

# **ANÁLISIS DE DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DE UN SISTEMA PROTOTIPO DE COMUNICACIÓN DE DATOS MULTIPROPÓSITO VÍA RADIO EN 2.4 GHZ**



**Maury Vanessa Tumbajoy Navia  
Pedro Pablo Ortega Varón**

Directora: Claudia Milena Hernández Bonilla

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo de Radio e InALámbricas -GRIAL  
GNTT Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones  
Señales y Sistemas de Acceso y Difusión Basados en Radio  
Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de  
Telecomunicaciones  
Popayán, 2012**



# **ANÁLISIS DE DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DE UN SISTEMA PROTOTIPO DE COMUNICACIÓN DE DATOS MULTIPROPÓSITO VÍA RADIO EN 2.4 GHZ**



*Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones*

**Maury Vanessa Tumbajoy Navia  
Pedro Pablo Ortega Varón**

Directora: Claudia Milena Hernández Bonilla

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo de Radio e InALámbricas -GRIAL  
GNTT Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones  
Señales y Sistemas de Acceso y Difusión Basados en Radio  
Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de  
Telecomunicaciones**

Popayán, 2012



## CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN .....	1
INTRODUCCIÓN .....	2
1. GENERALIDADES .....	4
1.1 INTRODUCCION .....	5
1.2 ESQUEMA BÁSICO DEL SISTEMA PROTOTIPO DE COMUNICACIÓN DE DATOS VÍA RADIO DE CORTO ALCANCE .....	5
2. KIT DE DESARROLLO NORDIC nRF24LU1-DK.....	8
2.1 CONSIDERACIONES <i>HARDWARE</i> DEL KIT DE DESARROLLO NORDIC nRF24LU1-DK.....	8
2.1.1 Tarjeta de Funciones Básicas.....	9
2.1.2 Módulo Radio nRF24LU1 .....	10
2.1.2.1 Transceptor de Radio Frecuencia.....	11
2.2 APLICACIÓN DE CONFIGURACIÓN Y EVALUACIÓN.....	15
2.3 PROTOCOLO <i>ENHANCED SHOCKBURST</i> .....	17
2.3.1 Funciones del Protocolo <i>Enhanced ShockBurst</i> .....	18
2.3.2 Funcionamiento del Protocolo <i>Enhanced ShockBurst</i> .....	18
2.3.3 Formato de Paquete <i>Enhanced ShockBurst</i> .....	19
2.3.3.1 Preámbulo.....	19
2.3.3.2 Dirección .....	19
2.3.3.3 Control de paquete .....	19
2.3.2.4 Carga útil.....	20
2.3.2.5 CRC.....	20
3. ESCENARIOS Y PLAN DE PRUEBAS .....	21
3.1 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA PROTOTIPO DE COMUNICACIÓN DE DATOS.....	21
3.2 PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN.....	22
3.2.1 Parámetros Variables .....	23
3.2.2 Parámetros Fijos.....	23

3.3 ESCENARIOS DE EVALUACIÓN.....	24
3.3.1 Escenario Exteriores.....	24
3.3.2 Escenario Interiores.....	25
3.3.3 Escenarios con Interferencia .....	26
3.3.3.1 Escenario con Interferencia con Wi-Fi. ....	26
3.3.3.2 Escenario con Interferencia con el Kit de Desarrollo CY3653.....	26
3.4 PLAN DE PRUEBAS.....	26
3.4.1 Verificación de Datos del Fabricante .....	26
3.4.1.1 Potencia de Transmisión.....	27
3.4.1.2 Frecuencia de Operación.....	27
3.4.1.3 Exactitud en Frecuencia Respecto a la Temperatura. ....	28
3.4.1.4 Medida de Ancho de Banda de la Señal. ....	29
3.4.2 Medida de Tasa de Error de Bit (BER) del Sistema.....	29
3.4.3 Medida de la Energía de Bit respecto a la Densidad Espectral de Potencia de Ruido (Eb/No) .....	30
3.4.3.1 Potencia de Recepción. ....	33
3.4.4 Medida de la Tasa de Error de Bit (BER) ante Interferencia.....	35
3.4.4.1 Interferencia con Wi-Fi.....	35
3.4.4.2 Interferencia con el Kit de Desarrollo CY3653 .....	36
4. EJECUCIÓN DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	38
4.1 VERIFICACIÓN DE DATOS DEL FABRICANTE.....	38
4.1.1 Potencia de Transmisión Efectiva.....	38
4.1.2 Frecuencia de Operación.....	39
4.1.3 Exactitud en Frecuencia respecto a la Temperatura.....	43
4.1.4 Medida de Ancho de Banda de la Señal.....	45
4.2 TASA DE ERROR DE BIT (BER) DEL SISTEMA .....	49
4.2.1 Resultados en Exteriores.....	49
4.2.1.1 BER a 1 Mbps.....	50
4.2.1.2 BER a 2 Mbps.....	50
4.2.2 Resultados en Interiores .....	52

4.2.2.1 BER a 1 Mbps.....	53
4.2.2.2 BER a 2 Mbps.....	53
4.2.3 Comparación de los Resultados de BER en Exteriores e Interiores .....	55
4.3 OBTENCIÓN DE LA ENERGÍA DE BIT RESPECTO A LA DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA DE RUIDO (Eb/No) .....	57
4.3.1. Potencia de Recepción en Exteriores e Interiores .....	57
4.3.2 Modelo de Pérdidas de Propagación de Pendiente Única.....	57
4.3.3 Predicción de Cobertura del Sistema Prototipo de Comunicación de Datos en Exteriores con <i>Wireless Insite</i> ®.....	60
4.3.4 Predicción de Cobertura del Sistema Prototipo de Comunicación de Datos en Interiores con <i>Wireless Insite</i> ®.....	64
4.3.5 Comparación y Análisis de los Distintos Resultados de Potencia de Recepción.....	68
4.4 DESEMPEÑO TEÓRICO A NIVEL FÍSICO DEL SISTEMA IMPLEMENTADO EN EXTERIORES .....	70
4.4.1 Relación de Energía de Bit respecto a la Densidad Espectral de Potencia de Ruido en Exteriores con Potencia de Transmisión igual a -12 dBm .....	71
4.4.2 Relación de Energía de Bit respecto a la Densidad Espectral de Potencia de Ruido en Exteriores con Potencia de Transmisión igual a -18 dBm .....	73
4.5 DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DEL SISTEMA IMPLEMENTADO EN INTERIORES .....	75
4.5.1 Relación de Energía de Bit respecto a la Densidad Espectral de Potencia de Ruido en Interiores con Potencia de Transmisión igual a -12 dBm. ....	75
4.5.2 Relación de Energía de Bit respecto a la Densidad Espectral de Potencia de Ruido en Interiores con Potencia de Transmisión igual a -18 dBm. ....	77
4.6 COMPARACION DE LOS RESULTADOS DE DESEMPEÑO PARA	

EXTERIORES E INTERIORES .....	79
4.7 DESEMPEÑO DEL SISTEMA PROTOTIPO IMPLEMENTADO ANTE INTERFERENCIA .....	81
4.7.1 Desempeño ante Interferencia Wi-Fi .....	81
4.7.2 Desempeño ante Interferencia con el Kit de Desarrollo CY3653.....	83
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	87
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	90

## LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1.1 Esquema Básico del Sistema de Comunicación de Datos Vía Radio ....	6
Figura 2.1 Componentes <i>Hardware</i> del Kit de Desarrollo nRF24LU1-DK.....	9
Figura 2.2 Diagrama en Bloques del Módulo Radio nRF24LU1.....	10
Figura 2.3 Espectro IEEE 802.11 y Espectro Nordic.....	11
Figura 2.4 Diagrama en Bloques del Transceptor RF.....	12
Figura 2.5 Interfaz Gráfica de la Aplicación <i>Software</i> CES.....	16
Figura 2.6 Reporte de la Aplicación <i>Software</i> CES en el Receptor.....	17
Figura 2.7 Protocolo <i>Enhanced ShockBurst</i> .....	17
Figura 2.8 Formato de Transmisión de Paquetes.....	19
Figura 2.9 Campo de Control de Paquete.....	19
Figura 3.1 Sistema Prototipo de Comunicación de Datos Vía Radio.....	21
Figura 3.2 Escenario Exteriores Centro Deportivo Universitario (CDU).....	24
Figura 3.3 Escenario Interiores Pasillo de Ingenierías.....	25
Figura 3.4 Espectro GFSK.....	28
Figura 3.5 Prueba de la Exactitud en Frecuencia Respecto a la Temperatura.....	29
Figura 3.6 Medida de la Potencia de Recepción.....	34
Figura 3.7 Prueba de Desempeño del Sistema ante Interferencia.....	37
Figura 4.1 Frecuencia de Marca de la Señal para 1 Mbps.....	40
Figura 4.2 Frecuencia de Espacio de la Señal para 1 Mbps.....	40
Figura 4.3 Frecuencia de Marca de la Señal para 2 Mbps.....	42
Figura 4.4 Frecuencia de Espacio de la Señal para 2 Mbps.....	42
Figura 4.5 Frecuencia Central a Temperatura Ambiente.....	44
Figura 4.6 Frecuencia Central a Alta Temperatura.....	44
Figura 4.7 Ancho de Banda de la Señal a 20 dBr para 1 Mbps.....	45
Figura 4.8 Ancho de Banda de la Señal a 20 dBr para 2 Mbps.....	46
Figura 4.9 Ancho de Banda de la Señal de 30 dBr para 1 Mbps.....	47
Figura 4.10 Ancho de Banda de la Señal a 30 dBr para 2 Mbps.....	48
Figura 4.11 BER en Exteriores.....	51
Figura 4.12 PER en Exteriores.....	52
Figura 4.13 BER en Interiores.....	55
Figura 4.14 PER en Interiores.....	55
Figura 4.15 BER vs Distancia en Interiores y Exteriores.....	56
Figura 4.16 Modelo de Pérdidas Básicas de Propagación para Exteriores.....	58
Figura 4.17 Modelo de Pérdidas Básicas de Propagación para Interiores.....	59
Figura 4.18 Potencia Recepción para la Simulación 1.....	61
Figura 4.19 Potencia de Recepción vs Distancia.....	61
Figura 4.20 Pérdidas de Propagación vs Distancia.....	62
Figura 4.21 Potencia de Recepción para la Simulación 2.....	62
Figura 4.22 Potencia de Recepción vs Distancia.....	63
Figura 4.23 Pérdidas de Propagación vs Distancia.....	63
Figura 4.24 Potencia de Recepción para la Simulación 3.....	64
Figura 4.25 Potencia de Recepción vs Distancia.....	65

Figura 4.26 Pérdidas de Propagación vs Distancia .....	65
Figura 4.27 Trazado de Rayos .....	66
Figura 4.28 Potencia de Recepción para la Simulación 4 .....	67
Figura 4.29 Potencia de Recepción vs Distancia .....	67
Figura 4.30 Potencia de Recepción vs Distancia .....	68
Figura 4.31 Potencia de Recepción vs Distancia en Exteriores .....	69
Figura 4.32 Potencia de Recepción vs Distancia en Interiores .....	69
Figura 4.33 Desempeño Teórico del Sistema de Comunicación.....	70
Figura 4.34 Desempeño Teórico del Sistema de Comunicación.....	71
Figura 4.35 BER vs Eb/No en Exteriores .....	73
Figura 4.36 BER vs Eb/No en Exteriores .....	75
Figura 4.37 BER vs Eb/No en Interiores.....	76
Figura 4.38 BER vs Eb/No en Interiores.....	79
Figura 4.39 BER vs Eb/No en Exteriores e Interiores .....	80
Figura 4.40 BER vs Eb/No en Exteriores ante Interferencia Wi-Fi .....	82
Figura 4.41 BER vs Eb/No en Interiores ante Interferencia Wi-Fi .....	83
Figura 4.42 BER vs CIR en Exteriores ante Interferencia CY3653 .....	84
Figura 4.43 BER vs CIR en Interiores ante Interferencia CY3653.....	86

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1 Canales en Frecuencia.....	13
Tabla 3.1 Componentes <i>Hardware</i> y <i>Software</i> del Sistema Prototipo.....	22
Tabla 3.2 Parámetros Variables del Sistema Prototipo .....	23
Tabla 3.3 Parámetros Fijos del Sistema Prototipo .....	23
Tabla 3.4 Configuración de Parámetros del Módulo Radio Transmisor .....	28
Tabla 4.1 Potencias de Transmisión Efectiva.....	39
Tabla 4.2 Resumen de Resultados del Ancho de Banda Medido .....	48
Tabla 4.3 Valores de BER y PER en Exteriores para 1 Mbps a -12 dBm.....	50
Tabla 4.4 Valores de BER y PER en Exteriores para 1 Mbps a -18 dBm.....	50
Tabla 4.5 Valores de BER y PER en Exteriores para 2 Mbps a -12 dBm.....	50
Tabla 4.6 Valores de BER y PER en Exteriores para 2 Mbps a -18 dBm.....	51
Tabla 4.7 Valores de BER y PER en Interiores para 1 Mbps a -12 dBm.....	53
Tabla 4.8 Valores de BER y PER en Interiores para 1 Mbps a -18 dBm.....	53
Tabla 4.9 Valores de BER y PER en Interiores para 2 Mbps a -12 dBm.....	54
Tabla 4.10 Valores de BER y PER en Interiores para 2 Mbps a -18 dBm.....	54
Tabla 4.11 Constantes de Propagación para Exteriores .....	57
Tabla 4.12 Constantes de Propagación para Interiores .....	59
Tabla 4.13 Valores de BER y Eb/No en Exteriores para 1 Mbps a -12 dBm.....	72
Tabla 4.14 Valores de BER y Eb/No en Exteriores para 2 Mbps a -12 dBm.....	72
Tabla 4.15 Valores de BER y Eb/No en Exteriores para 1 Mbps a -18 dBm.....	74
Tabla 4.16 Valores de BER y Eb/No en Exteriores para 2 Mbps a -18 dBm.....	74
Tabla 4.17 Valores de BER y Eb/No en Interiores para 1 Mbps a -12 dBm .....	75
Tabla 4.18 Valores de BER y Eb/No en Interiores para 2 Mbps a -12 dBm .....	76
Tabla 4.19 Valores de BER y Eb/No en Interiores para 1 Mbps a -18 dBm .....	78
Tabla 4.20 Valores de BER y Eb/No en Interiores para 2 Mbps a -18 dBm .....	78
Tabla 4.21 Valores de BER y Eb/No en Exteriores ante Interferencia Wi-Fi .....	81
Tabla 4.22 Valores de BER y Eb/No en Interiores ante Interferencia Wi-Fi .....	82
Tabla 4.23 Valores de BER y Eb/No en Exteriores ante Interferencia CY3653.....	84
Tabla 4.24 Valores de BER y Eb/No en Interiores ante Interferencia CY3653.....	85

## LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>ACK</b>	<i>Acknowledgement</i> , Reconocimiento.
<b>BER</b>	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit.
<b>CES</b>	<i>Configuration and Evaluation Suite</i> , Aplicación de Configuración y Evaluación.
<b>CIR</b>	<i>Carrier to Interference Ratio</i> , Relación Portadora a Interferencia.
<b>CD</b>	<i>Carrier Detect</i> , Detección de Portadora.
<b>CRC</b>	<i>Cyclic Redundancy Check</i> , Verificación de Redundancia Cíclica.
<b>DIL</b>	<i>Dual in Line</i> , Doble Línea.
<b>DSSS</b>	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> , Espectro Ensanchado por Secuencia Directa.
<b>DK</b>	<i>Development Kit</i> , Herramienta de Desarrollo.
<b>Eb/No</b>	<i>Energy per Bit to Noise Power Spectral Density Ratio</i> , Relación Energía de Bit a Densidad Espectral de Potencia de Ruido.
<b>ETSI</b>	<i>European Telecommunications Standards Institute</i> , Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones.
<b>FCC</b>	<i>Federal Communication Commission</i> , Comisión Federal de Comunicaciones.
<b>FIFO</b>	<i>First Input First Output</i> , Primero en Entrar, Primero en Salir.
<b>FSK</b>	<i>Frequency Shift keying</i> , Modulación por Cambio de Frecuencia.
<b>FM</b>	<i>Frequency Modulation</i> , Modulación en Frecuencia.
<b>GFSK</b>	<i>Gaussian Frequency Shift keying</i> , Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano.
<b>GPIO</b>	<i>Input/Output Ports</i> , Puertos de Entrada y Salida.
<b>ISM</b>	<i>Industrial, Scientific and Medical</i> , Industrial, Científica y Médica.
<b>ISP</b>	<i>Serial Programmable Interface</i> , Interfaz Serial Programable.

<b>LNA</b>	<i>Low Noise Amplifier</i> , Amplificador de Bajo Ruido.
<b>NF</b>	<i>Noise Figure</i> , Figura de Ruido.
<b>No</b>	<i>Noise Spectral Density</i> , Densidad Espectral de Potencia de Ruido.
<b>MCU</b>	<i>Microcontroller Unit</i> , Microcontrolador.
<b>OSI</b>	<i>Open System Interconnection</i> , Interconexión de Sistemas Abiertos.
<b>PA</b>	<i>Power Amplifier</i> , Amplificador de Potencia.
<b>PER</b>	<i>Packet Error Rate</i> , Tasa de Error de Paquete.
<b>PCB</b>	<i>Printed Circuit Board</i> , Tarjeta de Circuito Impreso.
<b>RF</b>	<i>Radio Frequency</i> , Radio Frecuencia.
<b>RFIC</b>	<i>Radio Frequency Integrated Circuits</i> , Circuitos Integrados de Radiofrecuencia.
<b>RSSI</b>	<i>Receive Signal Strength Indication</i> , Indicador de Intensidad de la Señal Recibida.
<b>SMA</b>	<i>SubMiniature Version A</i> , Subminiatura Versión A.
<b>SPI</b>	<i>Serial Peripheral Interface</i> , Interfaz Periférico Serie.
<b>SPD</b>	<i>Signal Processing Designer</i> , Diseñador de Procesamiento de Señales.
<b>SRN</b>	<i>Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido.
<b>ULP</b>	<i>Ultra Low Power</i> , Potencia Ultra Baja.
<b>USB</b>	<i>Universal Serial Bus</i> , Bus Serie Universal.
<b>WPAN</b>	<i>Wireless Personal Area Network</i> , Red Inalámbrica de Área Personal.



## RESUMEN

En este trabajo de grado se presenta la evaluación y el análisis de desempeño a nivel físico de un sistema prototipo de comunicación de datos multipropósito vía radio en 2.4 GHz. Inicialmente, se presenta el esquema básico de un sistema de comunicación de datos y se describen los componentes *hardware* del kit de desarrollo nRF24LU1-DK especificando los módulos radio nRF24LU1 utilizados para implementar el sistema. Después, se detallan los escenarios de evaluación donde las señales transmitidas son afectadas por diferentes fenómenos físicos presentes en el canal de comunicación inalámbrico tales como atenuación, ruido, multitrayectoria, e interferencia, que afectan el desempeño del sistema de comunicación de datos. Además se presenta el plan de pruebas a realizar para evaluar el desempeño del mismo. Finalmente se documentan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas al sistema prototipo de comunicación de datos implementado, comparando los resultados reales con los resultados obtenidos con la herramienta *software* de predicción de propagación *Wireless Insite®*.

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento explosivo de las Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN, *Wireless Personal Area Network*) y su gran acogida en el mercado actual de telecomunicaciones se debe a la facilidad de acceso y configuración, movilidad, escalabilidad, flexibilidad, y bajo costo de implementación.

El uso de bandas de frecuencia reguladas por la Comisión Federal de Comunicaciones <sup>1</sup> (FCC, *Federal Communication Commission*) y el Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones <sup>2</sup> (ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*), que no requieren el pago de licencias para su operación, como las bandas libres de uso Industrial, Científico y Médico (ISM, *Industrial, Scientific and Medical*) contribuyen a la masificación, aceptación y popularización de las redes inalámbricas de área personal, provocando un crecimiento acelerado sin ningún tipo de control ni planificación de los enlaces vía radio, lo que facilita la aparición de numerosos servicios y dispositivos, dando paso a problemas de interferencia que afectan el desempeño de los sistemas de comunicación de datos que operan en las bandas ISM [1].

Los sistemas de comunicación inalámbricos tienen desventajas debido a que las ondas electromagnéticas se ven afectadas por diferentes fenómenos físicos presentes en el canal de comunicación, tales como: multitrayectoria, ruido, interferencia, y dispersión, entre otros, los cuales degradan el desempeño del sistema de comunicación de datos.

Por lo anterior es importante evaluar y analizar el desempeño a nivel físico de un sistema de comunicación de datos en la banda de 2.4 GHz en diferentes escenarios, bajo distintos parámetros de configuración y bajo condiciones de interferencia, con el fin de obtener diferentes resultados que al compararse permiten analizar el desempeño del sistema de comunicación de datos vía radio.

El análisis del desempeño consiste en determinar cómo es el funcionamiento en el primer nivel del Modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, *Open System Interconnection*), donde la información procesada es una secuencia de bits, por tanto los parámetros a analizar son la Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*) considerando diferentes valores de la Relación de Energía de Bit respecto a

---

<sup>1</sup> Página Web <http://www.fcc.gov/>, la FCC regula la banda 2.4 GHz en América.

<sup>2</sup> Página Web <http://www.etsi.org/>, la ETSI regula la banda 2.4 GHz en Europa.

Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ , *Energy per Bit to Noise Power Spectral Density Ratio*) y la Relación Portadora a Interferencia (CIR, *Carrier Interference Ratio*).

En este trabajo de grado se implementó un sistema prototipo de comunicación de datos multipropósito vía radio en 2.4 GHz, con el kit de desarrollo nRF24LU1-DK de Nordic *Semiconductor*. El kit nRF24LU1 utiliza la Aplicación de Configuración y Evaluación (CES, *Configuration and Evaluation Suite*) para la modificación de los parámetros de configuración de los módulos radio nRF24LU1, permitiendo la evaluación y el análisis del desempeño a nivel físico del sistema de comunicación de datos.

El presente trabajo de grado consta de cinco capítulos y dos anexos:

**Capítulo 1. Generalidades.** Detalla el esquema básico del sistema de comunicación de datos multipropósito vía radio en 2.4 GHz, y especifica los módulos radio nRF24LU1 utilizados para la implementación del sistema.

**Capítulo 2. Kit de desarrollo Nordic nRF24LU1-DK.** Describe los componentes *hardware* del kit nRF24LU1, presenta la solución *software* que permite la modificación de los parámetros de configuración, el análisis y la evaluación de la comunicación vía radio.

**Capítulo 3. Escenario y Plan de Pruebas.** Presenta los parámetros de configuración del sistema implementado, detalla los escenarios de evaluación propuestos y documenta el plan de pruebas a realizar para evaluar el desempeño del sistema de comunicación de datos.

**Capítulo 4. Ejecución de Pruebas y análisis de resultados.** Documenta los resultados obtenidos y el respectivo análisis del desempeño del sistema de comunicación en los escenarios propuestos, comparando los resultados con los obtenidos en simulación con la herramienta *software* de predicción de propagación *Wireless Insite®*.

**Capítulo 5. Conclusiones y Trabajos Futuros.** Presenta las conclusiones del trabajo de grado y propone posibles trabajos futuros.

**Anexo A.** Presenta un análisis espectral de la Modulación por Cambio de Frecuencia (FSK, *Frequency Shift keying*) y la Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK, *Gaussian Frequency Shift keying*), y se describe el mapa de registros para configurar y controlar los módulos radio nRF24LU1 a nivel de bit.

**Anexo B.** Realiza el análisis de cobertura de un sistema radio de comunicación de datos multipropósito de corto alcance en la banda de 2.4 GHz en interiores y exteriores, por medio de la herramienta software de predicción de propagación *Wireless InSite®*.

## **1. GENERALIDADES**

## **1.1 INTRODUCCION**

Es importante el estudio del desempeño de los sistemas de comunicación de datos vía radio en diferentes escenarios dado que los mecanismos de propagación<sup>3</sup> presentes tanto en exteriores como en interiores afectan el desempeño de los mismos, por lo que se dice que el medio de propagación o canal de comunicación presenta una alta complejidad y variabilidad [2].

Además es importante presentar el análisis del comportamiento de los sistemas de comunicación de datos bajo distintos parámetros de configuración y ante condiciones de interferencia, ya que la modificación de los parámetros y las señales del generador de interferencia influyen en el desempeño de los sistemas de comunicación de datos a nivel físico.

Este capítulo analiza de manera general el esquema básico del sistema de comunicación implementado vía radio.

## **1.2 ESQUEMA BÁSICO DEL SISTEMA PROTOTIPO DE COMUNICACIÓN DE DATOS VÍA RADIO DE CORTO ALCANCE**

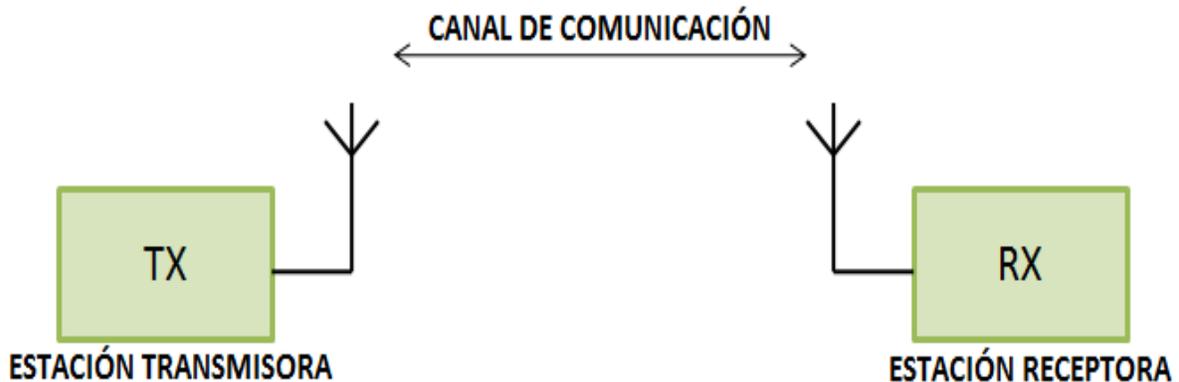
Las comunicaciones radio necesitan de un sistema de comunicación inalámbrico que establezca el enlace entre la estación transmisora y la estación receptora, adaptando la señal al canal de comunicación mediante un proceso de modulación, para posteriormente extraerla mediante el proceso inverso de demodulación.

El sistema prototipo de comunicación de datos vía radio de corto alcance implementado se compone de una estación transmisora, de un canal de comunicación y de una estación receptora, como se muestra en la figura 1.1

---

<sup>3</sup> Los principales mecanismos de propagación son: reflexión, difracción y dispersión [25].

**Figura 1.1** Esquema Básico del Sistema de Comunicación de Datos Vía Radio



El kit de desarrollo nRF24LU1-DK de Nordic *Semiconductor* cuenta con diferentes versiones de módulos radio nRF24LU1, 1 módulo radio nRF24LU1 con Antena Impresa (PCB, *Printed Circuit Board*) y 1 módulo radio nRF24LU1 con Conector Subminiatura de Precisión (SMA, *Subminiature Version A*). El sistema prototipo a implementar utilizara como estación receptora el módulo radio nRF24LU1 con Antena monopolo Impresa de lambda cuartos (PCB) [4], y como estación transmisora el módulo radio nRF24LU1 con Conector Subminiatura de Precisión (SMA) donde se conecta una antena externa omnidireccional en la frecuencia de 2.4 GHz. En adelante la estación receptora se definirá como módulo radio receptor y la estación transmisora como módulo radio transmisor del sistema prototipo de comunicación de datos implementado con la herramienta de desarrollo nRF24LU1-DK.

El módulo radio transmisor es el encargado del proceso de Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK) con el fin de adaptar la señal de información al medio de transmisión facilitando su propagación, optimizando el uso del ancho de banda y aumentando la inmunidad frente a ruido, hasta el extremo receptor.

El módulo radio receptor se encarga de detectar la señal, decodificarla e interpretarla, además de determinar el número de paquetes perdidos durante la transmisión.

El canal de comunicación es el medio por el cual se propagan las ondas electromagnéticas. Las características del medio inalámbrico cambian dependiendo del escenario donde se implemente el sistema de comunicación, y los mecanismos de propagación que afectan las ondas dependen del tipo de escenario, los cuales generan cambios de amplitud y fase en cada una de las

réplicas de la señal recibida. Conocer estos mecanismos y sus principios es fundamental para analizar y evaluar el desempeño a nivel físico del sistema prototipo de comunicación de datos implementado.

Las pérdidas de propagación dependen directamente de la distancia entre el módulo radio transmisor y el módulo radio receptor, la frecuencia de operación y las características del escenario, disminuyendo el nivel de la potencia de la señal recibida [24].

Los modelos de propagación radio son complejos y diversos, desarrollados para escenarios y frecuencias específicas. Estos modelos tratan de describir las pérdidas de la señal en determinado escenario de propagación. La importancia de los modelos radica en predecir la potencia de la señal que se recibe a determinada distancia [1].

Para el desarrollo del presente trabajo de grado el modelo utilizado para predecir la potencia de la señal en diferentes escenarios es el modelo de pérdidas de propagación de pendiente única [18] y la ecuación de balance de enlace.

## 2. KIT DE DESARROLLO NORDIC nRF24LU1-DK

El kit de desarrollo nRF24LU1-DK<sup>4</sup> (DK, *Development Kit*), es la principal herramienta en el desarrollo del presente trabajo de grado, la cual permite implementar sistemas de comunicación de datos multipropósito vía radio en 2.4 GHz y realizar las pruebas necesarias para el análisis del desempeño a nivel físico, en diferentes entornos o escenarios.

Este capítulo describe los componentes *hardware* del kit de desarrollo nRF24LU1-DK, explicando sus características, funcionalidades, y modos de operación, además se presenta la solución *software*, de la cual se dispone para la evaluación del desempeño del sistema de comunicación implementado.

### 2.1 CONSIDERACIONES *HARDWARE* DEL KIT DE DESARROLLO DE NORDIC nRF24LU1-DK

El kit de desarrollo nRF24LU1-DK es una plataforma de desarrollo y evaluación, el cual usa la Aplicación *software* de Configuración y Evaluación (CES) para evaluar de manera práctica su funcionamiento y desempeño [4].

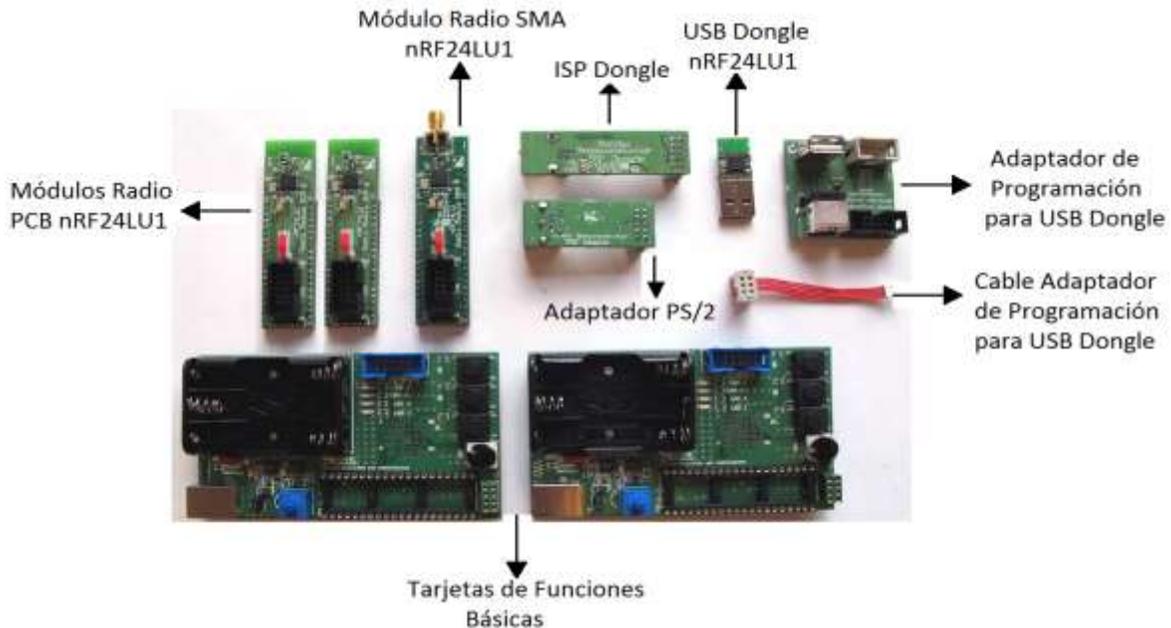
El kit nRF24LU1-DK está compuesto por 2 tarjetas de funciones básicas, 2 módulos radio nRF24LU1 con Antenas Impresas (PCB) [3], 1 módulo radio nRF24LU1 con Conector Subminiatura de Precisión (SMA), 1 Bus Serie Universal (USB, *Universal Serial Bus*) *Dongle* nRF24LU1, 1 adaptador de programación para USB *Dongle* nRF24LU1, 1 cable adaptador de programación para USB *Dongle* nRF24LU1, 1 Adaptador PS/2, y la Interfaz Serie Programable (ISP, *Serial Programmable Interface*) *Dongle*. El adaptador PS/2 permite conectar un mouse o un teclado PS/2 a los módulos radio nRF24LU1 [4].

En la figura 2.1 se muestran los componentes *hardware* del kit de desarrollo nRF24LU1-DK.

---

<sup>4</sup>Página Web del fabricante <http://www.nordicsemi.com/>.

**Figura 2.1** Componentes *Hardware* del Kit de Desarrollo nRF24LU1-DK



### 2.1.1 Tarjeta de Funciones Básicas

Las tarjetas de funciones básicas cuentan con dos opciones de alimentación por medio de baterías AAA o a través del cable USB; tiene tres *leds* indicadores de estados y 3 botones que dependiendo del *firmware* que se esté ejecutando cumplen funciones específicas. El voltaje de operación del módulo radio es de 3.6 voltios, con un consumo de corriente en transmisión de 7.0 mA, 7.5 mA, 9.0 mA y 11.3 mA dependiendo de la potencia de transmisión -18 dBm, -12 dBm, -6 dBm y 0 dBm respectivamente; en recepción 12.3 mA para 2 Mbps y 11.8 mA para 1 Mbps. El bajo consumo de energía en transmisión es posible debido a que los módulos radio nRF24LU1 cuentan con una función avanzada en el manejo de baja potencia combinando los modos de espera con una alta velocidad de transmisión de datos lo que disminuye el tiempo de transmisión y el consumo de corriente [33].

