

Evaluación y Análisis del Desempeño de un Sistema de Comunicación de Datos Vía Radio en la Banda de 900 MHz basado en Espectro Ensanchado por Saltos en Frecuencia utilizando el Modelo Peer-To-Peer.



**Dora Isabel García Muñoz
Lucia Fernanda Navarro García**

Director: Víctor Manuel Quintero Flórez

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas -GRIAL
Línea de investigación en Señales y Sistemas de Acceso y
Difusión Basados en Radio
Popayán, Enero de 2012**

Evaluación y Análisis del Desempeño de un Sistema de Comunicación de Datos Vía Radio en la Banda de 900 MHz basado en Espectro Ensanchado por Saltos en Frecuencia utilizando el Modelo Peer-To-Peer.



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

**Dora Isabel García Muñoz
Lucía Fernanda Navarro García**

Director: Víctor Manuel Quintero Flórez

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas -GRIAL
Línea de investigación en Señales y Sistemas de Acceso y
Difusión Basados en Radio**

Popayán, Enero de 2012

CONTENIDO

pág.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. ESPECTRO ENSANCHADO POR SALTO EN FRECUENCIA (FHSS).....	1
1.2.1. Generación FHSS.....	1
1.2.2. Interferencia en Sistemas FHSS.....	7
1.3. MODELOS TRADICIONALES DE RED.....	8
1.3.1. Modelo de Red Maestro/Esclavo.....	8
1.3.1.1. <i>Características</i>	9
1.3.1.2. <i>Limitaciones</i>	10
1.3.1.3. <i>Ventajas</i>	10
1.3.2. Modelo de Red Cliente/Servidor.....	10
1.3.2.1. <i>Características</i>	12
1.3.2.2. <i>Limitaciones</i>	13
1.3.2.3. <i>Ventajas</i>	13
1.3.3. Modelo de Red Peer to Peer.....	13
1.3.3.1. <i>Características</i>	14
1.3.3.2. <i>Limitaciones</i>	15
1.3.3.3. <i>Ventajas</i>	15
CAPÍTULO 2.WIRELESS INSITE®.....	16
2.1. INTRODUCCIÓN.....	16
2.2. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DE PREDICCIÓN DE COBERTURA: WIRELESS INSITE®.....	16
2.2.1. Características Principales.....	17
2.3. METODOS DE TRAZADO DE RAYOS.....	21
2.4. MODELOS DE PROPAGACIÓN BASADOS EN TRAZADO DE RAYOS.....	24
2.5. MODELO FULL 3D.....	24
2.5.1. Trazado de Rayos.....	25
2.5.2. Evaluación del Campo Eléctrico.....	27
2.6. MODELO DE ESPACIO LIBRE.....	27
2.6.1. Trazado de Rayos.....	28
2.6.2. Evaluación del Campo Eléctrico.....	28

CAPÍTULO 3. MODULO RADIO AC 4790	29
3.1 INTRODUCCIÓN	29
3.2 CARACTERÍSTICAS HARDWARE Y SOFTWARE DEL SDK AC4790.....	29
3.2.1. Modulo Radio AC4790	30
3.2.1.1. Especificaciones	30
3.2.1.2. Definición de Pines	31
3.2.1.3. Arquitectura Masterless	31
3.2.1.4. Modos de Operación del Módulo AC4790.....	32
3.2.1.5. Función de Control (API Control)	34
3.2.2. Tarjeta de Evaluación AC4790.....	35
3.2.2.1. Diagrama de la Tarjeta de Evaluación	35
3.2.2.2. Comunicación entre los Módulos AC4790.....	36
3.2.2.3. Configuración AC4790.....	37
3.2.2.4. Prueba de Rango.....	43
3.2.3. Antena	46
CAPÍTULO 4. EJECUCIÓN DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	48
4.1. INTRODUCCIÓN	48
4.2. ESCENARIOS DE PRUEBA	48
4.2.1. Exteriores (<i>Outdoor</i>).....	48
4.2.1.1. Predicción de Cobertura en <i>Wireless Insite</i>	49
4.2.2. Interiores (<i>Indoor</i>).....	57
4.2.2.1. Predicción de Cobertura en <i>Wireless Insite</i>	57
4.3. PRUEBAS DEL SISTEMA	68
4.3.1. Definición e implementación del sistema.....	68
4.3.2. Definición de Medidas y Pruebas	68
4.3.2.1. Medidas de Intensidad de Señal Recibida	69
4.3.2.2. Calculo de la Tasa de Errores de Bit.....	71
4.3.3. Resultados de las Pruebas	74
4.3.3.1. Calculo del Ancho de Banda	76
4.3.3.2. Niveles de Intensidad de Potencia Recibida	80
4.3.3.3. Pérdidas Básicas de Propagación en Exteriores e Interiores	82
4.3.3.4. Niveles de Potencia de Ruido y Densidad Espectral de Potencia de Ruido en exteriores e interiores	84
4.3.3.5. Desempeño a Nivel Físico del Sistema	85
4.3.4. Comparación del Nivel de Potencia	96
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	99
5.1. CONCLUSIONES	99
5.2. TRABAJO FUTURO.....	100

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	101
--------------------------------	-----

ANEXOS

Anexo A	Procedimiento para modelar entornos en espacio libre e interiores usando <i>Wireless Insite</i>
Anexo B	Simulación de un Sistema de Comunicaciones basado en FHSS

ÍNDICE DE FIGURAS

	pág.
Figura 1.1 Principio de Ensanchamiento.....	2
Figura 1.2 Transmisión de Bloques de Información en FHSS.....	3
Figura 1.3 Diagrama de Bloques del Sistema FHSS.....	4
Figura 1.4 Modelo de saltos en Frecuencia de FHSS.....	4
Figura 1.5 Principio de Espectro Ensanchado.....	5
Figura 1.6 Ejemplo de salto en frecuencia Lento.....	6
Figura 1.7 Ejemplo de salto en frecuencia Rápido.....	6
Figura 1.8 Modelo de Red Maestro/Esclavo.....	8
Figura 1.9 Modelo Maestro/Esclavo de una Comunicación <i>Bluetooth</i>	9
Figura 1.10 Modelo de Red Cliente/Servidor.....	11
Figura 1.11 Funcionamiento Básico del Modelo Cliente/Servidor.....	12
Figura 1.12 Modelo de Red <i>Peer to Peer</i>	14

Figura 2.1 Ventanas de <i>Wireless InSite</i> ®. (a) <i>Ventana Principal</i> . (b) <i>Vista del Proyecto</i> ..	17
Figura 2.2 Ventana Principal del software (<i>Main window</i>)	17
Figura 2.3 Definición de un área de estudio.....	20
Figura 2.4 Rayos principales entre el transmisor al receptor.....	21
Figura 2.5 Métodos de Trazado de Rayos, (a) método de la imagen, (b) método de lanzamiento de rayos.....	22
Figura 2.6 Algoritmo de lanzamiento de rayos SBR.....	23
Figura 2.7 Modelo de lanzamiento de rayos en dos dimensiones (2D) y en tres dimensiones (3D).....	23
Figura 2.8 Trayectoria de <i>Fermat</i>	26
Figura 2.9 Modelo de Propagación de Espacio Libre	27
Figura 3.1 Contenido del SDK AC4790.....	30
Figura 3.2 Diagrama de Distribución de los 50ms.....	32
Figura 3.3 Tarjeta de Evaluación SDK AC4790-200M	35
Figura 3.4 Funcionamiento de los módulos AC4790 integrados al SDK.	36
Figura 3.5 Ventana de configuración del Radio	37
Figura 3.6 Ventana de Prueba de Rango.....	43
Figura 3.7 Conexión inalámbrica entre los radios en Modo <i>Loopback</i>	44
Figura 3.8 Conexión inalámbrica entre los radios en Modo USB con un PC.....	44
Figura 3.9 Conexión inalámbrica entre los radios en Modo USB con dos PCs.	44
Figura 3.10 Diagrama de la antena.....	47
Figura 4.1 Escenario de Espacio libre - Exteriores (<i>Outdoor</i>)	49
Figura 4.2 Escenario de exteriores a) 2D b) 3D	50
Figura 4.3 Potencia recibida vs distancia para la simulación 1.....	51
Figura 4.4 Nivel de Potencia a lo largo de la ruta de receptores.	51
Figura 4.5 Pérdidas de propagación vs distancia para la simulación 1.	52
Figura 4.6 Potencia recibida vs distancia para la simulación 2.....	52
Figura 4.7 Nivel de potencia a lo largo de la ruta de receptores.....	53
Figura 4.8 Pérdidas de propagación vs distancia para la simulación 2.	53
Figura 4.9 Tiempo de Llegada vs. Retardo para todos los receptores.	54
Figura 4.10 Trazado de rayos para el escenario de exteriores.....	54
Figura 4.11 Acercamiento del trazado de rayos para exteriores en 3D	55
Figura 4.12 Vista en perspectiva del trazado de rayos para exteriores en 3D.....	55
Figura 4.13 Nivel de potencia en una grilla de recepción con 2318 puntos.....	55
Figura 4.14 Nivel de Potencia en una grilla de recepción con 1647 puntos.....	56
Figura 4.15 Escenario de Interiores (<i>Indoor</i>).....	57
Figura 4.16 Escenario de Interiores 2D.....	58
Figura 4.17 Escenario de Interiores 3D.....	58
Figura 4.18 Ubicación del Transmisor y de la Ruta de Recepción.	59
Figura 4.19 Vista del Área de Estudio sobre el escenario de Interiores 2D.....	60

Figura 4.20 Potencia Recibida vs. Distancia – Simulación 1.....	61
Figura 4.21 Trayectos de Propagación en el escenario de Interiores.....	61
Figura 4.22 Trayectos de Propagación en 3D en el escenario de Interiores.	62
Figura 4.23 Propiedades de un trayecto directo y (b) de un trayecto reflejado.....	62
Figura 4.24 Dispersión del Retador vs Distancia - Simulación 1.....	63
Figura 4.25 Tiempo de Llegada	64
Figura 4.26 (a) Ganancia del Trayecto. (b) Pérdidas de Propagación.....	65
Figura 4.27 Potencia Recibida con receptor de grilla XY	66
Figura 4.28 Potencia Recibida vs. Distancia del método SBR y Eigenray.....	67
Figura 4.29 Implementación del Sistema de Comunicación con el SDK AC4790.....	68
Figura 4.30 <i>Script</i> con los APIs de Transmisión y de Envío Completo de Datos.....	70
Figura 4.31 <i>Script</i> con el API de Recepción.....	70
Figura 4.32 Curva <i>CubicSpline</i> del RSSI	71
Figura 4.33 Relación E_b/N_0 a la entrada y a la salida del receptor	73
Figura 4.34 Ventana de Prueba de Rango en Recepción.	74
Figura 4.35 Ventana de Prueba de Rango API de Envío Completo de Datos.....	75
Figura 4.36 Ancho de Banda de 20 dB para la Banda Baja.	77
Figura 4.37 Ancho de Banda de 20 dB para la Banda Alta.	78
Figura 4.38 Ancho de Banda de 20 dB del canal 11.	79
Figura 4.39 Potencia recibida en exteriores.	80
Figura 4.40 Potencia Recibida en Interiores.	81
Figura 4.41 Pérdidas de propagación en Exteriores.	83
Figura 4.42 Pérdidas de propagación en Interiores.....	84
Figura 4.43 Desempeño de un sistema de comunicaciones basado en FHSS	85
Figura 4.44 Curva de desempeño del sistema de comunicación de datos en términos de la PER en exteriores.....	86
Figura 4.45 Curva de desempeño del sistema de comunicación de datos en términos de la BER en exteriores.....	87
Figura 4.46 Curvas de desempeño en términos de la PER en exteriores para variaciones de la carga útil de 58 bytes a 128 bytes.....	88
Figura 4.47 Curvas de desempeño en términos de la BER en exteriores para variaciones de la carga útil de 58 bytes a 128 bytes.....	88
Figura 4.48 Curva de desempeño del sistema de comunicación de datos en términos de la PER para interiores.	90
Figura 4.49 Curva de desempeño del sistema de comunicación de datos en términos de la BER para interiores.	90
Figura 4.50 Desempeño en términos de la PER para variaciones de la carga útil de datos de 58 bytes a 128 bytes en interiores.	91
Figura 4.51 Curvas de desempeño en términos de la BER en interiores para variaciones de la carga útil de datos de 464 bits y 1024 bits en interiores.	92

Figura 4.52 Curvas de desempeño en términos de la PER para interiores y exteriores. ...	93
Figura 4.53 Curvas de desempeño en términos de la BER en interiores y exteriores.	93
Figura 4.54 Montaje del sistema para evaluar el desempeño bajo condiciones de interferencia.	94
Figura 4.55 Relación Portadora Interferencia vs. Tasa de Error de Paquete (PER).	95
Figura 4.56 Relación Portadora Interferencia vs. Tasa de Error de Bit (BER).	95
Figura 4.57 Comparación del Nivel de Potencia Recibido Real y de <i>Wireless Insite</i> en Exteriores.	97
Figura 4.58 Comparación del nivel de potencia recibido real y de simulación en <i>Wireless Insite</i> en Interiores.	98

ÍNDICE DE TABLAS

	pág.
Tabla 2.1 Clasificación de Materiales.....	18
Tabla 2.2 Capacidades soportadas por el Modelo <i>Full 3D</i>	25
Tabla 2.3 Capacidades soportadas por el Modelo de Espacio Libre.....	27
Tabla 3.1 Especificaciones del módulo radio AC4790.....	30
Tabla 3.2 Definición de Pines.....	31
Tabla 3.3 Tabla de verdad del Contador de Sesión.....	33
Tabla 3.4 Formato del API de transmisión de Paquetes.....	34
Tabla 3.5 Formato del API de Envío Completo de Datos.....	34
Tabla 3.6 Formato del API de Recepción de Paquetes.....	34
Tabla 3.7 Valor de los Parámetros de la Sección Interfaz Radio.....	39
Tabla 3.8 Configuración del Canal RF.....	39
Tabla 3.9 Valor de los Parámetros de la sección Radio RF.....	41
Tabla 3.10 Valor de los Parámetros de la sección Características Radio.....	42
Tabla 3.11 Función y Configuración para la Selección de Prueba.....	45
Tabla 3.12 Propiedades Eléctricas de la Antena.....	47
Tabla 3.13 Propiedades Mecánicas de la Antena.....	47
Tabla 4.1 Parámetros Configurados en exteriores.....	50
Tabla 4.2 Materiales de las estructuras del escenario.....	58

Tabla 4.3 Formato del paquete transmitido.....	70
Tabla 4.4 Intensidad de Señal Recibida.....	70
Tabla 4.5 Resultados de la prueba para exteriores.....	76
Tabla 4.6 Resultados de la prueba para interiores.....	76
Tabla 4.7 Intensidad de Potencia Recibida en exteriores.....	80
Tabla 4.8 Intensidad de Potencia Recibida en Interiores	81
Tabla 4.9 Exponentes típicos de pérdidas de propagación.	82
Tabla 4.10 Pérdidas de Propagación en Exteriores.	83
Tabla 4.11 Pérdidas de Propagación en Interiores.	83
Tabla 4.12 Medidas de la Potencia de ruido para los escenarios considerados.....	84
Tabla 4.13 Densidad espectral de potencia de ruido para los escenarios considerados. .	84
Tabla 4.14 Resultados de desempeño del sistema de comunicación en exteriores.	86
Tabla 4.15 Resultados de desempeño del sistema de comunicación en interiores.	89
Tabla 4.16 Resultados de desempeño del sistema de comunicación bajo condiciones de interferencia.....	95
Tabla 4.17 Niveles de potencia recibida real y de simulación para exteriores.....	96
Tabla 4.18 Niveles de potencia recibida real y de simulación para Interiores.....	98
Tabla 5.1 Niveles de la relación E_b/N_0 para obtener una BER de 10^{-3}	99

LISTA DE ACRÓNIMOS

ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i> , Código Estadounidense Estándar para el Intercambio de Información.
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i> , Ruido Gaussiano Blanco Aditivo.
BER	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit.
CIR	<i>Carrier to Interference Ratio</i> , Relación Portadora a Interferencia.
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i> , Verificación de Redundancia Cíclica.
CTS	<i>Clear to Send</i> , Listo para Enviar.
DES	<i>Data Encryption Standard</i> , Algoritmo de Cifrado de Datos.
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> , Espectro Ensanchado por Secuencia Directa.
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i> , Memoria de Solo Lectura Eléctricamente Programable y Borrable.
FCC	<i>Federal Communications Commission</i> , Comisión Federal de Comunicaciones.
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i> , Espectro Ensanchado por Saltos en Frecuencia.
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Frecuencia.
GO	<i>Geometrical Optics</i> , Óptica Geométrica.
GTD	<i>Geometric Theory of Diffraction</i> , Teoría Geométrica de la Difracción.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
ISI	<i>Inter Symbol Interference</i> , Interferencia entre Símbolos.
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i> , Industrial, Científica y Médica.
LOS	<i>Line of Sight</i> , Línea de Vista.
LSB	<i>Least Significant Bytes</i> , Bytes Menos Significativos.
MAC	<i>Media Access Control</i> , Control de Acceso al Medio.

MFSK	<i>M-ary Frequency Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Frecuencia de Orden M.
NF	<i>Noise Figure</i> , Figura de Ruido.
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i> , Fabricantes de Equipos Originales.
P2P	<i>Peer to Peer</i> , Igual a Igual.
PN	<i>Pseudo Noise</i> , Pseudo Ruido.
PER	<i>Packet Error Rate</i> , Tasa de Error de Paquete.
RF	<i>Radio Frequency</i> , Radio Frecuencia.
RSSI	<i>Receive Signal Strength Indication</i> , Indicador de Intensidad de Señal Recibida.
RS-232	<i>Recommended Standard 232</i> , Estándar Recomendado 232.
RS-485	<i>Recommended Standard 485</i> , Estándar Recomendado 485.
RTS	<i>Request to Send</i> , Solicitud para Enviar.
SDK	<i>Software Development Kit</i> , Kit de Desarrollo de Software.
SBR	<i>Shooting-and-Bouncing Ray</i> , Disparo y Rebote de Rayo.
SS	<i>Spread Spectrum</i> , Espectro Ensanchado.
TCP/IP	<i>Transmissions Control Protocol/ Internet Protocol</i> , Protocolo de Control de Transmisión/ Protocolo de Internet.
TTL	<i>Transistor Transistor Logic</i> , Lógica Transistor a Transistor.
USB	<i>Universal Serial Bus</i> , Bus Universal Serial.
UTD	<i>Uniform Theory of Diffraction</i> , Teoría Uniforme de Difracción.
UWB	<i>Ultra Wide Band</i> , Banda Ultra Ancha.
WPAN	<i>Wireless Personal Área Networks</i> , Red de Área Personal Inalámbrica.

INTRODUCCIÓN

La demanda de nuevos y mejores servicios de telecomunicaciones a través de las redes inalámbricas es cada vez mayor, lo cual implica mejores condiciones en la prestación del servicio, que garanticen el establecimiento de la comunicación y la seguridad de las redes. Las técnicas utilizadas para la transmisión de datos, como lo son las técnicas de Espectro ensanchado, se encuentran ampliamente relacionadas con este aspecto y entran a jugar un papel muy importante en la confiabilidad e integridad que pueda garantizarse en las comunicaciones. Las técnicas de espectro ensanchado han sido muy utilizadas desde hace varios años, en las Redes de Área Local Inalámbrica (WLAN, *Wireless Local Area Networks*), para la transmisión de los datos de una manera segura y eficaz. Existen dos técnicas muy utilizadas en los sistemas de espectro ensanchado, ellas son: Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*) y Espectro Ensanchado por Salto en Frecuencia (FHSS, *Frequency Hopping Spread Spectrum*), la cual hace parte del enfoque principal del presente trabajo de grado.

El presente trabajo de grado está dirigido a superar las limitaciones encontradas en la versión inicial [1]. Para ello aborda el estudio con un enfoque diferente, al hacer uso de una herramienta software de predicción de propagación y al considerar la evaluación y análisis del desempeño del sistema de comunicación de datos vía radio en la banda de 900 MHz utilizando el modelo *Peer-to-Peer*¹, y de esta manera determinar en qué medida la utilización de este modelo para el establecimiento, sincronización y control de las sesiones de comunicación, mejora el desempeño a nivel físico de un sistema de comunicación de datos vía radio, elementos que no se consideraron en el trabajo citado y anteriores trabajos.

El documento final de trabajo de grado incluye 4 capítulos: el primer capítulo corresponde a una contextualización en torno a la temática de la tecnología FHSS y los modelos tradicionales de red, en el segundo capítulo se presenta una descripción de la herramienta de propagación Wireless InSite®, la temática relacionada a los métodos de trazado de rayos junto a los modelos de propagación basados en trazado de rayos, en el tercer capítulo se hace mención a las características y especificaciones del kit de evaluación y desarrollo utilizado en las pruebas de campo para el establecimiento del sistema de comunicación de datos, el cuarto capítulo presenta los resultados obtenidos de la simulación realizada a partir del uso de la herramienta software de predicción de propagación, la descripción de las pruebas de campo realizadas, los resultados obtenidos junto con el análisis correspondiente y la comparación del nivel de potencia recibida en los dos escenarios propuestos, con los resultados obtenidos mediante la herramienta de predicción de propagación. Finalmente en el quinto capítulo se encuentran las conclusiones y los trabajos futuros.

¹ Modelo *Peer to Peer* es una arquitectura en la cual cada nodo tiene capacidades y responsabilidades equivalentes (de igual a igual), donde cualquier nodo (Transmisor/Receptor) del sistema de comunicación puede establecer y controlar una sesión de comunicación, a diferencia del sistema clásico maestro/esclavo

Acompaña al documento principal dos anexos A y B, en los cuales respectivamente se describe los pasos a seguir para crear cada uno de los dos escenarios modelados en la herramienta de predicción de propagación y una simulación del sistema en la herramienta *Matlab* que se utilizó para comparar los resultados ideales con los obtenidos experimentalmente en los escenarios considerados.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

Los inicios de los sistemas de comunicaciones de espectro ensanchado tuvieron lugar a finales de la segunda guerra mundial, siendo utilizados inicialmente en aplicaciones de uso militar, en navegación y sistemas de orientación, con el fin de evitar la interceptación (*jamming*) y la captación de las comunicaciones garantizando la seguridad e inmunidad al ruido [2]. Dado que estos sistemas, presentan una gran resistencia ante la interferencia (de banda estrecha), el bloqueo y la interceptación, también, pueden ser usados como técnica de acceso múltiple, para compartir recursos de un sistema y la misma banda espectral entre diferentes usuarios [3], [4].

En este capítulo se presenta una amplia descripción del funcionamiento y de las características más importantes de la técnica en mención y también se consideran los diferentes modelos utilizados en la implementación de las redes inalámbricas, entre ellos el modelo *Peer to Peer*, resaltando las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

1.2. ESPECTRO ENSANCHADO POR SALTO EN FRECUENCIA (FHSS)

La técnica de transmisión de Espectro Ensanchado fue adoptada por las *WLAN* principalmente, debido a que las primeras bandas de frecuencia sin licenciar adaptadas para radiocomunicaciones de alta velocidad fueron las bandas Industriales, Científicas y Médicas (*ISM, Industrial, Scientific and Medical*), en las cuales era permitido operar, bajo la condición de utilizar la técnica en mención. Además, en tecnologías como *Bluetooth, Zigbee* y de Banda Ultra ancha (*UWB, Ultra Wide Band*), Redes de Área Personal Inalámbrica (*WPAN, Wireless Personal Area Networks*), esta técnica es muy empleada debido a su fácil implementación y al bajo consumo de energía que presenta [5]. Entre estas técnicas, se encuentra la Técnica de Espectro Ensanchado por Salto en Frecuencia *FHSS*, que es ampliamente utilizada en la actualidad, en sistemas de comunicación inalámbrica debido a las ventajas que presenta ante condiciones de interferencia [6].

1.2.1. Generación FHSS

La técnica *FHSS* es un método de transmisión de señales de radio que consiste en tomar la señal de información y modularla para luego transmitirla realizando saltos en frecuencia en función del tiempo dentro de un ancho de banda asignado [7]. Estos saltos son realizados de manera rápida o lenta, de acuerdo a una secuencia pseudo aleatoria conocida por el transmisor y el receptor y es considerada de Espectro Ensanchado puesto que los saltos en frecuencia se realizan dentro de un ancho de banda superior al de la

señal original [4]. Este ensanchamiento del espectro, que consiste en distribuir la potencia de una señal en un ancho de banda mayor al de la información, se lleva a cabo cuando a la señal de información se le agrega un código pseudo aleatorio con una velocidad de transmisión mayor; de manera que se obtiene una señal con una densidad de potencia comparable al ruido, requiriendo un ancho de banda amplio en relación con la información en banda base; este concepto de ensanchamiento puede observarse gráficamente en la Figura 1.1 [7], [1].

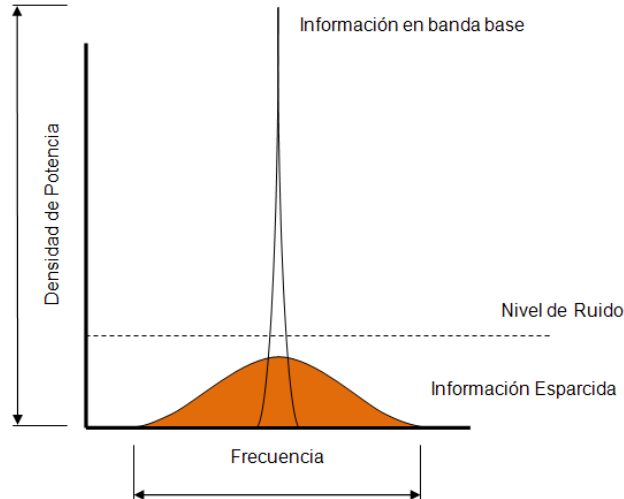


Figura 1.1 Principio de Ensanchamiento

En ese sentido, una señal con un ancho de banda B , al ser ensanchada, emplea una banda n veces mayor, siendo n el número de frecuencias portadoras utilizadas, como se nota en la ecuación 1.1, [1]. Por ejemplo, si la frecuencia central cambia de manera aleatoria entre 100 diferentes frecuencias, el ancho de banda necesario para la transmisión es 100 veces más grande que el ancho de banda utilizado para transmitir la señal original, es decir, su espectro es ensanchado [5] y el factor de ensanchamiento está determinado de acuerdo al nivel de seguridad requerido en la comunicación en un rango de 10 a 1000 veces respectivamente [8].

$$W_{ss}[\text{Hz}] = N[\text{veces}] \cdot \Delta f_{ch}[\text{Hz}] \quad (1.1)$$

Dónde:

W_{ss} : Ancho de banda disponible.

N : Número de canales de frecuencia o portadoras disponibles.

Δf_{ch} : Ancho de banda de canal.

Durante la transmisión, claramente debe seguirse una secuencia de saltos en frecuencia, generada independientemente de la señal por un código pseudo aleatorio denominado secuencia de pseudo-ruido (PN, *PseudoNoise*); la longitud de la secuencia determina el número de canales disponibles, como se aprecia en la ecuación 1.2 y debe ser conocida por el transmisor y el receptor antes de dar inicio a la transmisión [1].

$$N = 2^k \quad (1.2)$$

Dónde:

N : Número de canales disponibles.

k : Numero de bits de la secuencia pseudo aleatoria.

El concepto fundamental de la técnica FHSS, radica en la división de la información en varios bloques de datos de tamaño fijo que son transmitidos posteriormente de manera secuencial de acuerdo a un patrón específico y en distintas frecuencias de portadora, tal como se aprecia en la Figura 1.2 en donde también se observa el uso de múltiples frecuencias a lo largo de la transmisión. Una vez establecida la comunicación, el transmisor envía un bloque en una portadora y a continuación, como se observa en la Figura 1.2, salta a la siguiente frecuencia en la secuencia; cada canal es utilizado por un corto periodo de tiempo, denominado periodo de salto, después del cual la frecuencia de transmisión cambia para realizar un nuevo envío [1].

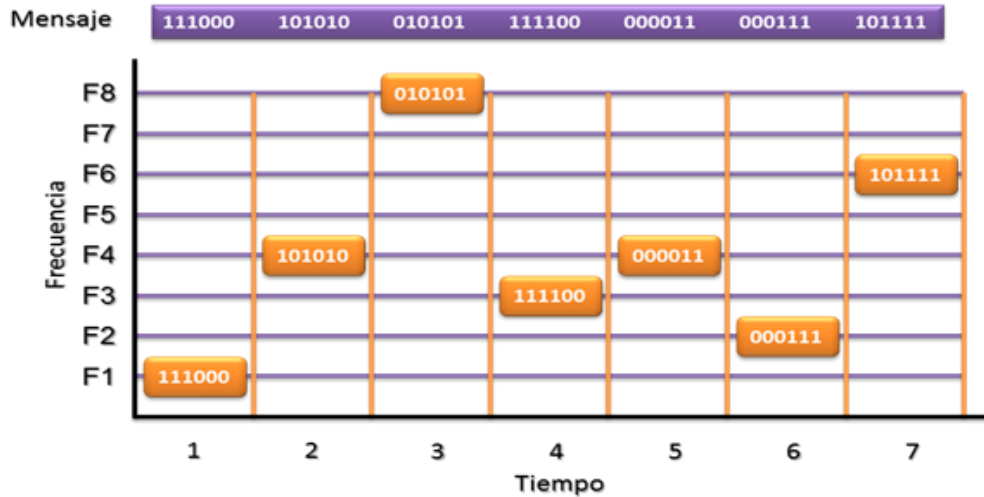


Figura 1.2 Transmisión de Bloques de Información en FHSS.

Por su parte el receptor para recibir correctamente la señal debe de disponer del mismo patrón de salto y estar en sincronía con el transmisor para conocer las frecuencias de la señal en el momento correcto, es decir, el generador de pseudo ruido debe estar sincronizado con la señal recibida y así generar la misma secuencia PN que le fue aplicada a la información al ser transmitida, para demodular la señal resultante y de esta forma obtener la información original [7], [9]. Para obtener una señal FHSS, la señal de información debe ser modulada después de que un generador de código de pseudo ruido PN, que es alimentado dentro de un sintetizador de frecuencia, genera la secuencia de salto, de esta manera se obtiene una señal portadora con diferentes frecuencias acorde con la secuencia de saltos. Esta señal resultante es la señal FHSS que se va a transmitir, como se observa en el diagrama de bloques de un Sistema FHSS, representado en la Figura 1.3, [5].

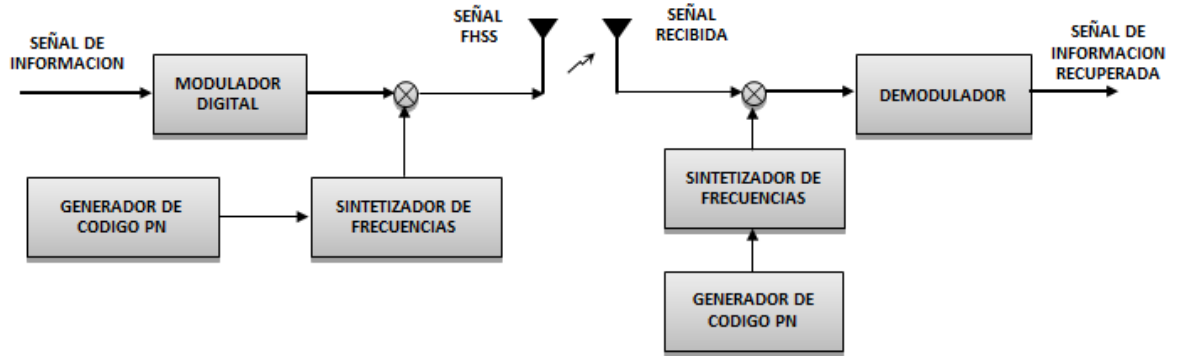


Figura 1.3 Diagrama de Bloques del Sistema FHSS

En la Figura 1.4 se observa la operación en tiempo y frecuencia de dos sistemas transmitiendo de manera simultánea pero con una secuencia de salto diferente. Las secuencias asignadas a cada transmisor son diferentes, de tal manera que exista una baja probabilidad de interferencia Cocanal, es decir, que las dos estén utilizando el mismo canal. Se aprecia que en cada instante de tiempo, las transmisiones son realizadas en una frecuencia distinta [6].

