

**EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO A NIVEL
FÍSICO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES
PUNTO A PUNTO BASADO EN EL ESTÁNDAR IEEE
802.11G**



**Darío Andrés Benavides Moreno
Germán Darío Beltrán Constain**

Directora: Jenny Cuatindioy Imbachí
Codirector: Víctor Manuel Quintero Flórez

Universidad del Cauca

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

**EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO A NIVEL
FÍSICO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES
PUNTO A PUNTO BASADO EN EL ESTÁNDAR IEEE
802.11G**



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

**Darío Andrés Benavides Moreno
Germán Darío Beltrán Constain**

*Directora: Jenny Cuatindioy Imbachí
Codirector: Víctor Manuel Quintero Flórez*

Universidad del Cauca

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

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	11
1. ASPECTOS TÉCNICOS DE NIVEL FÍSICO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES PUNTO A PUNTO BASADO EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.11g.....	13
1.1. SISTEMA DE COMUNICACIONES BASADO EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.11g	13
1.1.1 Fuente de Información para el Nivel Físico.....	16
1.1.2 Transmisor del Sistema de Comunicaciones Basado en el Estándar IEEE 802.11g.....	18
1.1.3 Receptor del Sistema.	22
1.2 CANAL INALÁMBRICO.	22
1.2.1 Fenómenos de Propagación.....	22
1.2.2 Distribuciones Rayleigh y Ricean.	24
1.2.3 Ruido Gaussiano Blanco Aditivo.....	25
1.2.4 Interferencia Electromagnética.	26
1.3 MODELOS DE RED	26
1.3.1 Modelo de Red Cliente/Servidor	26
1.3.2 Modelo de Red Punto a Punto.....	27
2. ESCENARIOS DE PRUEBAS, PARÁMETROS DE DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO Y PLAN DE PRUEBAS	29
2.1. ESCENARIOS.....	29
2.1.1. Selección de Escenarios	30
2.2. MODELOS DE PROPAGACIÓN	31
2.2.1. Modelos de Propagación en IEEE 802.11g	32
2.3. PARÁMETROS DE DESEMPEÑO	35
2.3.1. Potencia de Recepción y Cobertura	35
2.3.2. Relación Señal a Ruido	37
2.3.3. Relación Señal a Interferencia.....	38
2.3.4. Estabilidad en Frecuencia Frente a la Temperatura.	39
2.3.5. Tasa de Error de Bits.....	39
2.3.6. Ancho de Banda.....	40
2.4. PLAN DE PRUEBAS.	41
2.4.1. Medición de Potencia de Recepción, Relación Señal a Ruido y Cobertura	41
2.4.2. Medición de la Tasa de Error de Bits.....	44
2.4.3. Medición de la BER en Condiciones de Interferencia	46
2.4.4. Medida de la Estabilidad en Frecuencia Frente a la Temperatura.	47

3. OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	48
3.1. POTENCIA DE RECEPCIÓN	48
3.1.1. Potencia de Recepción y Cobertura en el Escenario de Exteriores.	50
3.1.2. Potencia de Recepción y Cobertura en el Escenario de Interiores.	54
3.2. MEDIDA DE LA ESTABILIDAD EN FRECUENCIA FRENTE A LA TEMPERATURA.....	61
3.3. ANCHO DE BANDA.	63
3.4. POTENCIA DE TRANSMISION.....	68
3.5. TASA DE ERROR DE BIT	69
3.5.1. Relación BER vs SNR en el Escenario de Interiores.	69
3.5.2. Comparación de la Relación BER vs SNR entre el escenario de exteriores e interiores.	72
3.5.3. BER en condiciones de interferencia.	75
4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	77
4.1. TRABAJOS FUTUROS.....	78
BIBLIOGRAFÍA.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	Sistema de comunicaciones básico.....	13
Figura 1.2.	Estándar 802.11g basado en el modelo OSI.	14
Figura 1.3.	Distribución de canales 802.11g.....	15
Figura 1.4.	Formato de Trama MAC.....	16
Figura 1.5.	Sub-campos del control de trama.....	16
Figura 1.6.	Diagrama de bloques de un transceptor basado en el estándar IEEE 802.11g.	18
Figura 1.7.	Codificador convolucional de longitud de restricción $L=7$	19
Figura 1.8.	Asignación de constelaciones BPSK, 16-QAM, QPSK, y 64-QAM.....	20
Figura 1.9.	Prefijo cíclico entre símbolos OFDM consecutivos.	21
Figura 1.10.	Fenómenos de multitrayectoria.....	23
Figura 1.11.	Enlace tipo NLOS.....	24
Figura 1.12.	Modelo de canal AWGN	25
Figura 1.13.	Modelo de Red Cliente/Servidor	27
Figura 1.14.	Modo Infraestructura	27
Figura 1.15.	Modelo de Red Punto a Punto.....	27
Figura 2.1.	Escenario típico exterior.	29
Figura 2.2.	Panorámica del CDU - Universidad del Cauca	30
Figura 2.3.	Escenario de trabajo modelado en Wireless InSite®	31
Figura 2.4.	Densidad espectral transmitida	40
Figura 2.5.	Sistema de comunicaciones implementado	41
Figura 2.6.	Mediciones sobre el trayecto con LOS.	42
Figura 2.7.	Ubicación puntual de receptores	43
Figura 2.8.	Mediciones sobre el trayecto con LOS para el escenario exterior.....	43
Figura 2.9.	Esquema del sistema implementado para la medición de la BER.	44
Figura 2.10.	Elementos utilizados en la medición de la BER.	46
Figura 2.11.	Montaje del sistema para evaluar el desempeño bajo condiciones de interferencia.....	47
Figura 3.1.	Medida del valor de RSSI.....	49
Figura 3.2.	Relación entre el RSSI y la potencia de recepción.	50
Figura 3.3.	Potencia de recepción en el escenario de exteriores.....	51
Figura 3.4.	Multitrayectoria en el escenario de exteriores.....	53
Figura 3.5.	Potencia de recepción en el escenario de interiores - LOS.....	55
Figura 3.6.	Potencia de recepción en el escenario de interiores - NLOS.....	57
Figura 3.7.	Variación de la potencia de recepción en un intervalo de 1 metro de distancia.	58
Figura 3.8.	Cobertura en el escenario interior.....	59
Figura 3.9.	Distribución de subportadoras.	61
Figura 3.10.	Espectro de la señal alrededor de la frecuencia central.....	62
Figura 3.11.	Esquema para la medida de la estabilidad en frecuencia.	62
Figura 3.12.	Espectro de frecuencias a distintos niveles de temperatura.....	63
Figura 3.13.	Espectro de la señal IEEE 802.11g a -40dBr.....	65
Figura 3.14.	Espectro de la señal IEEE 802.11g a -28 dBr.....	66
Figura 3.15.	Espectro de la señal IEEE 802.11g a -20 dBr.....	66
Figura 3.16.	Espectro de la señal IEEE 802.11b a -30 dBr.....	67
Figura 3.17.	Espectro para las velocidades de transmisión de 54, 36 y 18 Mbps.	67
Figura 3.18.	Niveles de potencia de transmisión.	68
Figura 3.19.	Interfaz de la utilidad “Alfa Tools”.	69
Figura 3.20.	Efecto del ruido sobre una señal. a) señal sin ruido. b) señal con ruido.	70
Figura 3.21.	PER vs SNR – Interiores.	70

Figura 3.22. BER vs SNR – Interiores.	71
Figura 3.23. Gráficas de desempeño para las tasas de codificación en 3/4 y 2/3 en 64-QAM para el escenario de interiores. a) BER vs SNR. b) PER vs SNR.	72
Figura 3.24. PER vs SNR – Exteriores.	72
Figura 3.25. BER vs SNR – Exteriores.	73
Figura 3.26. Curvas de PER la modulación 64QAM y tasa de codificación = 3/4.	74
Figura 3.27. Curvas de BER para cada modulación en escenarios de interiores y exteriores.	74
Figura 3.28. PER VS SIR.	75
Figura 3.29. BER VS SIR.	75

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1.	Frecuencia central de cada canal en IEEE 802.11g.	15
Tabla 1.2.	Funciones de los sub-campos de control de trama.....	17
Tabla 1.3.	Codificación del campo Duración/ID.....	17
Tabla 1.4.	Relación entre velocidad de transmisión de datos, modulación y tasa de codificación.....	21
Tabla 2.1.	Descripción general de los modelos de propagación Completo 3D y de Pendiente Única.	33
Tabla 2.2.	Índice de propagación n según el escenario de propagación.	33
Tabla 2.3.	Parámetros modelo completo 3D.	34
Tabla 2.4.	Rango de cobertura teórico en un escenario de interiores IEEE 802.11g.....	36
Tabla 2.5.	Velocidad de transmisión de datos y sensibilidad.....	37
Tabla 2.6.	Características técnicas del adaptador USB 802.11b/g.....	42
Tabla 2.7.	Velocidades de transmisión seleccionadas.	44
Tabla 3.1.	Parámetros de simulación.	48
Tabla 3.2.	Potencia de recepción en el escenario de exteriores.....	52
Tabla 3.3.	Valores estadísticos de EMR, ECM y DEE en el escenario de exteriores.	54
Tabla 3.4.	Potencia de recepción en el escenario de interiores con LOS.	56
Tabla 3.5.	Potencia de recepción en el escenario de interiores con NLOS.	57
Tabla 3.6.	Error relativo y error absoluto de los modelos de propagación en el escenario de interiores con LOS.	59
Tabla 3.7.	Error relativo y error absoluto de los modelos de propagación en el escenario de interiores de con NLOS.	60
Tabla 3.8.	Valores estadísticos de EMR, ECM y DEE en el escenario de interiores con LOS y NLOS.	61
Tabla 3.9.	Parámetros para el cálculo del ancho de banda.	65
Tabla 3.10.	Ancho de banda medido y teórico.	68
Tabla 3.11.	Niveles de potencia de transmisión.	68
Tabla 3.12.	Valores de PER y BER en relación a la SNR para el escenario de Interiores en condiciones de LOS.....	70
Tabla 3.13.	Valores de BER-PER vs SNR para las tasas de codificación en 3/4 y 2/3 en 64-QAM para el escenario de interiores.....	71
Tabla 3.14.	Valores de PER y BER en relación a la SNR para el escenario exterior en condiciones de LOS.....	72
Tabla 3.15.	Valores de PER y BER en relación a la SIR.	75

LISTA DE ACRÓNIMOS

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> , Conversor Analógico a Digital.
AGC	<i>Automatic Gain Control</i> , Control Automático de Ganancia.
AID	<i>Association Identify</i> , Identificador de Asociación.
AP	<i>Access Point</i> , Punto de Acceso.
ARM	<i>Advanced RISC Machines</i> , Arquitectura Computacional RISC
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i> , Ruido Gaussiano Blanco Aditivo.
BER	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit.
BPSK	<i>Binary Phase-Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria.
BSSID	<i>Basic Service Set Identifier</i> , Identificador del Conjunto Básico de Servicios.
CCK	<i>Complementary Code Keying</i> , Modulación por Código Complementario.
CDU	Centro Deportivo Universitario.
CFP	<i>Contention Free Period</i> , Periodo Libre de Contención.
CP	<i>Cyclic Prefix</i> , Prefijo Cíclico.
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access, Collision Avoidance</i> , Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisiones.
CTS	<i>Clear to Send</i> , Despejado para Enviar.
DCD	<i>Data Carrier Detect</i> , Detección de Portadora de Datos.
DEE	Desviación Estándar del Error.
DSR	<i>Data Set Ready</i> , Conjunto de Datos Listos.
ECM	Error Cuadrático Medio.
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i> , Interferencia Electromagnética.
EMR	Error Medio Relativo.
ERP	<i>Extended Rate Physical</i> , Nivel Físico de Velocidad Extendida.
ESS	<i>Extended Service Set</i> , Conjunto Extendido de Servicios.
ESSID	<i>ESS Identifier</i> , Identificador del Conjunto Extendido de Servicios.
FCS	<i>Frame Check Sequence</i> , Secuencia de Chequeo de Trama.
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> , Transformada Rápida de Fourier.

FIET	Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.
GO	<i>Geometrical Optics</i> , Óptica Geométrica.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , Instituto de Ingenieros Electrónicos y Eléctricos,
ISI	<i>Inter-Symbol Interference</i> , Interferencia Inter-Simbólica.
ISM	<i>Industrial Scientific and Medical</i> , Industrial Científica y Médica.
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> , Organización Internacional de Normalización.
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i> , Transformada Inversa Rápida de Fourier.
LLC	<i>Logical Link Control</i> , Control de Enlace Lógico.
LOS	<i>Line of Sight</i> , Línea de Vista.
MAC	<i>Medium Access Control</i> , Control de Acceso al Medio.
IM	<i>Implementation Margin</i> , Margen de Implementación.
M-QAM	<i>M-ary Quadrature Amplitude Modulation</i> , Modulación de Amplitud en Cuadratura M-aria.
MSB	<i>Most Significant Bit</i> , Bit Más Significativo.
NAV	<i>Network Allocation Vector</i> , Vector de Asignación de Red.
NF	<i>Noise Figure</i> , Figura de Ruido.
NLOS	<i>Non line of Sight</i> , Sin Línea de Vista.
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal.
OSI	<i>Open System Interconnection</i> , Modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos.
PCM	<i>Pulse Code Modulation</i> , Modulados por Codificación de Pulso.
PDF	<i>Probability Density Function</i> , Función de Densidad de Probabilidad.
PER	<i>Packet Error Rate</i> , Tasa de Error de Paquete.
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Efectiva.
PSDU	<i>Physical layer Service Data Unit</i> , Unidad de Dato de Servicio de la Capa Física.
QPSK	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura.
RAM	<i>Random-Access Memory</i> , Memoria de Acceso Aleatorio.

RF	<i>Radio Frequency</i> , Radio Frecuencia.
RI	<i>Ring Indicator</i> , Indicador de Llamada.
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i> , Conjunto de Instrucciones Reducido para Computadores.
RNF	<i>Receiver Noise Floor</i> , Piso de Ruido en el Receptor.
ROE	Relación de Onda Estacionaria.
RSSI	<i>Receive Signal Strength Indicator</i> , Indicador de Intensidad de Señal Recibida.
RT	<i>Ray Tracing</i> , Trazado de Rayos.
SBR	<i>Shooting and Bouncing Ray</i> , Disparo y Rebote de Rayos.
SIR	<i>Signal to Interference Ratio</i> , Relación Señal a Interferencia.
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i> , Transmisor-Receptor Asíncrono Universal.
USB	<i>Universal Serial Bus</i> , Bus Universal en Serie.
UTD	<i>Uniform Theory of Diffraction</i> , Teoría Uniforme de la Difracción.
WPA	<i>Wi-Fi Protect Access</i> , Acceso Wi-Fi Protegido.
WEP	<i>Wired Equivalent Privacy</i> , Privacidad Equivalente a la Red Cableada.
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> , Redes Inalámbricas de Área Local.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las Redes Inalámbricas de Área local (WLAN, *Wireless Local Area Network*) han ganado mucha popularidad, que se ve acrecentada conforme sus prestaciones aumentan y se descubren nuevas aplicaciones para ellas. Una WLAN, es un sistema de comunicaciones de datos que usa Radio Frecuencias (RF¹, *Radio Frequency*) para la transmisión de la información. En general, las WLAN se implementan como una alternativa a las redes cableadas o como una extensión de ellas, siendo cada vez más utilizada para brindar a los usuarios acceso inalámbrico a los servicios de red en tiempo real, añadiendo flexibilidad a la red y lo más importante, incrementando la productividad y eficiencia en las empresas donde se implementa. Un usuario dentro de una red WLAN puede transmitir y recibir datos, voz y vídeo en espacios públicos, en el hogar y en la oficina.

El origen de las WLAN se fundamenta en los resultados de un experimento realizado en 1979 por F.R. Gfeller y U. Bapst, ingenieros de IBM en Suiza, quienes diseñaron e implementaron una WLAN con dispositivos infrarrojos. En Junio de 1.997, del Instituto de Ingenieros Electrónicos y Eléctricos (IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) ratificó el estándar 802.11 como el primer estándar mundial para WLAN. Esa primera versión proporcionaba velocidades de 1 y 2 Mbps en las frecuencias de 2.4 GHz, así como un conjunto de métodos de señalización y otros servicios de red.

Distintas organizaciones y grupos de investigación han buscado mejorar las características de las redes inalámbricas, impulsando el desarrollo de las tecnologías relacionadas con las WLAN. En 1999 se creó la alianza WiFi, con el objetivo de promover a nivel mundial la adopción de una norma única para la transmisión de información sobre WLAN, para ello, la alianza adoptó el conjunto de estándares IEEE 802.11, siendo actualmente el estándar IEEE 802.11g el más difundido.

Debido a las ventajas, características, aplicaciones y aceptación de los sistemas inalámbricos basados en el estándar IEEE 802.11g, es apropiada la realización de procesos de investigación a nivel de ingeniería que permitan evaluar el desempeño a nivel físico de este sistema, teniendo en cuenta diferentes escenarios de operación, condiciones de interferencia, efectos de multi-trayectoria y el ruido inherente al sistema de comunicaciones; generalmente los estudios son realizados mediante modelado y simulación, los cuales son abstracciones de los sistemas reales y por lo tanto no tienen en cuenta todas las variables de un sistema real.

Por tal razón, se efectuó este trabajo de grado, donde se estudió el desempeño de un sistema de comunicación punto a punto vía radio basado en el estándar IEEE 802.11g, en un entorno experimental por medio de la evaluación y análisis de sus parámetros de desempeño a nivel físico, en escenarios de interiores (*indoor*) y exteriores (*outdoor*) y bajo condiciones de interferencia.

Los resultados del trabajo de grado se presentan en este documento, el cual se encuentra estructurado en 4 capítulos y dos anexos.

¹ RF: Abarca desde 10 KHz hasta los 300 GHz, se divide en bandas que presentan características diferentes en cuanto a la propagación.

Capítulo 1. Aspectos Técnicos de Nivel Físico de un Sistema de Comunicaciones Punto a Punto Basado en el Estándar IEEE 802.11g.

Presenta los aspectos técnicos de nivel físico de un sistema de comunicaciones punto a punto basado en el estándar IEEE 802.11g, se asocia a un sistema básico de comunicaciones, identificando en él la fuente de información, el canal y el receptor, posteriormente se describen los modelos de red cliente/servidor y el modelo de red punto a punto, siendo este último el utilizado en este trabajo de grado.

Capítulo 2. Escenarios de Pruebas, Parámetros de Desempeño a Nivel Físico y Plan De Pruebas.

Presenta los escenarios de pruebas de interiores y de exteriores, parámetros de desempeño de nivel físico a evaluar como potencia de recepción, relación señal a ruido, estabilidad en frecuencia frente a la temperatura, relación señal a interferencia y ancho de banda, y el plan de pruebas para la medida de estos parámetros.

Capítulo 3. Obtención y Análisis de Resultados.

Presenta los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas, mediante la implementación del sistema de comunicaciones en un entorno experimental, analizando su comportamiento en diferentes escenarios y ante interferencia.

Capítulo 4. Conclusiones.

Presenta las conclusiones del trabajo de grado y trabajos futuros a desarrollar en esta área.

Anexo A. Kit de Evaluación y Desarrollo WISDK01BI-02.

Presenta la descripción general del kit WISDK01BI-02 empleado en el desarrollo de este trabajo de grado, así como la configuración hardware y software requerido para su funcionamiento

Anexo B.

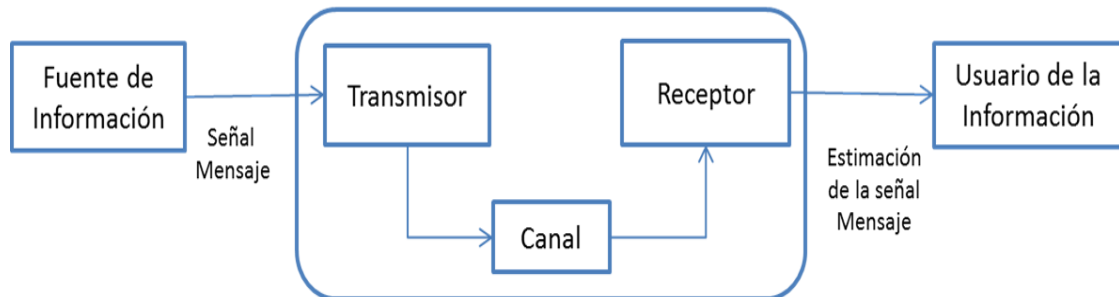
Contiene los códigos fuente ejecutados sobre el kit de referencia WISDK01BI-02 que permitieron obtener la medida del RSSI (medida_RSSI) y establecer una conexión ad.hoc (conexion). Además, contiene los archivos de simulación de la herramienta de simulación *Wireless InSite*® y un videotutorial sobre el uso de la utilidad "*Alfa Tools*".

1. ASPECTOS TÉCNICOS DE NIVEL FÍSICO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES PUNTO A PUNTO BASADO EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.11g

Actualmente, tecnologías inalámbricas como Zigbee, Bluetooth y WiFi, que operan en la banda de 2.4 GHz son ampliamente utilizadas al proveer a los usuarios las ventajas de la conectividad inalámbrica. Además, estas tecnologías implementan procesos y técnicas de transmisión que robustecen la señal frente a fenómenos presentes en el canal inalámbrico.

En este capítulo se presentan aspectos técnicos de nivel físico de un sistema de comunicaciones inalámbrico basado en el estándar IEEE 802.11g, teniendo en cuenta el modelo transmisor, canal y receptor de un sistema de comunicaciones básico, ilustrado en la figura 1.1.

Figura 1.1. Sistema de comunicaciones básico



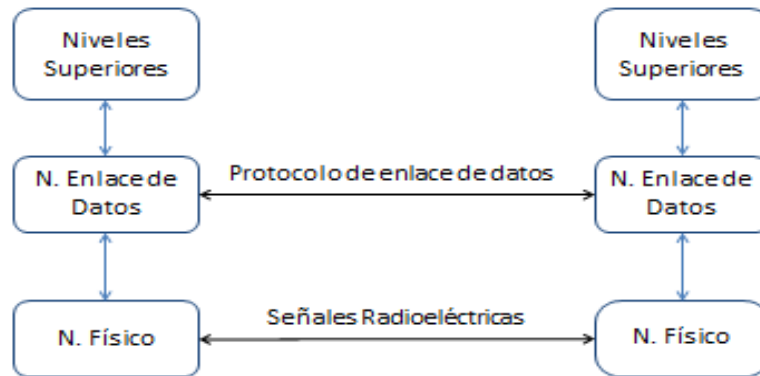
1.1. SISTEMA DE COMUNICACIONES BASADO EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.11g

El estándar IEEE 802.11g define los niveles inferiores del Modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, *Open System Interconnection*) denominados nivel físico y nivel de enlace de datos, ilustrados en la figura 1.2. Para el estándar IEEE 802.11g, el nivel de enlace de datos se sub-divide en dos subniveles: Control de Enlace Lógico (LLC, *Logical Link Control*) y Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*).

El subnivel LLC, administra la comunicación punto a punto entre dispositivos, además, soporta los servicios orientados y no orientados a conexión, usados por los protocolos de los niveles superiores [1].

En el estándar de la Organización Internacional de Normalización (ISO, *International Organization for Standardization*) ISO/IEC 15802-1 se describen las funciones del subnivel MAC entre las cuales se encuentran: especificar la forma de acceso al medio físico, definir la topología de red, reordenar las tramas que fueron transmitidas fuera de secuencia, controlar el flujo de datos, es decir, realiza un control de la transmisión de datos, de tal manera que el dispositivo receptor no se sature con tráfico superior al que pueda procesar en un intervalo de tiempo y solucionar los problemas de reenvío cuando ocurren errores [2].

Figura 1.2. Estándar 802.11g basado en el modelo OSI [3]



Específicamente para el control de tramas este subnivel se encarga de agregar la dirección MAC de los nodos fuente y destino en cada una de las tramas que se transmiten, delimitar las tramas en el origen agregando bits de bandera para que el receptor pueda reconocer el inicio y fin de cada trama dentro de una cadena de bits recibidos por el nivel físico. Además, se encarga de efectuar la detección y si es necesario, la corrección de errores de transmisión y descartar tramas duplicadas o erróneas [2].

En el nivel físico, se especifican los dispositivos necesarios para la comunicación, los medios mecánicos y eléctricos que se encargan de transformar la información binaria en una sucesión de impulsos adecuados para viajar sobre el canal de comunicación, garantizando que un bit transmitido llegue con el mismo valor lógico. También detalla el proceso de convertir las señales eléctricas recibidas en bits de información, que posteriormente serán enviados al subnivel MAC.

El estándar IEEE 802.11g utiliza la técnica de transmisión Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), para el nivel físico en las WLAN que operan en la banda de frecuencia de 2.4 GHz, la cual se había implementado en el estándar IEEE 802.11a en la banda de frecuencia de 5 GHz. El estándar IEEE 802.11g también utiliza la técnica de transmisión Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*), la cual le brinda compatibilidad con el estándar IEEE 802.11b, donde puede alcanzar una velocidad de transmisión máxima de 11Mbps mediante la utilización del esquema de Modulación por Código Complementario (CCK, *Complementary Code Keying*) [4].

El estándar IEEE 802.11g incorpora un Nivel Físico de Velocidad Extendida (ERP, *Extended Rate Physical*) que incluye cuatro esquemas de operación los cuales se describen a continuación [5].

- **DSSS-OFDM:** Es un esquema opcional, el cual es una técnica de transmisión híbrida que combina preámbulo y encabezado transmitidos en DSSS, con datos en OFDM. Permite velocidades de transmisión de datos de 6 a 54 Mbps.
- **ERP-PBCC:** Es un esquema opcional, el cual utiliza la Codificación Convolutiva Binaria de Paquete (PBCC, *Packet Binary Convolutional Code*), proporcionando velocidades de transmisión de datos de 22 y 33 Mbps.

- **ERP-OFDM:** Es uno de los esquemas obligatorios en el estándar IEEE 802.11g. Se basa en las especificaciones del estándar IEEE 802.11a con algunas variaciones. La técnica de transmisión OFDM proporciona a las WLAN velocidades de transmisión de 6, 9, 12, 18, 24, 48 y 54 Mbps, siendo obligatorias las de 6, 12 y 24 Mbps.
- **ERP-DSSS/CCK:** Es otro de los esquemas obligatorios en IEEE 802.11g, cumple con las características del nivel físico IEEE 802.11b incluyendo técnica de transmisión DSSS a 1 y 2 Mbps y CCK a 5.5 y 11 Mbps.

El estándar IEEE 802.11g opera en la banda de 2.4 GHz, la cual está dividida en 14 canales de 22 MHz de ancho de banda, con una separación entre frecuencias centrales de canales adyacentes de 5 MHz, lo que produce un traslapamiento de canales. En la figura 1.3 se muestra la distribución de los canales y en la tabla 1.1 la frecuencia central definida para cada canal.

Este trabajo de grado se enfocó en el esquema obligatorio de operación ERP-OFDM, debido a su mayor aceptación comercial en aplicaciones ISM; sin embargo con el objetivo de comparar características con el otro esquema obligatorio ERP-DSSS/CCK, se realizaron pruebas de ancho de banda y desempeño para una velocidad de transmisión de datos de 11Mbps.

Figura 1.3. Distribución de canales 802.11g

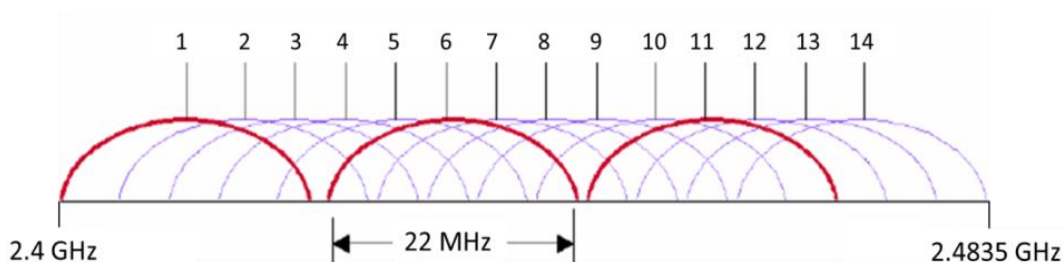


Tabla 1.1. Frecuencia central de cada canal en IEEE 802.11g.