Las tarjetas proporcionan la facilidad de comunicación con el computador por puerto USB, permiten la correcta conectividad de los componentes *hardware* disponibles en el kit de desarrollo nRF24LU1-DK al contar con un Conector de Doble Línea (DIL, *Dual in Line*) para la conexión de los módulos radio nRF24LU1, y una Interfaz de Periférico Serie (SPI, *Serial Peripheral Interface*) para conectar el adaptador PS/2 y la Interfaz Serie Programable (ISP) *Dongle*.

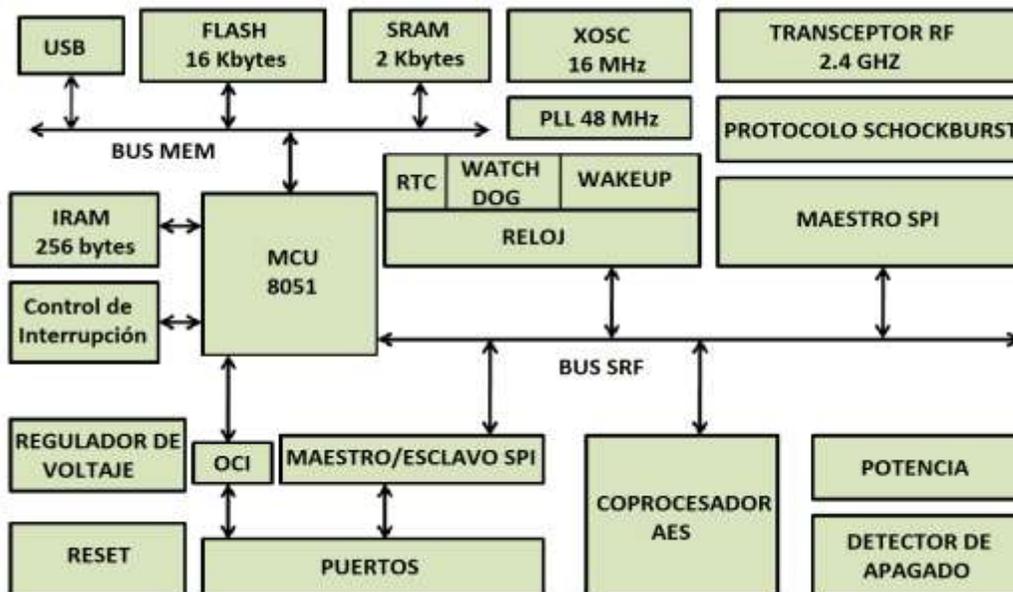
### 2.1.2 Módulo Radio nRF24LU1

Está integrado por un transceptor de Radio Frecuencia (RF, *Radio Frequency*) en 2.4 GHz, una USB2.0 de alta velocidad, un Microcontrolador 8051 (MCU, *Microcontroller Unit*) de 8 bits, una memoria *flash* de 16 Kbytes y un oscilador de bajo costo de 16 MHz +/- 60 ppm. El transceptor nRF24LU1 se alimenta directamente del puerto USB ya que cuenta con un regulador interno, lo que produce una alta resistencia al ruido externo [4].

La memoria *flash* del transceptor nRF24LU1 se programó conectando la Interfaz Serie Programable (ISP) *Dongle* en la Interfaz de Periférico Serie (SPI) de la tarjeta, tanto el ISP *Dongle* como la tarjeta de funciones básicas van conectadas al computador [6].

Los módulos radio cuentan con un detector de apagado (*Brown-out*) el cual permite que las operaciones sean interrumpidas de manera segura, reiniciando el transceptor nRF24LU1 cuando ocurre una perturbación de energía durante una operación de escritura de la memoria *flash*. En la figura 2.2 se muestra el diagrama en bloques del módulo radio nRF24LU1.

**Figura 2.2** Diagrama en Bloques del Módulo Radio nRF24LU1 [4]

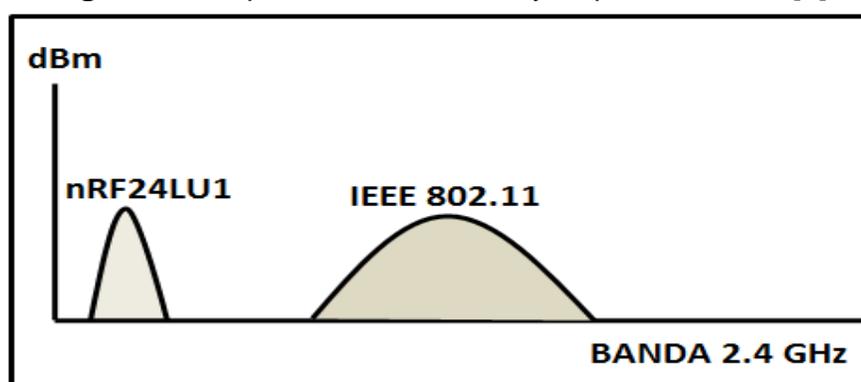


Por otro lado, los módulos radio minimizan el consumo de energía ya que no usa técnicas de transmisión, como la de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*) usada por IEEE 802.11, sino que transmite a una alta velocidad de transmisión de datos usando una técnica de

modulación<sup>5</sup> eficiente en el uso del espectro, y cuando existe la presencia de señales interferentes los datos se transfieren a un canal alternativo o se transmiten en un instante de tiempo después<sup>6</sup>. [7][30].

En la figura 2.3 se compara el espectro de IEEE 802.11 utilizando la técnica de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS) y el espectro de nRF24LU1, se evidencia que nRF24LU1 hace un uso eficiente del espectro mientras que IEEE 802.11 ocupa un mayor ancho de banda en la transmisión, demostrando así la diferencia en cuanto al uso del espectro de cada tecnología.

**Figura 2.3** Espectro IEEE 802.11 y Espectro Nordic [7]



**2.1.2.1 Transceptor de Radio Frecuencia.** En la figura 2.4 se muestra el transceptor RF. El transmisor se compone de un Amplificador de Potencia (PA, *Power Amplifier*), un sintetizador de Radio Frecuencia (RF) totalmente integrado con un cristal de bajo costo, un filtro y un modulador que utiliza la técnica de Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK), y el receptor se compone de un Amplificador de Bajo Ruido (LNA, *Low Noise Amplifier*), un sintetizador de Radio Frecuencia (RF), un filtro y un demodulador GFSK.

En la técnica de Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK) la información es pasada por un filtro gaussiano antes de modular la señal, dando como resultado una suave oscilación de frecuencias entre los dos niveles alto “1” y bajo “0”, originando un espectro más limpio y estrecho de la señal modulada comparada con la Modulación por Cambio de Frecuencia (FSK)<sup>7</sup>.

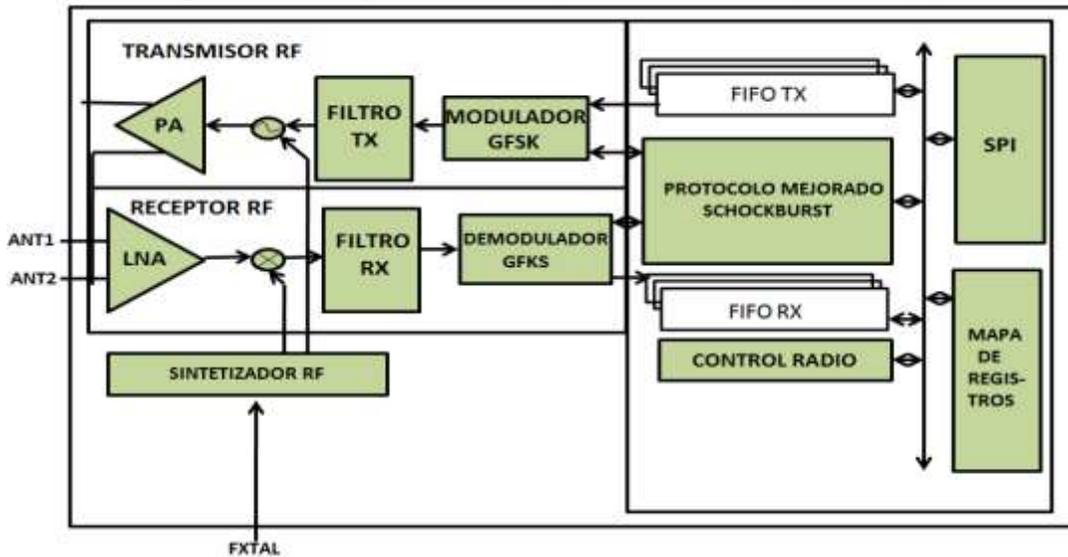
---

<sup>5</sup> Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK).

<sup>6</sup> Protocolo de Agilidad en frecuencia [31].

<sup>7</sup>En el anexo A se presenta un análisis espectral de la Modulación por Cambio de Frecuencia (FSK) y la Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK).

**Figura 2.4** Diagrama en Bloques del Transceptor RF [4]



El módulo radio receptor tiene una sensibilidad de -85 dBm a 1 Mbps y de -82 dBm a 2 Mbps [4], el módulo radio transmisor es un amplificador de potencia clase AB de dos etapas con regulación interna de voltaje con cuatro opciones para la programación de la potencia de transmisión<sup>8</sup>.

El transceptor nRF24LU1 está diseñado para operar en la banda libre (ISM)<sup>9</sup> de 2.400 a 2.525 GHz, emplea el protocolo *Enhanced ShockBurst* en banda base en el nivel de enlace de datos como modo de transmisión en ráfagas, manejando un consumo Ultra Bajo de Energía (ULP, *Ultra Low Power*) al disminuir la carga de procesamiento del Microcontrolador (MCU) para aplicaciones inalámbricas.

Para lograr una comunicación fiable en un escenario donde las interferencias siempre se esperan, el transceptor nRF24LU1 envía los paquetes en ráfagas cortas a una alta velocidad de transmisión de datos, disminuyendo el tiempo<sup>10</sup> de ocupación del medio inalámbrico y el consumo de energía.

<sup>8</sup> Potencias de transmisión 0, -6, -12 y -18 dBm.

<sup>9</sup> Definida por la Unión Internacional de Telecomunicaciones en la sección de Radiocomunicaciones (ITU-R) [8].

<sup>10</sup> Se refiere al tiempo entre la transición del modo transmisor al modo receptor de 130 µs.

Por otra parte, la ocupación de canal para 1 Mbps es 1 MHz y para 2 Mbps es 2 MHz, es decir, la eficiencia espectral es de 1 bps, por lo cual se disponen de 125 canales<sup>11</sup> alternativos en frecuencia independientes para evitar interferencia.

En la tabla 2.1 se detalla la distribución de canales disponibles para los módulo radio nRF24LU1.

**Tabla 2.1 Canales en Frecuencia**

<b>Canal</b>	<b>Frecuencia (MHz)</b>	<b>Canal</b>	<b>Frecuencia (MHz)</b>	<b>Canal</b>	<b>Frecuencia (MHz)</b>
<b>0</b>	2400	<b>42</b>	2442	<b>84</b>	2484
<b>1</b>	2401	<b>43</b>	2443	<b>85</b>	2485
<b>2</b>	2402	<b>44</b>	2444	<b>86</b>	2486
<b>3</b>	2403	<b>45</b>	2445	<b>87</b>	2487
<b>4</b>	2404	<b>46</b>	2446	<b>88</b>	2488
<b>5</b>	2405	<b>47</b>	2447	<b>89</b>	2489
<b>6</b>	2406	<b>48</b>	2448	<b>90</b>	2490
<b>7</b>	2407	<b>49</b>	2449	<b>91</b>	2491
<b>8</b>	2408	<b>50</b>	2450	<b>92</b>	2492
<b>9</b>	2409	<b>51</b>	2451	<b>93</b>	2493
<b>10</b>	2410	<b>52</b>	2452	<b>94</b>	2494
<b>11</b>	2411	<b>53</b>	2453	<b>95</b>	2495
<b>12</b>	2412	<b>54</b>	2454	<b>96</b>	2496
<b>13</b>	2413	<b>55</b>	2455	<b>97</b>	2497
<b>14</b>	2414	<b>56</b>	2456	<b>98</b>	2498
<b>15</b>	2415	<b>57</b>	2457	<b>99</b>	2499
<b>16</b>	2416	<b>58</b>	2458	<b>100</b>	2500
<b>17</b>	2417	<b>59</b>	2459	<b>101</b>	2501
<b>18</b>	2418	<b>60</b>	2460	<b>102</b>	2502
<b>19</b>	2419	<b>61</b>	2461	<b>103</b>	2503
<b>20</b>	2420	<b>62</b>	2462	<b>104</b>	2504
<b>21</b>	2421	<b>63</b>	2463	<b>105</b>	2505
<b>22</b>	2422	<b>64</b>	2464	<b>106</b>	2506
<b>23</b>	2423	<b>65</b>	2465	<b>107</b>	2507
<b>24</b>	2424	<b>66</b>	2466	<b>108</b>	2508
<b>25</b>	2425	<b>67</b>	2467	<b>109</b>	2509
<b>26</b>	2426	<b>68</b>	2468	<b>110</b>	2510
<b>27</b>	2427	<b>69</b>	2469	<b>111</b>	2511
<b>28</b>	2428	<b>70</b>	2470	<b>112</b>	2512

<sup>11</sup> Canales de 1 MHz.

**Tabla 2.1 (Continuación)**

<b>29</b>	2429	<b>71</b>	2471	<b>113</b>	2513
<b>30</b>	2430	<b>72</b>	2472	<b>114</b>	2514
<b>31</b>	2431	<b>73</b>	2473	<b>115</b>	2515
<b>32</b>	2432	<b>74</b>	2474	<b>116</b>	2516
<b>33</b>	2433	<b>75</b>	2475	<b>117</b>	2517
<b>34</b>	2434	<b>76</b>	2476	<b>118</b>	2518
<b>35</b>	2435	<b>77</b>	2477	<b>119</b>	2519
<b>36</b>	2436	<b>78</b>	2478	<b>120</b>	2520
<b>37</b>	2437	<b>79</b>	2479	<b>121</b>	2521
<b>38</b>	2438	<b>80</b>	2480	<b>122</b>	2522
<b>39</b>	2439	<b>81</b>	2481	<b>123</b>	2523
<b>40</b>	2440	<b>82</b>	2482	<b>124</b>	2524
<b>41</b>	2441	<b>83</b>	2483		

El transceptor nRF24LU1 tiene cuatro modos de operación y cuenta con una máquina de estados finita integrada que controla las transiciones entre los modos, de acuerdo a las señales internas y los valores de los registros definidos por el usuario [4].

- I. Modo de apagado. En este modo el módulo radio nRF24LU1 permanece desactivado con un consumo mínimo de corriente.
- II. Modos de espera. Este modo de espera se divide en modo I y en modo II. El modo I es usado para minimizar el consumo de energía promedio durante 130  $\mu$ s, hasta que el transceptor nRF24LU1 se establezca en modo de recepción o en el modo de transmisión. El modo II consume más energía ya que el transceptor nRF24LU1 se ha establecido en modo de transmisión sin tener datos para transmitir, permaneciendo en este modo hasta que se carguen datos.
- III. Modo de recepción. Este modo dispone de una señal de Detección de Portadora CD (CD, *Carrier Detect*), la cual detecta la presencia de señales de Radio Frecuencia (RF), tanto del propio sistema de comunicación como de otros sistemas WLAN en la frecuencia de recepción del canal de Radio Frecuencia (RF), para asegurar la detección de la señal, ésta debe estar modulada con la técnica de Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK) y debe permanecer por al menos 128  $\mu$ s en el medio inalámbrico.
- IV. Modo de Transmisión. Este modo depende del estado del registro de transmisión mientras en el buffer de transmisión se encuentren datos para ser transmitidos con el principio del que Primero Entra

Primero Sale (FIFO, *First Input First Output*) se permanece en este modo, de lo contrario se pasa al modo de espera II. Los datos se transmiten por los puertos<sup>12</sup> de propósito general dependiendo del *firmware* programado.

## 2.2 APLICACIÓN DE CONFIGURACIÓN Y EVALUACIÓN

El kit de desarrollo nRF24LU1-DK, cuenta con una Aplicación *software* de Configuración y Evaluación (CES) [4].

Para ejecutar la Aplicación *software* de Configuración y Evaluación (CES) se recomienda instalar Microsoft.NET framework v2.0, y el sistema operativo Microsoft Windows XP Service Pack 2, pero se comprobó que funciona sobre cualquier sistema operativo de 32 bits ya sea XP, Vista o Windows7.

La Aplicación *software* de Configuración y Evaluación (CES) permite acceder a los diferentes registros <sup>13</sup> del módulo radio nRF24LU1 los cuales definen los parámetros de configuración del sistema prototipo de comunicación de datos.

La modificación de los parámetros de configuración de la Aplicación *software* de Configuración y Evaluación (CES) se divide en cuatro menús; Primer menú “General settings” donde se activa la casilla *Power Up*<sup>14</sup> y *Activate Features*<sup>15</sup>. Segundo menú “RF settings” donde se configura la potencia de transmisión, la velocidad de transmisión de datos, la frecuencia de operación, además se establece si el módulo radio es transmisor o receptor y finalmente se activa la ganancia del Amplificador de Bajo Ruido (LNA). Tercer menú “Packet settings” donde se habilitan los canales de datos incorporando un direccionamiento a nivel MAC del módulo radio transmisor y del módulo radio receptor de 5 bytes de longitud variable, la longitud de la carga útil<sup>16</sup>, y se activa la corrección de errores CRC de 8 o 16 bits. Cuarto menú “Automatic Acknowledgement settings” donde se establece el tiempo de espera para volver a enviar el paquete cuando el acuse de recibo no llega, y el número de veces que el paquete puede ser retransmitido, y se habilita la funcionalidad de acuse de recibo para cualquier canal de datos. Al

---

<sup>12</sup> Se disponen de 6 entradas/salidas digitales programables y configurables.

<sup>13</sup> En el anexo A se detallan los registros y su configuración a nivel de bit.

<sup>14</sup> *Power Up* coloca al módulo radio nRF24LU1 en modo de espera I.

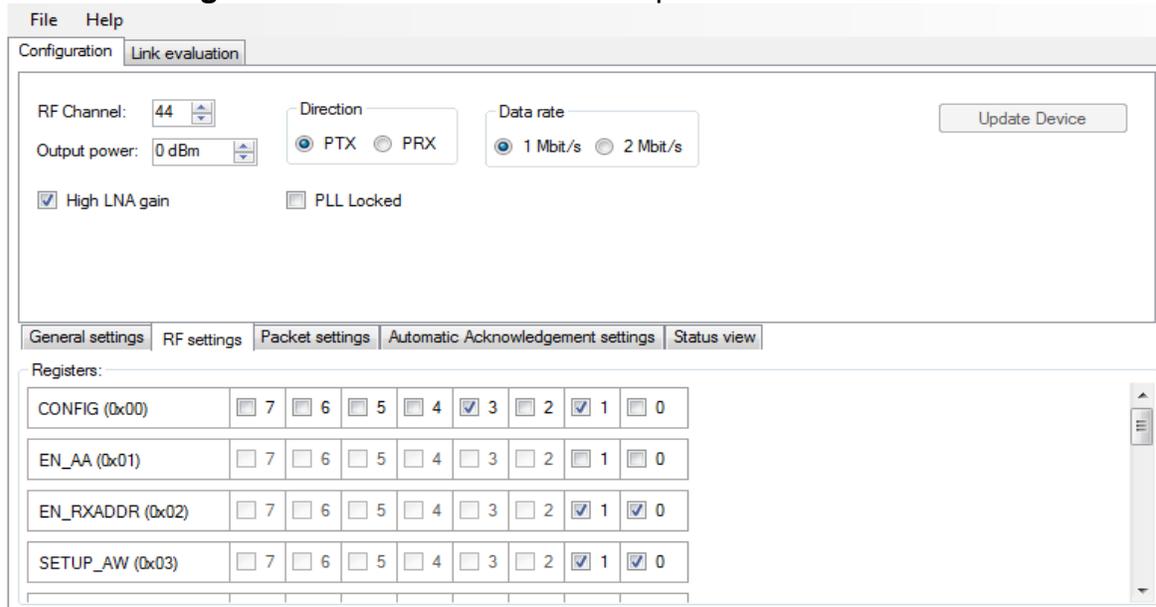
<sup>15</sup> Habilita las funcionalidades del protocolo *Enhanced ShockBurst*.

<sup>16</sup> De 0 a 32 bytes.

terminar la configuración de los parámetros del enlace se presiona la tecla *Update Device* [6].

En la figura 2.5 se muestra la interfaz gráfica de configuración de la aplicación.

**Figura 2.5** Interfaz Gráfica de la Aplicación *Software CES*



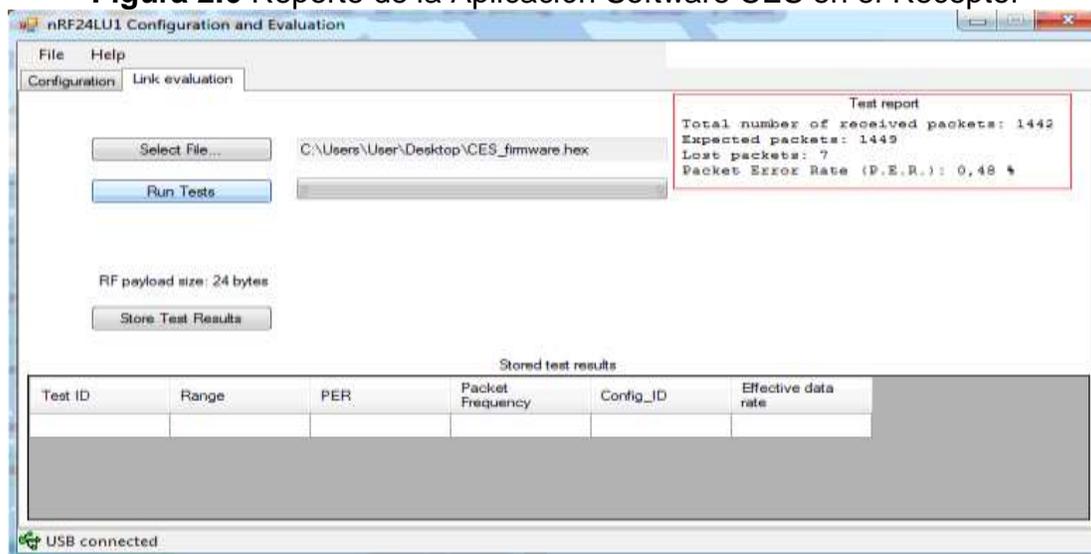
La aplicación permite recuperar y cargar la configuración en un archivo de texto en código hexadecimal.

Los parámetros de configuración deber ser iguales en ambos lados del sistema de comunicación diferenciando el módulo radio transmisor y el módulo radio receptor, para asegurar el correcto diálogo entre las estaciones. Por otro lado la Aplicación *software* de Configuración y Evaluación (CES) necesita que se cargue el archivo a enviar en el módulo radio receptor para fraccionarlo, conocer la cantidad de paquetes que se esperan, y así determinar el número de paquetes perdidos durante la comunicación. El archivo a enviar puede ser de datos, música, o video en cualquier formato, por lo que se tiene una comunicación multipropósito.

La Aplicación *software* de Configuración y Evaluación (CES) entrega un reporte del número de paquetes perdidos durante la transmisión y el valor de la Tasa de Error de Paquete (PER, *Packet Error Rate*) [16] con la cual se obtiene la Tasa de

Error de Bit (BER)<sup>17</sup>, consiguiendo una medición cuantitativa de los parámetros para evaluar y analizar el desempeño de la comunicación. En la figura 2.6 se muestra el reporte entregado por la Aplicación *software* (CES).

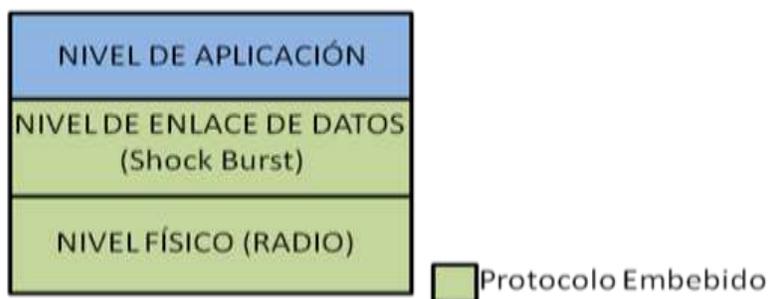
**Figura 2.6** Reporte de la Aplicación Software CES en el Receptor



### 2.3 PROTOCOLO ENHANCED SHOCKBURST

La figura 2.7 muestra los niveles en los que funciona el protocolo *Enhanced ShockBurst*, según el Modelo de Referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI).

**Figura 2.7** Protocolo *Enhanced ShockBurst* [32]  
Pila del Protocolo  
Nordic nRF



<sup>17</sup> De la ecuación 3.3.

El Protocolo Embebido en banda base *Enhanced ShockBurst* [33], es un mecanismo de intercambio de paquetes, basado en el nivel de enlace de datos, que ofrece reconocimiento automático de paquetes recibidos y retransmisión de paquetes perdidos. El módulo radio receptor reconoce los paquetes recibidos enviando un paquete de Reconocimiento (ACK, *Acknowledgement*) al módulo radio transmisor, el cual retransmite el paquete cuando no recibe el Reconocimiento (ACK) [4].

### **2.3.1 Funciones del Protocolo *Enhanced ShockBurst***

La administración automática de paquetes está a cargo del protocolo *Enhanced ShockBurst*, entre las principales funciones están: el reconocimiento automático, la retransmisión automática configurando el número máximo de retransmisiones del paquete, manejo dinámico de la longitud de la carga útil, y utilización de 6 transmisores con una sola estación receptora<sup>18</sup>, además permite configurar el tiempo de espera entre una transmisión y la siguiente.

Las características del protocolo permiten la implementación de sistemas bidireccionales y unidireccionales de enlace de datos, disminuyendo el consumo de energía al implementar (ULP) y optimizando el desempeño de la comunicación.

### **2.3.2 Funcionamiento del Protocolo *Enhanced ShockBurst***

1. El usuario inicia la comunicación mediante la transmisión de un paquete de datos, e inmediatamente se coloca al módulo radio transmisor en modo recepción esperando por un paquete de reconocimiento (ACK).
2. Durante la recepción constantemente se busca una dirección válida en la señal demodulada. Cuando se encuentra la dirección se procesa el resto del paquete y se procede a validarlo analizando el Código de Redundancia Cíclica (CRC, *Cyclic Redundancy Check*) si el paquete es válido los datos se mueven al registro FIFO de recepción (RX).
3. Si el paquete se recibe, se transmite un paquete de reconocimiento (ACK) al módulo radio transmisor, antes de regresar al modo de recepción.
4. Si el módulo radio transmisor no recibe el paquete de reconocimiento (ACK) dentro de un plazo establecido automáticamente se retransmite el paquete de datos original y se vuelve al modo de recepción.

---

<sup>18</sup> Función *Multiceiver*.

### 2.3.3 Formato de Paquete *Enhanced ShockBurst*

En la figura 2.8 se muestra el formato utilizado para transmitir un paquete.

**Figura 2.8** Formato de Transmisión de Paquetes

Preámbulo 1 byte	Dirección 3-5 bytes	Control de Paquetes 9 bits	Carga Útil 0-32 bytes	CRC 1-2 bytes
---------------------	------------------------	-------------------------------	--------------------------	------------------

**2.3.3.1 Preámbulo.** Secuencia de bits usada para detectar los niveles 0 y 1 en el módulo radio receptor. La longitud del preámbulo es de un byte, puede ser 01010101 o 10101010. Si el primer bit de la dirección es 1 el preámbulo será 10101010 y si el primer bit de la dirección es 0 el preámbulo será 01010101. Esto se hace para asegurar que existan suficientes transiciones en el preámbulo para estabilizar el módulo radio receptor.

**2.3.3.2 Dirección.** Dirección del módulo radio receptor, asegura que el paquete sea detectado por el módulo radio receptor correcto. Su longitud puede ser configurada para 3, 4 o 5 bytes, en el registro AW<sup>19</sup>.

**2.3.3.3 Control de paquete.** En la figura 2.9 se muestra como está conformado.

**Figura 2.9** Campo de Control de Paquete

Longitud de los datos 6 bits	PID 2 bits	NO_ACK 1 bit
---------------------------------	------------	--------------

- Longitud de los datos. Especifica la longitud de los datos en bytes de 0 a 32. Para los paquetes de reconocimiento (ACK) vacíos este campo se establece en 000000, y para una longitud del paquete de 32 bytes se establece en 100000.
- Identificación del paquete PID. Usado para detectar si el paquete recibido es nuevo o retransmitido, evitando que el módulo radio receptor procese más de una vez los mismos datos.

---

<sup>19</sup> En el Anexo A se describe el mapa de registros para configurar y controlar los módulos radio nRF24LU1.

- **Bandera NO\_ACK.** Si se establece en 1 el paquete no se reconoce, por lo tanto el módulo radio transmisor no espera un paquete de reconocimiento (ACK).

**2.3.2.4 Carga útil.** Representa los datos o la información definida por el usuario, puede tener una longitud de 1 a 32 bytes, se carga en el módulo radio transmisor sin sufrir modificaciones en la transmisión.

**2.3.2.5 CRC.** La función de este campo es detectar la presencia de errores en el paquete, se calcula a partir del campo de dirección, del campo de control de paquetes y de los datos.

### 3. ESCENARIOS Y PLAN DE PRUEBAS

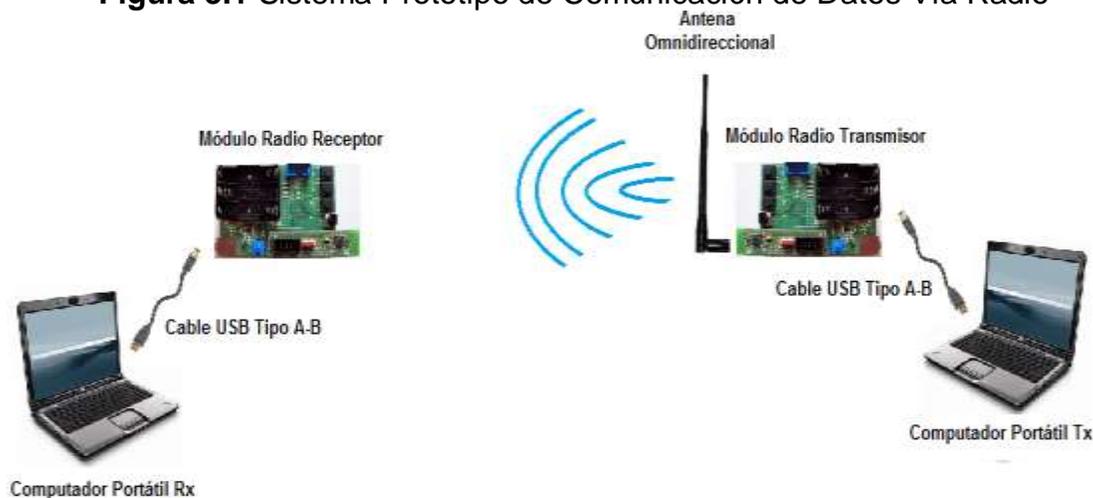
La evaluación y el análisis del desempeño a nivel físico de un sistema de comunicación tiene como objeto de estudio la Tasa de Error de Bit (BER) considerando diferentes valores de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ), parámetros evaluados en diferentes escenarios, bajo distintas configuraciones del sistema prototipo de comunicación de datos y ante condiciones de interferencia.

Este capítulo presenta los parámetros de configuración del sistema de comunicación de datos inalámbrico, detalla los escenarios de evaluación propuestos, los cuales son simulados en la herramienta de predicción de propagación *Wireless Insite®*, y documenta las pruebas realizadas para evaluar y analizar el desempeño del sistema prototipo de comunicación de datos. Finalmente, describe las pruebas para el análisis de la Tasa de Error de Bit (BER) y la Relación Portadora a Interferencia (CIR) bajo condiciones de interferencia.

#### 3.1 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA PROTOTIPO DE COMUNICACIÓN DE DATOS

Para la implementación del sistema prototipo de comunicación de datos multipropósito se empleó el kit de desarrollo nRF24LU1-DK. En la figura 3.1 se muestra el montaje utilizado.

**Figura 3.1** Sistema Prototipo de Comunicación de Datos Vía Radio



La comunicación entre la tarjeta de funciones básicas y el computador se realizó mediante cable USB tipo A-B, en el módulo radio receptor se utilizó la Antena Impresa (PCB) y en el módulo radio transmisor se usó la antena externa omnidireccional, como se muestra en la figura 3.1.

En la tabla 3.1 se describen los componentes *hardware* y *software* usados en la implementación del sistema prototipo de comunicación de datos.

**Tabla 3.1** Componentes *Hardware* y *Software* del Sistema Prototipo

<b>COMPONENTE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
1 Computador portátil para recepción	Sistema operativo windows XP SP2
1 Computador portátil para transmisión	Sistema operativo windows XP SP2
2 Tarjetas de funciones básicas	
1 Módulo radio PCB	Antena Impresa (PCB) con 0 dBi de ganancia
1 Módulo radio SMA	Conector Subminiatura de Precisión (SMA)
1 Antena omnidireccional	Con 0 dBi de ganancia <sup>20</sup>
2 Cables USB tipo A-B	Estándar de impresora
<i>Firmware</i> CES_ <i>firmware</i>	Proporcionado por Nordic
<i>Software</i> CES	CES, Aplicación <i>software</i> de Configuración y Evaluación

Los módulos radio nRF24LU1 se programaron con el CES\_ *firmware* [4]. La Aplicación *software* de Configuración y Evaluación (CES) permitió modificar los parámetros de configuración del sistema prototipo de comunicación de datos desde el computador ya que cuenta con una interfaz gráfica de fácil configuración, desde la cual se cargan los datos a ser transmitidos.

