentals of wireless communication*: Cambridge university press, 2005
- [26] Tomasi, W., *Sistemas de comunicaciones electrónicas*: Pearson educación, 2003
- [27] Física, P., "Levantamiento Arquitectónico Facultad de Ingeniería Civil, Electrónica y Geotecnia," U. d. Cauca, Ed., ed, 2010.
- [28] Candotti, K., *et al.*, "Impacto de la Variación de la Dispersión de Retardo RMS de un Canal Multitrayecto en el Rendimiento de Sistemas OFDM."
- [29] Pérez, J. A. M., "Detección multiusuario ciega basada en subespacios ensistemas MC-CDMA cuasi-síncronos," Universidad de Sevilla Escuela Superior de Ingenieros, 2007.
- [30] Portilla, L. C. and Tascon, M., "Evaluación y Análisis del Desempeño de la Tecnología ZigBee (IEEE 802.15.4) a Nivel Físico," Trabajo de Grado, Universidad del Cauca, 2008.
- [31] Mathworks, "SIMULINK, Simulation and Model-Based Design," ed, 2012.
- [32] Garza, J. M. N. d. I., "RF Jamming," Universidad de las Américas Puebla, Cholula, Puebla, México, 2006.
- [33] Anaya, L. M. and Cordoba, R. A., "Evaluación y Análisis del Desempeño a nivel físico de un Sistema de Comunicación de datos punto a punto en 2.4 GHz basado en ZigBee," Trabajo de Grado, Universidad del Cauca, 2012.
- [34] "Low-Power Sub- 1 GHz RF Transceiver," T. Instruments, Ed., ed: Chipcon Products of Texas Instruments, .
- [35] Electronics, H. F., "Bit Error Rate: Fundamental Concepts and Measurement Issues," 2003.
- [36] Shuaib, K., *et al.*, "Performance evaluation of IEEE 802.15. 4: Experimental and simulation results," *Journal of Communications*, vol. 2, pp. 29-37, 2007.
- [37] Schwarz®, R., "ZVL Vector Network Analyzer," R. Schwarz®, Ed., 03.01 ed, 2009.
- [38] Goldsmith, A., *Wireless Communications*: Cambridge University Press, 2005
- [39] Garrido, G. C., " Caracterización del Consumo en Redes ZigBee/802.15.4," Ingeniería de Telecomunicaciones, Universidad de Málaga, Málaga, 2009.
- [40] Salgado, I. V., "ZigBee y sus aplicaciones," ed. Escuela Técnica Superior de Ingeniería-ICAI. Universidad Pontificia Comillas, 2011-2012.

ANEXO A RESULTADOS TEÓRICOS

A.1 PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN - ANÁLISIS DE COBERTURA

Las pérdidas de propagación se obtuvieron a partir de la Ecuación 3.2 y los valores de longitud de onda (λ), frecuencia de operación, ganancia de las antenas y distancia entre transmisor y receptor (R), descritos en el capítulo 3 sección 3.1.1.1. En la Tabla A.1, se observan los valores hallados.

Tabla A.1 Distancia vs Pérdidas de Propagación

Distancia (m)	Pérdidas de Propagación (dB)
7	52.53
12	57.21
17	60.24
22	62.48
27	64.26
32	65.73
37	66.99
42	68.09
47	69.07
52	69.95
57	70.75
62	71.48
67	72.15
72	72.78
77	73.36
82	73.91
87	74.42
92	74.91
97	75.37
102	75.8

En la Figura A.1, se observan las pérdidas de propagación obtenidas a partir de la ecuación de *Friss*, en función de la distancia. Estas pérdidas, varían en un rango entre 52 dB y 75 dB, al igual que las pérdidas obtenidas de la herramienta de simulación *Wireless InSite®* para el escenario de exteriores.