Canal	Frecuencia
1	2.412 GHz
2	2.417 GHz
3	2.422 GHz
4	2.427 GHz
5	2.432 GHz
6	2.437 GHz
7	2.442 GHz
8	2.447 GHz
9	2.452 GHz
10	2.457 GHz
11	2.462 GHz
12	2.467 GHz
13	2.472 GHz
14	2.484 GHz

Tabla 1.2. Funciones de los sub-campos de control de trama [1]

Sub-campo	No de Bits	Descripción
Versión del Protocolo	2	Indica la versión del estándar y solo podrá ser incrementado cuando una versión sea incompatible con la anterior.
Tipo	2	Identifica la función de la trama (datos o gestión).
Subtipo	4	Especifica la información transportada en el sub-campo tipo.
Hacia DS ²	1	Se configura en 1, para todas las tramas de datos que son enviadas por una estación ³ asociada a un Sistema de Distribución (DS, <i>Distribution System</i>).
Desde DS	1	Se configura en 1, para todas las tramas de datos que son enviadas por un DS.
Mas Fragmentos	1	Se configura en 1, para tramas de datos y gestión que han sido fragmentadas.
Reintento	1	Se configura en 1, para tramas de datos y de gestión que son retransmitidas.
Gestión de energía	1	Indica el modo de consumo de energía de una estación.
Más Datos	1	Se configura en 1, para indicar a una estación receptora que existen más datos por recibir.
Protección de trama	1	Se configura en 1, para indicar que la información contenida en el cuerpo de la trama, ha sido procesada por un algoritmo de encriptación (WEP / WPA) ⁴ .
Orden	1	Se configura en 1, cuando se están transfiriendo datos con prioridad.

Tabla 1.3 Codificación del campo Duración/ID [1]

Bit 15 (MSB)	Bit 14	Bit 13-0	Utilización.
0	0 – 32767		Tiempo (En microsegundos) utilizado para transmitir la trama durante el periodo de contienda.
1	0	0	Valor configurado para transmitir tramas durante el Periodo Libre de Contienda (CFP ⁵ , <i>Contention-Free Period</i>).
1	0	1–16383	Reservado.
1	1	0	Reservado.
1	1	1–2007	Identificador de asociación en tramas de Control de Ahorro de Energía (PS-POLL, <i>Power-Save Poll</i>)
1	1	2008–16383	Reservado.

- **Control de Secuencia.** Es un campo de 16 bits que está conformado por los subcampos número de fragmento (4 bits) y número de secuencia (12 bits). El subcampo número de secuencia contiene un valor que está en el rango de 0 a 4095, que es incrementando en 1 por cada Unidad de Datos de Servicio MAC (MSDU, *MAC Service Data Unit*) transmitida y permanece invariable para las retransmisiones de la misma MSDU. El subcampo número de fragmento contiene el

² DS, Sistema de Distribución.

³ Equipo terminal de datos que está asociado a una red.

⁴ Privacidad Equivalente a la Red Cableada (WEP, *Wired Equivalent Privacy*). Acceso Wi-Fi Protegido (WPA, *Wi-Fi Protect Access*).

⁵ CFP es el periodo de tiempo asignado a una estación por el punto coordinador, durante el cual se le permite intercambiar tramas sin realizar contienda por el medio inalámbrico

valor correspondiente a la cantidad de divisiones de una MSDU, permanece constante en las retransmisiones del fragmento y se configura en cero si la MSDU no es fragmentada [1] [6].

- **Datos.** Es un campo de longitud variable que contiene la información. El tamaño de este campo varía entre 0 y 2312 bytes.
- **Secuencia de Chequeo de Trama (FCS, *Frame Check Sequence*).** Es un campo de 32 bits que contiene información para la detección de errores, el cálculo de los datos para este campo se hace por medio del código de redundancia cíclica, sobre todos los bits de encabezado de la trama MAC y sobre el campo datos. El polinomio generador del campo FCS es presentado en la ecuación 1.1.

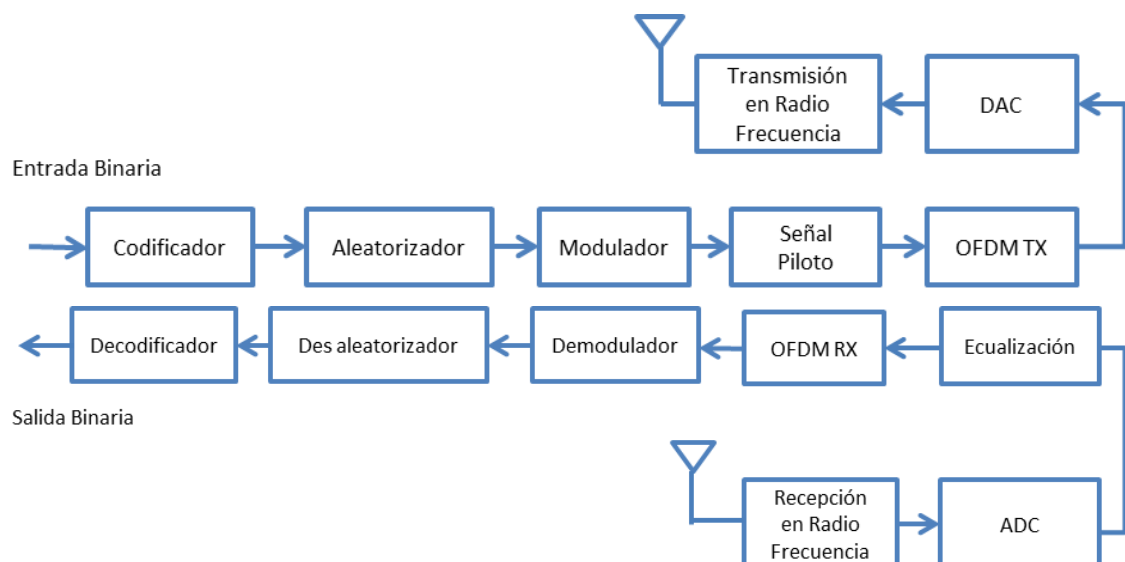
$$G(x) = x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1 \quad (1.1)$$

1.1.2 Transmisor del Sistema de Comunicaciones Basado en el Estándar IEEE 802.11g

El transmisor se encarga de procesar los datos proporcionados por la fuente de información, para acondicionarlos de tal forma que puedan ser transmitidos a través del canal de comunicaciones y recibir la señal de información con el menor número de errores posibles.

Las etapas de procesamiento que conforman un sistema de comunicaciones basado en el estándar IEEE 802.11g bajo el esquema obligatorio de operación ERP-OFDM, se indican en la figura 1.6.

Figura 1.6. Diagrama de bloques de un transceptor basado en el estándar IEEE 802.11g



La función de cada bloque del transmisor se explica a continuación.

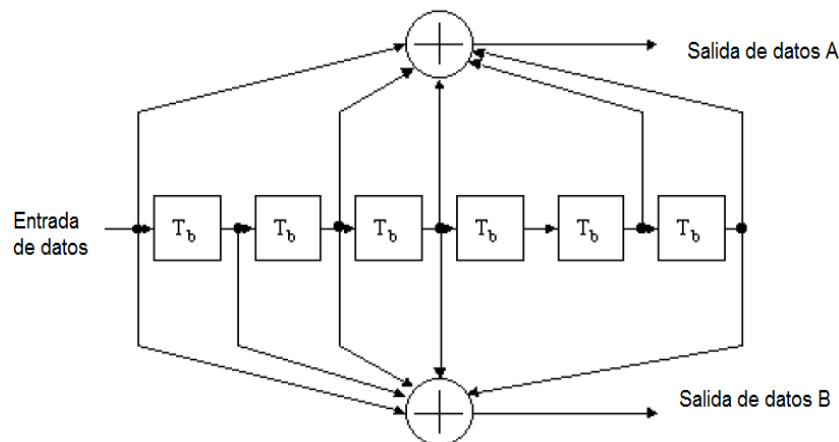
1.1.2.1 Codificador

El codificador se incluye en el transmisor debido a que en un canal de comunicaciones inalámbrico, la señal transmitida es afectada por aspectos como desvanecimientos, ruido e interferencia, que dificultan recuperar la información correctamente. Por tal motivo, para obtener los datos con una baja probabilidad de error y disminuir los efectos causados por el medio de propagación, se aplican métodos de codificación de canal que permiten mejorar la fiabilidad en la comunicación.

La técnica de codificación de canal utilizada en un sistema de comunicaciones basado en el estándar IEEE 802.11g es la codificación convolucional [5], donde la secuencia de bits codificada, depende de los bits previos. A este tipo de técnica se la denomina codificación con memoria. Los códigos convolucionales se describen mediante la tasa de codificación y la longitud de restricción. La tasa de codificación, k/n , es la relación entre el número de bits que entran al codificador (k) y el número de bits que se obtienen a la salida del codificador (n). La longitud de restricción de un código convolucional L , se define como el número de corrimientos sobre el cual un bit de un solo mensaje puede influir en la salida del codificador.

El estándar 802.11g establece las tasas de codificación⁶ 1/2, 2/3 y 3/4. La figura 1.7 muestra un codificador convolucional de tasa de codificación 1/2 y longitud de restricción $L=7$.

Figura 1.7. Codificador convolucional de longitud de restricción $L=7$ [5]



1.1.2.2 Aleatorizador

El aleatorizador tiene la función de intercalar los bits (ordenar los bits de forma diferente) antes de ser transmitidos, con el objetivo de proteger la información frente a errores consecutivos.

Inicialmente, los bits provenientes del codificador se organizan en bloques de tamaño equivalente al número de bits requeridos para formar un símbolo OFDM. En un

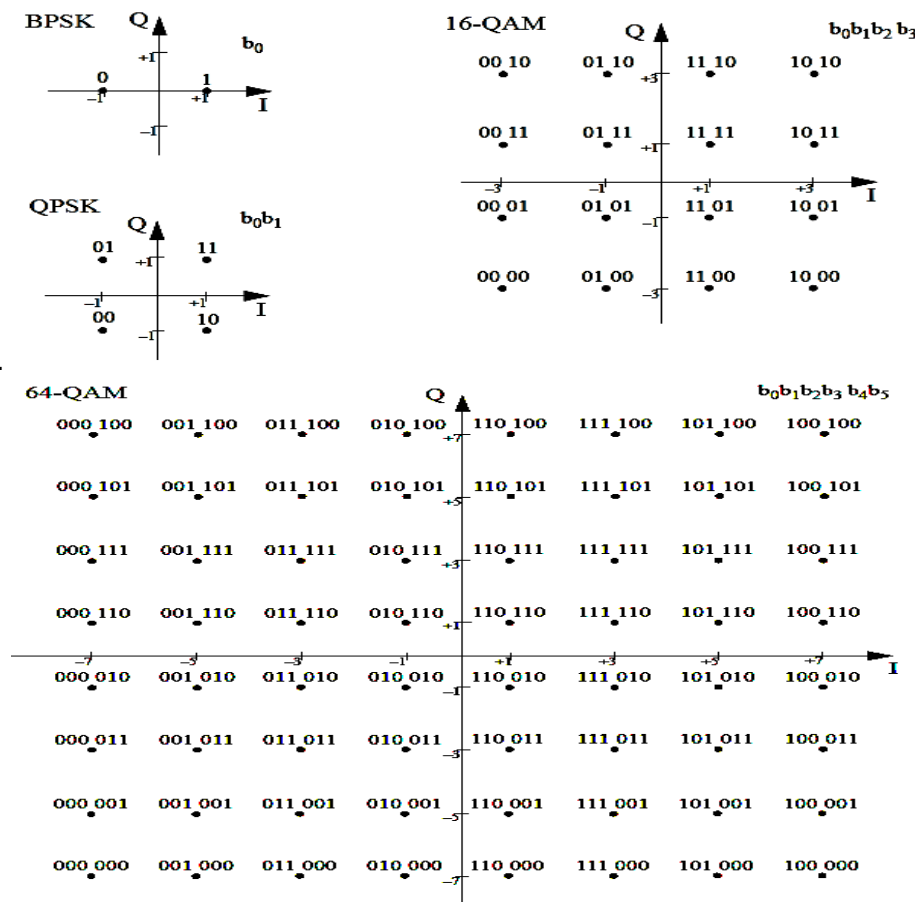
⁶ Para incrementar la tasa de codificación a 2/3 y 3/4 se emplea un procedimiento denominado "Puncturing", que consiste en omitir algunos de los bits codificados con el fin de reducir el número de bits a transmitir.

transmisor basado en el estándar IEEE 802.11g, el aleatorizador realiza una permutación de bits en dos fases: la primera fase, asegura que los bits codificados adyacentes se asignen a subportadoras no adyacentes y la segunda fase asegura que los bits codificados adyacentes, se asignen de forma intercalada a las posiciones de bits menos y más significativas de la constelación, fortaleciendo la señal frente al ruido que genera errores en ráfaga, que se caracteriza por afectar a varios bits consecutivos. Mediante este proceso, los errores consecutivos que afectan un bloque de bits son tratados en recepción como errores individuales, facilitando su detección y corrección.

1.1.2.3 Modulador

El modulador digital tiene como función agrupar los bits que entrega el aleatorizador en bloques de determinado tamaño dependiendo del esquema de modulación utilizado, para convertirlos en números complejos que representan puntos de una constelación. Las modulaciones utilizadas por el estándar IEEE 802.11g son: La Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria (BPSK, *Binary Phase-Shift Keying*), Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK *Quadrature phase-shift keying*), Modulación de Amplitud en Cuadratura M-aria (M-QAM, *M-ary Quadrature Amplitude Modulation*) 16-QAM Y 64-QAM. Los diagramas de constelaciones de estas modulaciones se ilustran en la figura 1.8

Figura 1.8. Asignación de constelaciones BPSK, 16-QAM, QPSK, y 64-QAM [1]



En la tabla 1.4 se muestra la relación entre las diferentes velocidades de transmisión de datos, los esquemas de modulación y tasas de codificación definidas para el esquema de operación ERP-OFDM en el estándar IEEE 802.11g.

Tabla 1.4. Relación entre velocidad de transmisión de datos, modulación y tasa de codificación

Velocidad de transmisión (Mbps)	Modulación	Tasa de codificación
6	BPSK	$\frac{1}{2}$
9	BPSK	$\frac{3}{4}$
12	QPSK	$\frac{1}{2}$
18	QPSK	$\frac{3}{4}$
24	16 QAM	$\frac{1}{2}$
36	16 QAM	$\frac{3}{4}$
48	64 QAM	$\frac{2}{3}$
54	64 QAM	$\frac{3}{4}$

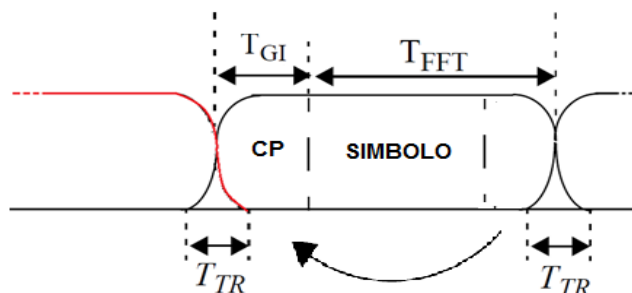
1.1.2.4 Señal Piloto

Este bloque tiene la función de generar y modular en BPSK datos pseudoaleatorios que son enviados sobre las portadoras piloto de cada símbolo OFDM con el fin de permitir que el receptor realice la ecualización de canal.

1.1.2.5 OFDM TX

En esta etapa, se procesan los datos mediante la Transformada Inversa Rápida de Fourier (IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*) tanto a señales complejas de datos como a señales complejas piloto; posteriormente se agrega un intervalo de guarda entre símbolos, llamado Prefijo Cíclico (CP, *Cyclic Prefix*)⁷, utilizado para evitar la Interferencia Inter-Simbólica (ISI, *InterSymbol Interference*) causada por la multitrayectoria [7]. En la figura 1.9 se muestra la duración del CP (T_{GI}), el tiempo de transición (T_{TR}) y el periodo útil (T_{FFT}) de un símbolo OFDM.

Figura 1.9. Prefijo cíclico entre símbolos OFDM consecutivos



El tiempo definido por el estándar IEEE 802.11g para el CP (T_{GI}) es $0.8 \mu s$, para el periodo útil T_{FFT} es $3.2 \mu s$ y para el tiempo de transición T_{TR} es de $100 ns$ [1].

⁷ El CP es una copia de las últimas muestras del símbolo, agregadas por delante de las muestras emitidas en la IFFT.

1.1.2.6 Conversor Analógico a Digital (DAC)

Convierte la señal digital en una señal analógica para facilitar su transporte sobre una portadora RF.

1.1.2.7 Transmisión en Radio-Frecuencia

Esta etapa del sistema de comunicación tiene como función, tomar la señal entregada por el conversor para convertirla a una señal de RF por medio de un oscilador de alta velocidad.

1.1.3 Receptor del Sistema

El receptor se encarga de realizar la demodulación en radiofrecuencia, efectuar la realimentación necesaria para realizar el Control Automático de Ganancia (AGC, *Automatic Gain Control*), luego la señal es digitalizada por el Conversor Analógico a Digital (ADC, *Analog to Digital Converter*), posteriormente realiza las tareas de sincronización en tiempo y en frecuencia o ecualización, para lo cual hace uso de las secuencias de entrenamiento enviadas por el transmisor, así como de la información insertada en las portadoras pilotos, en seguida la etapa de OFDM RX extrae el CP y realiza el procesamiento digital mediante el uso de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*), finalmente se efectúan los procesos de demodulación, des-aleatorización y decodificación. La decodificación se realiza mediante un decodificador de Viterbi [1].

1.2 CANAL INALÁMBRICO

El trayecto entre el transmisor y el receptor puede variar, desde una simple línea de vista hasta la obstrucción por edificios montañas y árboles, en analogía a los medios de propagación guiados que son estacionarios y predecibles, los inalámbricos son aleatorios y difíciles de analizar, puesto que las ondas electromagnéticas experimentan un conjunto de cambios que tienen lugar según las particularidades del canal utilizado

1.2.1 Fenómenos de Propagación

El mecanismo de propagación de las ondas electromagnéticas puede ser atribuido a fenómenos de reflexión, difracción, dispersión y refracción. Debido a estos fenómenos, las ondas electromagnéticas viajan a través de caminos diferentes de longitud variable hasta el receptor, esto se denomina multi-trayectoria y origina interferencia que puede ser constructiva o destructiva, dependiendo de la fase con que llegue la señal al receptor [8]. A continuación se presentan las características más relevantes de estos fenómenos.

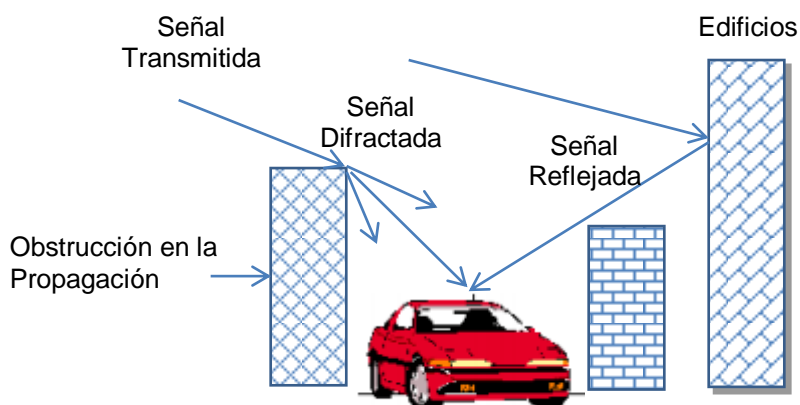
- **Reflexión:** este fenómeno se presenta cuando la onda electromagnética incide sobre la frontera entre dos medios, en donde parte o toda la onda incidente no se propaga en el segundo medio sino que es reflejada en dirección al primer medio, para la producción de este efecto la longitud de onda de la señal electromagnética debe ser menor que el tamaño del obstáculo en el cual se refleja [9].

- **Refracción:** este fenómeno se presenta siempre que una onda electromagnética pasa de un medio a otro, produciendo cambios en su velocidad y en la dirección de propagación [10].
- **Dispersión:** este fenómeno se presenta cuando la onda electromagnética viaja a través de un considerable número de obstáculos, de pequeñas dimensiones comparables con la longitud de onda de la señal, propagándose en múltiples direcciones y dividiendo su energía.
- **Difracción:** este fenómeno se presenta cuando la onda electromagnética bordea un obstáculo, lo cual depende de la longitud de onda, polarización de la señal y de la geometría del obstáculo [10].

En la figura 1.10 se observa la multitrayectoria de la señal transmitida, debido a los fenómenos de propagación de difracción y reflexión

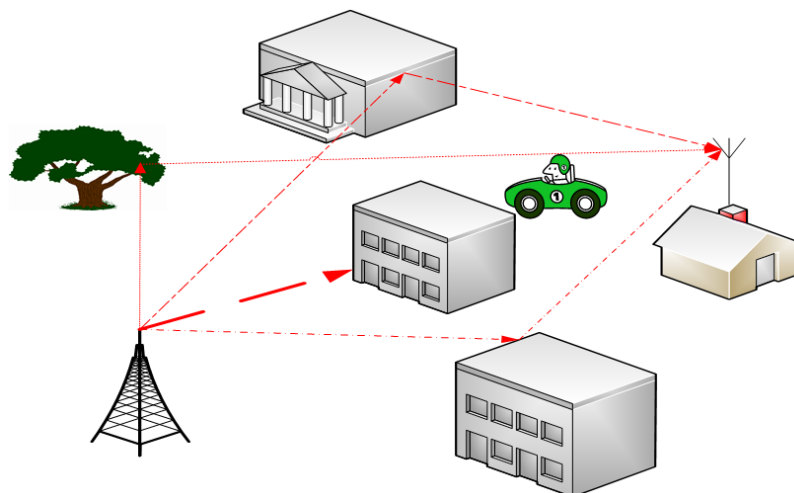
La propagación tiene lugar bien en condiciones de Línea de Vista (LOS, *Line of sight*) a lo largo de las calles, múltiples difracciones en las esquinas y reflexiones laterales en las fachadas de los edificios. De este modo también hay señal en puntos Sin Línea de Vista (LOS, *Non Line of sight*). Estas dos condiciones se explican a continuación:

Figura 1.10. Fenómenos de multitrayectoria



- **Propagación con línea de vista:** la propagación con LOS es una forma de comunicación entre dos o más puntos, donde es necesario que exista una visión directa entre el transmisor y el receptor
- **Propagación sin línea de vista:** es una forma de comunicación, donde el transmisor y el receptor no tienen visión directa. En la figura 1.11 se muestra que la presencia de obstáculos como edificios, árboles y autos impiden que las señales radioeléctricas, lleguen directamente al receptor. Cuando esto ocurre la multitrayectoria generada por los elementos del entorno permite que la señal llegue a su destino.

Figura 1.11. Enlace tipo NLOS



1.2.2 Distribuciones Rayleigh y Ricean

La magnitud de la señal que llega al receptor depende de la existencia de la componente de línea de vista y de las componentes sin línea de vista y se modela por medio de las funciones de densidad de probabilidad Rayleigh y Rice.

- Modelo de canal con distribución Rayleigh

El modelo de canal con distribución Rayleigh, se utiliza para describir la variación estadística de la envolvente de la señal resultante de la propagación multitrayecto que experimenta desvanecimientos rápidos cuando los diferentes rayos tienen amplitudes similares y fases aleatorias. La ecuación 1.2 define la expresión de la Función de Densidad de Probabilidad (PDF, *Probability Density Function*) de la envolvente de una gaussiana compleja [11].

$$P(r) = \frac{r}{b} e^{\left(\frac{-r^2}{2b}\right)} \quad (1.2)$$

Donde:

r: Envolvente de la función de densidad de probabilidad.

b: Potencia media de las componentes multitrayecto.

- Modelo de canal con distribución Rice

Se utiliza esta distribución para la descripción estadística de las variaciones de intensidad de una señal constituida por una componente determinística y varias componentes aleatorias, situación que se produce cuando hay un trayecto dominante despejado y multi-trayectos sin visión directa. La función de densidad de probabilidad viene dada por la ecuación 1.3 [11].

$$P(r) = \frac{r}{b} e^{-(r^2+c^2)} I_0\left(\frac{cr}{b}\right) \quad (1.3)$$

Donde:

- 2b: Valor cuadrático medio de la componente aleatoria (señal multitrayecto).
- c: Valor eficaz de la componente determinística (señal directa).
- I_0 : Función de Bessel modificada de orden 0.

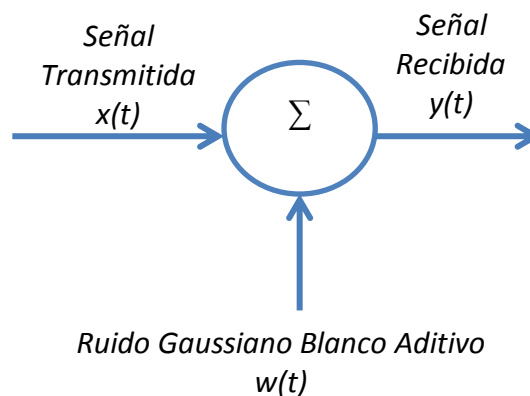
El parámetro μ se define como la razón de potencias de la componente directa de la señal y los componentes del multitrayecto y se expresa en la ecuación 1.4.

$$\mu = \frac{c^2}{2b} \quad (1.4)$$

1.2.3 Ruido Gaussiano Blanco Aditivo

Además de los fenómenos de propagación descritos en la sección 1.2.1, la señal también se ve afectada por el Ruido Gaussiano Blanco Aditivo (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*), el cual es un elemento limitante para el funcionamiento de un sistema de comunicaciones. Este tipo de ruido se añade a la señal de forma aditiva sobre todas las componentes de frecuencia de la señal [12]. En la práctica, el canal inalámbrico se modela con la presencia de ruido AWGN, como se muestra en la figura 1.12.

Figura 1.12. Modelo de canal AWGN [12]



Se supone que el canal tiene dos características, las cuales hacen posible expresar la señal recibida $y(t)$ como en la ecuación 1.5.

- El canal es lineal, con un ancho de banda lo suficientemente amplio para permitir la transmisión de señales $x(t)$.
- El ruido del canal $w(t)$, es función de muestreo de un proceso de AWGN de media cero [12].

El receptor tiene la tarea de observar la señal recibida $y(t)$ y efectuar la estimación de la señal transmitida $x(t)$. Sin embargo, por la presencia de AWGN, este proceso de toma de decisiones es de naturaleza estadística, resultando que el receptor cometerá errores ocasionales.

$$y(t) = x(t) + w(t) \quad (1.5)$$

1.2.4 Interferencia Electromagnética

Un fenómeno presente en las comunicaciones inalámbricas es la Interferencia Electromagnética (EMI, *Electromagnetic Interference*). Por EMI se entiende como la interacción del campo eléctrico y magnético de una señal no deseada que causa la presencia de voltajes o corrientes en los circuitos y mecanismos electrónicos sensitivos [13]. La EMI se produce como resultado de la operación de otro aparato eléctrico, o por fenómenos naturales.

En las tecnologías inalámbricas, la palabra Interferencia se refiere comúnmente a disturbios producidos desde otras fuentes de RF. La interferencia es un parámetro crítico para el despliegue de enlaces inalámbricos, especialmente en ambientes urbanos, o en espacios cerrados donde las interferencias de RF son causadas por aparatos que están trabajando en la misma banda y mismo canal del sistema de comunicación.

En una comunicación bajo el IEEE 802.11g, también se consideran interferencias a otras transmisiones bajo este estándar que estén en el mismo canal, por lo que siempre es conveniente utilizar el canal menos ocupado. Incluso otros sistemas de RF como las microondas puede interferir y degradar el nivel de la señal recibida. Las técnicas de modulación y el uso de canales múltiples ayudan a manejar el problema de la interferencia, pero no lo eliminan completamente [14].

1.3 MODELOS DE RED

Las redes inalámbricas pueden ser implementadas utilizando diferentes modelos, relaciones o arquitecturas de red. Por lo general, no hay una sola clasificación aceptada en la que se ajusten todas las redes de computadores, sin embargo, hay dos modelos de red que se destacan: modelo de red Cliente/Servidor y el modelo de red Punto a Punto.

1.3.1 Modelo de Red Cliente/Servidor

El modelo Cliente/Servidor intenta proveer usabilidad, flexibilidad, interoperabilidad y escalabilidad en las comunicaciones. El término Cliente/Servidor fue usado por primera vez en 1980 para referirse a una comunicación donde el proceso cliente envía una solicitud a través de la red al proceso servidor y espera una respuesta [15]. El intercambio de dichos mensajes se muestra en la figura 1.13.