La comunicación entre los módulos radio nRF24LU1 se realizó mediante el envío de paquetes de datos, desde el computador usado en la transmisión hacia el módulo radio receptor, en donde se reporta el número de paquetes perdidos.

### 3.2 PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN

Para el desarrollo del trabajo de grado se definieron dos tipos de parámetros: variables y fijos.

---

<sup>20</sup> Se asumió 0 dBi de ganancia para la antena omnidireccional de transmisión.

### 3.2.1 Parámetros Variables

Para evaluar el desempeño del sistema prototipo de comunicación de datos en diferentes escenarios, se modificaron los parámetros de configuración definidos en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2** Parámetros Variables del Sistema Prototipo

Parámetro	Valores a configurar
Canal de Radio Frecuencia (RF)	Canal 44, Canal 62 <sup>21</sup>
Potencia de Transmisión	-18dBm, -12 dBm,-6dBm, 0dBm
Velocidad de Transmisión de datos	1 Mbps, 2 Mbps

Para determinar la frecuencia central del canal de transmisión se empleó la ecuación 3.1 proporcionada por el fabricante [4].

$$F_o = 2400 + \text{Canal RF}[\text{MHz}] \quad (3.1)$$

### 3.2.2 Parámetros Fijos

La tabla 3.3 muestra los valores de los parámetros fijos del sistema prototipo de comunicación de datos.

**Tabla 3.3** Parámetros Fijos del Sistema Prototipo

Parámetro	Valor Fijo
Ganancia Amplificador de Bajo Ruido (LNA)	Activado
Tamaño de campo de dirección	5 Bytes
Carga útil o datos	24 Bytes
Código de Redundancia Cíclica (CRC)	16 bits
Reconocimiento (ACK)	Desactivado

Luego de realizar diferentes pruebas se definieron los parámetros fijos que determinaron un buen funcionamiento del sistema prototipo de comunicación de datos implementado.

Inicialmente se activó el parámetro de Reconocimiento (ACK) para la evaluación del desempeño del sistema prototipo de comunicación de datos, pero no se obtuvo un funcionamiento adecuado del sistema de comunicación ya que cuando un paquete no llegaba al receptor se interrumpía la comunicación, por lo que fue necesario desactivar el Reconocimiento (ACK).

---

<sup>21</sup> El canal 62 tiene una frecuencia central igual a la frecuencia central del canal 11 de Wi-Fi [9].

### 3.3 ESCENARIOS DE EVALUACIÓN

Para analizar el desempeño a nivel físico del sistema prototipo de comunicación de datos, se realizaron diferentes pruebas en dos escenarios de estudio: interiores y exteriores, cada uno con características propias dada la naturaleza de los mismos.

Los escenarios propuestos se modelaron en la herramienta de predicción de propagación *software Wireless Insite®*<sup>22</sup>, con el fin de obtener los valores de potencia recibida en diferentes puntos de los escenarios teniendo en cuenta la localización de los transmisores y receptores, además la herramienta considera las propiedades físicas de la estructura lo que permite que los resultados de simulación se asemejen a los resultados obtenidos en los escenarios reales.

La descripción de la herramienta *software Wireless Insite®*, la configuración del sistema prototipo de comunicación de datos implementado, los parámetros de configuración y las diferentes simulaciones se presentan en el anexo B.

#### 3.3.1 Escenario Exteriores

El escenario considerado como exteriores fue el Centro Deportivo Universitario Tulcán de la Universidad del Cauca (CDU), ya que este es un buen escenario para evaluar las pérdidas por espacio libre<sup>23</sup>, en un ambiente libre de obstáculos, en la figura 3.2 se muestra el escenario de exteriores.

**Figura 3.2** Escenario Exteriores Centro Deportivo Universitario (CDU)



<sup>22</sup> Página web del fabricante <http://www.remcom.com/wireless-insite>.

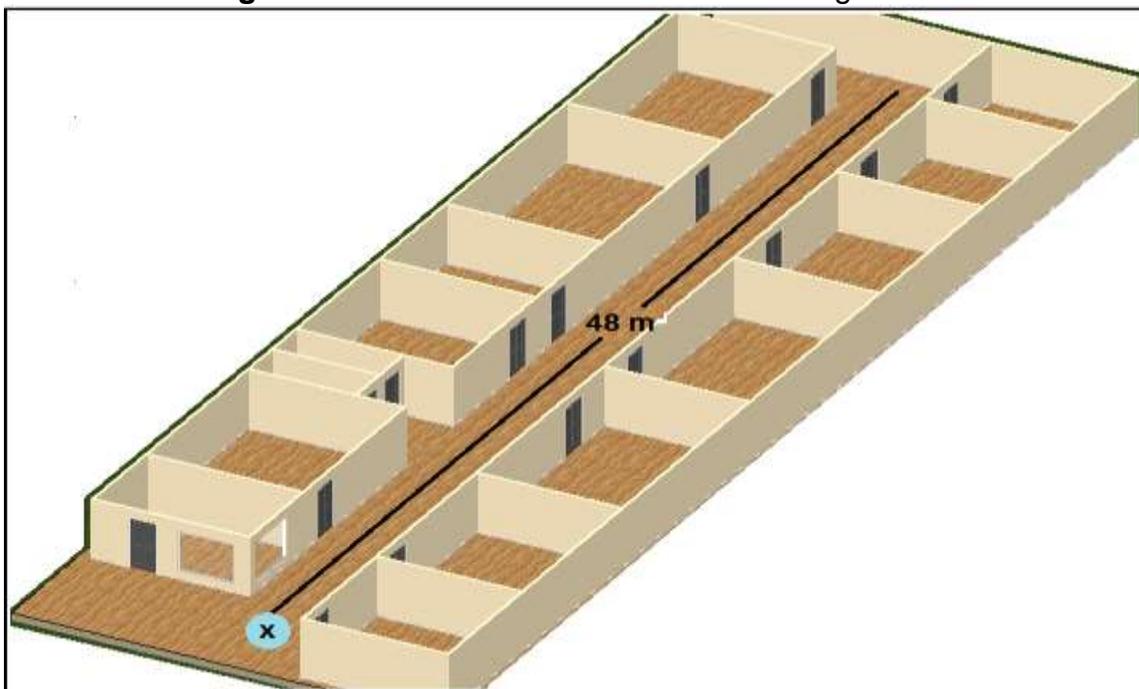
<sup>23</sup>En el espacio libre las ondas se dispersan reduciendo la potencia, fenómeno conocido como atenuación [23].

En este escenario, los datos se transmitieron desde el punto x donde se ubicó el módulo radio transmisor, hasta el módulo radio receptor el cual se fue moviendo a lo largo de las gradas incrementando la distancia, por otra parte los módulos radio se ubicaron a una distancia de 80 centímetros del suelo para disminuir el efecto de absorción de la señal por su cercanía al suelo.

### 3.3.2 Escenario Interiores

Se consideró como escenario de interiores el pasillo del tercer piso de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca. Este escenario permitió evaluar el efecto de los desvanecimientos por multitrayectoria<sup>24</sup> presentados por las condiciones del lugar. En la figura 3.3 se muestra el pasillo de ingenierías, el cual tiene 48 metros de largo, tres de alto y dos de ancho aproximadamente.

**Figura 3.3** Escenario Interiores Pasillo de Ingenierías



Las pruebas se realizaron enviando datos desde el módulo radio transmisor, el cual se encuentra en el punto x, hasta el módulo radio receptor el cual cambia de

---

<sup>24</sup>Los desvanecimientos por multitrayectoria son causados por los mecanismos de propagación tales como reflexión, difracción y dispersión [23].

posición dentro del pasillo, este escenario genera un efecto de guía de onda en la comunicación [5].

### **3.3.3 Escenarios con Interferencia**

Para evaluar el desempeño del sistema de comunicación de datos bajo condiciones de interferencia, se consideraron diferentes fuentes interferentes en distintos escenarios.

**3.3.3.1 Escenario con Interferencia con Wi-Fi.** Las pruebas se realizaron tanto en el escenario considerado para interiores y para exteriores, manteniendo los parámetros de configuración descritos en el numeral 3.2, con el fin de comparar los resultados obtenidos.

**3.3.3.2 Escenario con Interferencia con el Kit de Desarrollo CY3653.** En esta prueba se consideró como escenario de interiores la oficina del grupo GNTT de la Universidad del Cauca. Los módulos radio nRF24LU1 se ubicaron a una distancia fija de 5 metros entre ellos y se generó interferencia con el kit de desarrollo CY3653 de *Cypress Semiconductor Corp* [11], el cual cambió de posición acercándose al módulo radio receptor del sistema prototipo de comunicación de datos implementado.

Esta prueba se realizó también en exteriores generando interferencia con el kit de desarrollo CY3653 y se procedió de igual forma que en interiores, es decir con los módulos radio nRF24LU1 fijos y el generador de interferencia CY3653 móvil.

## **3.4 PLAN DE PRUEBAS**

A continuación se describen los procesos empleados en la verificación de las características del kit de desarrollo nRF24LU1-DK, y en la evaluación de los parámetros de desempeño del sistema prototipo de comunicación de datos.

### **3.4.1 Verificación de Datos del Fabricante**

Estas pruebas se encaminaron en la verificación de las características descritas por el fabricante con respecto al kit de desarrollo nRF24LU1-DK. Para este

propósito se empleó el analizador de red *ZVL Rohde&Schwarz*<sup>25</sup>, que opera en un rango de frecuencias de 9 KHz a 6 GHz [13]. Este equipo es de gran utilidad para el desarrollo de este trabajo de grado, pues permitió obtener el espectro de la señal para su análisis.

**3.4.1.1 Potencia de Transmisión.** Para conocer el valor real de la potencia de transmisión del transceptor nRF24LU1, se conectó el módulo radio transmisor directamente al analizador, mediante un Conector Subminiatura de Precisión (SMA) a uno tipo N<sup>26</sup>, con el fin de disminuir las pérdidas que se presentan en la comunicación.

Se modificó el valor de la potencia de transmisión del módulo radio, programando las cuatro opciones de potencia que se detallan en la tabla 3.2.

**3.4.1.2 Frecuencia de Operación.** El transceptor nRF24LU1 trabaja con Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK)<sup>27</sup> [4] , por esto se espera obtener un espectro de la señal como el mostrado en la figura 3.4, ya que un uno lógico se representa mediante un incremento de la frecuencia de la onda portadora, y un cero lógico mediante el decremento de la frecuencia, por otra parte la figura muestra la separación de  $2\Delta f$  entre las frecuencias que representan un uno y un cero denominadas frecuencias de marca y espacio respectivamente, el valor de  $\Delta f$  se denomina desviación en frecuencia [28].

Esta prueba empleó el analizador para observar y analizar el espectro de la señal, con el fin de obtener la medida real de la frecuencia central y las frecuencias de marca y espacio. Para establecer las frecuencias utilizadas en la transmisión de unos y ceros binarios se enviaron datos<sup>28</sup> continuamente cargando un archivo de texto con caracteres que representan unos en binario y otro archivo de texto con caracteres que representa ceros en binario, observando el cambio de frecuencia utilizado por la Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK).

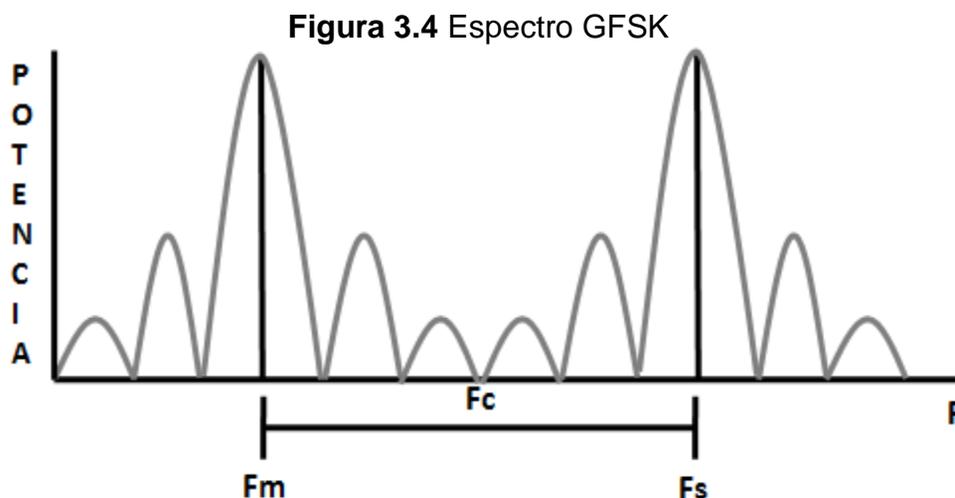
---

<sup>25</sup> Página web del fabricante <http://www2.rohde-schwarz.com>.

<sup>26</sup> De acuerdo a los resultados obtenidos en la pruebas, se consideraron despreciables las pérdidas generadas por el conector utilizado.

<sup>27</sup> Refiérase al anexo A para encontrar en detalle la Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK).

<sup>28</sup> Se cargaron diferentes archivos texto al módulo transmisor con caracteres que representan unos y ceros en binario.



La tabla 3.4 describe los parámetros de configuración del sistema prototipo de comunicación de datos usados para esta prueba, de esta manera se disminuyó el tamaño de los campos del protocolo siendo más significativos los datos transmitidos.

**Tabla 3.4 Configuración de Parámetros del Módulo Radio Transmisor**

Parámetro	Valor
Canal de Radio Frecuencia (RF)	Canal 44
Potencia de Transmisión	0 dBm
Velocidad de Transmisión	1 Mbps, 2 Mbps
Tamaño de campo de dirección	3 Bytes
Carga útil	32 Byte
Código de Redundancia Cíclica (CRC)	Desactivado
Reconocimiento (ACK)	Desactivado

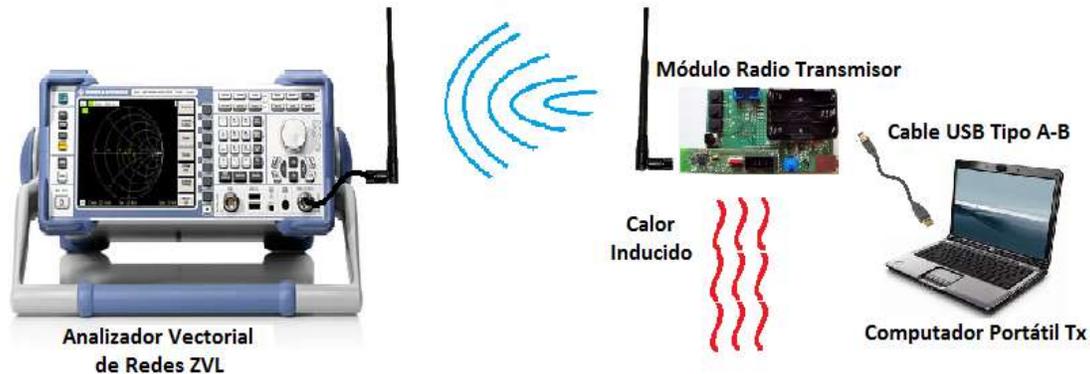
**3.4.1.3 Exactitud en Frecuencia Respecto a la Temperatura.** Para conocer el comportamiento del transceptor nRF24LU1 respecto al cambio en la temperatura<sup>29</sup> se procedió a inducir calor al módulo radio transmisor del sistema prototipo, y se observó en el analizador el espectro de la señal a medida que aumenta la temperatura, con el fin de medir el corrimiento de la frecuencia central.

---

<sup>29</sup> El rango de temperatura definido por el fabricante está entre -40° y 85°C [4].

El calor se indujo a la tarjeta por medio de un secador de cabello, durante intervalos de tiempo de 3 a 5 minutos<sup>30</sup>. La prueba se realizó con la configuración presentada en la figura 3.5.

**Figura 3.5** Prueba de la Exactitud en Frecuencia Respecto a la Temperatura



**3.4.1.4 Medida de Ancho de Banda de la Señal.** El método práctico empleado para obtener el ancho de banda de la señal es el descrito en [20] para señales de Frecuencia Modulada (FM, *Frequency modulation*), donde se mide 20 dB y 30 dB por debajo de la amplitud máxima<sup>31</sup>, ya que dentro de un intervalo de 20 dBr se obtiene aproximadamente el 98% de la potencia total de la señal, y para 30dBr se obtiene una mayor aproximación [20].

Al obtener el espectro de la señal con el analizador se procedió a realizar las medidas prácticas del ancho de banda del transceptor nRF24LU1, para compararlo con el ancho de banda teórico de la Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK) y el ancho de banda brindado por el fabricante.

### **3.4.2 Medida de Tasa de Error de Bit (BER) del Sistema**

Uno de los parámetros más importantes en el análisis de desempeño a nivel físico de un sistema de comunicación de datos, es la medida de la Tasa de Error de Bit (BER) la cual representa el número de bits errados o el número de errores en una comunicación. La ecuación 3.2 expresa la relación del número total de bits errados con respecto al número total de bits transmitidos [4].

---

<sup>30</sup> Se realizaron pruebas variando los tiempos de exposición a la alta temperatura.

<sup>31</sup> En adelante 20dBr y 30dBr, por ser medido respecto a una medida de referencia.

$$\text{BER} = \frac{\text{Número total de bits errados}}{\text{Número total de bits transmitidos}} \quad (3.2)$$

El kit de desarrollo nRF24LU1-DK no permite obtener directamente la Tasa de Error de Bit (BER), pero la Aplicación de Configuración y Evaluación (CES) muestra el número de paquetes perdidos en la transmisión, este valor se conoce como Tasa de Error de Paquete (PER) [17]. La relación entre la Tasa de Error de Bit (BER) y Tasa de Error de Paquete (PER) se explica a continuación.

La Tasa de Error de Bit (BER) se define como la probabilidad de obtener un bit erróneo, la probabilidad de obtener un bit correcto es  $(1 - \text{BER})$ . Si un paquete contiene  $n$  bits<sup>32</sup>, la probabilidad de obtener todos los bits de un paquete correctos es  $(1 - \text{BER})^n$ . De la misma forma la probabilidad de obtener un paquete erróneo está dado por la ecuación 3.3 [6].

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

En la ecuación 3.4 se despeja el valor de la Tasa de Error de Bit (BER).

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

Donde  $n$  es el número de bits contenidos en un paquete [4]. Para obtener resultados más precisos, se promediaron 60 mediciones del valor que más se repite para cada punto de medición.

### 3.4.3 Medida de la Energía de Bit respecto a la Densidad Espectral de Potencia de Ruido (Eb/No)

Para realizar el análisis de desempeño a nivel físico del sistema prototipo de comunicación de datos, se relaciona la Tasa de Error de Bit (BER) para ciertos valores de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido (Eb/No), ya que cuando la potencia de la señal en el receptor disminuye el número de bits erróneos aumenta.

La Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $N_0$ , *Noise Spectral Density*), se presenta en la ecuación 3.5.

---

<sup>32</sup> Incluidos Bits de dirección, campos de control, carga útil y Código de Redundancia Cíclica (CRC) [6].

$$N_0 = N'_0 \left[ \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} \right] + \text{NF} [\text{dB}] \quad (3.5)$$

Donde,

$N_0$  : Densidad Espectral de Potencia de Ruido (No) a la salida del módulo radio receptor.

$N'_0$  : Densidad Espectral de Potencia de Ruido (No) a la entrada del módulo radio receptor.

NF : Figura de Ruido del módulo radio receptor.

La Figura de Ruido (NF, *Noise Figure*) del módulo radio receptor, se define como la Relación Señal a Ruido (SRN, *Signal to Noise Ratio*) a la entrada del módulo radio receptor respecto a la Relación Señal a Ruido (SRN) a la salida del módulo radio receptor. Este valor se asume como 7 dB<sup>33</sup>, pues el fabricante no lo proporciona.

Sustituyendo el valor de la Figura de Ruido (NF) en la ecuación 3.5, se obtiene la ecuación 3.6.

$$N_0 = N'_0 \left[ \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} \right] + 7 \text{ dB} \quad (3.6)$$

La Densidad Espectral de Potencia de Ruido (No) a la entrada del módulo radio receptor está definida por la ecuación 3.7.

$$N'_0 [\text{W/Hz}] = K [\text{J/}^\circ\text{K}] \times T [^\circ\text{K}] \times B [\text{Hz}] \quad (3.7)$$

Donde,

K: Constante de Boltzmann  $K = 1.380650 \times 10^{-23}$ .

T: Temperatura efectiva<sup>34</sup>  $T = 290^\circ\text{K}$ .

B: Ancho de banda  $B = 1 \text{ Hz}$ <sup>35</sup>.

---

<sup>33</sup> Valor típico de referencia para dispositivos de este tipo [14][15].

<sup>34</sup> Valor típico de Temperatura efectiva.

<sup>35</sup> Valor típico usado para estos sistemas de comunicación de datos.

Remplazando estos valores en la ecuación 3.7, se obtiene el valor de la Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $N_0$ ) a la entrada del módulo radio receptor, como se indica en 3.8.

$$\begin{aligned}
 N'_0[\text{W/Hz}] &= K [\text{J}/^\circ\text{K}] \times T [^\circ\text{K}] \times B [\text{Hz}] \\
 N'_0[\text{W/Hz}] &= 1.380650 * 10^{-23} [\text{J}/^\circ\text{K}] \times 290 [^\circ\text{K}] \times 1 [\text{Hz}] \\
 N'_0[\text{W/Hz}] &= 4 * 10^{-21} [\text{W/Hz}] \\
 N'_0[\text{W/Hz}] &= 4 * 10^{-18} [\text{mW/Hz}] \\
 N'_0[\text{dBm/Hz}] &= -174 [\text{dBm/Hz}] \tag{3.8}
 \end{aligned}$$

Al sustituir el valor de  $N'_0$  en la ecuación 3.6, se obtiene el valor de la Densidad de Espectral Potencia de Ruido ( $N_0$ ) a la salida del módulo radio receptor, como se indica en 3.9.

$$\begin{aligned}
 N_0 &= -174 [\text{dBm/Hz}] + 7 \text{ dB} \\
 N_0 &= -167 [\text{dBm/Hz}] \tag{3.9}
 \end{aligned}$$

La energía de bit en unidades logarítmicas se obtiene como la diferencia entre la potencia de recepción y la velocidad de transmisión de datos del enlace. La ecuación 3.10 representa la energía de bit.

$$E_b[\text{dBm/Hz}] = P_{\text{Rx}}[\text{dBm}] - 10 \log R_b [\text{bps}] \tag{3.10}$$

Donde,

$P_{\text{Rx}}$  : Potencia de recepción medida en el módulo radio receptor.

$R_b$  : Velocidad de transmisión de datos<sup>36</sup>.

La ecuación 3.11 representa la relación de Energía de Bit respecto a la Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ).

$$\left( \frac{E_b}{N_0} \right) [\text{dB}] = P_{\text{Rx}}[\text{dB}_m] - 10 \text{ Log}(R_b[\text{bps}]) - N_0[\text{dBm/Hz}] \tag{3.11}$$

---

<sup>36</sup>Se realizaron pruebas con dos velocidades 1 y 2 Mbps.

La potencia de recepción se calcula como lo indica la ecuación de balance de enlace 3.12.

$$\text{Prx[dBm]} = \text{Ptx[dBm]} + \text{Gantx[dBi]} + \text{Ganrx[dBi]} - \text{Laten[dB]} - \text{Lb[dB]} - \text{Lotros[dB]} \quad (3.12)$$

Donde,

Ptx : Potencia de transmisión.

Ganrx : Ganancia de la antena receptora.

Gantx : Ganancia de la antena transmisora<sup>37</sup>.

Laten : Pérdidas por atenuadores.

Lotros : Pérdidas por conectores.

Lb : Pérdidas de propagación.

Al sustituir los datos<sup>38</sup> conocidos en 3.12 se obtiene la ecuación 3.13, para la potencia de recepción del sistema prototipo de comunicación de datos implementado.

$$\text{Prx[dBm]} = \text{Ptx[dBm]} - \text{Lb[dB]} \quad (3.13)$$

Las pérdidas básicas de propagación se obtienen a partir del modelo de propagación de pendiente única [18].

**3.4.3.1 Potencia de Recepción.** El kit de desarrollo nRF24LU1-DK no permite medir la potencia de recepción<sup>39</sup>, en consecuencia se usó el kit de desarrollo CY3653 de *Cypress Semiconductor Corp*<sup>40</sup>, con el cual se obtuvieron los Indicadores de Intensidad de la Señal Recibida (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*) a diferentes distancias y por interpolación se encontraron los valores de potencia recibidos [19]. La conversión de los valores de potencia de recepción se especifican en el trabajo de grado titulado “Evaluación y Análisis del Desempeño a

---

<sup>37</sup> Antena omnidireccional Gantx = 0 dBi.

<sup>38</sup> Datos suministrados por el fabricante: Ganrx = 0 dBi, Laten = 0 dB, Lotros = 0dB.

<sup>39</sup> Información confirmada por el fabricante.

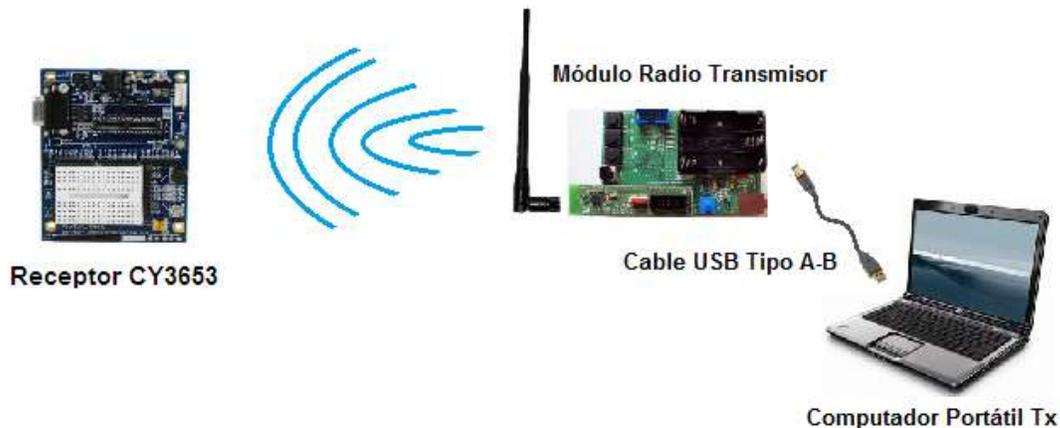
<sup>40</sup> Página web del fabricante <http://www.cypress.com/?rID=41083>.

Nivel Físico de un Sistema de Comunicación de Datos de Corto Alcance Vía Radio en 2.4 GHz Basado en Espectro Ensanchado por Secuencia Directa DSSS<sup>41</sup> [19]. El montaje utilizado para esta medida de potencia de recepción se muestra en la figura 3.6.

Con los valores de potencia obtenidos se realizó una predicción de pérdidas básicas de propagación para el sistema prototipo de comunicación de datos implementado en los diferentes escenarios, variando la velocidad de transmisión de datos.

La potencia de recepción se obtuvo de la ecuación 3.13, después de encontrar las pérdidas de propagación, para esto se empleó el modelo de propagación de pendiente única descrito en [18].

**Figura 3.6** Medida de la Potencia de Recepción



El valor de la pérdidas básicas se expresa en función de la distancia entre el módulo radio transmisor y el módulo radio receptor. El modelo predice una variación de la forma mostrada en la ecuación 3.14.

$$l_b(d) = k * d^n \quad (3.14)$$

La constante k depende del tipo de terreno, de la frecuencia, la altura de las antenas y se determinó midiendo la pérdida básica a una distancia unitaria de

---

<sup>41</sup> Trabajo de Grado desarrollado en la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca.

referencia<sup>42</sup>. El exponente  $n$  es función del medio de propagación, la frecuencia y la altura de la antena del módulo radio transmisor. Los valores de  $n$  y  $k$  se obtuvieron a partir de mediciones de campo, y  $d$  es la distancia en metros entre el módulo radio transmisor y módulo radio el receptor.

La ecuación 3.15 expresa el valor de pérdidas básicas de propagación en dB.

$$L_b(\text{dB}) = L_o + 10n \log(d [\text{m}]) \quad (3.15)$$

Donde,

$$L_o = 10 \log(k)$$

Al sustituir la ecuación de pérdidas básicas de propagación 3.15 en la ecuación 3.13 se obtuvo la ecuación 3.16 que representa la potencia de recepción para el sistema prototipo de comunicación de datos implementado.

$$Prx[\text{dBm}] = Ptx[\text{dBm}] - L_o - 10n \log(d[\text{m}]) \quad (3.16)$$

Con los valores estimados de potencia de recepción, se obtuvo el valor de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_o$ ), la cual se expresa en la ecuación 3.17.

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right) [\text{dB}] = P_{Rx}[\text{dB}_m] - 10 \text{Log}(R_b[\text{bps}]) - N_o[\text{dBm/Hz}] \quad (3.17)$$

### 3.4.4 Medida de la Tasa de Error de Bit (BER) ante Interferencia

Se realizaron dos pruebas para el análisis ante interferencia, a continuación se describe cada una de ellas.

**3.4.4.1 Interferencia con Wi-Fi.** Esta prueba se realizó configurando el transceptor nRF24LU1 con una frecuencia central igual a la del canal 11 de Wi-Fi<sup>43</sup>, es decir 2.462 GHz [8], correspondiente al canal 62 de los módulos radio nRF24LU1.

El valor de la Tasa de Error de Bit (BER) se obtuvo de la forma descrita en 3.4.2, el módulo radio transmisor se configuró con una potencia de transmisión de -12

---

<sup>42</sup> Se tomó como distancia de referencia 1 metro.

<sup>43</sup> Se eligió este canal por su frecuente uso en dispositivos Wi-Fi, para esta región geográfica [9].

dBm y una velocidad de transmisión de datos de 2 Mbps, esta prueba se realizó en interiores y exteriores.

**3.4.4.2 Interferencia con el Kit de Desarrollo CY3653.** El módulo radio transmisor del sistema prototipo de comunicación de datos implementado se ubicó a 5 metros del módulo radio receptor y se realizaron transmisiones con el fin de obtener la Tasa de Error de Bit (BER). Posteriormente se ubicó el transmisor del kit de desarrollo CY3653 como generador de interferencia a diferentes distancias del módulo radio receptor, iniciando en 50 centímetros hasta los 7 metros. La figura 3.7 muestra la ubicación de los dispositivos para la realización de la prueba. La potencia de transmisión de módulo radio transmisor se configuró a -12 dBm con una frecuencia de 2.444 GHz. El kit de desarrollo CY3653 se programó con la misma frecuencia y una potencia de transmisión de -16.4 dBm [18].

La interferencia se presenta debido a que las señales del módulo radio transmisor nRF24LU1 se combinan con las del transmisor CY3653 degradando el funcionamiento del sistema prototipo de comunicación de datos implementado. Los efectos de la interferencia se midieron a partir de los valores de Tasa de Error de Bit (BER) obtenidos en el módulo radio receptor, debido a que la potencia de recepción tiene una relación directa con Tasa de Error de Bit (BER).

A partir de las potencias de recepción se obtuvo la Relación Portadora a Interferencia (CIR). La ecuación 3.18 indica la expresión matemática para la Relación Portadora a Interferencia (CIR) [21].

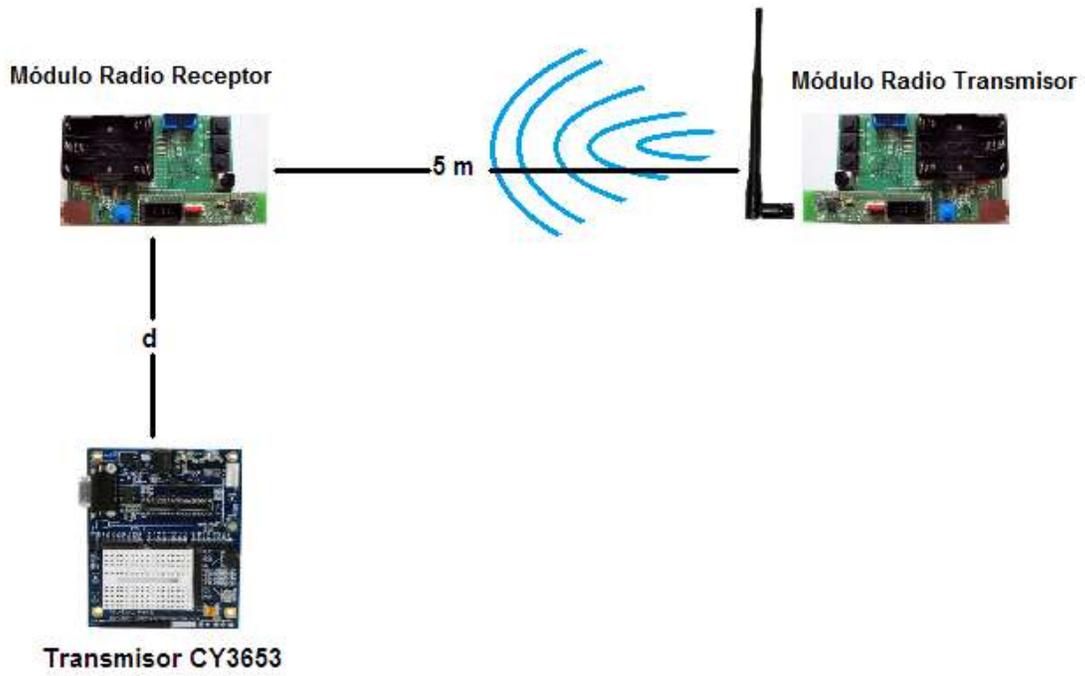
$$CIR[dB] = P_{SX}[dBm] - P_{SXI}[dBm] \quad (3.18)$$

Dónde:

$P_{SX}$  : Potencia de la señal deseada.

$P_{SXI}$  : Potencia de la señal interferente.

**Figura 3.7** Prueba de Desempeño del Sistema ante Interferencia



## 4. EJECUCIÓN DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para cumplir con los objetivos del presente trabajo de grado, este capítulo presenta los resultados obtenidos de las pruebas descritas en el capítulo 3, los cuales permiten analizar y evaluar el desempeño del sistema prototipo de comunicación de datos implementado con el kit de desarrollo nRF24LU1-DK en los diferentes escenarios propuestos, bajo diferentes configuraciones y en condiciones de interferencia. Se comparó además los resultados de potencia de recepción obtenidos de manera práctica con los resultados obtenidos en simulación mediante la herramienta *software* de predicción de propagación de *Wireless Insite®*.