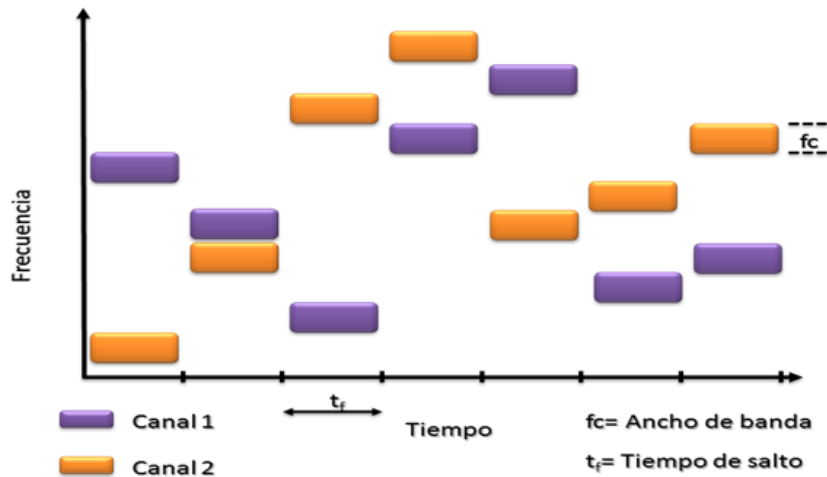


Figura 1.4 Modelo de saltos en Frecuencia de FHSS.

Hay dos aspectos a tener en cuenta en un sistema FHSS, el primero se relaciona con la ecuación 1.1 y establece que el ancho de banda del sistema FHSS es actualmente el número de frecuencias disponibles. Así, el ensanchamiento es dependiente del número de frecuencias disponibles para los saltos en frecuencia y del ancho de banda de cada canal. El segundo aspecto hace referencia a la velocidad de salto, la cual determina la robustez del sistema y depende de la velocidad de transmisión de datos de la señal de información y del número de bits por símbolo, como se nota en la ecuación 1.3, [1].

$$R_s \left[\frac{\text{simbolo}}{\text{s}} \right] = \frac{R_b [\text{bit/s}]}{K [\text{bit/simbolo}]} \quad (1.3)$$

Dónde:

R_s : Tasa de símbolos.

R_b : Velocidad de transmisión de datos.

K : Número de bits por símbolo.

El número de bits por símbolo está determinado por la ecuación 1.4.

$$K = \text{Log}_2 M \quad (1.4)$$

Dónde:

M : es el orden de modulación.

En la Figura 1.5 se observa un ejemplo de una señal FHSS en la que el ancho de banda es dividido en 8 canales, cada uno con su respectiva portadora. Sobre cada canal se encuentra ubicado un número que indica el orden en que se va a transmitir su portadora, así por ejemplo la portadora f_1 va a ser la quinta en utilizarse para transmitir información, mientras f_2 será la octava y así sucesivamente. De esta forma se observa que la transmisión de información en esta técnica, se efectúa en pequeños fragmentos.

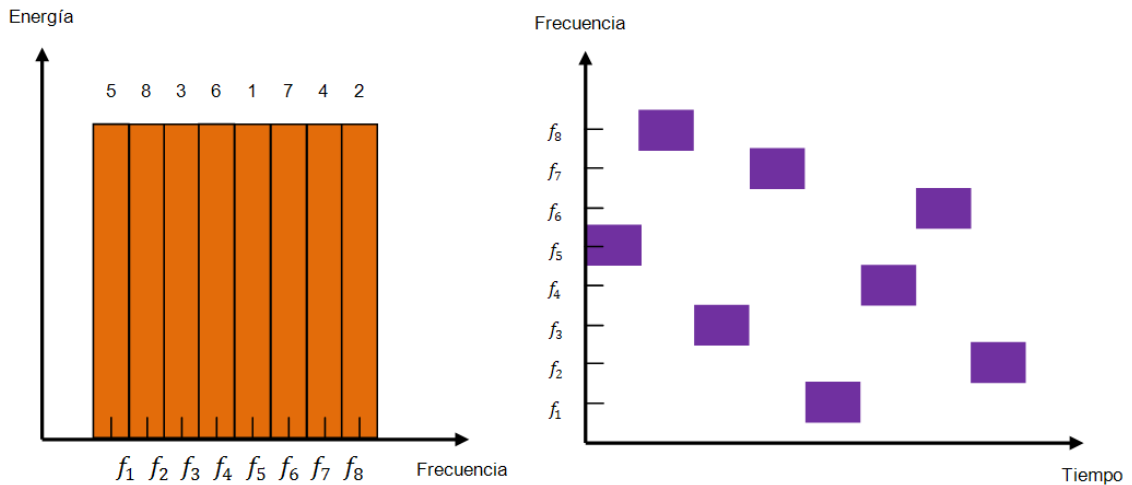


Figura 1.5 Principio de Espectro Ensanchado.

La velocidad de salto puede ser clasificada en dos tipos: salto lento, en el cual se transmiten múltiples símbolos en la misma frecuencia, es decir, la frecuencia de saltos del sistema es menor o igual que la tasa de símbolos como se describe en el ejemplo de la Figura 1.6 y salto rápido como se ilustra en la Figura 1.7, el cual se caracteriza por transmitir cada símbolo en múltiples frecuencias, lo cual significa que la frecuencia de saltos es mayor que la tasa de símbolos [1], [8].

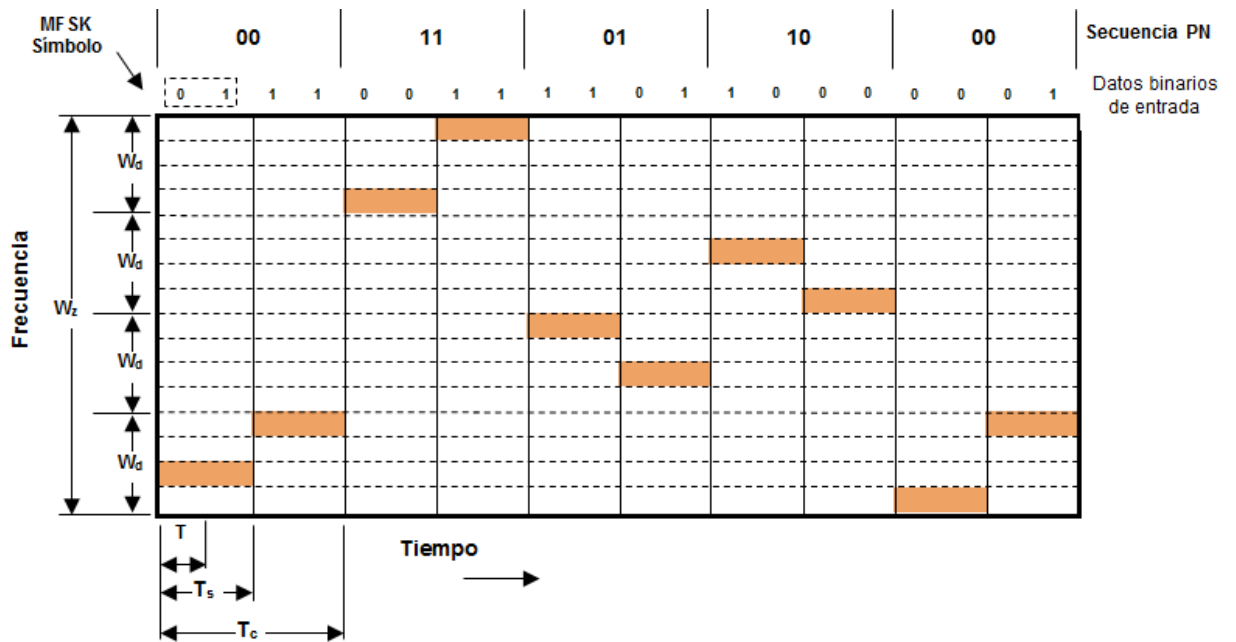


Figura 1.6 Ejemplo de salto en frecuencia Lento

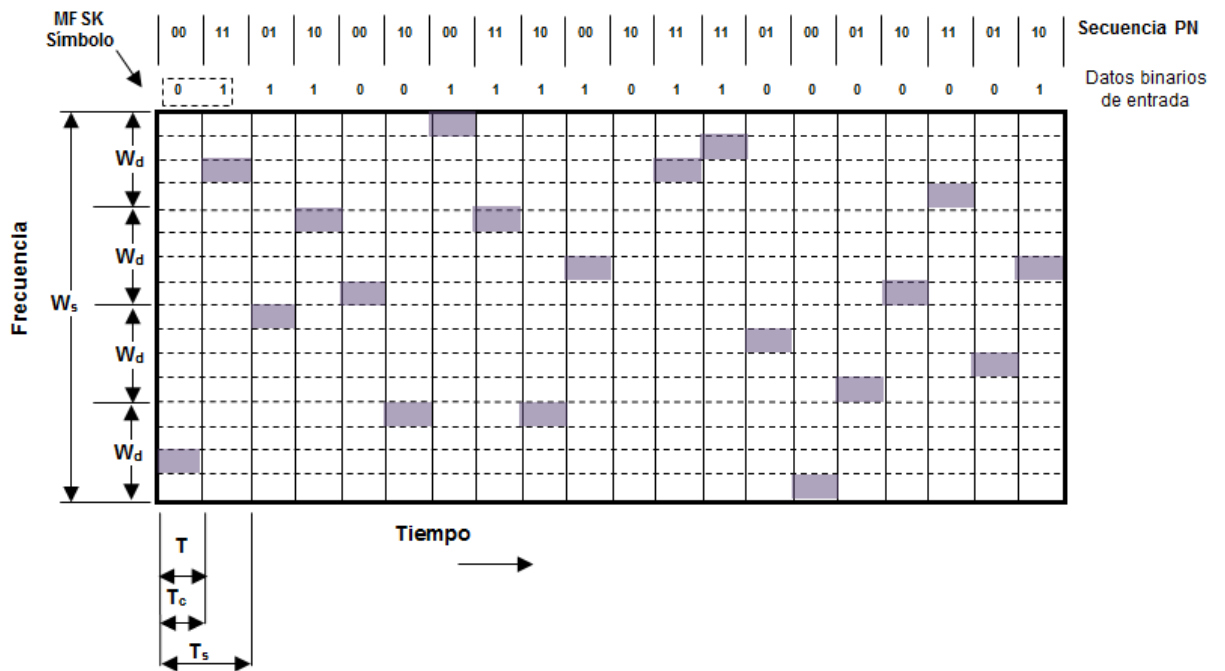


Figura 1.7 Ejemplo de salto en frecuencia Rápido

En ambas figuras se utiliza modulación MFSK con $M=4$, lo cual significa que se hace uso de 4 diferentes frecuencias para codificar la entrada de 2 en 2 bits, indicando que cada símbolo de la señal de entrada está conformado por dos bits. En las Figura 1.6 y Figura 1.7, T_c corresponde al tiempo durante el cual se encuentra activa cada portadora, mientras que T es la duración de un bit de la señal de entrada y T_s es la duración de cada símbolo. Así, se observa que en la Figura 1.6 que corresponde a FHSS de salto lento, dos bits de información que forman un símbolo se envían en la misma portadora; mientras que en FHSS de salto rápido sólo se envía un bit en una portadora, es decir, que se tiene que utilizar dos portadoras para enviar un solo símbolo de dos bits [7].

1.2.2. Interferencia en Sistemas FHSS

En un sistema FHSS, las transmisiones pueden compartir una banda de frecuencia con las transmisiones convencionales con una presencia mínima de interferencia. Las señales con salto en frecuencia agregan un nivel mínimo de ruido a las comunicaciones de banda estrecha y viceversa [6]. En ese sentido, una de las ventajas de la técnica FHSS es que ofrece la posibilidad de que varios usuarios empleen la misma banda de frecuencia, utilizando un patrón de salto diferente que evite problemas de interferencia; el cambio periódico de frecuencia de la portadora reduce la interferencia producida por otra señal de banda estrecha, de manera que el sistema solo se vea afectado en caso de que ambas señales se transmitan en la misma frecuencia y en el mismo instante de tiempo. De esta forma si dos patrones de salto nunca emplean la misma frecuencia se dice que son ortogonales [7].

Por otra parte, al hacer referencia al desvanecimiento selectivo en frecuencia, hay que mencionar que este desvanecimiento multitrayecto (o selectivo), puede darse como resultado de reflexiones sobre la superficie, o inducidas por anomalías atmosféricas como fuertes gradientes de conducción. Los impactos del desvanecimiento por multitrayecto en la radio digital se pueden resumir brevemente:

- Decremento de la relación señal/ruido y por tanto un incremento de la relación de error de bit (BER).
- Decremento de la relación portadora/interferencia (CIR) y por tanto el aumento de la BER.
- Distorsión de la forma de onda de un pulso digital, provocando una mayor interferencia entre símbolos y una mayor BER.

Claramente, la dispersión por multitrayecto puede degradar seriamente el funcionamiento y causar cortes e interrupciones en un sistema de radio por medio de diversos mecanismos [10].

FHSS permite la coexistencia de varias transmisiones en la misma banda de frecuencia, usando diferentes secuencias de salto. Diferentes usuarios podrían ser miembros de la misma red, siguiendo un patrón de salto coordinado o de dos redes diferentes cada una con su propio patrón. Por ejemplo, IEEE802.11 FHSS y *Bluetooth* usan el mismo ancho de banda de 1 MHz y los mismos 79 canales en la banda de 2.4 GHz, es decir, ambas

tecnologías coexisten en la misma banda y solo habría presencia de interferencia en el caso en que dos usuarios diferentes transmitan sobre la misma frecuencia de salto; caso en el que se produciría una colisión y como resultado el receptor observaría una señal interferente en la señal. Sin embargo, puede darse solución a estas colisiones, utilizando técnicas de detección y/o corrección de errores y solicitudes de retransmisión. En este caso, la retransmisión es llevada a cabo unos instantes después y en otra frecuencia portadora [6]. Además, si los códigos son sincronizados y los patrones de salto son seleccionados de tal manera que dos usuarios nunca salten a la misma frecuencia al mismo tiempo, este tipo de interferencia puede considerarse eliminada o de baja probabilidad [5].

1.3. MODELOS TRADICIONALES DE RED

Las redes inalámbricas pueden ser implementadas utilizando diferentes modelos, relaciones o arquitecturas de red. Los modelos de red pueden variar de acuerdo a:

- La Posición del nodo/dispositivo.
- Niveles de control sobre los recursos compartidos
- Mecanismos de comunicación, sincronización e intercambio de recursos y servicios.

A continuación se presentan los modelos de red usualmente empleados.

1.3.1. Modelo de Red Maestro/Esclavo

El modelo de red Maestro/Esclavo es un modelo en el cual un dispositivo o proceso designado como el maestro, ejerce el control total sobre uno o más dispositivos o procesos llamados esclavos. Una vez la relación Maestro/Esclavo es establecida, la dirección de control siempre va desde el maestro al (a los) esclavo(s) y la transferencia de datos es bidireccional como se indica en la Figura 1.8.

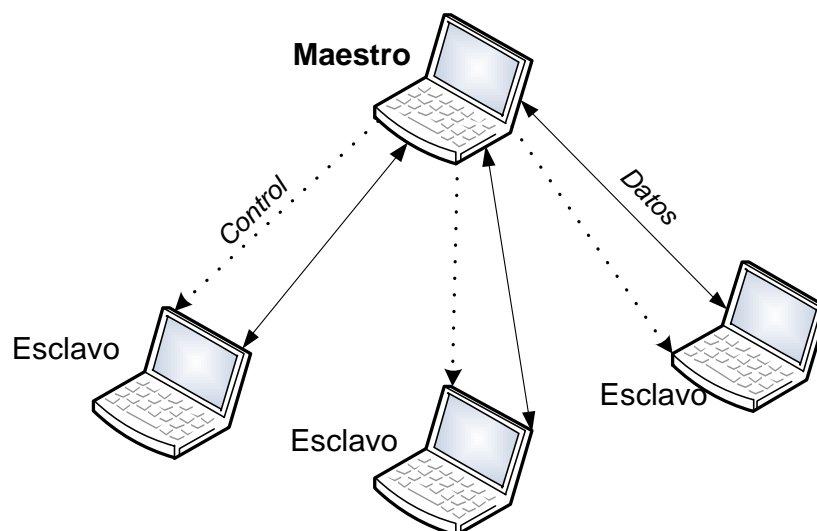


Figura 1.8 Modelo de Red Maestro/Esclavo

En la Figura 1.8 se observa este modelo como un sistema en el cual existe un nodo central, maestro, controlando todos los demás nodos, los esclavos. Usualmente el maestro manda al esclavo que debe hacer y éste obedece; el maestro le envía peticiones y el esclavo responde de acuerdo a lo que le pida el maestro. Este modelo es muy útil para distribuir la carga de trabajo [11], cuando se tienen varios procesos, que no requieren ejecutarse a la vez y no dependen el uno del otro y es apropiado para redes de computadores donde la disponibilidad es limitada [12]. Por ejemplo, un maestro tiene un número de trabajos o tareas independientes que necesitan ser ejecutadas, éste envía dichos trabajos o tareas por separado a cada esclavo. El esclavo procesa su trabajo o tarea y envía los resultados al maestro. Finalmente el maestro integra los resultados de cada esclavo en su base de datos y cumple su función.

1.3.1.1. Características

Es un modelo simple comúnmente utilizado en aplicaciones concurrentes o paralelas [13], en arquitecturas de redes de computadores, redes sincrónicas, y en la tecnología *Bluetooth*² tal como se muestra en la Figura 1.9, entre otras aplicaciones [13]. Una arquitectura de este tipo está organizada alrededor de un maestro, el cual crea o posee un número determinado de esclavos. Cada esclavo está conectado directamente al maestro y cualquier comunicación entre esclavos se realiza a través del maestro. Una vez establecida la relación Maestro/Esclavo, la jerarquía impone la dirección de control del maestro sobre los esclavos. La única comunicación desde los esclavos es para enviar los resultados del trabajo o tarea asignada y usualmente no hay dependencias fuertes entre las tareas realizadas por los esclavos, por lo que es casi nula la comunicación entre esclavos.

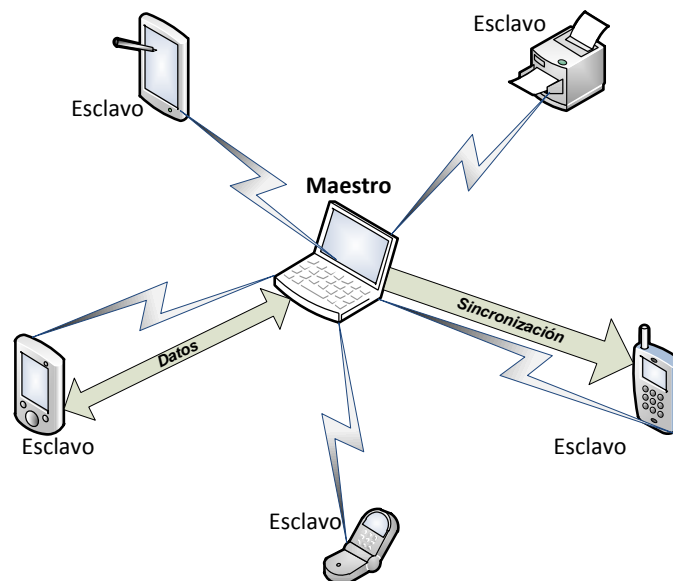


Figura 1.9 Modelo Maestro/Esclavo de una Comunicación *Bluetooth*

² El principio de comunicación de la tecnología *Bluetooth* se basa en el modelo de operación Maestro/Esclavo. Una piconet o pico-red contiene un dispositivo maestro y hasta siete esclavos activos, y está conformada por todas las comunicaciones que se llevan a cabo sólo entre el maestro y los esclavos.

El modelo Maestro/Esclavo está basado en la estrategia “divide y vencerás” en la cual, el maestro delega tareas a uno o más esclavos que a su vez están distribuidos en toda la red y trabajan en paralelo [14]. Este modelo requiere mecanismos de asignación de tareas, distribución de datos, y de control del maestro sobre los esclavos.

1.3.1.2. Limitaciones

A continuación se nombran las principales limitaciones o desventajas del modelo Maestro/Esclavo:

- Es un sistema centralizado, lo que indica que la comunicación es totalmente dependiente de un único nodo, el maestro, si éste último falla, la comunicación se cae por completo.
- La comunicación siempre es iniciada por el maestro, por lo que el esclavo siempre tiene que esperar las solicitudes del maestro.
- Se pueden generar cuellos de botella ya que todas las comunicaciones requieren pasar a través del maestro.
- No existe comunicación directa entre los esclavos.

1.3.1.3. Ventajas

Las ventajas o beneficios del modelo Maestro/Esclavo son:

- Simplicidad: El modelo Maestro/Esclavo es fácil de implementar, usualmente no se requieren equipos especiales o complejos.
- Control Centralizado: el nodo maestro se encarga de establecer y controlar la comunicación y el acceso a los recursos de la red, entonces si un nodo esclavo falla o es inalcanzable, la comunicación de los demás nodos de la red no se ve afectada.
- Distribución de la carga: el maestro asigna tareas para que sean resueltas por los diferentes esclavos de forma simultánea. Estas tareas son independientes entre sí, por lo que no se requiere comunicación y coordinación entre los esclavos.
- Flexibilidad: Se pueden agregar o quitar nodos esclavos de forma dinámica.

El modelo Maestro/Esclavo no es adecuado para el sistema de comunicación de datos vía radio que se desea implementar en el desarrollo del presente trabajo de grado, puesto que dicho modelo no satisface un requerimiento básico del sistema, el cual determina que cualquier nodo (Transmisor/Receptor) tenga la capacidad de establecer y controlar una sesión de comunicación.

1.3.2. Modelo de Red Cliente/Servidor

En este modelo, un nodo de la red actúa como el servidor y los demás nodos como los clientes que se conectan a dicho servidor (no un cliente con otro directamente). Por lo general el servidor es quien lleva a cabo la mayoría de tareas de procesamiento, está activado y en espera de las solicitudes del cliente [15]. Cuando los clientes quieren enviar instrucciones o datos al servidor, estos inician una conexión con él. Por lo tanto el diagrama de este modelo puede representarse como una estrella, con el servidor como

nodo central y conexiones hacia cada uno de los clientes, como se muestra en la Figura 1.10.

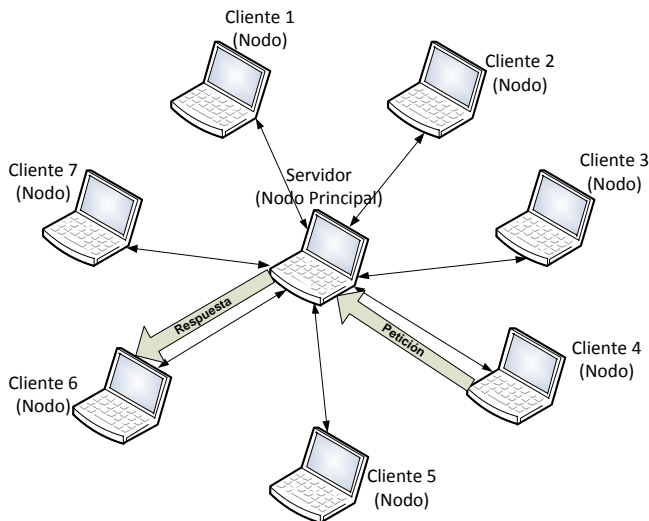


Figura 1.10 Modelo de Red Cliente/Servidor

El modelo Cliente/Servidor es similar al modelo maestro/esclavo, ya que también cuenta con un nodo central, llamado servidor, el cual atiende a uno o a múltiples clientes. Sin embargo, la funcionalidad de los clientes con respecto a la de los esclavos es mejorada ya que tienen autonomía en el proceso de comunicación. A pesar de lo anterior, su funcionalidad es limitada, ya que los clientes no pueden comunicarse, sincronizarse o compartir recursos entre sí.

Algunas definiciones del modelo de red cliente/servidor mencionadas usualmente son:

- El modelo de red Cliente/Servidor, es básicamente una red centralizada, que está compuesta de un sistema de mayor desempeño, el servidor, y de varios sistemas de menor desempeño, los 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].
- Una arquitectura Cliente/Servidor es una arquitectura de red en la que cada computador o proceso de la red es o bien un cliente o un servidor. Los servidores son computadores o procesos potentes dedicados a gestionar las unidades de disco (servidores de archivos), las impresoras (servidores de impresión), o el tráfico de la red (servidores de red). Por su parte, los clientes son equipos o estaciones de trabajo sobre las cuales los usuarios ejecutan las aplicaciones [17].

La Figura 1.11, ilustra el funcionamiento básico de este modelo, el cliente es una estación de trabajo que usa los recursos y solicita los servicios que ofrece la red y el servidor es el nodo que hace disponibles los servicios y recursos de la red [18]. El cliente solicita un recurso determinado del servidor y el servidor provee al cliente el recurso requerido. El cliente y el servidor usualmente operan en dispositivos independientes, pero inclusive un

único dispositivo puede actuar como un cliente y otras veces como servidor dependiendo de las condiciones de comunicación, por lo que el cliente y el servidor son solo simples roles que cumplen los dispositivos.

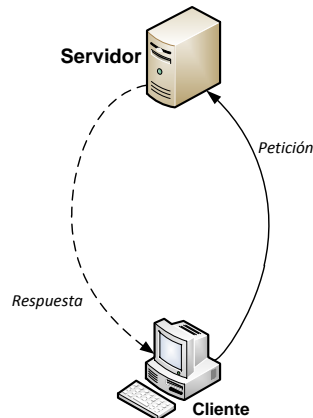


Figura 1.11 Funcionamiento Básico del Modelo Cliente/Servidor

Este modelo también es utilizado en muchos sistemas FHSS, para coordinar la secuencia del salto. Un transceptor³ es configurado como servidor y puede haber uno o más transceptores, configurados como clientes. Para establecer sincronización entre el servidor y el(los) cliente(s), el servidor envía una baliza⁴ (*beacon*). Una vez se detecta la baliza, el cliente sincroniza su salto en frecuencia al servidor [19].

El modelo Cliente/Servidor ha sido ampliamente utilizado en aplicaciones distribuidas, aplicaciones web, servicios web, aplicaciones comerciales sobre Internet [20], a nivel de transporte y de red: protocolo TCP/IP, en redes de computadores, redes inalámbricas, transmisión entre otras.

1.3.2.1. Características

- El modelo Cliente/Servidor es un modelo de red centralizado, ya que el nodo servidor es el que gestiona, monitorea y mantiene todos los recursos y servicios de la red. Los clientes no se comunican entre sí, solo con el nodo servidor.
- En este modelo, el servidor espera pasivamente las solicitudes del cliente y responde a ellas. Generalmente un servidor puede procesar múltiples peticiones al mismo tiempo.
- En el modelo Cliente/Servidor, el servidor usualmente es el dispositivo o proceso más complejo y potente de toda la red. Los clientes en general son dispositivos o procesos más simples.

³ Un transceptor es un dispositivo que realiza funciones tanto de transmisión como de recepción de señales, estas funciones se combinan y comparten una circuitería común.

⁴ Una baliza es una señal de guía o referencia, que emite un módulo radio servidor para lograr sincronizarse con un cliente.

- El cliente inicia la comunicación y solicita servicios o recursos del servidor, y este último le provee dichos servicios o recursos y el cliente accede a un servicio o recurso a la vez.

1.3.2.2. Limitaciones

Las principales limitaciones del modelo de red Cliente/Servidor son:

- La comunicación es solo entre cliente y servidor, por lo que no hay comunicación entre los clientes ni intercambio de recursos
- El servidor requiere de un equipo potente, con características especiales como redundancia incorporada y seguridad, por lo que su implementación es muy costosa.
- Siendo este un modelo centralizado, el servidor se convierte en un punto indispensable de la red. Una falla en el servidor puede aislar todos los clientes servidos por él o provocar retardos en la comunicación, lo cual impacta la seguridad de toda red en general.

1.3.2.3. Ventajas

Las ventajas más importantes del modelo Cliente/Servidor son:

- Estructura Centralizada: facilita la gestión y el intercambio de recursos con todos los clientes.
- Flexibilidad: debido a su arquitectura es posible quitar o añadir clientes sin afectar el funcionamiento de la red y sin la necesidad de modificaciones importantes.
- Seguridad: ya que el servidor controla el acceso e intercambio de los recursos y servicios de la red, para garantizar que sólo los clientes con los permisos adecuados pueden acceder a ellos.
- Extensibilidad: pueden añadirse los servidores y clientes que se deseen.

Al igual que el modelo anterior, el modelo Cliente/Servidor no es adecuado para el sistema de comunicación de datos vía radio que se quiere implementar, debido al carácter centralizado del control, propio de este modelo. Adicionalmente, la carga concentrada sobre un dispositivo puede causar congestión en toda la red y por tanto una comunicación ineficiente.

1.3.3. Modelo de Red Peer to Peer

El modelo *Peer to Peer* o abreviado P2P toma un enfoque diferente al de los modelos maestro/esclavo y cliente/servidor, en los cuales existe un nodo dedicado a manejar o servir a los demás nodos de la red. Por el contrario, este modelo se refiere a un tipo de red en la que cada estación de trabajo tiene capacidades y responsabilidades equivalentes. La Figura 1.12 representa este modelo, en el que cada nodo puede conectarse a cualquier otro nodo o grupo de nodos de la red, transmitir y recibir información y aprovechar los recursos y servicios de la red [15] como se muestra en la Figura 1.12.

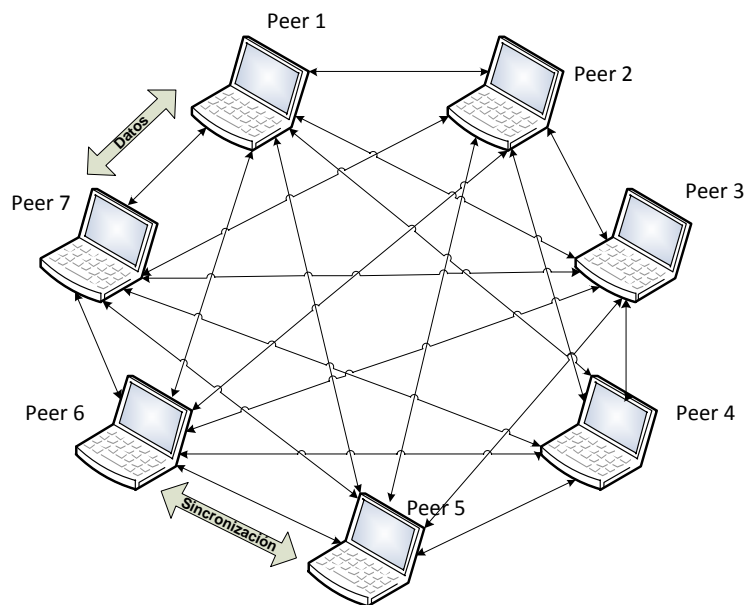


Figura 1.12 Modelo de Red Peer to Peer

En este modelo de comunicación cada nodo tiene las mismas capacidades para iniciar, controlar y terminar una sesión de comunicación. Las conexiones no requieren de un nodo central y se mantienen hasta que los nodos implicados deseen terminar la conexión.

Todos los nodos de la red se comunican entre sí como iguales, y cada nodo es responsable de hacer disponibles sus propios recursos a otros nodos en la red. De igual manera, es responsable de establecer y mantener la seguridad para dichos recursos. Estos recursos pueden ser archivos, directorios, aplicaciones, dispositivos (impresoras, módems o fax) o combinaciones de estos [18].

1.3.3.1. Características

El modelo *Peer-to-Peer* es una arquitectura de red que 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 *peer*⁵ puede actuar como un servidor, si éste tiene recursos para intercambiar o servicios que proveer, y puede actuar como un cliente si éste quiere solicitar recursos o servicios de otros *peers*, de esta manera se equilibra la carga de la red entre todos los nodos.