El modelo de red Cliente/Servidor, es básicamente una red centralizada, que está compuesta de un sistema de mayor desempeño, la máquina servidor, y de varios sistemas de menor desempeño, las máquinas clientes. El servidor es la unidad central de registro, así como también el único proveedor de contenidos y servicios. Un cliente solo solicita contenido o la ejecución de los servicios, sin compartir ninguno de sus propios recursos [16].

En particular para el estándar IEEE 802.11, el modelo de red Cliente/Servidor es también conocido como modo infraestructura, el cual utiliza el concepto de celda, similar a los sistemas de telefonía móvil. La figura 1.14 muestra una configuración en

modo infraestructura, la cual es formada por el Punto de Acceso (AP, *Access Point*) y las estaciones ubicadas dentro del área de cobertura. Esta configuración se le denomina Conjunto Extendido de Servicios (ESS, *Extended Service Set*). Cada ESS se identifica a través de un Identificador de ESS (ESSID, *ESS Identifier*).

Figura 1.13. Modelo de Red Cliente/Servidor [15]

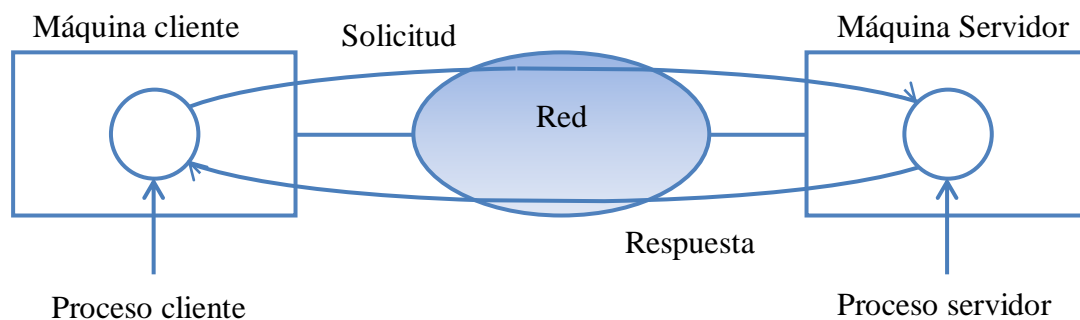


Figura 1.14. Modo Infraestructura



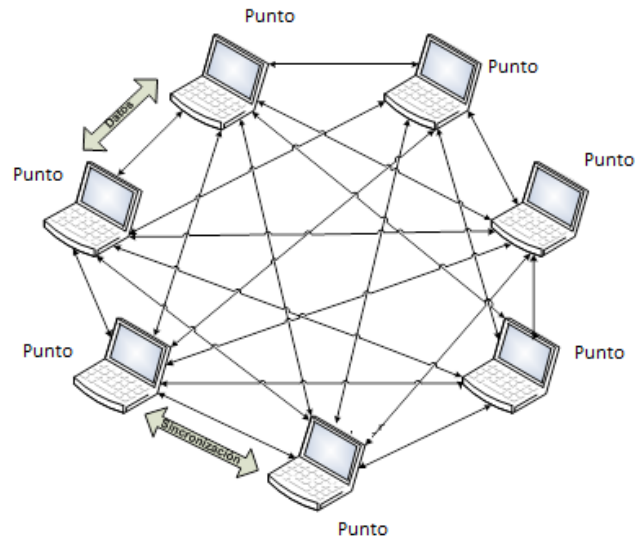
1.3.2 Modelo de Red Punto a Punto

Es un modelo que describe un tipo de red donde cada estación de trabajo tiene la capacidad para iniciar, controlar y terminar una sesión sin la presencia de un dispositivo central dedicado a la gestión de la comunicación [17]. La figura 1.15 representa este modelo, en el que cada nodo puede conectarse a cualquier otro nodo o grupo de nodos de la red para transmitir y recibir información y aprovechar los recursos y servicios de la red [18]

En este modelo de red los nodos se comunican entre sí como iguales, cada nodo es responsable de compartir sus recursos con otros nodos en la red, así como de la seguridad de dichos recursos.

El modelo Punto a Punto no necesita de un servidor o maestro central que permita la comunicación o asuma funciones de gestión. Todos los nodos pueden formar una red donde cada uno es igual al otro. Cada estación puede actuar tanto como servidor como cliente, dependiendo si tiene recursos para intercambiar o servicios que proveer, o si éste quiere solicitar recursos o servicios proporcionados por otros nodos [19].

Figura 1.15. Modelo de Red Punto a Punto



Debido a su estructura y organización, este modelo es relativamente tolerante a las fallas, ya que no hay un punto central e indispensable; la red puede compensar fácilmente la pérdida de un nodo o incluso de algunos nodos. Con la pérdida de nodos el desempeño de la red puede verse afectado, sin embargo, si hay un número suficiente de nodos en la red, ésta aún podría estar funcionando. Presenta algunas desventajas como difícil gestión y diagnóstico de fallas en la red.

En particular para el estándar IEEE 802.11, el modelo de red Punto a Punto es conocido como modo Ad-Hoc, el cual consiste en un grupo de computadores que se comunican entre sí directamente sin utilizar un AP, para ello se necesita configurar el mismo canal radio y un Identificador del Conjunto Básico de Servicios (BSSID, *Basic Service Set Identifier*). El modo Ad-Hoc es adecuado para la implementación del sistema de comunicaciones vía radio debido a que en este modelo el comportamiento de cada nodo es autónomo, no existe sobrecarga de procesamiento en alguno de los nodos y cualquiera de ellos puede iniciar o terminar la comunicación. Además, está definido como una configuración básica para una red WLAN por el estándar IEEE 802.11 [20] .

2. ESCENARIOS DE PRUEBAS, PARÁMETROS DE DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO Y PLAN DE PRUEBAS

Los parámetros de desempeño a nivel físico permiten analizar el comportamiento del sistema de comunicaciones en diferentes entornos o escenarios. Para la evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema de comunicaciones punto a punto definido por el estándar IEEE 802.11g se requiere, conocer sus especificaciones técnicas, establecer los escenarios de pruebas, considerar los efectos de canal y las condiciones de operación del sistema.

En este capítulo se describen los escenarios de prueba escogidos, se presentan algunos modelos de propagación afines a un sistema de comunicaciones basado por el estándar IEEE 802.11g, posteriormente se definen y seleccionan los parámetros de desempeño a nivel físico a evaluar, por último, se establece el procedimiento para su medición.

2.1. ESCENARIOS

En este trabajo de grado se tienen en cuenta los escenarios de interiores y de exteriores para la evaluación del desempeño a nivel físico del sistema de comunicaciones inalámbricas definido por el estándar IEEE 802.11g. A continuación se presenta las características de estos tipos de escenarios.

- Escenarios de Exteriores

Estos escenarios se caracterizan por la presencia de vegetación poco densa, edificios o residencias, fuentes de agua, carreteras, personas circundantes y LOS entre el transmisor y el receptor [24], un escenario exterior típico se muestra en la Figura 2.1. En la estimación de la potencia de recepción se consideran las pérdidas de propagación de espacio libre y los parámetros del perfil del terreno [21].

Figura 2.1. Escenario típico exterior



- Escenarios de Interiores

Estos escenarios se caracterizan por la presencia de obstáculos como paredes, suelos y techo, los cuales originan el efecto de múltiples trayectorias, es decir que un número

elevado de componentes de la señal transmitida llegan al receptor. En este tipo de escenarios se presentan altos niveles de dispersión y reflexión, los cuales suelen ser mecanismos condicionantes y restrictivos en la propagación de las señales radioeléctricas [22].

2.1.1. Selección de Escenarios

Los escenarios de pruebas a elegir, deben permitir la evaluación de los parámetros de desempeño de nivel físico de un sistema de comunicaciones inalámbrico punto a punto definido por el estándar IEEE 802.11g tanto en los escenarios de interiores como de exteriores, y la evaluación de la incidencia del fenómeno de la interferencia. Los sitios seleccionados deben contar con red eléctrica, debido a los requerimientos de alimentación tanto de los instrumentos de medida como del sistema de comunicaciones inalámbrico a evaluar.

- Selección del Escenario de exteriores

Para este escenario se ha elegido el Centro Deportivo Universitario (CDU) de la Universidad del Cauca (Unicauca). Una panorámica de este sitio se presenta en la figura 2.2. Su elección se debe principalmente a que este entorno cumple con las condiciones descritas para un escenario de exteriores. El sitio se caracteriza por estar rodeado de poca vegetación, una cancha de futbol y cinco de baloncesto, un coliseo adjunto y árboles de gran altura. Este escenario permite evaluar el sistema en su límite de cobertura de 100 m [23] y configurar un enlace con línea de vista entre el transmisor y el receptor.

Figura 2.2. Panorámica del CDU - Universidad del Cauca

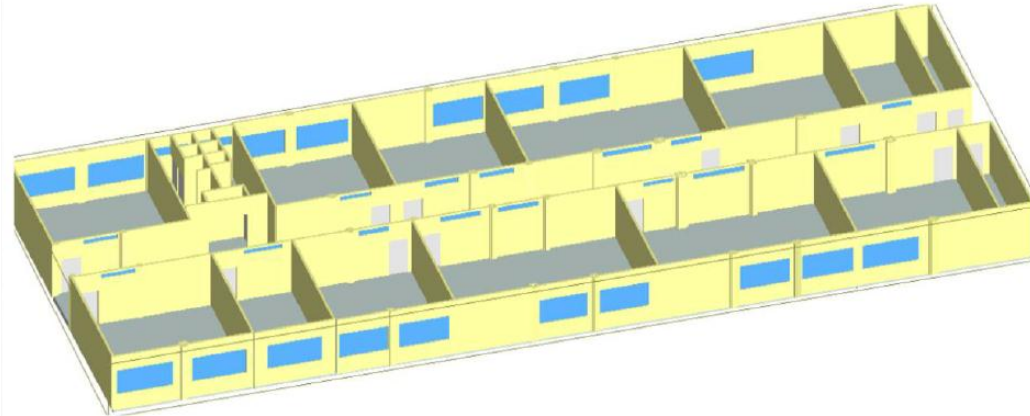


- Selección del escenario de interiores

Debido a su conformación física, ha sido seleccionado el segundo piso de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET) de la Universidad del Cauca. Este espacio cuenta con las características de un escenario interior y es asociado a un entorno de edificios, oficinas, residencias o centros comerciales. De [24] se ha tomado

un modelo del escenario seleccionado, el cual fue diseñado en la herramienta *Wireless InSite®* y se presenta en la figura 2.3.

Figura 2.3. Escenario de trabajo modelado en *Wireless InSite®* [24]



La estructura física cuenta con paredes y pisos de concreto, doce salones adjuntos, pasillo principal de 51m de longitud, puertas de madera, ventanas de vidrio transparente, dos cuartos de baño y dos cuartos de uso general. Esta disposición proporciona un ambiente adecuado para evaluar aspectos de la propagación como el nivel de potencia de la señal, teniendo en cuenta la incidencia de la distancia y la generación de múltiples trayectos. Dentro de este escenario se distinguen dos casos de evaluación del sistema.

- **Caso 1.** Cuando el transmisor y el receptor se encuentran en línea de vista, esta condición se presenta particularmente cuando el transmisor y el receptor se encuentran en el pasillo de este escenario.
- **Caso 2.** Cuando no existe línea de vista entre el transmisor y el receptor.

2.2. MODELOS DE PROPAGACIÓN

Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las pérdidas de propagación en un escenario dado. Los modelos de propagación son utilizados para determinar el área de cobertura, la incidencia de las trayectorias múltiples y las pérdidas del enlace sobre la señal de propagación dentro de un espacio o zona particular, los modelos de propagación se consideran la base para el proceso de planificación de radioenlaces [25].

En general, los modelos de propagación se clasifican en tres tipos: determinísticos, estocásticos y empíricos; esta clasificación está relacionada con la metodología utilizada al momento de realizar una estimación sobre la propagación de la señal.

- **Modelos Determinísticos:** la implementación de estos modelos requiere gran cantidad de datos relativos a las características del entorno, por tanto, los algoritmos usados por los modelos determinísticos son generalmente muy complejos y computacionalmente poco eficientes, sin embargo, proporcionan precisión en su estimación [26]. Los modelos de propagación determinísticos se

basan en las ecuaciones de Maxwell, que definen el comportamiento de las ondas electromagnéticas en el espacio y el tiempo dentro de un entorno de propagación [27] [28].

- **Modelos Estocásticos:** en estos modelos, los parámetros del canal son tratados como variables estocásticas, debido a la dificultad para conseguir datos específicos del escenario de propagación, es decir, los resultados se obtienen mediante distribuciones de probabilidad [26] [29].
- **Modelos Empíricos:** estos modelos se basan en medidas realizadas sobre el terreno para un área geográfica o edificio determinado, son importantes debido a que algunos sistemas de comunicaciones inalámbricas operan en entornos de propagación complejos que no pueden ser modelados con precisión por medio de modelos estocásticos o determinísticos [28]. Los modelos empíricos establecen el efecto conjunto de las pérdidas de propagación, desvanecimientos y multi-trayectoria. La precisión de este modelo depende de la precisión de las medidas y de la similitud con el entorno donde fueron realizadas [28].

2.2.1. Modelos de Propagación en IEEE 802.11g

Uno de los parámetros de desempeño a nivel físico es la potencia de recepción, la cual depende del tipo de escenario. Los modelos de propagación son una herramienta apropiada para predecir los niveles de potencia en el receptor cuando se desea una estimación relativamente rápida de los resultados que se obtendrían experimentalmente. Actualmente, existen muchos modelos de propagación con distintos niveles de complejidad para diferentes condiciones de operación. En este trabajo de grado es interés un modelo de propagación que permita una estimación eficiente, rápida y acorde con las características del sistema de comunicaciones punto a punto basado en el estándar IEEE 802.11g, como son la banda de frecuencias de 2.4 GHz y un alcance alrededor de 100 m.

El modelo de propagación Completo 3D se utiliza en este trabajo de grado, el cual se basa en la técnica de Trazado de Rayos (RT, *Ray Tracing*) y su elección se debe a la confiabilidad en sus predicciones, lo que se comprueba en [24], donde se realiza una comparación directa con las medidas realizadas experimentalmente sobre el terreno obteniendo resultados aproximados. Además, este modelo ha sido ampliamente utilizado para predecir la propagación en interiores, aunque también su método se ajusta a los escenarios de exteriores, por tal razón, el modelo Completo 3D se utilizará para la estimación de potencia tanto en los escenarios de interiores como de exteriores.

Un inconveniente de los modelos basados en el método de trazado de rayos radica en la necesidad de caracterizar de manera detallada el entorno a analizar, lo que hace que la precisión del modelo dependa en gran medida de la exactitud y veracidad de los datos asociados al entorno de simulación, además el número de reflexiones, difracciones y número de puntos a analizar, afectan directamente el tiempo de procesamiento. Cuando los anteriores son factores decisivos, una opción es predecir los niveles de potencia por medio de modelos básicos de propagación.

En este trabajo de grado se compararan los niveles de potencia de recepción obtenidos de forma experimental con los proporcionados por el modelo de propagación Completo 3D y un modelo básico de propagación, para este último se ha elegido el modelo de pérdidas de trayecto de pendiente única descrito en [30], puesto

que este se ajusta al escenario de interiores y de exteriores. La tabla 2.1 se presenta la descripción general de los modelos de pendiente única y Completo 3D, que serán utilizados para la estimación de la potencia de recepción.

Tabla 2.1. Descripción general de los modelos de propagación completo 3D y de pendiente única

Modelo de Propagación	Frecuencia de operación	Distancia de Operación	Escenario	Línea de vista	Complejidad
Modelo de pendiente única.	RF	Mayor al campo lejano ⁸	Interior-Exterior	LOS - NLOS	Baja
Modelo Completo 3D	RF	Mayor al campo lejano	Interior-Exterior	LOS - NLOS	Alta

2.2.1.1. Modelo de propagación de Pendiente Única

El modelo de propagación de pendiente única se clasifica como un modelo determinístico- empírico, el cual describe de forma logarítmica la atenuación de la potencia de la señal recibida respecto al incremento de la distancia, esto es válido tanto en escenarios de interiores como de exteriores [30]. Este modelo plantea que las pérdidas promedio para una separación arbitraria entre el transmisor y el receptor están en función de la distancia, se utiliza el índice de propagación n que indica la tasa a la cual las pérdidas se incrementan con la distancia y se asocia al escenario de estudio. Las pérdidas de propagación $Pl[dB]$, se obtienen por medio de la ecuación 2.1.

$$Pl = l_0(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2.1)$$

Donde:

- $d_0[m]$: Distancia unitaria de referencia.
- $l_0[dB]$: Pérdida de propagación en la distancia d_0 .
- $d[m]$: Distancia entre el transmisor y receptor.
- n : Índice de propagación.

Los valores de n , dependen del ambiente de propagación, los valores para una frecuencia de 2.5 GHz son presentados en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Índice de propagación n según el escenario de propagación [30]

Escenario	n
Corredor	1.4
Edificios de oficina	3.5
Exterior	2

Es importante seleccionar la distancia de referencia apropiada para el ambiente de propagación; en sistemas micro-celulares, comúnmente la distancia de referencia está entre 1 y 10 metros, cabe destacar que la distancia de referencia debe estar en el

⁸ Región de campo lejano o de Fraunhofer, se define como la región en donde los campos electromagnéticos se comportan como una onda plana.

campo lejano de la antena y que el número de paredes y otros elementos dentro del edificio no son considerados en este modelo.

2.2.1.2. Modelo Completo 3D

La técnica de RT, está basada en la Óptica Geométrica (GO, *Geometrical Optics*) y en la Teoría Uniforme de la Difracción (UTD, *Uniform Theory of Diffraction*), la cual es una técnica utilizada en el estudio de la propagación de las señales radioeléctricas para predecir su comportamiento en escenarios de interiores y de exteriores [24]. El modelo de propagación completo 3D, predice la potencia de recepción mediante el disparo de rayos y la propagación de ellos a través de un entorno específico utilizando el modelo tridimensional. Dichos rayos interactúan con los objetos presentes en el entorno y establecen su camino hacia el receptor. Este modelo se caracteriza por no tener restricciones en cuanto a la forma de las estructuras, considerando objetos con todo tipo de irregularidades y reflexiones en pisos, paredes y techo. La Tabla 2.3 muestra los parámetros para la aplicación del modelo completo 3D.

Tabla 2.3. Parámetros del modelo completo 3D [24]

Máximas reflexiones	30, asumiendo que no hay traspaso de señal en la superficie
Máximas difracciones	4 (SBR) - 3 (Eigenray)
Transmisiones máximas	30, asumiendo que no hay reflexiones
Ambiente	Todos
Terreno	Todos
Interiores	Todos
Objetos	Todos
Alcance	Varía de acuerdo a la aplicación
Altura de las antenas	Todas
Tipo de antenas	Todos
Trazado de rayos	SBR, Eigenray.
Frecuencia mínima	100 MHz
Frecuencia máxima	Depende de la aplicación

El modelo de propagación Completo 3D dispone de dos algoritmos para la generación de rayos: de Disparo y Rebote de Rayos (SBR, *Shooting-and-Bouncing Ray*) y de Eigenray.

El algoritmo SBR consiste en el disparo de rayos desde los puntos fuentes y puntos de reflexiones del escenario hasta el punto de recepción. Los rayos que chocan con alguna estructura del escenario se reflejan y continúan viajando hasta lograr el número máximo de reflexiones. Se lanza una serie finita de rayos con una separación angular constante desde la antena transmisora, trazando el rayo con el fin de detectar si este incide sobre algún objeto o es recibido por la antena receptora, si el rayo incide sobre un objeto, se produce reflexión, refracción dispersión o difracción, dependiendo de la las propiedades geométricas del objeto. Después de que los rayos han sido disparados y reflejados, se identifican los bordes de difracción en el escenario, luego se disparan y trazan los rayos desde los bordes de difracción identificados y se determinan las trayectorias de propagación desde el punto de transmisión hasta el punto de recepción.

El algoritmo de Eigenray, se basa en el método de las imágenes y consiste en la construcción de las trayectorias de los rayos entre el transmisor y el receptor, que cumplen el principio de Fermat⁹ [21].

2.3. PARÁMETROS DE DESEMPEÑO

Los parámetros que se describen en esta sección permiten evaluar el desempeño a nivel físico del sistema de comunicaciones definido por el estándar IEEE 802.11g. A continuación se describen los parámetros definidos en este trabajo de grado para dicha evaluación.

2.3.1. Potencia de Recepción y Cobertura

Uno de los problemas que afecta a la señal recibida es la atenuación causada por factores como la distancia, absorción, reflexiones, difracciones y los múltiples trayectos, los últimos generan cambios rápidos en la intensidad de la señal [31]. La potencia de la señal recibida es descrita mediante la ecuación 2.2.

$$p_{rx} = \frac{p_{tx} * g_{rx} * g_{tx}}{l} \quad (2.2)$$

Donde:

- $p_{tx}[W]$: Potencia de transmisión.
- g_{tx} : Ganancia de la antena transmisora.
- g_{rx} : Ganancia de la antena receptora.
- l : Pérdidas de propagación.
- $p_{rx}[W]$: Potencia total de la señal recibida en el receptor.

Actualmente, la mayoría de los dispositivos de recepción de radiofrecuencia de baja potencia, tienen un Indicador de Intensidad de Señal Recibida (RSSI, *Receive Signal Strength Indicator*) que ofrece una medida de la energía detectada en la entrada del receptor [32].

El RSSI es un parámetro especificado como opcional en el estándar 802.11g, la precisión absoluta de la lectura del RSSI se limita a cada fabricante, es decir, el estándar IEEE 802.11g no especifica una relación entre el valor de RSSI y el valor de la potencia real, sin embargo, los fabricantes han optado por ofrecer relaciones entre la potencia real y el valor de RSSI medido [33].

Según [32] y [34], las relaciones entre el nivel de RSSI medido y los niveles de potencia de recepción p_{rx} , están dada por la ecuación 2.3.

$$RSSI = 10 \text{ Log} \left(\frac{p_{rx}}{p_{ref}} \right) \quad (2.3)$$

Donde:

- p_{ref} : Valor de referencia en unidades del fabricante.

⁹ El principio de Fermat establece que el trayecto seguido por la luz al propagarse de un punto a otro es tal que el tiempo empleado en recorrerlo es estacionario respecto a posibles variaciones de la trayectoria.

En la ecuación 2.4 se aplica una propiedad de logaritmo de un cociente a la ecuación 2.3

$$RSSI = 10\text{Log}(p_{rx}) - 10\text{Log}(p_{ref}) \quad (2.4)$$

Se define el segundo término de la ecuación 2.4 conforme a la ecuación 2.5.

$$RSSI_{ref} = 10\text{Log}(p_{ref}) \quad (2.5)$$

Despejando la potencia de recepción P_{rx} y sustituyendo 2.5 en 2.4, se obtiene la ecuación 2.6

$$P_{rx} = RSSI + RSSI_{ref} \quad (2.6)$$

El $RSSI_{ref}$ es un valor dado por cada fabricante o en su defecto es hallado empíricamente mediante la ecuación 2.7.

$$RSSI_{ref} = P_{rx} - RSSI \quad (2.7)$$

Por otra parte, la cobertura está asociada a la distancia máxima que un sistema de comunicaciones puede brindar servicios, es decir, para que la comunicación entre dos estaciones sea posible hace falta que cada una de ellas esté en el rango de cobertura radioeléctrica de la otra [35].

Para un sistema de comunicaciones bajo el estándar IEEE 802.11g el rango de cobertura cambia en relación a la potencia de transmisión, velocidad de transmisión de datos y tipo de entorno [23]. En la tabla 2.4, se muestra un ejemplo de valores de la cobertura estimada para un sistema de comunicaciones basado en el estándar IEEE 802.11g en un ambiente interior con una potencia de transmisión de 30 mW y ganancia de antena de 2.2 dBi.

Tabla 2.4. Rango de cobertura teórico en un escenario de interiores IEEE 802.11g [23]

Velocidad de transmisión De datos (Mbps)	Cobertura IEEE 802.11g (30 mW con ganancia de antena de 2.2 dBi)
54	90 ft (27 m)
48	95 ft (29 m)
36	100 ft (30 m)
24	140 ft (42 m)
18	180 ft (54 m)
12	210 ft (64 m)
11	160 ft (48 m)
9	250 ft (76 m)
6	300 ft (91 m)
5.5	220 ft (67 m)
2	270 ft (82m)
1	410 ft (124 m)

Un aspecto importante que determina el rango de cobertura es la sensibilidad del receptor. Este parámetro indica que tan débil puede ser una señal de RF para que sea detectada por el receptor. Entre más baja sea la potencia que el receptor pueda detectar, mayor es su sensibilidad.

La sensibilidad para los sistemas de comunicaciones bajo el estándar IEEE 802.11g es definida como el mínimo nivel señal requerido para una Tasa de Error de Paquetes (PER, *Packet Error Rate*) del 10% para una Unidad de Dato de Servicio de Nivel Físico (PSDU, *Physical layer Service Data Unit*) de 1000 bytes, además se debe considerar un Figura de Ruido¹⁰ (NF, *Noise Figure*) de 10dB y un Margen de Implementación¹¹ (IM, *Implementation Margin*) de 5dB [5]. La sensibilidad aumenta a una mayor velocidad de transmisión de datos, esto es debido a que al aumentar la velocidad de transmisión de datos, cambia el esquema de modulación asociado hacia uno de mayor orden, lo cual exige un mayor nivel de potencia de recepción para su correcta demodulación. Los niveles de sensibilidad definidos por el estándar IEEE 802.11g para cada velocidad de transmisión de datos se muestran en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Velocidad de transmisión de datos y sensibilidad [1]

Velocidad de transmisión de datos (Mbps)	Sensibilidad (dBm)
6	-82
9	-81
12	-79
18	-77
24	-74
36	-70
48	-66
54	-65

2.3.2. Relación Señal a Ruido

La Relación Señal a Ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*) es un valor en decibeles (dB) del nivel de potencia de la señal con relación al nivel de potencia de ruido. Cuando este valor es positivo, indica que el nivel de potencia de la señal está por encima del nivel de potencia del ruido, y cuando la SNR es negativa, indica que el nivel de potencia del ruido es mayor que el nivel de potencia de la señal.

Un sistema de comunicaciones inalámbrico ideal es aquel que no introduce ruido, sin embargo, en un entorno real está presente el ruido, ya sea en menor o mayor proporción y una de las formas para analizar su efecto es calcular la SNR, la cual ofrece una idea de la calidad del enlace de comunicaciones.

La potencia de ruido a la salida del receptor está dada por la ecuación 2.8 y depende de la potencia de ruido a la entrada del receptor, este valor se asume teniendo en cuenta la sensibilidad del receptor [12].

$$P_n = P'_n + NF \quad (2.8)$$

Donde:

¹⁰ La figura de ruido del receptor está definida como la relación señal a ruido a la entrada del receptor sobre la relación señal a ruido a la salida del receptor.

¹¹ El margen de implementación es agregado para considerar la degradación introducida por el procesamiento no ideal de la señal.

$P_n[dBm]$: Potencia de ruido a la salida del receptor.
 $P'_n[dBm]$: Potencia de ruido a la entrada del receptor.
 $NF[dB]$: Figura de ruido.

Por lo tanto, la SNR se define mediante la ecuación 2.9

$$SNR = Prx - P_n \quad (2.9)$$

Considerando la degradación debida al procesamiento no ideal de la señal en el receptor se agrega a la SNR el IM, como se muestra en la ecuación 2.10

$$SNR_{Req} = SNR - IM \quad (2.10)$$

Donde:

$SNR_{Req}[dB]$: SNR requerida.
 $IM[dB]$: Margen de implementación.

2.3.3. Relación Señal a Interferencia

La interferencia electromagnética es una señal o emisión radiada en el espacio, producida por dispositivos eléctricos o electrónicos que alteran el normal funcionamiento de un sistema de comunicaciones, afectando su desempeño al modificar las magnitudes del campo eléctrico o magnético de la señal deseada [36] [37] [38]. En sistemas de comunicaciones, esto ocurre cuando coinciden en frecuencia tiempo y espacio dos o más señales, o cuando un sistema genera señales no deseadas fuera de su banda de operación y estas coinciden con la bandas de operación de otros sistemas.

La potencia de la señal interferente pi_{rx} se describe mediante la combinación de distintas fuentes que están radiando. La interferencia total que se presenta en el receptor es descrita por la ecuación 2.11.

$$pi_{rx} = \sum_{i=1}^I \frac{ptxi * g_{rx} * g_{txi}}{l_n} \quad (2.11)$$

Donde:

$ptxi[W]$: Potencia de transmisión de la n-ésima fuente interferente.
 g_{txi} : Ganancia de la antena transmisora de la n-ésima fuente interferente.
 l_n : Pérdidas de propagación.
 $pi_{rx}[W]$: Potencia total de la señal interferente recibida en el receptor.