### 4.1 VERIFICACIÓN DE DATOS DEL FABRICANTE

Con el propósito de asegurar que los módulos radio nRF24LU1 cumplen con las especificaciones dadas por el fabricante y proporcionan un funcionamiento adecuado al sistema de comunicación de datos, se midió la potencia de transmisión efectiva, frecuencia de operación, ancho de banda, exactitud en frecuencia respecto a la temperatura, potencia de recepción y medidas de la Tasa de Error de Bit (BER).

Con la ecuación 4.1 se obtiene el valor del porcentaje de error en la precisión de las medidas realizadas con el analizador.

$$Error = \frac{|Valor Teórico - Valor Experimental|}{Valor Teórico} * 100\% \quad (4.1)$$

#### 4.1.1 Potencia de Transmisión Efectiva

Para estas pruebas se conectó el módulo radio transmisor del sistema implementado directamente al analizador de red *ZVL Rohde&Schwarz®*, en adelante analizador. Se realizaron mediciones para las diferentes potencias de transmisión del kit programadas y se procedió de acuerdo a la sección 3.4.1.1. En la tabla 4.1 se relacionan los datos medidos de forma práctica con el analizador y los programados con la Aplicación *software* de Configuración y Evaluación (CES), al reemplazar los valores prácticos y experimentales de la potencia de transmisión efectiva en la ecuación 4.1 se obtiene el porcentaje de error en la medida realizada.

Sin embargo y dado que el analizador muestra la potencia recibida en la frecuencia central, no se obtuvo el valor de la potencia total de transmisión.

**Tabla 4.1** Potencias de Transmisión Efectiva

Ptx Programada (dBm)	Ptx Medida (dBm)	Variación (dB)	Error
0	-0.3	0.3	0.016%
-6	-4.45	1.55	0.2583%
-12	-9.82	2.18	0.1816%
-18	-18.23	0.23	0.0127%

Para las potencias de transmisión -6 dBm y -12 dBm, se observaron variaciones de casi 2 dB, respecto a los valores programados. Lo que demuestra que el transceptor nRF24LU1 es más preciso en la definición de las potencias de transmisión máxima y mínima, mientras que en la definición de las potencias de transmisión intermedias se presenta un mayor error.

#### 4.1.2 Frecuencia de Operación

La desviación en frecuencia del transceptor nRF24LU1 para 1 Mbps es de +/- 160 KHz y para 2 Mbps es de +/- 320 KHz, según los datos del fabricante [4].

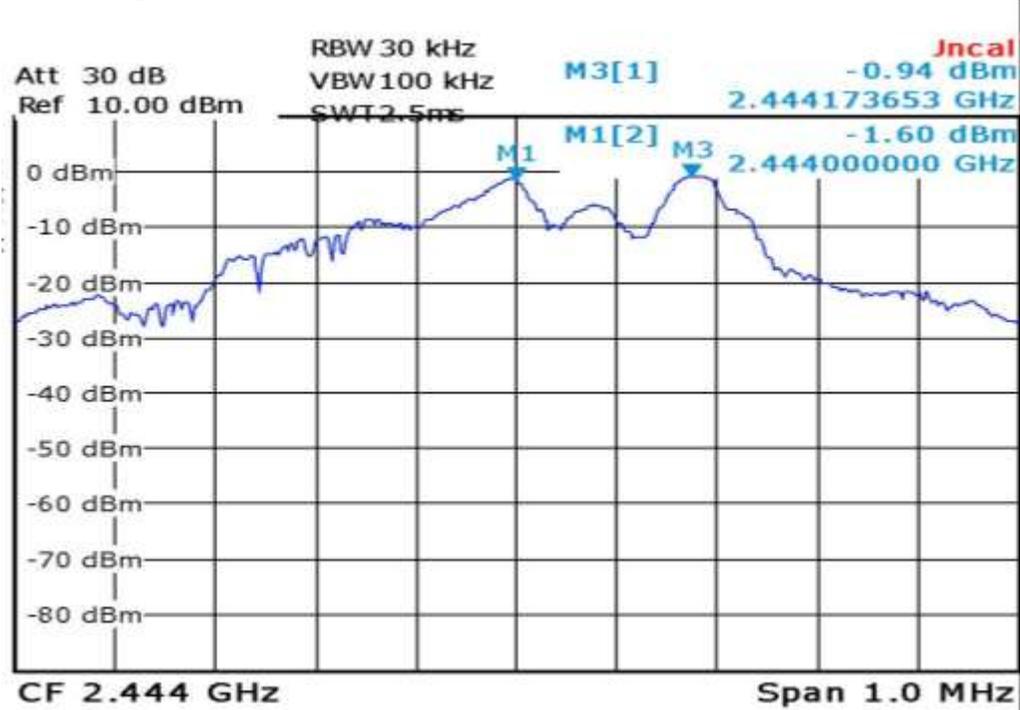
Para obtener la frecuencia de marca se transmitió una secuencia constante de unos<sup>44</sup> y se obtuvo el espectro de la señal del módulo radio transmisor como se muestra en la figura 4.1. El marcador *M1* está en 2.444 GHz frecuencia central programada, el marcador *M3* muestra el valor práctico de la frecuencia de marca en 2.444173653 GHz para una velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps.

Para obtener el valor práctico de la frecuencia de espacio se transmitió una secuencia de ceros para una velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps, el valor práctico de la frecuencia de espacio es de 2.443870300 GHz este valor se obtuvo de la diferencia que existe entre la frecuencia central *M1* y el diferencial *D3*, como se muestra en la figura 4.2.

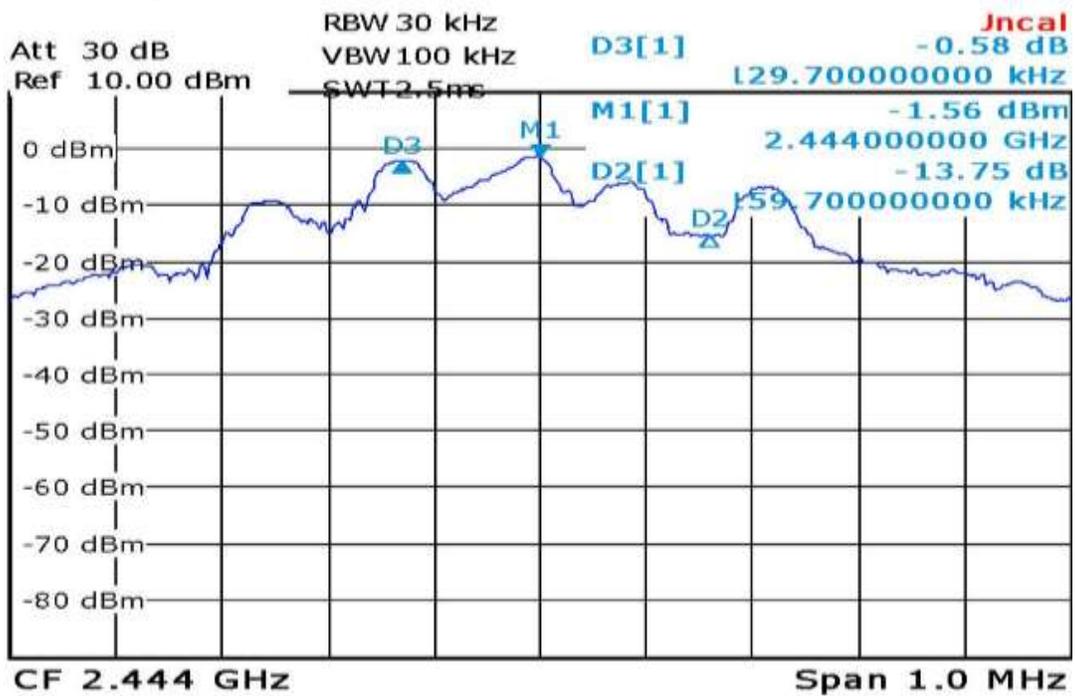
---

<sup>44</sup> De igual forma se procedió cuando se transmiten ceros.

**Figura 4.1** Frecuencia de Marca de la Señal para 1 Mbps



**Figura 4.2** Frecuencia de Espacio de la Señal para 1 Mbps



A partir de las frecuencias de marca y espacio, y usando la ecuación 4.2 se obtuvo la separación de frecuencias  $2\Delta f$  y la desviación de frecuencia  $\Delta f$ .

$$\begin{aligned} 2\Delta f &= |f_s [\text{KHz}] - f_m [\text{KHz}]| & (4.2) \\ 2\Delta f &= |2443870.300 \text{ KHz} - 2444173.653 \text{ KHz}| \\ 2\Delta f &= 303.353 \text{ KHz} \\ \Delta f &= 151.6765 \text{ KHz} \end{aligned}$$

El valor práctico que se obtuvo de la desviación de frecuencia  $\Delta f$  para el transceptor nRF24LU1 es aproximado al valor teórico definido por el fabricante igual a 160 KHz. Al reemplazar los valores teórico y obtenido de la desviación de frecuencia  $\Delta f$  en la ecuación 4.1, se obtiene el porcentaje de error en la medida, como se representa en la ecuación 4.3.

$$Error = \frac{|160 [\text{KHz}] - 151.6765 [\text{KHz}]|}{160 [\text{KHz}]} * 100\% = 0.052\% \quad (4.3)$$

Por otra parte, despejando la ecuación 4.4 y reemplazando el valor de la desviación de la frecuencia se obtiene el valor práctico de la frecuencia central.

$$\begin{aligned} \Delta f &= |f_c [\text{KHz}] - f_m [\text{KHz}]| & (4.4) \\ f_c &= 2444173.653 \text{ KHz} - 151.6765 \text{ KHz} \\ f_c &= 2444021.977 \text{ KHz} \end{aligned}$$

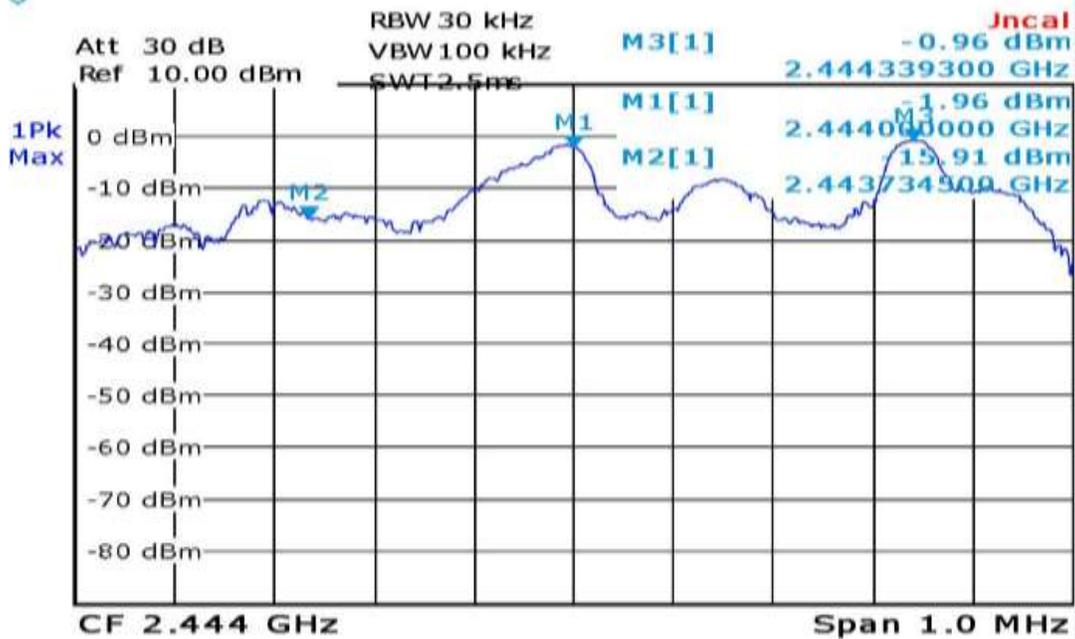
Por lo tanto, el corrimiento en frecuencia existente entre la frecuencia central programada a 2.444 GHz correspondiente al canal 44, y la frecuencia central medida fue de 21.977 KHz. por encima de la frecuencia programada. La precisión de la frecuencia central se especifica en ppm mediante la ecuación 4.5.

$$Precisión [ppm] = \frac{|Frecuencia Teórica - Frecuencia Medida|}{Frecuencia Teórica} * 10^6 \quad (4.5)$$

Al reemplazar los valores de frecuencia programada y medida en la ecuación 4.5 se encontró el corrimiento en frecuencia equivalente a 8.99223 ppm [10].

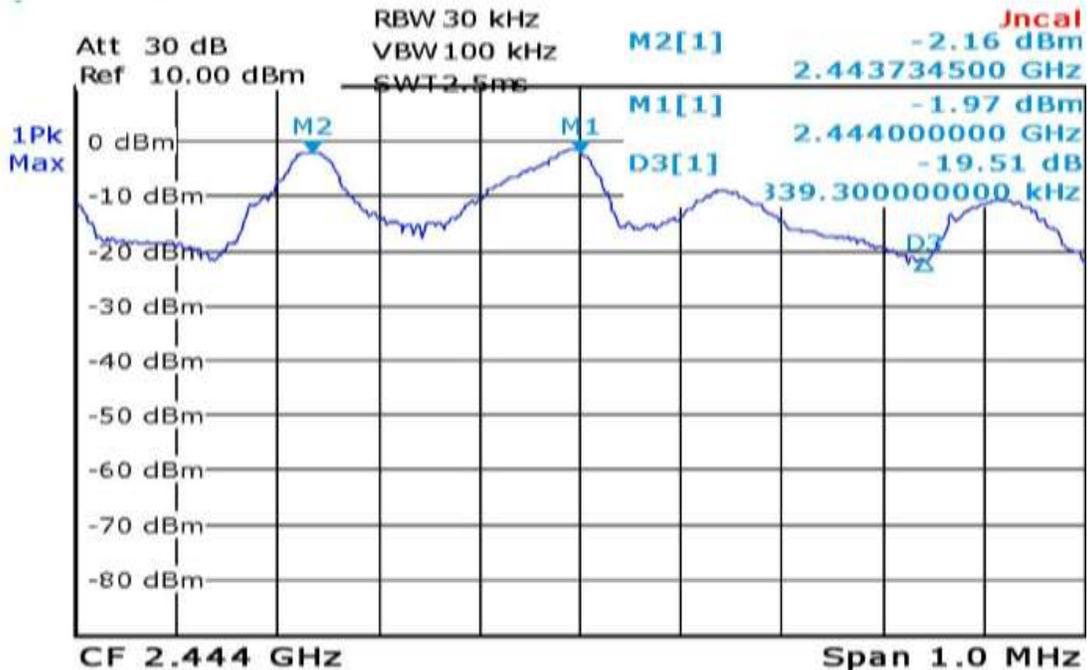
Transmitiendo una secuencia constante de unos se obtuvo el valor práctico de la frecuencia de marca dada por el marcador M3 en 2.444339300 GHz como se muestra en la figura 4.3 para una velocidad de transmisión de datos de 2 Mbps.

**Figura 4.3** Frecuencia de Marca de la Señal para 2 Mbps



La figura 4.4 muestra el valor práctico para la frecuencia de espacio en 2.443734500 GHz dada por el marcador *M2*, para una velocidad de transmisión de datos de 2 Mbps.

**Figura 4.4** Frecuencia de Espacio de la Señal para 2 Mbps



Utilizando las ecuaciones 4.2 y 4.4 se obtuvo la desviación de frecuencia  $\Delta f = 302.4$  KHz, y la frecuencia central  $f_c = 2444036.9$  KHz, respectivamente. El valor del porcentaje de error en la medida es de 0.055% y se encontró de la ecuación 4.1.

Por lo tanto, el corrimiento en frecuencia entre la frecuencia central programada y la frecuencia central medida fue de 36.9 KHz, para especificar la precisión en frecuencia se usó la ecuación 4.5, de donde se obtuvo una precisión de 15.0982 ppm.

De lo anterior, se concluye que el corrimiento en la frecuencia central tanto para 1 Mbps como para 2 Mbps se encuentra dentro del rango<sup>45</sup> de precisión de frecuencia definido por el fabricante.

#### **4.1.3 Exactitud en Frecuencia Respecto a la Temperatura**

Al analizador se conectó una antena omnidireccional con el fin de obtener el espectro de la señal, lo cual permitió medir la frecuencia central mientras el módulo radio transmisor enviaba datos continuamente en una frecuencia central de 2.444 GHz, y se procedió como se describió en la sección 3.4.1.3 elevando la temperatura del transceptor nRF24LU1. La figura 4.5 muestra el comportamiento de la señal a temperatura ambiente, donde el marcador *M1* está en 2.444 GHz frecuencia de la portadora.

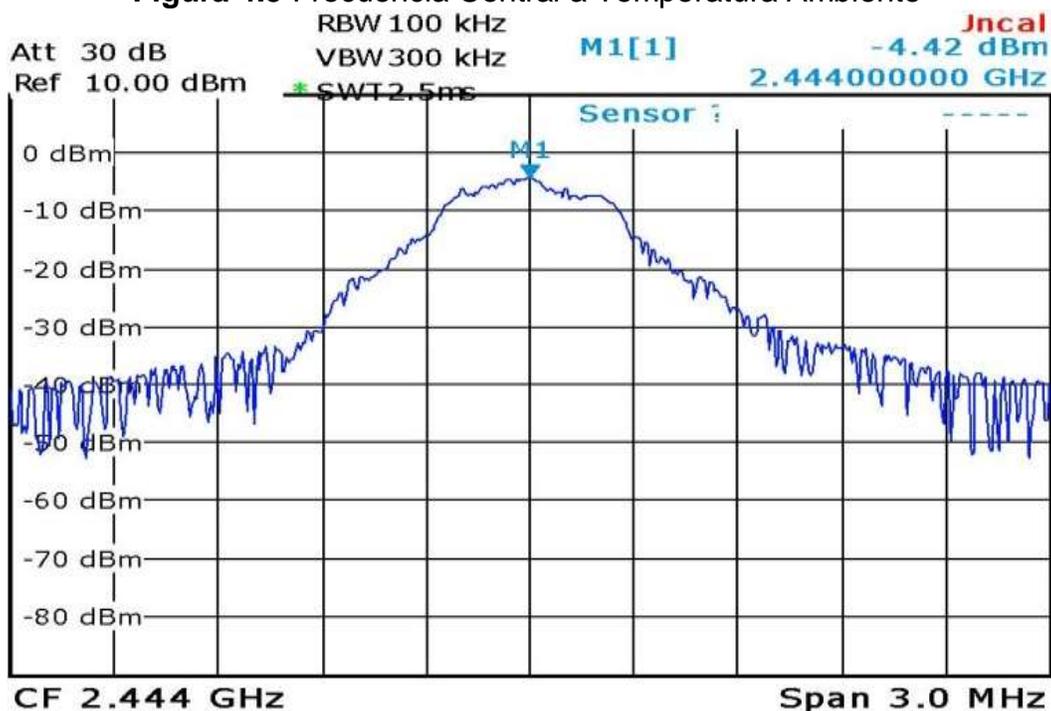
La figura 4.6 muestra los resultados obtenidos luego de inducir calor al módulo radio transmisor durante cinco minutos, el marcador *M1* mantiene su valor en 2.444 GHz, por lo cual no se percibió corrimiento de la frecuencia portadora.

Con los resultados de esta prueba, se demostró que la herramienta de desarrollo tiene un buen comportamiento frente a altas temperaturas, pues luego de someter el módulo radio transmisor a altas temperaturas, la frecuencia portadora permaneció fija.

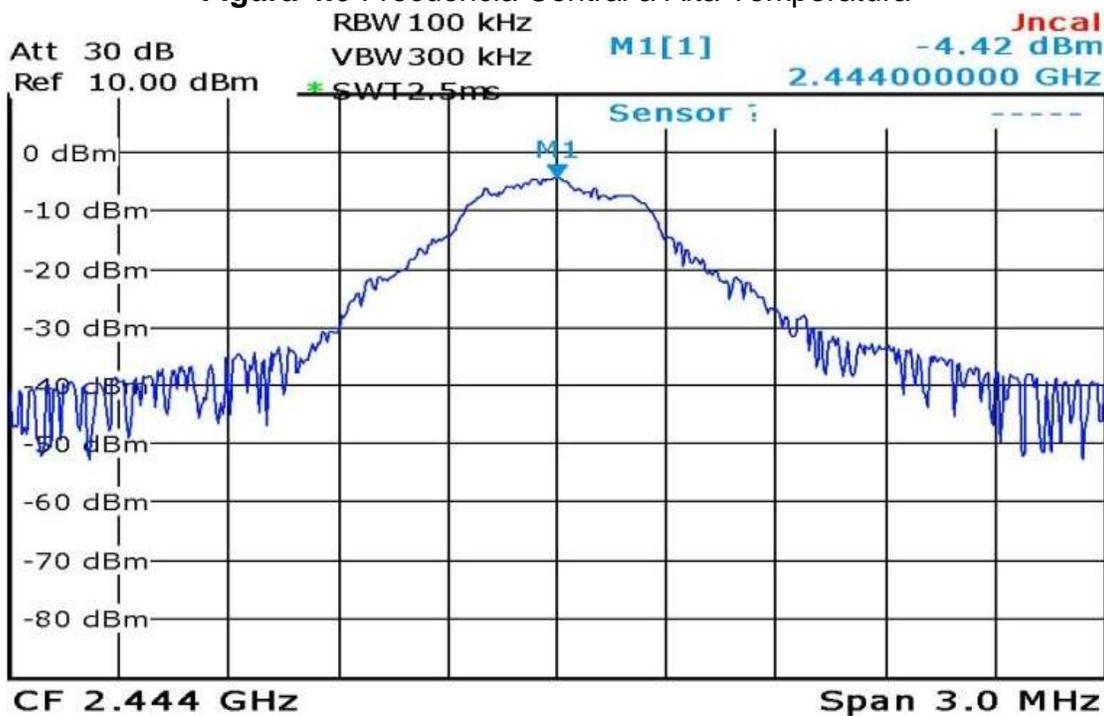
---

<sup>45</sup> El rango de precisión de frecuencia definido por el fabricante es +/- 60 ppm.

**Figura 4.5** Frecuencia Central a Temperatura Ambiente



**Figura 4.6** Frecuencia Central a Alta Temperatura



#### 4.1.4 Medida de Ancho de Banda de la Señal

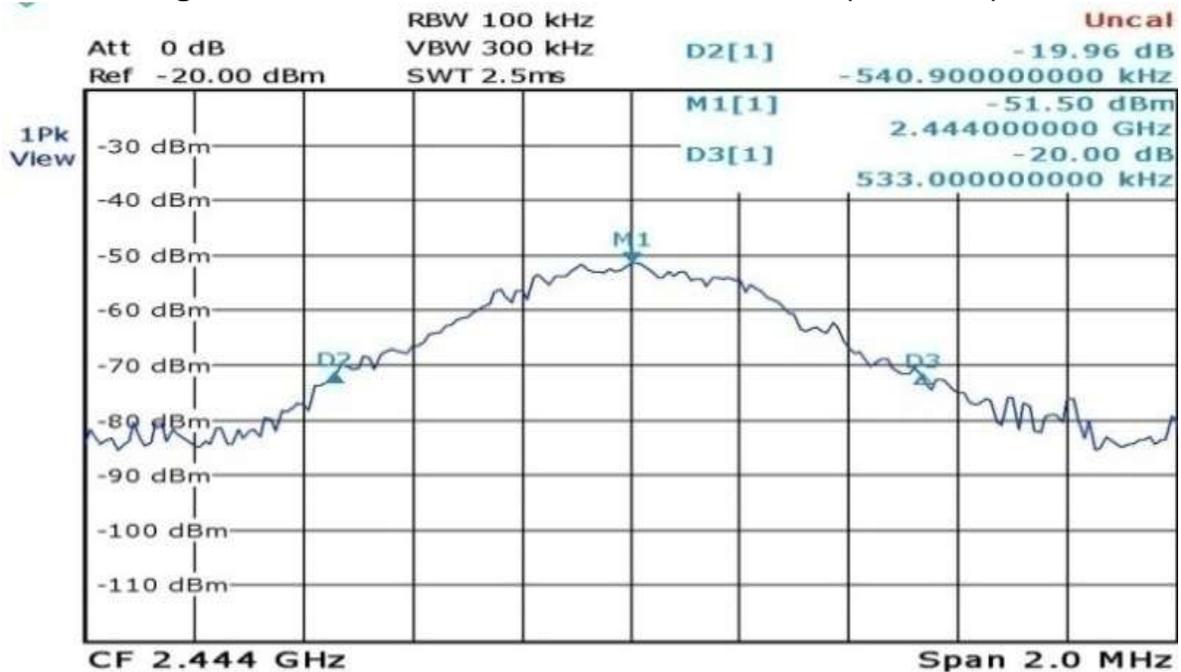
El transceptor nRF24LU1 tiene un ancho de banda de 1 MHz para 1 Mbps y 2 MHz para 2 Mbps [4].

De acuerdo a la sección 3.4.1.4 se realizaron medidas del ancho de banda para 20 dBr y 30 dBr, tanto para 1Mbps como para 2 Mbps.

- Ancho de Banda de la señal a 20 dBr para 1 Mbps

La figura 4.7 muestra el ancho de banda práctico a 20 dBr para una velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps. Las marcas *D2* y *D3* se encuentran 20 dB por debajo de la componente central o componente más significativa, por lo cual sumando los valores de los diferenciales *D2* y *D3* se obtiene el ancho de banda de la señal a 20 dBr mostrado en la ecuación 4.6, por otro lado al reemplazar los valores teórico y experimental del ancho de banda a 20 dBr en la ecuación 4.1 se obtiene el porcentaje de error en la medida, como se representa en la ecuación 4.7.

**Figura 4.7** Ancho de Banda de la Señal a 20 dBr para 1 Mbps



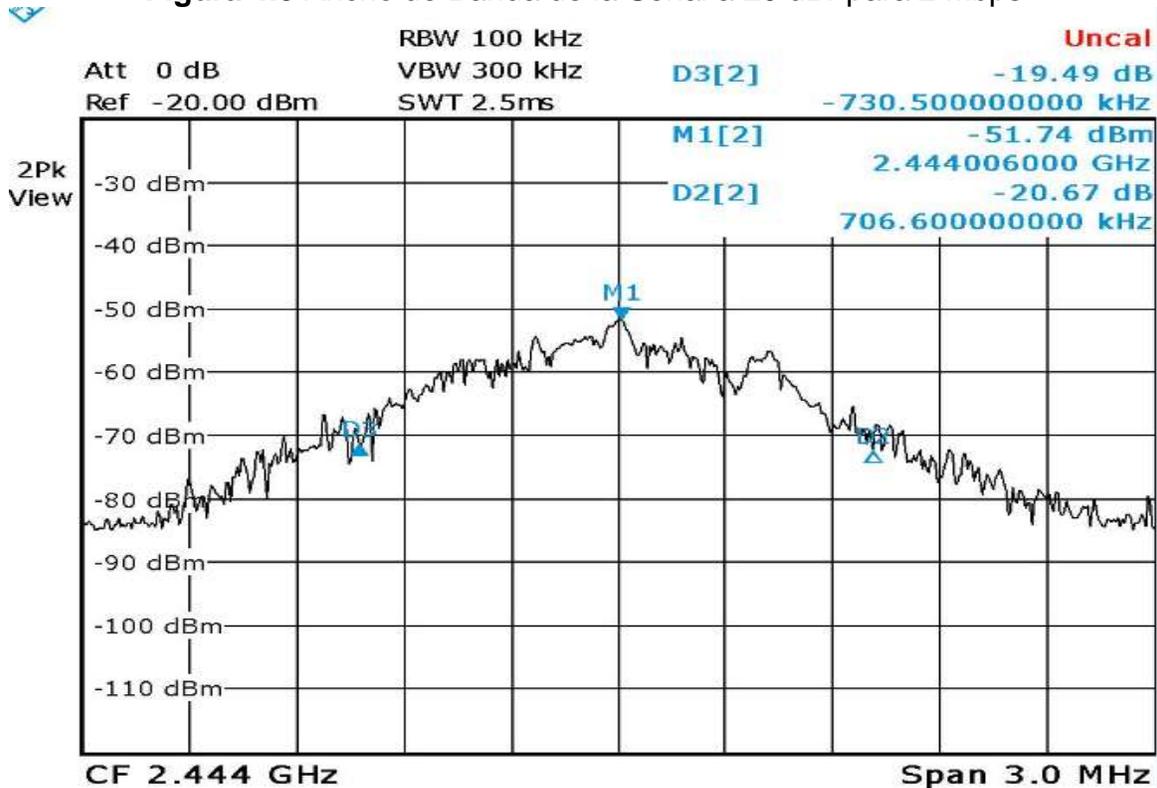
$$\begin{aligned}
 BW_{20dBr} &= |540.9[\text{KHz}] + 533[\text{KHz}]| \\
 BW_{20dBr} &= 1073.9 [\text{KHz}] = 1.0739 [\text{MHz}]
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

$$Error = \frac{|1 \text{ [MHz]} - 1.0739 \text{ [MHz]}|}{1 \text{ [MHz]}} * 100 = 0.0739\% \quad (4.7)$$

- Ancho de Banda de la señal a 20 dBr para 2 Mbps

Según la ecuación 4.8 el ancho de banda práctico a 20 dBr para una velocidad de transmisión de datos de 2 Mbps es la suma de los valores de  $D2$  y  $D3$ , los valores de los diferenciales  $D2$  y  $D3$  se muestran en la figura 4.8, por otro lado el porcentaje de error en la medida se calcula en la ecuación 4.9.

**Figura 4.8** Ancho de Banda de la Señal a 20 dBr para 2 Mbps



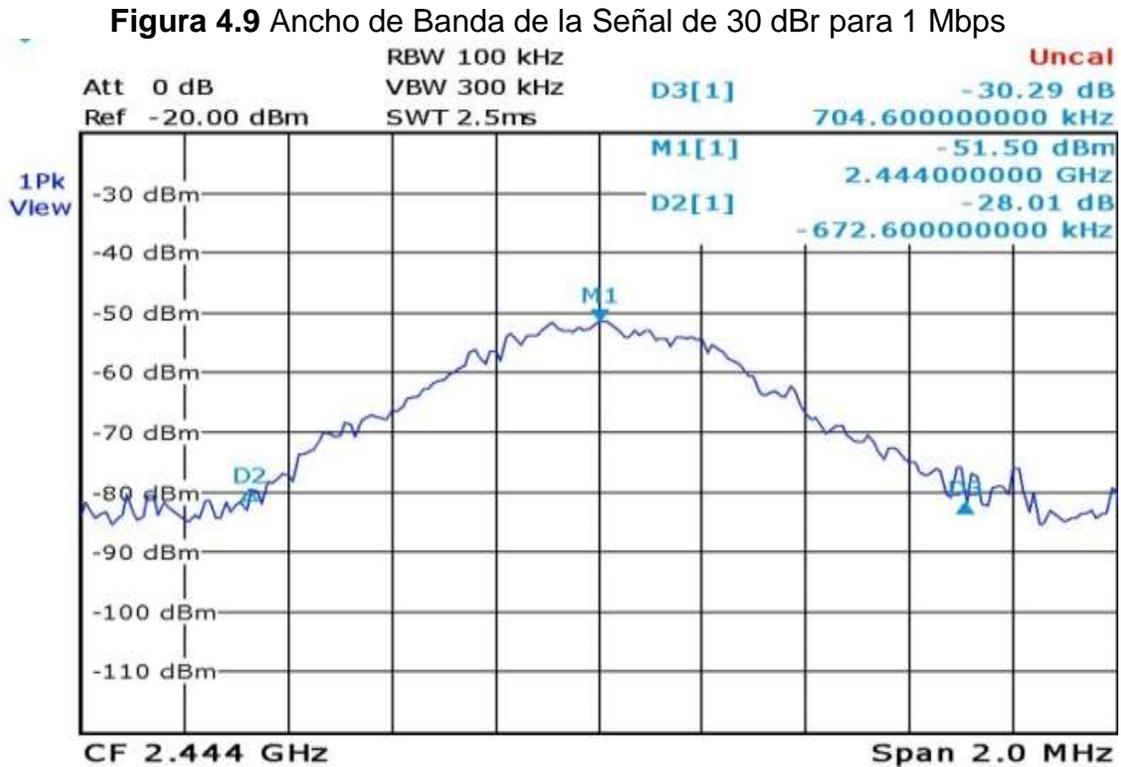
$$BW_{20dBr} = |730.5 \text{ [KHz]} + 706.6 \text{ [KHz]}| \quad (4.8)$$

$$BW_{20dBr} = 1437.1 \text{ [KHz]} = 1.4371 \text{ [MHz]}$$

$$Error = \frac{|2 \text{ [MHz]} - 1.4371 \text{ [MHz]}|}{2 \text{ [MHz]}} * 100\% = 0.2814\% \quad (4.9)$$

- Ancho de Banda de la señal a 30 dBr para 1 Mbps

La figura 4.9 muestra el valor de los diferenciales  $D2$  y  $D3$ , los cuales se encuentran 30 dB por debajo de la componente central. En la ecuación 4.10 se obtiene el ancho de banda práctico a 30 dBr para una velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps, además en la ecuación 4.11 se calcula el valor del porcentaje de error en la medida.



$$BW_{30dBr} = |704.6[\text{KHz}] + 672.6[\text{KHz}]| \quad (4.10)$$

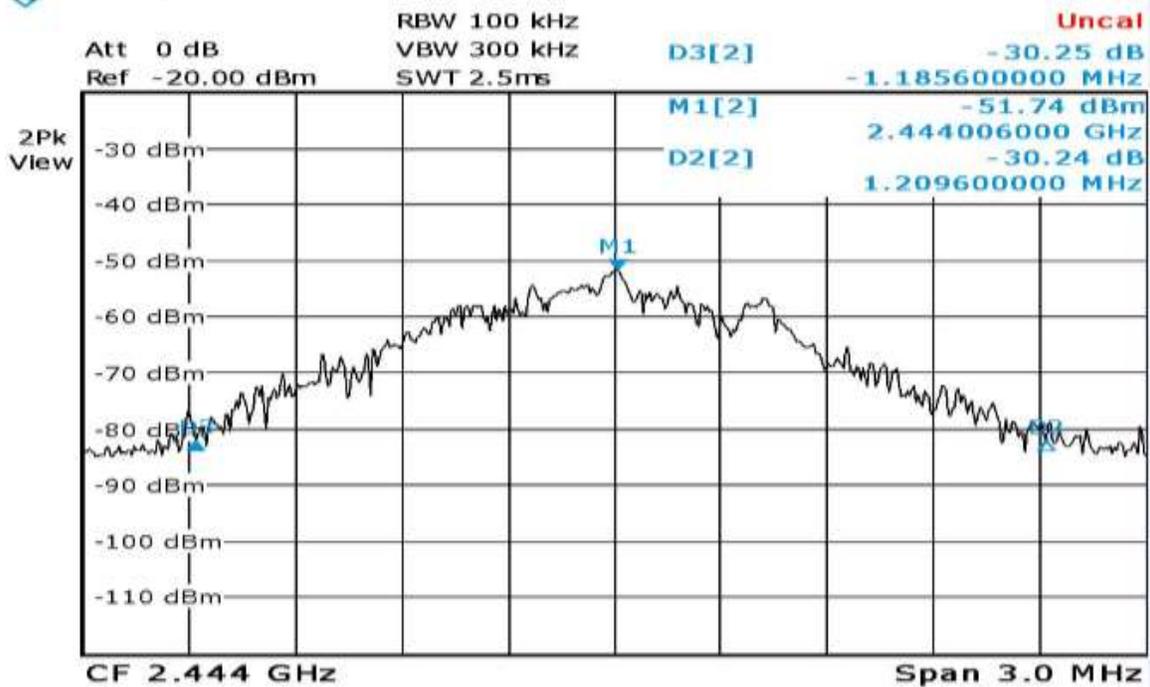
$$BW_{30dBr} = 1377.2 [\text{KHz}] = 1.377 [\text{MHz}]$$

$$Error = \frac{|1 [\text{MHz}] - 1.377 [\text{MHz}]|}{1 [\text{MHz}]} * 100\% = 0.377\% \quad (4.11)$$

- Ancho de Banda de la señal a 30 dBr para 2 Mbps

La figura 4.10 muestra el valor de los diferenciales  $D2$  y  $D3$ , los cuales se encuentran 30 dB por debajo de la componente más significativa. Con la ecuación 4.12 se obtiene el ancho de banda práctico a 30 dBr para una velocidad de transmisión de datos de 2 Mbps y con la ecuación 4.13 se obtiene el valor del porcentaje de error en la medida.