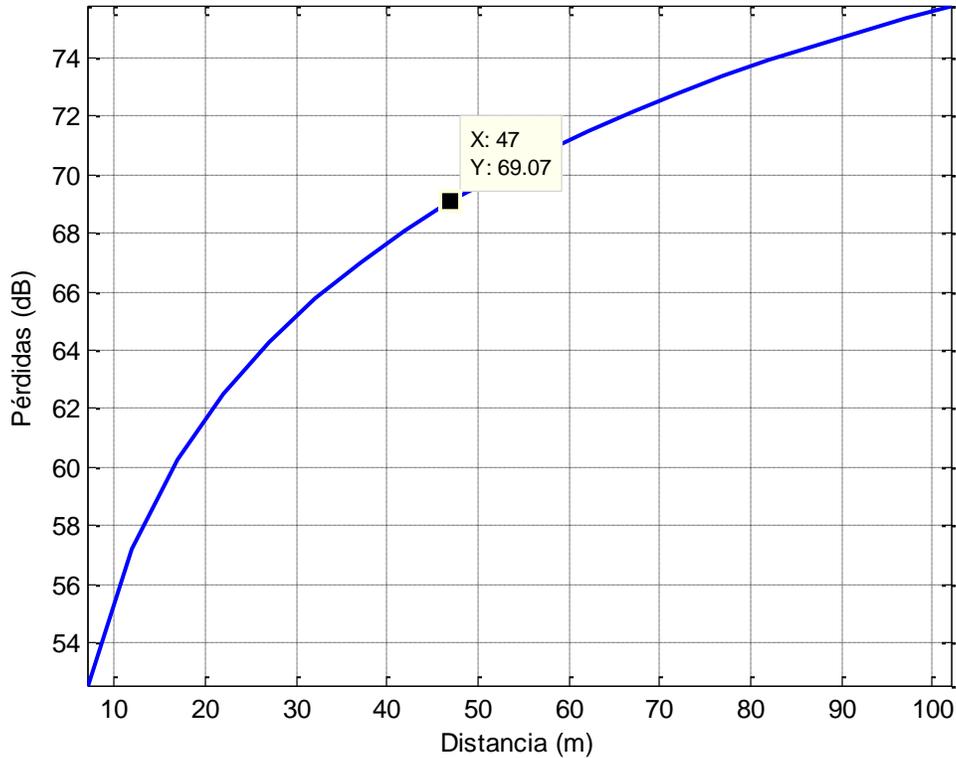


Figura A.1 Pérdidas de Propagación vs Distancia

A.2 TASA DE ERROR DE BIT – ANÁLISIS PRÁCTICO

Para analizar el desempeño del sistema, se calculó el valor de la relación energía de bit a densidad espectral de potencia de ruido (E_b/N_o), a partir de la intensidad de potencia recibida y, la tasa de error de bit (BER) en función de la tasa de error de paquete (PER). Estos valores se encuentran detallados para BPSK y O-QPSK en la Tabla A.2 para exteriores y en la Tabla A.3 para interiores. Para el escenario de exteriores, fue necesario configurar potencias de transmisión diferentes para BPSK y O-QPSK iguales -16 dBm y -6.1 dBm respectivamente. Para interiores, se configuró una potencia de transmisión igual a -23 dBm para ambos esquemas de modulación. La configuración de las potencias diferentes, fue necesario debido a la necesidad de limitar el rango de operación del sistema de comunicaciones implementado.

Tabla A.2 Resultados de E_b/N_o , PER y BER para exteriores

BPSK			O-PSK		
E_b/N_o (dB)	PER	BER	E_b/N_o (dB)	PER	BER
48.35	0.008	1.00E-04	54.79	0.006	7.52E-05
43.74	0.015	1.89E-04	49.54	0.124	1.65E-03
40.73	0.066	8.53E-04	46.27	0.124	1.65E-03
38.5	0.084	1.10E-03	43.9	0.258	3.72E-03
36.73	0.107	1.41E-03	42.04	0.403	6.43E-03

Eb/No (dB)	PER	BER	Eb/No (dB)	PER	BER
35.26	0.15	2.03E-03	40.51	0.403	6.43E-03
34	0.186	2.57E-03	39.21	0.542	9.71E-03
32.9	0.204	2.85E-03	38.08	0.759	1.76E-02
31.92	0.217	3.05E-03	37.07	0.815	2.09E-02
31.04	0.231	3.28E-03	36.18	0.983	4.97E-02
30.25	0.263	3.81E-03	-	-	-
29.52	0.318	4.77E-03	-	-	-
28.84	0.375	5.86E-03	-	-	-
28.22	0.414	6.66E-03	-	-	-
27.64	0.49	8.38E-03	-	-	-
27.09	0.571	1.05E-02	-	-	-
26.58	0.606	1.16E-02	-	-	-
26.09	0.742	1.68E-02	-	-	-
25.63	0.876	2.58E-02	-	-	-