Por lo tanto, la Relación Señal a Interferencia (SIR, *Signal to Interference Ratio*) expresada en veces, se entiende como la razón entre la potencia de la señal deseada y la potencia de la señal interferente como se muestra mediante la ecuación 2.12.

$$SIR = \frac{prx}{pi_{rx}} \quad (2.12)$$

2.3.4. Estabilidad en Frecuencia Frente a la Temperatura

La estabilidad en frecuencia frente a la temperatura se refiere a la habilidad de un oscilador para permanecer en una frecuencia fija ante cambios de temperatura y es de gran importancia en los sistemas de comunicaciones vía radio para un óptimo proceso de traslado en frecuencia desde una señal en banda base a radiofrecuencia y viceversa, puesto que de un óptimo funcionamiento del oscilador depende que los datos modulados lleguen adecuadamente y puedan ser demodulados en el receptor, por lo tanto, se requiere que los osciladores del transmisor y del receptor trabajen a una determinada frecuencia sin desplazamientos, esto puede lograrse mediante cristales compensados ante cambios de temperatura..

La frecuencia de trabajo de un cristal es influenciada por su temperatura de operación. La relación entre la magnitud del cambio en la frecuencia Δf y el cambio en la temperatura ΔC se conoce como coeficiente de temperatura, esto se muestra en la ecuación 2.13.

$$\Delta f = k_T(fn * \Delta C) \quad (2.13)$$

Dónde:

Δf [Hz]: Variación en la frecuencia.
 k_T [Hz/MHz°C]: Coeficiente de temperatura.
 fn [MHz]: Frecuencia natural del cristal.
 ΔC [°C]: Variación en la temperatura.

2.3.5. Tasa de Error de Bits

La Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*) es uno de los parámetros más importantes en el análisis de cualquier sistema de comunicaciones digital, puesto que permite determinar el desempeño del sistema y se define como la probabilidad de que un bit transmitido sea recibido con error, es decir, la BER se expresa de acuerdo con el número de errores presentes en la transmisión, como lo indica la ecuación 2.14.

$$BER = \frac{\text{Número Total de Bits Errados}}{\text{Número Total de Bits Transmitidos}} \quad (2.14)$$

La medida de la BER depende de los factores que inciden sobre la señal transmitida en el canal de comunicaciones, algunos de estos son: las pérdidas de espacio libre, la interferencia de otros sistemas de comunicaciones y multitrayectoria.

La mayoría de dispositivos basados en el estándar IEEE 802.11g no presentan un reporte de errores por bits, en su lugar despliega la PER, la cual se define como la razón entre el número de paquetes recibidos con errores y el número de paquetes transmitidos, como lo muestra la ecuación 2.15.

$$PER = \frac{\text{Número de Paquetes Errados}}{\text{Número de Paquetes Transmitidos}} \quad (2.15)$$

Si los errores en los bits son eventos independientes distribuidos, entonces existe una relación entre la tasa de error de paquete, la tasa de error de bit y el número de bits por paquete.

Si se considera que la BER es la probabilidad de bit errado, entonces la probabilidad de bit exitoso es igual a $1 - BER$. Dado que un paquete de datos contiene n_p bits, la probabilidad de un paquete exitoso es $(1 - BER)^{n_p}$, y por lo tanto, la probabilidad de un paquete errado es $1 - (1 - BER)^{n_p}$ [39] como se define en la ecuación 2.16.

$$PER = 1 - (1 - BER)^{n_p} \quad (2.16)$$

Donde n_p es el número de bits en un paquete¹².

Despejando de la ecuación 2.16, se obtiene la BER en términos de la PER como lo indica la ecuación 2.17.

$$BER = 1 - (1 - PER)^{1/n_p} \quad (2.17)$$

2.3.6. Ancho de Banda

El ancho de banda se define como el rango de frecuencias en el que se concentra la mayor parte de la potencia de la señal y se define mediante la ecuación 2.18.

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (2.18)$$

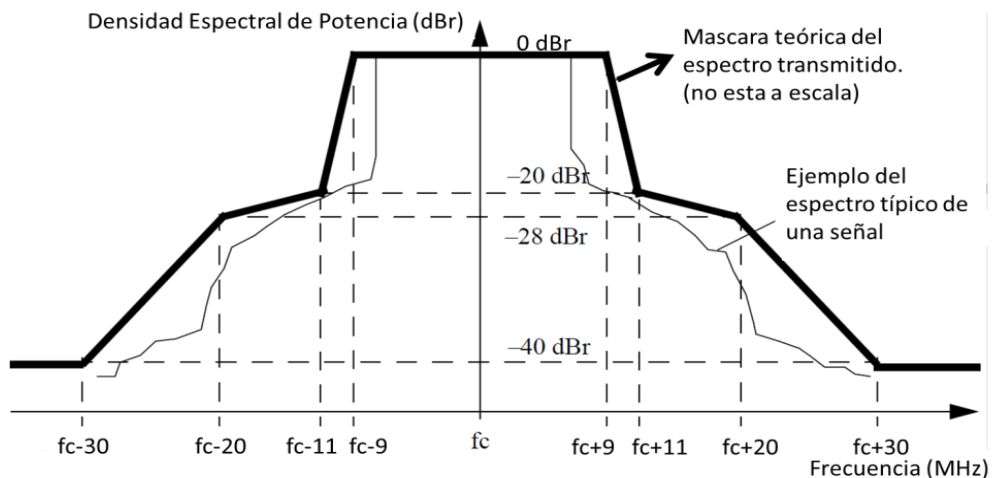
Donde:

f_1 : Frecuencia Inferior del ancho de banda de la señal.

f_2 : Límite superior del ancho de banda.

De acuerdo con el estándar IEEE 802.11g, la máscara espectral de una señal electromagnética transmitida debe estar contenida dentro de los siguientes límites: a 0 dBr¹³ un ancho de banda menor a 18 MHz, a -20 dBr un ancho de banda menor a 22 MHz, a -28 dBr un ancho de banda menor a 40 MHz y a -40 dBr un ancho de banda de 60 MHz, como se muestra en la figura 2.4.

Figura 2.4. Densidad espectral transmitida [1]



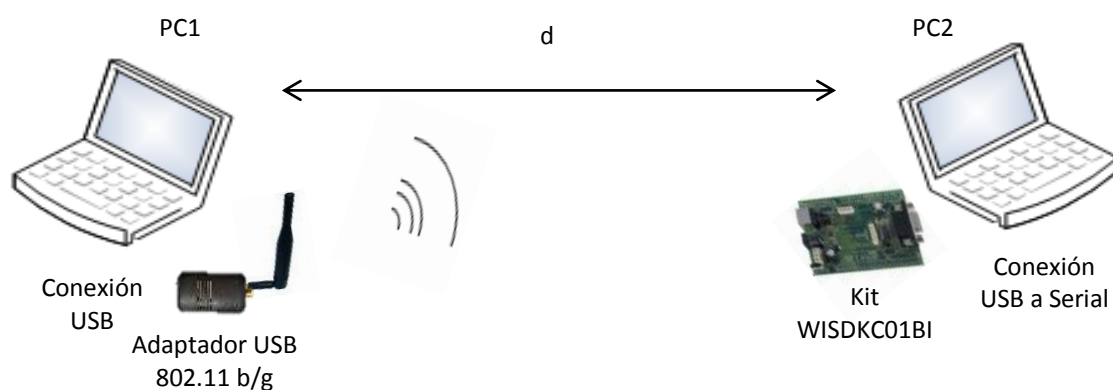
¹² Para el caso de una trama IEEE 802.11g, este valor asciende a 1502 bytes (12016 bits).

¹³ dBm: dBm relativos al máximo valor de la densidad espectral de potencia.

2.4. PLAN DE PRUEBAS

El plan de pruebas tiene en cuenta los escenarios descritos en la sección 2.1 y los parámetros de desempeño descritos en la sección 2.3. En la presente sección se describen los procedimientos establecidos para la obtención de los parámetros que definen el desempeño a físico del sistema de comunicaciones punto a punto basado en el estándar IEEE 802.11g. Para ello se implementó un sistema de comunicaciones basado en el estándar IEEE 802.11g en el modo de conexión Ad-Hoc. En el transmisor se utilizará el adaptador USB 802.11b/g de referencia QP-W2410USB y en el receptor el kit de evaluación y desarrollo de referencia WISDK01BI-02¹⁴, cada uno es conectado a un computador donde se ejecutó su respectivo software de control. En la figura 2.5 se representa el sistema de comunicaciones que se utilizó para las pruebas experimentales en los escenarios de interiores, exteriores y ante interferencia.

Figura 2.5. Sistema de comunicaciones implementado.



2.4.1. Medición de Potencia de Recepción, Relación Señal a Ruido y Cobertura

Para la medida de la potencia de recepción en los escenarios descritos en la sección 2.1, se empleó el adaptador USB 802.11b/g de referencia QP-W2410USB como transmisor, cuyas características técnicas se muestran en la tabla 2.6. Con este adaptador y el kit WISDK01BI-02, se creó una red bajo el estándar IEEE 802.11g en modo Ad-Hoc, luego se ejecutó sobre el kit WISDK01BI-02 un código fuente¹⁵, el cual permite obtener la medida del RSSI de la señal.

En el escenario de interiores se estudiaron los dos casos de evaluación mencionados en la sección 2.1.2. En el primer caso, el transmisor y receptor se ubicarán a 70 centímetros de altura del piso, la distancia entre ellos tomó valores entre 3 - 51 metros con incrementos constantes de 3 metros. Las medidas se realizaron en el canal 1 a una frecuencia central de 2.412 GHz, este canal fue liberado de otras redes con el propósito de evitar interferencia y errores en las medidas. El escenario planteado para el primer caso se muestra en la figura 2.6.

¹⁴ Los aspectos generales y de operación del kit WISDK01BI-02 se describen en el Anexo A.

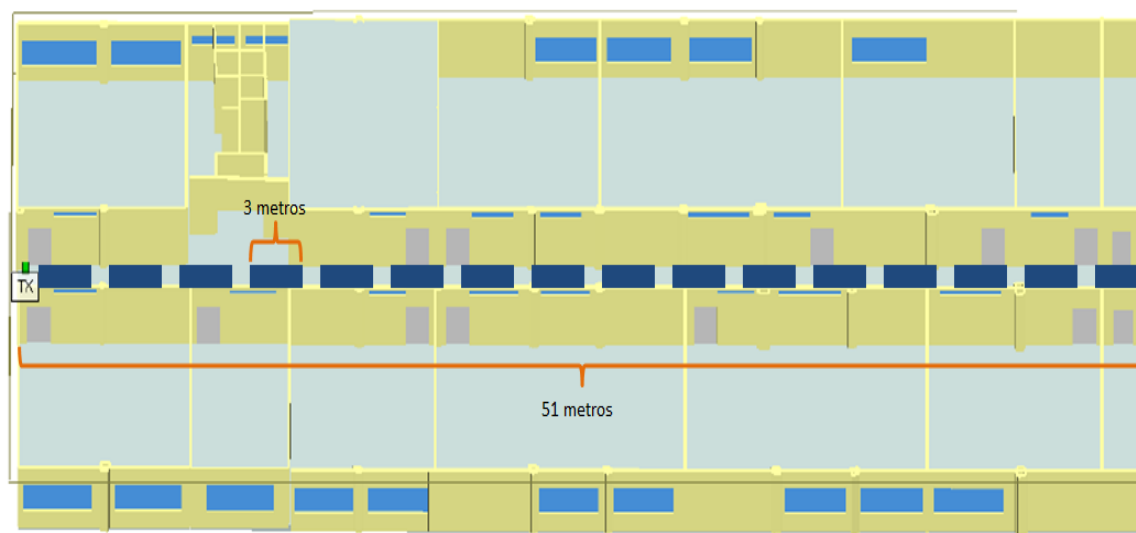
¹⁵ El código fuente se encuentra en el anexo C (Adicionado digitalmente)

Tabla 2.6. Características técnicas del adaptador USB 802.11b/g

QP-W2410USB Adaptador USB 802.11b/g	
Controlador	Realtek RTL 8187 ¹⁶
Estándares soportados	802.11b/g
Rango de frecuencia	2.412 GHz -2.472 GHz (13 canales)
Técnicas de Transmisión	OFDM, DSSS
Protocolo de Acceso al Medio	CSMA/CA ¹⁷
Potencia de Transmisión	0 - 15 dBm
Velocidades de Transmisión de datos Soportada	54, 48, 36, 24, 18, 12, 9 y 6 Mbps
Sensibilidad	54Mbps: -68 dBm 11Mbps: -80 dBm
Modo de Red	Ad-Hoc e Infraestructura
Sistemas Operativos Soportados	Windows 98/SE/ME/2000/XP/Vista/7 Mac SO 10.3/10.4 Linux Kernel 2.6.x

En el segundo caso, los puntos de recepción fueron ubicados de tal forma que el transmisor y receptor no estaban en línea de vista. La figura 2.7, muestra la ubicación de los puntos donde se tomaron las medidas.

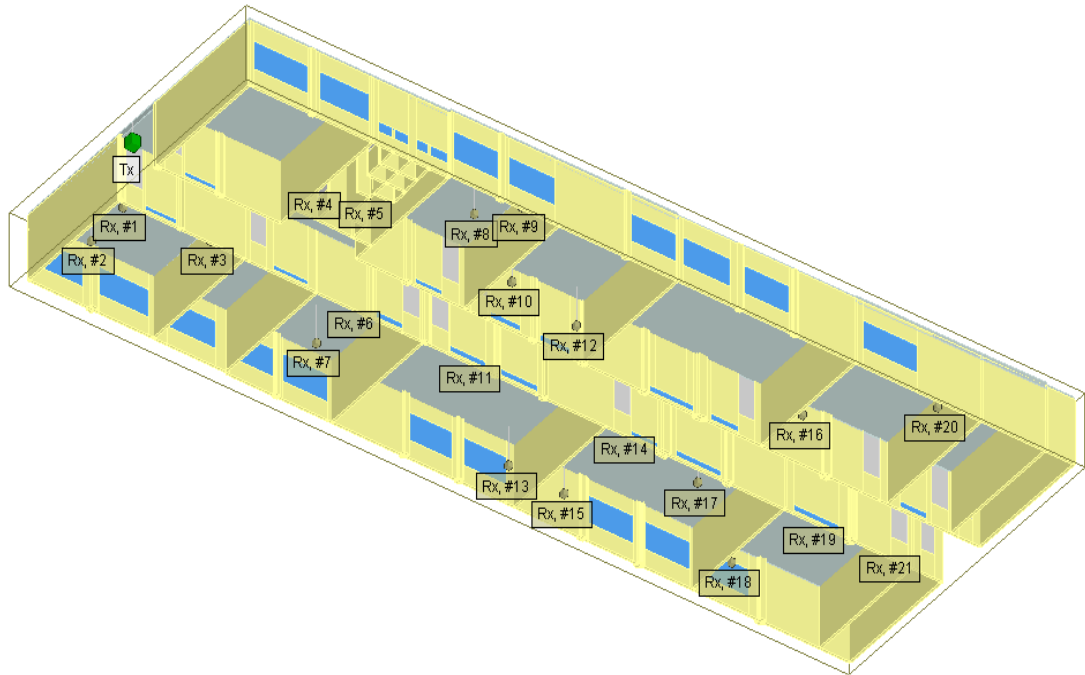
Figura 2.6 Mediciones sobre el trayecto con LOS



¹⁶ El controlador Realtek RTL 8187 en un sistema operativo basado en Linux permite modificar manualmente la potencia y velocidad de transmisión.

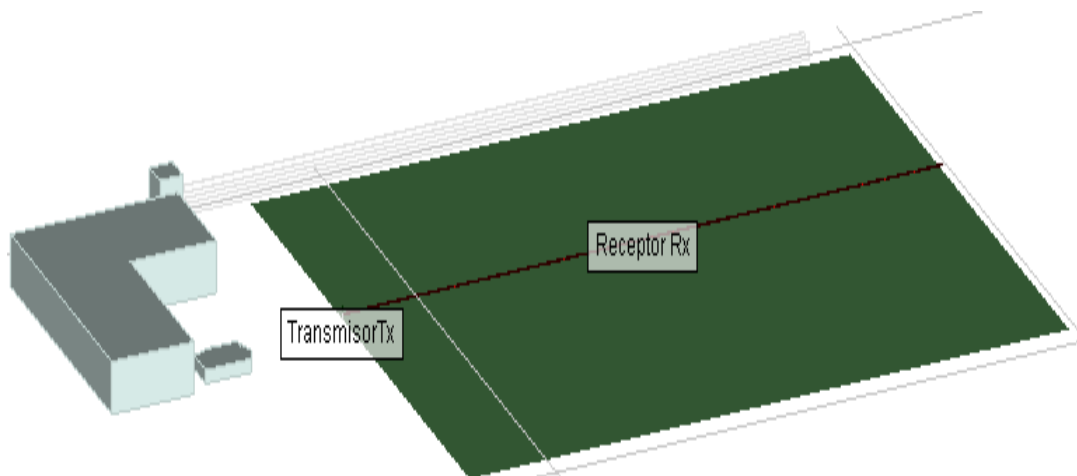
¹⁷ Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisiones (CSMA/CA, *Carrier Sense Multiple Access, Collision Avoidance*)

Figura 2.7 Ubicación puntual de receptores [24]



En el escenario de exteriores, el sistema se ubicó sobre la cancha de fútbol del escenario descrito en la sección 2.1.3. El transmisor y el receptor se ubicaron a 1 metro de altura del piso, la distancia entre ellos tomó valores entre 5 - 105 metros con incrementos constantes de 5 metros. En estos términos, las medidas se realizan en puntos sobre una línea recta, tal como se indica en la figura 2.8.

Figura 2.8. Mediciones sobre el trayecto con LOS para el escenario exterior



2.4.2. Medición de la Tasa de Error de Bits

El objetivo de esta medición es determinar el desempeño en relación a la SNR. En el desarrollo de este trabajo de grado, esta medición se limitó al uso de la tasa de codificación de 3/4 y las modulaciones BPSK, QPSK, 16-QAM Y 64-QAM para establecer su influencia sobre el desempeño del sistema de comunicaciones. Adicionalmente, se comparó el efecto de la utilización de las tasas de codificación 2/3 y 3/4 para una modulación 64 QAM, puesto que este es uno de los casos más vulnerables al ruido que puede presentarse en el sistema. La tabla 2.7 muestra las modulaciones y las tasas de codificación asociadas a una velocidad de transmisión datos, que se utilizaran para el análisis de la BER.

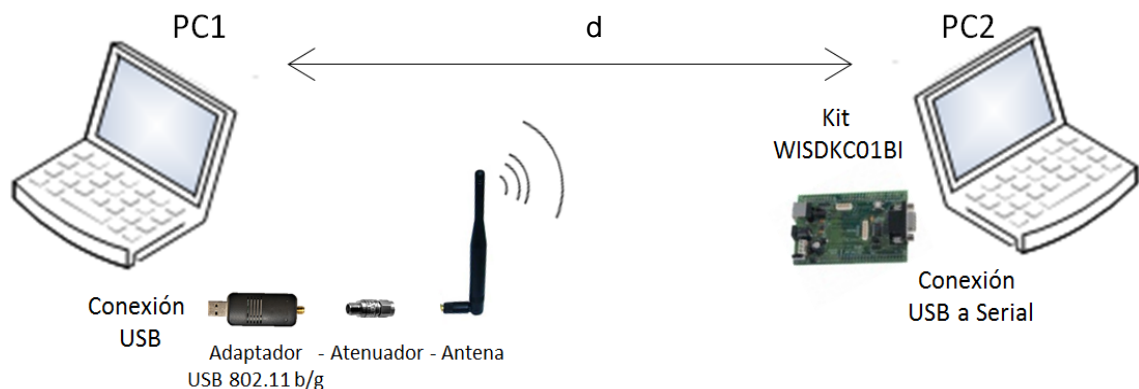
Tabla 2.7. Velocidades de transmisión seleccionadas

Velocidad de transmisión (Mbps)	Modulación	Tasa de codificación
9	BPSK	3/4
18	QPSK	3/4
36	16 QAM	3/4
48	64 QAM	2/3
54	64 QAM	3/4

Debido a que el estándar IEEE 802.11g es compatible con las velocidades definidas por el estándar IEEE 802.11b, se realizó un análisis de la BER para la modulación CCK a 11 Mbps.

Para lograr la variación de la SNR fue conveniente cambiar la potencia de transmisión con la ayuda de atenuadores de señal, lo que implicó un cambio directo en la potencia de recepción y permitió mantener estables las condiciones de propagación de la señal entre las medidas. Otra opción es cambiar la distancia entre el transmisor y el receptor, sin embargo, debido a los efectos de multitrayectoria, esta opción no asegura un cambio controlado en el nivel de potencia recibido. En la figura 2.9 se muestra un esquema del sistema planteado para la medición de la BER.

Figura 2.9. Esquema del sistema implementado para la medición de la BER



La medida de la BER se realizó en los escenarios descritos en la sección 2.1.1, los dispositivos se ubicaron a 70 centímetros de altura del piso, en condiciones de línea de vista y el sistema operó en canal 1 del estándar IEEE 802.11g

Según la ecuación 2.17 la medida de la BER se puede obtener a partir de la PER. Para establecer el valor de la PER, se adaptó el proceso presentado en [40], el cual consta de 5 pasos que se describen a continuación:

1. Se establece una conexión Ad-Hoc entre el kit WISDK01BI-02 y el adaptador USB 802.11b/g.

En este paso, se estableció la conexión mediante las herramientas ofrecidas por Wifiway¹⁸ para el adaptador USB 802.11b/g.

2. Se transmiten un paquete IP¹⁹ desde el adaptador USB 802.11b/g hacia el kit WISDK01BI-02.

En este paso, se estableció una conexión TCP/IP, y desde la consola de línea comandos de Wifiway, se ejecutó el comando:

```
netcat [IP de destino] [puerto] < / [Ruta y nombre del archivo]
```

Donde el archivo es un documento de texto que contiene secuencias de letras y números.

3. Se evalúa el Acuse de Recibo (*Acknowledgment*), si este no es recibido o es negativo (*Negative Acknowledgment*) significa que el paquete de datos no llegó a su destino, presentó errores o llegó fuera de secuencia y debe ser retransmitido, de lo contrario se establece que el paquete llegó correctamente.

En este paso, se utilizó el analizador de protocolos Wireshark²⁰, el cual ofrece información detallada de los datos que fluyen por una red, permitiendo inspeccionar paquetes en redes cableadas e inalámbricas del nivel de enlace de datos o superior. La sentencia que permitió filtrar la cantidad de paquetes erróneos fue:

```
tcp.analysis.retransmissions or tcp.analysis.out_of_order && ip.src == [IP de origen]
```

4. Se repiten los pasos 2 y 3 un número predeterminado de veces.

En este paso, se determinó el número de paquetes a transmitir mediante la realización de múltiples pruebas en los dos escenarios. En estas pruebas se realizaron transmisiones de: 100, 200, 400, 500, 800, 1000, 2000, 4000, 8000, 10000 y 16000 paquetes en iguales condiciones de propagación y se determinó la PER en cada caso. Como resultado de esta prueba se obtuvo que en transmisiones a partir de 1000 paquetes la PER presentó valores similares, por tanto, para minimizar el tiempo de ejecución en cada prueba se definió un número de paquetes igual a 1000. Esta prueba se repitió 5 veces para mayor confiabilidad en los resultados.

¹⁸ Wifiway es una distribución del sistema operativo Linux, que fue diseñado y adaptado para auditorías en seguridad en redes inalámbricas.

¹⁹ IP, Protocolo de Internet.

²⁰ <http://www.wireshark.org/>

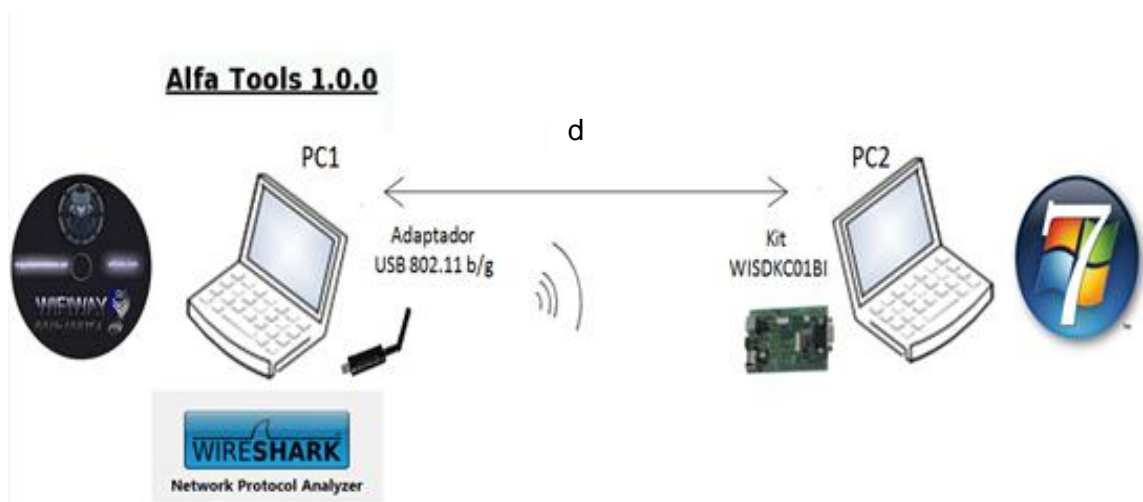
5. Se establece la PER con base en el número de paquetes de datos erróneos el número total de paquetes transmitidos en el paso 2.
6. En este paso, se relaciona la cantidad de paquetes erróneos detectados en el paso 3, con cantidad total de paquetes transmitidos, esta última se obtiene con ayuda de la herramienta Wireshark por medio del filtro:

ip.src == [IP de origen]

En el lado del receptor, el kit WISDK01BI-02 es monitoreado y controlado desde la aplicación UwTerminal, ejecutada sobre el sistema operativo Windows 7, por medio de la cual se ejecutó un *script*²¹ que permite conectarse a la red creada en el paso 1 y recibir los datos enviados en el paso 2.

Un diagrama general de los elementos utilizado por el sistema se muestra en la figura 2.10.

Figura 2.10. Elementos utilizados en la medición de la BER



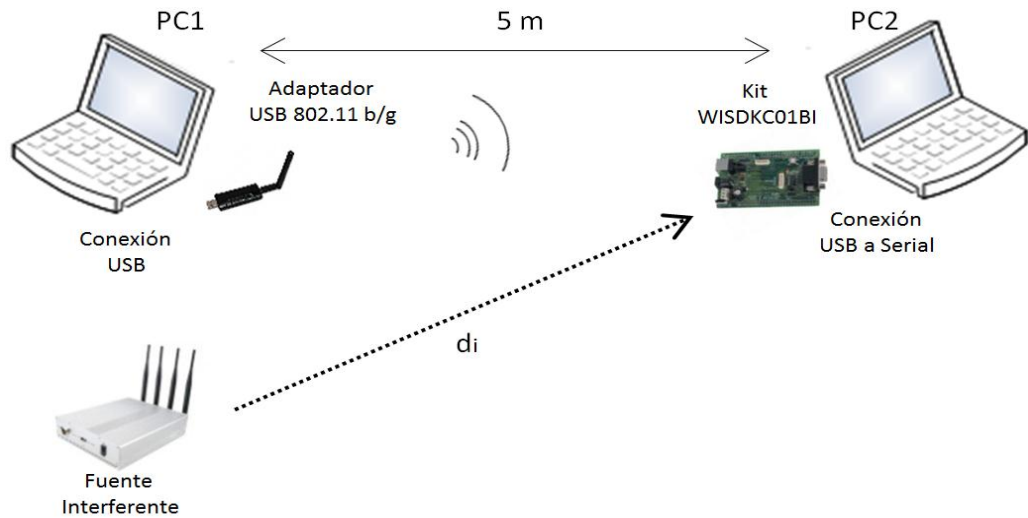
2.4.3. Medición de la BER en Condiciones de Interferencia

El objetivo de esta medición es determinar la BER en relación a la SIR, es decir determinar el desempeño del sistema de comunicaciones en condiciones de interferencia para cada modulación presentada en la tabla 2.7. La BER se midió mediante el proceso presentado en la sección 2.4.2 y la interferencia se generó por un *jammer*²² que emite una señal de 1 vatio y ocupa un ancho de banda de 100 MHz. El sistema se adecuó como se indica en la figura 2.11. Cinco niveles de potencia interferente fueron considerados y obtenidos mediante la variación de la distancia hacia el receptor, como se indica en la figura 2.11.