**Figura 4.10** Ancho de Banda de la Señal a 30 dBr para 2 Mbps



$$BW_{30dBr} = |1.1856[\text{MHz}] + 1.2096[\text{MHz}]| \quad (4.12)$$

$$BW_{30dBr} = 2.3952 [\text{MHz}]$$

$$Error = \frac{|2 [\text{MHz}] - 2.3952 [\text{MHz}]|}{2 [\text{MHz}]} * 100\% = 0.1976\% \quad (4.13)$$

En la tabla 4.2 se presenta un resumen con los resultados prácticos de ancho de banda medidos con el analizador con referencia a la componente más significativa, lo cual facilita la comparación entre los distintos resultados.

**Tabla 4.2** Resumen de Resultados del Ancho de Banda Práctico

Ancho de Banda de la señal	1 Mbps	2 Mbps
$BW_{20dBr}$	1.0739 [MHz]	1.4371 [MHz]
$BW_{30dBr}$	1.377 [MHz]	2.3952 [MHz]

De los datos mostrados en la tabla 4.2 se verificó que la medida del ancho banda de la señal a 20 dBr para 1 Mbps es igual al ancho de banda del canal y la medida del ancho banda de la señal a 20 dBr para 2 Mbps es menor al ancho de banda del canal.

De la ecuación A.7 se calcula el ancho de banda teórico nulo a nulo [29] para la Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK), y velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps y de 2 Mbps.

$$\begin{aligned} BW(1\text{Mbps})_{\text{nulo-nulo}} &= 2(160000) + 1000000 \\ BW(1\text{Mbps})_{\text{nulo-nulo}} &= 1320000 = 1.32 \text{ MHz} \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} BW(2\text{Mbps})_{\text{nulo-nulo}} &= 2(320000) + 2000000 \\ BW(2\text{Mbps})_{\text{nulo-nulo}} &= 2640000 = 2.64 \text{ MHz} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Al comparar los resultados teóricos de ancho de banda teórico de la señal modulada con la técnica de Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK) que se obtuvieron a partir de los datos proporcionados por el fabricante en 4.14 y 4.15 y los resultados prácticos de ancho de banda a 30 dB presentados en la tabla 4.2 se observa que para la velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps los resultados son iguales, mientras que para la velocidad de transmisión de datos de 2 Mbps la diferencia es de 2 MHz, además son valores de ancho de banda mayores al ancho de banda de canal brindado por el fabricante<sup>46</sup>. Evidenciando que 30 dB por debajo de la amplitud máxima se obtiene una aproximación al ancho de banda teórico nulo a nulo del espectro de la Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK).

## 4.2 TASA DE ERROR DE BIT (BER) DEL SISTEMA

Las medidas de la Tasa de Error de Bit (BER) se realizaron tanto en interiores como en exteriores, variando la distancia, la potencia de transmisión y la velocidad de transmisión de datos.

Para cada uno de los datos de la Tasa de Error de Bit (BER) obtenidos se realizaron 60 mediciones, con el fin de promediar los resultados.

### 4.2.1 Resultados en Exteriores

Las medidas de la Tasa de Error de Bit (BER) se realizaron configurando los módulos radio nRF24LU1 distintas velocidades de transmisión de datos de 1 Mbps

---

<sup>46</sup>Ancho de banda proporcionado por el fabricante 1 MHz para 1 Mbps y 2 MHz para 2 Mbps.

y de 2 Mbps, para potencias de transmisión de -12 dBm y -18 dBm, además se tomaron en horas de la mañana, a una temperatura aproximada de 20°C<sup>47</sup>.

**4.2.1.1 BER a 1 Mbps.** La tabla 4.3 presenta los valores de la Tasa de Error de Paquete (PER) y de la Tasa de Error de Bit (BER) obtenidos a diferentes distancias con una potencia de transmisión de -12 dBm.

**Tabla 4.3** Valores de BER y PER en Exteriores para 1 Mbps a -12 dBm

Distancia (m)	PER	BER
1	$3.45 \times 10^{-5}$	$1.30 \times 10^{-7}$
9	$6.90 \times 10^{-5}$	$2.60 \times 10^{-7}$
17	$6.90 \times 10^{-4}$	$2.61 \times 10^{-6}$
21	$8.14 \times 10^{-3}$	$3.09 \times 10^{-5}$
23	$2.49 \times 10^{-1}$	$1.08 \times 10^{-3}$
24	$9.52 \times 10^{-1}$	$1.14 \times 10^{-2}$

La tabla 4.4 presenta los valores de la Tasa de Error de Paquete (PER) y de la Tasa de Error de Bit (BER) para -18 dBm en exteriores, a diferentes distancias.

**Tabla 4.4** Valores de BER y PER en Exteriores para 1 Mbps a -18 dBm

Distancia (m)	PER	BER
1	$2.07 \times 10^{-4}$	$7.81 \times 10^{-7}$
9	$7.25 \times 10^{-3}$	$2.74 \times 10^{-5}$
12	$4.47 \times 10^{-2}$	$1.72 \times 10^{-4}$
13	$1.27 \times 10^{-1}$	$5.14 \times 10^{-4}$
14	$4.56 \times 10^{-1}$	$2.29 \times 10^{-3}$
15	$6.59 \times 10^{-1}$	$4.05 \times 10^{-3}$

**4.2.1.2 BER a 2 Mbps.** En la tabla 4.5 se presentan los valores de la Tasa de Error de Paquete (PER) y de la Tasa de Error de Bit (BER) obtenidos a diferentes distancias con una potencia de transmisión de -12 dBm. De igual forma la tabla 4.6 presenta los resultados a -18 dBm.

**Tabla 4.5** Valores de BER y PER en Exteriores para 2 Mbps a -12 dBm

Distancia (m)	PER	BER
1	$6.90 \times 10^{-5}$	$2.60 \times 10^{-7}$
9	$1.04 \times 10^{-4}$	$3.91 \times 10^{-7}$
14	$6.90 \times 10^{-4}$	$2.61 \times 10^{-6}$

<sup>47</sup> Datos tomados del Módulo de Variables Ambientales SIRA de La Universidad del Cauca [12].

**Tabla 4.5 (Continuación)**

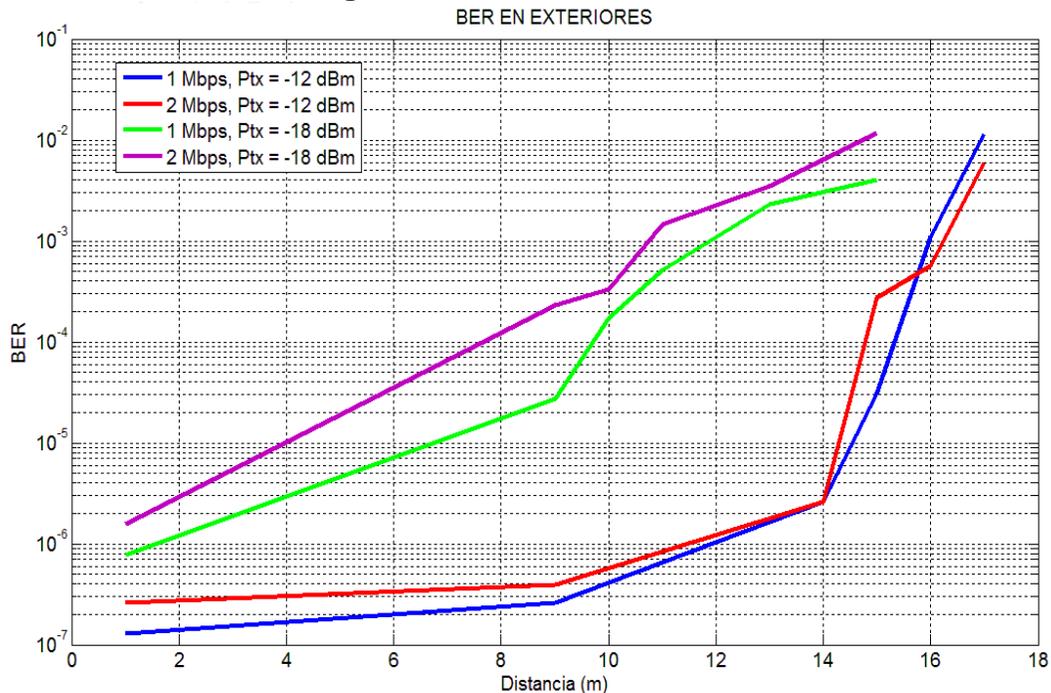
15	$6.98 \times 10^{-2}$	$2.73 \times 10^{-4}$
16	$1.39 \times 10^{-1}$	$5.64 \times 10^{-4}$
17	$7.96 \times 10^{-1}$	$5.99 \times 10^{-3}$

**Tabla 4.6** Valores de BER y PER en Exteriores para 2 Mbps a -18 dBm

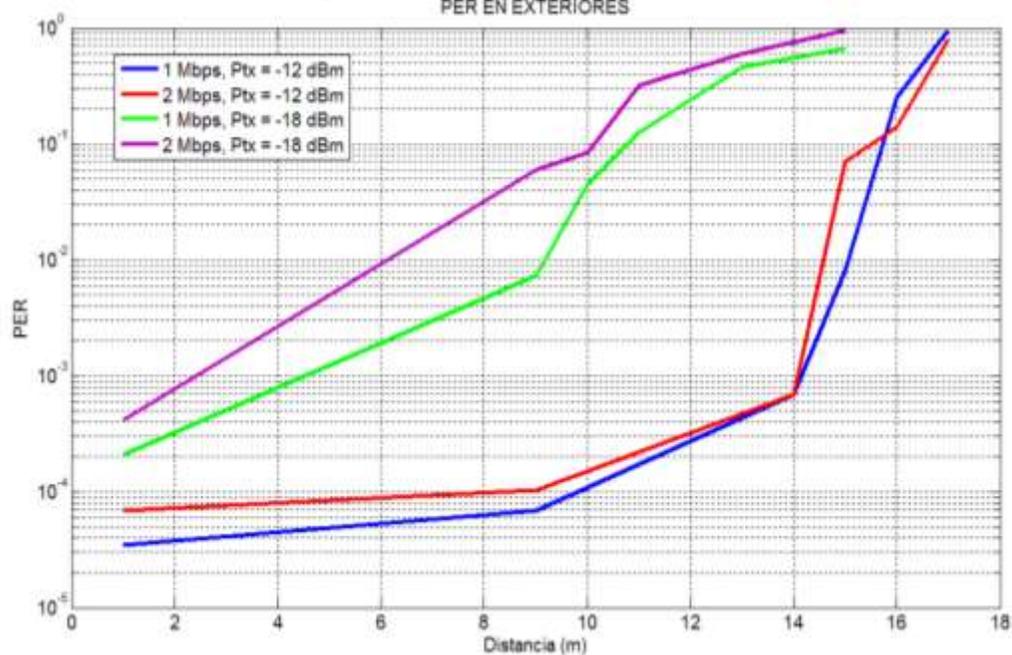
Distancia (m)	PER	BER
1	$4.14 \times 10^{-4}$	$1.56 \times 10^{-6}$
9	$5.92 \times 10^{-2}$	$2.30 \times 10^{-4}$
10	$8.49 \times 10^{-2}$	$3.35 \times 10^{-4}$
11	$3.22 \times 10^{-1}$	$1.46 \times 10^{-3}$
13	$6.00 \times 10^{-1}$	$3.45 \times 10^{-3}$
15	$9.57 \times 10^{-1}$	$1.18 \times 10^{-2}$

A partir de los valores de las tablas 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6 se obtienen las figuras 4.11 y 4.12, las cuales presenta las curvas de la Tasa de Error de Bit (BER) y de la Tasa de Error de Paquete (PER) respectivamente en función de la distancia obtenidas en interiores para diferentes potencias y velocidades de transmisión de datos.

**Figura 4.11 BER en Exteriores**



**Figura 4.12 PER en Exteriores**



En las figuras 4.11 y 4.12 se muestra que la Tasa de Error de Bit (BER) aumenta a medida que se incrementa la distancia al igual que la Tasa de Error de Paquete (PER), por otra parte se observa que las gráficas tienen un comportamiento similar para las dos velocidades de transmisión de datos, sin embargo se aprecia que a menor potencia de transmisión es decir para las curvas verde y morada las cuales representan los resultados de la Tasa de Error de Bit (BER) y de la Tasa de Error de Paquete (PER) para una potencia de transmisión de  $-18$  dBm el número de bits errados aumenta.

#### 4.2.2 Resultados en Interiores

Las primeras medidas de la Tasa de Error de Bit (BER) se tomaron a un metro de distancia entre el módulo radio transmisor y el módulo radio receptor y se repitieron cada ocho metros hasta el final del pasillo. Tanto el módulo radio transmisor como el módulo radio receptor se ubicaron a 80 centímetros del suelo<sup>48</sup>. Las medidas en este escenario se realizaron en horas de la noche, para evitar que los resultados se modificaran a causa de la interferencia de las personas que transitaban por el pasillo.

---

<sup>48</sup> Se observan mejores resultados, cuando el módulo radio transmisor se aleja del piso, pues esto disminuye las pérdidas por absorción del suelo [10].

**4.2.2.1 BER a 1 Mbps.** Se configuraron los módulos radio nRF24LU1 con una velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps y se realizaron pruebas ubicando el módulo radio receptor a diferentes distancias del módulo radio transmisor a lo largo del pasillo. Esta prueba se realizó para potencias de transmisión de -12 dBm y de -18 dBm.

La tabla 4.7 presenta los valores de la Tasa de Error de paquete (PER) y de la Tasa de Error de Bit (BER) obtenidos a diferentes distancias con una potencia de transmisión de -12 dBm.

**Tabla 4.7** Valores de BER y PER en Interiores para 1 Mbps a -12 dBm

Distancia (m)	PER	BER
1	$5.75 \times 10^{-4}$	$2.17 \times 10^{-6}$
9	$9.54 \times 10^{-4}$	$3.6 \times 10^{-6}$
17	$1.71 \times 10^{-2}$	$6.5 \times 10^{-5}$
25	$3.26 \times 10^{-2}$	$1.25 \times 10^{-4}$
33	$5.03 \times 10^{-2}$	$1.95 \times 10^{-4}$
41	$8.66 \times 10^{-2}$	$3.28 \times 10^{-5}$
49	$2.56 \times 10^{-2}$	$1.12 \times 10^{-3}$

Con una potencia de transmisión de -18 dBm se obtienen valores de la Tasa de Error de Paquete (PER) y de la Tasa de Error de Bit (BER) para diferentes distancias, los cuales se presentan en la tabla 4.8.

**Tabla 4.8** Valores de BER y PER en Interiores para 1 Mbps a -18 dBm

Distancia (m)	PER	BER
1	$2.01 \times 10^{-2}$	$7.67 \times 10^{-5}$
9	$6.44 \times 10^{-2}$	$2.51 \times 10^{-4}$
17	$3.94 \times 10^{-2}$	$1.52 \times 10^{-4}$
25	$1.50 \times 10^{-1}$	$6.14 \times 10^{-4}$
33	$3.78 \times 10^{-1}$	$1.79 \times 10^{-3}$
41	$5.1 \times 10^{-1}$	$2.74 \times 10^{-3}$

**4.2.2.2 BER a 2 Mbps.** Para esta prueba se configuró la velocidad de transmisión de datos en 2 Mbps y se realizó el mismo procedimiento descrito en la prueba anterior.

En la tabla 4.9 se presentan los valores de la Tasa de Error de Paquete (PER) y de la Tasa de Error de Bit (BER) obtenidos a diferentes distancias con una

potencia de transmisión de -12 dBm. De igual forma la tabla 4.10 presenta los resultados con una potencia de transmisión de -18 dBm.

**Tabla 4.9** Valores de BER y PER en Interiores para 2 Mbps a -12 dBm

<b>Distancia (m)</b>	<b>PER</b>	<b>BER</b>
1	$3.79 \times 10^{-4}$	$1.43 \times 10^{-6}$
9	$1.01 \times 10^{-3}$	$3.81 \times 10^{-6}$
17	$1.34 \times 10^{-2}$	$5.09 \times 10^{-5}$
25	$3.81 \times 10^{-2}$	$1.46 \times 10^{-4}$
33	$3.43 \times 10^{-2}$	$1.32 \times 10^{-4}$
41	$2.76 \times 10^{-3}$	$1.04 \times 10^{-5}$
49	$5.82 \times 10^{-1}$	$3.29 \times 10^{-3}$

**Tabla 4.10** Valores de BER y PER en Interiores para 2 Mbps a -18 dBm

<b>Distancia (m)</b>	<b>PER</b>	<b>BER</b>
1	$1.12 \times 10^{-2}$	$4.24 \times 10^{-5}$
9	$2.06 \times 10^{-1}$	$8.70 \times 10^{-4}$
17	$3.18 \times 10^{-2}$	$1.22 \times 10^{-4}$
25	$1.75 \times 10^{-1}$	$7.25 \times 10^{-4}$
33	$3.84 \times 10^{-1}$	$1.83 \times 10^{-3}$
41	$4.60 \times 10^{-1}$	$2.32 \times 10^{-3}$

A partir de los valores de las tablas 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10 se obtienen las figuras 4.13 y 4.14, las cuales presentan las curvas la de Tasa de Error de Bit (BER) y de la Tasa de Error de Paquete (PER) respectivamente en función de la distancia obtenidas en interiores para diferentes potencias y velocidades de transmisión de datos.

En las figuras 4.13 y 4.14 se muestra que los valores de la Tasa de Error de Bit (BER) y de la Tasa de Error de Paquete (PER) se incrementan a mayor distancia sin embargo existen puntos para los cuales el número de bits errados disminuye debido a los mecanismos de propagación presentes en este escenario, por otra parte se observa que para una menor potencia de transmisión el número de bits errados aumenta y que las gráficas tienen un comportamiento similar para las dos velocidades de transmisión de datos.

Figura 4.13 BER en Interiores

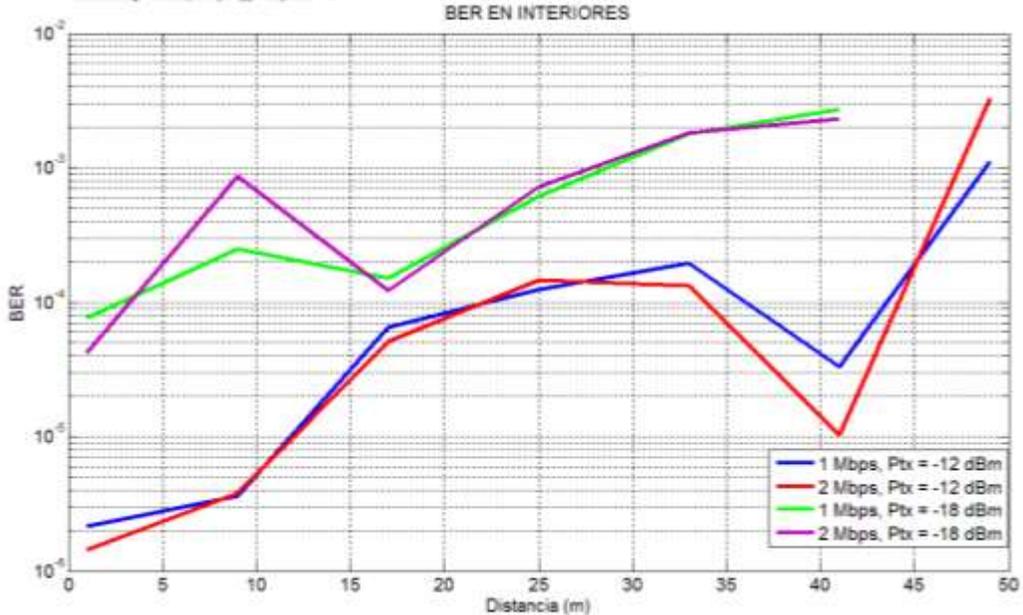
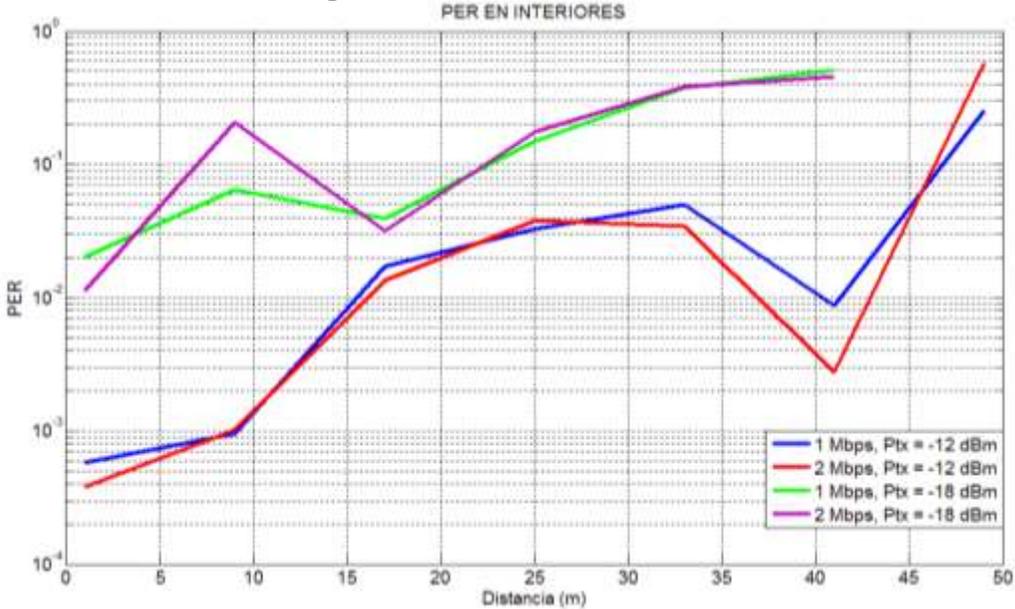


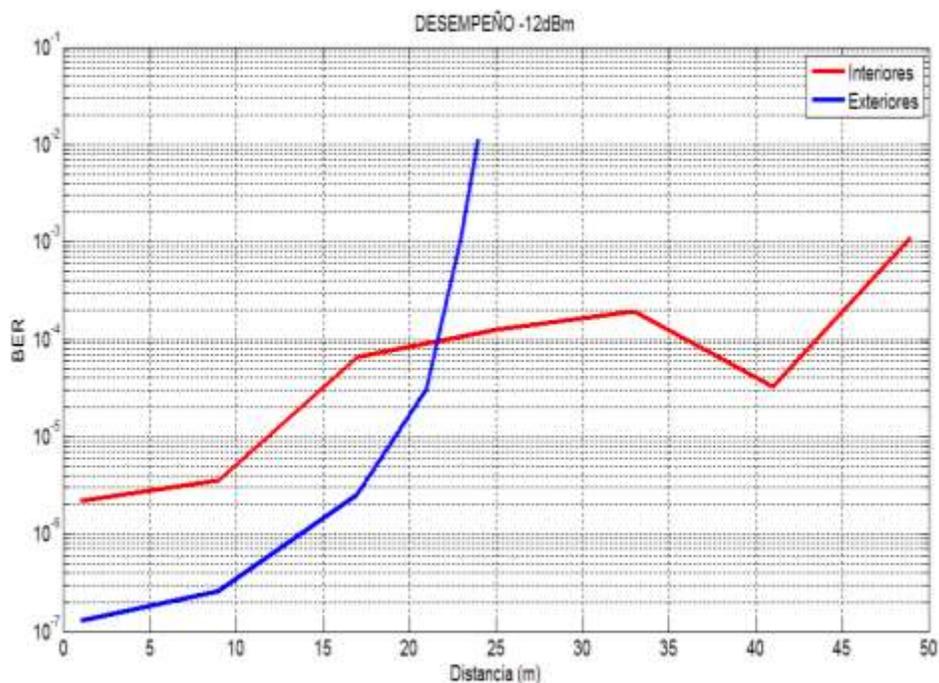
Figura 4.14 PER en Interiores



#### 4.2.3 Comparación de los Resultados de BER en Exteriores e Interiores

A partir de los valores de las tablas 4.3 y 4.7 se obtiene la figura 4.15, la cual presenta las curvas de la Tasa de Error de Bit (BER) respecto a la distancia obtenidas en interiores y exteriores para una potencia de transmisión de -12 dBm y una velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps.

**Figura 4.15** BER vs Distancia en Interiores y Exteriores



De acuerdo a los resultados, se observa que en el escenario escogido para interiores se obtienen paquetes hasta el final del pasillo; es decir para distancias mayores a 40 metros, mientras que para exteriores no se perciben paquetes para distancias mayores a 25 metros. Por otra parte para distancias menores a los 21 metros la BER es menor en exteriores y para distancias mayores a los 21 metros la BER es menor en interiores Este comportamiento es el esperado, puesto que en el pasillo de la FIET se genera un efecto de guía de onda donde la señal se confina a través del mismo<sup>49</sup>.

Para exteriores el comportamiento es diferente, pues la señal se distribuye hacia diferentes direcciones reduciendo el radio de cobertura del sistema prototipo de comunicación de datos implementado.

---

<sup>49</sup>Por el efecto de multirayectoria [23].

### 4.3 OBTENCIÓN DE LA ENERGÍA DE BIT RESPECTO A LA DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA DE RUIDO (Eb/No)

#### 4.3.1. Potencia de Recepción en Exteriores e Interiores

Con el fin de obtener la medida práctica de la potencia de recepción en los dos escenarios exteriores e interiores se utilizó el kit de desarrollo CY3653 [11]. Las medidas se tomaron en ambos escenarios (Exteriores e Interiores) separando el módulo radio transmisor nRF24LU1 del módulo CY3653 cada metro además se realizaron para diferentes potencias de transmisión<sup>50</sup>. Por limitaciones de equipos no fue posible medir la potencia de recepción para una velocidad de transmisión de datos de 2 Mbps. En este trabajo de grado se asume que la potencia de recepción para la velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps es igual a la velocidad de transmisión de datos de 2 Mbps.

#### 4.3.2 Modelo de Pérdidas de Propagación de Pendiente Única

- Modelo de pérdidas de propagación de pendiente única en exteriores

La tabla 4.11 presenta los valores del índice de variación de potencia  $n$  y el valor de la constante de pérdidas  $L_0$ . La figura 4.16 muestra los resultados de pérdidas básicas obtenidos en la práctica para potencias de transmisión de -18 dBm y 0 dBm representadas por las curvas de color azul y rojo respectivamente, y las pérdidas básicas del modelo de pérdidas de propagación de pendiente única en exteriores representada por la curva de color verde.

**Tabla 4.11** Constantes de Propagación para Exteriores

Velocidad	$L_0$ (dB)	$n$
1 Mbps, 2 Mbps	33.7	2.39

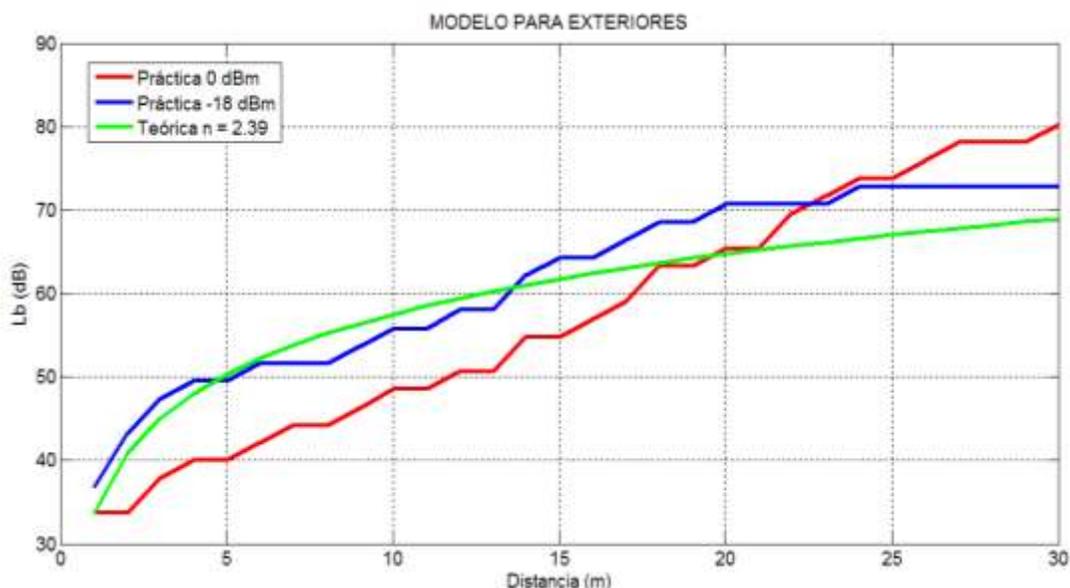
Con los valores de la tabla 4.11 y reemplazándolos en la ecuación 3.16 se obtiene la ecuación 4.16, la cual representa la potencia de recepción modelada para velocidades de transmisión de datos de 1 Mbps y de 2 Mbps para exteriores.

$$Prx[\text{dBm}] = Ptx[\text{dBm}] - 33.7 - 23.9 \log d [\text{m}] \quad (4.16)$$

---

<sup>50</sup> Se realizan mediciones con potencias de 0 y -18 dBm.

**Figura 4.16** Modelo de Pérdidas Básicas de Propagación para Exteriores



En la figura 4.16 se muestra como las pérdidas básicas se incrementan cuando la distancia aumenta. En la propagación de ondas electromagnéticas en escenarios exteriores, la onda se dispersa reduciendo la potencia inversamente proporcional al cuadrado de la distancia [27]. Al aplicar el modelo de pérdidas de propagación de pendiente única, se obtuvo el valor de índice de variación de potencia igual a 2.39, el cual representa una aproximación a los resultados obtenidos en la práctica. El valor fue comprobado matemáticamente calculando el Error Medio Mínimo (MMSE, *Minimum Mean Square Error*)<sup>51</sup>, la ecuación 4.17 describe el MMSE [26].

$$F(\gamma) = \sum_{i=1}^m [M_{measured}(di) - M_{model}(di)]^2 \quad (4.17)$$

Haciendo uso de la ecuación 4.16 se obtiene el valor modelado de la potencia de recepción para los diferentes escenarios para cada distancia en particular.

- Modelo de pérdidas básicas de propagación en interiores

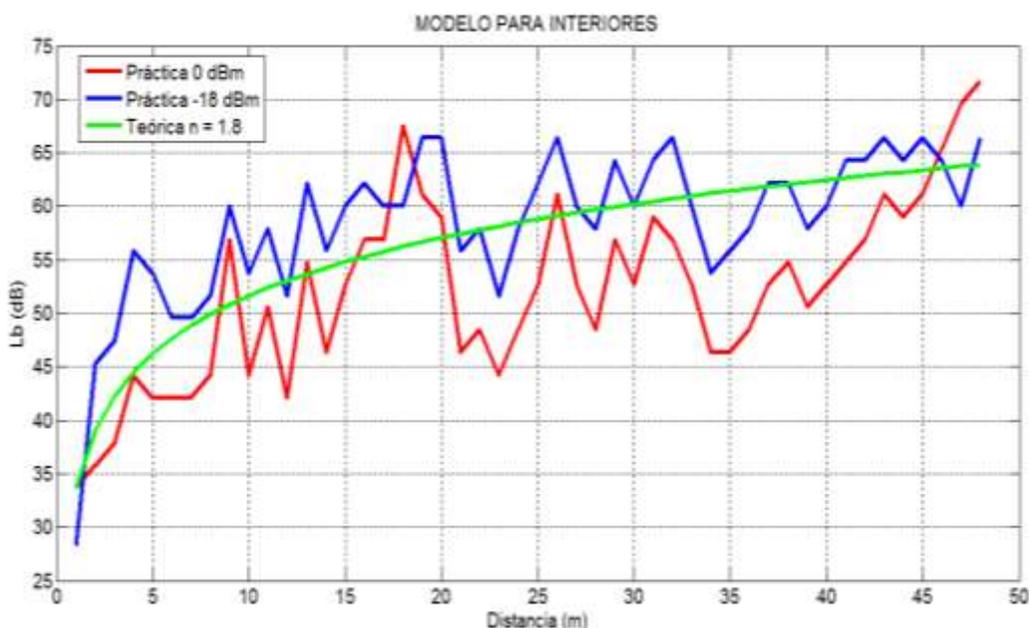
A partir de los resultados obtenidos de potencia de recepción se estimaron los valores del índice de variación de potencia  $n$  y el valor de la constante de pérdidas

<sup>51</sup> Mediante el MMSE se obtuvo un valor de 2.4 para el índice de variación de potencia.