Siendo este un modelo descentralizado, cada nodo es igual a otro, y no existen nodos que asuman de manera permanente funciones especiales de administración, mantenimiento y facilitación de los recursos y servicios de la red [20]. 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 *peer* o incluso de algunos de *peers*. Con la pérdida de *peers* el desempeño de la red puede verse afectado, sin embargo si hay un número suficiente de *peers* en la red, ésta aún podría estar funcionando.

⁵*Peer*: nodo que proporciona la misma capacidad y funcionalidad que otro.

1.3.3.2. Limitaciones

A continuación se presentan las principales limitaciones del modelo *Peer to Peer*:

- No se implementan niveles de seguridad, ya que ningún nodo emplea autenticación o autorización en la red, para el intercambio de recursos y petición de servicios.
- No existe control sobre los recursos compartidos.
- Dado que este no es un modelo centralizado, es difícil la gestión y diagnóstico de fallas en la red.
- Usualmente las conexiones entre los *peers* no están diseñadas para altas tasas de *throughput*⁶.
- No es un modelo escalable, ya que su desempeño se ve afectado cuando aumenta la demanda de servicios, intercambio de datos y recursos en la red.

1.3.3.3. Ventajas

Las ventajas del modelo *Peer to Peer* son:

- Mínima Congestión: Debido a que no existe un nodo centralizado, no se presentan cuellos de botella o carga concentrada en un nodo específico, ni tampoco pérdida total de la comunicación.
- Alta Disponibilidad: No existe un nodo central gestionando la comunicación, entonces si en un *peer* ocurre una falla, los demás *peers* pueden establecer diversas rutas y mantener la comunicación.
- Arquitectura Descentralizada: Hay comunicación directa entre los nodos, los cuales pueden actuar como clientes o servidores e intercambiar sus propios recursos. De esta manera, cualquier *peer* es capaz de establecer, controlar y finalizar la comunicación.
- Simplicidad: Los nodos no necesariamente necesitan ser equipos especiales y potentes para conectarse a la red y aprovechar los recursos y servicios de ésta les ofrece.
- Redundancia: el modelo *Peer to Peer* puede ofrecer mayor redundancia que un modelo de Cliente/Servidor, debido a que hay menos puntos de falla que pueden afectar a toda la red y a todos los que la usan [18].

Finalmente, se puede decir que la utilización del modelo *Peer to Peer* es conveniente para el sistema de comunicación de datos vía radio que se busca implementar, ya que en este modelo, el comportamiento de cada nodo es autónomo, no existen cargas concentradas en un único dispositivo, además cualquier nodo puede iniciar o terminar la comunicación con otro nodo o grupo de nodos, usando *multicast*⁷.

⁶*Throughput* es la cantidad total de datos (de usuario y de control) que puede ser procesada por un sistema cuando opera a su máxima capacidad. La medición es en unidades de datos por unidad de tiempo, tales como bits, bytes, bloques, celdas, tramas, o paquetes por segundo.

⁷*Multicast*: es la distribución simultánea de la información en una red a múltiples destinos.

CAPÍTULO 2. WIRELESS INSITE®

2.1. INTRODUCCIÓN

Los resultados del nivel de potencia recibida en los dos escenarios de simulación propuestos para el presente trabajo de grado, fueron obtenidos a partir del uso de la herramienta de predicción de propagación *Wireless InSite*®, que dispone de un conjunto de modelos de propagación basados en la técnica de trazado de rayos entre los que se encuentra el modelo *Full 3D*, adicionalmente a estos modelos, *Wireless InSite*® dispone de modelos empíricos como el modelo de Espacio Libre que proporciona de manera útil, resultados de la zona de cobertura y es considerablemente rápido.

En este capítulo se realiza la descripción del software empleado, junto con sus características principales. Se incluyen los métodos de trazado de rayos, seguido de la definición de los modelos de propagación basados en la técnica de trazado de rayos y finalmente, se realiza una descripción general de los modelos empleados en la predicción de cobertura en los dos escenarios considerados, el modelo *Full 3D*, utilizado tanto en interiores como exteriores y el modelo de Espacio Libre utilizado en exteriores.

2.2. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DE PREDICCIÓN DE COBERTURA: WIRELESS INSITE®

Wireless InSite® es una herramienta de predicción de propagación de ondas electromagnéticas que permite el análisis y diseño de sistemas de comunicación inalámbricos, proporcionando una representación visual de algunos resultados, tales como áreas de cobertura del transmisor y la distribución de la potencia con respecto a las características del escenario modelado. Este software permite predecir la forma en que la localización de los transmisores y receptores dentro de un escenario afecta la intensidad de la señal, e incluye varios ejemplos, que constituyen un soporte en el proceso de aprendizaje y manejo de la herramienta. Además, presenta un manual detallado [21] que contiene instrucciones de manejo y uso de la herramienta para el diseño de escenarios junto a una variedad de elementos que hacen parte de la construcción de los mismos, sus características y su funcionalidad; dicho manual fue utilizado como apoyo para la descripción de las características principales del software a las que se hace referencia a continuación.

⁸ <http://www.remcom.com/wireless-insite>

2.2.1. Características Principales

La interfaz del software es bastante amigable y proporciona dos ventanas de trabajo fundamentales, denominadas ventana principal (*Main window*) y vista del proyecto (*Project view*), como se muestra en la Figura 2.1. Estas ventanas desempeñan un papel elemental a lo largo del desarrollo de cada proyecto, puesto que en ellas se realizan las descripciones de las mismas, la creación y el diseño de diversos escenarios, la especificación de los materiales de pisos, paredes, ventanas y techos y la configuración del modelo de propagación a considerar, de acuerdo al tipo de escenario definido tanto para la predicción de radio propagación en interiores como en exteriores.

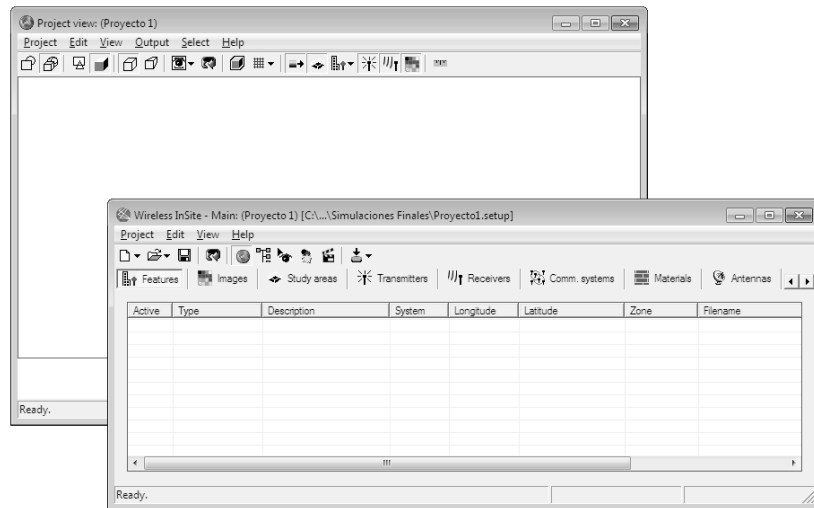


Figura 2.1 Ventanas de *Wireless InSite*®. (a) *Ventana Principal*. (b) *Vista del Proyecto*

En la Figura 2.1 (b) se muestra la ventana de vista del Proyecto, que brinda la opción de edición de los datos cuando se requiera hacer el ajuste o modificación de algún parámetro en particular, así como del diseño del escenario en general. La ventana principal, Figura 2.1 (a) proporcionan diferentes opciones de configuración, como por ejemplo, características de las antenas, los transmisores y receptores, como se muestra en la Figura 2.2, la cual permite el ingreso de la información correspondiente a cada elemento del proyecto, de acuerdo a los requerimientos que se tenga, entre estas configuraciones se encuentran:

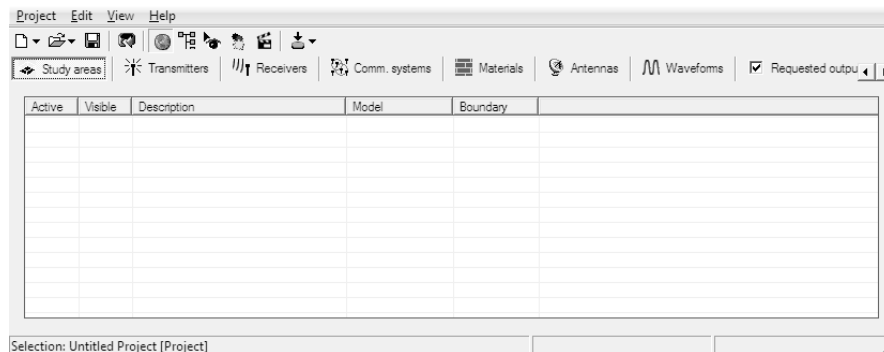


Figura 2.2 Ventana Principal del software (*Main window*)

✓ **Formas de onda (Wave forms):**

Esta opción permite configurar parámetros que describen la señal radiada por la antena transmisora. Los parámetros a configurar en esta opción incluyen el ancho de banda de operación, la frecuencia de trabajo y la fase.

Entre los diferentes tipos de forma de onda se encuentran: envolvente Blackman, pulso de Gauss, envolvente Hamming, envolvente Hanning, sinusoidal, entre otras. Una vez que una forma de onda se define, debe ser asignada a una antena.

✓ **Antenas (Antennas):**

Esta opción permite configurar parámetros de las antenas usadas en los proyectos: el tipo de antena, polarización, ganancia, longitud de onda, temperatura y las pérdidas en la línea de transmisión. En cuanto al tipo de antena, la base de datos incluye: antena omnidireccional, dipolo corto, monopolo corto, dipolo lineal, dipolo de media onda, monopolo lineal, monopolo de cuarto de onda, helicoidal, piramidal de corneta, reflector parabólico, entre otros.

✓ **Transmisores y Receptores (Transmitters - Receivers):**

Existen diferentes tipos de conjuntos de transmisores y receptores. Los principales tipos son: puntos, ruta, red xy, arco horizontal y vertical. En el tipo punto, la ubicación del transmisor y el receptor pueden ser especificados de forma independiente es decir, el software ofrece la opción de ubicar los transmisores y receptores en cualquier lugar dentro del escenario de simulación. Transmisores y receptores comparten propiedades de configuración de las antenas como por ejemplo la altura relativa de la antena, la forma de onda, la figura de ruido, la longitud de onda y la potencia radiada.

✓ **Materiales (Materials):**

El conjunto de propiedades de los materiales asignados a cada objeto o superficie del proyecto, determina sus propiedades electromagnéticas, las cuales en su conjunto son denominadas por la herramienta como tipo de material. La herramienta, determina los coeficientes de reflexión y transmisión directamente de las propiedades del material, pero los coeficientes de difracción son determinados de forma indirecta, es decir, depende de los coeficientes de reflexión y transmisión.

Los materiales están divididos en dos grupos: follaje y no follaje y entre sus propiedades se encuentran: el brillo, el color, el grosor, aspereza, permitividad y conductividad. En la Tabla 2.1, se clasifican los tipos de materiales disponibles de acuerdo a los dos grupos definidos para interiores y exteriores.

Tabla 2.1 Clasificación de Materiales

Especificación del Material	Tipos de material	Grupos
Materiales para exteriores	Pared de concreto, pared de ladrillo, madera, placa de vidrio, asfalto.	NO FOLLAJE
Materiales para interiores	Capas de yeso.	

Materiales de terreno	Suelo húmedo, arena seca, arena húmeda, agua dulce, agua de mar.	
Materiales de follaje	Bosque denso y no denso, bosque de pino denso y no denso.	FOLLAJE

✓ **Características** (*Features*):

La opción *Features*, permite configurar cinco tipos de diseño de escenario:

Ciudad (*City*):

El diseño tipo Ciudad incorpora el diseño de edificios y estructuras que conforman, una ciudad. Permite crear y eliminar las estructuras y configurar las alturas de las construcciones realizadas.

Plano general (*Floor plan*):

El tipo plano general, permite el diseño de estructuras que conforman el piso de un edificio como cuartos y pasillos. El editor permite al usuario agregar techo, pisos y paredes y proporciona una interfaz sencilla para la creación de puertas y ventanas.

Objeto (*Object*):

El tipo objeto permite la representación de elementos tales como equipos de oficina, vehículos, señales, etc. La herramienta editor permite la creación de formas poligonales simples.

Terreno (*Terrain*):

El tipo terreno representa la masa de tierra debajo de todas las otras superficies y estructuras que están en un proyecto. La herramienta editor permite la configuración de alturas de los vértices para crear el perfil del terreno.

✓ **Áreas de estudio** (*Study areas*):

Wireless InSite® incluye la opción de configurar una o varias áreas de estudio, como se muestra en la Figura 2.3. Esta opción, permite especificar una o varias regiones dentro del escenario de simulación, de manera que se puedan definir varias áreas de estudio en un mismo proyecto, con el fin de realizar varias pruebas en este, pero bajo diferentes parámetros, como por ejemplo, la elección de dos áreas de estudio: la primera, con los valores establecidos inicialmente, y la segunda, con un número mayor o menor de receptores o con variaciones en la altura de las antenas y en el número de transmisiones y reflexiones, y así establecer comparaciones de forma más práctica entre los diversos resultados para cada caso.

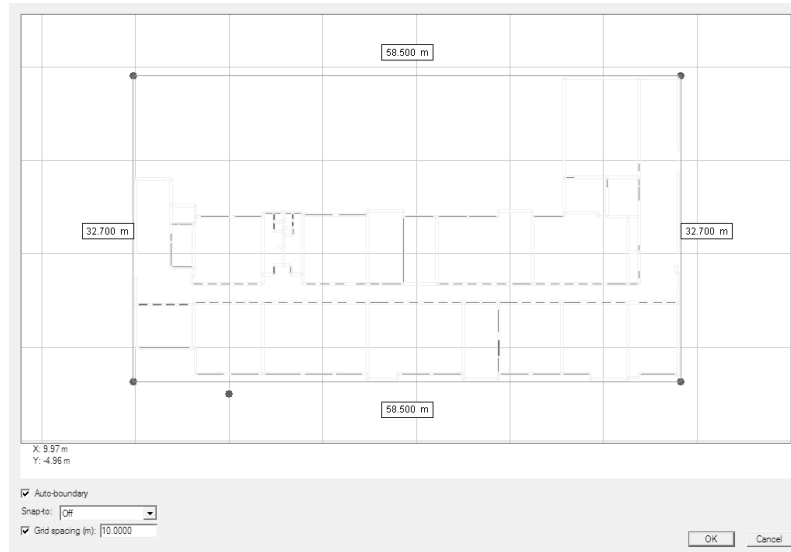


Figura 2.3 Definición de un área de estudio

✓ **Salida Requerida/Solicitada (*Requested output*):**

Entre algunas de las funciones que suministra *Wireless InSite* y que se pueden seleccionar en esta opción, se encuentran el cálculo de la potencia recibida, el trazado de rayos y la definición del área de cobertura. En ese sentido, el software realiza los cálculos mediante la técnica de trazado de rayos, a la que se hará mención en la siguiente sección, de tal manera que los rayos son emitidos por el transmisor y se propagan a lo largo del escenario definido e interactúan con las características del mismo hasta llegar al receptor; los efectos de cada interacción a lo largo de la trayectoria de un rayo hacia el receptor, se evalúan para determinar el nivel de la señal resultante. Dentro de las interacciones se incluyen: reflexiones, difracciones y traspasos de paredes. Estas características pueden ser visualizadas de manera gráfica, y configuradas manualmente para valores específicos en cuanto al número de reflexiones o difracciones permitidas, o también se puede trabajar con los valores predeterminados por el software.

La opción *Request output* permite seleccionar los parámetros de salida que serán representados gráficamente junto a los resultados obtenidos, como por ejemplo: potencia recibida, pérdidas de trayecto, ganancia de trayecto, tiempo de llegada, dispersión de retardo, magnitud del campo eléctrico, fase de campo eléctrico, campo eléctrico complejo, dirección de llegada, media dirección de salida, perfil de retardo de potencia, Corrimiento *Doppler*, perfiles del terreno, campo eléctrico contra frecuencia, campo eléctrico en función del tiempo y la potencia total recibida. Estos archivos de salida se almacenan en una carpeta con el nombre del área de estudio.

✓ **Salida (*Output*):**

La pestaña de Salida (*Output*) permite al usuario acceder a un árbol jerárquico para visualizar todas las salidas y graficas disponibles y actuales. Los resultados de salida son organizados para cada Área de Estudio y cada grafica se va añadiendo a la rama de Graficas (*Graphs*) una vez ha sido generada.

2.3. METODOS DE TRAZADO DE RAYOS

Wireless InSite® dispone de cuatro modelos de propagación basados en la técnica de trazado de rayos: Cañón Urbano (*Urban Canyon*), Urbano Rápido 3D (*Fast 3D Urban*), Completo 3D (*Full 3D*) y Plano Vertical (*Vertical Plane*), los cuales combinan algoritmos de trazado de rayos con la teoría Uniforme de Difracción⁹ (UTD, *Uniform Theory of Diffraction*) [21]. Para entender el funcionamiento de dichos modelos y principalmente, la operación del modelo Full 3D utilizado en la predicción de cobertura del presente trabajo para los dos escenarios seleccionados: exterior e interior, a continuación se realiza un estudio general de los métodos de trazado de rayos y de los modelos de propagación asociados.

Los métodos de trazado de rayos están basados en la Óptica Geométrica¹⁰ (GO, *Geometrical Optics*) y sus extensiones, entre ellas, la teoría Geométrica de Difracción¹¹ (GTD, *Geometrical Theory of Diffraction*), y han sido aplicados como métodos aproximados para calcular niveles de campo electromagnético de alta frecuencia. Al igual que estas teorías, los métodos de trazado de rayos intentan modelar todos los rayos directos posibles en el espacio libre, los rayos reflejados usando los coeficientes de reflexión *Fresnel*, los rayos difractados utilizando la teoría uniforme de difracción y los rayos transmitidos usando los coeficientes de transmisión de *Fresnel* en un entorno determinado [22]. En la Figura 2.4 se muestran los rayos principales entre un punto transmisor y un punto receptor [23].

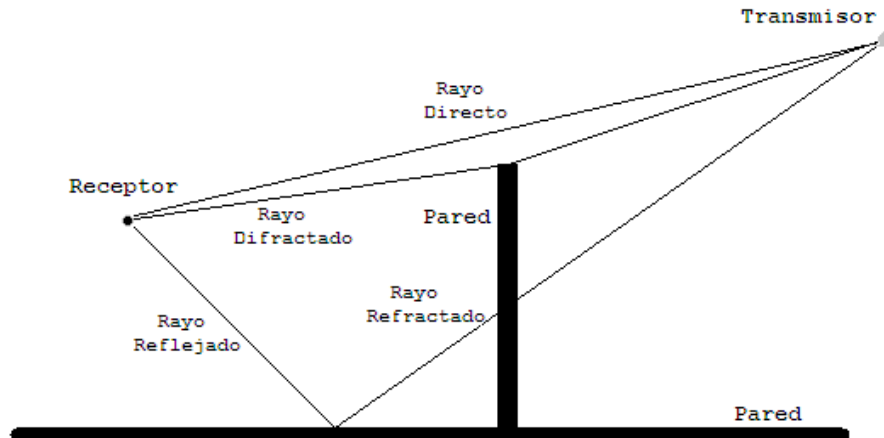


Figura 2.4 Rayos principales entre el transmisor al receptor.

⁹ UTD: Es un método de alta frecuencia usado para resolver problemas de dispersión electromagnética en pequeñas discontinuidades, mediante la difracción de rayos y la determinación de los coeficientes de difracción utilizados para calcular la intensidad de campo y la fase para cada rayo.

¹⁰ GO: Esta técnica asume que la energía puede considerarse que es radiada a través de pequeños tubos infinitesimales llamados rayos. En la Óptica Geométrica, un rayo viaja en línea recta hasta encontrar un objeto en el que se puede reflejar, refractar o absorber.

¹¹ GTD: Esta teoría junto con su extensión, la UTD, complementan la GO, con la introducción de un nuevo tipo de rayos llamados rayos difractados. Estos rayos eliminan las discontinuidades de campo predichas por la GO.

Existen dos métodos principales de trazado de rayos: el método de la imagen y el método de lanzamiento de rayos (*ray-launching*). El primero consiste en generar todas las imágenes del transmisor a partir de las reflexiones producidas en el escenario. El segundo método implica el lanzamiento de rayos separados con un incremento angular desde el transmisor que pueden alcanzar o no al receptor. En la Figura 2.5 se ilustran los dos métodos de trazado de rayos. El método de las imágenes es eficiente, pues debido a que la teoría de las imágenes determina las trayectorias exactas de radiación, este método no introduce errores en las trayectorias de radiación que encuentra, sin embargo este método usualmente trabaja solo en modos de propagación reflejados y limita o no tiene en cuenta las difracciones ya que estas introducen infinitos grados de libertad en la dirección del trayecto que sigue un rayo, por lo que este método es más adecuado para manejar entornos simples [24]. Por otro lado el método de lanzamiento de rayos se basa en obtener rayos para cada una de las posibles direcciones de propagación desde el transmisor, lo que exige mayores requerimientos computacionales que el método de la imagen [22].

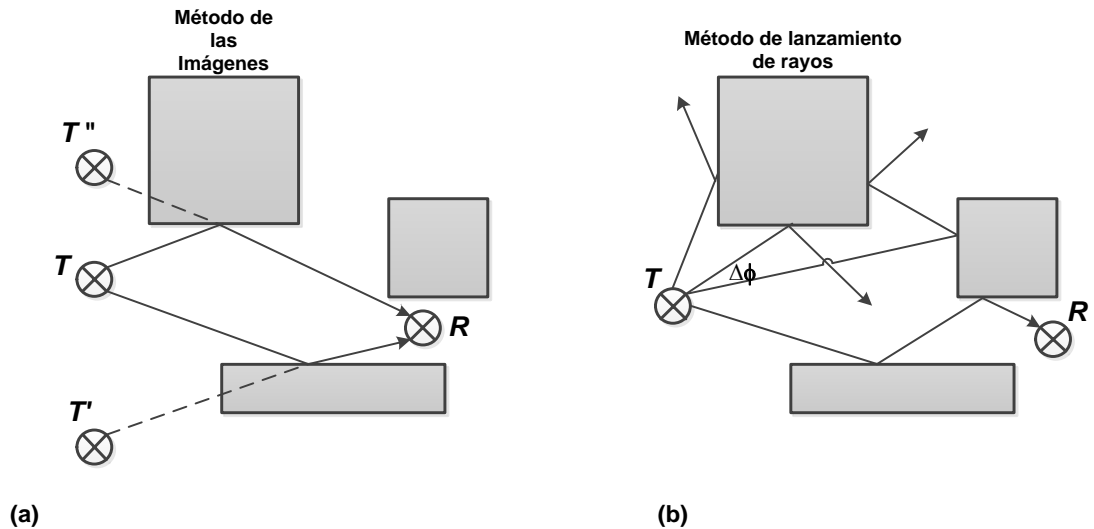


Figura 2.5 Métodos de Trazado de Rayos, (a) método de la imagen, (b) método de lanzamiento de rayos.

El método de disparo y rebote de rayo (SBR, *Shooting and Bouncing Ray*) es un método de lanzamiento de rayos, que consiste en el disparo de rayos desde la antena transmisora hacia la antena receptora. Cada rayo (con su amplitud y fase asociada) es trazado junto con los rebotes en objetos presentes en el escenario. Cuando un objeto es golpeado por un rayo, dependiendo de la geometría y las propiedades eléctricas del objeto, el rayo se refleja, se transmite, se difracta o se dispersa. Cuando los rayos son captados por la antena receptora, se procede a calcular el campo eléctrico asociado a cada rayo. La solución final es la suma de las contribuciones de todos los rayos que alcanzan al receptor [25]. La Figura 2.6 representa el método de lanzamiento de trazado de rayos SBR, en la cual se puede observar que algunos rayos lanzados desde el transmisor se reflejan en las paredes llegando al receptor. Al final del proceso, un número menor de rayos llega al receptor [26].

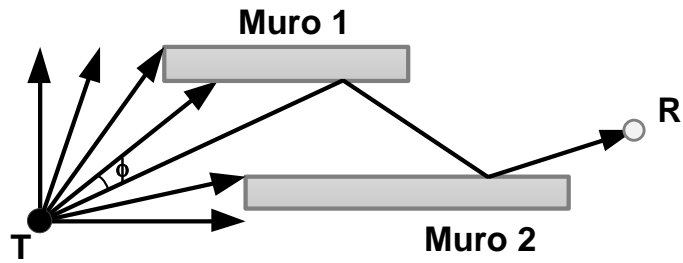


Figura 2.6 Algoritmo de lanzamiento de rayos SBR

Los métodos de trazado rayos consisten fundamentalmente en la generación y la descripción de los rayos y su función es encontrar una manera de cálculo rápida para determinar las trayectorias dominantes que sigue el rayo y de esta manera proporcionar predicciones exactas de las pérdidas por trayectoria. Existen dos tipos de métodos para generar los rayos desde el punto fuente o punto de transmisión: el modelo de trazado de rayos en dos dimensiones (2D) y el modelo de trazado de rayos tridimensional (3D) [27], en la Figura 2.7 se muestran los dos tipos de modelos y se observa cómo a partir del modelo 2D se puede obtener el modelo 3D [28].

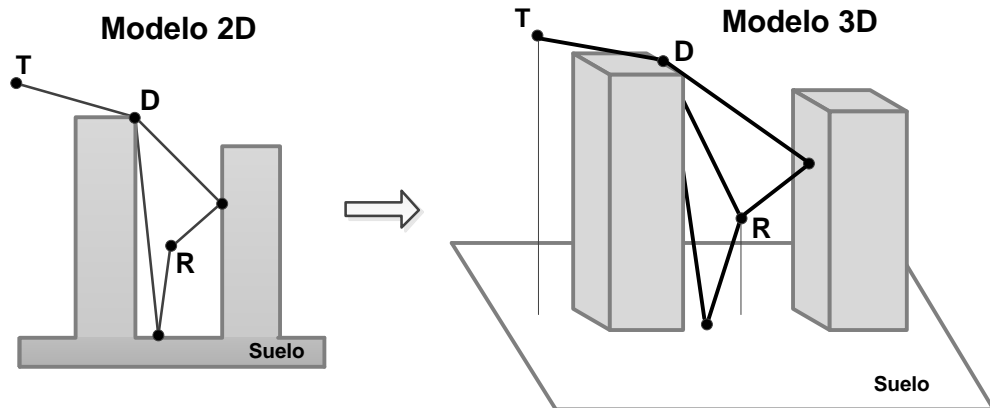


Figura 2.7 Modelo de lanzamiento de rayos en dos dimensiones (2D) y en tres dimensiones (3D)

Al utilizar la técnica de trazado de rayos el transmisor y el receptor se modelan como fuentes puntuales. Desde el transmisor se lanzan rayos en diferentes direcciones. La intersección con la superficie de un objeto se representa por un nodo, al igual que la intersección con un borde y el punto de difracción se procesa como una fuente, desde la cual se lanzan un gran número de rayos. Este procedimiento continua hasta que los rayos sean más débiles que un umbral definido, o hasta que el rayo llegue al receptor. En dos dimensiones, los rayos son lanzados en diferentes direcciones con el mismo ángulo, en un plano. En tres dimensiones, para determinar todos los posibles rayos que pueden salir del transmisor y llegar al receptor, es necesario considerar todos los posibles ángulos de salida del transmisor y llegada al receptor.

2.4. MODELOS DE PROPAGACIÓN BASADOS EN TRAZADO DE RAYOS

Los modelos de propagación se encargan de predecir la pérdida de potencia que sufre la señal a una determinada distancia del transmisor, al igual que las variaciones de la potencia de la señal en la cercanía de un lugar específico [29]. Existen muchos modelos de propagación y se clasifican de acuerdo a su precisión en: modelos matemáticos, empíricos o estadísticos, teóricos, determinísticos y estocásticos. Los modelos basados en métodos o técnicas de trazado de rayos hacen parte de los modelos determinísticos, en los cuales, los resultados de la simulación dependen únicamente de las condiciones de simulación (*entradas*) y no tienen ninguna distribución de probabilidad que describa su comportamiento. Los modelos basados en trazado de rayos se basan en principios fundamentales de la física y pueden ser aplicados en diferentes entornos. Por otro lado su implementación requiere la recolección y precisión de una gran cantidad de datos referentes a la geometría del entorno, que en la práctica son imposibles de obtener [30].

Los modelos basados en técnicas de trazado de rayos permiten el análisis de propagación dentro de un entorno, mediante la generación de rayos y la determinación de las trayectorias que siguen los rayos desde el transmisor al receptor y teniendo en cuenta la contribución de cada uno de estos en el campo eléctrico total que es captado por la antena receptora [31]. Para garantizar que se obtengan predicciones muy aproximadas, esta técnica requiere del trazado de todas las trayectorias posibles que conectan un transmisor con un receptor. Es necesario limitar el número de trayectorias en el trazado de rayos, para ello se lleva a cabo el seguimiento de la atenuación experimentada por cada trayectoria de propagación, el establecimiento del tipo y del número máximo de interacciones (reflexiones, refracciones y difracciones) por trayectoria del rayo y su descarte, si la energía que lleva tal rayo es menor a un valor umbral [22]. En un punto determinado de la comunicación se puede obtener el nivel de señal mediante la sumatoria de las contribuciones de todas las trayectorias posibles entre el transmisor y el receptor [30].

Los modelos de propagación basados en el trazado de rayos han sido ampliamente utilizados para predecir la propagación en interiores. El modelo *Full 3D* es el único modelo basado en trazado de rayos de *Wireless InSite®*, que puede aplicarse a todo tipo de entornos, interiores y exteriores, por lo que fue escogido entre el conjunto de modelos basados en trazado de rayos, disponibles en la herramienta para realizar la predicción de cobertura en los dos escenarios. Por otro lado, además de utilizar el modelo *Full 3D* en el escenario de exteriores, se aplicó el modelo de Espacio Libre, a fin de comparar y corroborar los resultados. A continuación se realiza una breve descripción de los modelos *Full 3D* y Espacio Libre, utilizados en la predicción de propagación, sus características, limitaciones y como llevan a cabo el trazado de rayos y finalmente lo convierten a campo eléctrico.

2.5. MODELO FULL 3D

El modelo *Full 3D* es uno de los modelos de propagación de *Wireless InSite®* basados en la técnica de trazado de rayos, que realiza los cálculos electromagnéticos mediante el disparo de rayos desde los transmisores 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 los receptores. Estas interacciones comprenden: la reflexión fuera de la tierra; la reflexión sobre la superficie de una fachada de la construcción; la difracción sobre un borde de una estructura; y la transmisión a través de una pared. Los efectos de cada interacción a lo largo de la trayectoria del rayo hasta el receptor son evaluados para determinar el nivel de la señal resultante. El modelo *Full 3D* es el único modelo que no impone restricción sobre la forma del objeto, es decir soporta estructuras planas e inclinadas. Así mismo es el único modelo que incluye transmisiones a través de las superficies, por lo que es el único modelo basado en trazado de rayos que puede aplicarse a escenarios de interiores (*indoor*). En la tabla 2.2 se presenta una lista de capacidades soportadas por el Modelo *Full 3D*.

Tabla 2.2 Capacidades soportadas por el Modelo *Full 3D*

Número Máximo de Reflexiones	30 (suponiendo que no hay transmisiones).
Número Máximo de Transmisiones	30 (suponiendo que no hay reflexiones).
Número Máximo de difracciones	4 (SBR), 3 (Eigenray).
Escenarios	Todos.
Terreno	Todos.
Urbano	Todos.
Follaje	Ondas directas.
Interiores	Todos.
Objetos	Todos.
Alcance	Depende de la aplicación.
Alturas de Antena	Todas.
Tipos de Antena	Todos.
Trazado de Rayos	SBR or Eigenray.
Frecuencia Mínima	100 MHz.
Frecuencia Máxima	Depende de la aplicación.