²¹ *Script*, es un conjunto de instrucciones almacenadas en un archivo de texto plano.

²² Jammer es también conocido como bloqueador de señal.

Figura 2.11. Montaje del sistema para evaluar el desempeño bajo condiciones de interferencia.



2.4.4. Medida de la Estabilidad en Frecuencia Frente a la Temperatura

El objetivo de esta medición es determinar la variación en frecuencia de la portadora respecto a la temperatura, para ello, se procedió a elevar la temperatura gradualmente por medio de la exposición a aire caliente generado por un termo-ventilador y con ayuda del analizador de espectro ZLV Rohde & Schwarz²³ se analizó la respuesta del oscilador del módulo inalámbrico del WISDK01BI-02, para los niveles de temperatura de 40 °C, 50 °C, 80 °C y 110 °C, los cuales fueron medidos con un termómetro infrarrojo.

²³ El analizador de espectro ZLV Rohde & Schwarz tiene funciones de analizador de redes vectorial, analizador de espectro y medidor de potencia. Opera en un rango de frecuencias de 9 kHz a 6 GHz.

3. OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo se enfoca en presentar la obtención y el análisis de los parámetros de desempeño de un sistema de comunicaciones punto a punto basado en el estándar IEEE 802.11g, propósito para el cual fue necesario la ejecución del plan de pruebas indicado en la sección 2.4 del capítulo 2.

En primer lugar se presentan los resultados de la potencia de recepción, la cual es comparada con las predicciones dadas por los modelos completo 3D y modelo de pendiente única, posteriormente, se presentan los resultados en cuanto a estabilidad en frecuencia frente a temperatura, en seguida se presentan los resultados del ancho de banda ocupado por la señal, luego se muestra los resultados de la potencia de transmisión. Finalmente se presenta la evaluación del desempeño del sistema de comunicaciones en cuanto a la BER en escenarios de interiores, exteriores y en condiciones de interferencia.

3.1. POTENCIA DE RECEPCIÓN

Para los escenarios planteados en la sección 2.4.2, se realizó la estimación de la potencia de recepción haciendo uso del modelo de propagación Completo 3D en la herramienta de simulación *Wireless Insite*®. En esta herramienta se configuraron los parámetros de simulación de acuerdo a las especificaciones del estándar IEEE 802.11g en cuanto a la frecuencia de operación, potencia de transmisión, ancho de banda, entre otros parámetros propios de los equipos que fueron utilizados para la medición experimental, tal como se indica en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Parámetros de simulación

Potencia de transmisión	15dBm
Frecuencia de operación	2.412 GHz
Número de canal	1
Ancho de banda del canal	22 MHz
Altura de antenas Tx- Rx	70 cm
Tipo de antenas	Isotrópica
Ganancia	2 dBi
Sensibilidad del receptor	-65 dBm
Temperatura	293k
Modelo de propagación	Completo 3D

Para la medida experimental de la potencia de recepción se obtuvo el valor del RSSI en cada punto determinado en el escenario, para ello se desarrolló un *script* que se ejecutó en el kit de evaluación y desarrollo de referencia WISDK01BI-02. El procedimiento para obtener las medidas de RSSI²⁴ es el siguiente: el script ordena buscar todas las redes existentes en su entorno y organizarlas en una matriz, luego se selecciona por medio del BSSID la red de interés para luego obtener y almacenar el valor de RSSI. Con el objetivo de encontrar un valor de RSSI confiable, este procedimiento se repite 50 veces, cuando se llega a la última medida se procede calcular el valor promedio. Los resultados de este procedimiento se muestran en la figura 3.1.

²⁴ La medida de RSSI se encuentra en un registro que tiene valores en el rango de 0 a 255.

Figura 3.1. Medida del valor de RSSI

```

UwTerminal v0.990 Beta
Terminal | Script | Config | About |
CTS DSR DCD RI RTS DTR BREAK LocalEcho LineMode Clear
[COM12:115200,N,8,1]
J: = 44
RSSI Instantaneo = 179
BSSID = Red_Adhoc
J: = 45
RSSI Instantaneo = 179
BSSID = Red_Adhoc
J: = 46
RSSI Instantaneo = 178
BSSID = Red_Adhoc
J: = 47
RSSI Instantaneo = 179
BSSID = Red_Adhoc
J: = 48
RSSI Instantaneo = 178
BSSID = Red_Adhoc
J: = 49
RSSI Instantaneo = 178
BSSID = Red_Adhoc
J: = 50
RSSI Promedio: = 179
    
```

Según la ecuación 2.6 existe una relación lineal entre los valores de RSSI y los niveles de potencia. Previamente se validó esta ecuación mediante medidas experimentales, para ello se midió el valor mínimo de RSSI detectado por el Kit WISDK01BI-02 equivalente a 173^{25} , este valor es asociado a su sensibilidad igual a -84 dBm. Además, se determinó que el valor de RSSI a un metro es de 235 y con el sensor de potencia R&S®NRP-Z22 incluido en el analizador de redes ZVL Rohde & Schwarz®, se encontró que el nivel de potencia a esta distancia es -21 dBm. La ecuación 3.1, relaciona los valores de RSSI y de potencia de recepción y la figura 3.2 muestra gráficamente esta relación.

$$m = (y2 - y1)/(x2 - x1) \tag{3.1}$$

Donde:

- m*: Pendiente de la relación entre la potencia y el RSSI.
- y2*: Sensibilidad del receptor.
- y1*: Valor de potencia medida a 1 metro.
- x2*: Valor mínimo de RSSI medido.
- x1*: Valor de RSSI medido a 1 metro.

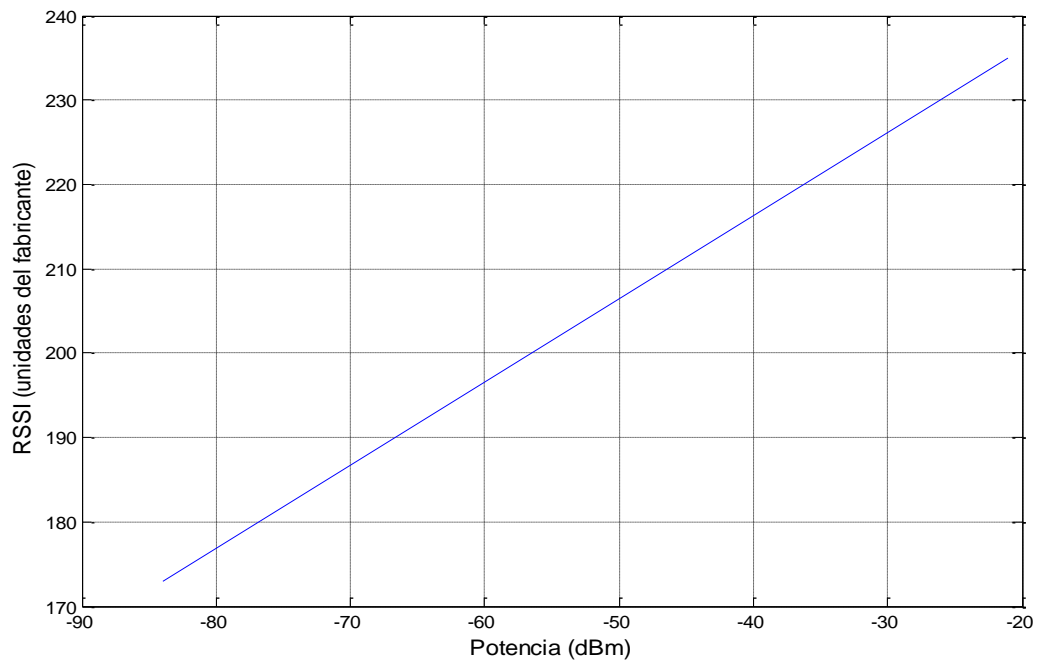
De la ecuación 3.1, se encuentra que la pendiente es aproximadamente 1, este valor indica que la variación de la potencia de recepción cambia en igual proporción al valor de RSSI, es decir un cambio en 1 del valor de RSSI implica un cambio en 1 dBm en el nivel de potencia recibida²⁶. Los niveles de potencia de recepción están relacionados con un RSSI a través de una constante que en este trabajo de grado se denomina RSSI de referencia ($RSSI_{ref}$). Esta constante puede ser calculada mediante la

²⁵ Los valores de RSSI se encuentran en unidades del fabricante.

²⁶ Algunos fabricantes presentan su propio método de conversión de valores de RSSI a potencia, debido a que esta conversión no está estandarizada.

ecuación 2.7, conociendo la potencia de recepción y el valor del RSSI en un mismo punto del escenario. Con la ayuda del analizador de redes ZVL Rohde & Schwarz® y su módulo medidor de potencia, se obtuvieron los valores de potencia de recepción a 1 metro de distancia. En este mismo punto se obtuvieron el valor de RSSI por medio del Kit WISDK01BI-02. El resultado de esta prueba determinó que el valor del RSSI de referencia es de -256, es decir que para encontrar un nivel de potencia conociendo el valor del RSSI se necesita únicamente restarle 256, lo cual concordó con la información suministrada por el fabricante.

Figura 3.2. Relación entre el RSSI y la potencia de recepción



En la estimación de la potencia de recepción por medio del modelo de pendiente única, se definió una distancia de referencia de 1 metro y con ayuda del analizador de redes se midió la potencia de recepción, la cual fue igual a -21 dBm. La potencia de transmisión y las ganancias de antena fueron tomadas de la tabla 3.1. Expresando la ecuación 2.2 en dB y despejando las pérdidas de propagación (l), se obtiene la ecuación 3.2

$$l = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - P_{Rx} \quad (3.2)$$

Por tanto la pérdida de propagación en la distancia de referencia para el modelo de propagación de pendiente única es de 40 dB, en cuanto al índice de propagación (n) fue seleccionado de la tabla 2.2.

3.1.1. Potencia de Recepción y Cobertura en el Escenario de Exteriores

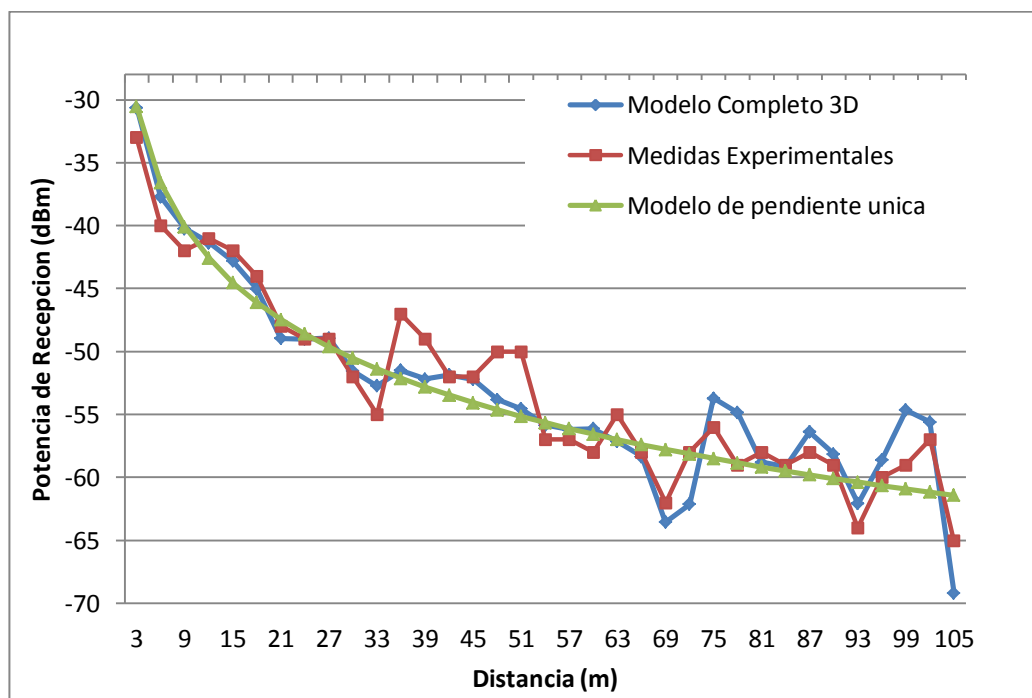
En la figura 3.3 se presentan los resultados del nivel de potencia obtenidos por medio de los modelos de propagación de pendiente única y completo 3D, así como los obtenidos a través de medidas experimentales para el escenario exterior planteado en la figura 2.9.

La curva de color verde de la figura 3.3, corresponde a las predicciones del nivel de potencia obtenidas por medio del modelo de pendiente única. Esta curva desciende logarímicamente en función de la distancia desde -34.54 dBm hasta -61.42 dBm en una distancia de 105 metros, con un factor $n=2$ que de acuerdo a la tabla 2.2, corresponde al índice de propagación de espacio libre.

La curva de color azul de la figura 3.3, corresponde a las predicciones obtenidas por medio del modelo completo 3D. En esta curva se observa que los niveles de potencia disminuyen logarímicamente respecto a la distancia, comienzan en -30,63 dBm y terminan en -69,19 dBm. Además, la curva presenta irregularidades. En la figura 3.3, se muestra que a pesar de ser un escenario exterior algunos obstáculos presentes generan multitrayecto, sin embargo, el efecto de este fenómeno es menos significativo que en los escenarios de interiores.

La curva de color rojo de la figura 3.3, corresponde a las medidas obtenidas experimentalmente en el escenario de exteriores, presentando una tendencia similar a la curva obtenida mediante el modelo de propagación completo 3D. Se observa que el nivel de potencia recibido a lo largo de la ruta de receptores tiene una relación inversamente proporcional con la distancia, obteniendo un valor inicial de potencia de -33 dBm y final de -64 dBm, es decir, se tiene que para los primeros metros existe un mayor nivel de potencia y a medida que el receptor se aleja, su nivel de potencia disminuye.

Figura 3.3. Potencia de recepción en el escenario de exteriores



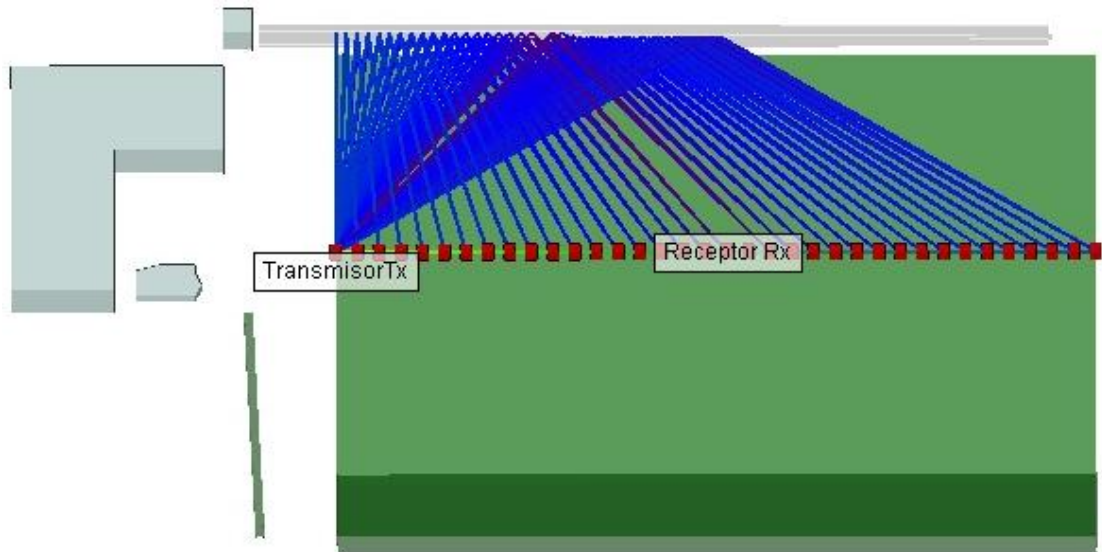
En las curvas de color rojo y azul de la figura 3.3 se observan desvanecimientos poco profundos, producidos principalmente por las ondulaciones del terreno, vegetación y algunas reflexiones presentadas sobre la gradería ubicadas en el costado superior del escenario mostrado en figura 3.4. Las curvas de la potencia de recepción obtenidas mediante el modelo de propagación completo 3D y las medidas obtenidas experimentalmente tiene la misma tendencia, con diferencia en los niveles de potencia

desde 0.1 a 4.55 dB; mientras que el modelo de propagación de pendiente única sobreestima el nivel de potencia recibida en la mayoría de los puntos, con una diferencia entre los niveles de potencia entre 0.57 y 6.7 dB respecto a las medidas experimentales. La tabla 3.2 Muestra los valores de potencia recibidos en cada punto del escenario de exteriores.

Tabla 3.2. Potencia de recepción en el escenario de exteriores

Distancia (m)	Medidas Experimentales (dBm)	Modelo Completo 3D (dBm)	Modelo de Pendiente Única (dBm)
3	-33	-30.63	-30.54
6	-40	-37.7	-36.56
9	-42	-40.23	-40.08
12	-41	-41.35	-42.58
15	-42	-42.8	-44.52
18	-44	-45.03	-46.11
21	-48	-48.96	-47.44
24	-49	-49.01	-48.6
27	-49	-48.93	-49.63
30	-52	-51.55	-50.54
33	-55	-52.73	-51.37
36	-47	-51.51	-52.13
39	-49	-52.18	-52.82
42	-52	-51.85	-53.46
45	-52	-52.21	-54.06
48	-50	-53.81	-54.62
51	-50	-54.55	-55.15
54	-57	-55.86	-55.65
57	-57	-56.21	-56.12
60	-58	-56.12	-56.56
63	-55	-57.14	-56.99
66	-58	-58.35	-57.39
69	-62	-63.54	-57.78
72	-58	-62.13	-58.15
75	-56	-53.71	-58.5
78	-59	-54.86	-58.84
81	-58	-58.79	-59.17
84	-59	-59.14	-59.49
87	-58	-56.37	-59.79
90	-59	-58.13	-60.08
93	-64	-62.09	-60.37
96	-60	-58.62	-60.65
99	-59	-54.66	-60.91
102	-57	-55.59	-61.17
105	-62	-69.19	-61.42

Figura 3.4. Multitrayectoria en el escenario de exteriores



El nivel de potencia recibido se considera una variable aleatoria, por tanto es necesario conocer la precisión de la estimación de potencia de los modelos de propagación respecto a las medidas experimentales. Para ello se calcula el error absoluto²⁷ y el error relativo²⁸ utilizando las ecuaciones 3.3 y 3.4

$$E_{Abs} = |P_{medida} - P_{estimada}| \quad (3.3)$$

$$E_{Rel} = \left| \frac{P_{medida} + P_{estimada}}{P_{medida}} \right| * 100 \quad (3.4)$$

Donde:

E_{Abs} [dB]:	Error absoluto.
E_{Rel} [%]:	Error relativo.
P_{medida} [dBm]:	Potencia medida experimentalmente.
$P_{estimada}$ [dBm]:	Potencia estimada por un modelo de propagación.

El Error Medio Relativo²⁹ (EMR), el Error Cuadrático Medio³⁰ (ECM) y la Desviación Estándar del Error (DEE) se pueden calcular mediante las ecuaciones 3.5, 3.6 y 3.7 respectivamente.

$$EMR = \frac{\sum_{i=1}^{Nr} E_{Rel}}{Nr} \quad (3.5)$$

²⁷ El error absoluto da una idea de que tan aproximado es la estimación respecto a valores reales.

²⁸ El error relativo es un índice de la precisión de la estimación respecto a valores reales.

²⁹ El error medio relativo identifica el porcentaje de variación que existe entre la estimación y los valores reales promedio.

³⁰ El error cuadrático medio proporciona una estimación del error que se está cometiendo en la estimación respecto a los valores reales.

$$ECM = \frac{\sum_{i=1}^{Nr} (P_{estimada} - P_{medida})^2}{Nr} \quad (3.6)$$

$$DEE = \sqrt{\sum_{i=1}^{Nr} \frac{\sum_{i=1}^{Nr} (P_{estimada} - P_{medida})^2}{Nr - 1}} \quad (3.7)$$

Donde:

Nr : Número de medidas.

El término P_{medida} equivale a la potencia medida experimentalmente. Es importante aclarar que este término no representa la media de los valores estimados de potencia de recepción, ya que de la desviación estándar de error no se mide respecto de la media, sino, que promedia las desviaciones de las estimaciones de potencia respecto a las medidas experimentales.

En la tabla 3.3 se muestran los valores de EMR, ECM y DEE para los modelos de propagación completo 3D y de pendiente única para el escenario de exteriores.

Tabla 3.3. Valores estadísticos de EMR, ECM y DEE en el escenario de exteriores

Modelo Completo 3D			Modelo de Pendiente Única		
Error Medio Relativo	Error Cuadrático Medio	Desviación Estándar del Error	Error Medio Relativo	Error Cuadrático Medio	Desviación Estándar del Error
3,49	5,37	2,32	4,18	6,65	2,62

Los resultados mostrados en las tablas 3.3 comprueban la confiabilidad en las predicciones obtenidas por medio del modelo completo 3D.

3.1.2. Potencia de Recepción y Cobertura en el Escenario de Interiores

De acuerdo al plan de pruebas, en la figura 3.5 se presentan los resultados del nivel de potencia obtenidos por medio de los modelos de propagación de pendiente única y completo 3D, así como los obtenidos a través de medidas experimentales para el caso de línea de vista entre el transmisor y el receptor en el escenario de interiores mostrado en la figura 2.7.

El modelo de pendiente única ofrece la forma más fácil de calcular el nivel medio de la potencia de recepción dentro de un edificio, sin tener conocimiento detallado de la distribución del mismo, por medio del cálculo de las pérdidas sobre el trayecto, las cuales se encuentran en decibelios y están en función de la distancia entre el transmisor y el receptor.

En la curva de color verde de la figura 3.5 se indica la potencia de recepción por medio del modelo de pendiente única, donde se observa que la potencia decae logarítmicamente desde -27.68 dBm hasta -44.14 dBm. El valor de la potencia

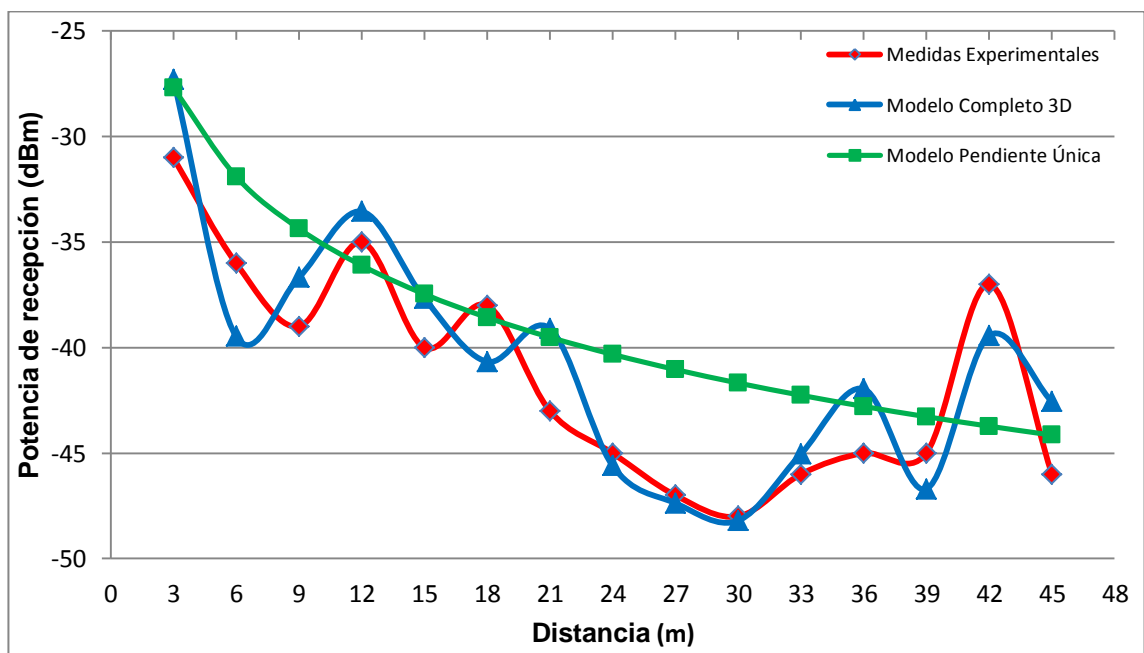
desciende en un índice de propagación $n = 1.4$, el cual, según la tabla 2.2 corresponde al índice de propagación sobre un corredor dentro de un edificio.

En las predicciones del nivel de potencia de recepción mediante el modelo de propagación completo 3D y su técnica de trazado de rayos SBR, se utilizó el simulador *Wireless InSite®*. Para el escenario planteado en la figura 2.7, se ubicó un transmisor al inicio del pasillo, una ruta de recepción en línea de vista con el transmisor y un área de estudio alrededor del escenario.

La curva de color azul de la figura 3.5, presenta los niveles de potencia de recepción obtenidos mediante el modelo de propagación Completo 3D, comienzan en -27.29 dBm y terminan en -42.57 dBm. Se observa que para las distancias entre 3 m y 45 m, que corresponde a la longitud del pasillo principal, los niveles de potencia tienen un comportamiento irregular, debido a que las señales experimentan los efectos de la interferencia constructiva y destructiva de la multitrayectoria, un ejemplo de esto se observa en el punto recepción ubicado a 42 metros, el cual a pesar de encontrarse a mayor distancia del transmisor recibe un mayor nivel de potencia que el punto de recepción ubicado a 24 metros.

Las medidas experimentales se presentan en la curva de color rojo de la figura 3.5. En general, los puntos que están más cerca del transmisor, captan los mayores niveles de potencia, a excepción de las medidas tomadas al final del pasillo donde se observa un incremento en el nivel de potencia.

Figura 3.5. Potencia de recepción en el escenario de interiores - LOS



En la figura 3.5 se observa que las curvas de la potencia de recepción obtenidas mediante el modelo de propagación completo 3D y las medidas obtenidas experimentalmente tienen la misma tendencia, con diferencia en los niveles de potencia entre 0.2 y 3.71 dB; mientras que, el modelo de propagación de pendiente única sobreestima el nivel de potencia recibida en la mayoría de los puntos, con una diferencia entre los niveles de potencia entre 0.57 y 6.7 dB respecto a las medidas experimentales. El modelo de pendiente única tiende a ser aproximado al valor

promedio, dado que no tiene en cuenta el efecto de la multitrayectoria. La tabla 3.4 muestra los valores de potencia recibidos en cada punto del escenario con LOS.

En el segundo caso de estudio del escenario de interiores, se evaluó la potencia de recepción en puntos sin línea de vista con el transmisor. La figura 2.8, presenta los puntos de recepción seleccionados aleatoriamente, los resultados de esta prueba se muestran en la figura 3.6. Es importante resaltar que esta figura no ofrece una tendencia respecto a la distancia, pero si una comparación entre las medidas experimentales y los modelos de estimación en un punto determinado del escenario. El valor del índice de propagación utilizado en las predicciones con el modelo de pendiente única fue de $n = 3.5$, cuyo valor tomado de la tabla 2.2.

Tabla 3.4. Potencia de recepción en el escenario de interiores- LOS

Distancia (m)	Medidas Experimentales (dBm)	Modelo Completo 3D (dBm)	Modelo de Pendiente Única (dBm)
3	-31	-27.29	-27.68
6	-36	-39.47	-31.89
9	-39	-36.68	-34.36
12	-35	-33.55	-36.11
15	-40	-37.67	-37.47
18	-38	-40.67	-38.57
21	-43	-39.1	-39.51
24	-45	-45.6	-40.32
27	-47	-47.37	-41.04
30	-48	-48.2	-41.68
33	-46	-45.04	-42.26
36	-45	-41.96	-42.79
39	-45	-46.7	-43.27
42	-37	-39.43	-43.73
45	-46	-42.57	-44.14

En la figura 3.6, se observa que la diferencia entre los niveles de potencia de recepción obtenidos mediante el modelo de propagación completo 3D y las medidas experimentales oscilan entre 0.12 y 6.24 dB; mientras que para el modelo de propagación de pendiente única presenta una diferencia en los niveles de potencia entre 1.04 y 9.68 dB con respecto a las medidas experimentales. Esta diferencia es más amplia con respecto al rango presentado en el escenario de interiores con línea de vista, dado que el escenario interior NLOS, el rayo directo se encuentra bloqueado por paredes, pisos u otros objetos, en cuyo caso la señal llega al receptor a través de múltiples trayectos, por tanto la gran variabilidad del entorno puede dar lugar a diferencias importantes de estimación. La tabla 3.5 muestra los valores de potencia recibida en cada punto del escenario NLOS.