$L_0$  descrito en la sección 3.4.3.1. La tabla 4.12 presenta estos valores. La figura 4.17 muestra los resultados de pérdidas básicas obtenidos en la práctica para potencias de transmisión de -18 dBm y 0 dBm representadas por las curvas de color azul y rojo respectivamente, y las pérdidas del modelo de pérdidas de propagación de pendiente única en interiores representada por la curva de color verde, de donde se aprecia un comportamiento similar para las dos potencias de transmisión.

La figura 4.17 muestra que a lo largo del pasillo existen réplicas de la señal causadas por los mecanismos de propagación los cuales ocasionan que las pérdidas de propagación aumenten o disminuyan su valor debido a la incidencia de las trayectorias múltiples las cuales llegan al módulo receptor, en diversos instantes de tiempo, con diferentes niveles de amplitud y fase [22][25].

**Figura 4.17** Modelo de Pérdidas Básicas de Propagación para Interiores



**Tabla 4.12** Constantes de Propagación para Interiores

Velocidad	$L_0$ (dB)	n
1 Mbps, 2 Mbps	33.65	1.8

Al aplicar el modelo de pérdidas de propagación de pendiente única, se obtiene un valor de 1.8 para el índice de variación de potencia, el cual brinda una

aproximación a los datos obtenidos de forma práctica. Este valor se verificó calculando el Error Medio Mínimo (MMSE)<sup>52</sup>.

Al sustituir los valores de la tabla 4.12 en la ecuación 3.16, se obtiene el modelo de pérdidas de propagación de pendiente única para interiores. La ecuación 4.18 representa la potencia de recepción modelada para velocidades de transmisión de datos de 1 Mbps y de 2 Mbps para interiores.

$$Prx[\text{dBm}] = Ptx[\text{dBm}] - 33.65 - 18 \log d [\text{m}] \quad (4.18)$$

### 4.3.3 Predicción de Cobertura del Sistema Prototipo de Comunicación de Datos en Exteriores con *Wireless Insite*®

- Simulación 1

La figura 4.18 muestra el escenario de exteriores modelado mediante la herramienta *Wireless Insite*®<sup>53</sup> [22]. Para la simulación 1 se ubicó un punto transmisor al lado izquierdo de la gradería y una ruta de 30 receptores a lo largo de la misma los cuales se encuentran separados 1 metro. Se configura la potencia de transmisión en 0 dBm y la velocidad de transmisión de datos en 1 Mbps, la distribución de colores a lo largo de la ruta de receptores representa el nivel de potencia recibido en simulación la cual varía desde -58.4 dBm hasta -85 dBm. La ruta de receptores permite obtener los valores de potencia recibida a cada metro a lo largo de la gradería de la misma forma que se obtuvo la medida práctica de la potencia de recepción en el escenario real.

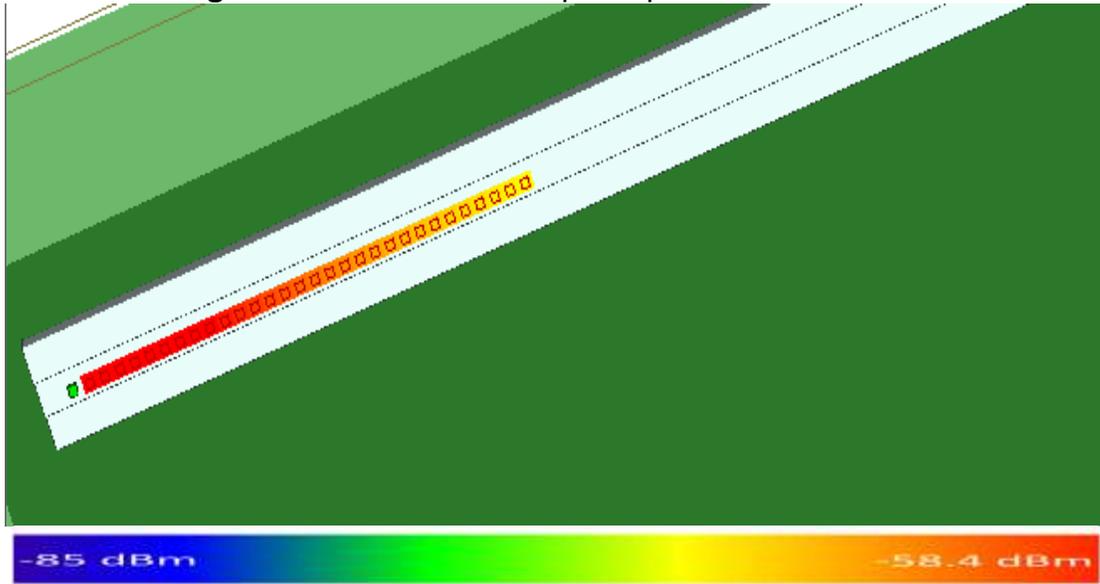
La figura 4.19 muestra el resultado de la simulación 1 donde se observa la potencia de recepción en función de la distancia para cada punto de la ruta. La señal se atenúa a medida que la distancia se incrementa hasta alcanzar 29 metros aproximadamente.

---

<sup>52</sup> Mediante el MMSE se obtuvo un valor de 1.82 para el índice de variación de potencia.

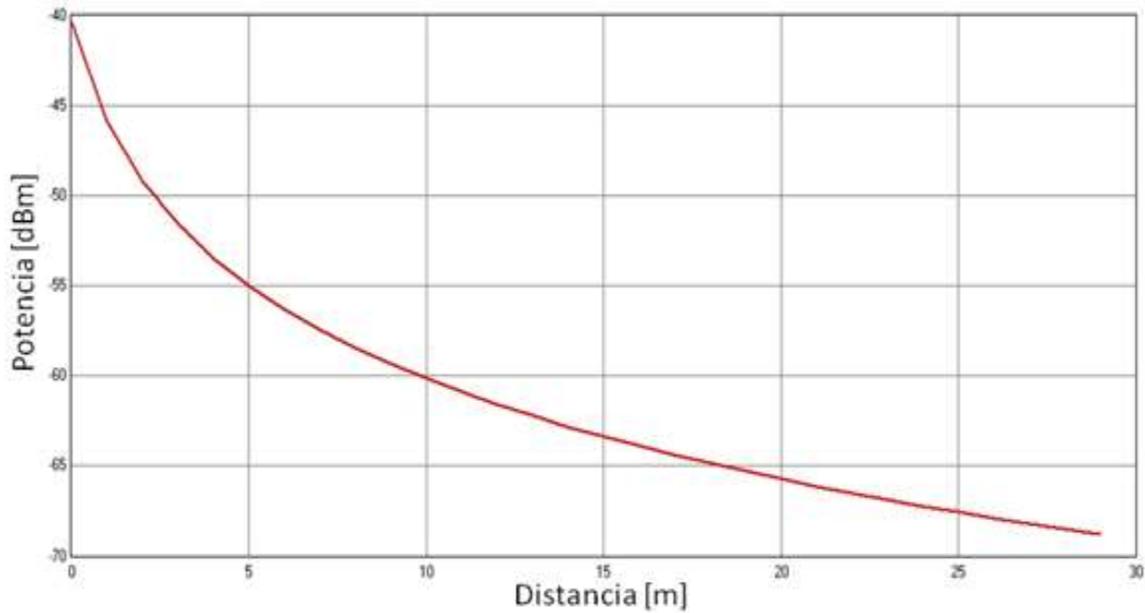
<sup>53</sup> En el anexo B se presenta el procedimiento para la simulación.

**Figura 4.18** Potencia Recepción para la Simulación 1

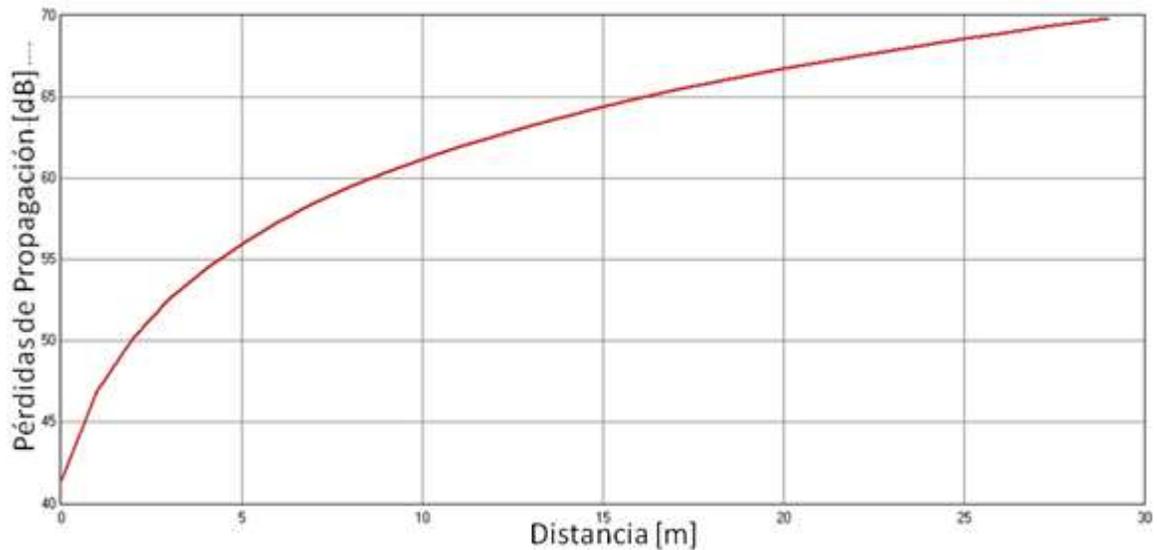


La figura 4.20 muestra las pérdidas de propagación que sufre la señal cuando se dispersa.

**Figura 4.19** Potencia de Recepción vs Distancia



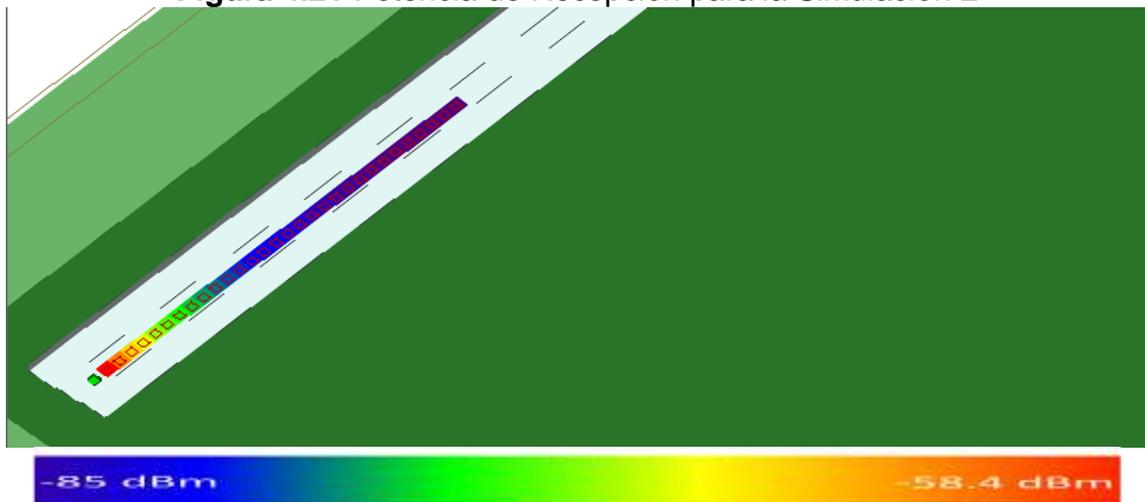
**Figura 4.20** Pérdidas de Propagación vs Distancia



- Simulación 2

La figura 4.21 muestra la simulación 2 para exteriores con potencia de transmisión de -18 dBm y velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps. La ruta de receptores muestra el nivel de potencia recibido en la simulación a lo largo de la gradería, se observa que los receptores cercanos al transmisor reciben altos niveles de potencia indicados por los colores rojo y amarillo, mientras que a mayor distancia los receptores reciben bajos niveles de potencia indicados por los colores azul y morado. Además en la figura 4.22 se muestra que al disminuir la potencia de transmisión se disminuye la cobertura del sistema implementado con la herramienta *Wireless Insite*® en comparación a la simulación anterior.

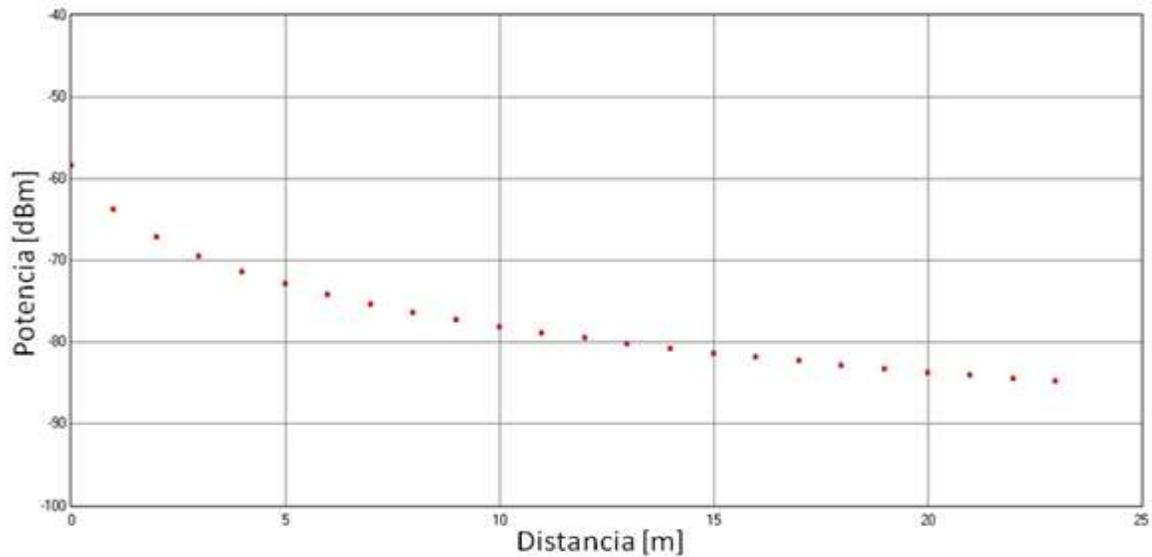
**Figura 4.21** Potencia de Recepción para la Simulación 2



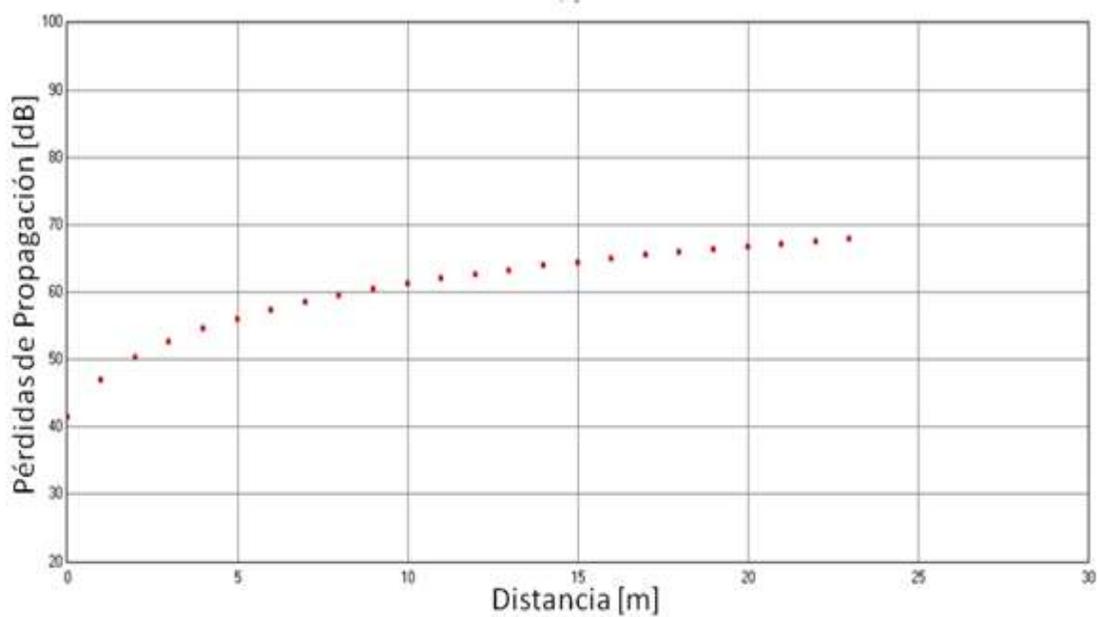
La figura 4.22 muestra el resultado de la simulación 2, en la cual se observa una disminución uniforme de la potencia de recepción a medida que la distancia aumenta.

La figura 4.23 muestra las pérdidas de propagación que sufre la señal en función de la distancia, la cual se dispersa en todas las direcciones.

**Figura 4.22** Potencia de Recepción vs Distancia



**Figura 4.23** Pérdidas de Propagación vs Distancia



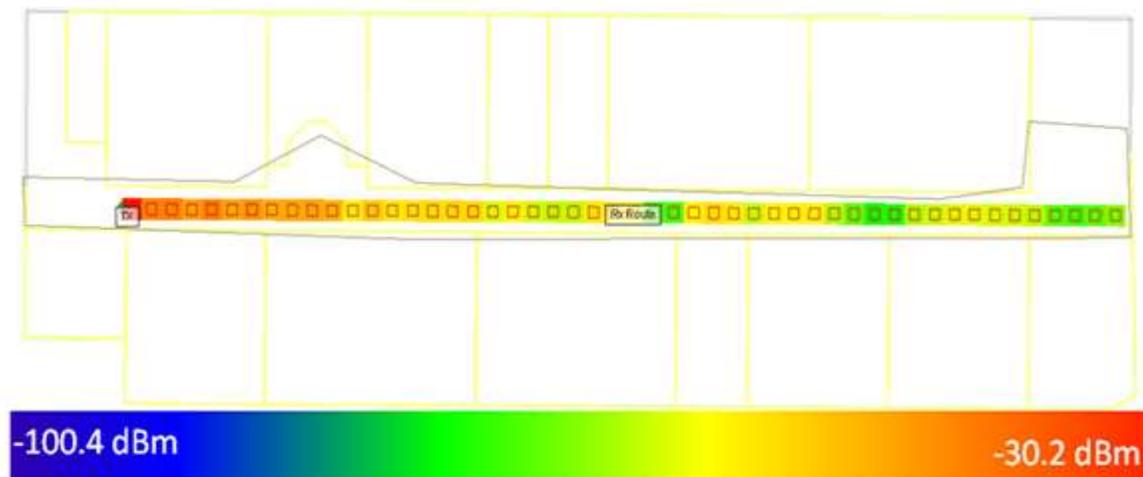
#### 4.3.4 Predicción de Cobertura del Sistema Prototipo de Comunicación de Datos en Interiores con *Wireless Insite*®

- Simulación 3

La figura 4.24 muestra el escenario de interiores modelado mediante la herramienta *Wireless Insite*®<sup>54</sup> [22][24]. Para la simulación 3 se ubicó un punto transmisor al lado izquierdo del inicio del pasillo y una ruta de 50 receptores a lo largo del mismo con un espaciamiento entre los receptores de 1 metro, la separación entre los receptores de la ruta permite obtener los valores de potencia recibida en simulación cada metro a lo largo del pasillo de la misma forma que se obtuvo la medida de la potencia de recepción en el escenario real.

Los parámetros configurados son la potencia de transmisión en 0 dBm y la velocidad de transmisión de datos en 1 Mbps. Los niveles de potencia recibida varían de -30.2 dBm hasta -100.4 dBm. En la figura 4.24 se refleja el efectos de la multitrayectoria, pues aunque los receptores cercanos al transmisor reciben niveles altos de potencia representados por los colores rojo, naranja y amarillo, existen receptores más alejados para los cuales el nivel de potencia recibido es igual alto representado por el color amarillo. Esta simulación sustenta los resultados obtenidos en el escenario real.

**Figura 4.24** Potencia de Recepción para la Simulación 3

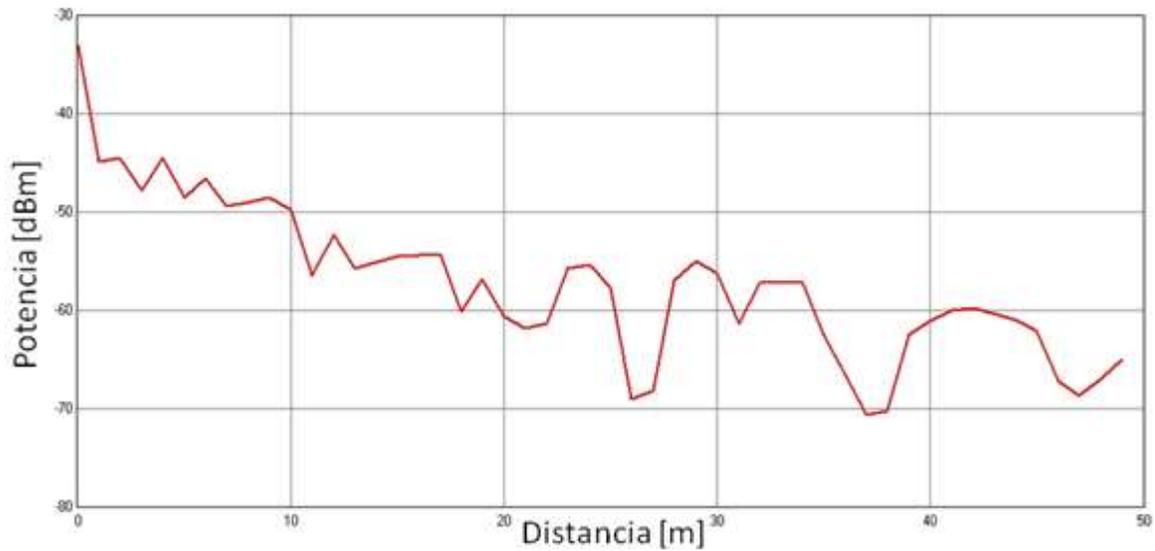


<sup>54</sup> En el anexo B se presenta la configuración de los parámetros de la simulación, los cuales se utilizaron en la implementación del sistema de comunicación de datos con el kit de desarrollo nRF24LU1-DK.

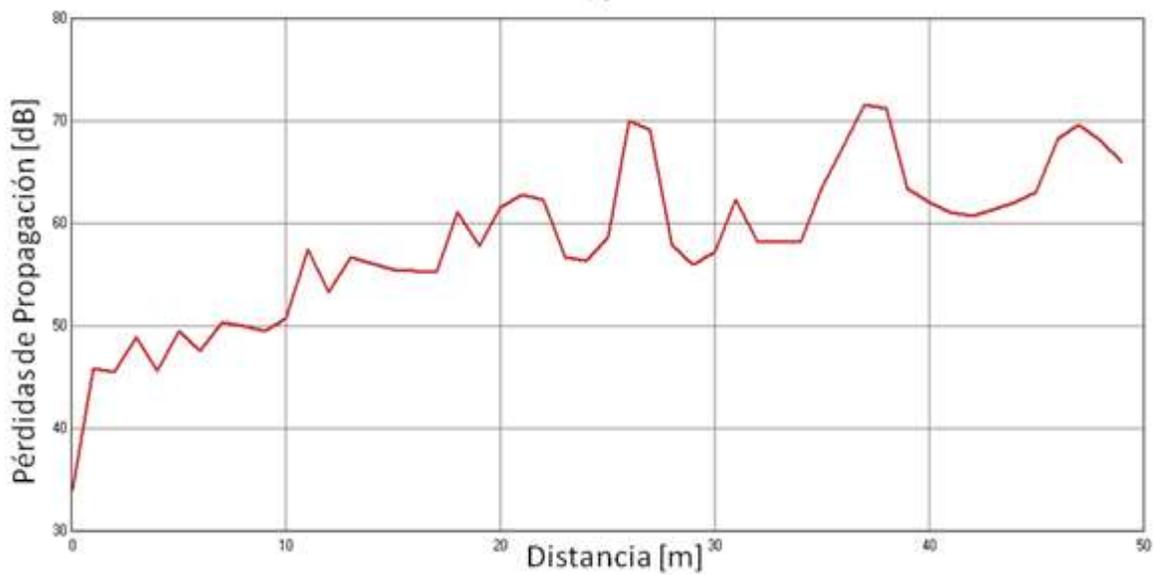
La figura 4.25 muestra el resultado de la simulación 3, se observa una variación de la potencia de recepción debido a la reflexión y difracción que sufre la señal en las paredes del pasillo creando múltiples trayectos directos e indirectos por el efecto de la multitrayectoria a medida que la distancia aumenta.

La figura 4.26 muestra las pérdidas de propagación que sufre la señal en función de la distancia.

**Figura 4.25** Potencia de Recepción vs Distancia

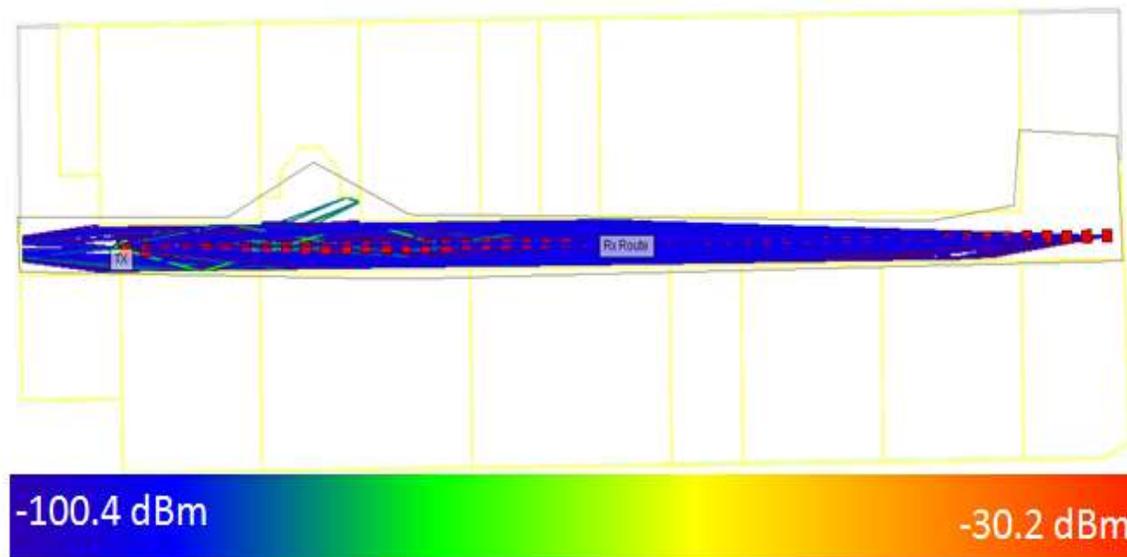


**Figura 4.26** Pérdidas de Propagación vs Distancia



La figura 4.27 muestra que las señales de radiofrecuencia se propagan mediante los mecanismos de propagación por múltiples reflexiones por la presencia de las paredes a lo largo del pasillo, esto lleva a que la señal se confine hasta el final del mismo, fenómeno conocido como efecto guía de onda [5].

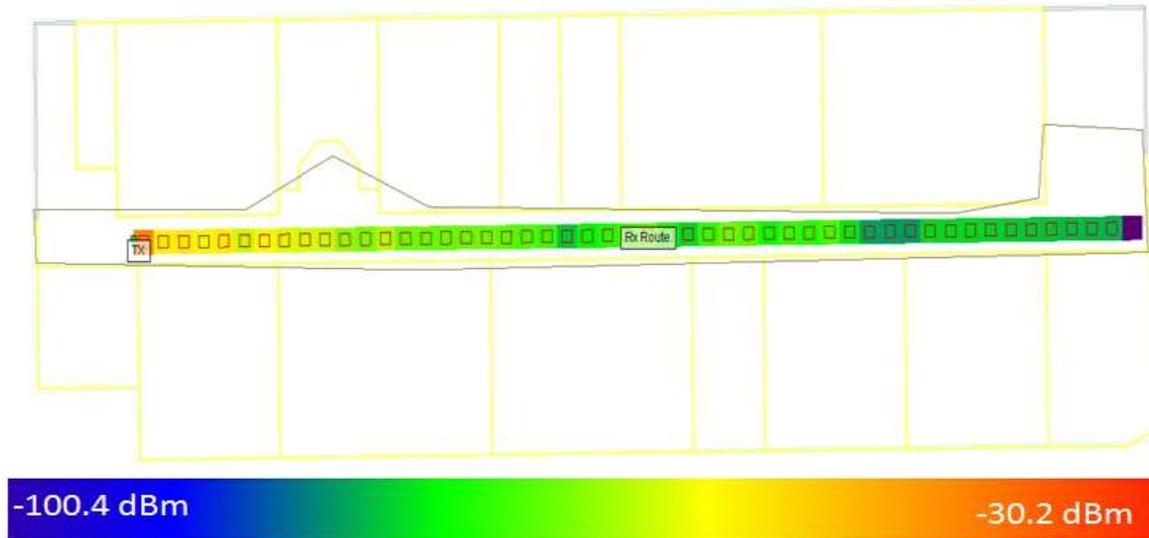
**Figura 4.27** Trazado de Rayos



- Simulación 4

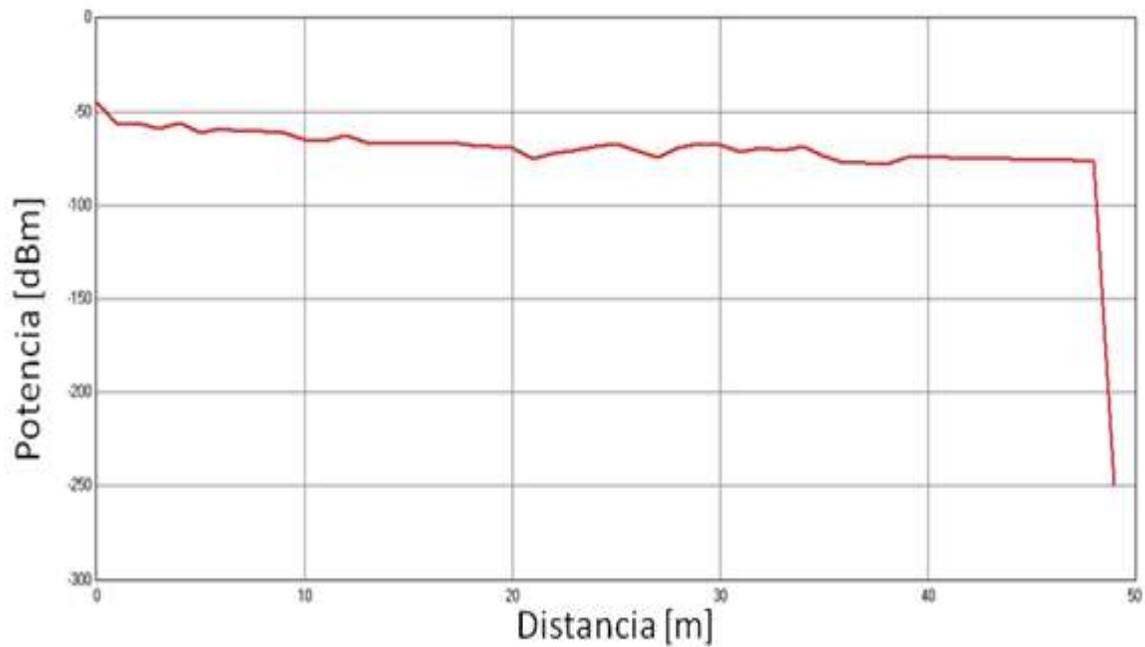
La figura 4.28 muestra los resultados de la simulación 4, con potencia de transmisión de -18 dBm y velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps. El resultado muestra que el nivel de cobertura disminuye con respecto a la simulación anterior debido a la disminución de la potencia de transmisión, además se observa que algunos receptores ubicados en la mitad del pasillo reciben bajos niveles de potencia mientras que receptores a mayor distancia reciben niveles mayores de potencia, los resultados de esta simulación sustentan los obtenidos en el escenario real.