El modelo *Full 3D* al igual que los otros modelos de *Wireless InSite®* basados en trazado de rayos, utilizan algoritmos de trazado de rayos para encontrar las trayectorias de propagación para cada punto de recepción y la UTD para evaluar el campo eléctrico complejo asociado a cada trayectoria de rayo [21]. A continuación se describe de forma general la aplicación de estas teorías en el modelo *Full 3D*.

2.5.1. Trazado de Rayos

El modelo de propagación Full 3D dispone de dos algoritmos de trazado de rayos para la generación de rayos. El modelo basado en la técnica de SBR y el segundo método llamado *Eigenray*.

La técnica SBR consiste en el disparo de rayos desde los puntos fuentes y los puntos de reflexión de una estructura (paredes, muros, ventanas, puertas, techos) del escenario hasta el punto de recepción. Los rayos que chocan con alguna estructura del escenario se reflejan especularmente¹² y continúan viajando hasta llegar al número máximo de

¹² Reflexión Especular: se produce cuando la superficie reflejante es muy lisa y los rayos reflejados e incidentes generan el mismo ángulo con respecto a una recta normal desde la superficie de reflexión.

reflexiones, 30 para el modelo *Full 3D*. Después de que los rayos han sido disparados y reflejados, se identifican los bordes de difracción en el escenario y se disparan y trazan los rayos desde los bordes de difracción identificados. Posteriormente se construye la geometría de las trayectorias de propagación desde el punto de transmisión hasta el punto de recepción. Para evaluar el campo en un punto determinado se define una superficie que contiene el punto de campo y se encuentran los rayos SBR que interceptan dicha superficie. Varios rayos que siguen la misma trayectoria a través de un escenario pueden interceptar la superficie, por lo que es necesario que los rayos sean clasificados para seleccionar un solo rayo por cada trayectoria, evitando así contar con trayectorias de más. Por lo general, el rayo que se selecciona es el que pasa más cerca del punto de campo. Luego de encontrar las trayectorias de los rayos para cada punto de campo, se almacenan las trayectorias en un archivo ubicado en el directorio del área de estudio. A continuación, se construyen las trayectorias tridimensionales a partir de la base de datos de trayectorias en dos dimensiones. Muchas trayectorias de rayo tendrán un rayo compañero que sigue casi la misma trayectoria pero que ha sido reflejado desde el suelo. Los puntos de reflexión del suelo se obtienen usando el método de las imágenes. Finalmente después de que se construyen las trayectorias 3D, los puntos finales de cada segmento de la trayectoria, junto con la secuencia de reflexiones y difracciones presentes en el escenario, son almacenados en un archivo del directorio del área de estudio. Estas trayectorias de rayo son utilizadas para evaluar la intensidad de campo eléctrico, que se describe en la siguiente sub-sección.

El segundo método de trazado de rayos denominado *Eigenray*, basado 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 *Fermat* del menor tiempo¹³ que se muestra en la Figura 2.8, sin incluir refracción en las transmisiones. El tiempo de computación será aproximadamente igual a $(N_F)^X$, donde N_F es el número de facetas y X es el número máximo de reflexiones y difracciones de una determinada trayectoria. Dado que el tiempo de computación de este método no depende del número de transmisiones, el método *Eigenray* es una rápida y buena opción para aplicaciones que requieren un gran número de transmisiones, siempre que las restricciones sobre el número de reflexiones y difracciones sean un número considerable como se especificó en la Tabla 2.2 [21].

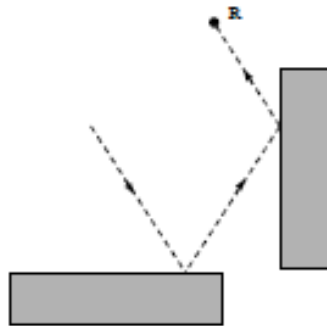


Figura 2.8 Trayectoria de *Fermat*

¹³ El principio de Fermat afirma que la trayectoria correcta entre dos puntos por un rayo de luz, es aquella que es recorrida en el menor tiempo.

2.5.2. Evaluación del Campo Eléctrico

Después de que todos los rayos entre el transmisor y el receptor han sido generados y las interacciones han sido establecidas, el campo eléctrico recibido es la suma de cada campo asociado a cada trayectoria seguida por un rayo. Para determinar las amplitudes del campo eléctrico asociado a cada trayectoria del rayo es necesario calcular los coeficientes de reflexión de las estructuras del escenario y del suelo, y los coeficientes de difracción por la geometría del escenario [32].

La UTD utiliza los rayos que han sido difractados desde un borde de la geometría del escenario y determina los coeficientes de difracción conocidos como componente suave (componente paralela al borde de difracción) y componente dura (componente perpendicular al borde de difracción), y tiene en cuenta la distancia desde el transmisor al punto de difracción y la distancia desde el punto de difracción al receptor. Estos coeficientes permiten calcular la intensidad de campo y la fase para cada rayo. Estos campos se suman a los campos incidentes y a los campos reflejados para obtener el campo eléctrico total en el punto de recepción [33], [21].

2.6. MODELO DE ESPACIO LIBRE

El modelo de Espacio Libre asume que el campo eléctrico disminuye a razón de $1/r$ con la distancia en todas las direcciones. El modelo de Espacio libre no tiene en cuenta ningún obstáculo como bloques debido a construcciones, el suelo u otros fenómenos entre el transmisor y el receptor, y las ondas transmitidas se propagan a lo largo de una única trayectoria posible, llamada línea de vista (LOS, *Line of Sight*) como se observa en la Figura 2.9 [34], [21].

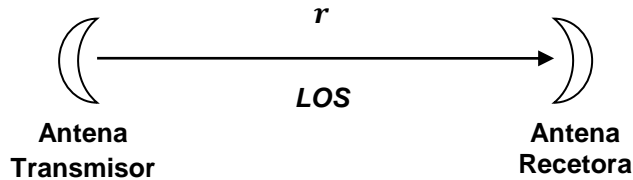


Figura 2.9 Modelo de Propagación de Espacio Libre

La Tabla 2.3 presenta una lista de capacidades que soporta el Modelo de Espacio Libre.

Tabla 2.3 Capacidades soportadas por el Modelo de Espacio Libre

Número Máximo de Reflexiones	No Aplica.
Número Máximo de Transmisiones	No Aplica.
Número Máximo de difracciones	No Aplica.
Escenarios	Todos.
Terreno	No Aplica.
Urbano	No Aplica.

Follaje	No Aplica.
Interiores	No Aplica.
Objetos	No Aplica.
Alcance	Ilimitado.
Alturas de Antena	Todas.
Tipos de Antena	Todos.
Trazado de Rayos	Un solo rayo del Transmisor al Receptor.
Frecuencia Mínima	Depende de la aplicación.
Frecuencia Máxima	Depende de la aplicación.

2.6.1. Trazado de Rayos

Únicamente se traza un rayo desde el punto transmisor al punto receptor. El trayecto del rayo es usado para determinar la distancia, el tiempo de llegada, la dirección de llegada y la dirección de salida. Las direcciones son usadas para determinar las ganancias de las antenas de transmisión y recepción.

2.6.2. Evaluación del Campo Eléctrico

Para evaluar el campo eléctrico, es necesario encontrar el campo eléctrico en la zona lejana de la antena de transmisión mediante la ecuación 2.1 del Campo lejano $E(r, \theta, \phi)$ a una distancia r del transmisor, este es igual a la suma compleja de las ecuaciones de amplitud en la dirección (θ, ϕ) , que relacionan la Ganancia $G_\theta(\theta, \phi)$ y la Eficiencia η_0 de la antena de transmisión y la Potencia Radiada por el transmisor P_T , que se explican detalladamente en [21].

$$E(r, \theta, \phi) = (A_\theta(\theta, \phi)\hat{e}_\theta + A_\phi(\theta, \phi)\hat{e}_\phi) \frac{e^{-j\beta r}}{r} \quad (2.1)$$

CAPÍTULO 3. MODULO RADIO AC 4790

3.1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las pruebas se llevó a cabo con la ayuda del Kit de Desarrollo de Software (SDK, *Software Development Kit*) AC4790-200M, miembro de la familia de transceptores de *ConnexRF* de *AeroComm* (actualmente *Laird Technologies*¹⁴), que opera en la banda de 915 MHz mediante la técnica de transmisión FHSS. En este capítulo se documentan detalles relevantes en cuanto al *hardware* y la interfaz *software* del transceptor, los cuales deben tenerse en cuenta para implementar y ejecutar de forma adecuada el sistema de comunicación de datos vía radio basado en FHSS, utilizando el modelo *Peer-To-Peer*. Con el objetivo de dar a conocer las características técnicas y de funcionamiento del kit adquirido, la información documentada fue tomada del manual del kit de Desarrollo de Software e incluye la teoría relacionada con el software de configuración, enfatizando en los modos de operación, las especificaciones del módulo radio; descripción de la interfaz de usuario y la información de configuración del funcionamiento general del módulo radio.

3.2 CARACTERÍSTICAS HARDWARE Y SOFTWARE DEL SDK AC4790

El kit de evaluación y desarrollo AC4790-200M de *Laird Technologies* permite la implementación de un sistema de comunicación de datos mediante un kit integrado que incluye: dos módulos AC4790, dos tarjetas de evaluación, dos adaptadores de voltaje AC, dos cables para conexión serial, dos cables USB, dos antenas omnidireccionales y software de configuración y gestión [35]. Además, presenta un manual [36] detallado del módulo AC4790 que contiene las especificaciones y definiciones técnicas; dicho manual fue utilizado como apoyo para la descripción de las características principales del software a las que se hace referencia. En la Figura 3.1 se muestra el contenido del SDK AC4790-200M.

En lo consecutivo, cada vez que se mencionen los términos, “radio” o “transceptor”, se hará referencia a módulo AC4790. Igualmente, el término “anfitrión OEM” corresponde al computador conectado al módulo AC4790.

¹⁴ *Laird Technologies*: fabricante de productos para aplicaciones inalámbricas y electrónicas.
<http://www.lairdtech.com/>



Figura 3.1 Contenido del SDK AC4790.

3.2.1. Módulo Radio AC4790

El AC4790 es un transceptor de alto desempeño que implementa la técnica FHSS y ha sido diseñado para integrarse con sistemas de Fabricantes de Equipos Originales (OEM, *Original Equipment Manufacturer*) que se rigen por las normas de la FCC parte 15.247 para la banda ISM de 900 MHz.

El funcionamiento del transceptor AC4790 se basa en la arquitectura Sin Maestro (*Masterless*) que se caracteriza por su extensión de sesión dinámica y el mecanismo para evitar colisiones y asegurar que cada nodo tenga un acceso equitativo a la red. La arquitectura de red *peer-to-peer* permite que varios pares de transceptores puedan llevar a cabo conversaciones simultáneas en la misma red. Para establecer comunicación con el computador donde se ejecuta el software, el módulo cuenta con dos sistemas de configuración de datos: un sistema asíncrono TTL o la interfaz serial RS-485. La configuración de datos se almacena en una memoria de solo lectura eléctricamente programable y borrable (EEPROM, *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*) y los saltos de frecuencia, la sincronización y el sistema de transmisión y recepción de datos son realizados por el transceptor [36].

3.2.1.1. Especificaciones

La Tabla 3.1 contiene las especificaciones principales del radio AC4790 [36].

Tabla 3.1 Especificaciones del módulo radio AC4790

Banda de Frecuencia	902 – 928 MHz	
Velocidad de Transmisión de Datos	76.8 kbps fijos	
Tecnología de Transmisión	Espectro Ensanchado por Saltos en Frecuencia (FHSS)	
Potencia de Salida	Sin Antena	Con antena de ganancia 3dBi

	100mW	200mW
Voltaje de Alimentación	3.3 – 5.5V, ± 50 mV rizado	
Sensibilidad	-100dBm para una Velocidad de transmisión de Datos de 76.8kbps	
Ciclos de Escritura EEPROM	20000	
Tiempo de Sincronización inicial del radio/ Periodo del Salto	25 ms / 50 ms	
Dimensiones del Radio	Transceptor con conector MMCX: 1.65" x 1.9" x 0.20"	

3.2.1.2. Definición de Pines

La Tabla 3.2 muestra el número de pin, el nombre de la señal asociada a cada pin y su respectiva función.

Tabla 3.2 Definición de Pines

# Pin	Nombre de la señal	Función
1	GO0	Estado de sesión
2	TXD	Datos de salida del transceptor.
3	RXD	Datos de entrada al transceptor.
4	GI0	Pin de entrada de datos
5	GND	Tierra
6	No conectar	
7	CTS	Listo para enviar (<i>Clear to Send</i>)
8	RTS	Solicitud de envío
9	GO1	Estado del reconocimiento recibido.
10	VCC1	Pin de alimentación
11	VCC2	Pin de alimentación
12	Prueba (<i>Test</i>)	Modo de Prueba
13	RSSI	Intensidad de la señal recibida: Una señal analógica indica de manera instantánea la intensidad de la señal recibida.
14	GI1	Pin de entrada de datos
15	UP_RESET	Reset
16	GND	Tierra
17	CMD/Data	En el estado lógico bajo, el transceptor interpreta los datos del anfitrión OEM como los comandos. En el estado lógico alto, el receptor interpreta los datos del anfitrión OEM como datos de transmisión.
18	AD In	Entrada de datos Analógicos
19	No conectar	
20	Estado de Sesión (<i>Session Status</i>)	Cuando el pin se encuentra en estado lógico bajo, indica que el transceptor está en sesión.

3.2.1.3. Arquitectura Masterless

La arquitectura Sin Maestro es una arquitectura *peer-to-peer*, así, cualquiera de los módulos que tenga datos para transmitir, dará inicio a una sesión de comunicación con los transceptores que se encuentren dentro de su rango. Esta arquitectura elimina la

necesidad de asignar un transceptor como maestro que realice el control de la comunicación o el flujo de datos, y por lo tanto, se reduce la carga del sistema y se mejora la eficiencia.

3.2.1.4. Modos de Operación del Módulo AC4790

El módulo AC4790 tiene tres modos de funcionamiento diferentes: transmisión, recepción, y el modo de comando. Recepción es por defecto, el modo de funcionamiento del transceptor (en el cual el radio se encuentra a la espera de un pulso de sincronización de otro radio), mientras que los modos transmisión y comando se presentan cuando el anfitrión OEM envía datos al radio a través de la interfaz serial.

I. Modo Transmisión (*Transmit Mode*)

En este modo de operación, el transceptor envía un pulso de sincronización para iniciar una sesión con uno o más radios en modo recepción, de esta manera, si alguno de ellos detecta el pulso de sincronización, se unirá a la sesión y comenzará a recibir datos. Para establecer la sesión, este pulso de sincronización de 25 ms se envía durante la primera mitad de cada salto de 50 ms. En los 25 ms restantes del salto actual, el radio transmitirá los datos y se mantendrá en el modo de transmisión hasta que un contador de sesión, que puede ser establecido por el usuario, expire. Cuando un radio está en sesión, el contador de sesión establecido disminuye en uno por cada salto y cuando el número de sesiones llega a cero, el radio sale de la sesión. En la Figura 3.2, se observa un diagrama de la distribución de los 50 ms de cada salto.

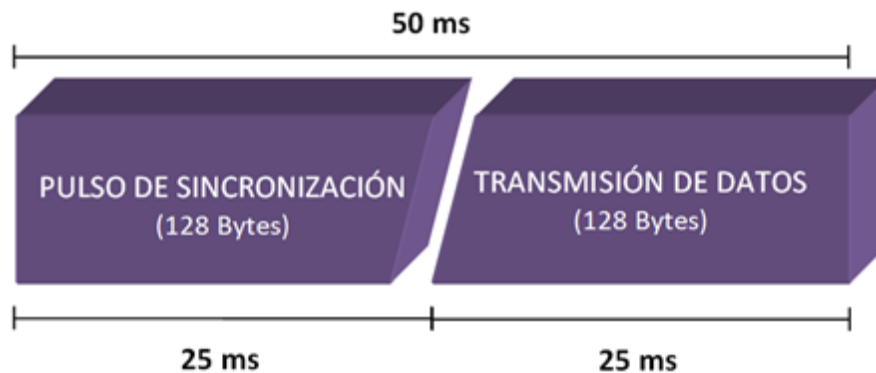


Figura 3.2 Diagrama de Distribución de los 50ms.

Además, para garantizar que el radio transmisor enviará el paquete al receptor previsto, hasta asegurarse que fue recibido sin errores, se utilizan los intentos de retransmisión (*Transmit Retries*) para el envío de paquetes direccionados (*Addressed Packets*) y los intentos de transmisión (*Broadcast Attempts*) para el envío de paquetes de broadcast (*Broadcast Packets*). De esta manera, si el receptor recibe el paquete libre de errores, devolverá un acuse de recibo dentro de los mismos 50 ms de duración de cada salto y los intentos de retransmisión son ignorados. De lo contrario, si el acuse de recibo no llega, el radio retransmitirá el paquete hasta que se reciba la confirmación o hasta que todos los intentos de retransmisión se hayan utilizado.

II. Modo de Recepción (*Receive Mode*)

Un transceptor en modo recepción siempre estará en espera de un pulso de sincronización de otro transceptor para poder iniciar sesión tal como se mencionó anteriormente; una vez el contador de sesión expira y con el fin de continuar recibiendo datos, los transceptores actualizan el contador de sesión cada vez que reciben los datos o un acuse de recibo. La configuración del SLock0 y SLock1 establece el control del número de sesiones del contador de sesión, como se muestra a continuación en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Tabla de verdad del Contador de Sesión

Caso	SLock0	SLock1	Transceptor Recibiendo un Paquete Direcccionado	Transceptor Recibiendo un Paquete <i>Broadcast</i>
1	0	0	El radio carga su contador de sesión actual con su contador de sesión de Actualización.	El radio carga su contador de sesión actual con su contador de sesión de Actualización.
2	0	1	El radio carga su contador de sesión actual con el número de Intentos de Retransmisión + su contador de sesión de actualización.	El radio carga su contador de sesión actual con el número de Intentos <i>Broadcast</i> + su contador de sesión de actualización.
3*	1	0	El radio carga su contador de sesión actual con el contador de sesión actualizado del radio remoto.	El radio carga su contador de sesión actual con el contador de sesión actualizado del radio remoto.
4	1	1	El radio carga su contador de sesión actual con el contador de sesión actual del radio remoto.	El radio carga su contador de sesión actual con el contador de sesión actual del radio remoto.

* Valor por defecto en la EEPROM.

Caso 1: Adecuado para comunicaciones *Half Duplex*, en las que no se recibe una respuesta inmediata del radio remoto.

Case 2: Adecuado para aplicaciones en las que existen altos niveles de interferencia y es probable que se requieran intentos de retransmisión para mantener una comunicación confiable.

Case 3: Adecuado para aplicaciones *Full Duplex*, donde la sesión se prolonga siempre y cuando se mantenga la comunicación.

Case 4: Adecuado para redes extensas, en las que los radios no pueden permanecer en sesión más tiempo del necesario.

III. Modo Comando (*Command Mode*)

Un radio ingresa en modo comando cuando recibe datos del anfitrión OEM a través de la interfaz serial, en tanto que el pin de Comando / Datos (pin 17) se encuentre en estado lógico bajo, o bien cuando la información recibida contenga el comando "AT + + +" (*Enter AT Command Mode*).

3.2.1.5. Función de Control (API Control)

El API de control es una característica que ofrece la arquitectura Sin Maestro (*Masterless*). Esta función cuenta con tres modalidades, el API de transmisión de paquetes, el API de envío completo de datos y el API de recepción de paquetes.

A. API de Transmisión de Paquetes (API Transmit Packet)

El API de transmisión de paquetes es un comando que permite al anfitrión enviar datos a uno o más transceptores, paquete por paquete. El anfitrión OEM debe utilizar el formato mostrado en la Tabla 3.4 para transmitir un paquete.

Tabla 3.4 Formato del API de transmisión de Paquetes

0x81	Longitud de la carga útil de datos. (0x01 - 0x80)	Cuenta de sesión actual.	Intentos de retransmisión / Intentos de Broadcast	MAC de destino (2,1,0)	Carga útil datos
------	--	--------------------------	---	---------------------------	------------------

B. API de Envío Completo de Datos (API Send Data Complete)

El API de envío completo de datos se utiliza para monitorear el proceso de reconocimiento RF del paquete recibido; si un reconocimiento no es recibido se desplegará un fracaso y en el caso contrario se desplegará un éxito. El transceptor envía al anfitrión OEM los datos mostrados en la Tabla 3.5, al recibir un acuse de recibo o al agotar todos los intentos.

Tabla 3.5 Formato del API de Envío Completo de Datos

0x82	RSSI	RSSI*	0x00: Fracaso 0x01: Éxito.
------	------	-------	-------------------------------

Nota 1: RSSI indica la intensidad con que el transceptor remoto escuchó al transceptor local; RSSI* indica la intensidad con que el transceptor local escuchó al transceptor remoto.

Nota 2: El byte éxito / fracaso es actualizado por cada reconocimiento exitoso.

C. API de Recepción de Paquetes (API Receive Packet)

Cuando el API de recepción de paquetes está activado, todos los paquetes recibidos por el transceptor, incluirán la dirección MAC de origen del radio junto con el RSSI que determina la calidad del enlace entre los radios. Una vez recibido un paquete, el radio lo envía al anfitrión OEM en el formato indicado en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Formato del API de Recepción de Paquetes

0x81	Longitud de la carga útil de datos (0x01 - 0x80)	RSSI	RSSI*	MAC de origen (2,1,0)	Carga útil de datos
------	---	------	-------	--------------------------	---------------------

3.2.2. Tarjeta de Evaluación AC4790

3.2.2.1. Diagrama de la Tarjeta de Evaluación

La tarjeta de evaluación ofrece diferentes formatos de datos seriales para comunicarse con el transceptor: RS-232, USB, RS-485 o TTL. La operación de la tarjeta se muestra de forma continua mediante los LEDs ubicados en el lado izquierdo. Los interruptores de puente (*jumpers*) definen parámetros de configuración como: la interfaz del radio para comunicarse con el anfitrión OEM, la comunicación elegida, el voltaje suministrado al radio y la fuente de potencia. La Figura 3.3 ilustra la tarjeta del kit de desarrollo de software para el radio AC4790.

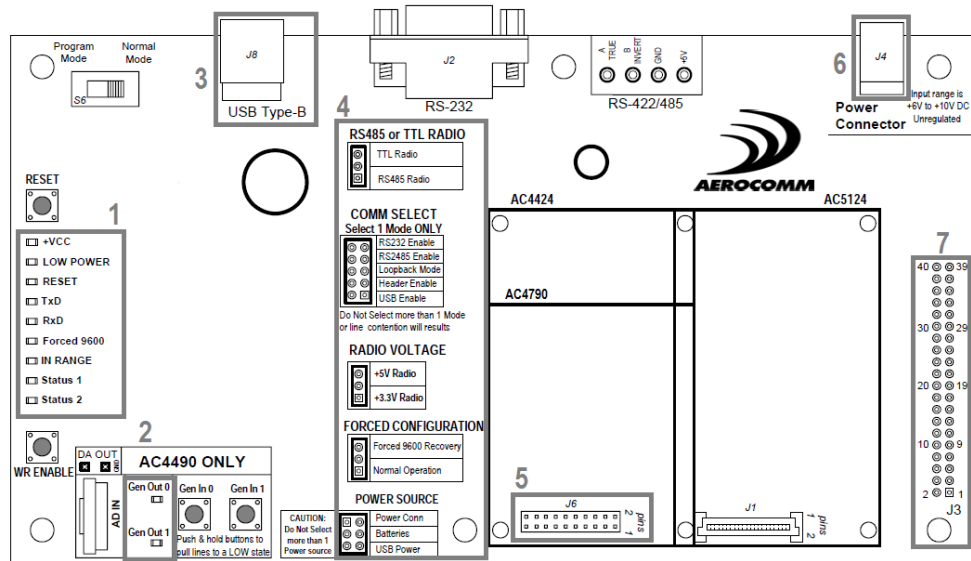


Figura 3.3 Tarjeta de Evaluación SDK AC4790-200M

1. *Leds*: Permiten verificar la funcionalidad del modulo
2. Sección AC4490 ONLY: Esta sección contiene dos botones y dos *leds*. Los botones sirven como señales de entrada genéricas y los *leds* además de servir como salidas genéricas, cuando el Estado de Protocolo se habilita, representan los pines: GO0 (Estado de Sesión) y GO1 (Estado de Reconocimiento Recibido) del transceptor.
3. Socket USB tipo B: Utilizado para la conexión entre el radio y la tarjeta SDK.
4. *Jumper*: La configuración de las siguientes secciones se establece mediante la posición de su interruptor de puente.
 - RS-485 o TTL Radio: Modos de comunicación entre el radio y el anfitrión OEM.
 - Selección de comunicación: La tarjeta dispone de cuatro interfaces de comunicación RS-232, RS-485, Modo *Loopback* y 40 pines.
 - Voltaje del Radio: Dos posibles voltajes para energizar el radio, +5v y +3.3v.
 - Fuente de Potencia: Tres opciones para suministrar el voltaje a la tarjeta, Conector de Potencia, Baterías, Potencia USB.

5. Conector del Módulo AC4790: Es el espacio de la tarjeta destinado para conectar el transceptor.
6. Conector de Potencia: Utilizado para conectar el adaptador de potencia a la tarjeta, cuando el interruptor de puente de la sección fuente de potencia se ubica en Conector de Potencia (*Power Conn*).
7. Conector de 40 pines: Se utiliza para acceder a los pines de entrada/salida del módulo AC4790, los cuales tienen niveles de señal que se encuentran entre 0.4v y 5.5v.

3.2.2.2. Comunicación entre los Módulos AC4790

El módulo radio se comunica con el anfitrión OEM mediante una interfaz serial TTL. A través de esta interfaz, el módulo radio puede comunicarse directamente con cualquiera de las interfaces de comunicación disponibles en la tarjeta: RS-232, RS-485, Modo *Loopback*, 40 pines, USB, de las cuales se estableció la interfaz USB para comunicar el anfitrión OEM y el módulo radio en el desarrollo de las pruebas.

Una prueba de comunicación entre dos módulos AC4790 se realiza mediante el envío de paquetes de datos, desde el anfitrión OEM conectado al transceptor que desea iniciar la comunicación, hacia el receptor deseado conectado al anfitrión OEM, en el que se reportan el número éxitos y errores. El anfitrión OEM designado como transmisor, inicia el envío de paquetes desde el software de prueba y a través del puerto de comunicación del anfitrión OEM, hasta llegar a la tarjeta y en seguida al radio AC4790 por el pin R_{XD} . Aquí se llevan a cabo los procesos de salto en frecuencia, sincronización y posteriormente, transmisión de los datos mediante una interfaz RF conectada a la antena. En el lado receptor, la antena recibe los datos y los pasa por la interfaz RF al transceptor y los lleva al pin T_{XD} , desde este pin salen los datos fuera del radio AC4790, y se envían de forma serial hacia la interfaz USB del anfitrión OEM designado como receptor, en el que también se está ejecutando el software de prueba. Finalmente del lado receptor se obtienen todos los paquetes recibidos correctos o errados de la prueba.

La Figura 3.4 presenta el diagrama de conexión entre las tarjetas y el computador, que explica cómo se realiza la comunicación entre el radio y el software que se ejecuta en el anfitrión OEM.

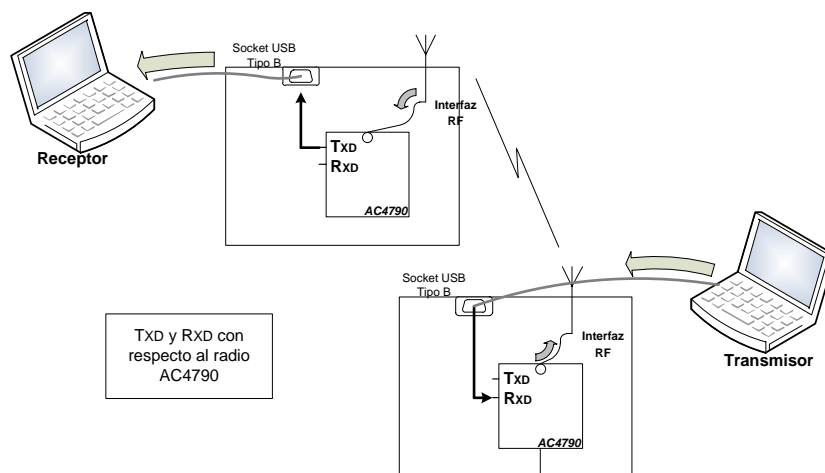


Figura 3.4 Funcionamiento de los módulos AC4790 integrados al SDK.

3.2.2.3. Configuración AC4790

La ventana de configuración es una interfaz gráfica para acceder a los 256 bytes de la EEPROM contenida en el radio. Una vez se conecta la tarjeta al computador, desde la ventana de configuración del anfitrión OEM, se selecciona y se abre el puerto de comunicación del dispositivo inalámbrico. A continuación, en la ventana de configuración se presiona el botón *Read Radio* para leer el contenido de la EEPROM del radio. Si la tarjeta está conectada apropiadamente el radio se puede leer correctamente [35]. En la Figura 3.5 se muestra la ventana de Configuración para el modulo radio AC4790 cuando es leído de forma exitosa.

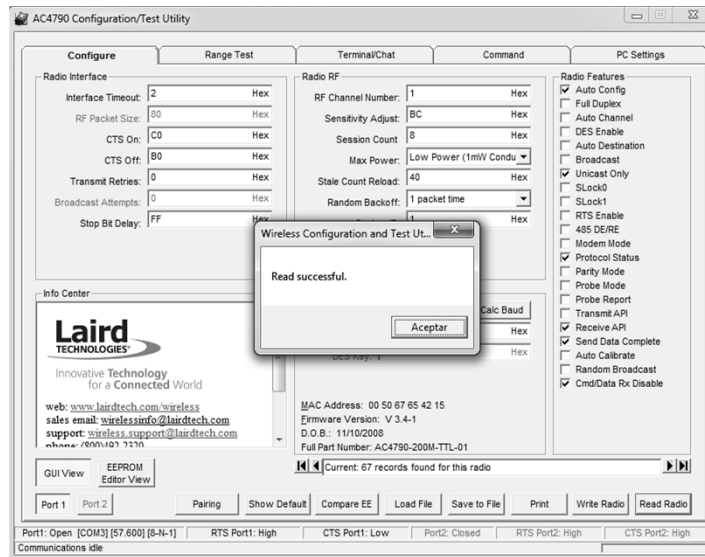


Figura 3.5 Ventana de configuración del Radio

A continuación se realiza una breve descripción de los parámetros que conforman la ventana de Configuración del módulo radio presentada en la Figura 3.5.

1. Interfaz Radio

La interfaz radio es una sección de la ventana de configuración, que contiene los parámetros encargados de asegurar la fiabilidad en el canal y que permiten que los datos se envíen y se reciban correctamente entre el transmisor y el receptor.

- **Tiempo de Espera de la Interfaz** (*Interface Timeout*)

El tiempo de espera de la interfaz específica el tiempo de espera máximo entre bytes consecutivos, y se utiliza junto con el tamaño del paquete RF para determinar cuándo un paquete que viene sobre la interfaz está completo. Este tiempo de espera es ajustable en incrementos de 0.5ms y tiene una tolerancia de ± 0.5 ms, por lo que debe ser establecido en un mínimo de 2ms (0x04) que es el valor por defecto.

- **Tamaño del Paquete RF** (*RF Packet Size*)

El tamaño del paquete RF define el tamaño máximo de un paquete RF, sin incluir los bytes adicionales de encabezado que contiene el paquete enviado por el transceptor. Cuando el transceptor recibe el número de bytes especificado por el Tamaño del Paquete RF, sin experimentar un espaciado de byte igual al Tiempo de Espera de la Interfaz, ese bloque de datos es procesado como un paquete completo.