Figura 3.6. Potencia de recepción en el escenario de interiores - NLOS

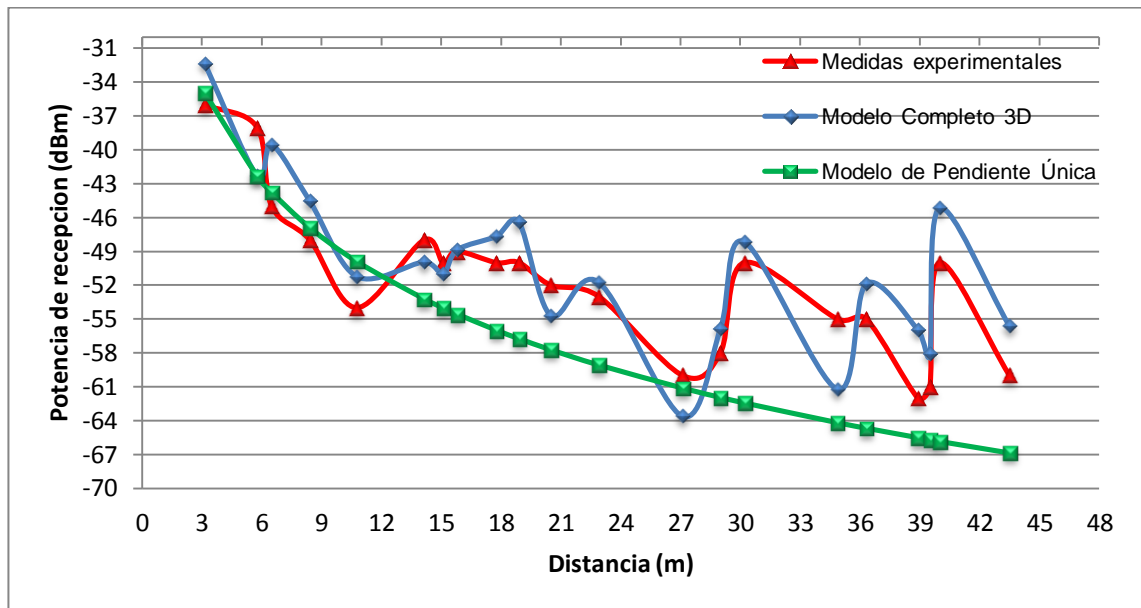


Tabla 3.5. Potencia de recepción en el escenario de interiores con NLOS

Numero de Receptor	Distancia (m)	Medidas experimentales (dBm)	Modelo Completo 3D (dBm)	Modelo de Pendiente Única (dBm)
1	3,15	-36	-32,34	-34,9526955
2	5,77	-38	-42,3	-42,3129228
3	6,5	-45	-39,54	-43,761574
4	8,42	-48	-44,56	-46,9087386
5	10,77	-54	-51,23	-49,9020397
6	14,13	-48	-49,96	-53,2039805
7	15,1	-50	-51	-54,0113545
8	15,8	-49	-48,88	-54,5623984
9	17,76	-50	-47,68	-55,9844029
10	18,9	-50	-46,43	-56,7409305
11	20,5	-52	-54,69	-57,7291081
12	22,9	-53	-51,74	-59,0753935
13	27,1	-60	-63,63	-61,1231401
14	29	-58	-55,88	-61,9471439
15	30,2	-56	-48,16	-62,4401944
16	34,87	-55	-61,24	-64,1886545
17	36,32	-55	-51,86	-64,6840835
18	38,9	-62	-55,95	-65,5185888
19	39,5	-61	-58,12	-65,7047187
20	40	-50	-45,16	-65,8576798
21	43,49	-60	-55,62	-66,8749034

Con el objetivo de visualizar las variaciones del nivel de potencia, sobre la herramienta de simulación *Wireless InSite®* se ubicaron receptores a una distancia entre ellos del orden de la longitud de onda (λ) de la señal transmitida. En esta prueba se ubicaron 5 receptores por cada λ , para tal propósito se calculó la longitud de onda, mediante la ecuación 3.3

$$\lambda = c/f \quad (3.3)$$

Donde:

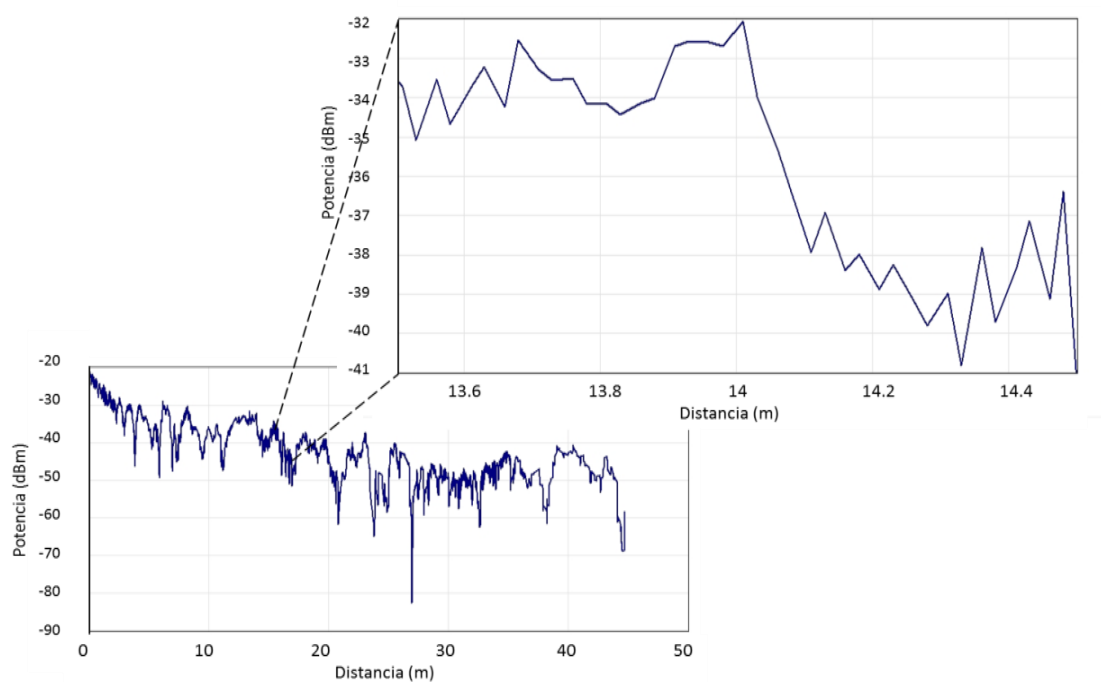
c [m/s]: Velocidad de la luz.
 f [MHz]: Frecuencia de operación.

A partir de los datos proporcionados por la tabla 3.1, se obtuvo para una frecuencia igual a 2412 MHz una longitud de onda de 0.124 m.

En resultados proporcionados por el modelo completo 3D, se nota que las variaciones de potencia en los escenarios de interiores en un intervalo pequeño de distancia son altas.

Un ejemplo de esto se muestra en la figura 3.7 donde se observa que la variación del nivel de potencia para un intervalo de distancia menor a 1 metro es de 9 dB, estas variaciones pueden tener una pendiente negativa o positiva, lo que explica cambios pronunciados de la pendiente en las curvas de color rojo y azul correspondiente a las medidas experimentales y al modelo completo 3D respectivamente de las figuras 3.5 y 3.6.

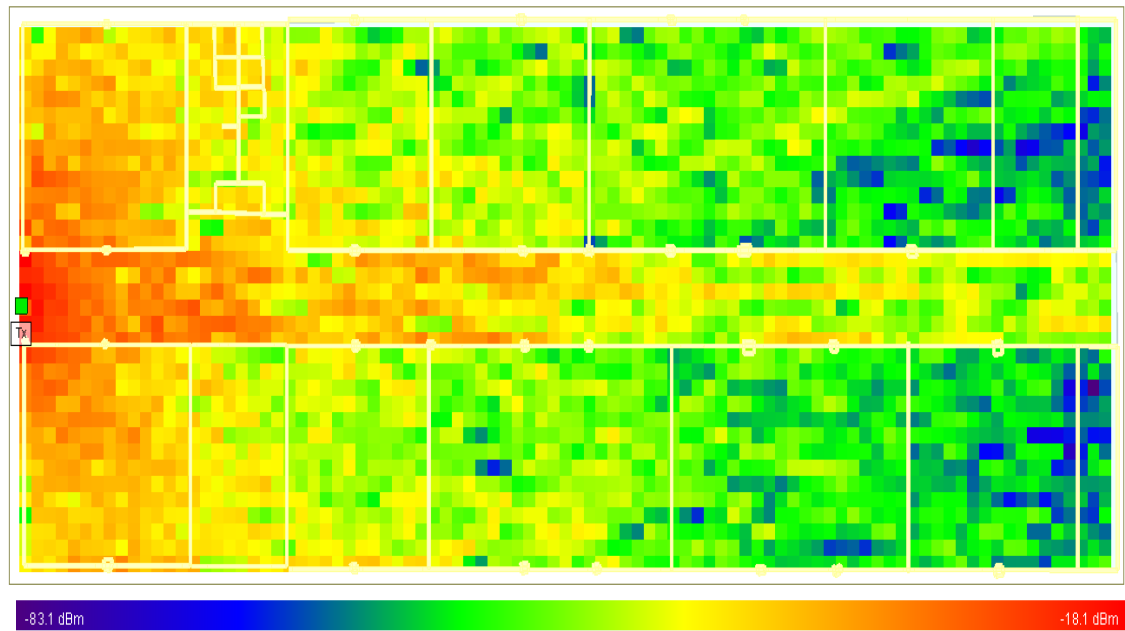
Figura 3.7. Variación de la potencia de recepción en un intervalo de 1 metro de distancia



En este trabajo de grado se evaluó la cobertura del sistema de comunicaciones en el escenario de interiores por medio de la herramienta de simulación *Wireless InSite®*

con el modelo de propagación Completo 3D. Se configuró una grilla de recepción de 3094 puntos, con puntos de recepción separados entre sí 0.5 metros. La figura 3.8, muestra la cobertura dentro del escenario de interiores, donde los niveles de potencia de recepción se representan por la barra de colores que está en la parte inferior. Se nota el efecto de la multitrayectoria, cuando dos puntos recepción ubicados a las misma distancia del transmisor, no obligatoriamente tienen el mismo nivel de potencia de recepción, también se aprecia que existen puntos de recepción cercanos al transmisor que tienen un nivel de potencia menor que otros que se encuentra más lejanos.

Figura 3.8. Cobertura en el escenario interior



En las tablas 3.6 y 3.7 se muestran los datos de error absoluto y error relativo obtenidos para el escenario de interiores con línea de vista y sin línea de vista respectivamente.

Tabla 3.6. Error relativo y error absoluto de los modelos de propagación en el escenario de interiores con LOS

Distancia (m)	Modelo Completo 3D		Modelo de Pendiente Única	
	Error Absoluto (dB)	Error Relativo [%]	Error Absoluto (dB)	Error Relativo (%)
3	3.71	11.97	3.32	10.71
6	3.47	9.64	4.11	11.41
9	2.32	5.95	4.64	11.9
12	1.45	4.14	1.11	3.17
15	2.33	5.83	2.53	6.34
18	2.67	7.03	0.57	1.51
21	3.9	9.07	3.49	8.11

Tabla 3.6. Error relativo y error absoluto de los modelos de propagación en el escenario de interiores con LOS. (continuación)

Distancia (m)	Modelo Completo 3D		Modelo de Pendiente Única	
	Error Absoluto (dB)	Error Relativo [%]	Error Absoluto (dB)	Error Relativo (%)
24	0.6	1.33	4.68	10.39
27	0.37	0.79	5.96	12.68
30	0.2	0.42	6.32	13.17
33	0.96	2.09	3.74	8.13
36	3.04	6.76	2.21	4.92
39	1.7	3.78	1.73	3.83
42	2.43	6.57	6.73	18.18
45	3.43	7.46	1.86	4.03

Tabla 3.7. Error relativo y error absoluto de los modelos de propagación en el escenario de interiores de con NLOS

Distancia (m)	Modelo Completo 3D		Modelo de Pendiente Única	
	Error Absoluto (dB)	Error Relativo (%)	Error Absoluto (dB)	Error Relativo (%)
3,15	3,66	10,17	1,05	2,91
5,77	4,3	11,32	4,31	11,35
6,5	5,46	12,13	1,24	2,75
8,42	3,44	7,17	1,09	2,27
10,77	2,77	5,13	4,10	7,59
14,13	1,96	4,08	5,20	10,84
15,1	1	2,00	4,01	8,02
15,8	0,12	0,24	5,56	11,35
17,76	2,32	4,64	5,98	11,97
18,9	3,57	7,14	6,74	13,48
20,5	2,69	5,17	5,73	11,02
22,9	1,26	2,38	6,08	11,46
27,1	3,63	6,05	1,12	1,87
29	2,12	3,66	3,95	6,81
30,2	1,84	3,68	12,44	24,88
34,87	6,24	11,35	9,19	16,71
36,32	3,14	5,71	9,68	17,61
38,9	6,05	9,76	3,52	5,68
39,5	2,88	4,72	4,70	7,71
40	4,84	9,68	15,86	31,72
43,49	4,38	7,30	6,87	11,46

En la tabla 3.8 se muestran los valores obtenidos de EMR, ECM y DEE para los modelos de propagación completo 3D y de pendiente única.

Tabla 3.8. Valores estadísticos de EMR, ECM y DEE en el escenario de interiores con LOS y NLOS

Escenario	Modelo Completo 3D			Modelo de Pendiente Única		
	Error Medio Relativo (%)	Error Cuadrático Medio	Desviación Estándar del Error	Error Medio Relativo (%)	Error Cuadrático Medio	Desviación Estándar del Error
LOS	5,52	6,15	2,57	8,57	15,83	4,12
NLOS	6,36	13,52	3,77	11,47	47,37	7,06

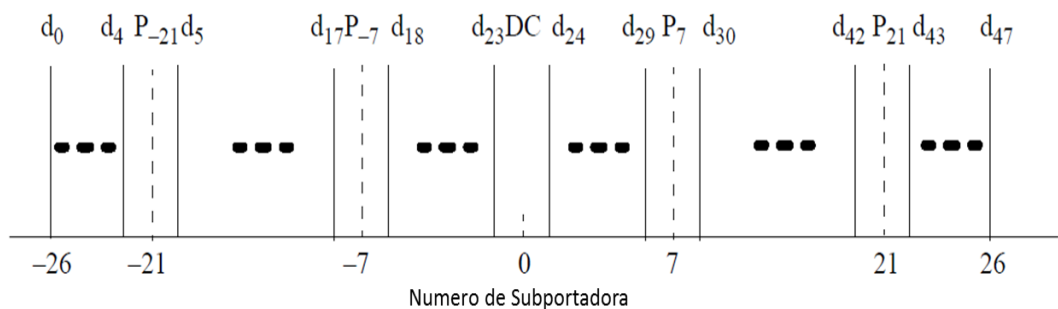
De acuerdo a los resultados mostrados en la tabla 3.6, el modelo completo 3D presenta un porcentaje de error más bajo respecto a las medidas experimentales, lo que representa una estimación más coherente, contrario a lo presentado por el modelo de pendiente única el cual mostró una menor fiabilidad en la estimación del nivel de potencia.

Los resultados obtenidos indican que para los dos modelos de propagación existe un porcentaje menor de error en el cálculo de la estimación de potencia en el escenario de exteriores en comparación con el escenario de interiores, esto debido a que en los escenarios de interiores existen múltiples variables que son difíciles de modelar completamente.

3.2. MEDIDA DE LA ESTABILIDAD EN FRECUENCIA FRENTE A LA TEMPERATURA

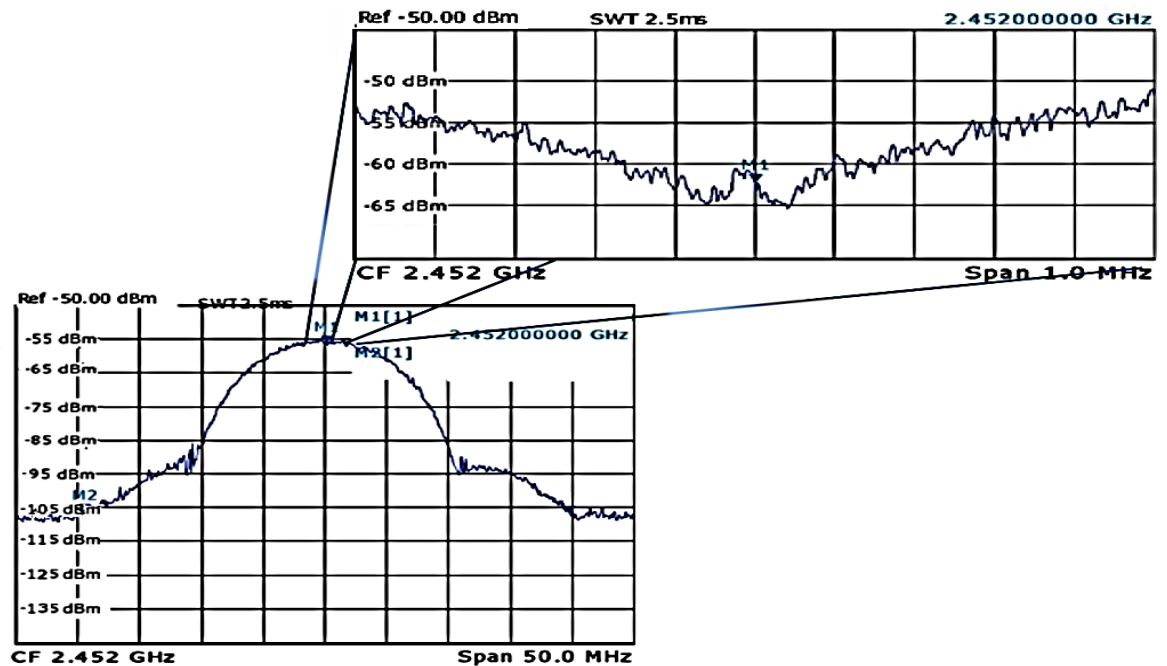
El estándar IEEE 802.11g define 53 subportadoras para un canal, 48 de ellas son utilizadas para el transporte de información (d_i), 4 son utilizadas como subportadoras de señales piloto (P_j) y una sub-portadora ubicada en la frecuencia central (DC) la cual no es utilizada para evitar problema en la conversiones realizadas por el DAC y el ADC, por lo tanto el espectro de una señal transmitida bajo el estándar IEEE 802.11g, tiene una depresión alrededor de la frecuencia central. En la figura 3.9 se observa la distribución de las subportadoras y en la figura 3.10 se muestra un acercamiento del espectro de la señal alrededor de la frecuencia central.

Figura 3.9. Distribución de subportadoras



Con base en lo anterior, la estabilidad en frecuencia frente a la temperatura se puede determinar si al observar las gráficas obtenidas para distintos niveles de temperatura se encuentra un corrimiento en frecuencia de dicha depresión.

Figura 3.10. Espectro de la señal alrededor de la frecuencia central



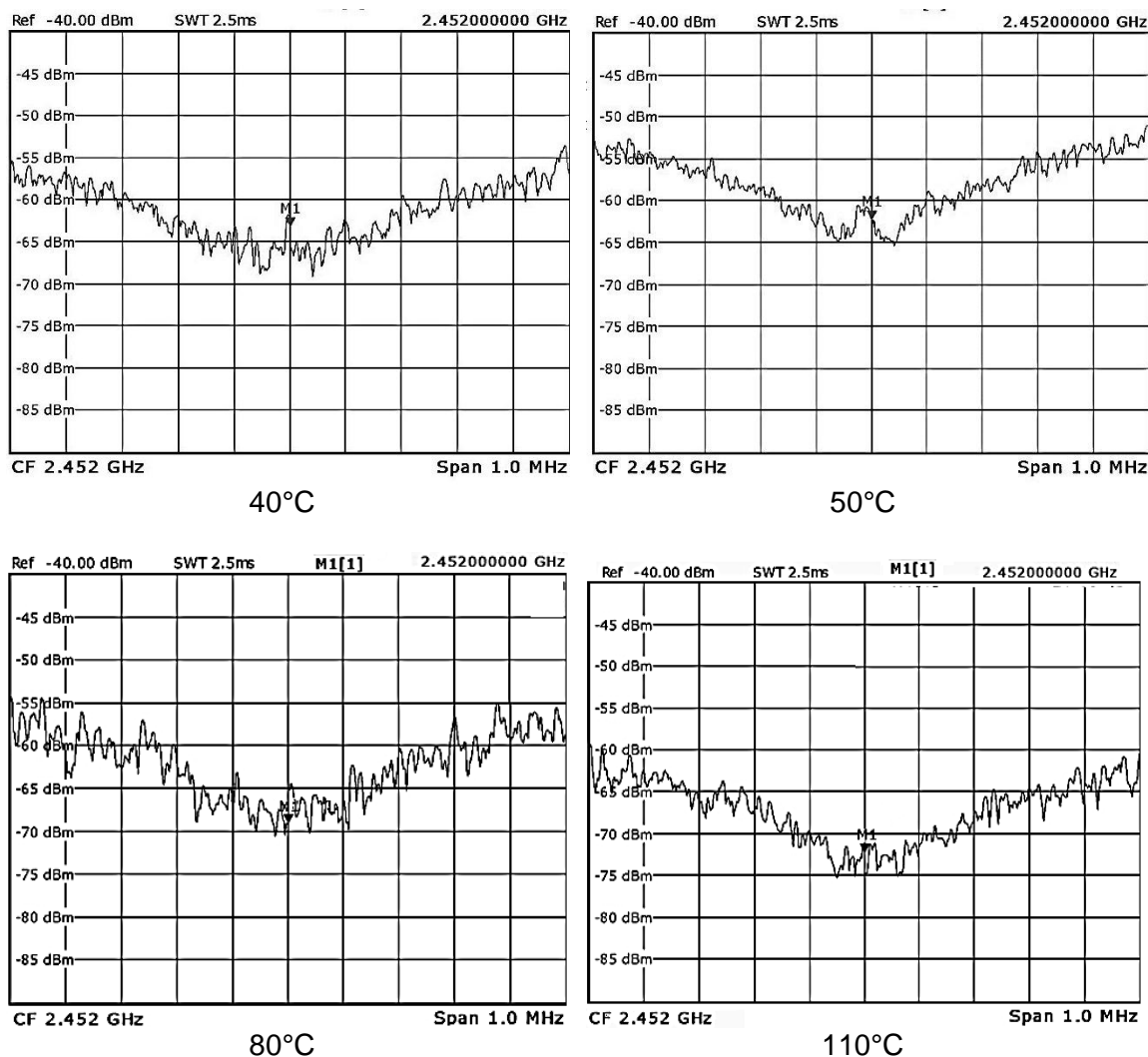
Para esta prueba se utilizó el WISDKC01BI-02, en cual se creó una red en el modo Ad-Hoc configurada en el canal 9 frecuencia central igual a 2.452 GHz, luego se transmitieron datos continuamente y se configuró el analizador de espectro ZLV Rohde & Schwarz con una ventana de visualización de 1 MHz alrededor de la frecuencia central, finalmente la temperatura se incrementó con ayuda de un termoventilador y fue medida con un termómetro infrarrojo. La figura 3.11 muestra los elementos utilizados para esta medida.

Figura 3.11. Esquema para la medida de la estabilidad en frecuencia



La figura 3.12 muestra las gráficas del espectro alrededor de la frecuencia central obtenidas para distintos valores de temperatura, el marcador M1 indica la frecuencia central.

Figura 3.12. Medida de la estabilidad en frecuencia frente a la temperatura



Debido a que las gráficas del espectro no presentaron una diferencia apreciable entre ellas para distintos niveles de temperatura y no se desplegaron errores ni hubo desconexiones al momento de la transmisión de datos, se considera que el transmisor no se ve afectado frente cambios de temperatura que sean menores a 110 °C. En la tabla A1 del anexo A se presenta el rango de operación especificado por el fabricante, el cual inicia a partir de -40°C hasta 85°C.

3.3. ANCHO DE BANDA

El ancho de banda teórico para una señal transmitida bajo el estándar IEEE 802.11g se obtiene mediante el procedimiento que se describe a continuación.

El periodo de un símbolo OFDM (T_s), está compuesto por un tiempo de guarda o prefijo cíclico (T_{GI}), y un tiempo en el que se transmite la información (T_{FFT}), como se indica en la ecuación 3.8. Estos tiempos se definen y explican en la sección 1.1.2.5.

$$T_s = T_{GI} + T_{FFT} \quad (3.8)$$

El número de bits de datos por símbolo OFDM (b_d), corresponde a la velocidad de transmisión de datos R en un periodo del símbolo OFDM (T_s), y se obtiene mediante la ecuación 3.9.

$$b_d = R \cdot T_s \quad (3.9)$$

Debido a que el sistema de comunicaciones basado en el estándar IEEE 802.11g utiliza codificación convolucional, se incrementa la cantidad de bits transmitidos en relación a la tasa de código (k/n), se denominan bits codificados por símbolo OFDM (b_c) y se obtienen mediante la ecuación 3.10.

$$b_c = b_d / (k/n) \quad (3.10)$$

Una vez los bits de datos han sido codificados son mapeados en símbolos BPSK, QPSK, 16-QAM o 64-QAM. Teniendo en cuenta el número de subportadoras de datos (c_d), y el tiempo en que se trasmite la información T_{FFT} . La cantidad de símbolos por subportadora OFDM (R_s) se obtiene mediante la ecuación 3.11.

$$R_s = \frac{b_c}{c_d \cdot \text{Log}_2(M) T_{FFT}} \quad (3.11)$$

Donde

M: Número de puntos de una constelación de acuerdo a la modulación empleada.

El ancho de banda de una subportadora OFDM (B) se obtiene mediante la ecuación 3.12.

$$B = R_s \quad (3.12)$$

Puesto que se trata de un sistema multi-portadora OFDM, el valor obtenido mediante la expresión de la ecuación 3.13 corresponde también a la separación entre frecuencias centrales, por lo tanto el ancho de banda de las 53 subportadoras de todo el sistema es 16.56 MHz. Los datos utilizados para este cálculo se presentan en la tabla 3.9

Por otra parte se determinó experimentalmente si el ancho de banda se encuentra dentro la máscara teórica del espectro transmitido definida por el estándar IEEE 802.11g, (Ver figura 2.5). Para esto, se creó una red Ad-Hoc en el canal 7 (Frecuencia central 2.437 MHz), se transmitieron datos continuamente y se configuró en el analizador de espectro ZLV Rohde & Schwarz® una ventana de visualización de 80 MHz comprendida entre 2997 MHz y 2477 MHz.

Tabla 3.9. Parámetros para el cálculo del ancho de banda

Velocidad de transmisión de datos (Mbps)	Modulación	Número de puntos de la constelación	Bits de datos por símbolo OFDM (bd)	Tasa de código (k/n)	Bits codificados por símbolo OFDM (bc)
6	BPSK	2	24	1/2	48
9	BPSK	2	36	3/4	48
12	QPSK	4	48	1/2	96
18	QPSK	4	72	3/4	96
24	16-QAM	16	96	1/2	192
36	16-QAM	16	144	3/4	192
48	64-QAM	64	192	2/3	288
54	64-QAM	64	216	3/4	288

En la figura 3.13 se observa el espectro de la señal obtenido. La línea roja es la máscara espectral que representa los límites del ancho de banda permitidos por el estándar IEEE 802.11g, el marcador M1 está ubicado en la frecuencia con el máximo valor de densidad espectral de potencia y cada línea vertical de color negro representa un intervalo de 8 MHz, los marcadores D₂ y D₃, están ubicados donde las componentes de la señal decaen -40 dB respecto M1, encontrando una diferencia hasta este marcador de 23.55 y 24.33 MHz respectivamente, por tanto el ancho de banda a -40 dB es de 47.88 MHz. De igual manera se ubicaron marcadores a -28 dB y -20 dB, obteniendo un ancho de banda de 32.64 y 22.26 MHz respectivamente a partir de los datos mostrados en la figuras 3.14 y 3.15.

Figura 3.13. Espectro de la señal IEEE 802.11g a -40dB.