Tabla A.3 Resultados de Eb/No, PER y BER para interiores

O-QPSK			BPSK		
Eb/No (dB)	PER	BER	Eb/No (dB)	PER	BER
29.02	0.997	7.00E-02	23.27	0.989	5.48E-02
29.34	0.958	3.89E-02	30.02	0.915	3.03E-02
31.14	0.947	3.61E-02	31.99	0.853	2.37E-02
32.49	0.914	3.02E-02	33.46	0.806	2.03E-02
35.55	0.893	2.75E-02	32.39	0.762	1.78E-02
35.23	0.822	2.13E-02	35.13	0.728	1.61E-02
35.47	0.797	1.97E-02	38.21	0.471	7.93E-03
38.31	0.683	1.43E-02	39.09	0.226	3.20E-03
39.08	0.642	1.28E-02	41.68	0.177	2.43E-03
42.01	0.584	1.09E-02	44.38	0.104	1.37E-03
43.09	0.513	8.95E-03	44.74	0.063	8.13E-04
45.5	0.375	5.86E-03	45.83	0.015	1.89E-04
46.17	0.197	2.74E-03	-	-	-
46.85	0.114	1.51E-03	-	-	-
51.99	0.092	1.21E-03	-	-	-
52.7	0.046	5.88E-04	-	-	-
53.79	0.003	3.76E-05	-	-	-

A.3 PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN – ANÁLISIS PRÁCTICO

Usando las Ecuaciones 3.14 y 3.15 descritas en la sección de pérdidas de propagación en el análisis práctico del capítulo 3, se encontraron todos los valores de pérdidas de propagación y las pérdidas obtenidas a partir del modelo de pendiente única para cada distancia en la cual se ubicó un receptor. En la Tabla A.4 se encuentran las pérdidas en exteriores, para valores de potencia de transmisión igual a – 16 dBm y – 6.1 dBm, con un exponente de pérdidas de propagación (n) equivalente a 2 y 2.2 respectivamente.

Tabla A.4 Pérdidas reales y teóricas en exteriores

Distancia (m)	Pt = - 16 dBm y n = 2			Pt = - 6.1 dBm y n = 2.2		
	P _r (dBm)	L _b (dB)	L (dB)	P _r (dBm)	L _b (dB)	L (dB)
7	-63.63	51.63	51.63	-49.23	47.13	47.13
12	-68.24	56.24	56.31	-54.48	52.38	52.28
17	-71.25	59.25	59.34	-57.75	55.65	55.61
22	-73.48	61.48	61.58	-60.12	58.02	58.07
27	-75.25	63.25	63.36	-61.98	59.88	60.03
32	-76.72	64.72	64.83	-63.51	61.41	61.65
37	-77.98	65.98	66.09	-64.81	62.71	63.04
42	-79.08	67.08	67.19	-65.94	63.84	64.25
47	-80.06	68.06	68.17	-66.95	64.85	65.32
52	-80.94	68.94	69.05	-67.84	65.74	66.29
57	-81.73	69.73	69.85	-	-	-
62	-82.46	70.46	70.58	-	-	-
67	-83.14	71.14	71.25	-	-	-
72	-83.76	71.76	71.87	-	-	-
77	-84.34	72.34	72.46	-	-	-
82	-84.89	72.89	73	-	-	-
87	-85.4	73.4	73.52	-	-	-
92	-85.89	73.89	74	-	-	-
97	-86.35	74.35	74.46	-	-	-
102	-86.79	74.79	74.9	-	-	-

Las pérdidas de propagación y las obtenidas a partir del modelo de pendiente única para interiores con una potencia de transmisión igual a – 23 dBm y 1.4 como exponente de propagación(n), se observan en la Tabla A.5.

Tabla A.5 Pérdidas reales y teóricas en interiores

Pt = - 23 dBm y n = 1.4			
Distancia (m)	P _r (dBm)	L _b (dB)	L (dB)
0.5	-62.99	43.99	29.96
1	-58.19	39.19	34.17
1.5	-59.28	40.28	36.64
2	-59.64	40.64	38.38
2.5	-59.99	40.99	39.74
3	-59.85	40.85	40.85
3.5	-62.34	43.34	41.79
4	-64.93	45.93	42.6
4.5	-69.37	50.37	43.32
5	-68.63	49.63	43.96
5.5	-67.9	48.9	44.54
6	-66.67	47.67	45.06
6.5	-64.93	45.93	45.55
7	-65.13	46.13	46
7.5	-65.81	46.81	46.42
8	-66.48	47.48	46.81
8.5	-66.85	47.85	47.18
9	-68.8	49.8	47.53
9.5	-71.11	52.11	47.86
10	-73.43	54.43	48.17
10.5	-70.21	51.21	48.47
11	-71.07	52.07	48.75
11.5	-69.43	50.43	49.02
12	-68.89	49.89	49.28