- **Listo para Enviar, Encendido/Apagado** (CTS, *Clear to Send – On/ Off*)

El transceptor tiene un buffer de 256 bytes de tamaño. El CTS controla el estado del buffer para evitar la pérdida de los datos, que se envían al transceptor antes de que su buffer sea vaciado. Cuando el buffer está lleno el pin CTS se coloca en alto (deshabilitado) y cuando el buffer se vacía, CTS se lleva a bajo (habilitado). CTS *On* y CTS *Off* controlan la operación del CTS. CTS *On* determina el número de bytes que deben estar en el buffer para que CTS sea deshabilitado. Una vez CTS este deshabilitado, CTS *Off* especifica el tamaño hasta el cual se vacía el buffer.

- **Intentos de Retransmisión** (*Transmit Retries*)

Este parámetro especifica el número máximo de veces que un paquete se envía cuando se seleccionan paquetes direccionados (*Addressed packets*), y se utiliza para incrementar la probabilidad de recepción exitosa de los paquetes por el receptor deseado.

- **Intentos Broadcast** (*Broadcast Attempts*)

Este parámetro indica el número máximo de veces que un paquete se envía cuando se seleccionan Paquetes Broadcast (*Broadcast Packets*), y es útil para incrementar la probabilidad de entrega exitosa de los paquetes a los receptores. Cuando el receptor recibe el paquete exitosamente, este rechaza cualquier duplicado de paquete causado por Intentos *Broadcast* adicionales.

- **Retardo de Bit de Parada** (*Stop Bit Delay*)

El retardo del bit de parada controla el ancho del último bit antes de que el bit de parada se produzca. Generalmente, este parámetro debería ser mayor o igual que el tiempo de un bit, que se expresa como el inverso de la tasa de baudios y se representa en la ecuación 3.1.

$$t_b = \frac{1}{T_B} \quad (3.1)$$

Donde:

T_B : Velocidad de Transmisión de Datos RF= 76800 bps

Este parámetro es programado automáticamente por el kit de desarrollo de software en el valor 0xFF que Deshabilita el Retardo de Bit de Parada (12us).

En Tabla 3.7 se registran los valores en hexadecimal del rango, valor por defecto y valor configurado para cada parámetro de la Interfaz Radio.

Tabla 3.7 Valor de los Parámetros de la Sección Interfaz Radio

Parámetro	Rango	Valor por Defecto	Valor de Configuración
Tiempo de Espera de la Interfaz.	0x02 - 0xFF	0x04	0x02
Tamaño del Paquete RF.	0x01 - 0x80	0x80	0x80
Listo para enviar, Encendido/Apagado.	On: 0x01 - 0xFF Off: 0x00 - 0xFE	On: 0xD2 Off: 0xAC	On: 0xC0 Off: 0xB0
Reintentos de Transmisión	0x00 - 0xFF	0x04	0x00
Intentos Broadcast	0x00 - 0xFF	0x04	0x00
Retardo de Bit de Parada	0x00 - 0xFF	0xFF	0xFF

2. Radio RF

La sección de Radio RF, contiene los parámetros que intervienen en el establecimiento de la comunicación entre el transmisor y el receptor.

- **Numero de Canal RF** (*RF Channel Number*)

El radio AC4790 se comunica mediante la técnica de transmisión FHSS, utilizando valores de frecuencia espaciados en la banda de 902 – 928 MHz. El módulo AC4790 dispone de dos configuraciones de banda: la configuración 0 comprende la banda de frecuencias de 902 – 915 MHz y la configuración 1 comprende todo la banda de frecuencia de 902 – 928 MHz; el ancho de banda disponible en la configuración 0 es 13 MHz, el cual se divide en canales de 500 KHz para los saltos en frecuencia (FCC sección 15.247), por lo tanto los canales del rango 0x00 – 0x0F saltan en 26 frecuencias diferentes. La configuración 1 dispone de un ancho de banda de 26 MHz, entonces los canales del rango 0x10 – 0x2F saltan en 50 frecuencias diferentes. El número de canal RF especifica una secuencia de salto pseudo-aleatoria única. Se recomienda usar la configuración 1 ya que esta salta a través de todas las frecuencias en la banda de 902- 928 MHz, lo cual es más útil cuando se trabaja en ambientes de mucho ruido. En la Tabla 3.8 se describe las configuraciones de canal, el rango y todos los canales de operación del módulo de acuerdo a la configuración.

Tabla 3.8 Configuración del Canal RF

Configuración del Canal	Rango del Numero de Canal RF	Detalles de Frecuencia
0	0 – 0x0F	902 – 915 MHz (26 saltos)
1	0x10 – 0x2F	902 – 928 MHz (50 saltos)

- **Ajuste de la Sensibilidad** (*Sensitivity Adjust*)

El ajuste de la sensibilidad controla la sensibilidad del receptor RF en el transceptor, la cual indica el valor mínimo requerido por dicho transceptor para establecer una sesión de comunicación. A medida que este byte disminuye, la sensibilidad también se reduce.

- **Contador de Sesión Actual** (*Session Count Refresh*)

Cuando el transceptor inicia una sesión de comunicación RF, carga su Contador de Sesión (Registro de 8 bits) de acuerdo a la configuración del *SLock* del transceptor. Cada 50 ms (equivalentes al periodo del salto) el contador es disminuido, a menos de que un evento ocurra para reiniciar el contador de sesión (por ejemplo, la recepción de datos o un reconocimiento RF por parte del transceptor). Cuando el contador de sesión llega a cero, el radio se declara fuera de sesión.

- **Potencia Maxima** (*Max Power*)

El transceptor tiene una Potencia de salida RF ajustable. La potencia puede ajustarse dinámicamente para optimizar la comunicación y obtener mayor alcance.

- **Cuenta Obsoleta Actual** (*Stale Count Reload*)

Cada transceptor mantiene una tabla que contiene hasta 8 de los radios de los cuales ha recibido paquetes RF recientemente. En la tabla, un radio está clasificado como obsoleto o activo. La cuenta obsoleta actual determina la cantidad de tiempo durante el cual un transceptor conservará un radio como activo en su tabla de radios. El contador de radios obsoletos (registro de 8 bits) se establece en 0 cuando un paquete es recibido. Este se incrementa cada 100 ms.

- **Backoff Aleatorio** (*Random Backoff*)

El *backoff* aleatorio determina la cantidad de tiempo que un transceptor espera cuando ocurre una colisión antes de reenviar el paquete nuevamente.

- **ID del Sistema** (*System ID*)

El ID del Sistema es similar a un carácter secreto o un número de red, que garantiza la seguridad de la red. Un receptor no entrará en una sesión o se comunicará con otro transceptor con un diferente ID del Sistema.

- **Dirección de Destino** (*Destination Address*)

La dirección de destino es la dirección de Control de Acceso al Medio (MAC, *Media Access Control*) del receptor de destino en la red. Solo los 3 bytes menos significativos (LSBs, *Least Significant Bytes*) de la dirección de destino son usados para el envío del paquete. Valores

- **Clave DES** (*DES Key*)

El cifrado es el proceso de codificación de un flujo de bits de información para asegurar el contenido de los datos. El algoritmo de cifrado de Datos (DES, *Data Encryption Standard*) es una rutina de cifrado simple, común y bien establecida. Una clave de cifrado (Clave DES) de 56 bits se utiliza para cifrar el paquete, de manera que el receptor debe usar la misma clave para descifrar el paquete; de otro modo se producirán datos ilegibles.

En la Tabla 3.9 se presentan los valores en hexadecimal del Rango o la configuración, Valor por defecto y valor establecido para cada parámetro de la sección Radio RF.

Tabla 3.9 Valor de los Parámetros de la sección Radio RF

Parámetro	Rango o Configuración	Valor por Defecto	Valor Establecido
Número de Canal RF	0x00 - 0x2F	0x00	0X01
Ajuste de la Sensibilidad	0x00 - 0xFF	0xD8	0xBC
Cuenta de Sesión Actual	0x00 - 0xFF	0x08	0x08
Potencia Máxima	Potencia máxima: 0x60 Media potencia (50mW): 0x0D Cuarto de potencia (25mW): 0x0A Potencia mínima (1mW): 0x03	Potencia máxima (0x60)	Potencia mínima (1mW): 0x03
Cuenta Obsoleta Actual	0x01 - 0xFF	0x40	0x40
Backoff Aleatorio	1 vez por paquete: 0x00 1-2 veces por paquete: 0x01 1-4 veces por paquete: 0x03 1-8 veces por paquete: 0x07 1-16 veces por paquete: 0x0F 1-32 veces por paquete: 0x1F 1-64 veces por paquete: 0x3F 1-128 veces por paquete: 0x7F 1-256 veces por paquete: 0xFF	1 vez por paquete (0x00)	1 vez por paquete (0x00)
ID del Sistema	0x00 - 0xFF	0x01	0x01
Dirección de Destino	0x00 - 0xFF	0xFF 0xFF 0xFF 0xFF 0xFF 0xFF	0x00 0x50 0x67 0x65 0x42 0x??
Clave DES	0x00 - 0xFF	0x0D 0x1D 0x2D 0x3D 0x4D 0x5D 0x6D	0x0D 0x1D 0x2D 0x3D 0x4D 0x5D 0x6D

3. Características Radio

Esta sección contiene casillas de configuración que están relacionadas con el protocolo de comunicación y los modos de operación del radio. A continuación se describen las características utilizadas en la configuración del radio.

- **Auto Configuración** (*Auto Config*)

La casilla de verificación de Auto Configuración ajusta automáticamente el tamaño del Paquete RF basado en varios modos de selección para optimizar el ancho de banda RF. Al habilitar ésta casilla el transceptor sobrepasará el valor para el Paquete RF almacenado en EEPROM y usará un valor predeterminado para el modo dado.

- **Sólo Unicast** (*Unicast Only*)

Para evitar que los transceptores reciban paquetes *Broadcast*, la casilla de Sólo Unicast establece que el transceptor reciba únicamente paquetes direccionados.

- **Habilitar RTS (RTS Enable)**

Con el modo RTS habilitado, el anfitrión OEM puede evitar que el transceptor le envíe información, deshabilitando RTS (estado lógico alto), lo cual provoca que el transceptor almacene los datos en su buffer. Una vez que RTS es habilitado (estado lógico bajo), el transceptor continuará enviando datos al anfitrión OEM, comenzando con los datos almacenados en su buffer.

- **Estado del Protocolo (Protocol Status)**

El radio tiene dos pines, GO0 y GO1, que al ser habilitados realizarán las funciones de Estado de Sesión y Reconocimiento Recibido respectivamente.

Estado de Sesión: al habilitarlo, GO0 estará en el estado lógico bajo cuando el transceptor no esté en una sesión. Al iniciar o entrar en una sesión, GO0 ira al estado lógico alto y permanecerá en alto hasta que el transceptor abandone la sesión.

Reconocimiento Recibido: el radio usa el GO1 para indicar que un reconocimiento RF fue recibido desde el radio remoto. GO1 está normalmente en el estado lógico bajo y estará en el estado lógico alto dentro de aproximadamente 75 μ s después de recibir un reconocimiento RF. Este pin permanecerá en alto hasta el final (flanco de subida) del siguiente salto.

- **Deshabilitar Datos / Comandos en RX (Command/Data RX Disable)**

Por defecto, el receptor del radio está habilitado mientras el pin CMD/Data (pin 17) se ajusta en el estado lógico bajo. Cuando este comando se activa en la EEPROM, el radio deshabilita el receptor RF siempre que CMD/Data esté en estado lógico bajo. Para asegurar que el radio no esté en el medio de la transmisión de datos al anfitrión OEM, este debería estar preparado para recibir los datos hasta 50 ms después de ajustar CMD/Data en estado lógico bajo.

También se utilizan las casillas: API de Transmisión (*Transmit API*), API de Recepción (*Receive API*), Envío Completo de los Datos (*Send Data Complete*), que emplean formatos de paquete específicos, los cuales contienen los parámetros de configuración del radio explicados en la primera sección de este capítulo.

Las casillas de verificación que contiene la sección de Características del Radio pueden estar habilitadas o deshabilitados. En la Tabla 3.10 se presentan los valores designados para los dos posibles estados en hexadecimal de los parámetros seleccionados y la configuración asignada para ellos.

Tabla 3.10 Valor de los Parámetros de la sección Características Radio

Parámetro	Habilitado (Enabled)	Deshabilitado (Disable)	Configuración Asignada
Auto Configuración	1	0	1
Sólo Unicast	1	0	1
Estado del Protocolo	0xE3	0xFF	0xFF
API de Transmisión	1	0	1
API de Recepción	1	0	1
Envío Completo de Datos	1	0	1
Deshabilitar Datos / Comandos en RX	0xE3	0xFF	0xE3 (Modo Transmisión) 0xFF (Modo Comando)

3.2.2.4. Prueba de Rango

La ventana de Prueba de Rango permite enviar paquetes de datos entre dos radios y registra el número de ejecuciones exitosas y con errores. La Figura 3.6 muestra la ventana de Prueba de Rango del radio que está transmitiendo los datos.

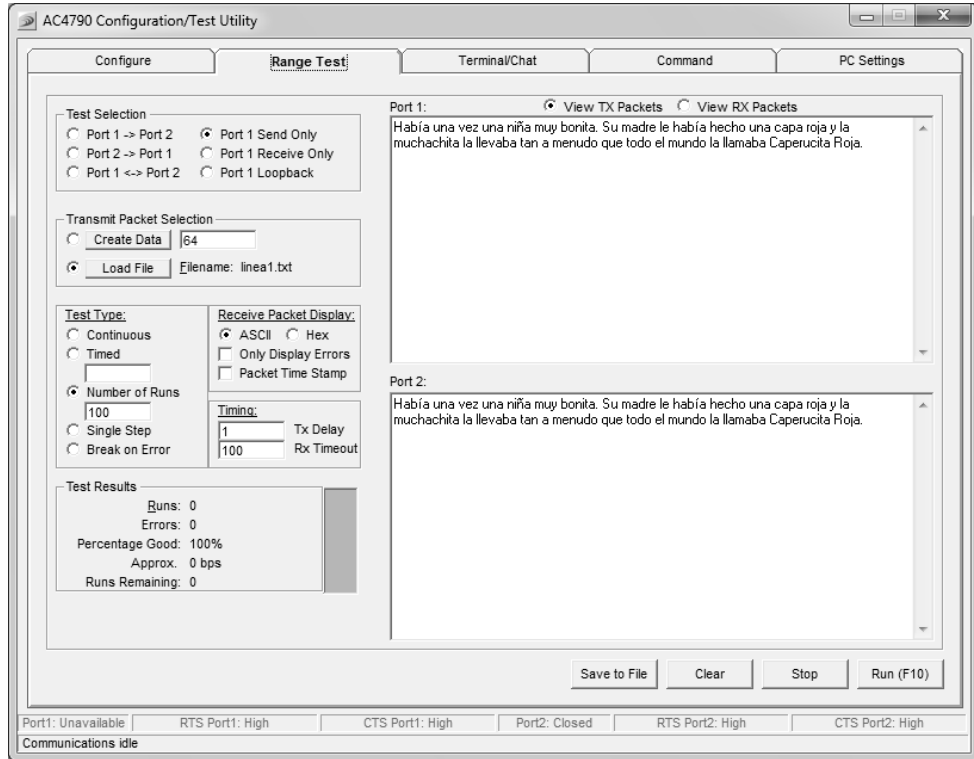


Figura 3.6 Ventana de Prueba de Rango

Esta ventana está dividida en varias secciones, las cuales cuentan con parámetros útiles de configuración o de resultados, y que a continuación se describen de forma breve.

1. Selección de Prueba (*Test Selection*)

La Selección de Prueba proporciona seis opciones de prueba, que se clasifican de acuerdo a tres posibles conexiones de los dos radios al (los) computador(es) donde se ejecuta el software.

- A. Un radio se conecta al puerto serial o USB de un Computador, el segundo radio se conecta a una fuente de alimentación separada del primero y la posición del jumper de la Comunicación se establece en *Loopback*. Este modo se utiliza para resolver problemas de conexión física, detectando la señal enviada por el mismo puerto. En la Figura 3.7 se presenta la conexión para la prueba en modo *Loopback*.

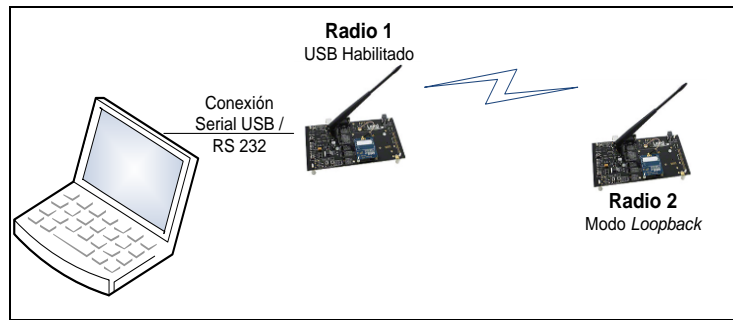


Figura 3.7 Conexión inalámbrica entre los radios en Modo *Loopback*.

- B. Un radio se conecta al puerto serial o USB en un Computador, el segundo radio es conectado a un puerto serial o USB diferente del mismo computador y la posición del interruptor de puente de la Comunicación se establece en USB Habilitado (*USB Enable*). En la Figura 3.8 se muestra la conexión para el modo USB utilizando un solo computador.

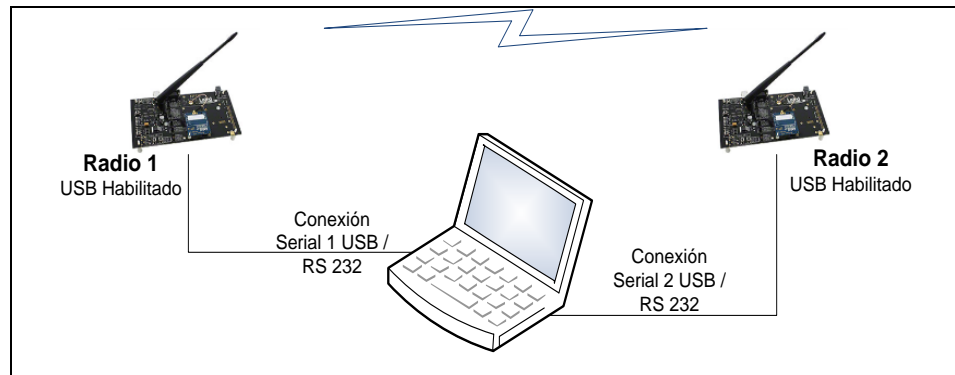


Figura 3.8 Conexión inalámbrica entre los radios en Modo USB con un PC.

- C. Un radio se conecta al puerto serial o USB de un Computador y el segundo radio se conecta a un puerto serial o USB de otro Computador. El interruptor de puente se ubica en la posición USB Habilitado (*USB Enable*). Esta conexión se ilustra en la Figura 3.9.

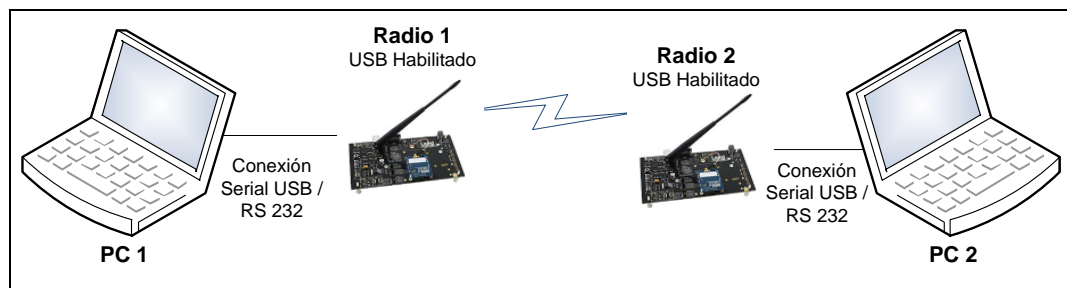


Figura 3.9 Conexión inalámbrica entre los radios en Modo USB con dos PCs.

A continuación, se presenta la Tabla 3.11, en la cual se registran las posibles selecciones de prueba junto con las funciones del puerto de comunicación y la configuración apropiada de los radios al computador.

Tabla 3.11 Función y Configuración para la Selección de Prueba

Selección de Prueba	Función Puerto 1	Función Puerto 2	Configuración de los Radios al Computador (es)
Puerto 1 → Puerto 2	Tx	Rx	B
Puerto 1 ← Puerto 2	Rx	Tx	B
Puerto 1 ↔ Puerto 2	Tx/Rx	Tx/Rx	B
Puerto 1 Sólo Envía	Tx	No Aplica	C
Puerto 1 Sólo Recibe	Rx	No Aplica	C
Puerto 1 Loopback	Tx/Rx	No Aplica	A

La configuración A se utilizó inicialmente para probar el funcionamiento de los radios. La configuración C se utilizó para las pruebas del sistema, dada la limitación en distancia que presenta la configuración B.

2. Selección del Paquete Transmitido (*Transmit Packet Selection*)

Esta sección describe la selección del paquete de datos empleado para realizar la prueba. Se tienen dos opciones, la primera es crear un paquete datos especificando la longitud en bytes y la segunda es cargar un archivo personalizado de texto o de comandos.

3. Tipo de Prueba (*Test Type*)

Esta sección de la ventana de Prueba de Rango permite seleccionar cual será la duración del envío y recepción de paquetes. Los tipos de prueba disponibles son: continuo, en un tiempo determinado, número de ejecuciones, simple paso, interrumpir en caso de error.

4. Visualización de Paquetes Recibidos (*Receive Packet Display*)

Esta sección permite seleccionar la manera en que los paquetes recibidos pueden ser presentados. Los paquetes recibidos pueden ser desplegados en formato ASCII o Hexadecimal, desplegados con una marca de tiempo y/o mostrados solo cuando un error ha ocurrido.

5. Sincronización (*Timing*)

Esta sección permite modificar el tiempo de la prueba en el Transmisor y Receptor

- Retardo de Transmisión (*Tx Delay*)
Este parámetro permite modificar el retardo entre cada paquete en milisegundos (ms).
- Tiempo de espera de Recepción (*Rx Timeout*)
Este parámetro permite establecer la cantidad total de tiempo en milisegundos que el radio espera un paquete antes de emitir un error *Data Timeout*.

6. Resultados de la Prueba (*Test Results*)

Resultados de la prueba es la sección de la ventana que proporciona los resultados de la prueba.

- Ejecuciones (*Runs*)

El número de ejecuciones se incrementa cada vez que se envía o recibe un paquete.

- Errores (*Errors*)

Este parámetro despliega el número de errores que se producen mientras se realiza una prueba. Hay dos tipos de errores que se pueden presentar en la transmisión de un paquete: Error de Datos (*Data Error*) y Datos fuera de Tiempo (*Data Timeout*).

- ✓ Error de Datos (*Data Error*): Indica que los datos no pasaron el chequeo CRC, por lo cual el paquete fue desplegado como un paquete errado.
- ✓ Datos fuera de Tiempo (*Data Timeout*): Indica que el receptor no recibió ningún paquete del transmisor en el tiempo asignado al parámetro Tiempo de espera de Recepción (*RX Timeout*).

- Porcentaje de Éxito (*Percentage Good*)

Este parámetro muestra el porcentaje de resultados de las pruebas que fueron exitosos y se calcula mediante la ecuación 3.2.

$$\text{Porcentaje de Ejecuciones Buenas} = \frac{(\text{Ejecuciones} - \text{Errores})}{\text{Ejecuciones}} * 100 \quad (3.2)$$

- Throughput Aproximado (*Approximate Throughput*)

Este parámetro utiliza un cálculo aproximado para desplegar la cantidad de datos transferidos en bits por segundo (bps).

3.2.3. Antena

La tarjeta de evaluación del AC4790-200M utiliza una antena externa que cumple con los criterios de desempeño del módulo radio en cuanto al alcance y rango de frecuencias de operación. Puesto que la antena es un elemento clave en el éxito del diseño de cualquier sistema radio, a continuación se realiza una exploración de sus características principales y la descripción del modelo de antena S467FL-L-RMM-915S de *Nearson*¹⁵ incluida en las tarjetas de evaluación utilizadas.

La antena contenida en el SDK es una antena omnidireccional que tiene polarización lineal vertical, lo cual hace que la radiación sea ligeramente menos afectada por las reflexiones en el camino de transmisión. Cada tarjeta de evaluación incluye una antena externa que permite transmitir ondas radioeléctricas en la banda de frecuencia de 902-928 MHz y a la potencia deseada. Esta antena se muestra en la Figura 3.10.

¹⁵ *Nearson*: Compañía de diseño y fabricación de antenas para todo tipo de aplicaciones de comunicación inalámbrica. <http://www.nearson.com/>.

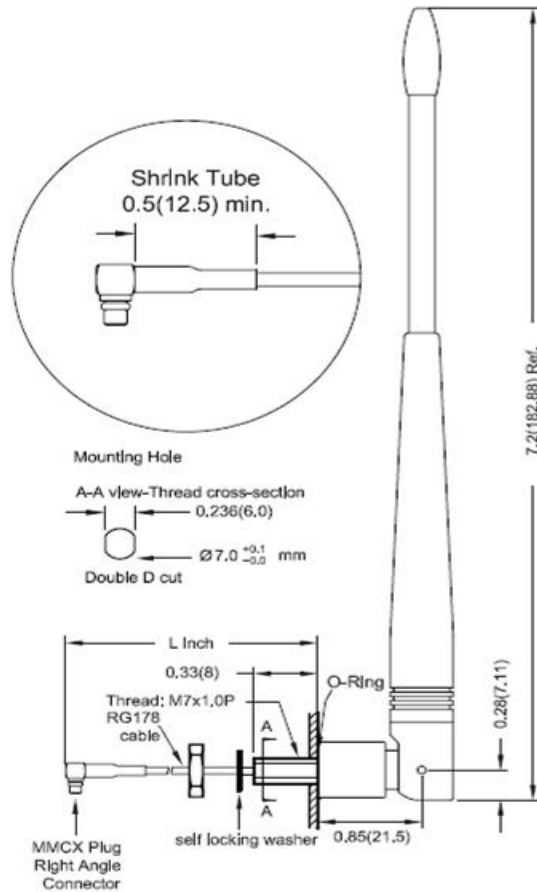


Figura 3.10 Diagrama de la antena

En la Tabla 3.12 y en la Tabla 3.13 se encuentran las propiedades eléctricas y mecánicas de la antena utilizada.

Tabla 3.12 Propiedades Eléctricas de la Antena

Rango de Frecuencia	902-928 MHz
Impedancia	50Ω nominal
Relación de Onda Estacionaria (VSWR, Voltage Standing Wave Ratio)	<2.0:1
Ganancia (medida antes del cable)	2.0dBi
Patrón de Radiación	Omnidireccional
Polarización	Vertical
Tipo	Monopolo de Media Onda

Tabla 3.13 Propiedades Mecánicas de la Antena

Cable	M17/93-RG178; Industrias Harbour	
Longitud del Cable	Longitud Estándar L= 5 pulgadas	
Material	Cubierta (Overmold)	Poliuretano (Negro): BASF
	Torniquete (Swivel)	Poliuretano (Negro): BASF Policarbonato (Negro): Bayer
Temperatura de Operación	-20°C - +65°C	
Temperatura de Almacenamiento	-30°C - +75°C	

CAPÍTULO 4. EJECUCIÓN DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a los objetivos del presente trabajo de grado y en cuanto a la evaluación y análisis del desempeño a nivel físico del sistema de comunicación de datos, en este capítulo se realiza una descripción detallada de los dos escenarios considerados: exteriores e interiores junto al análisis de la predicción de cobertura realizada mediante la herramienta software *Wireless InSite*¹⁶. Posteriormente, se documenta las pruebas que se llevaron a cabo en las medidas reales y se realiza el análisis de los resultados obtenidos que incluye la comparación del nivel de potencia recibido en la implementación real, con la predicción realizada por la herramienta software en los dos escenarios propuestos y bajo condiciones de interferencia.

4.2. ESCENARIOS DE PRUEBA

Para evaluar el desempeño del sistema de comunicación de datos vía radio en 900 MHz, se consideran dos escenarios distintos: espacio libre (exteriores) e interiores, y bajo condiciones de interferencia. La predicción de cobertura del sistema de comunicaciones se realizó mediante el uso de la herramienta software de predicción de propagación *Wireless InSite*, en la que se recrearon los dos escenarios seleccionados. A continuación, se realiza una descripción detallada de los escenarios de simulación mencionados y de los parámetros que se tuvieron en cuenta en la configuración de los transmisores y receptores, junto a un análisis de los resultados obtenidos.

4.2.1. Exteriores (*Outdoor*)

El escenario de exteriores considerado en el presente trabajo de grado, fue la cancha de fútbol del Centro Deportivo Universitario de la Universidad del Cauca (CDU), que es un espacio que presenta las condiciones necesarias para la realización de las pruebas en este tipo de escenario, tal como puede observarse en la Figura 4.1 y que por lo mismo, fue el lugar que se tomó de referencia para modelar los escenarios en la herramienta software como se observará en la siguiente sección.

¹⁶ Información disponible en <http://www.remcom.com/wireless-insite>



Figura 4.1 Escenario de Espacio libre - Exteriores (*Outdoor*)

4.2.1.1. Predicción de Cobertura en Wireless Insite

Para exteriores, se realizaron 2 simulaciones, en cada una de las cuales se tuvieron en cuenta características semejantes en cuanto a las dimensiones y los materiales utilizados en la creación del escenario, pero con diferencias en los modelos de propagación empleados. El escenario inicial diseñado en la herramienta para cada una de las simulaciones en exteriores, es un campo abierto, libre de obstáculos y de dimensiones semejantes a las de una cancha de futbol; se definió como un terreno de tierra mojada cubierto con follaje, de 120 m de largo por 80 m de ancho.

4.2.1.1.1. Simulación 1

La primera simulación, fue realizada con el fin de determinar el comportamiento del sistema en un ambiente libre de obstáculos tales como árboles, edificios o montañas, de manera que se evalúe el efecto de las pérdidas de propagación en espacio libre. Para el análisis de cobertura fue creada un área de estudio, la cual se observa levemente delineada en color amarillo sobre el terreno en mención. Este escenario puede apreciarse en dos planos en la Figura 4.2, el primero en dos dimensiones y el segundo en tres dimensiones, en la cual se observan localizados sobre el terreno el punto transmisor y la ruta de receptores. Para la ubicación de estos últimos, se utilizó el receptor tipo ruta, el cual ubica de manera uniforme varios puntos a lo largo de una línea recta de color rojo y los coloca a una distancia determinada, dependiendo de las especificaciones que el usuario haya registrado en la configuración del espaciamiento entre receptores. Como se observa, se tienen 21 receptores, el primero se encuentra ubicado a 10 m del transmisor y existe una distancia de 5 m entre los receptores dispuestos a lo largo de la ruta, hasta llegar a una distancia máxima de 110 m. La predicción para esta primera simulación se calcula usando el modelo de Espacio Libre y la señal que se transmite corresponde a una frecuencia central de 915 MHz con ancho de banda de 500 KHz, de acuerdo a las reglas y recomendaciones de la Comisión Federal de Comunicaciones (*FCC Federal Communications Commission*) en la sección 15.247 para la banda UHF de 900 MHz. El transmisor utiliza una potencia de transmisión mínima de 0 dBm y una antena tipo monopolo lineal, al igual que los receptores; estas antenas con polarización vertical tienen una ganancia igual a 2 dBi y están ubicadas a una altura de 1 m del suelo. Las características descritas anteriormente se resumen en la Tabla 4.1

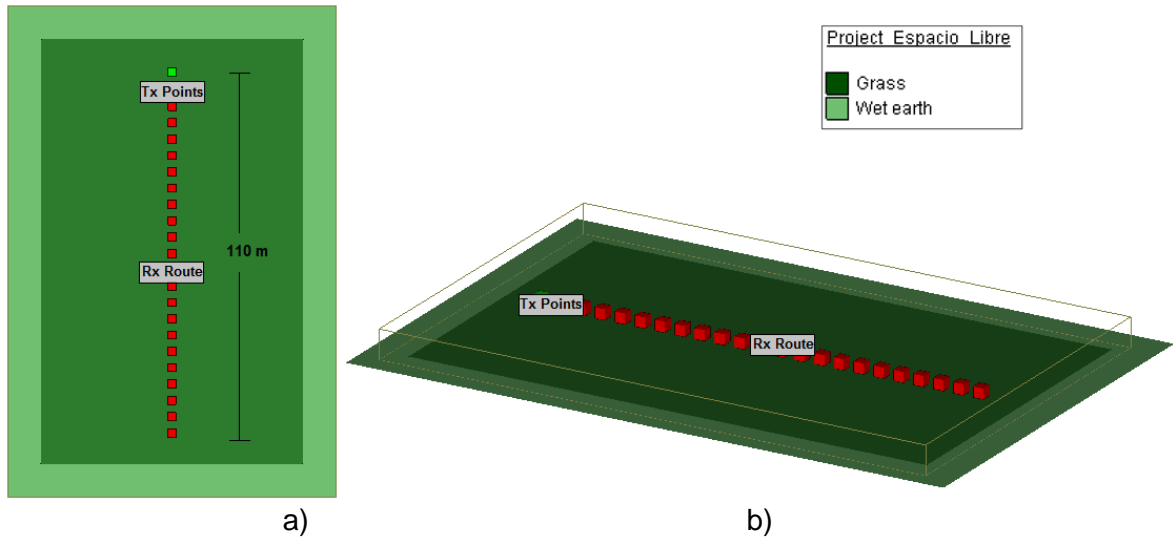


Figura 4.2 Escenario de exteriores a) 2D b) 3D

Tabla 4.1 Parámetros Configurados en exteriores.