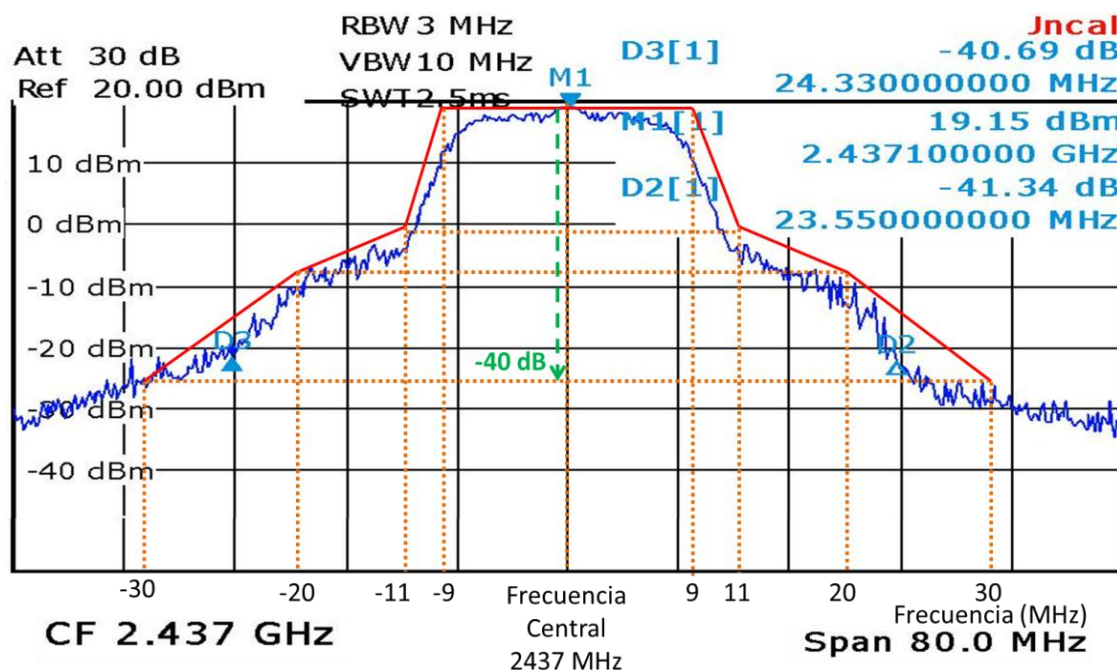


Figura 3.14. Espectro de la señal IEEE 802.11g a -28 dBr.

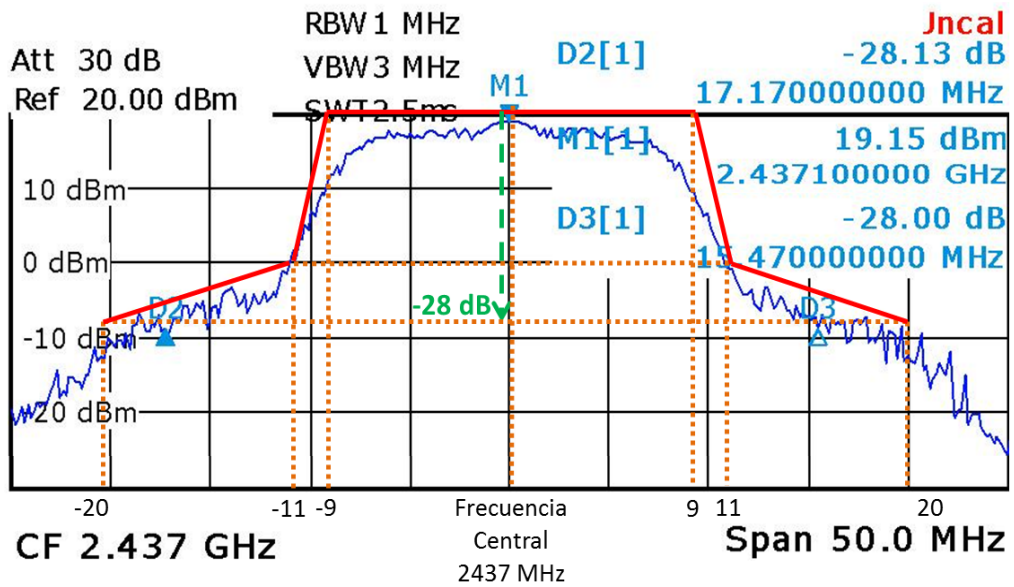
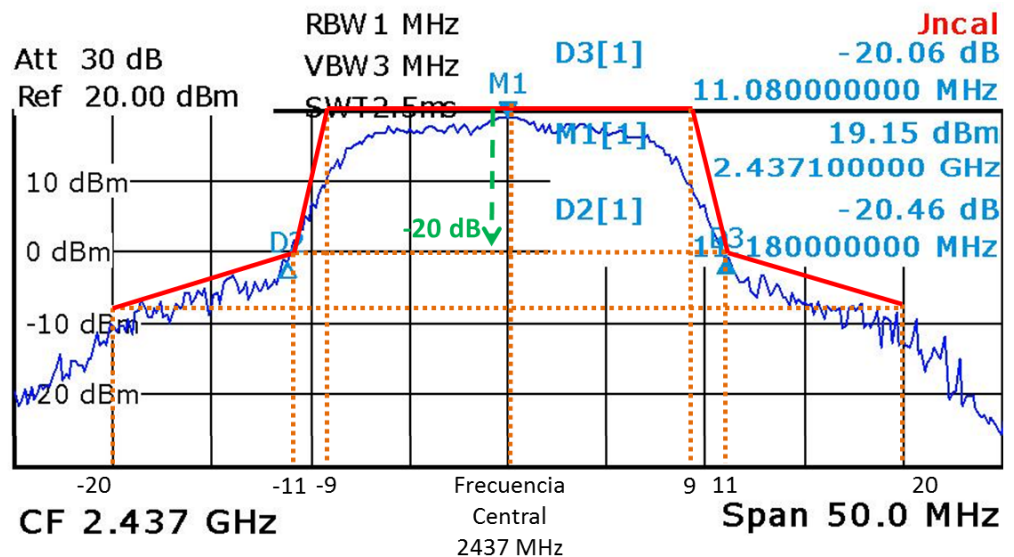


Figura 3.15. Espectro de la señal IEEE 802.11g a -20 dBr.



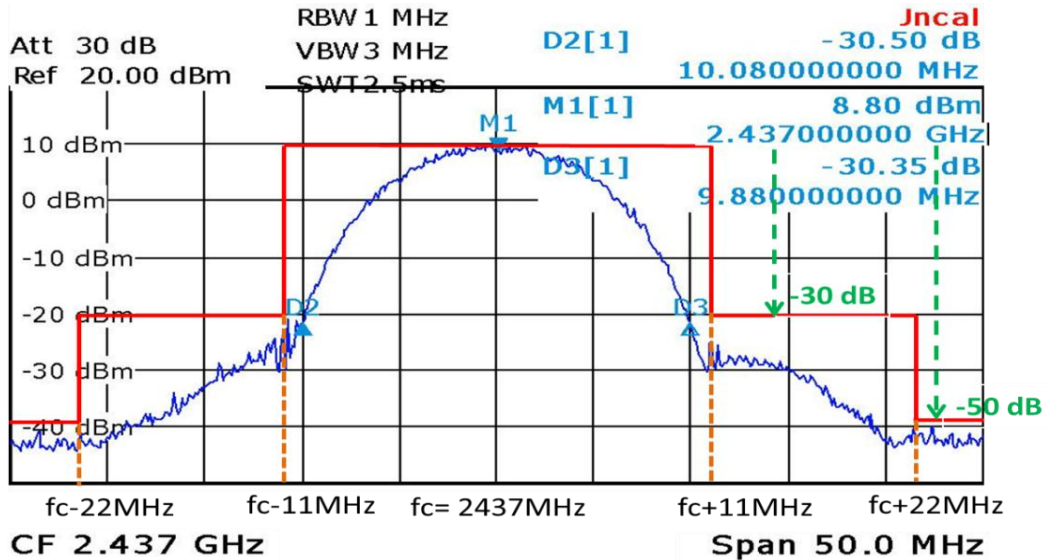
En esta prueba se observó que el ancho de banda de la señal transmitida bajo el estándar IEEE 802.11g se encontró dentro de los límites de la máscara espectral y que el ancho de banda teórico es comparable al valor de ancho de banda de 0 dBr. En la tabla 3.10 se muestra una comparación entre el ancho de banda medido y el ancho de banda máximo permitido por el estándar IEEE802.11g.

Tabla 3.10. Ancho de banda medido y máximo permitido

Atenuación	Ancho de banda	
	Medido	Máximo
-20 dBr	22.26MHz	22 MHz
-28 dBr	32.64 MHz	40 MHz
-40 dBr	47.88 MHz	60 MHz

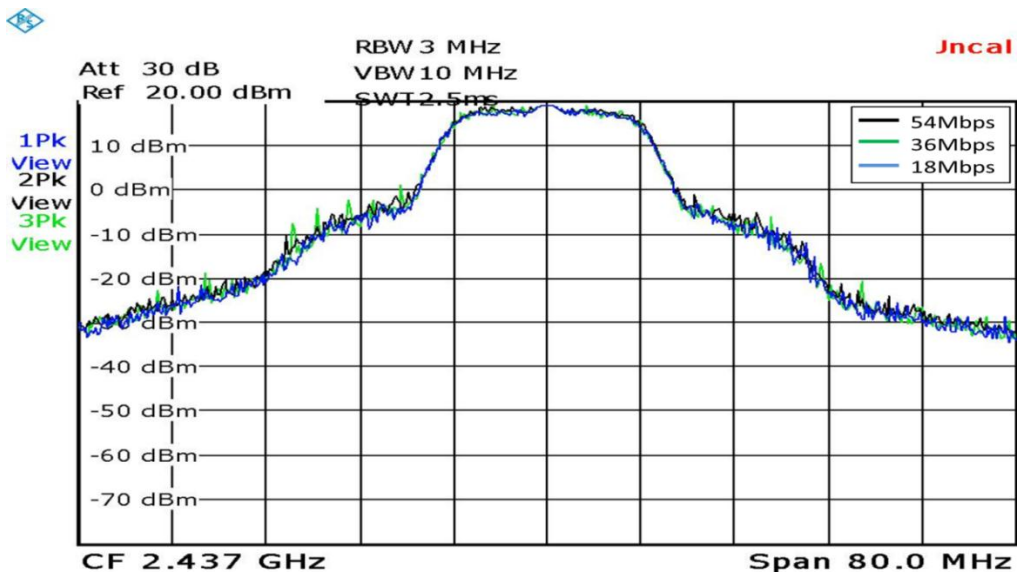
De igual manera se encontró que una señal transmitida bajo el estándar IEEE 802.11b cumple con los límites de la máscara espectral y que el ancho de banda teórico de 22 MHz definido por este estándar es comparable con el ancho de banda de -30 dBr, equivalente a 19.96 MHz, tal como se ilustra en la figura 3.16

Figura 3.16. Espectro de la señal IEEE 802.11b a -30 dBr



El estándar IEEE 802.11g combina una tasa de codificación con una modulación específica (ver tabla 1.4), de tal forma que el ancho de banda empleado para las diferentes velocidades de transmisión permanezca constante. Lo anterior fue comprobado para las velocidades de transmisión de 54, 36 y 18 Mbps. Los resultados de esta prueba se muestran en la figura 3.17, donde se observa que efectivamente el ancho de banda permanece invariante.

Figura 3.17. Espectro para las velocidades de transmisión de 54, 36 y 18 Mbps



3.4. POTENCIA DE TRANSMISION

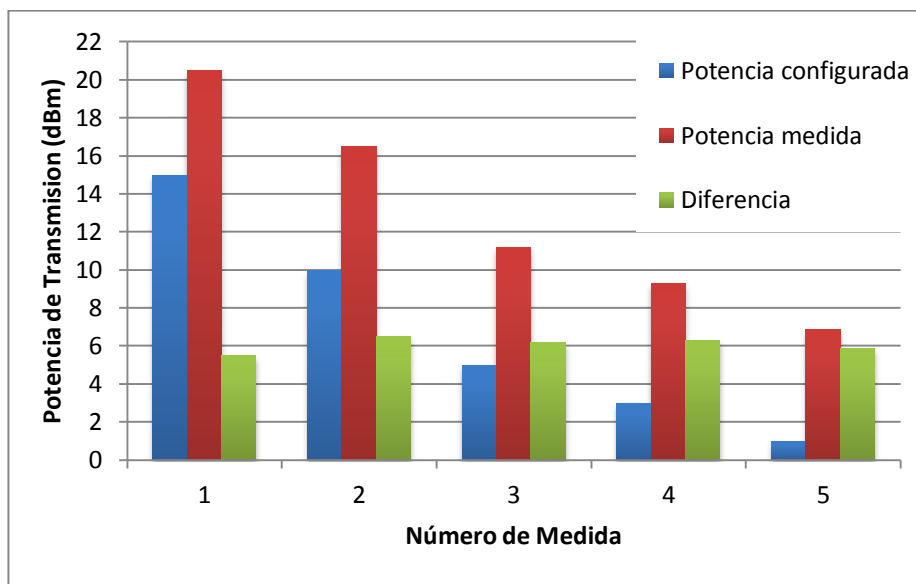
Por medio del sensor universal de potencia R&S®NRP-Z22 incluido en el analizador de redes Rohde & Schwarz®, se evaluó la potencia de transmisión correspondiente al adaptador USB de referencia QP-W2410USB. Con ayuda de la utilidad “Alfa Tools”³¹ se configuró el transmisor a la potencia máxima de 15 dBm y se midió con el sensor. Este procedimiento se repitió para 5 diferentes niveles de potencia. Se tuvo en cuenta que según las especificaciones del trasmisor mostradas en la tabla 2.6, la potencia máxima configurable es de 15dBm. Los resultados de esta prueba se muestran en la tabla 3.11 y se ilustran en la figura 3.18.

En la figura 3.19 se presenta la interfaz de la utilidad “Alfa Tools”, donde los campos velocidad “Bit-rate” y velocidad “Tx-Power” son utilizados para configurar la velocidad de transmisión de datos y la potencia de transmisión respectivamente.

Tabla 3.11. Niveles de potencia de transmisión

Número de medida	Potencia configurada (dBm)	Potencia medida (dBm)	Diferencia
1	15	20.50	5.5
2	10	16.5	6.5
3	5	11.2	6.2
4	3	9.30	6.3
5	1	6.9	5.9

Figura 3.18. Niveles de potencia de transmisión



³¹ La utilidad “Alfa Tools” permite modificar los parametros de potencia y velocidad de transmision de datos para los controladores Realtek RTL8187 y R8187 únicamente.

Figura 3.19. Interfaz de la utilidad “Alfa Tools”



De acuerdo a la tabla 3.9 se observa que la potencia de transmisión medida siempre tiene un nivel superior al nivel de potencia configurada. Sin embargo, esta diferencia se mantiene aproximadamente en el mismo valor, mostrando que en promedio la diferencia entre la potencia de transmisión configurada y medida es de 6.08 dB.

3.5. TASA DE ERROR DE BIT

La evaluación de la BER del sistema de comunicaciones punto a punto basado en el estándar IEEE 802.11g, se lleva a cabo al comparar su valor respecto a la SNR. El procedimiento para llevar a cabo esta medida es el presentado en la sección 2.4.2. La BER fue medida en los escenarios de interiores y exteriores seleccionados en la sección 2.1.1 en condición de línea de vista.

En pruebas realizadas previamente se determinó que la máxima cobertura alcanzada por el sistema de comunicaciones operando a 54 Mbps, con una potencia de transmisión de 0 dBm y atenuación de 30 dB. La distancia de separación fue de 10 y 7 metros para el escenario de interiores y exteriores respectivamente.

El Estándar IEEE 802.11g define que la PER debe ser menor al 10 % del total de transmisiones para tramas de longitud de 1000 bytes, que en términos BER según la ecuación 2.15 equivale a $1.317E-05$

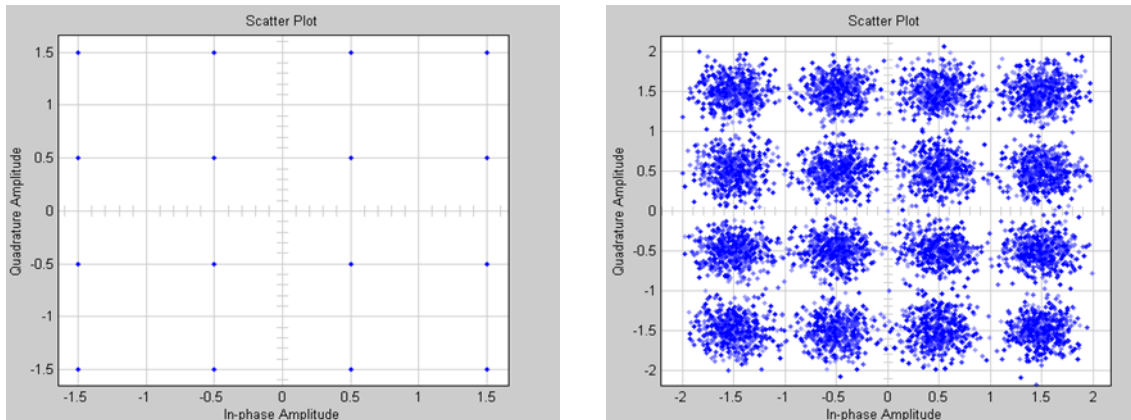
Fue muy importante la utilización de la utilidad “Alfa Tools” incorporado en el sistema operativo Wifiway, la cual permitió configurar de forma manual la velocidad de transmisión de datos, puesto que en condiciones normales de operación esta velocidad cambia automáticamente al variar la SNR. El uso de esta utilidad se muestra en el anexo B.

3.5.1. Relación BER vs SNR en el Escenario de Interiores

La tabla 3.12 muestra los valores de PER obtenidos experimentalmente para las modulaciones empleadas por el estándar IEEE 802.11g para una tasa de codificación de 3/4 así como los valores de BER y en las figuras 3.21 y 3.22 se ilustran gráficamente los resultados, donde se nota que a un mayor orden de modulación, la

BER y la PER respecto a la SNR son mayores. Estos resultados obedecen a que en una modulación de mayor orden los puntos de la constelación tienen una menor separación, provocando que en recepción se dificulte la detección por traslados del punto de la constelación debido a efectos del ruido y la multitrayectoria, esto se puede ilustrar gráficamente en la figura 3.20.

Figura 3.20. Efecto del ruido sobre una señal. a) señal sin ruido b) señal con ruido



a)

b)

Tabla 3.12. Valores de PER y BER en relación a la SNR para el escenario de Interiores en condiciones de LOS

SNR	BER					PER				
	BPSK	QPSK	16-QAM	64QAM	CCK 11Mbps	BPSK	QPSK	16-QAM	64QAM	CCK 11Mbps
7	1E-06	3E-06	5E-06	2E-05	9E-07	1E-02	3E-02	6E-02	2E-01	1E-02
17	5E-07	9E-07	2E-06	4E-06	4E-07	6E-03	1E-02	3E-02	5E-02	5E-03
27	3E-07	6E-07	1E-06	1E-06	1E-07	4E-03	7E-03	1E-02	2E-02	1E-03
37	3E-08	5E-08	6E-08	9E-08	1E-08	4E-04	6E-04	7E-04	1E-03	2E-04

Figura 3.21. PER vs SNR – Interiores

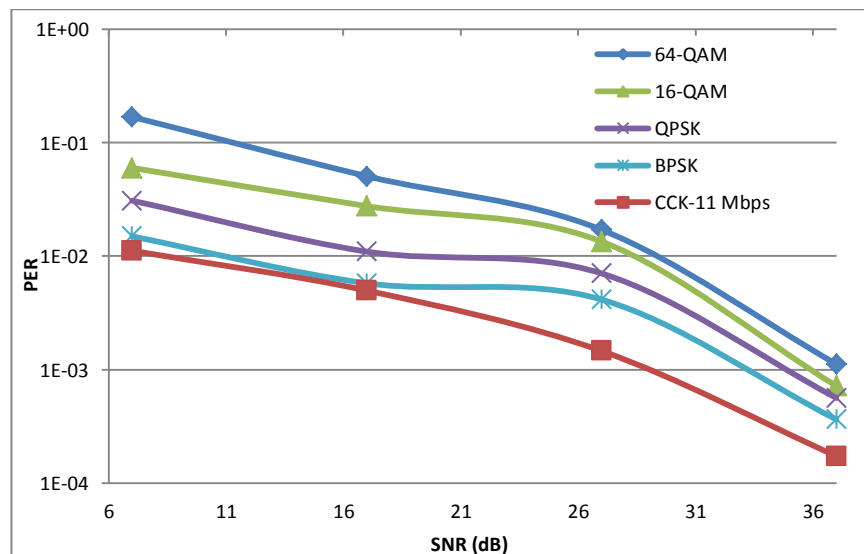
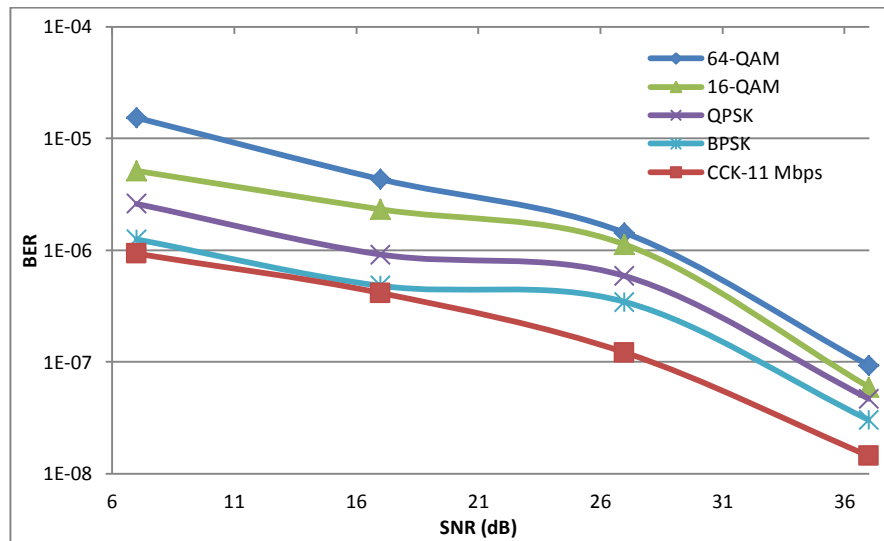


Figura 3.22. BER vs SNR – Interiores



De la figura 3.22 se puede observar que la BER para todos los esquemas de modulación disminuye de manera uniforme respecto a valores crecientes de SNR. Las curvas tienden a decaer con una pendiente más elevada a partir de valores de la SNR mayores a 26 dB. También se puede observar que para cualquier valor de SNR, la modulación CCK a 11 Mbps tiene una BER menores que cualquiera de los demás esquemas de modulación. Igual comportamiento se puede observar en la tendencia de las curvas de la PER en relaciona a la SNR como se muestra en la figura 3.21.

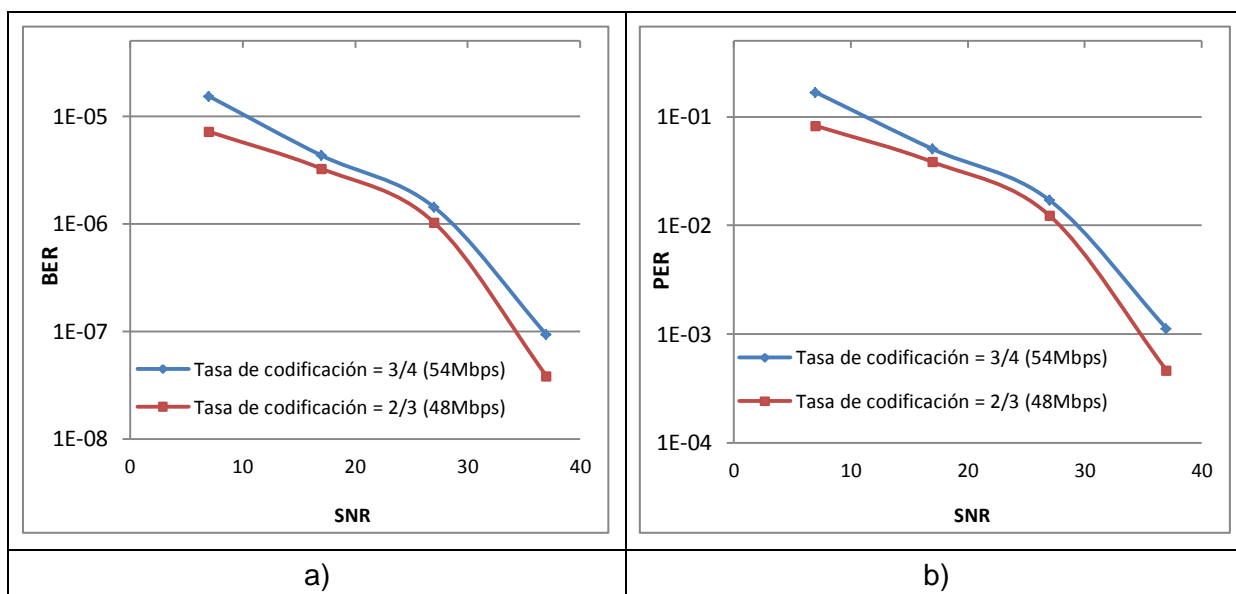
A valores de SNR mayores a 7 dB, la BER para todas las modulaciones es menor que el límite de BER permitido de 1,317 E-05. En ninguna de las modulaciones se obtuvo valores de BER para una SNR menor a 7dB, debido que a partir de este valor el sistema presentó desconexiones.

Para determinar el desempeño del sistema cuando se utilizan dos tasas de codificación diferentes se realizó la comparación entre las tasas codificación de 3/4 y 2/3 para la modulación 64-QAM correspondiente a los parámetros de las velocidades de transmisión de datos de 54 y 48 Mbps respectivamente. Esta prueba fue realizada para el escenario de interiores. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.13 y se ilustran en la figura 3.23, donde se observa que con un valor menor de tasa de codificación, el desempeño del sistema mejora. La tasa de codificación de 2/3 requiere una SNR menor entre 3 y 4 dB que la codificación de 3/4 para obtener la misma BER, lo que equivale a un ahorro de potencia alrededor al 50%.

Tabla 3.13. Valores de BER-PER vs SNR para las tasas de codificación en 3/4 y 2/3 en 64-QAM para el escenario de interiores

SNR	BER		PER	
	Tasa de codificación 2/3	Tasa de codificación 3/4	Tasa de codificación 2/3	Tasa de codificación 3/4
7	7	7.20E-06	1.50E-05	8.30E-02
17	17	3.30E-06	4.30E-06	3.80E-02
27	27	1.00E-06	1.40E-06	1.20E-02
37	37	3.80E-08	9.30E-08	4.60E-04

Figura 3.23. Gráficas de desempeño para las tasas de codificación en 3/4 y 2/3 en 64-QAM para el escenario de interiores. a) BER vs SNR. b) PER vs SNR



3.5.2. Comparación de la Relación BER vs SNR entre el escenario de exteriores e interiores

Con el objetivo de analizar el desempeño del sistema de comunicaciones en el escenario de exteriores se presenta la tabla 3.14 que relaciona los valores de PER, BER y SNR para cada modulación con la tasa de codificación 3/4 y en las figuras 3.24 y 3.25 se ilustran los resultados.

En la figura 3.25 se observa que la forma de las curvas es similar a las encontradas en el escenario de interiores con la diferencia de una mayor pendiente de caída a partir de los 15 dB de SNR. Se obtuvo que las curvas con mayor y menor BER pertenecen a los esquemas de modulación 64-QAM y BPSK respectivamente.

Tabla 3.14. Valores de PER y BER en relación a la SNR para el escenario exterior en condiciones de LOS

SNR	BER - Escenario de exteriores				PER - Escenario de exteriores			
	BPSK	QPSK	16-QAM	64QAM	BPSK	QPSK	16-QAM	64-QAM
5	1.54E-06	2.29E-06	2.73E-06	3.29E-06	1.84E-02	2.71E-02	3.23E-02	3.88E-02
15	1.13E-06	1.66E-06	2.28E-06	3.00E-06	1.35E-02	1.98E-02	2.70E-02	3.54E-02
25	2.29E-07	4.40E-07	5.18E-07	1.03E-06	2.75E-03	5.27E-03	6.20E-03	1.23E-02
35	1.92E-08	3.20E-08	6.72E-08	2.06E-07	2.31E-04	3.85E-04	8.07E-04	2.47E-03

Por otra parte, la línea denominada “*per of conventional metric*” de la figura 3.26 representa la curva obtenida mediante simulación en [41] para una modulación 64-QAM con tasa de codificación 3/4, estas curvas se compararon con los resultados

obtenidos experimentalmente en el presente trabajo de grado, observando, que no coinciden, esto se debe a que en simulación las condiciones son ideales y no se consideran fenómenos físicos como la interferencia y el multitrayecto, los cuales afectan las comunicaciones inalámbricas en escenarios reales.