Distancia (m)	P _r (dBm)	L _b (dB)	L (dB)
12.5	-70.77	51.77	49.53
13	-70.71	51.71	49.77
13.5	-70.56	51.56	49.99
14	-72	53	50.22
14.5	-72.05	53.05	50.43
15	-72.76	53.76	50.64
15.5	-71.71	52.71	50.83
16	-72.03	53.03	51.03
16.5	-71.63	52.63	51.22
17	-75.91	56.91	51.4
17.5	-74	55	51.57
18	-75.45	56.45	51.74
18.5	-76.53	57.53	51.91
19	-91.51	72.51	52.07
19.5	-98.07	79.07	52.23
20	-94.06	75.06	52.38
20.5	-87	68	52.53
21	-84.19	65.19	52.68
21.5	-82.64	63.64	52.82
22	-80.75	61.75	52.96
22.5	-79.49	60.49	53.1
23	-78.12	59.12	53.23
23.5	-77.54	58.54	53.37
24	-74.43	55.43	53.49
24.5	-72.9	53.9	53.62
25	-74.96	55.96	53.74
25.5	-83.95	64.95	53.86
26	-82.96	63.96	53.98
26.5	-81.98	62.98	54.1
27	-72.88	53.88	54.21
27.5	-68.74	49.74	54.32
28	-70.61	51.61	54.43
28.5	-69.97	50.97	54.54
29	-70.41	51.41	54.64
29.5	-69.34	50.34	54.75
30	-67.45	48.45	54.85
30.5	-65.89	46.89	54.95
31	-66.15	47.15	55.05
31.5	-68.24	49.24	55.15
32	-68.71	49.71	55.24
32.5	-68.52	49.52	55.34
33	-68.16	49.16	55.43
33.5	-68.13	49.13	55.52
34	-68.74	49.74	55.61
34.5	-68.18	49.18	55.7
35	-71.08	52.08	55.79
35.5	-71.35	52.35	55.87
36	-71.21	52.21	55.96
36.5	-67.37	48.37	56.04
37	-72.17	53.17	56.13
37.5	-70.73	51.73	56.21
38	-70.54	51.54	56.29
38.5	-68.81	49.81	56.37
39	-68.69	49.69	56.45
39.5	-68.75	49.75	56.52
40	-68.62	49.62	56.6
40.5	-72.3	53.3	56.67
41	-72.31	53.31	56.75
41.5	-73.67	54.67	56.82
42	-74.2	55.2	56.9

Distancia (m)	P _r (dBm)	L _b (dB)	L (dB)
42.5	-74.04	55.04	56.97
43	-73.88	54.88	57.04
43.5	-77.19	58.19	57.11
44	-76.93	57.93	57.18
44.5	-72.9	53.9	57.25
45	-76.55	57.55	57.32
45.5	-76.39	57.39	57.38
46	-76.43	57.43	57.45
46.5	-76.51	57.51	57.51
47	-72.21	53.21	57.58
47.5	-75.89	56.89	57.64
48	-76.71	57.71	57.71
48.5	-76.75	57.75	57.77
49	-76.65	57.65	57.83
49.5	-73.14	54.14	57.89
50	-76.57	57.57	57.96
50.5	-76.5	57.5	58.02
51	-76.44	57.44	58.08
51.5	-76.91	57.91	58.14
52	-76.92	57.92	58.19
52.5	-76.91	57.91	58.25
53	-76.93	57.93	58.31
53.5	-81.12	62.12	58.37
54	-80.84	61.84	58.42
54.5	-79.84	60.84	58.48
55	-79.72	60.72	58.54
55.5	-79.64	60.64	58.59
56	-79.56	60.56	58.64
56.5	-79.47	60.47	58.7
57	-79.39	60.39	58.75
57.5	-79.39	60.39	58.81
58	-79.33	60.33	58.86

Usando todos los valores de las Tablas A.4 y A.5, se obtuvieron las Figuras 3.42, 3.43 y 3.44 del capítulo 3, que describen las pérdidas de propagación y las obtenidas a partir del modelo de pendiente única en función de la distancia para dos escenarios de pruebas (exteriores e interiores).