Descripción	Datos
Potencia de transmisión	0 dBm (1mw)
Frecuencia de operación	915 MHz
Ancho de banda del canal	500 KHz
Altura de antenas Tx- Rx	1 m
Tipo de antena	Monopolo
Polarización	Vertical
Ganancia de antena	2 dBi

I. Resultados de Predicción

Los resultados obtenidos a lo largo de cada simulación fueron graficados mediante el software utilizado, tales como la potencia recibida y las pérdidas de propagación a lo largo de la ruta de los receptores, entre otros.

a) Potencia Recibida

En la Figura 4.3 se observa la curva de la potencia recibida de la simulación 1 para el escenario de exteriores, en la cual se debe tener en cuenta que el valor de potencia registrado en la figura a la distancia de 10 m, corresponde al valor de potencia recibido en el primer receptor. Se observa que para los primeros metros, se registra una cantidad mayor de potencia debido a que este sector tiene incidencia directa del transmisor, con un valor máximo de -49.39 dBm y un valor mínimo de -71.39 dBm respectivamente.

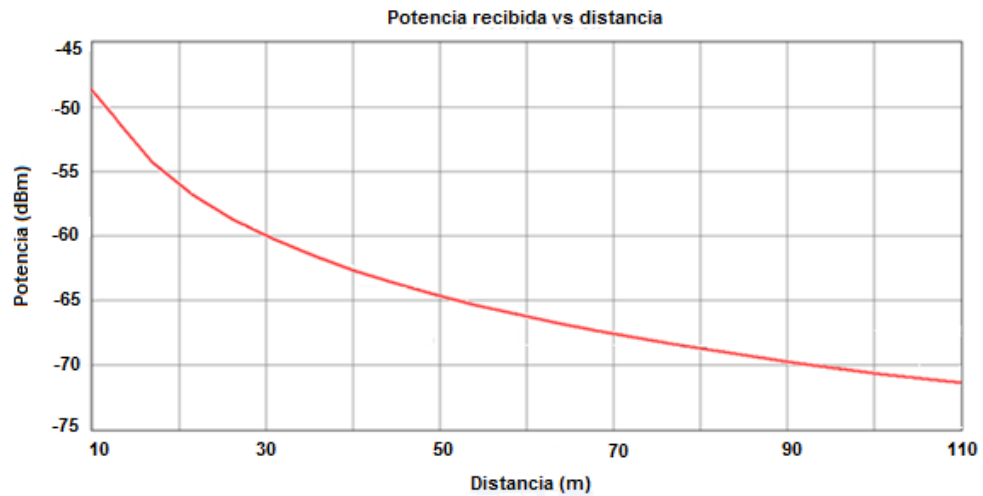


Figura 4.3 Potencia recibida vs distancia para la simulación 1.

En la Figura 4.4, se representa los diferentes niveles de potencia a lo largo de la ruta, mediante una distribución de colores de acuerdo al valor de potencia registrado en cada ubicación, esta clasificación corresponde a los mismos valores de la Figura 4.3 y se observa en la barra de colores ubicada en la parte final.

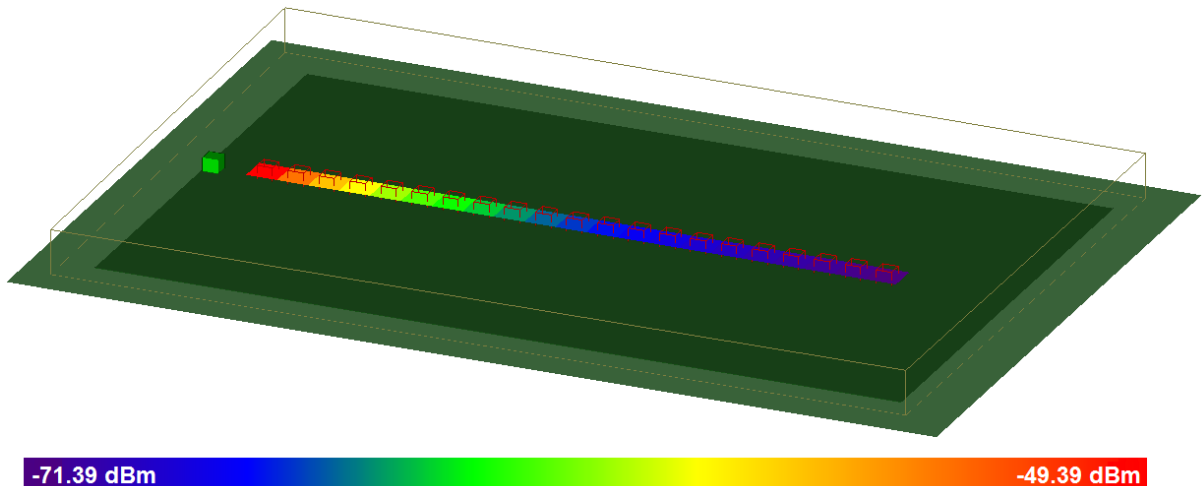


Figura 4.4 Nivel de Potencia a lo largo de la ruta de receptores.

b) Pérdidas de Propagación

La Figura 4.5, presenta las pérdidas de propagación para el escenario de exteriores, en la que se establece una relación proporcional entre la distancia y las pérdidas obtenidas. Se obtuvo un valor inicial de pérdidas a una distancia de 10 m correspondiente a 53.5 dB y un valor de 75.4 dB a los 110 m de distancia.

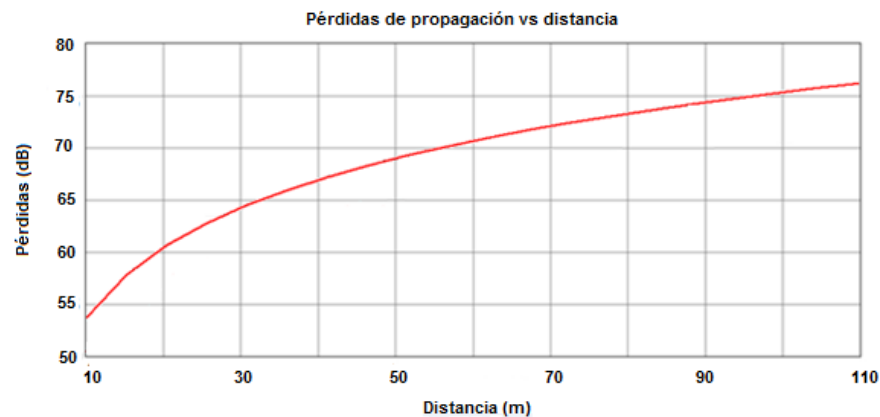


Figura 4.5 Pérdidas de propagación vs distancia para la simulación 1.

4.2.1.1.2. Simulación 2

En esta simulación se tuvieron en cuenta las mismas características de la simulación 1, a excepción del modelo de propagación utilizado, el modelo Full 3D, que nos permitió apreciar los trayectos de propagación generados por los rayos lanzados desde el punto de transmisión hacia los puntos de la ruta puesto que este modelo está basado en la técnica de trazado de rayos.

I. Resultados de Predicción

a) Potencia Recibida

En la Figura 4.6 se observan los niveles de potencia recibidos a lo largo de la ruta de receptores, presentando valores máximo y mínimo de -46.39 dBm y -68.39 dBm, es decir, se tiene que para los primeros metros existe una concentración superior de potencia y a medida que los receptores se alejan, su nivel de potencia disminuye. En la Figura 4.7 se observa el nivel de potencia a lo largo de la ruta de receptores, siendo los colores rojo, naranja y amarillo indicadores de un buen nivel de señal.

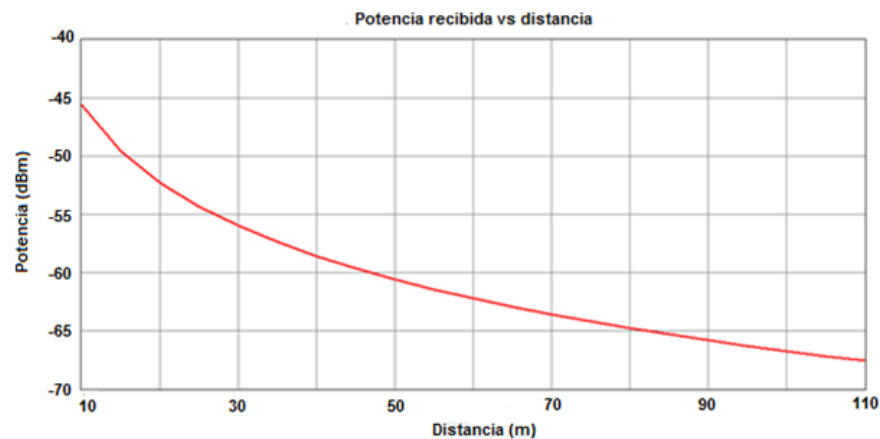


Figura 4.6 Potencia recibida vs distancia para la simulación 2.

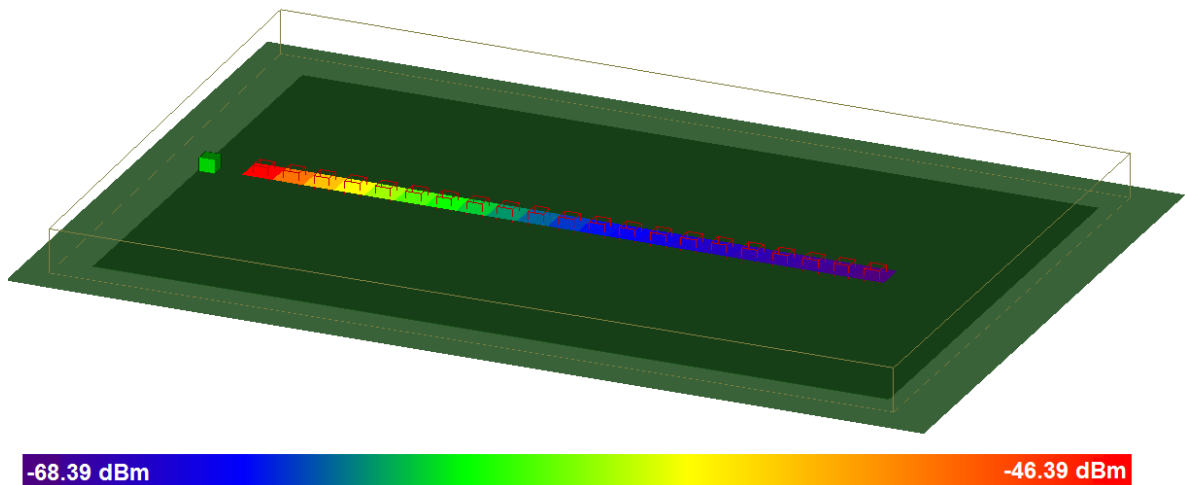


Figura 4.7 Nivel de potencia a lo largo de la ruta de receptores.

b) *Pérdidas de propagación*

En la Figura 4.8 se presentan las pérdidas de propagación para la simulación 2, en las que también se ve establecida una relación proporcional entre la distancia y las pérdidas, obteniendo un valor inicial de pérdidas igual a 50.4 dB en la distancia 10 m que corresponde a la ubicación del primer receptor y un valor de 72.4 dB en la distancia 110 m que corresponde a la ubicación del último receptor.

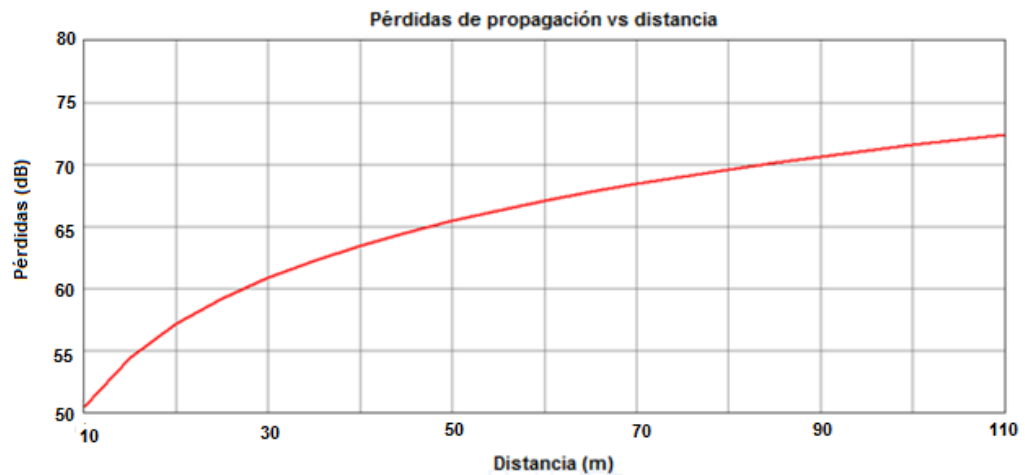


Figura 4.8 Pérdidas de propagación vs distancia para la simulación 2.

c) *Tiempo de Llegada*

En la Figura 4.9 se representan los valores de potencia recibidos en función del retardo por punto de recepción, lo cual indica la diferencia del tiempo de llegada de los rayos a cada punto receptor, que en este caso es una única componente directa como se observa para cada uno de los 21 puntos de recepción en la Figura 4.9, en la cual se aprecia el mismo comportamiento de la potencia recibida.

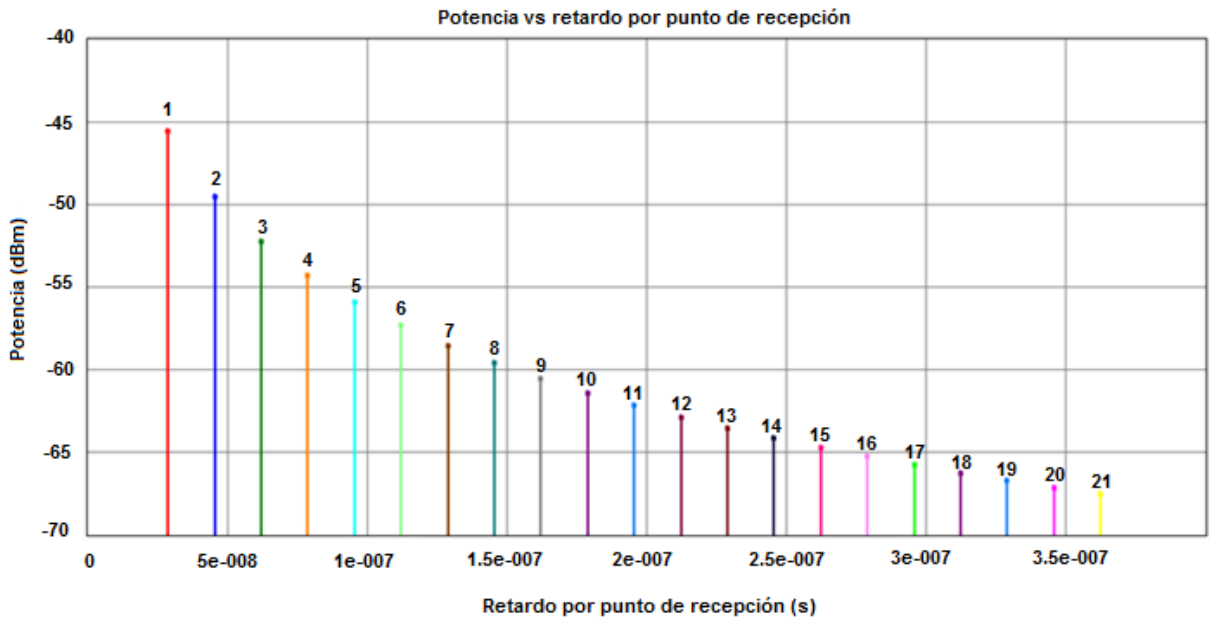


Figura 4.9 Tiempo de Llegada vs. Retardo para todos los receptores.

d) Trayectos de propagación

En la Figura 4.10 se observa el trazado de rayos para la ruta de receptores. Se observa que la señal puede llegar de forma directa a los receptores y no hay reflexiones dado que el escenario carece de obstáculos u objetos a su alrededor. El color rojo, naranja y amarillo de los rayos es un indicador de una buena intensidad de señal, los colores, azul y morado indican los rayos con menores niveles de intensidad de señal como se observa en los últimos receptores, dada una mayor distancia de ubicación. Para tener una mejor visualización del trazado de rayos en la Figura 4.11 se observa un acercamiento al trayecto de propagación sobre el plano en tres dimensiones y en la Figura 4.12 se observa la vista en perspectiva de los rayos generados y lanzados desde el punto transmisor hacia los cuatro primeros puntos de la ruta de receptores.

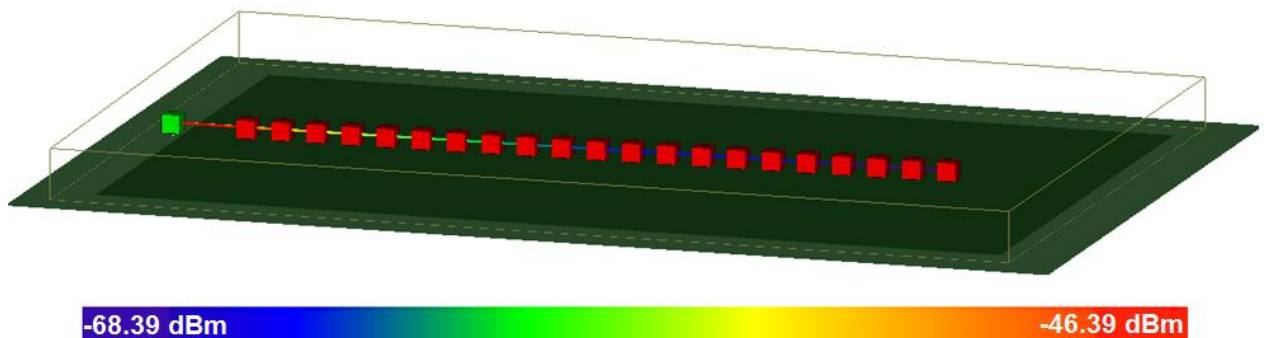


Figura 4.10 Trazado de rayos para el escenario de exteriores

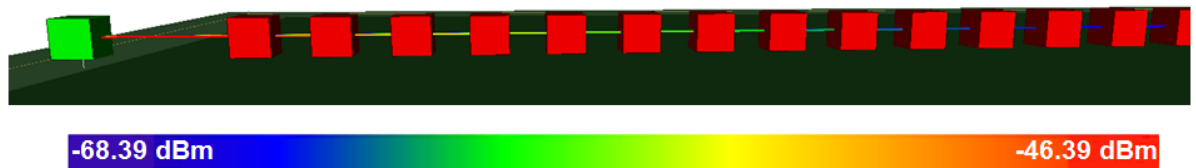


Figura 4.11 Acercamiento del trazado de rayos para exteriores en 3D

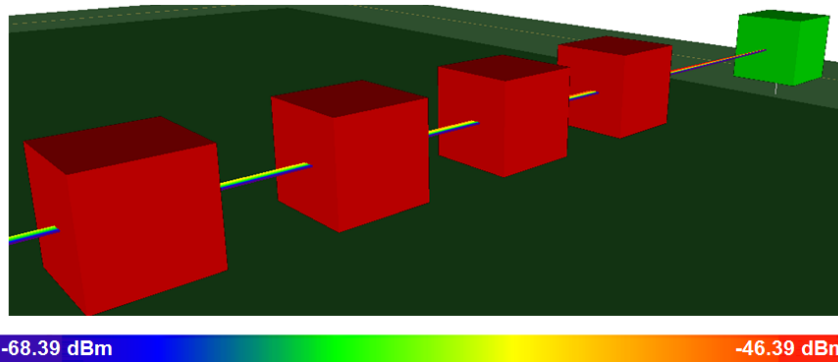


Figura 4.12 Vista en perspectiva del trazado de rayos para exteriores en 3D

e) Grilla de receptores

Para observar la potencia recibida sobre varios puntos a lo largo y ancho de la cancha, se ubican los receptores sobre una grilla de 2318 puntos con una separación entre receptores igual a 1 m del otro. En la Figura 4.13 se observa los niveles de potencia recibida en cada uno de los puntos de recepción para un escenario de 120 m de largo por 80 m de ancho.

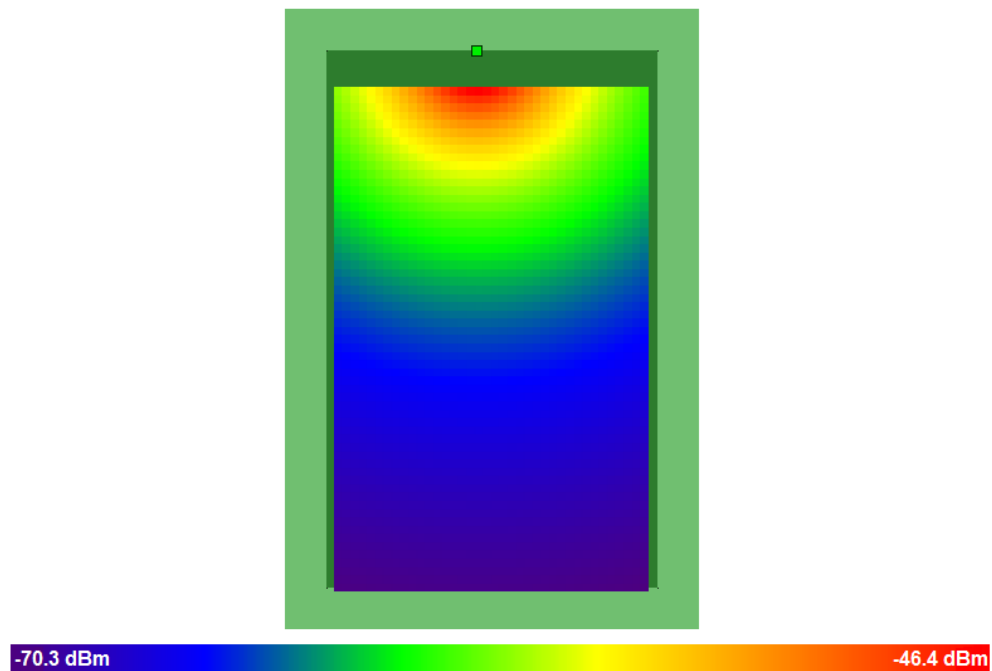


Figura 4.13 Nivel de potencia en una grilla de recepción con 2318 puntos.

Por último y con el fin de observar la incidencia de los trayectos de propagación en la potencia recibida sobre varios puntos a lo largo y ancho de la cancha, y observar los efectos de desvanecimiento rápido que se pueden presentar a lo largo del escenario en presencia de obstáculos tales como árboles y gradas, se modelaron graderías al costado derecho del escenario y se dispuso un trayecto de follaje que representa una zona de árboles al lado izquierdo. Además, se define una grilla de recepción compuesta por 1647 puntos, con una separación entre receptores igual a 1 m, abarcando un área de 120 m de largo por 65 m de ancho.

En la Figura 4.14 se observan los niveles de potencia recibidos para cada uno de los 1647 puntos de recepción. Se aprecia una diferencia al utilizar los receptores de grilla en presencia de obstáculos, dado que cada receptor recibió la contribución de señales provenientes de diferentes trayectos incluyendo las producidas debido a las reflexiones. Se observa una disminución del nivel de recepción de potencia a mayor distancia, estas pérdidas indicadas con colores azul oscuro y morado en diferentes puntos de recepción, ocurren porque parte de la señal es absorbida por las gradas y los árboles en las reflexiones, siendo esta variación de colores, la representación de los efectos de la interferencia constructiva y destructiva en cada punto.

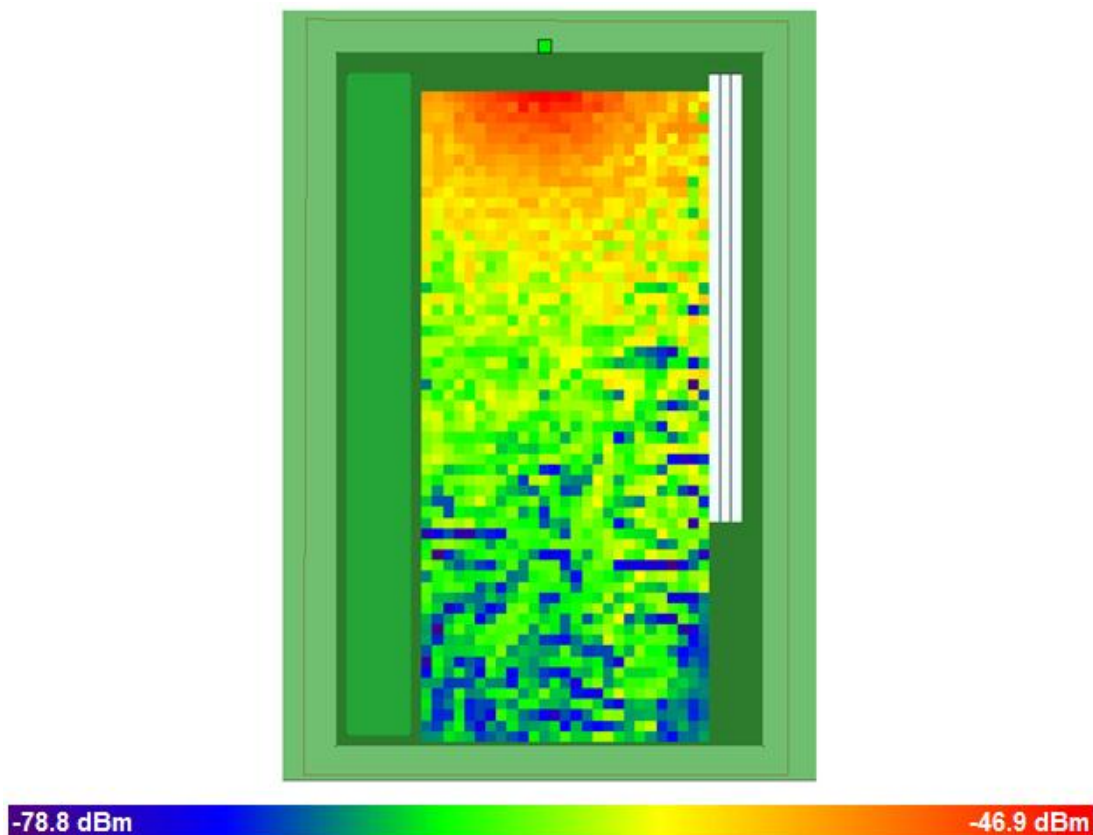


Figura 4.14 Nivel de Potencia en una grilla de recepción con 1647 puntos.

4.2.2. Interiores (*Indoor*)

El escenario de interiores en el que se llevó a cabo la simulación y las pruebas del sistema, fue el corredor del segundo piso del edificio de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca. Este escenario está conformado por gran cantidad de paredes, puertas y ventanas, un piso y el techo. El pasillo principal tiene aproximadamente 52 m de largo por 2 m de ancho y al final de este, se tiene un pasillo de cerca de 15 m de largo por 4 m de ancho hasta la ubicación de las gradas. La Figura 4.15 ilustra el plano del escenario de interiores que se modeló.

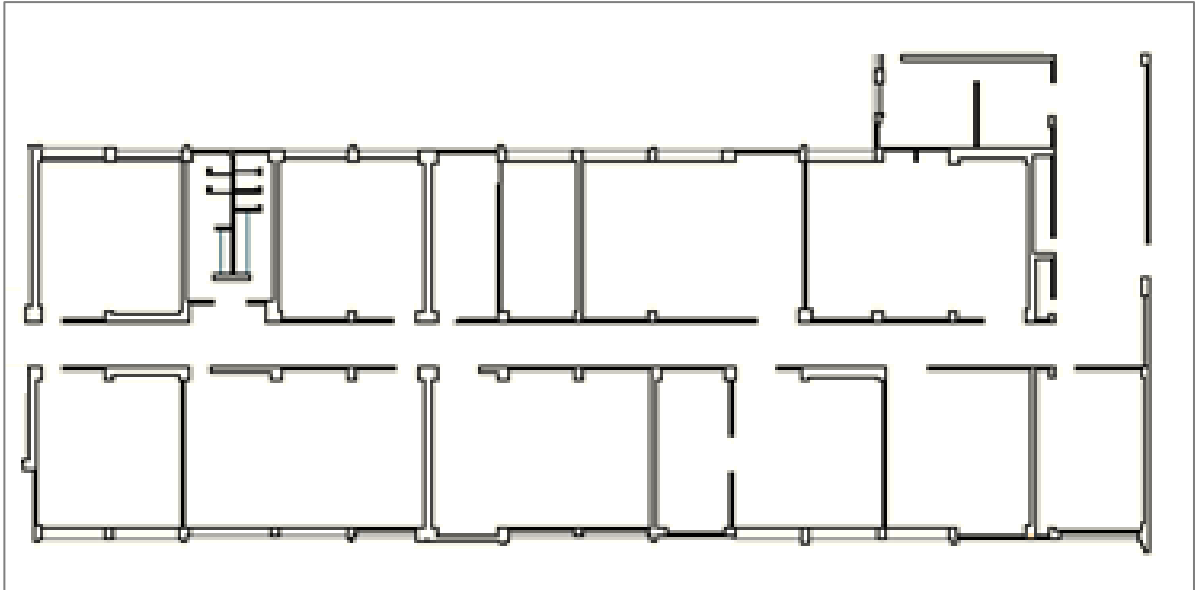


Figura 4.15 Escenario de Interiores (*Indoor*)

4.2.2.1. *Predicción de Cobertura en Wireless Insite*

Mediante el editor de plano de planta de Wireless Insite se modeló el corredor escogido como escenario de interiores. La estructura, la forma, el tamaño y la disposición de los salones en este escenario hacen que el plano sea mucho más complejo y la simulación requiera mayor tiempo de cálculo que en el escenario en espacio libre. La altura de la planta y las dimensiones de las paredes, puertas, ventanas junto con sus materiales son aproximadas, y dado que el editor cuenta con propiedades básicas para crear un entorno, hay características del entorno que no es posible modelar (gradas, columnas, marcos de puertas y marcos de ventanas). A continuación, en la Figura 4.16, se muestra el plano del corredor en dos dimensiones, y en la Figura 4.17 el plano tridimensional que contiene una leyenda donde se especifican los materiales de cada estructura los cuales se describen en la Tabla 4.2.