Figura 3.24. PER vs SNR – Exteriores

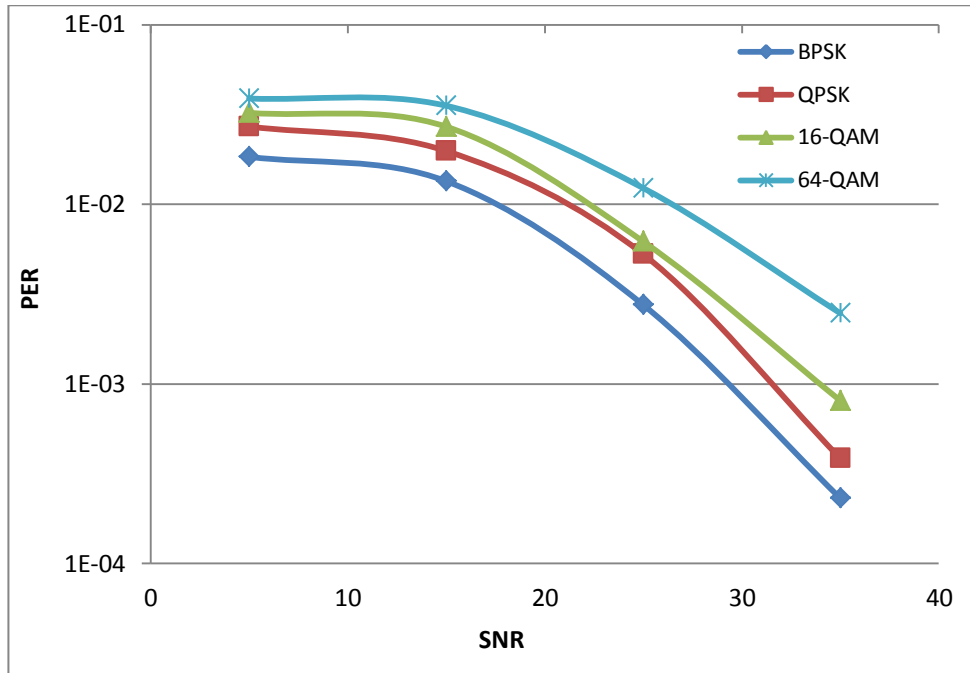


Figura 3.25. BER vs SNR – Exteriores

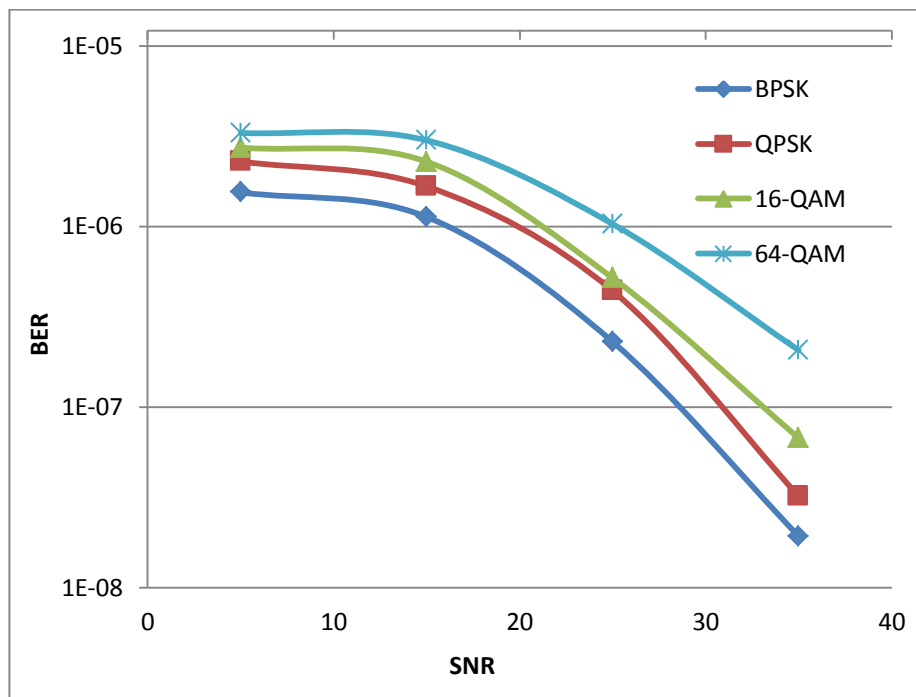
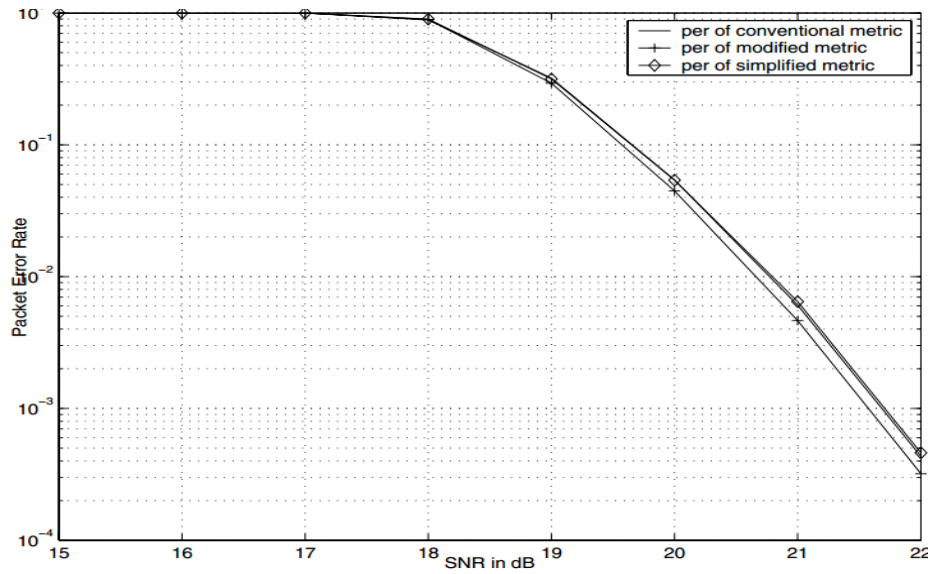
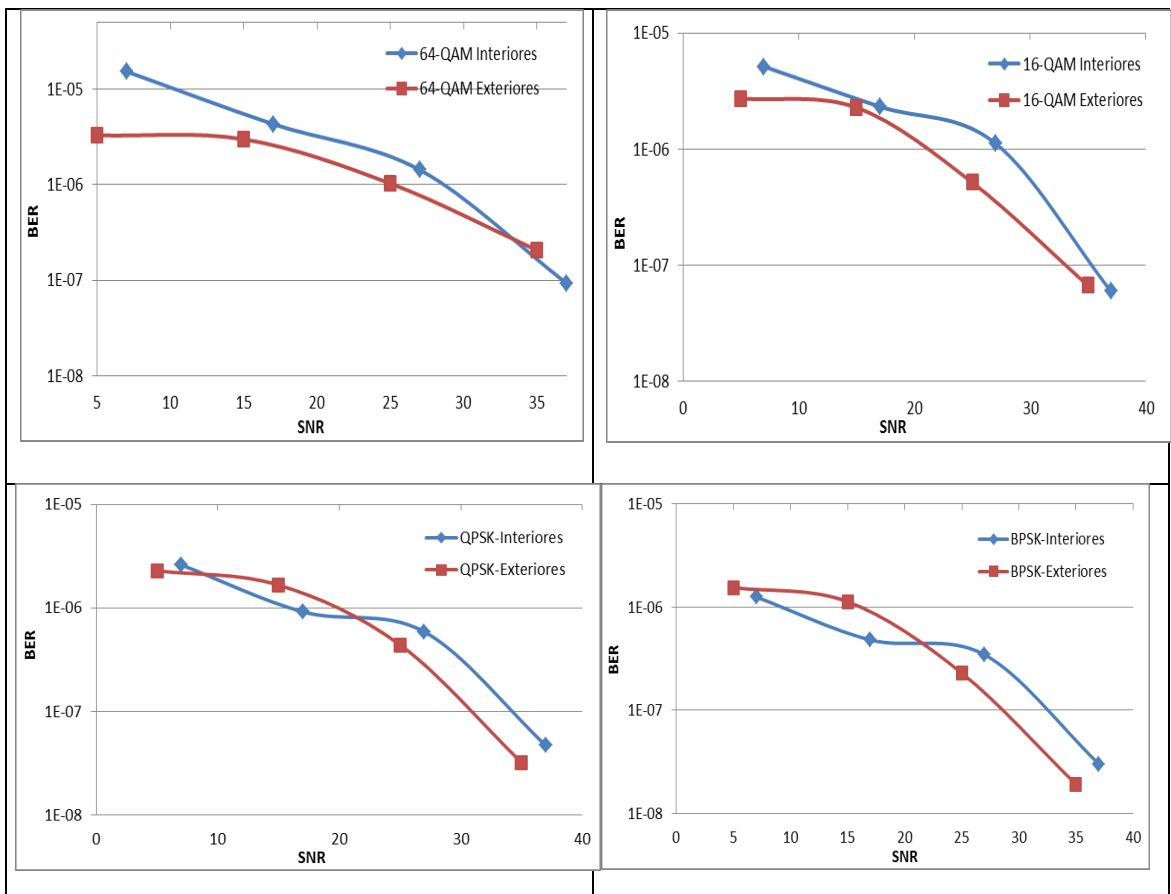


Figura 3.26. Curvas de PER la modulación 64QAM y tasa de codificación = 3/4



En figura 3.27 se muestran las curvas para todas las modulaciones en los escenarios de interiores y de exteriores donde se observa que las curvas tienen un comportamiento similar.

Figura 3.27. Curvas de BER en los escenarios de interiores y exteriores



La línea roja de la figura 3.27 representa la BER en el escenario de exteriores, por lo general, esta línea se encuentra por debajo de la línea de color azul que representa la BER en escenarios de interiores, esto significa que un mejor desempeño en el escenario de exteriores, excepto en las modulaciones QPSK y BPSK para valores menores de 20 dB de SNR, donde el desempeño fue mejor en el escenario de interiores, sin embargo la diferencia no es significativa debido a que la técnica de transmisión OFDM fortalece la señal frente a efectos de multitrayectoria al implementar mecanismos de protección como son la inserción del prefijo cíclico y el incremento de la duración de cada símbolo respecto a un sistema de portadora única.

3.5.3. BER en condiciones de interferencia

En la tabla 3.15 se presentan resultados de PER y BER obtenidos en un ambiente con interferencia para valores de SIR entre 5.43 dB y 24.43 dB. En la figuras 3.28 y 3.29, se ilustran los resultados.

Tabla 3.15. Valores de PER y BER en relación a la SIR

SIR (dB)	BER				PER			
	BPSK	QPSK	16QAM	64QAM	BPSK	QPSK	16QAM	64QAM
5	2E-06	3E-06	6E-06	2E-05	2E-02	3E-02	7E-02	2E-01
13	1E-06	2E-06	4E-06	2E-05	2E-02	2E-02	5E-02	2E-01
17	1E-06	1E-06	3E-06	1E-05	1E-02	1E-02	4E-02	1E-01
22	5E-07	7E-07	2E-06	8E-06	6E-03	9E-03	3E-02	9E-02
24	5E-07	7E-07	2E-06	6E-06	6E-03	8E-03	3E-02	7E-02

Figura 3.28. PER VS SIR

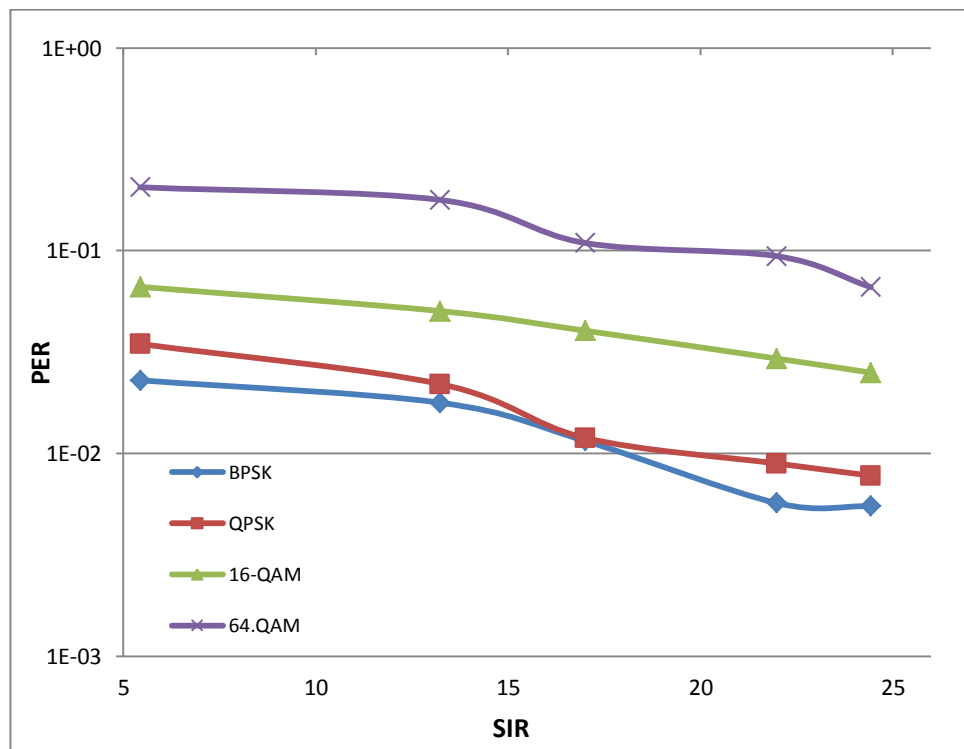
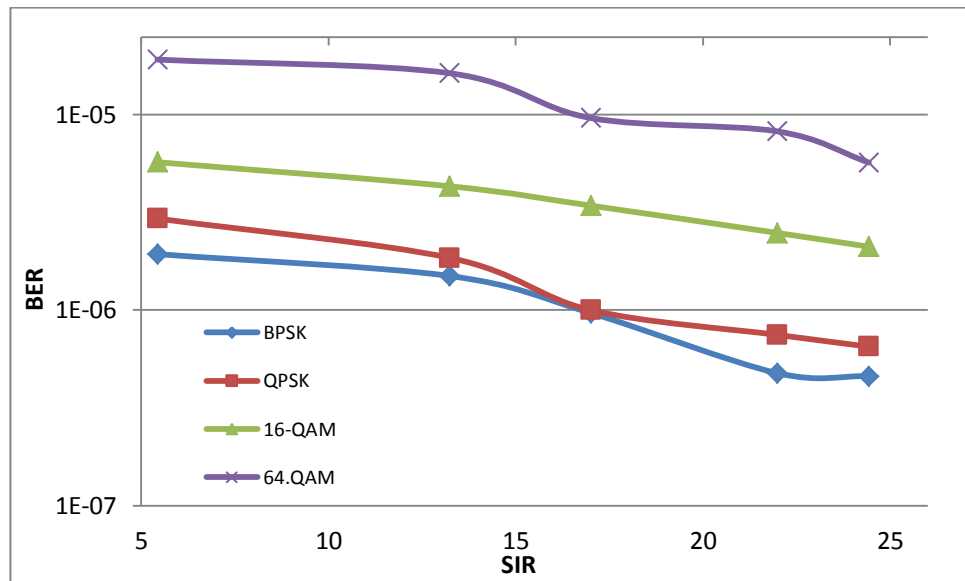


Figura 3.29. BER VS SIR



En figura 3.29 se pudo observar que la BER disminuye cuando la SIR aumenta. Las curvas de las modulaciones BPSK y QPSK proporcionaron valores cercanos, mientras que la curva de la modulación 64-QAM obtuvo el peor desempeño, incluso a valores de SIR aproximados de 13 dB sobrepasó el límite especificado por el estándar IEEE 802.11g.

Para valores de SIR menores a 13.23 dB la comunicación presentó interrupciones momentáneas lo que impedía el reconocimiento de las tramas en el receptor y para valores de SIR menores a 5.43 dB, la comunicación presentó interrupción total.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Cumplidas las actividades y los objetivos planteados en el anteproyecto de este trabajo de grado, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Los resultados obtenidos experimentalmente de potencia de recepción en el escenario de exteriores, muestran que entre puntos de recepción adyacentes existe menos variación de potencia respecto al escenario de interiores, esto se debe a que en este último escenario en el receptor coinciden más de una réplica de la señal lo que ocasiona un aumento o disminución de potencia dependiendo de la fase con que lleguen. Teniendo en cuenta lo anterior se decidió que para la toma medidas de BER vs SNR en el escenario de interiores no es conveniente modificar la potencia de recepción por medio de variación de la distancia, en cambio mantener una separación constante entre transmisor-receptor y variar la potencia de recepción por medio de la variación de la potencia de transmisión permite mantener constantes las condiciones de propagación y asegurar una variación controlada de SNR.
- Dada una distancia de separación entre el transmisor y el receptor se encontró que en el escenario de interiores con línea de vista presentó mayor potencia de recepción en comparación con el escenario de exteriores, lo anterior se debe a que en las condiciones del escenario de interiores definido se presentó el fenómeno conocido como “efecto túnel”, que consiste en que el pasillo se comporta como una guía de onda produciéndose una menor dispersión de la energía electromagnética ya que esta se encuentra confinada a lo largo de éste.
- En relación a los resultados obtenidos de Error Medio Relativo (EMR), el Error Cuadrático Medio (ECM) y la Desviación Estándar del Error (DEE) respecto a las medidas experimentales de potencia de recepción se concluye que el modelo de pendiente única tiene un mayor error en la estimación del nivel de potencia de recepción dado que no permite modelar detalladamente los fenómenos de propagación presentes en los escenarios de interiores, sin embargo, en los escenarios de exteriores ofrece una buena alternativa de predicción. El modelo Completo 3D incluido en la herramienta de propagación *Wireless InSite*® ofrece una buena aproximación del nivel de potencia recibida en los dos escenarios considerados en este trabajo de grado. Las diferencias entre niveles de potencia en recepción pueden obedecer a la dificultad para modelar todos los elementos presentes en el escenario sobre la herramienta de simulación.
- Los resultados obtenidos en este trabajo de grado mostraron que en el trasmisor del sistema de comunicaciones no se presentó una variación en frecuencia de portadora apreciable a temperaturas de operación por debajo de los 110 °C.
- El estándar IEEE 802.11g describe la máscara espectral de acuerdo a la figura 2.5. Las pruebas realizadas mostraron que el espectro de la señal estuvo contenido dentro de la máscara espectral. En particular, sobre los puntos de referencia de 28 dBr y 40 dBr el ancho de banda fue menor en 0,46 MHz y 12.22 MHz respectivamente respecto al definido por el estándar, por estas razones se

concluye que los dispositivos cumplen con las especificaciones del estándar IEEE 802.11g en cuanto a uso del espectro.

- Del análisis de las curvas de la BER para los escenarios de interiores y de exteriores, se obtuvo que a valores de SNR menores a 25 dB para las modulaciones 16 y 64 QAM se presentó una diferencia de 4 a 15 dB entre las curvas, mientras que para las modulaciones QPSK y BPSK la diferencia fue menor a 15dB. Para todas las modulaciones a partir de 25 dB de SNR, las curvas tienen una diferencia menor alrededor de los 4 dB o tienden a interceptarse.
- De las figuras 3.22 y 3.25 se concluye que para un orden de la modulación más alto la velocidad de transmisión de datos aumenta y con él la vulnerabilidad frente al ruido y se incrementa la tasa de error de bits. También se observa que las tasas de error de bit para todos los esquemas de modulación disminuyen respecto a valores crecientes de SNR. Las curvas tienden a decaer con una pendiente más elevada a partir de valores de SNR mayores a 26 dB. De la Fig. 3.22 se determinó que para cualquier valor SNR la modulación CCK a 11 Mbps tiene una BER menor.
- Respecto al desempeño del sistema de comunicaciones bajo condiciones de interferencia, se obtuvo que para todas las modulaciones (BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM) se presentó un aumento significativo de la BER respecto a SIR, siendo la modulación 64 QAM la más afectada. Una opción para mejorar el desempeño en un sistema basado en el estándar IEEE 802.11g ante interferencia es disminuir el orden de la modulación, aunque esto implica una disminución en su capacidad.

Además el desarrollo de este trabajo de grado sirve como soporte al proyecto de investigación "PROTOTIPO DE COMUNICACIÓN DE DATOS MULTIPROPOSITO VIA RADIO DE CORTO ALCANCE EN 2.4 GHZ", el cual es un proyecto que cuenta con la aprobación y financiación de la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Cauca.

4.1. TRABAJOS FUTUROS

Los resultados obtenidos permiten plantear algunos trabajos futuros que contribuyan en la investigación sobre redes de área local inalámbricas en la 2.4 GHz.

- Diseño e implementación de aplicaciones de telemetría y telecontrol basados en el kit referencia WISDK01BI-02.
- Evaluación y análisis del desempeño a nivel físico de un sistema de comunicaciones punto a punto bajo el estándar IEEE 802.11n.
- Diseño e implementación de un sistema de comunicaciones punto a punto con la técnica de transmisión OFDM y analizar su desempeño a nivel físico en distintas longitudes de prefijo cíclico.

- Evaluación y análisis el desempeño a nivel físico de un sistema de comunicaciones punto a punto basado en el estándar IEEE 802.11g en un entorno de movilidad.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] IEEE. Std. 802.11, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," ISBN 0-7381-1658-0, USA, 1999.
- [2] O. Ullauri, H. Sigüencia, "Normas 802.11a, 802.11b y 802.11g," Proyecto final de carrera, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, 2006.
Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/221/1/Indice.pdf>
[Consultado: Diciembre 2011].
- [3] ISO and IEC technical committees, "Information Technology –Open Systems Interconnection - Basic Reference Model: The Basic Model," Estándar Internacional ISO/IEC 7498-1, 2^{da} Ed, USA, 1996.
- [4] J. López, R. Esguerra, "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, 2007.
- [5] IEEE. Std. 802.11g, "Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band," USA, 2003.
Disponible en: <http://www.ieee.org/~standars/> [Consultado: Diciembre 2011].
- [6] O. Olmedo, "Diseño de una Red Inalámbrica Utilizando la Tecnología WIFI, para Proveer Servicio de Internet a la Parroquia Mindo," Trabajo de grado, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, 2010.
- [7] M. Alsinella, "Implementación de Técnicas de Estimación y Sincronización para Sistemas OFDM," Trabajo de grado, Universidad Autónoma de Barcelona, España, 2008.
- [8] J. Martínez, "Estudio Teórico Experimental de un Sistema Distribuido MIMO en la Banda de Frecuencias de WIFI," Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Cartagena, España, 2006.
- [9] J. Treviño, "Propagación de RF en las Bandas: LF, MF, HF, VHF, UHF y VHF," Trabajo de grado, Universidad de las Américas Puebla, México, 2003.
- [10] L. Muguira y J. López, "E2 Estado del Arte en Sistemas de Localización en Interiores Basados en RF," Proyecto de investigación, Universidad de Deusto, España, 2009.
- [11] J. M. Hernando, "Comunicaciones Móviles," Universidad Politécnica de Madrid, 2^{da} ed, Editorial Centro de estudios Ramón Areces S.A, España, 2004.
- [12] S. Haykin, "Sistemas de Comunicaciones," Universidad de Manchester, Vol 1, Editorial Limusa S.A, 2002.
- [13] R. Ortiz, "Evaluación de la Calidad de la Potencia Eléctrica (CPE) Ante Eventos de Corta Duración en un Sistema de Distribución," Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, 2006.

- [14] M. Toaza, "Análisis de Interferencias en una Red Inalámbrica Utilizando un Analizador de Espectro de Banda Ancha," Trabajo de grado, Escuela de Ingeniería Electrónica en Telemática, Ecuador, 2010.
- [15] A. Tanenbaum "Redes de computadoras," 4ta Ed, Editorial Person Education, México, 2003.
- [16] R. Schollmeier, "A Definition of Peer-to-Peer Networking for the Classification of Peer-to-Peer Architectures and Applications," 2001.
- [17] M. Al-Mouhamed, I. Khan y S. Firdous, "A Reliable Peer-to-Peer Protocol for Mobile Ad-Hoc Wireless Networks," Arabia Saudita, 2010.
- [18] B. Hallberg, "Networking, A Beginner's Guide," 5^{ta} Ed, Editorial McGraw-Hill, USA, 2009.
- [19] M. Ripeanu, L. Foster, A. Lamnitchi, "Mapping the Gnutella Network: Properties of Large-Scale Peer-to-Peer Systems and Implications for System Design," Universidad de Chicago, 2001.
- [20] A. Manjón, "Estudio y Simulación de la Tecnología WiFi de Acceso Inalámbrico," Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2008.
- [21] A. Armendáriz Mateos, F. J. Falcone Lanás, "Análisis de la Dependencia Topológica de una Red de Sensores Zigbee en Relación con el Canal de Radio propagación Para Entornos Interiores," Proyecto final de carrera, Universidad Pública de Navarra, España, 2011.
- [22] J. A. Martínez Cano, "Estudio Teórico Experimental de un Sistema Distribuido MIMO en la Banda de Frecuencias de WIFI," Proyecto fin de carrera, Universidad Politécnica de Cartagena, Colombia, 2006.
- [23] Cisco Systems, "Capacity, Coverage, and Deployment Considerations for IEEE 802.11g," 2005.
- [24] S. A. Agredo Parra, J. A. Luna Bonilla, "Análisis de Cobertura de un Sistema Wi-Fi en Interiores, Mediante la Técnica de Trazado de Rayos," Trabajo de grado, Universidad del Cauca, Colombia, 2011.
- [25] J. C. García, O. A. Rodríguez, J. L. Castillo, "Desempeño de Modelos de Propagación en Comunicación Móvil Para la Zona de Caldas Parte 1: Modelos Para Áreas Urbanas," Universidad Nacional, Colombia, 2000.
- [26] G. D. Durgin, "Theory Of Stochastic Local Area Channel Modeling For Wireless Communications," Dissertation PH. D. in electrical engineering, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2000.
- [27] S. R. Saunders, A. Aragón-Zavala, "Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems," 2^{da} edición, 2007.
- [28] A. Goldsmith, "Wireless Communications," Stanford University, USA, 2005.

- [29] A. J. Ikuomola, "Wireless Communication II," National Open University of Nigeria, 2011.
- [30] S. Zvanovec, P. Pechac, M. Klepal, "*Wireless LAN Networks Design: Site Survey or Propagation Modeling*," RadioEngineering, 2003.
- [31] A. P. García Ariza, "Sistemas MIMO como Alternativa para el Control del Efecto Multitrayectoria y de la Interferencia Co-Canal en Sistemas de Radio Móvil Satelital y Terrestre," Sistemas & Telemática, Universidad ICESI, Colombia, 2004.
- [32] K. Römer, "Wireless Sensor Networks", Edición ilustrada, Editor Birkhäuser, 2006.
- [33] WildPackets, "*Converting Signal Strength Percentage to dBm Values*," Noviembre, 2002.
- [34] J. Blumenthal, R. Grossmann, F. Golatowski, D. Timmermann, "Weighted Centroid Localization in Zigbee-based Sensor Networks," Presentado en el Simposio Internacional del IEEE, Sobre Procesamiento Inteligente de Señales, Alcalá de Henares, España, 2007.
- [35] A. Escudero, M. Oliver, "Redes De Área Local Inalámbricas Según el Estándar IEEE 802.11," Revista Buran de la Universidad Politécnica de Cataluña. N°14, 1999.
- [36] K. M. Muttaqiand M. E.Haque, "Electromagnetic Interference Generated from Fast Switching Power Electronic Devices," International Journal of Innovations in Energy Systems and Power, 2008.
- [37] J. Balcells, "Interferencias Electromagnéticas en Sistemas Electrónicos," Edición ilustrada, Marcombo, 1992.
- [38] A. Jiménez Tejero, "Efecto del Sistema UWB Sobre Sistemas de Telecomunicaciones con Bandas de Operación por Debajo de 3 GHz," proyecto fin de carrera, Universidad Autónoma de Madrid, España, 2008.
- [39] R. Khalili, K. Salamatian, "Evaluation of Packet Error Rate in Wireless Networks," Universite Pierre et Marie Curie, Francia.
- [40] Z. Serceki, M. E. Wilhoyte, "A Method For Determining Packet Error Rate of Wireless LAN Stations," European patent application, Texas Instruments Inc, 2004.
- [41] E. Akay y E. Ayanoglu, "High Performance Viterbi Decoder for OFDM Systems," University of California, Irvine, USA, 2000.