**Figura 4.28** Potencia de Recepción para la Simulación 4

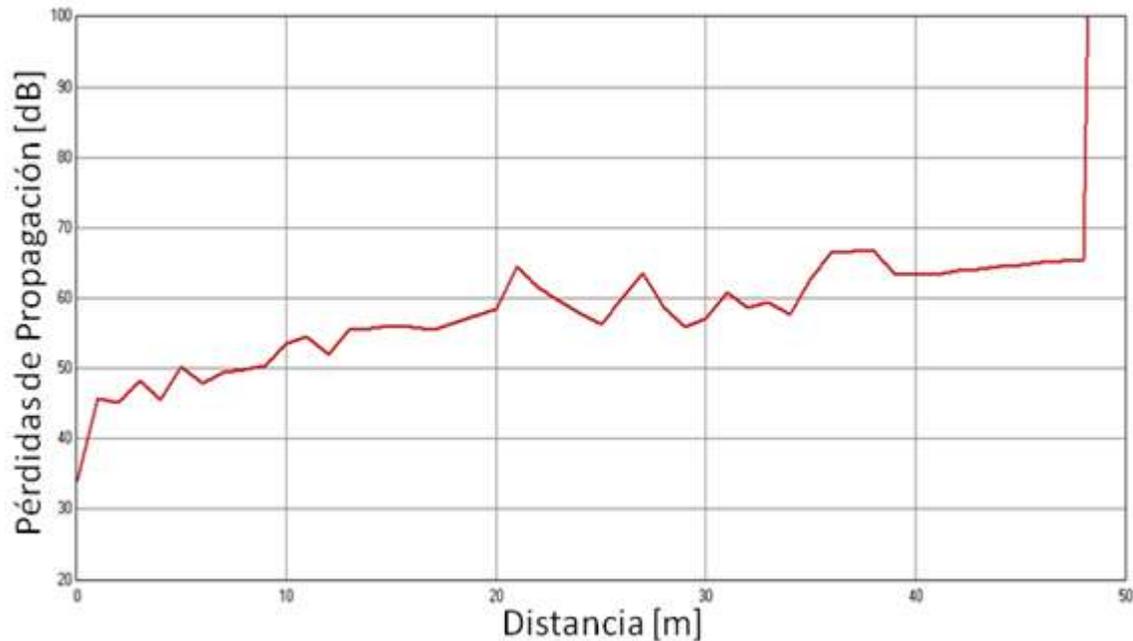


La figura 4.29 muestra la potencia recibida por la ruta de receptores a lo largo del pasillo y la figura 4.30 muestra las pérdidas de propagación que sufre la señal en función de la distancia.

**Figura 4.29** Potencia de Recepción vs Distancia



**Figura 4.30** Potencia de Recepción vs Distancia



#### 4.3.5 Comparación y Análisis de los Distintos Resultados de Potencia de Recepción

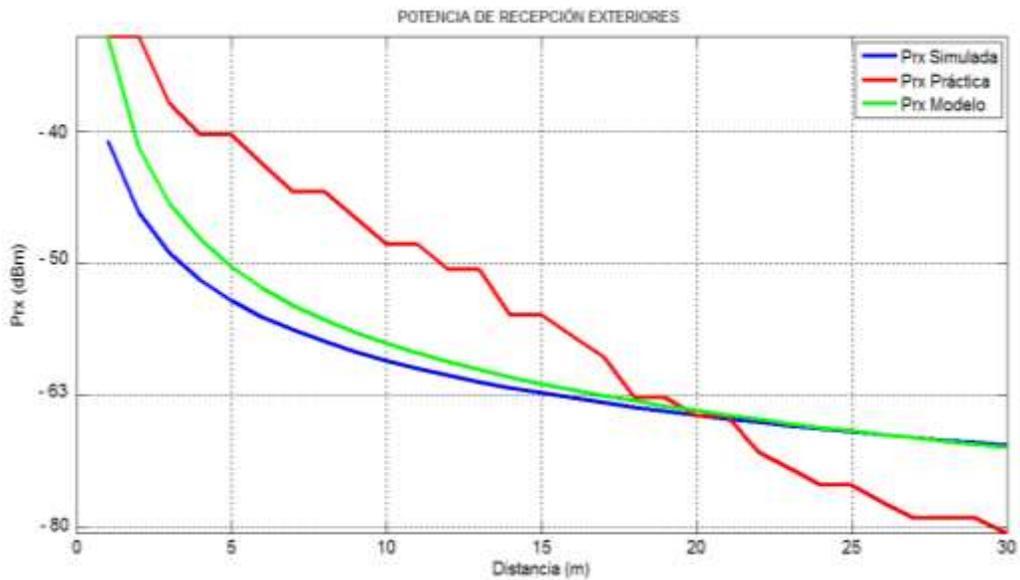
Con los resultados de potencia de recepción encontrados en exteriores e interiores de manera práctica, con los resultados de potencia de recepción simulada con la herramienta de *Wireless Insite®* y con los resultados de potencia de recepción modelada con el modelo de pérdidas de propagación de pendiente única, es posible comparar y analizar el comportamiento del sistema de comunicación de datos en los dos escenarios.

La figura 4.31 compara los resultados obtenidos en exteriores para la potencia de recepción encontrada de manera práctica representada por la curva de color rojo, la potencia de recepción encontrada con el modelo de pérdidas de propagación de pendiente única representada por la curva de color verde, y la potencia de recepción simulación con la herramienta *Wireless Insite®* representada por la curva de color azul. Se observa que las tres curvas tienen la misma tendencia, es decir que la potencia de recepción disminuye rápidamente debido a la atenuación que sufre la señal en un ambiente libre de obstáculos.

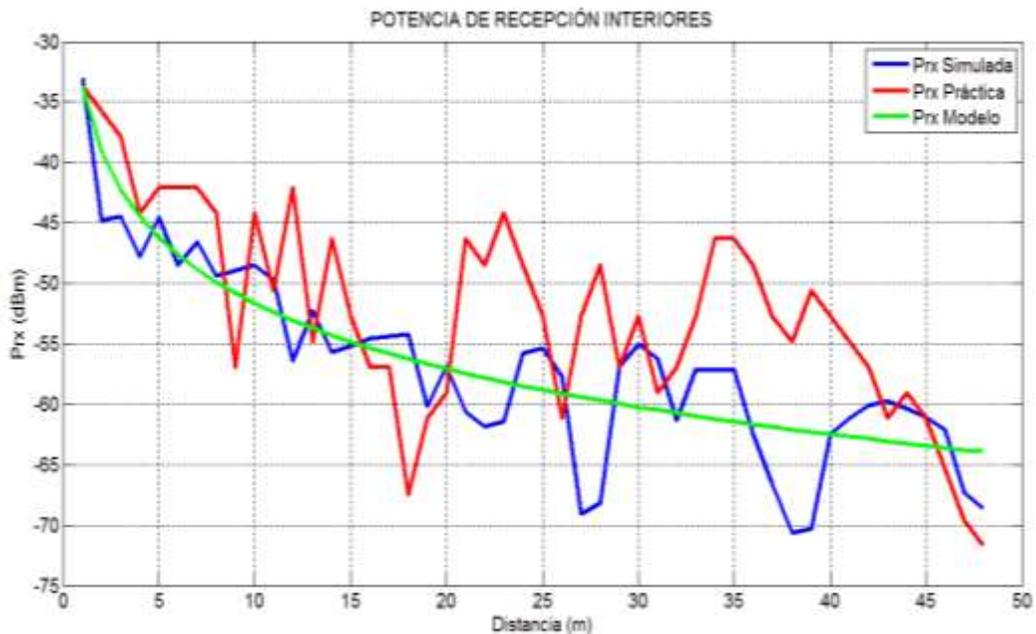
De la misma forma la figura 4.32 compara los tres resultados en interiores de potencia de recepción obtenida de manera práctica, modelada y simulada. En promedio se observa que los niveles de potencia recibidos van disminuyendo a

medida que la distancia aumenta, aunque existen puntos en los que la señal sufre interferencia constructiva y destructiva lo que aumenta y disminuye el valor de la potencia de recepción a diferentes distancias.

**Figura 4.31** Potencia de Recepción vs Distancia en Exteriores



**Figura 4.32** Potencia de Recepción vs Distancia en Interiores

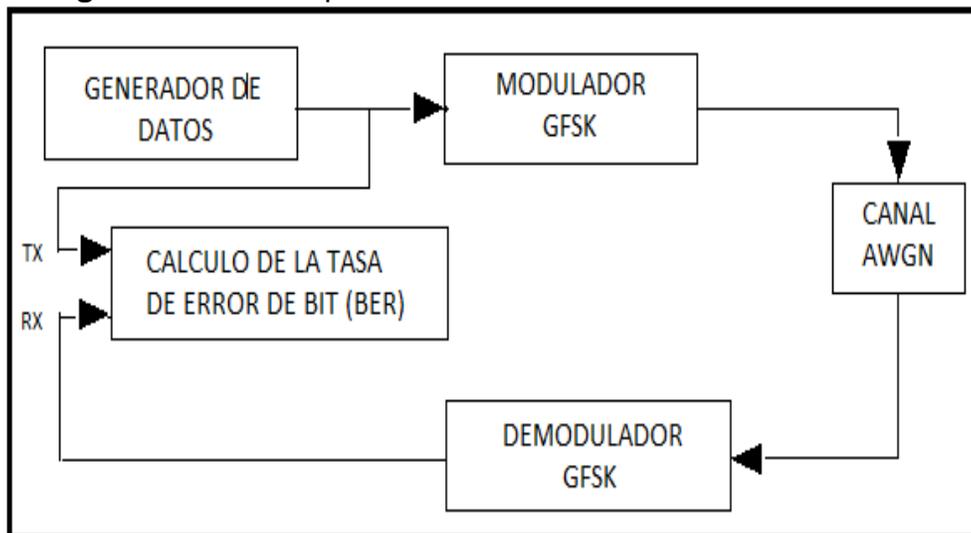


#### 4.4 DESEMPEÑO TEÓRICO A NIVEL FÍSICO DEL SISTEMA IMPLEMENTADO EN EXTERIORES

Los sistemas de comunicación inalámbricos presentan desventajas debido a que las señales de radiofrecuencia viajan en el espacio libre y se ven afectadas por los mecanismos de propagación los cuales generan errores en la información a nivel físico.

Simulink®<sup>55</sup> es una herramienta de simulación a nivel gráfico en el entorno de Matlab® la cual permite diseñar y simular diferentes sistemas, usando esta herramienta se realizó el diseño del sistema prototipo de comunicación de datos mediante bloques los cuales permiten configurar los parámetros de los módulos radio nRF24LU1, por otro lado Matlab® cuenta con la herramienta BERTool® usada para determinar el desempeño teórico del sistema de comunicación de datos para las dos velocidades de transmisión de datos 1Mbps y 2 Mbps. En la figura 4.33 se muestra el diagrama general del sistema de comunicación simulado.

**Figura 4.33** Desempeño Teórico del Sistema de Comunicación

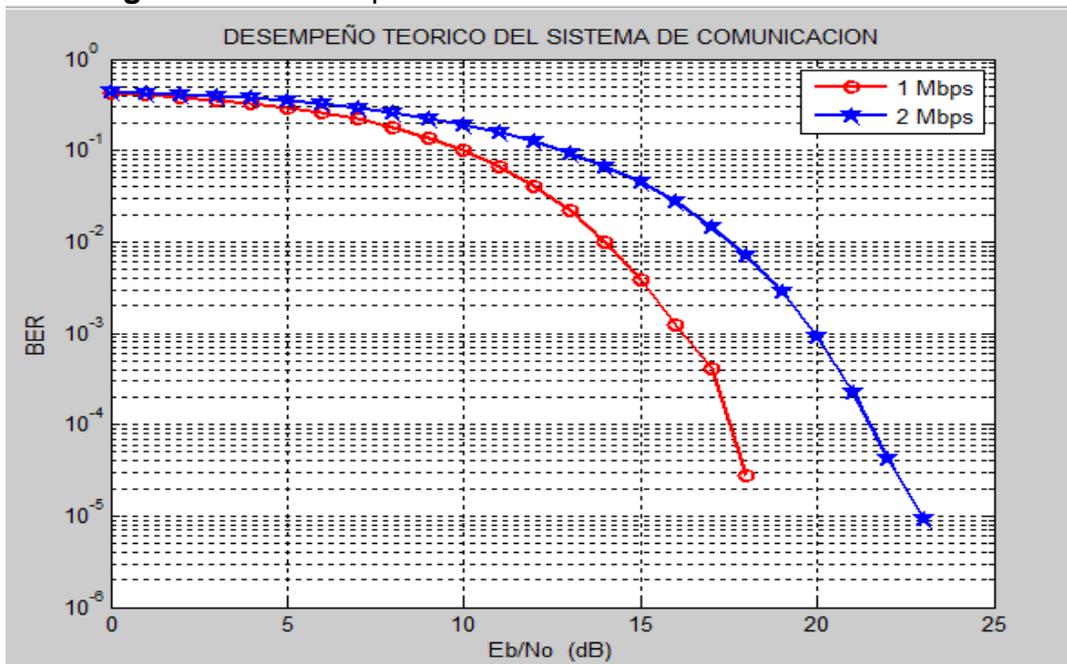


La figura 4.34 muestra el desempeño teórico del sistema prototipo de comunicación de datos implementado para cada una de las velocidades de transmisión de datos, de donde se observa que para 1 Mbps se obtiene un valor de la Tasa de Error de Bit (BER) igual a  $10^{-3}$  para un valor de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ )

<sup>55</sup> Página Web de Simulink: <http://www.mathworks.com/products/simulink/>.

cercano a 16 dB, mientras que para 2 Mbps este valor se logra para valores superiores de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ). A partir de los resultados teóricos se observa un mejor comportamiento del sistema de comunicación de datos para la menor velocidad de transmisión de datos, es decir para 1 Mbps.

**Figura 4.34** Desempeño Teórico del Sistema de Comunicación



#### 4.4.1 Relación de Energía de Bit respecto a la Densidad Espectral de Potencia de Ruido en Exteriores con Potencia de Transmisión igual a -12 dBm

Aplicando la ecuación 3.17 y con los valores obtenidos de potencia de recepción modelada para velocidades de transmisión de datos de 1 Mbps y de 2Mbps para exteriores de la ecuación 4.16, se obtuvo el valor de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ) parámetro utilizado para el análisis del desempeño del sistema prototipo de comunicación de datos implementado. La tabla 4.13 presenta los valores la Tasa de Error de Bit (BER) y de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ) para exteriores con potencia de trasmisión de -12 dBm y velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps.

**Tabla 4.13** Valores de BER y Eb/No en Exteriores para 1 Mbps a -12 dBm

Distancia (m)	BER	Potencia Rx (dBm)	Eb/No (dB)
1	$1.30 \times 10^{-7}$	-45.70	61.09
9	$2.60 \times 10^{-7}$	-68.51	38.29
17	$2.61 \times 10^{-6}$	-75.11	31.69
21	$3.09 \times 10^{-5}$	-77.30	29.49
23	$1.08 \times 10^{-3}$	-78.25	28.55
24	$1.14 \times 10^{-2}$	-78.69	28.11

En la tabla 4.14 se presentan los valores de la Tasa de Error de Bit (BER) y de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido (Eb/No) obtenidos con una potencia de transmisión de -12 dBm y una velocidad de transmisión de datos de 2 Mbps.

**Tabla 4.14** Valores de BER y Eb/No en Exteriores para 2 Mbps a -12 dBm

Distancia (m)	BER	Potencia Rx (dBm)	Eb/No (dB)
1	$2.60 \times 10^{-7}$	-45.70	58.08
9	$3.91 \times 10^{-7}$	-68.51	35.28
14	$2.61 \times 10^{-6}$	-73.09	30.69
15	$2.73 \times 10^{-4}$	-73.81	29.98
16	$5.64 \times 10^{-4}$	-74.48	29.31
17	$5.99 \times 10^{-3}$	-75.11	28.68

A partir de los resultados presentados en las tablas 4.13 y 4.14, se representa el desempeño a nivel físico en exteriores para una potencia de transmisión de -12 dBm. La figura 4.35 muestra dichos resultados para velocidades de transmisión de datos de 1 Mbps y de 2 Mbps.

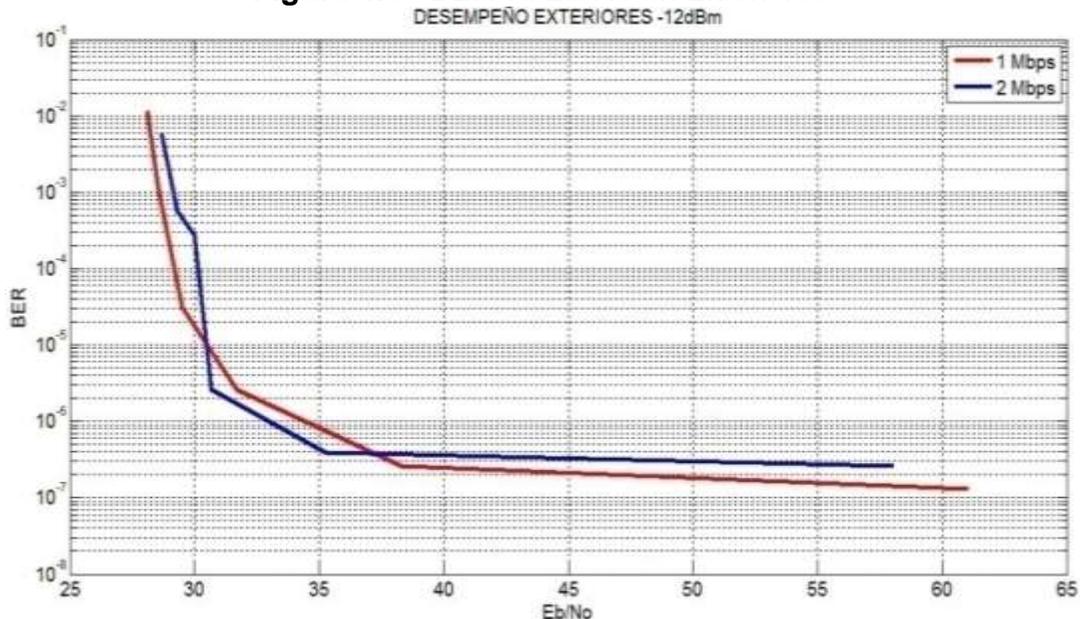
En la figura 4.35 se observa que a medida que la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido (Eb/No) disminuye, el valor de la Tasa de Error de Bit (BER) aumenta, es decir que cuando la potencia de recepción es menor se pierde un mayor número de bits.

Cuando las ondas electromagnéticas se propagan en el espacio libre o exteriores la señal se dispersa disminuyendo la potencia, esto se conoce como atenuación [28][28]. La atenuación es la reducción de la potencia respecto a la distancia.

La figura 4.35 muestra un comportamiento de la Tasa de Error de Bit (BER) similar para las diferentes velocidades; sin embargo para 2 Mbps se presenta un leve incremento en el valor de la Tasa de Error de Bit (BER) en relación a 1 Mbps igual

a los resultados prácticos obtenidos, por otra parte se aprecia que para una velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps se obtiene un valor de la Tasa de Error de Bit (BER) de  $10^{-3}$  para un valor de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ) de 28.5 dB, mientras que para 2 Mbps se obtiene el mismo valor de la Tasa de Error de Bit (BER) para un valor de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ) de 29 dB.

**Figura 4.35 BER vs  $E_b/N_0$  en Exteriores**



#### 4.4.2 Relación de Energía de Bit respecto a la Densidad Espectral de Potencia de Ruido en Exteriores con Potencia de Transmisión igual a -18 dBm

Con los valores obtenidos de potencia de recepción modelada para velocidades de transmisión de datos de 1 Mbps y de 2Mbps para exteriores de la ecuación 4.16 y aplicando la ecuación 3.17 se obtuvieron los valores de la tabla 4.15 donde se presentan los valores de la Tasa de Error de Bit (BER) y la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ) para exteriores con una velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps y potencia de transmisión de -18 dBm, de la misma forma la tabla 4.16 presenta los resultados a una potencia de transmisión de -18 dBm y velocidad de transmisión de datos de 2 Mbps.

**Tabla 4.15** Valores de BER y Eb/No en Exteriores para 1 Mbps a -18 dBm

<b>Distancia (m)</b>	<b>BER</b>	<b>Potencia Rx (dBm)</b>	<b>Eb/No (dB)</b>
1	$7.81 \times 10^{-7}$	-51.70	55.09
9	$2.74 \times 10^{-5}$	-74.51	32.29
12	$1.72 \times 10^{-4}$	-77.49	29.30
13	$5.14 \times 10^{-4}$	-78.32	28.47
14	$2.29 \times 10^{-3}$	-79.09	27.70
15	$4.05 \times 10^{-3}$	-79.81	26.99

**Tabla 4.16** Valores de BER y Eb/No en Exteriores para 2 Mbps a -18 dBm

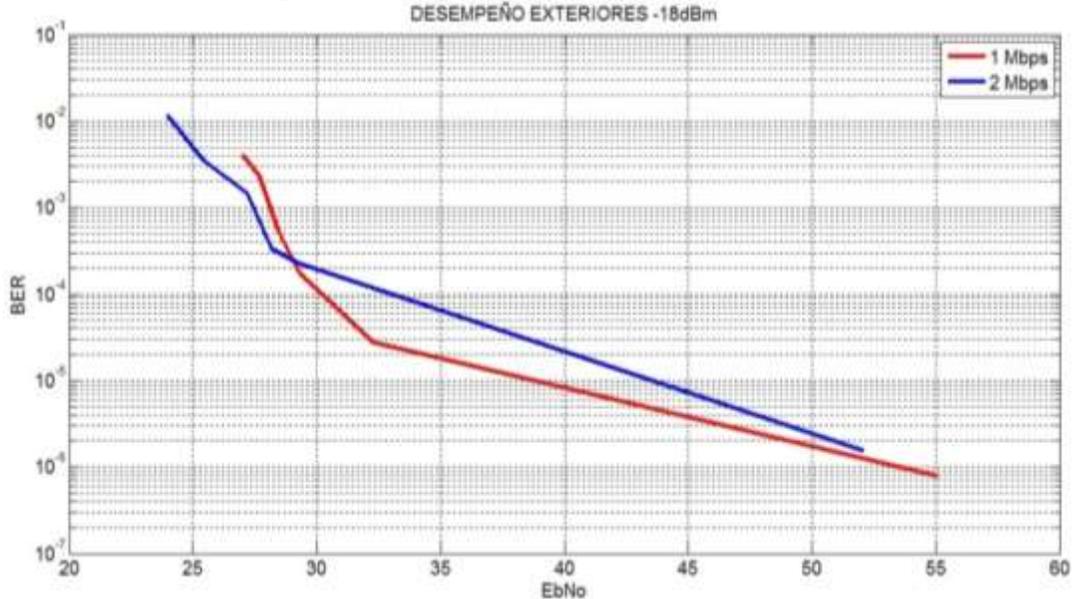
<b>Distancia (m)</b>	<b>BER</b>	<b>Potencia Rx (dBm)</b>	<b>Eb/No (dB)</b>
1	$1.56 \times 10^{-6}$	-51.70	52.08
9	$2.30 \times 10^{-4}$	-74.51	29.28
10	$3.35 \times 10^{-4}$	-75.60	28.18
11	$1.46 \times 10^{-3}$	-76.59	27.19
13	$3.45 \times 10^{-3}$	-78.32	25.46
15	$1.18 \times 10^{-2}$	-79.81	23.98

La figura 4.36 muestra el desempeño del sistema prototipo de comunicación de datos en exteriores para las velocidades de transmisión de datos de 1 y de 2 Mbps con una potencia de transmisión de -18 dBm. La gráfica se obtuvo a partir de los resultados presentados en las tablas 4.15 y 4.16.

En la figura 4.36 se observa que el sistema prototipo de comunicación de datos en exteriores con potencia de transmisión de -18 dBm, tiene un comportamiento similar al mostrado en la figura 4.35, la cual representa el desempeño del sistema prototipo de comunicación de datos para potencia de transmisión de -12 dBm, dado que el valor de la Tasa de Error de Bit (BER) aumenta cuando el valor de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido (Eb/No) decrementa su valor.

En la figura 4.36 se muestra que para valores de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido (Eb/No) inferiores a los 29 dB el desempeño del sistema prototipo de comunicación de datos es mejor para 2 Mbps, mientras que para valores superiores de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido (Eb/No) el desempeño es mejor para 1 Mbps resultado que refleja lo obtenido en el desempeño teórico.

**Figura 4.36 BER vs Eb/No en Exteriores**



#### 4.5 DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DEL SISTEMA IMPLEMENTADO EN INTERIORES

##### 4.5.1 Relación de Energía de Bit respecto a la Densidad Espectral de Potencia de Ruido en Interiores con Potencia de Transmisión igual a -12 dBm

Con los valores obtenidos de potencia de recepción modelada para velocidades de transmisión de datos de 1 Mbps y de 2Mbps para interiores de la ecuación 4.18 y aplicando la ecuación 3.17 se obtuvieron los valores de la tabla 4.17 donde se presentan los valores de la Tasa de Error de Bit (BER) y el valor de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido (Eb/No) para interiores con una velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps y potencia de transmisión de -12 dBm.

**Tabla 4.17** Valores de BER y Eb/No en Interiores para 1 Mbps a -12 dBm

Distancia (m)	BER	Potencia Rx (dBm)	Eb/No (dB)
1	$2.17 \times 10^{-6}$	-45.65	61.14
9	$3.6 \times 10^{-6}$	-62.83	43.97
17	$6.5 \times 10^{-5}$	-67.80	39.00
25	$1.25 \times 10^{-4}$	-70.81	35.98
33	$1.95 \times 10^{-4}$	-72.98	33.81
41	$3.28 \times 10^{-5}$	-74.68	32.11
49	$1.12 \times 10^{-3}$	-76.07	30.72

En la tabla 4.18 se presentan los valores la Tasa de Error de Bit (BER) y la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido (Eb/No) para una potencia de transmisión de -12 dBm y una velocidad de transmisión de datos de 2 Mbps.

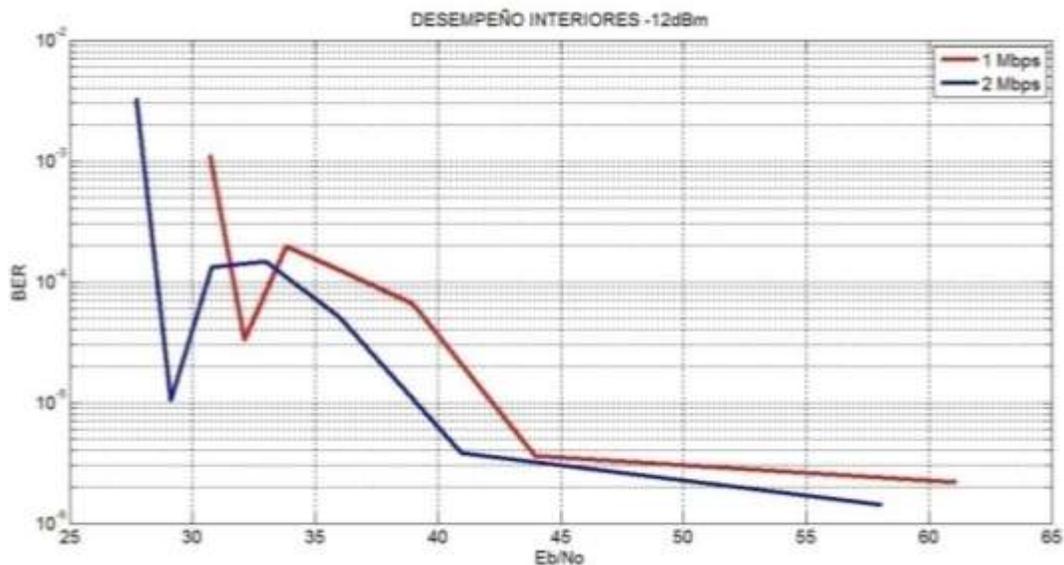
**Tabla 4.18** Valores de BER y Eb/No en Interiores para 2 Mbps a -12 dBm

Distancia (m)	BER	Potencia Rx (dBm)	Eb/No (dB)
1	$1.43 \times 10^{-6}$	-45.65	58.13
9	$3.81 \times 10^{-6}$	-62.83	40.96
17	$5.09 \times 10^{-5}$	-67.80	35.99
25	$1.46 \times 10^{-4}$	-70.81	32.97
33	$1.32 \times 10^{-4}$	-72.98	30.80
41	$1.04 \times 10^{-5}$	-74.68	29.10
49	$3.29 \times 10^{-3}$	-76.07	27.71

A partir de los resultados presentados en las tablas 4.17 y 4.18, se muestra en la figura 4.37 el desempeño a nivel físico del sistema prototipo de comunicación de datos implementado en interiores.

El desempeño en interiores es similar para las velocidades de transmisión de datos 1 y 2 Mbps. Los resultados obtenidos en estas pruebas presentan variaciones de la señal recibida, lo que se refleja en el valor de la Tasa de Error de Bit (BER).

**Figura 4.37** BER vs Eb/No en Interiores



La figura 4.37 muestra los valores de la Tasa de Error de Bit (BER) para diferentes valores de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ) los cuales se determinaron a partir de la potencia de recepción modelada dado que para utilizar las medidas prácticas de potencia de recepción dadas por el kit de desarrollo CY3653 se debían ubicar los kits de desarrollo exactamente en los mismos puntos donde se midió la Tasa de Error de Bit (BER) con el módulo radio nRF24LU1, pero debido a que la longitud de onda es pequeña, los resultados prácticos de potencia de recepción variaban con pequeños cambios de posición de los kits de desarrollo, dificultando las medidas.

En general el desempeño en interiores es mejor para la velocidad de transmisión de datos de 2 Mbps en comparación a la velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps, este resultado no es el esperado ya que de acuerdo a los resultados del desempeño teórico el comportamiento debería ser mejor para la velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps, esto se explica debido a que con el módulo radio receptor no fue posible obtener el valor de la potencia de recepción por lo cual fue necesario usar los datos de potencia de recepción modelados valores arrojados por el modelo de pérdidas de propagación de pendiente única con los cuales se encontró los valores de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ) para cada valor de la Tasa de Error de Bit (BER) obtenida de forma experimental.

En la figura 4.37 se muestra que para valores de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ) menores a 35 dB se presenta una disminución abrupta en el número de bits errados, el comportamiento del sistema de comunicación de datos implementado no es el esperado de acuerdo a los valores de desempeño teórico dadas las condiciones mencionadas anteriormente.

#### **4.5.2 Relación de Energía de Bit respecto a la Densidad Espectral de Potencia de Ruido en Interiores con Potencia de Transmisión igual a -18 dBm**

Con los valores obtenidos de potencia de recepción modelada para velocidades de transmisión de datos de 1 Mbps y de 2Mbps para interiores de la ecuación 4.18 y aplicando la ecuación 3.17 se obtuvieron los valores de la tabla 4.19 donde se presentan los valores la Tasa de Error de Bit (BER) y el valor de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ) para interiores con una velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps y potencia de transmisión de -18 dBm.

**Tabla 4.19** Valores de BER y Eb/No en Interiores para 1 Mbps a -18 dBm

<b>Distancia (m)</b>	<b>BER</b>	<b>Potencia Rx (dBm)</b>	<b>Eb/No (dB)</b>
1	$7.67 \times 10^{-5}$	-51.65	55.14
9	$2.51 \times 10^{-4}$	-68.83	37.97
17	$1.52 \times 10^{-4}$	-73.80	33.00
25	$6.14 \times 10^{-4}$	-76.81	29.98
33	$1.79 \times 10^{-3}$	-78.98	27.81
41	$2.74 \times 10^{-3}$	-80.68	26.11

La tabla 4.20 presenta los resultados con velocidad de transmisión de datos de 2 Mbps y potencia de transmisión de -18 dBm.

**Tabla 4.20** Valores de BER y Eb/No en Interiores para 2 Mbps a -18 dBm

<b>Distancia (m)</b>	<b>BER</b>	<b>Potencia Rx (dBm)</b>	<b>Eb/No (dB)</b>
1	$4.24 \times 10^{-5}$	-51.65	52.13
9	$8.70 \times 10^{-4}$	-68.83	34.96
17	$1.22 \times 10^{-4}$	-73.80	29.99
25	$7.25 \times 10^{-4}$	-76.81	26.97
33	$1.83 \times 10^{-3}$	-78.98	24.80
41	$2.32 \times 10^{-3}$	-80.68	23.10

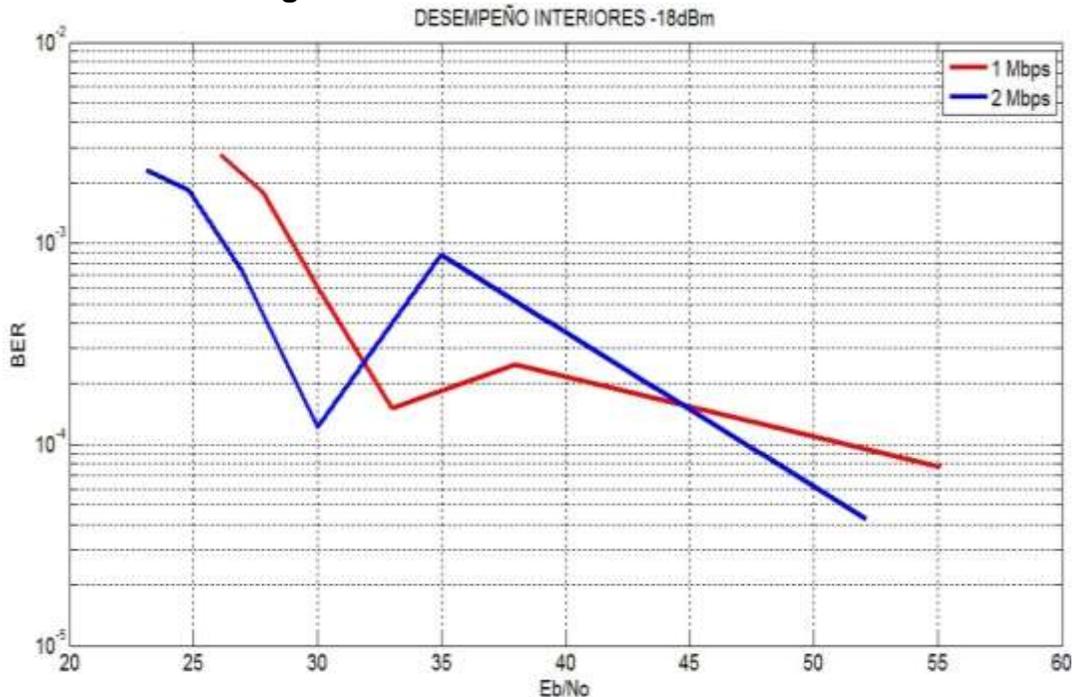
La figura 4.38 muestra el desempeño del sistema prototipo de comunicación de datos implementado en interiores para las velocidades de transmisión de datos de 1 y 2 Mbps, y potencia de transmisión de -18 dBm. La gráfica se obtuvo a partir de los resultados de las tablas 4.19 y 4.20.

Los resultados obtenidos muestran un comportamiento similar al de las pruebas en interiores con potencia de transmisión de -12 dBm. La figura 4.38 muestra los valores de la Tasa de Error de Bit (BER) para diferentes valores de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido (Eb/No) los cuales se determinaron a partir de la potencia de recepción modelada obtenida del modelo de propagación de pendiente única.