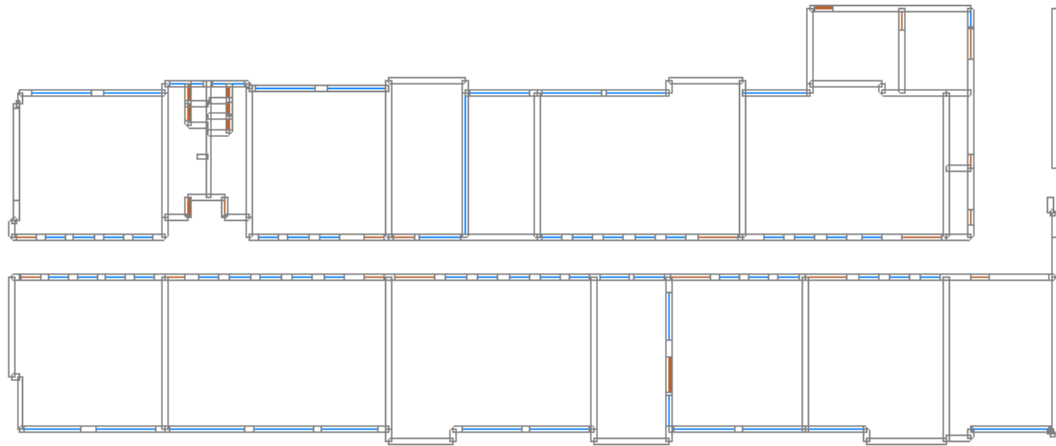


Figura 4.16 Escenario de Interiores 2D

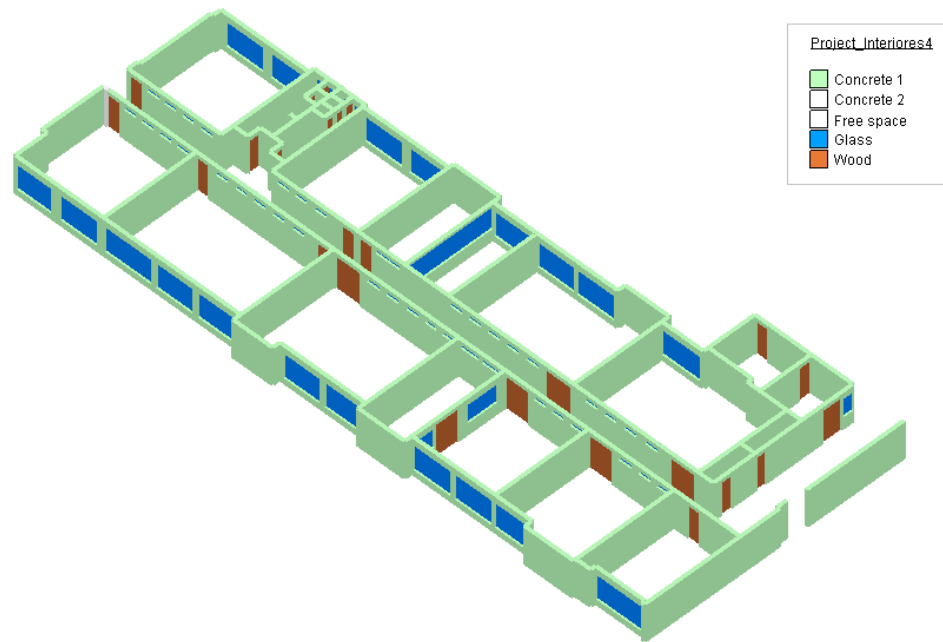


Figura 4.17 Escenario de Interiores 3D

Tabla 4.2 Materiales de las estructuras del escenario

Material de la Pared	Concreto (<i>Concrete 1</i>)
Material de la Puerta	Madera (<i>Wood</i>)
Material de la Ventana	Vidrio (<i>Glass</i>)
Material del Piso	Concreto (<i>Concrete 2</i>)
Material del Techo	Concreto (<i>Concrete 2</i>)

4.2.2.1.1. Simulación 1

La primera simulación del escenario de interiores, consiste en la definición del transmisor, una ruta de recepción sobre el pasillo y un área de estudio alrededor del escenario, en la que se hace uso del modelo de propagación Full 3D y la técnica de trazado de rayos SBR. En la Figura 4.18 se observa, la ubicación del punto de transmisión y la ruta de recepción dentro del escenario, teniendo en cuenta que la ruta se inicia a 10 m del transmisor, se define a lo largo del corredor principal y termina en el corredor siguiente. Debido a que el multitrayecto se presenta a distancias muy cortas, del orden de la longitud de onda (λ) de la señal transmitida, para observar sus efectos se requieren por lo menos 5 receptores por cada λ . De la Tabla 4.1 se obtiene que la frecuencia de trabajo es igual a 915 MHz, y mediante la ecuación 4.1 se obtiene una longitud de onda igual a 0.33 m. De acuerdo a esto la ruta de recepción está conformada por 763 puntos que se encuentran separados 6.56 cm entre sí.

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

Donde:

c : Velocidad de la luz = 3×10^8 m/s.

f : Frecuencia de trabajo = 915 MHz.

Reemplazando en la ecuación 4.1 se calcula el valor de λ .

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{915 \times 10^6 \text{ s}^{-1}} = 0.33 \text{ m}$$

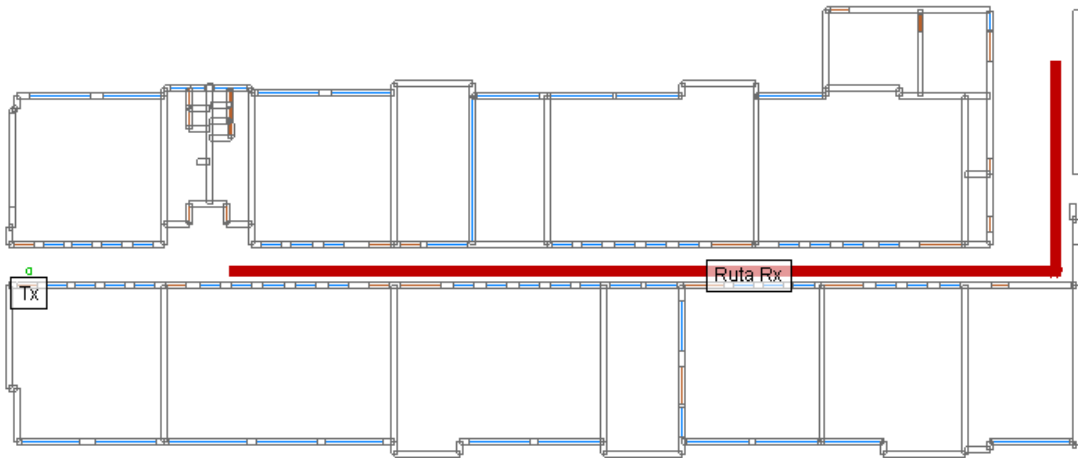


Figura 4.18 Ubicación del Transmisor y de la Ruta de Recepción.

Los parámetros del transmisor y de la antena, tales como: potencia de transmisión, frecuencia de operación, ancho de banda del canal, tipo de antena, altura de las antenas, ganancia y polarización, se establecen de acuerdo a los valores registrados en la Tabla 4.1.

El área de estudio se establece automáticamente, lo que permite incluir el escenario completo y con ello utilizar en los cálculos todas las estructuras contenidas en él. La

Figura 4.19 presenta el área de estudio como el recuadro que bordea el escenario y que define el área de análisis de propagación.

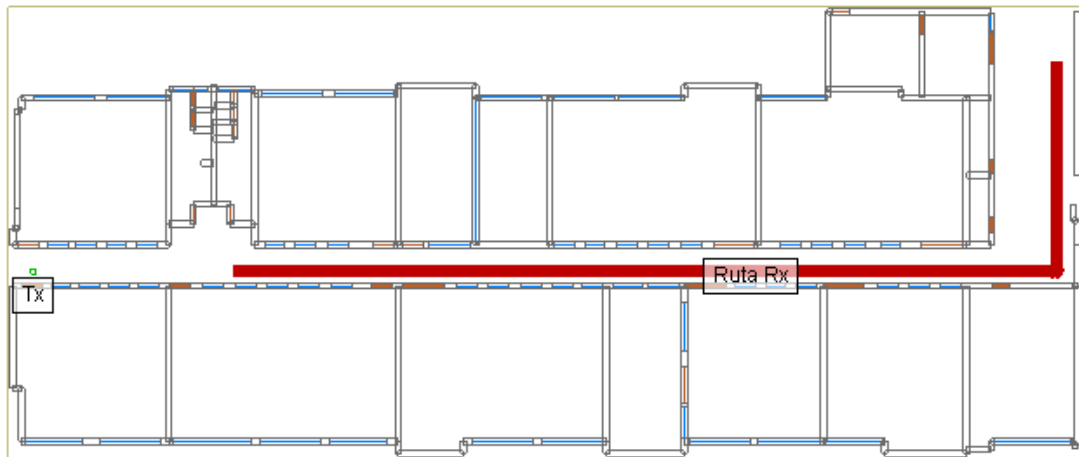


Figura 4.19 Vista del Área de Estudio sobre el escenario de Interiores 2D.

I. Resultados de Predicción

a) *Potencia Recibida*

La Figura 4.20 presenta los niveles de potencia para los puntos de la ruta de recepción, que comienzan en -42.71 dBm y terminan en -88 dBm. Se tiene que para las distancias entre 10 m y 50 m, que corresponde a la longitud del pasillo principal, los niveles de potencia crecen y decrecen, debido a que las señales que están confinadas a lo largo del pasillo experimentan los efectos de la interferencia constructiva y destructiva como resultado de la multitrayectoria en cada uno de los puntos de la ruta de recepción.

Los puntos de la ruta que se encuentran en el pasillo principal y que están más cerca del transmisor, captan los mayores niveles de potencia del mismo, a su vez, a medida que los puntos de la ruta se alejan y dado que se encuentran espaciados cada 7 cm aproximadamente, los niveles de potencia en cada punto oscilan continuamente entre 10 dB por encima y por debajo de -50 dBm. En promedio la potencia va disminuyendo a lo largo del corredor, pero esta disminución se puede observar en mayor nivel a partir de la distancia igual a 50 m, dado que esta distancia corresponde al cambio de corredor, y la potencia cae hasta -95.5 dBm; a los puntos de la ruta que están ubicados en el pasillo siguiente les llegan niveles de potencia mucho menores que los que llegaban a los puntos del pasillo principal, debido a que en este pasillo ya no existe línea de vista entre el transmisor y cada punto receptor y además este es un pasillo más amplio y tiene estructuras abiertas donde los rayos pueden dispersarse.

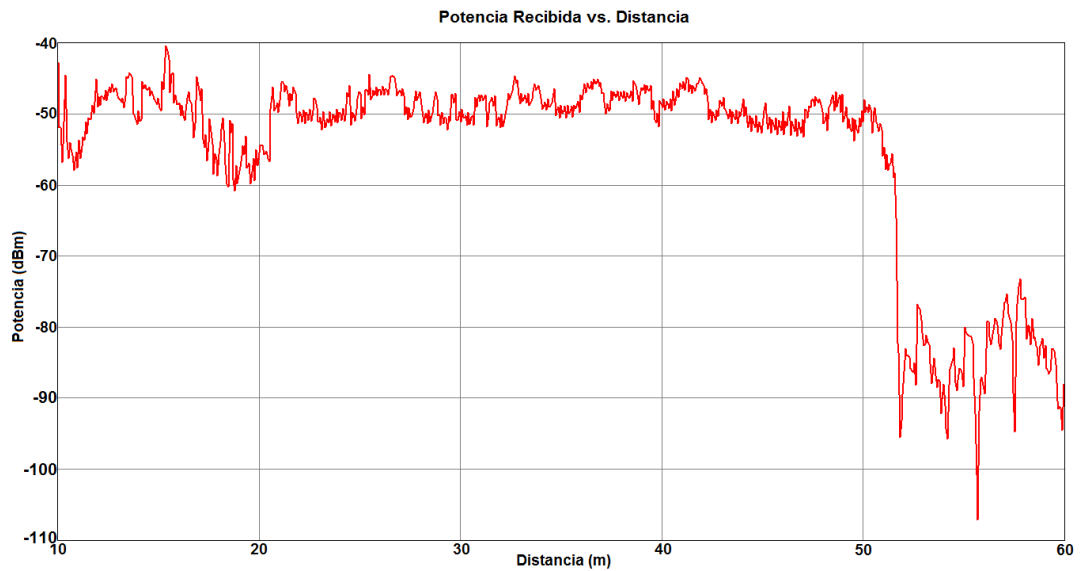


Figura 4.20 Potencia Recibida vs. Distancia – Simulación 1.

b) Trayectos de Propagación

En la Figura 4.21 se muestra el trazado de rayos para la ruta de receptores situados a lo largo del corredor. Se pueden observar los rayos transmitidos desde el punto Tx, y los rayos reflejados, difractados y transmitidos desde los obstáculos alrededor de la ruta Rx. El color de cada rayo indica el nivel de potencia asociado en dBm con el trayecto del rayo. Los colores rojo, naranja y amarillo representan los rayos con mayores niveles de intensidad, los colores verde, azul y morado indican los rayos con menores niveles de intensidad de señal.

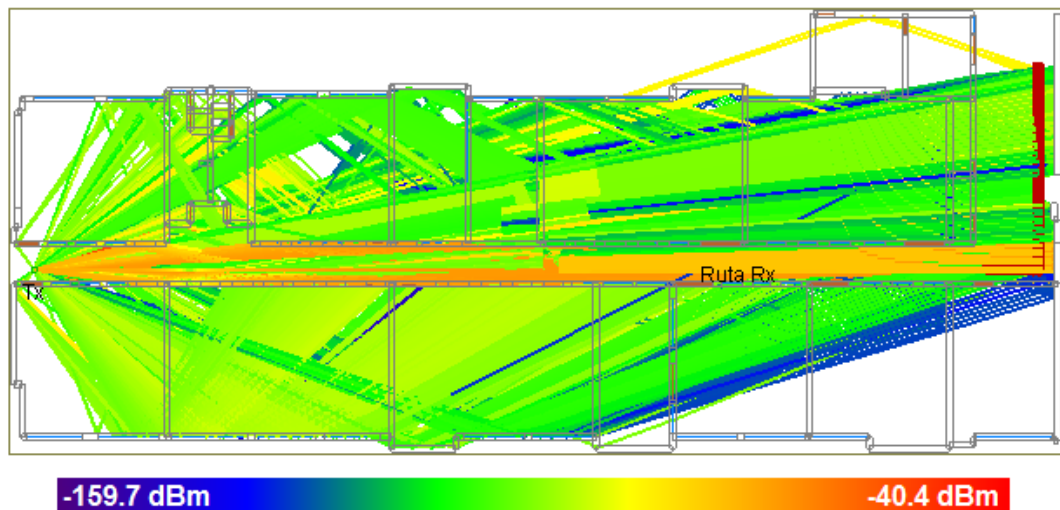


Figura 4.21 Trayectos de Propagación en el escenario de Interiores

En la Figura 4.22 se pueden visualizar los trayectos de propagación sobre el plano en tres dimensiones y la vista en perspectiva de los rayos generados y lanzados desde el punto de transmisión hacia los puntos de la ruta. Las principales propiedades de un trayecto son, la longitud, la potencia asociada, el tiempo de llegada, las interacciones que sufre y las direcciones de salida del transmisor y de llegada al receptor. Los trayectos que experimentan más interacciones entre el transmisor y el punto receptor tienen una longitud mayor que los trayectos directos y por lo tanto un nivel de potencia menor y un tiempo de llegada mayor. La Figura 4.23 (a) presenta los cuadros de propiedades de un trayecto directo y (b) de un trayecto reflejado al llegar al primer punto de la ruta de recepción.

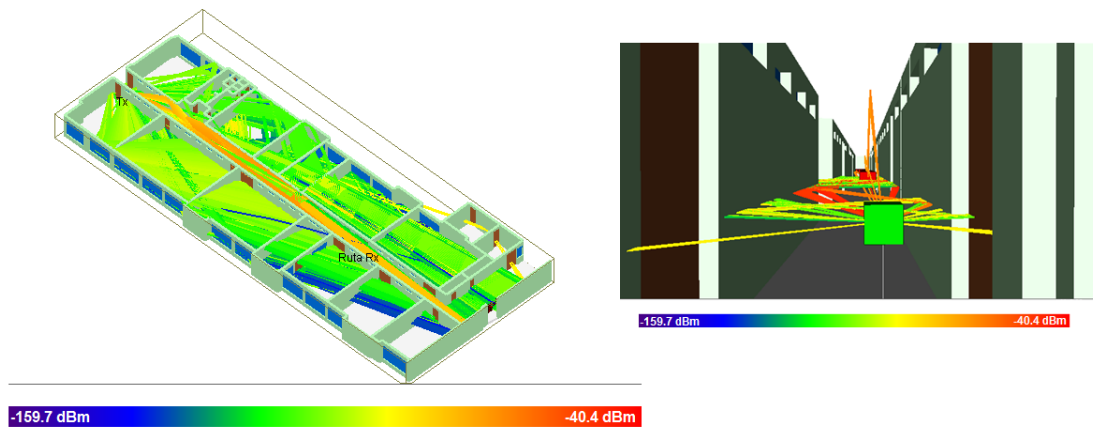


Figura 4.22 Trayectos de Propagación en 3D en el escenario de Interiores.

Path:	Ruta Rx, Point #1, Path #1	Path:	Ruta Rx, Point #1, Path #2
Interactions:	Tx-Rx	Interactions:	Tx-R-Rx
Path length (m):	10.00000	Path length (m):	10.06001
Power (dBm):	-47.676	Power (dBm):	-48.448
Time of arrival (s):	3.335600e-008	Time of arrival (s):	3.368200e-008
Direction of departure (theta (°)):	90.00	Direction of departure (theta (°)):	90.00
Direction of departure (phi (°)):	0.00	Direction of departure (phi (°)):	351.88
Direction of arrival (theta (°)):	90.00	Direction of arrival (theta (°)):	90.00
Direction of arrival (phi (°)):	180.00	Direction of arrival (phi (°)):	187.82
Transmitter doppler (Hz):	0.00	Transmitter doppler (Hz):	0.00
Receiver doppler (Hz):	-0.00	Receiver doppler (Hz):	-0.00
Combined doppler (Hz):	0.00	Combined doppler (Hz):	0.00

(a)

(b)

Figura 4.23 Propiedades de un trayecto directo y (b) de un trayecto reflejado.

c) *Dispersión del Retardo y Tiempo de Llegada*

Cualquier escenario de interiores genera interferencia constructiva o destructiva de las señales en los puntos de recepción, resultado de la reflexión, difracción y la dispersión de las señales con las estructuras y obstáculos que hacen parte del escenario causando el fenómeno conocido como desvanecimiento por multitrayecto. Los efectos del multitrayecto

son el desvanecimiento rápido e ISI. La dispersión del retardo (*Delay Spread*) es una medida de los efectos relacionados al multirrayecto en el canal de comunicaciones y es un parámetro importante, ya que puede limitar de forma directa la velocidad de transmisión de datos. En la Figura 4.24 se presenta la gráfica de Dispersión del Retardo (*Delay Spread*) a través de la ruta de receptores. A partir de esta gráfica se observa que la dispersión del retardo comienza a incrementarse con la distancia entre el transmisor y el receptor, debido a que los rayos reflejados se incrementan y tardan más tiempo en llegar al receptor que los rayos directos, lo que contribuye al aumento de la dispersión retardo. A una distancia igual a 30 m la dispersión del retardo comienza a disminuir debido a que los trayectos que llegan a los puntos receptores disminuyen o presentan menos interacciones, en su mayoría transmisiones a través de las estructuras, que pueden reducir la longitud de los trayectos pero que experimentan mayor atenuación. Esto se observa con mayor claridad en la Figura 4.25, los rayos iniciales que llegan en menor tiempo a cada punto de la ruta de recepción son los rayos con mayor intensidad de potencia, los siguientes rayos se van retardando y atenuando porque son rayos resultado del multirrayecto. De la Figura 4.24, también se puede ver que al final del pasillo principal e inicio del siguiente pasillo, las señales que llegan a los puntos de la ruta que allí se ubican se retardan considerablemente ya que los rayos en el cambio de pasillo encuentran varios caminos u obstrucciones y experimentan mayor número de iteraciones con las estructuras y por lo tanto recorren una longitud mayor para llegar al punto de recepción. Sin embargo, para los puntos sucesivos de la ruta, los rayos llegan con una menor potencia pero con un retardo menor al de otros rayos que llegan a puntos de recepción más próximos al transmisor, ya que los primeros, son rayos lanzados directamente hacia el punto de recepción, que atraviesan todas las estructuras y por tanto experimentan una pérdida mayor en su nivel de potencia, esto se ilustra en la Figura 4.25 para el punto 763 de la ruta.

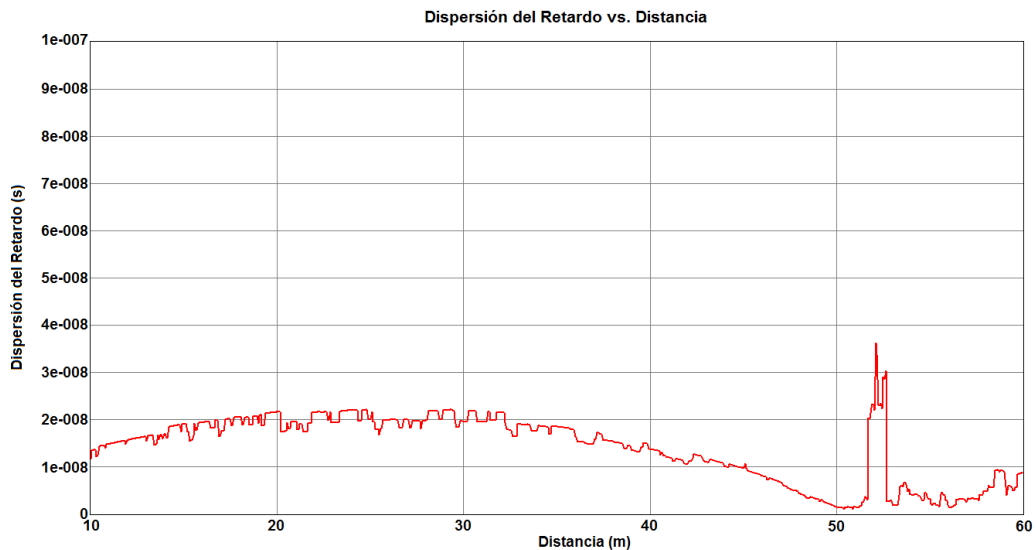


Figura 4.24 Dispersión del Retador vs Distancia - Simulación 1.

La variación del multirrayecto sobre un canal de comunicaciones además de caracterizarse en el tiempo mediante la dispersión del retardo puede caracterizarse en la frecuencia, mediante el Ancho de Banda de Coherencia B_c , calculado a partir de la

dispersión del retardo como se indica en la ecuación 4.2, y define el rango de frecuencias sobre las cuales el canal es considerado plano.

$$B_c = \frac{1}{2\pi D} \quad (4.2)$$

Donde:

D : La mayor dispersión del retardo en segundos hasta llegar a un punto de la ruta.

De acuerdo a la Figura 4.24 este valor se presenta en el punto 642 y es igual a 3.629e-008, entonces el ancho de banda de coherencia es 4,39 MHz. Dado que el ancho de banda de un canal B_{CH} es igual a 500 KHz y por lo tanto $B_{CH} < B_c$, el ancho de banda es aproximadamente igual en todo el ancho de banda de la señal y el canal se relaciona a un desvanecimiento plano [37].

El tiempo de llegada de un rayo depende de la longitud de la trayectoria que sigue el rayo, del tamaño y de las estructuras del escenario donde están ubicados el transmisor y el receptor, y se calcula a partir de la ecuación 4.3 [21]. La Figura 4.25 contiene los tiempos de llegada y su correspondiente nivel de potencia para los rayos que llegan al primer punto de la ruta, al punto 305 ubicado en la mitad del pasillo principal, al punto 610 de la ruta ubicado al final del pasillo principal, al punto 630 ubicado al inicio del pasillo secundario y al punto 763 ubicado al final de la ruta y del pasillo.

$$t_i = \frac{L_i[m]}{c[m/s]} \quad (4.3)$$

Donde:

L_i : Longitud geométrica total de la trayectoria recorrida por el rayo.

c : Velocidad de la luz = 3×10^8 m/s.

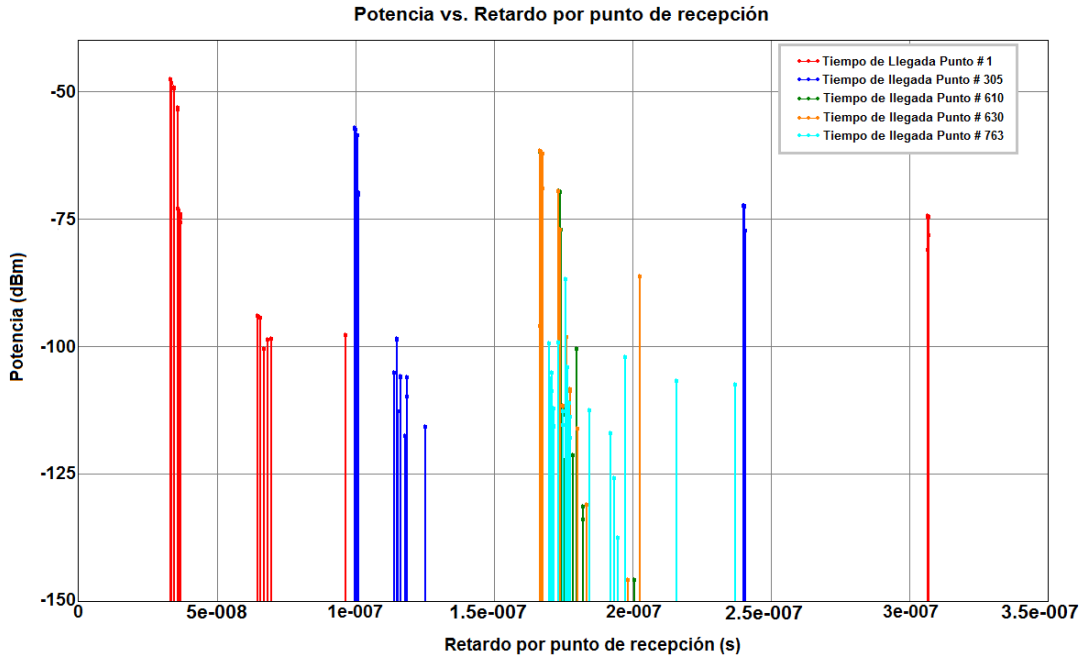


Figura 4.25 Tiempo de Llegada

d) *Ganancia y Pérdidas de Propagación*

La definición usada para calcular las pérdidas de propagación se muestra en la ecuación 4.4.

$$L_{\text{Trayecto}}(\text{dB}) = P_T(\text{dBm}) - P_R(\text{dBm}) + G_{T,\text{Max}}(\text{dBi}) + G_{R,\text{Max}}(\text{dBi}) - L_S(\text{dB}) \quad (4.4)$$

Donde:

P_T : Potencia de Transmisión.

P_R : Potencia Recibida.

$G_{T,\text{Max}}$: Ganancia máxima de la antena de transmisión (en comparación a un radiador isotrópico).

$G_{R,\text{Max}}$: Ganancia máxima de la antena de recepción (en comparación a un radiador isotrópico).

L_S : Pérdidas adicionales del Sistema (Pérdidas en la línea de transmisión, conectores y elementos pasivos)

La curva de ganancia del trayecto es exactamente la curva complementaria a la curva de pérdidas de propagación, que se define como el negativo de las pérdidas de propagación en dB, como lo indica la ecuación 4.5.

$$G_{\text{Trayecto}}(\text{dB}) = -L_{\text{Trayecto}}(\text{dB}) \quad (4.5)$$

La Figura 4.26 (a) ilustra la ganancia de la ruta de recepción, que sigue una curva semejante pero menor a la que sigue la potencia recibida de la Figura 4.20. Del mismo modo, en la Figura 4.26 (b) se muestra la curva de las pérdidas de propagación versus la distancia de separación, en la que se observa que a lo largo del corredor principal las pérdidas oscilan 10 dB por encima y por debajo de los 55 dB debido a los efectos del multirayecto, pero que en general presentan niveles cercanos dada la existencia de rayos directos entre el transmisor y cada punto de la ruta, posteriormente la figura ilustra un aumento significativo a partir de la distancia igual a 50 m, donde los rayos se encuentran con áreas abiertas y ya no hay línea de vista entre el transmisor y los puntos de la ruta que se ubican en el corredor siguiente.

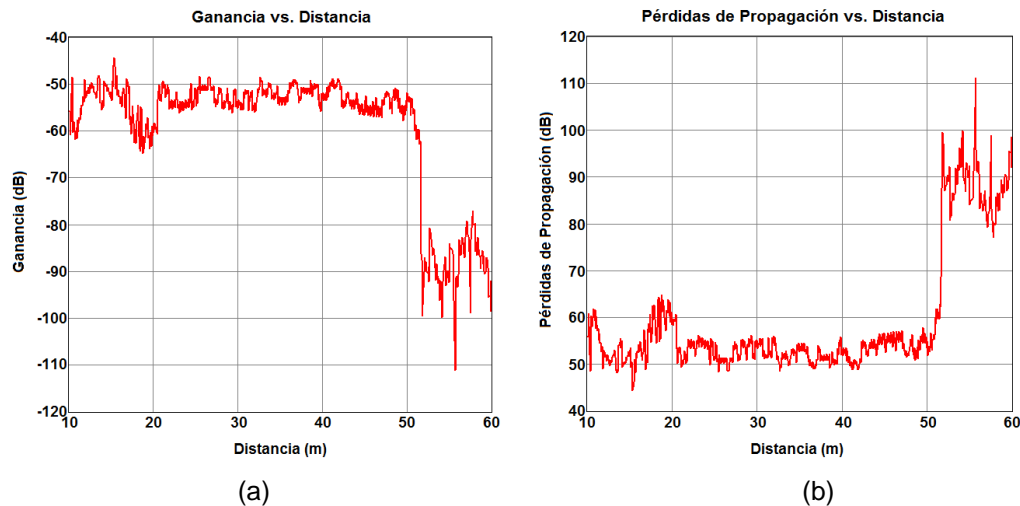


Figura 4.26 (a) Ganancia del Trayecto. (b) Pérdidas de Propagación.

e) Grilla de Puntos Receptores

Para observar la potencia recibida sobre los pasillos y visualizar de una forma más clara los efectos del desvanecimiento rápido que se pueden presentar en el escenario, se definen dos grillas XY de puntos receptores espaciados 6.56 cm entre sí. Una cubre el área del pasillo principal y la otra cubre el área del pasillo secundario. La Figura 4.27 muestra la potencia recibida utilizando dos grillas XY. Cada punto de la grilla de recepción presenta un color correspondiente al nivel de potencia recibido en dicho punto.

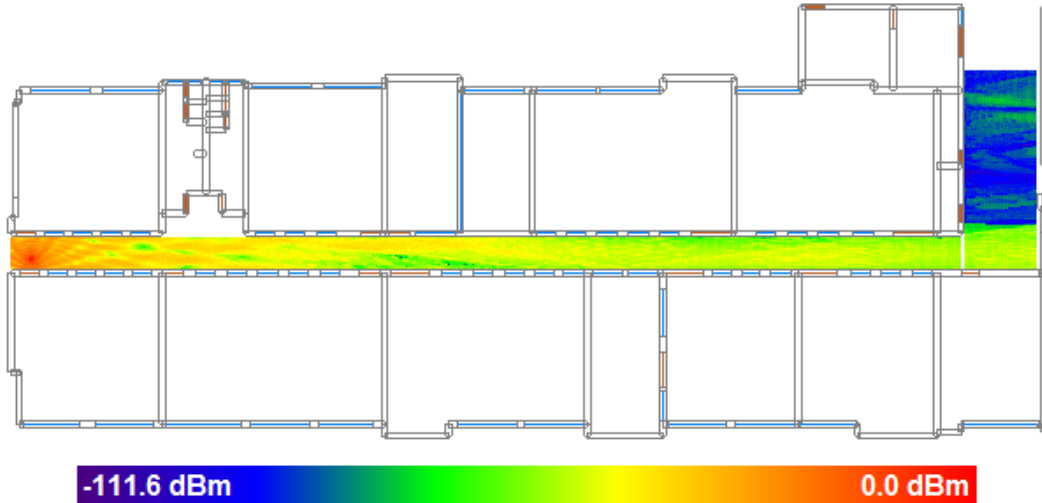


Figura 4.27 Potencia Recibida con receptor de grilla XY

4.2.2.1.2. Simulación 2

En la simulación 2, el punto de transmisión y la ruta de recepción se sitúan en las mismas posiciones utilizadas en la simulación 1, es decir la ubicación del transmisor y los receptores es igual a la presentada en la Figura 4.18. La variación de esta simulación con respecto a la primera consiste en la selección de la técnica de trazado de rayos *Eigenray* para el modelo Full 3D. A continuación se realiza una comparación del nivel de potencia de las Técnicas de Trazado de Rayos SBR y *Eigenray* ER.