ANEXO B IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES ZIGBEE® EN SIMULINK DE MATLAB®

Con el fin de obtener un modelo teórico, como base para la comparación de desempeño en términos de tasa de error de bit (BER), se realizó la simulación de un sistema de comunicaciones punto a punto basado en la tecnología ZigBee® con la herramienta *Simulink® de Matlab®*.

Simulink® es una herramienta software para el diseño, simulación y análisis de sistemas dinámicos. Cuenta con una interfaz gráfica para la construcción de modelos mediante diagramas de bloque y varias librerías con gran número de módulos en el área de comunicaciones, sistemas de control, identificación de sistemas, procesamiento de señales, entre otros.

B.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema de comunicaciones basado en ZigBee® es representado en la Figura B.1. La información se genera a una velocidad de transmisión de datos igual a 250 Kbps y 4 bits de entrada son representados en un símbolo para obtener una velocidad de 62.5 Ksps. Cada símbolo se traduce en una de las 16 secuencias casi ortogonales de 16 chips que va a ser transmitida. La secuencia seleccionada es modulada por desplazamiento de fase en cuadratura con desplazamiento temporal (O-QPSK) para ser enviada por un canal de Ruido Blanco Aditivo Gaussiano (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*). En el extremo receptor la señal es demodulada y desensanchada para recuperar la señal original.

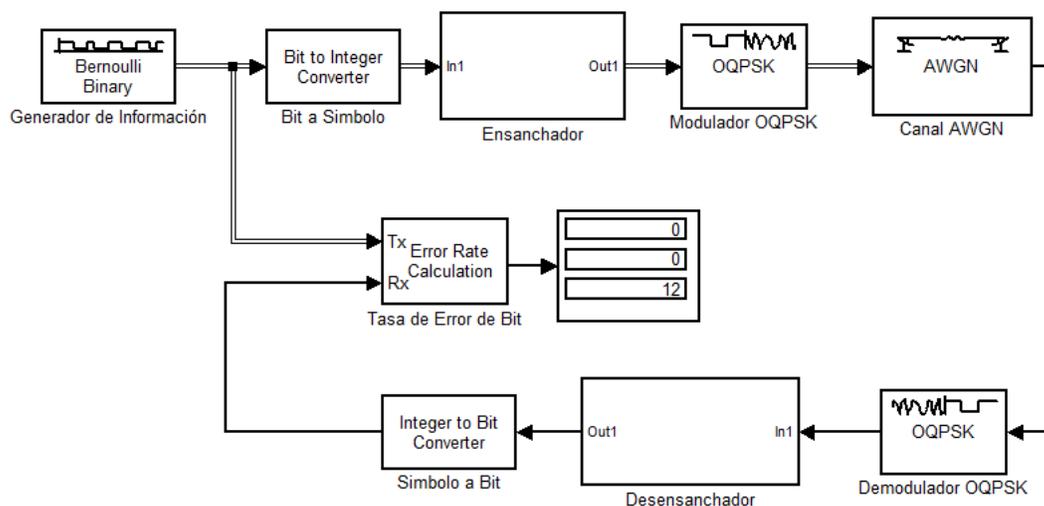


Figura B.1 Sistema de comunicación ZigBee®

B.2 MÓDULOS DEL SISTEMA ZIGBEE®

Se realiza una breve descripción de los módulos que conforman el sistema de comunicación implementado. El procesamiento de la señal es realizado a nivel de banda base, limitando el grado de precisión con el que se puede representar la señal.

- **Generador de información.** La secuencia de información es implementada por medio del bloque Bernoulli Binary Generator, el cual genera números binarios de manera aleatoria usando una distribución de Bernoulli. Para representar una velocidad de 250 Kbps, se define un tiempo de muestreo igual a 4 μ s. La salida es basada en tramas, con 4 muestras por trama, de esta manera se forman conjuntos de 4 bits para ser enviados al mapeador de bit a símbolo.
- **Mapeo de bit a símbolo y símbolo a bit.** En el extremo transmisor, el mapeo de bit a símbolo se realizó por medio del bloque *Bit to Integer Converter*, encargado de representar un conjunto de 4 bits en un número entero entre 0 y 15. En recepción se realiza el proceso contrario, con el fin de recuperar la secuencia de bits transmitida, de esta manera el bloque *Integer to Bit Converter* representa cada símbolo en un número binario de 4 dígitos.
- **Ensanchador.** ZigBee® asigna a cada símbolo una de las 16 secuencias pseudoaleatorias de 16 chips, definidas en el estándar IEEE 802.15.4. Para simular la técnica de espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS), se emplea el bloque *Lookup Table*, el cual asigna a cada símbolo su respectiva secuencia pseudoaleatoria. La secuencia pseudoaleatoria tiene una velocidad igual a 4 veces la velocidad de bit. Debido a las características del bloque, las secuencias pseudoaleatorias son definidas como un número entero, una vez asignadas pasan al bloque *Integer to Bit Converter*, para posteriormente ser moduladas. Los componentes del ensanchador, se observan en la Figura B.2.