En la figura 4.38 se aprecia que para valores de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido (Eb/No) menores a 32 dB el desempeño es mejor para la velocidad de transmisión de datos de 2 Mbps, para valores de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido (Eb/No) entre los 32 dB y los 44 dB el desempeño es mejor para la velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps y para valores de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido (Eb/No)

superiores a los 44 dB el desempeño es mejor para la velocidad de transmisión de 2 Mbps, estos resultados no son los esperados dadas las condiciones en que se obtuvieron los valores de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ) explicadas anteriormente, sin embargo se nota lo contrario en el rango comprendido entre los 32 dB y los 44 dB donde se refleja el desempeño esperado de acuerdo a lo que se obtuvo en el desempeño teórico.

**Figura 4.38 BER vs  $E_b/N_0$  en Interiores**

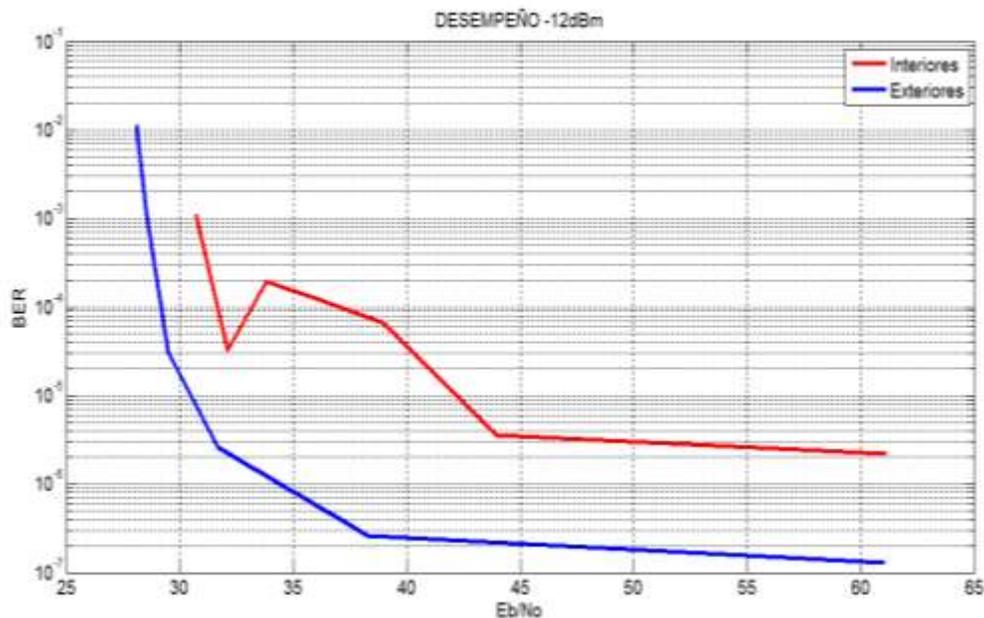


#### 4.6 COMPARACION DE LOS RESULTADOS DE DESEMPEÑO PARA EXTERIORES E INTERIORES

A partir de los resultados de desempeño obtenidos para exteriores e interiores es posible comparar y analizar si para los dos escenarios se logran valores similares de la Tasa de Error de Bit (BER) para un mismo valor de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ). La comparación de los resultados de la Tasa de Error de Bit (BER) con respecto a la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ) con potencia de transmisión de  $-12$  dBm y velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps se muestran en la figura 4.39.

Las dos curvas de la figura 4.39 tienen la misma tendencia, es decir que decrecen a medida que el valor de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ) aumenta, sin embargo la curva roja la cual representa los resultados en interiores presenta mayores valores de la Tasa de Error de Bit (BER) para un mismo valor de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ) además se aprecia que para interiores se alcanza una Tasa de Error de Bit (BER) de  $10^{-3}$  con un valor de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ) igual a 30.76 dB y para exteriores se alcanza el mismo valor de la Tasa de Error de Bit (BER) con un valor menor de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ) igual a 28.57 dB, debido a que en la propagación en interiores existen señales directas y reflejadas, las cuales interfieren en la comunicación de forma constructiva o destructiva. La interferencia constructiva se produce cuando la suma vectorial de las señales aumenta la amplitud de la señal recibida, del mismo modo, la interferencia destructiva se presenta cuando la suma disminuye su amplitud [24], lo que causa un aumento o una disminución de la potencia recibida lo cual incrementa o decrementa el valor de la Tasa de Error de Bit (BER).

**Figura 4.39** BER vs  $E_b/N_0$  en Exteriores e Interiores



## 4.7 DESEMPEÑO DEL SISTEMA PROTOTIPO IMPLEMENTADO ANTE INTERFERENCIA

### 4.7.1 Desempeño ante Interferencia Wi-Fi

Esta prueba se realizó configurando los módulos radio nRF24LU1 a una frecuencia central de 2.462 GHz [[9], frecuencia que corresponde al canal 62 del kit de desarrollo nRF24LU1-DK.

Se obtuvo la medida de la Tasa de Error de Bit (BER) de la forma descrita en la sección 3.4.2 y se configuró el módulo radio transmisor con una potencia de transmisión de -12 dBm y una velocidad de transmisión de datos de 2 Mbps. Esta prueba se realizó en los dos escenarios exteriores e interiores.

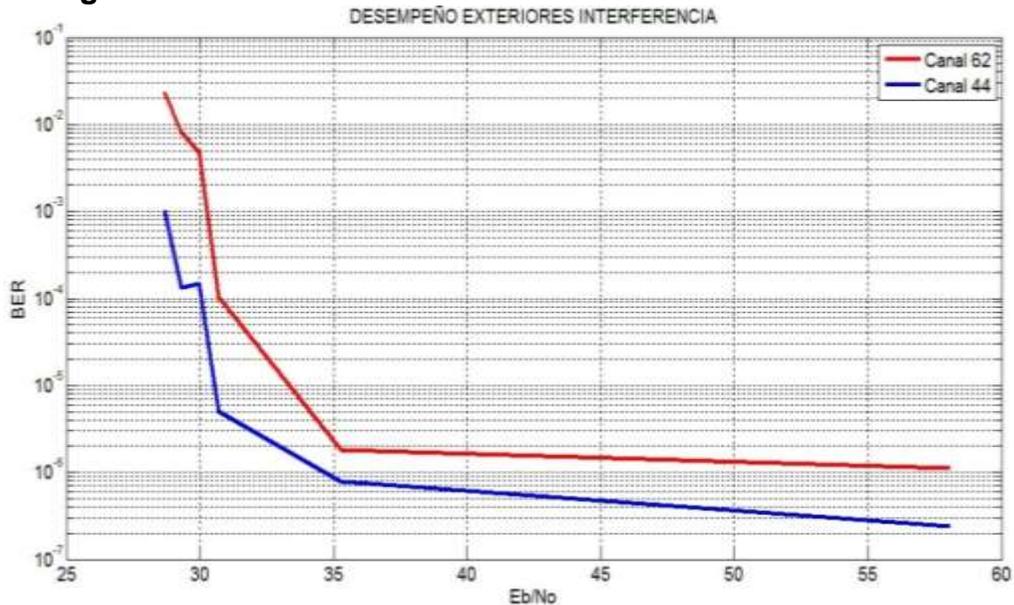
En la tabla 4.21 se presentan los resultados obtenidos en exteriores para una potencia de transmisión de -12 dBm y velocidad de transmisión de datos de 2 Mbps. La figura 4.40 refleja el desempeño del sistema prototipo de comunicación de datos implementado, frente a la interferencia producida por Wi-Fi en exteriores.

**Tabla 4.21** Valores de BER y Eb/No en Exteriores ante Interferencia Wi-Fi

Distancia (m)	BER	Potencia Rx (dBm)	Eb/No (dB)
1	$1.12 \times 10^{-6}$	-45.70	58.08
9	$1.82 \times 10^{-6}$	-68.51	35.28
14	$1.03 \times 10^{-4}$	-73.09	30.69
15	$4.82 \times 10^{-3}$	-73.81	29.98
16	$8.01 \times 10^{-3}$	-74.48	29.31
17	$2.37 \times 10^{-2}$	-75.11	28.68

En la figura 4.40 se muestran las curvas de la Tasa de Error de Bit (BER) con características similares en los dos canales; sin embargo en el canal 62 se observa una mayor pérdida de bits, en relación al canal 44. La señal Wi-Fi perjudica el desempeño del sistema prototipo de comunicación de datos. En exteriores el efecto de la señal Wi-Fi es poco puesto que la señal interferente está dispersa.

**Figura 4.40** BER vs Eb/No en Exteriores ante Interferencia Wi-Fi



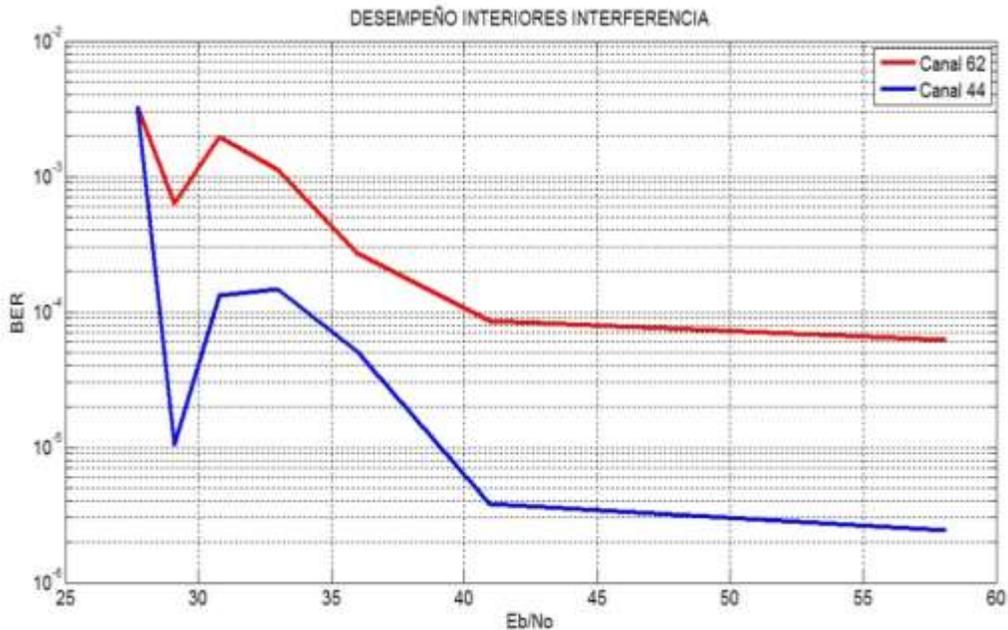
La tabla 4.22 presenta los resultados obtenidos para interiores.

**Tabla 4.22** Valores de BER y Eb/No en Interiores ante Interferencia Wi-Fi

Distancia (m)	BER	Potencia Rx (dBm)	Eb/No (dB)
1	$6,20 \times 10^{-5}$	-45.65	58.13
9	$0.86 \times 10^{-4}$	-62.83	40.96
17	$2.70 \times 10^{-4}$	-67.80	35.99
25	$1.12 \times 10^{-3}$	-70.81	32.97
33	$1.95 \times 10^{-3}$	-72.98	30.80
41	$6.29 \times 10^{-4}$	-74.68	29.10
49	$3.29 \times 10^{-3}$	-76.07	27.71

La figura 4.41 muestra el desempeño del sistema tanto en el canal 44 como en el canal 62. En esta gráfica se observa un deterioro en el desempeño del sistema prototipo de comunicación de datos implementado cuando se transmite en el canal 62, al coincidir con un canal congestionado por señales Wi-Fi.

**Figura 4.41 BER vs Eb/No en Interiores ante Interferencia Wi-Fi**



En la figura 4.41 se observa que el comportamiento de la Tasa de Error de Bit (BER) es similar para los dos canales; sin embargo, en el canal 62 el valor de la Tasa de Error de Bit (BER) es mayor, debido a la presencia de las señales interferentes de Wi-Fi, afectando el desempeño del sistema prototipo de comunicación de datos implementado [28].

#### **4.7.2 Desempeño ante Interferencia con el Kit de Desarrollo CY3653**

El módulo radio transmisor del sistema prototipo de comunicación de datos implementado se ubicó a 5 metros del módulo radio receptor y se realizó transmisiones constantes con potencia de transmisión igual a -12 dBm en una frecuencia central 2.444 GHz. El kit de desarrollo CY3653 se ubicó a diferentes distancias del módulo radio receptor del sistema de comunicación de datos implementado y se realizó transmisiones a -16.4 dBm en 2.444 GHz. La potencia de recepción del kit de desarrollo CY3653 está dada por valores de Intensidad de la Señal Recibida (RSSI) y por interpolación se obtiene la medida de la potencia de recepción [19].

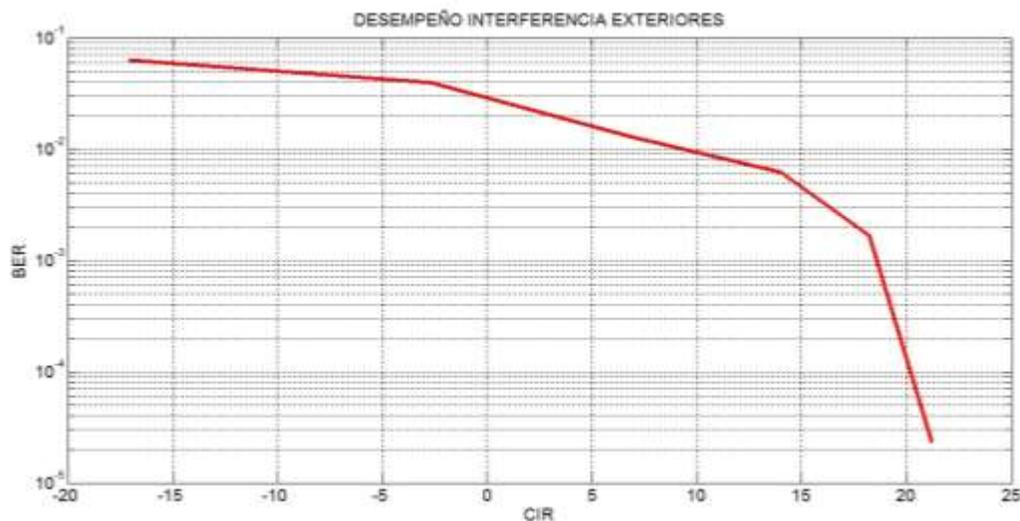
En exteriores la potencia a los 5 metros para este escenario es -60.09 dBm<sup>56</sup>. En la tabla 4.23 se presentan los valores de la Tasa de Error de Bit (BER) y la Relación Portadora a Interferencia (CIR) obtenidos de esta prueba.

La figura 4.42 muestra el desempeño del sistema prototipo de comunicación de datos implementado, frente a interferencia generada por el kit de desarrollo CY3653 en el escenario de exteriores.

**Tabla 4.23** Valores de BER y Eb/No en Exteriores ante Interferencia CY3653

Distancia (m)	BER	Potencia Rx Interferencia (dBm)	CIR (dB)
0.5	$6.36 \times 10^{-2}$	-43.01	-17.08
2	$3.93 \times 10^{-2}$	-57.39	-2.69
5	$1.30 \times 10^{-2}$	-66.91	6.82
10	$6.23 \times 10^{-3}$	-74.10	14.01
15	$1.68 \times 10^{-3}$	-78.31	18.22
20	$2.30 \times 10^{-5}$	-81.29	21.21

**Figura 4.42** BER vs CIR en Exteriores ante Interferencia CY3653



<sup>56</sup> La potencia de recepción se obtuvo del modelo de pérdidas de propagación de pendiente única para exteriores, descrito en 4.3.2.

En la figura 4.42 se aprecia que para valores de la Relación Portadora a Interferencia (CIR) mayores a 18 dB, la Tasa de Error de Bit (BER) toma valores inferiores a  $10^{-3}$ .

En exteriores la señal de interferencia afecta el desempeño del sistema prototipo de comunicación de datos implementado cuando el receptor se encuentra cerca al generador de la señal interferente. Para distancias superiores a 20 metros entre el transmisor CY3653 y el módulo radio receptor del sistema prototipo de comunicación de datos implementado, la señal de interferencia no perjudica considerablemente el desempeño a nivel físico, pues para esta distancia el nivel de señal interferente en el módulo radio receptor es pequeño debido a la dispersión de la onda.

Para esta prueba se escogió como escenario interior el salón del grupo GNTT de la Universidad del Cauca. La tabla 4.24 presenta los valores de la Tasa de Error de Bit (BER) obtenidos para el sistema prototipo de comunicación de datos implementado y la relación de Interferencia a Portadora (CIR), obtenidos a partir de la 3.18. La potencia de recepción del módulo radio receptor nRF24LU1 es de -56.61dBm<sup>57</sup>.

**Tabla 4.24** Valores de BER y Eb/No en Interiores ante Interferencia CY3653

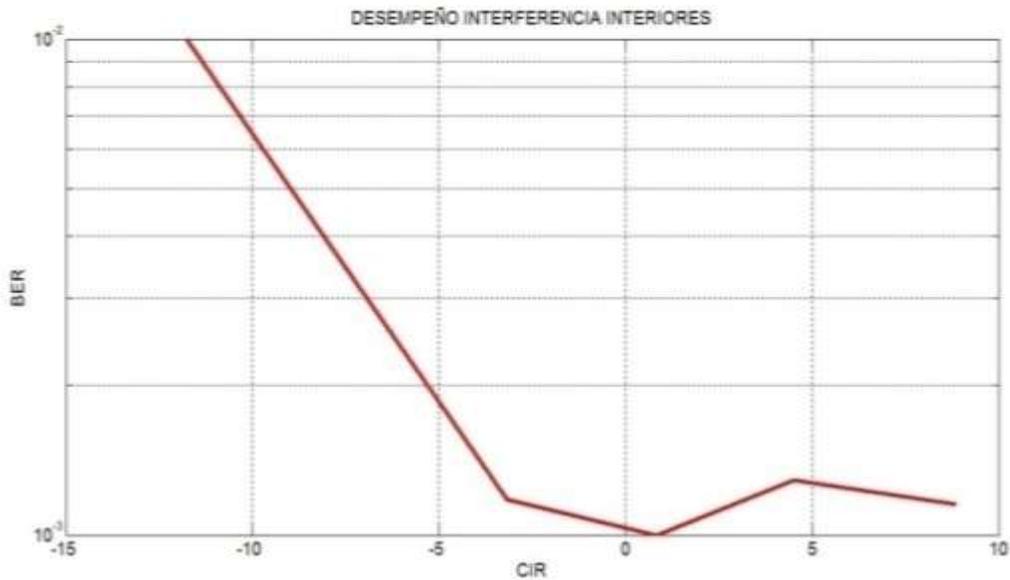
Distancia (m)	BER	Potencia Rx Interferencia (dBm)	CIR (dB)
0.5	$9.97 \times 10^{-3}$	-44.73	-11.76
1.5	$1.18 \times 10^{-3}$	-53.32	-3.17
2.5	$1.00 \times 10^{-3}$	-57.31	0.83
4	$1.29 \times 10^{-3}$	-60.99	4.50
7	$1.15 \times 10^{-3}$	-65.36	8.87

La figura 4.43 muestra el desempeño del sistema de comunicación de datos implementado frente a interferencia generada por el kit de desarrollo CY3653. Como se muestra en la figura 4.43 para esta prueba no se obtuvieron valores de la Tasa de Error de Bit (BER) inferiores a  $10^{-3}$ .

---

<sup>57</sup>La potencia de recepción se obtuvo del modelo de pérdidas de propagación de pendiente única para interiores, descrito en 4.3.1.

**Figura 4.43** BER vs CIR en Interiores ante Interferencia CY3653



Debido a las características de este escenario, la señal de interferencia siempre está presente afectando la comunicación. El valor máximo de la Relación Portadora a Interferencia (CIR) para esta prueba es de 8.87 dB, este valor no fue suficiente para reducir el número de bits errados a una Tasa de Error de Bit (BER) inferior a  $10^{-3}$ . El valor de la Tasa de Error de Bit (BER) sin interferencia es  $4.32 \times 10^{-5}$ , lo que evidencia que en este escenario la señal interferente perjudica considerablemente el desempeño del sistema de comunicación de datos implementado.

Este resultado es diferente al obtenido en exteriores pues en exteriores la señal de interferencia se distribuye en varias direcciones disminuyendo la potencia, mientras que en interiores la señal interferente está confinada dentro del escenario.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSIONES

- La frecuencia central del kit nRF24LU1 presentó una desviación en frecuencia que estuvo dentro del rango de precisión permitido por el fabricante. Se constató que el módulo radio mantuvo un buen comportamiento frente a altas temperaturas al contar con un cristal compensado en temperatura, características necesarias para establecer una comunicación exitosa vía radio.
- El ancho de banda medido de forma práctica de los módulos radio nRF24LU1 a 30 dBm es igual al ancho de banda teórico nulo a nulo de la Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK) para la velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps, mientras para la velocidad de transmisión de datos de 2 Mbps la diferencia es de 2 MHz, los cuales son mayores al ancho de banda de canal brindado por el fabricante.
- En interiores la señal principal recibe contribuciones tanto de los trayectos indirectos como del trayecto directo, como resultado de la multitrayectoria, en este escenario se alcanza una Tasa de Error de Bit (BER) de  $10^{-3}$  para un valor de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ) igual a 30.76 dB, mientras que en exteriores se alcanza el mismo valor de la Tasa de Error de Bit (BER) para un valor menor de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ) igual a 28.57 dB ya que en exteriores la señal se dispersa en todas las direcciones.
- La Tasa de Error de Bit (BER) disminuye para los escenarios considerados a medida que se incrementa la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ), sin embargo para exteriores la Tasa de Error de Bit (BER) disminuye con pequeños incrementos de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ), mientras que en interiores la disminución se presenta para incrementos mayores de la Relación de Energía de Bit respecto a Densidad Espectral de Potencia de Ruido ( $E_b/N_0$ ).

- Los resultados obtenidos en las simulaciones con *Wireless InSite*®, fueron valores aproximados a los niveles de potencia de recepción en los escenarios considerados, lo cual reflejó que la herramienta de simulación presenta un comportamiento similar de las señales en los escenarios estudiados.
- El alcance del sistema prototipo de comunicación de datos implementado fue mayor en interiores, pues se alcanzaron distancias superiores a 40 m con una Tasa de Error de Bit (BER) inferior a  $10^{-3}$ . En exteriores con las mismas características de transmisión, no se obtienen paquetes para distancias superiores a 25 m. De lo que se concluye que en espacio libre o exteriores se presentan mayores pérdidas de las que se presentan en interiores, debido a que en interiores la energía se confina a lo largo del pasillo generando un efecto de guía de onda.
- El modelo de pérdidas de propagación de pendiente única usado en el desarrollo del trabajo de grado brindó una buena aproximación al obtener las pérdidas básicas promedio para interiores y exteriores. Los valores de índice de variación de potencia obtenidos en la práctica se asemejan a los esperados.
- Con respecto al desempeño del sistema prototipo de comunicación de datos implementado frente a interferencia, se obtuvo una Tasa de Error de Bit (BER) inferior a  $10^{-3}$  para niveles de la Relación Portadora a Interferencia (CIR) mayores a 18 dB en exteriores. En interiores no se obtuvieron valores de la Tasa de Error de Bit (BER) inferiores a  $10^{-3}$ , debido a las características de propagación en este escenario. El sistema prototipo de comunicación de datos implementado, se ve afectado por la interferencia producida por otro sistema de comunicación de datos.
- El sistema prototipo de comunicación de datos implementado no presentó un buen desempeño frente a interferencia Wi-Fi, pues en los escenarios (interiores y exteriores) se obtuvieron altos valores de la Tasa de Error de Bit (BER) cuando se transmitía en el canal 62, en relación a los resultados del canal 44.

## 5.2 TRABAJOS FUTUROS

Los resultados obtenidos en este trabajo de grado y las diferentes prestaciones del kit de desarrollo nRF24LU1-DK, permiten plantear algunos trabajos futuros de investigación.

- Análisis y evaluación del desempeño de un sistema de comunicación de datos vía radio en la banda de 2.4 GHz, haciendo uso de los parámetros configurables del kit de desarrollo, tales como CRC, carga útil, y retransmisiones.
- Diseño e implementación de dispositivos de telemetría y telecontrol haciendo uso del kit de desarrollo nRF24LU1-DK de Nordic.
- Evaluación del desempeño de los módulos radio nRF24LU1 en un entorno de movilidad.
- Diseño e implementación de un dispositivo que permita medir la potencia de los módulos radio nRF24LU1, así como también permita obtener la Tasa de Error de Bit (BER) directamente a partir de los bits errados.
- Análisis del desempeño del protocolo *Enhanced ShockBursts* implementado en la herramienta de desarrollo nRF24LU1-DK haciendo uso de la función *MultiCeiver* y el *USB Dongle*.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Ocando, “Tecnologías para Redes Inalámbricas en las Organizaciones del Estado de Zulia”. [Artículo]. Universidad Rafael Belloso Chacín. [En línea]. Disponible: <http://www.urbe.edu/publicaciones/telematica/indice/pdf-vol4-1/4-tecnologias-redes-inalambricas-organizaciones-zulia.pdf>. [Consultado: Mayo, 2011].
- [2] A. Dowhuszko. “Teoría de la Transmisión de Información sobre canales MIMO Inalámbricos con Múltiples Usuarios”, Trabajo de grado Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 2010. [En línea] Disponible: [http://www.efn.uncor.edu/archivos/doctorado\\_cs\\_ing/dowhuszko/Tesis\\_Doctoral\\_Alexis\\_Dowhuszko.pdf](http://www.efn.uncor.edu/archivos/doctorado_cs_ing/dowhuszko/Tesis_Doctoral_Alexis_Dowhuszko.pdf). [Consultado: Mayo, 2011].
- [3] Nordic Semiconductor ASA, “Quarterwave Printed Monopole Antenna for 2.4 GHz”. [Artículo]. Nordic Semiconductor ASA, 2005. [En línea] Disponible: <https://www.nordicsemi.com/eng/Support/White-Papers>. [Consultado: Mayo, 2011].
- [4] Nordic Semiconductor ASA, “nRF24lu1 Single Chip 2.4GHz Transceiver with USB Microcontroller and Flash Memory,” Nordic Semiconductor ASA, 2008. [En línea]. Disponible: <https://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24LU1>. [Consultado: Mayo, 2011].
- [5] D. Velázquez Campos, “Cobertura dentro de Construcciones para Comunicaciones Personales Móviles vía Satélite”. Tesis, Universidad de las Américas, México, 2004. [En línea] Disponible: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/campos\\_v\\_da/](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/campos_v_da/). [Consultado: Abril, 2011].
- [6] Nordic Semiconductor ASA, “nRF24LU1 Development kit User Guide,” [Artículo]. Nordic Semiconductor ASA, 2007. Disponible: CD del kit de desarrollo Nordic NRF24LU1-DK [Consultado: Abril, 2011].
- [7] Nordic Semiconductor ASA, “nRF24xx Link Integrity”. Nordic Semiconductor ASA, 2003. [En línea]. Disponible: <https://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24LU1>. [Consultado: Mayo, 2011].
- [8] Unión Internacional de Telecomunicaciones, “Atribuciones de frecuencia del servicio aficionados por satélite”. [Artículo]. Unión

- Internacional de Telecomunicaciones, UIT-R, [En línea]. Disponible: [http://www.itu.int/en/ITU-R/space/AmateurDoc/ARS-ART5\\_S.pdf](http://www.itu.int/en/ITU-R/space/AmateurDoc/ARS-ART5_S.pdf). [Consultado: Junio, 2011].
- [9] L. Garcés y J. Ordoñez. “Evaluación y análisis del desempeño en el nivel físico para redes de área local inalámbricas (WLAN) IEEE 802.11g”, Trabajo de grado Universidad del Cauca, Colombia, 2009.
- [10] Nordic Semiconductor ASA, “Crystal Oscillator Desing Consideration”. Nordic Semiconductor ASA, 2008. [En línea]. Disponible: <https://www.nordicsemi.com/eng/Support/White-Papers>. [Consultado: Julio, 2011].
- [11] “CY3653 Wireless USB PProC Development Kit”. Corporación Cypress Semiconductor, California U. S, 1990 [En línea]. Disponible: <http://www.cypress.com/?rID=14332>. [Consultado: Agosto, 2011].
- [12] Grupo de estudios ambientales de la Universidad del Cauca. “Consolidación del sistema de Información Regional del Agua (SIRA)”. Cauca, 2008 [En línea] Disponible: <http://mva.unicauca.edu.co/moduloambiental/EstacionServlet>. [Consultado: Agosto, 2011].
- [13] NRP Power Meter Family, ROHDE&SCHWARS, “The ultimate solution for power measurements”, Datasheet, 2008. [En línea]. Disponible: [http://www2.rohde-schwarz.com/file\\_9417/NRP\\_bro\\_en.pdf](http://www2.rohde-schwarz.com/file_9417/NRP_bro_en.pdf). [Consultado: Junio, 2010].
- [14] D. García y L. Navarro. “Evaluación y análisis del desempeño de un sistema de comunicación de datos vía radio en la banda de 900 MHz basado en espectro ensanchado por saltos en frecuencia utilizando el modelo Peer to Peer”, Trabajo de grado Universidad del Cauca, Colombia, 2011.
- [15] C. Gómez y Y. Gonzales. “Implementación, análisis y evaluación de un sistema de comunicación de datos vía radio punto a punto de corto alcance en UHF”, Trabajo de grado Universidad del Cauca, Colombia, 2009.
- [16] L. James, A. Moore, A. Wonfor, R. Plumb, “Packet error rate and bit error rate non deterministic relationship in optical network applications”. [Artículo]. Universidad de Cambridge, Inglaterra, [En línea]. Disponible:

<http://www.cl.cam.ac.uk/~awm22/publications/james2005packet.pdf>.  
[Consultado: Julio, 2011].

- [17] J. Hernando. “Comunicaciones Móviles”. [Libro]. Editorial Centro de Estudios Ramón Areces, España, 2004, pp. 120, 126.
- [18] F. Ordoñez y Y. Narváez. “Evaluación y análisis del desempeño a nivel físico de un sistema de comunicación de datos de corto alcance vía radio en 2.4 GHz basado en espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS)”. Trabajo de grado Universidad del Cauca, Colombia, 2011.
- [19] LABVOLT, Telecomunicaciones Analógicas FM/PM, volumen 3. Lab-Volt Quebec Ltda. Canadá, 1985.
- [20] Telecom Hall, “What is Ec/Io (and Eb/No)?”. Telecom Hall Portal. Disponible en: <http://www.telecomhall.com/what-is-ecio-and-ebno.aspx>. [Consultado: Agosto 2011].
- [21] Remcom, “The Wireless Insite Users Manual” Remcom, Inc, 2009. [En línea]. Disponible: <http://www.remcom.com/wireless-insite>. [Consultado: Octubre, 2011].
- [22] Unión Internacional de Telecomunicaciones, “Propagación por trayectos múltiples y parametrización de sus características”, *Unión Internacional de Telecomunicaciones*, UIT-R P.1407-4, 2009. [En línea]. Disponible: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.1407/es>. [Consultado: Junio, 2011].
- [23] Unión Internacional de Telecomunicaciones, “Datos de Propagación y métodos de predicción para la planificación de sistemas de radiocomunicaciones en interiores y redes de radiocomunicaciones de área local en la gama de frecuencias de 900 MHz a 100 GHz”, *Unión Internacional de Telecomunicaciones*, UIT-R P.1238-6, 2009. [En línea]. Disponible: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.1238/es>. [Consultado: Septiembre, 2011].
- [24] J. Luna y S. Agredo. “Análisis de cobertura de un sistema Wi-Fi en interiores, mediante la técnica de trazado de rayos”, Trabajo de grado, Universidad del Cauca, Colombia, 2009.
- [25] E. Castellanos. “Análisis de propagación electromagnética en espacios interiores: herramienta software Matlab para predicción y simulación”. Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, Santander, Colombia, 2005.

- [26] F. Ordoñez y J. Chamorro “Evaluación del desempeño de un sistema de comunicación vía radio que utiliza codificación convolucional”. Trabajo de grado, Universidad del Cauca, Colombia, 2010.
- [27] J. Briceño. “Transmisión de Datos”. Mérida. 3ra ed. 2005, pp. 7, 63, 179-180, 182-183, 186-188, 364.
- [28] S. Yunes “Diseño de Antenas Direccionales de 2.4 GHz y 5.4 GHz por Medio de la Técnica de Microcinta”. Trabajo de grado, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México, 2009.
- [29] W. Tomasi, “Sistemas de comunicaciones electrónicas”, Prentice Hall 4ed. 2003, pp 350,351.
- [30] Nordic Semiconductor ASA, “Low Cost Networks, Zigbee & 802.15.4” Nordic Semiconductor ASA, 2005. [En línea]. Disponible: <https://www.nordicsemi.com/eng/Support/White-Papers>. [Consultado: Septiembre, 2011].
- [31] Nordic Semiconductor ASA, “Frequency Agility Protocol for nRF24XX”. Nordic Semiconductor ASA, 2004. [En línea]. Disponible: <https://www.nordicsemi.com/eng/Support/White-Papers>. [Consultado: Septiembre, 2011].
- [32] Nordic Semiconductor ASA, “Not a Standard Wireless Solution”. [Artículo]. Nordic Semiconductor ASA, 2006. [En línea] Disponible: [http://www.nordicsemi.com/eng/News/Press-Center/Press-Backgrounders/Technical-article-archive/\(language\)/eng-GB](http://www.nordicsemi.com/eng/News/Press-Center/Press-Backgrounders/Technical-article-archive/(language)/eng-GB). [Consultado: Octubre, 2011].
- [33] Nordic Semiconductor ASA, “nRF240x ShockBurst technology”. Nordic Semiconductor ASA, 2003. [En línea]. Disponible: [http://www.semiconductorstore.com/pdf/NewSite/nordic/WP\\_nRF240x\\_ShockBurst.pdf](http://www.semiconductorstore.com/pdf/NewSite/nordic/WP_nRF240x_ShockBurst.pdf). [Consultado: Octubre, 2011].