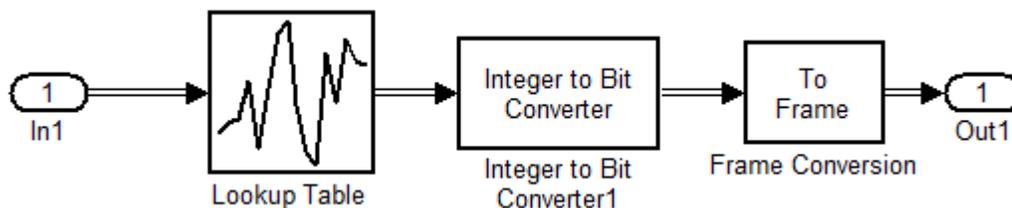


Figura B.2 Componentes del ensanchador

- **Modulación y demodulación.** Las secuencias de chips recibidas del ensanchador, son moduladas por desplazamiento de fase en cuadratura con desplazamiento temporal (O-QPSK). La modulación se realiza en banda base, generando un número complejo con parte real e imaginaria, el cual es enviado sobre el canal de transmisión para luego ser demodulado en recepción.

- Canal.** La simulación emplea un modelo de canal con ruido blanco aditivo gaussiano (AWGN), el cual es un modelo básico y ampliamente adoptado para representar el efecto del ruido térmico en un canal de comunicaciones. Este modelo se caracteriza porque el ruido es estadísticamente independiente de la señal y su amplitud adopta una distribución normal o gaussiana. En el bloque *AWGN Channel* se define una relación energía de bit a densidad espectral de potencia (E_b/N_0) que varía dependiendo de la prueba, 2 bits por símbolo y $2/250000$ s como periodo de símbolo.
- Desensanchador.** En el proceso de desensanchamiento, la secuencia de chips recibida es comparada de manera independiente con cada una de las 16 secuencias pseudoaleatorias por medio de una operación OR Exclusivo (XOR). Se genera un vector de 16 bits, con la comparación bit a bit de ambas secuencias, obteniendo 0 si los bits son iguales o 1 si son diferentes. Luego por medio del bloque *Integrate and Dump* se realiza la suma de todos los componentes del vector, obteniendo 0 si las secuencias son exactamente las mismas y un valor diferente de cero, si las secuencias varían en por lo menos un bit. Para obtener el símbolo correspondiente a la secuencia original, se evaluó si el resultado de la suma es menor o igual a 2 por medio de un comparador relacional, si la condición se cumple, se genera un 1, de lo contrario se genera un cero. La comparación respecto a 2 se realiza con el fin de aceptar secuencias con uno o dos chips erróneos y hacer más estable el sistema. Finalmente, este resultado es multiplicado por el valor entero correspondiente a cada símbolo y debido a que solo una secuencia pseudoaleatoria coincide con la entrada, solo uno de los 16 resultados obtenidos es diferente de cero, por lo tanto es posible sumar todas las salidas para obtener el símbolo decodificado. En la Figura B.3, se observan los componentes del Desensanchador.

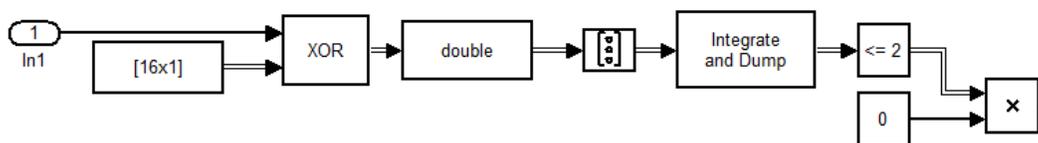


Figura B.3 Componentes del desensanchador

- Tasa de error de bit.** Usando el bloque de cálculo de tasa de error de bit, se comparó la señal de información generada por el transmisor y la obtenida en recepción, con el fin de obtener el desempeño del sistema de comunicación en función de la tasa de error de bits.