La Figura 4.28 ilustra la potencia recibida para las técnicas de trazado de rayos SBR y *Eigenray*. La gráfica azul representa los niveles de potencia a lo largo de la ruta de recepción utilizando la técnica *Eigenray*, que comienzan en -49.4 dBm, los siguientes niveles de potencia que llegan a los puntos de recepción, varían por encima y por debajo de los -50 dBm, debido al efecto del multitrayecto que se presenta en el pasillo, en promedio la potencia disminuye con la distancia. Al final del pasillo se tiene una disminución mayor de la potencia captada por los puntos de recepción aquí ubicados, característica del cambio de pasillo; el nivel de potencia que llega al último punto de la ruta es igual a -91.24 dBm y existen puntos receptores ubicados en la mitad del segundo pasillo que experimentan menores niveles de potencia por la geometría y la estructura de

este corredor. De esta figura se observa que el desempeño de la técnica SBR es superior al de la técnica Eigenray, dado que en general para cualquier distancia, la potencia recibida con la técnica SBR siempre es mayor, puesto que la potencia total que llega a cada receptor se calcula a partir de la suma de la potencia de cada trayectoria que sigue el rayo. El desempeño de la técnica Eigenray es menor ya que se limitan las trayectorias de los rayos a un número máximo de tres reflexiones y difracciones y con ello también limita el nivel potencia que llega a cada punto de la ruta. Sin embargo se puede observar de la superposición de la dos curvas que aunque los niveles de potencia obtenidos con la técnica ER son menores, también están próximos a los niveles de potencia obtenidos con la técnica SBR y el comportamiento que siguen las curvas a lo largo del escenario es similar.

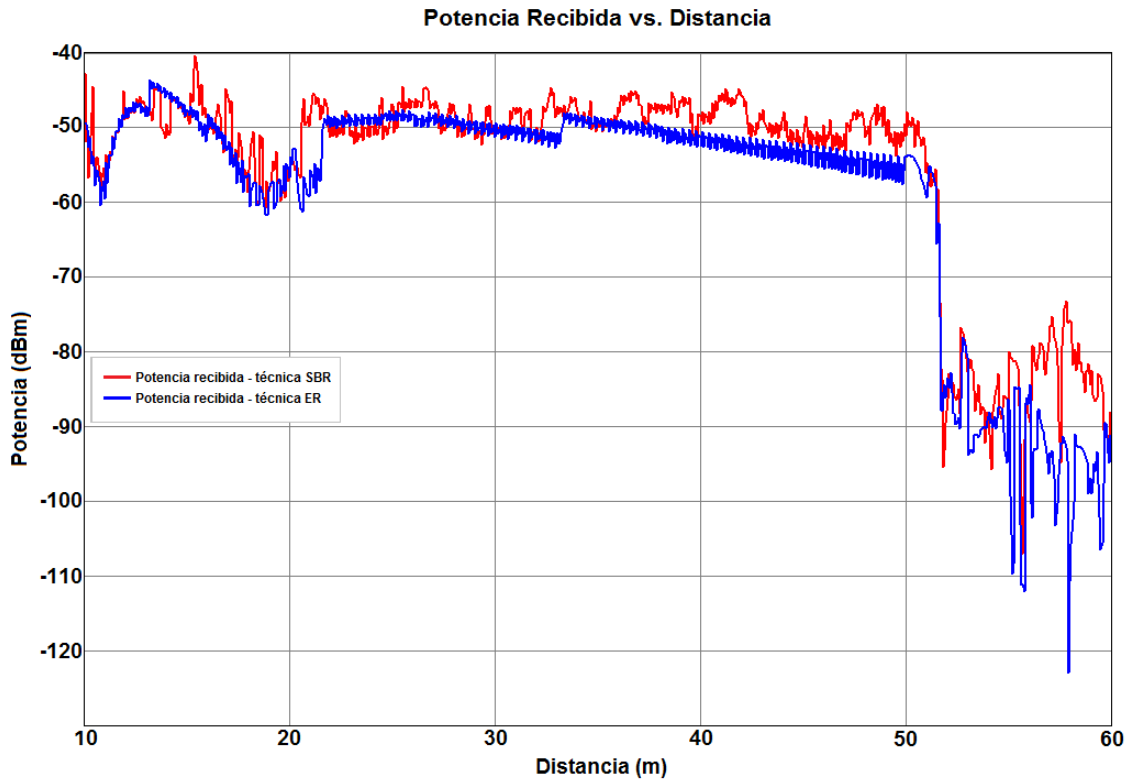


Figura 4.28 Potencia Recibida vs. Distancia del método SBR y Eigenray.

Dado que la técnica Eigenray limita el número de trayectorias, presenta menores variaciones en los niveles de potencia y un tiempo de cálculo menor lo que la convierte en una buena opción si se busca minimizar el tiempo de simulación, por otro lado la técnica SBR al permitir un mayor número de interacciones, entrega medidas del nivel de potencia con más variaciones que miden con mayor precisión los efectos del multitrayecto aunque se aumenta en gran medida el tiempo de simulación.

4.3. PRUEBAS DEL SISTEMA

4.3.1. Definición e implementación del sistema

La implementación del sistema se llevó cabo mediante la conexión C presentada en el capítulo anterior, que consiste en que los dos radios AC4790 están conectados a dos computadores diferentes, en los cuales se ejecuta el software de control y monitoreo de los paquetes transmitidos y recibidos. La Figura 4.29 representa el sistema de comunicación de datos vía radio utilizado para realizar las pruebas reales en los dos escenarios determinados: interior y exterior. La distancia toma valores entre 10 - 110 m para el escenario exterior con incrementos constantes de 10 m y 10 – 60 m para el escenario interior con incrementos constantes de 5 m.

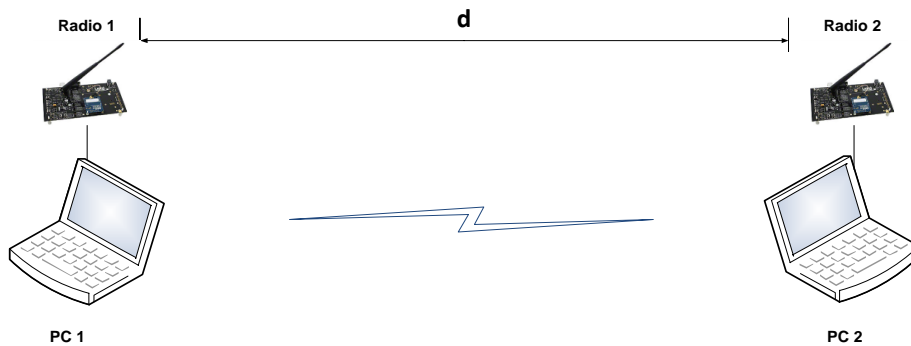


Figura 4.29 Implementación del Sistema de Comunicación con el SDK AC4790.

4.3.2. Definición de Medidas y Pruebas

En esta sección se describen las medidas obtenidas a partir de las pruebas desarrolladas con el SDK AC4790, tales como la Intensidad de Potencia Recibida, la relación Energía de Bit a Densidad Espectral de Potencia de Ruido, la relación Portadora a Interferencia, la Tasa de Error de Bit, la Tasa de Error de Paquete y el cálculo de Ancho de Banda; del mismo modo, se exponen brevemente las medidas proporcionadas por la sección de Resultados de la ventana de Prueba de Rango de la herramienta software del SDK y que fueron mencionadas en el anterior capítulo.

Las pruebas se realizan desde la ventana de Prueba de Rango. Esta ventana permite transmitir los paquetes de datos entre los dos radios y reporta el número de paquetes exitosos o errados. Desde esta interfaz se pueden variar el tamaño y contenido de los paquetes, al igual que el número de paquetes que se desea transmitir. Se realizaron pruebas con paquetes de longitud igual a 65 y 135 bytes, que contienen secuencias de letras y números. Para determinar estadísticamente el número de transmisiones a realizar en cada paso de distancia a través de un escenario dado, inicialmente se realizaron múltiples pruebas en los dos escenarios en los incrementos correspondientes; en estas pruebas se seleccionaron números de transmisión de: 10, 100, 500, 1000, 2000, 5000 y 10000, para observar la relación de los resultados obtenidos en cada caso. Cuando se compararon los resultados se evidenció que al elegir números de transmisiones entre 10 y 500 se obtienen medidas similares de error y éxito; asimismo los números comprendidos

entre 1000 y 10000 entregan resultados muy cercanos y más aproximados a los obtenidos en el primer rango. Para minimizar el tiempo de ejecución de cada prueba y dado que estos valores siguen una distribución uniforme se define un número de transmisiones igual a 1000 para las pruebas restantes.

4.3.2.1. Medidas de Intensidad de Señal Recibida

El Indicador de Intensidad de la Señal Recibida RSSI es la medida utilizada por el anfitrión OEM para obtener la Intensidad de señal en el receptor. Para obtener medidas de intensidad de señal recibida, válidas y de manera automática se utilizan los comandos AT y los API de Recepción de Paquetes y Envío Completo de Datos.

Inicialmente es necesario medir el RSSI en ausencia de una señal RF en el receptor para obtener la potencia de ruido P_N y en consecuencia una medida más práctica de la densidad espectral de potencia de ruido N_0 . La medida de la P_N se adquiere mediante un comando AT y debe medirse en cada uno de los escenarios (exterior e interior), como se describe a continuación.

En cada escenario, se sitúan los radios separados una distancia de 20 pies (6.1 m) aproximadamente. Una vez los dos radios están encendidos y conectados al respectivo anfitrión OEM, desde el software SDK instalado en el anfitrión OEM, sin enviar ninguna señal, se accede a la ventana Comando (*Command*) y mediante el comando Reporte del RSSI (*Report RSSI*) se obtiene el valor en hexadecimal del RSSI correspondiente a la P_N en el escenario considerado.

Para medir la RSSI en los escenarios considerados enviando paquetes de datos se hace uso de los comandos API de Recepción de Paquetes y Envío Completo de Datos.

Para utilizar los API de control es necesario crear los paquetes según el formato específico de cada API. Estos paquetes son usados para establecer la comunicación entre los dos radios. Se crea un *script* para el anfitrión OEM del lado transmisor y otro *script* para el anfitrión OEM designado como receptor. Estos *scripts* contienen los comandos que se quieren transmitir y recibir entre los radios y deben ser escritos en el orden en se esperan recibir y en formato hexadecimal. En la Figura 4.30 y en la Figura 4.31 se presentan los *scripts* empleados para comunicar los dos radios desde la ventana de Prueba de Rango del programa y mediante la selección de prueba Puerto 1 Sólo Envía para el transmisor y Puerto 1 Sólo Recibe para el receptor.

En el lado transmisor se escribe el API de Transmisión con el formato especificado en la Tabla 3.4 y el API de Envío Completo de Datos con el formato de la Tabla 3.5. Por su parte el primer API contiene un encabezado de 7 bytes y la carga útil de datos que se van a transmitir y el segundo API contiene un byte de preámbulo y 3 caracteres comodín que corresponden a los valores de RSSI, RSSI* y el byte de éxito/fracaso, que se espera sean enviados por el receptor una vez que reciba el paquete de datos. La Tabla 4.3 presenta el formato del paquete transmitido y la Figura 4.30 el contenido del archivo de comandos que se carga en la sección de Selección del Paquete Transmitido en la ventana de Prueba de Rango en el anfitrión OEM Transmisor que contiene los dos APIs descritos.

Tabla 4.3 Formato del paquete transmitido.

81 Byte de preámbulo	3A Longitud de la carga útil de datos	08 Cuenta de sesión actual.	00 Intentos de retransmisión	65 42 15 3 bytes menos significativos de la dirección MAC de destino	00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 3A 3B 3C 3D 3E 3F 41 42 43 44 45 46 47 48 49 4A 4B 4C 4D 4E 4F 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 5A 00 01 02 03 04 05 00 09 08 07 06 05 04 03 02 01 Carga útil datos
----------------------------	--	---	------------------------------------	--	--

```

First line is always a
comment

*s1 60
81 3A 08 00 65 42 15 00 01
02 03 04 05 06 07 08 09 3A
3B 3C 3D 3E 3F 41 42 43 44
45 46 47 48 49 4A 4B 4C 4D
4E 4F 50 51 52 53 54 55 56
57 58 59 5A 00 01 02 03 04
05 00 09 08 07 06 05 04 03
02 01
*

*c1 60
82 ?? ?? ??
*
    
```

Figura 4.30 Script con los APIs de Transmisión y de Envío Completo de Datos.

En el lado receptor se escribe el API de Recepción con el formato especificado en la Tabla 3.6. Este API contiene 2 caracteres comodín que representan los valores de RSSI y RSSI* y la misma carga útil de datos del *script* de transmisión, dado que el receptor necesita tener un copia de los datos que espera recibir para compararlos con los paquetes recibidos. En la Figura 4.31 se muestra el contenido del archivo de comandos que se carga en la sección de Selección del Paquete Transmitido en la ventana de Prueba de Rango en el anfitrión OEM Receptor.

```

First line is always a
comment

*c1 60
81 3A ?? ?? 65 42 11
00 01 02 03 04 05 06 07 08
09 3A 3B 3C 3D 3E 3F 41 42
43 44 45 46 47 48 49 4A 4B
4C 4D 4E 4F 50 51 52 53 54
55 56 57 58 59 5A 00 01 02
03 04 05 00 09 08 07 06 05
04 03 02 01
*
    
```

Figura 4.31 Script con el API de Recepción.

Una vez se obtiene el valor hexadecimal del cuarto byte del API de recepción, es decir el RSSI, se convierte a su equivalente valor en *dBm*, que está registrado en la Tabla 4.4 de Intensidad de Señal Recibida proporcionada por el fabricante en el Manual de Usuario del transceptor [36].

Tabla 4.4 Intensidad de Señal Recibida

Intensidad de Señal (dBm)	Valor RSSI (HEX)	Intensidad de Señal (dBm)	Valor RSSI (HEX)
4	0x0E	-62	0x2B
-2 a 1	0x0D	-66	0x40
-12 a -6	0x0C	-69	0x55
-36 a -22	0x0B	-72	0x62

-42 a -39	0x0C	-76	0x71
-46	0x0D	-79	0x78
-49	0x0E	-82	0x84
-52	0x11	-86	0x9A
-56	0x17	-89	0xAD
-59	0x1C	-92	0xBD

En algunos paquetes se obtienen valores de RSSI que no se registran en la tabla, por lo tanto, los valores faltantes se encuentran a partir de la interpolación de los valores presentes en la tabla que definen una función. La herramienta utilizada es la función *CubicSpline*¹⁷ de Excel®, la cual define una curva suave sobre un conjunto de puntos con una serie de tramos de curvas de polinomios de tercer grado.

La curva de la función *CubicSpline* a partir de los valores de la Tabla 4.4, se observa en la Figura 4.32. El eje X corresponde al valor decimal del RSSI y el eje Y señala el valor RSSI en dBm.

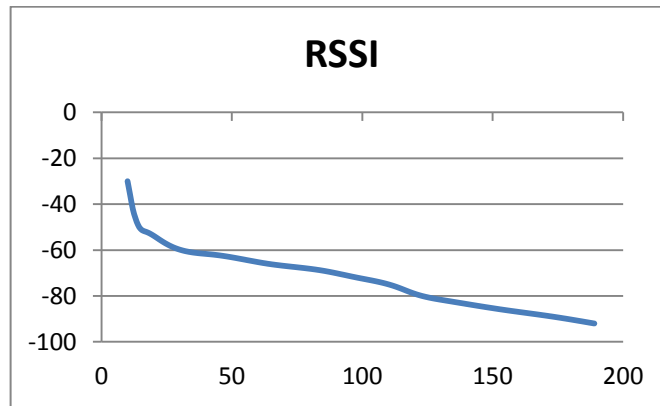


Figura 4.32 Curva *CubicSpline* del RSSI

4.3.2.2. Cálculo de la Tasa de Errores de Bit

La Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*) se define como la probabilidad de que un bit transmitido sea recibido con error. La BER es usada para evaluar el desempeño del sistema de comunicaciones via radio implementado y generalmente se calcula mediante la ecuación 4.6.

$$BER = \frac{\text{Número de Bits Errados}}{\text{Número Total de Bits Transmitidos}} \quad (4.6)$$

Cuando se transmiten los datos sobre el enlace de comunicaciones, existe la posibilidad de que se generen errores sobre la señal. Si esto sucede, la integridad de la señal puede verse afectada por lo cual es necesario evaluar el desempeño del sistema y la BER es una medida para realizarlo, ya que evalúa el desempeño de todo el sistema de comunicaciones: transmisor, receptor y el medio de comunicación, que esta expuesto al ruido, la interferencia, dispersión, multitrayectoria y las pérdidas de propagación, que son factores que pueden causar la degradación de la señal.

¹⁷ Disponible en <http://htwares.com/windows/business/math-scientific-tools/srs1-cubic-spline-for-excel/>

El software SDK despliega la cantidad de paquetes errados mediante el parámetro Errores de la sección Resultados de la Prueba, en la ventana de Prueba de Rango que se presentó en la Figura 3.6, la cual permite monitorear la integridad de los paquetes. La medida que puede obtenerse a partir de este parametro es la Tasa de Error de Paquete (PER, *Packet Error Rate*) y se define como la razón entre el número de paquetes recibidos con errores y el número de paquetes transmitidos, la cual se expresa en la ecuación 4.7.

$$PER = \frac{\text{Número de Paquetes Errados}}{\text{Número de Paquetes Transmitidos}} \quad (4.7)$$

Un paquete es considerado erróneo si al menos uno de los bytes en el paquete se detecta incorrectamente (*Data Error*) o no se recibe en el tiempo asignado de espera de recepción (*Data Timeout*). Si los errores en bytes 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, tal como se indica en la ecuación 4.8, especificada en [38] y ampliamente aplicada en la evaluación del desempeño de las redes de comunicación [39], [40].

$$PER = 1 - (1 - BER)^n \quad (4.8)$$

Donde:

n: Numero de bits por paquete.

La probabilidad de bit exitoso es igual a $1 - BER$, dado que un paquete de datos contiene n bits, la probabilidad de paquete exitoso es $(1 - BER)^n$, por lo tanto, la probabilidad de un paquete errado es $1 - (1 - BER)^n$ como se define en la ecuación 4.8.

Dado que la tasa de error de paquete se puede obtener a partir del software SDK y se conoce el número de bits por paquete, la tasa de error de bit se deriva a partir de la ecuación 4.7 y se expresa como indica la ecuación 4.9.

$$BER = 1 - 10^{\frac{\log_{10}(1-PER)}{n}} \quad (4.9)$$

La evaluación del desempeño del sistema de comunicación de datos vía radio en la Banda de 900 MHz basado en FHSS utilizando el Modelo Peer-To-Peer, se lleva a cabo mediante el cálculo de la PER y su relación con la relación Energía de Bit a Densidad Espectral de Potencia de Ruido (E_b/N_0) y la relación Portadora a Interferencia (C/I), el cálculo de la BER y su relación con la E_b/N_0 y la C/I, al igual que el cálculo del Ancho de Banda.

La E_b/N_0 es la razón de la Energía de Bit (E_b) a la Densidad Espectral de Potencia de Ruido (N_0). La relación de intensidades (E_b/N_0) entrega una medida aproximada de la intensidad de señal a la entrada del receptor. El cálculo de la Energía de Bit E_b se obtiene como se indica en la ecuación 4.10 y en dBm en la ecuación 4.11.

$$e_b[mW/bps] = \frac{p_r [mW]}{r[bps]} \quad (4.10)$$

$$E_b[\text{dBm}/\text{bps}] = P_r[\text{dBm}] - 10 \log R [\text{bps}] \quad (4.11)$$

Donde:

P_r : Potencia medida en el receptor.

R : Velocidad de transmisión de datos RF.

Para obtener la relación de la Energía de Bit a la Densidad Espectral de Ruido en el receptor, se calcula la N_0' que tiene en cuenta la Figura de Ruido (NF, *Noise Figure*) del Receptor. La figura de ruido en el receptor se define como la relación señal a ruido de entrada con respecto a la relación señal a ruido a la salida del receptor. La Figura 4.33 representa la relación entre la N_0 a la entrada del receptor respecto a la densidad espectral de ruido N_0' a la salida del receptor. El valor típico de la figura de ruido para el tipo de dispositivos utilizados en las pruebas es de 5 dB.

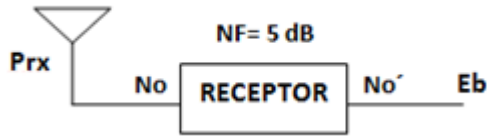


Figura 4.33 Relación E_b/N_0 a la entrada y a la salida del receptor

Continuando, la densidad espectral de potencia de ruido a la salida del receptor se calcula mediante la ecuación 4.12.

$$N_0'[\text{dBm}/\text{Hz}] = N_0[\text{dBm}/\text{Hz}] + NF[\text{dB}] \quad (4.12)$$

Donde:

N_0' : Densidad Espectral de Potencia de Ruido a la salida del Receptor.

N_0 : Densidad Espectral de Potencia de Ruido a la entrada del Receptor.

NF : Figura de Ruido del Receptor.

Por su parte la Densidad Espectral de Potencia de Ruido (N_0), relaciona la potencia total de ruido y el ancho de banda de la señal como se indica en la ecuación 4.13 y 4.14.

$$n_0 [\text{mW}/\text{Hz}] = \frac{p_N [\text{mW}]}{BW [\text{Hz}]} \quad (4.13)$$

$$N_0[\text{dBm}/\text{Hz}] = P_N[\text{dBm}] - 10 \log BW[\text{Hz}] \quad (4.14)$$

Donde:

P_N : Potencia de Ruido.

BW : El ancho de banda de un canal en (Hz) igual a 500000 Hz.

Reemplazando N_0 en la ecuación 4.12 se obtiene la ecuación 4.15.

$$N_0'[\text{dBm}/\text{Hz}] = P_N[\text{dBm}] - 10 \log BW[\text{Hz}] + NF[\text{dB}] \quad (4.15)$$

Combinando las ecuaciones 4.11 y 4.15 se obtiene la relación E_b/N_0' , que se expresa en la ecuación 4.16 o de manera simplificada en la ecuación 4.17.

$$\frac{E_b}{N_0'} [dB] = P_r [dBm] - 10 \log R [bps] - (P_N [dBm] - 10 \log BW [Hz] - NF [dB]) \quad (4.16)$$

$$\frac{E_b}{N_0'} [dB] = P_r [dBm] - 10 \log R [bps] - N_0' [dBm/Hz] \quad (4.17)$$

Mediante la aplicación del API de Recepción en los paquetes, cuando un radio recibe un paquete, este envía al anfitrión OEM un paquete con el formato indicado en la Figura 4.31. El cuarto byte del paquete contiene el valor hexadecimal del RSSI, al cual corresponde un valor en dBm de la Tabla 4.4 o el cual puede ser identificado a partir de la curva de la Figura 4.32. Debido a que el API entrega un valor válido y actual de la intensidad de potencia recibida, la ecuación 4.17 puede expresarse en términos del RSSI como se indica en la ecuación 4.18.

$$\frac{E_b}{N_0'} [dB] = RSSI [dBm] - 10 \log R [bps] - N_0' [dBm/Hz] \quad (4.18)$$

4.3.3. Resultados de las Pruebas

Como se mencionó anteriormente, la ventana Prueba de Rango despliega algunas medidas de desempeño de las pruebas del sistema de comunicación de datos que son presentadas a continuación. En la Figura 4.34 se ilustra esta ventana para un radio que está recibiendo 1000 paquetes con el API de recepción, del cual se adquiere el valor RSSI y en la Figura 4.35 se observa la trama del resultado de la ejecución del API de Envío Completo de Datos en el radio que transmite los paquetes. Este API contiene un byte de reconocimiento o confirmación del paquete recibido.

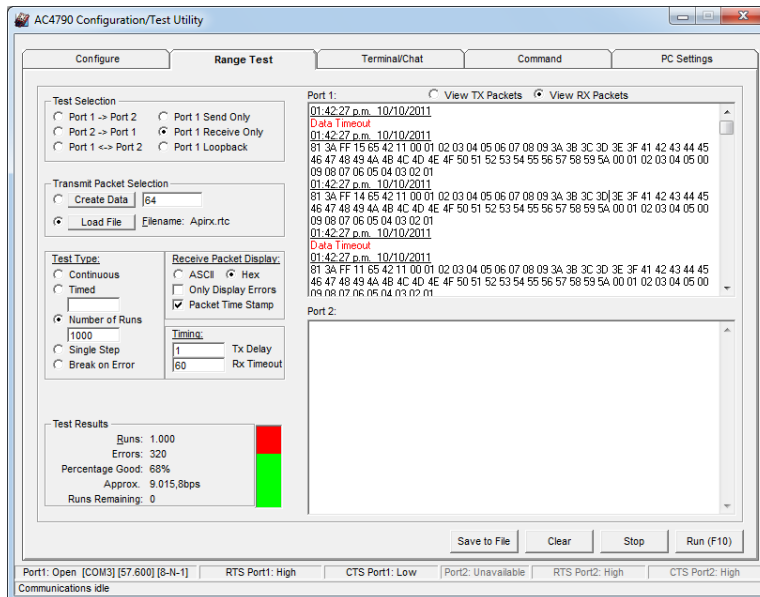


Figura 4.34 Ventana de Prueba de Rango en Recepción.

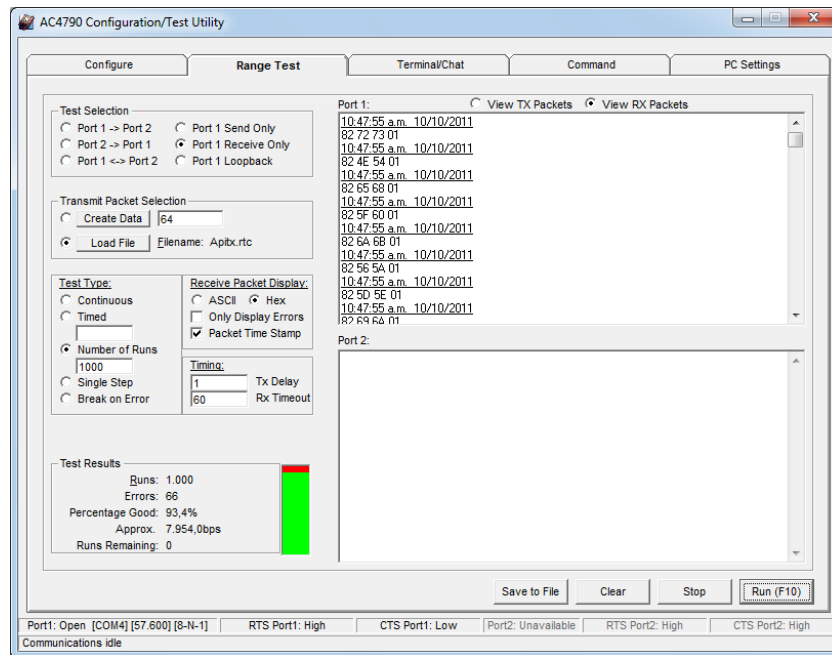


Figura 4.35 Ventana de Prueba de Rango API de Envío Completo de Datos.

En la Tabla 4.5 y en la Tabla 4.6, se encuentran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en los dos escenarios considerados: de exteriores y de interiores, las cuales contienen resultados para cada una de las distancias en las que se realizaron medidas. Primero se tiene el número de paquetes enviados o ejecuciones (*Runs*), el cual fue un valor constante igual a 1000, dado que después de varias pruebas se concluyó que al ser la sincronización el objetivo principal en el sistema de comunicación, éste era un valor adecuado para obtener resultados validos estadísticamente. Luego, se tiene el número de paquetes erróneos obtenidos en la transmisión, este valor está clasificado en errores de datos (*Data Error*), caso en el que el paquete transmitido llega incompleto y datos fuera de tiempo (*Data Timeout*), que son errores que se presentan generalmente al principio de la transmisión, hasta que los radios se sincronizan y en algunas ocasiones en medio o al final de la transmisión, porque no alcanzan a llegar al receptor en el tiempo establecido en el parámetro *Rx Timeout*, mencionado en el capítulo anterior, el cual fue de 60 ms, valor calculado a partir de los 50 ms en que ocurre cada salto en frecuencia. Posteriormente, se tiene el porcentaje de éxito de la transmisión y el valor aproximado de la velocidad de transmisión de datos (throughput), dependiendo de la cantidad total de paquetes transmitidos, la cantidad de paquetes recibidos satisfactoriamente en el receptor y la distancia. Por último se tiene el número de reconocimientos recibidos que hace referencia al número de paquetes recibidos con éxito y con error (*Data Error*) que llegan al receptor, sin incluir los paquetes de datos fuera de tiempo (*Data Timeout*).

En la ejecución de las pruebas se realizaron al menos 5 medidas para cada valor de distancia, es decir, las 1000 ejecuciones se repitieron 5 veces para establecer el valor óptimo de paquetes errados y todos los valores correspondientes.

Tabla 4.5 Resultados de la prueba para exteriores.

Distancia (m)	Ejecuciones (Runs)	Errores (Errors)		Porcentaje de éxito (Percentage Good)	Throughput aproximado (bps)	Número de reconocimientos recibidos
		Error de datos (Data Error)	Datos fuera de tiempo (Data Timeout)			
10	1000	184	6	81	18292.4	994
20	1000	224	6	77	11760.6	994
30	1000	309	8	68.3	6991.2	992
40	1000	440	8	55.2	5604.6	992
50	1000	515	10	47.5	4328.4	990
60	1000	572	10	41.8	4118.1	990
70	1000	656	12	33.2	3904.7	988
80	1000	708	15	27.7	3250.7	985
90	1000	737	18	24.5	2529.7	982
100	1000	761	21	21.8	1911.3	979
110	1000	790	25	18.5	1535.4	975

Tabla 4.6 Resultados de la prueba para interiores

Distancia (m)	Ejecuciones (Runs)	Errores (Errors)		Porcentaje de Éxito (Percentage Good)	Throughput Aproximado (bps)	Numero de Reconocimientos Recibidos
		Error de Datos (Data Error)	Datos fuera de tiempo (Data Timeout)			
10	1000	179	8	81.3	18749.6	992
15	1000	210	5	78.5	12652.7	995
20	1000	253	10	73.7	11742.5	990
25	1000	235	7	75.8	9015.8	993
30	1000	311	9	71,7	5219.7	993
35	1000	338	11	65,1	6942.7	989
40	1000	377	10	61,3	6841.7	990
45	1000	401	13	58,6	6559.0	987
50	1000	471	19	57,3	6308.0	981
55	1000	622	24	41,4	4436.6	976
60	1000	703	31	26,6	3629.2	969

4.3.3.1. Cálculo del Ancho de Banda

Para determinar el ancho de banda del sistema, se utilizó el analizador de espectro ZLV Rohde & Schwarz, el cual provee altos estándares de calidad, compatible con diferentes dispositivos hardware y software, proporcionando flexibilidad y amplia funcionalidad. Opera en un rango de frecuencias de 9 KHz a 6 GHz y combina las funciones de un

anizador de redes, un anizador de espectro y un medidor de potencia en un solo instrumento de medida ¹⁸.

- Banda Baja (*Configuración de Banda 0*)

Con el objetivo de determinar el ancho de banda espectral usado en los canales de frecuencia disponibles, se configuró el sistema en la banda 0 o banda baja de trabajo del SDK AC4790 (902 MHz – 915 MHz), en donde el ancho de banda esperado sería 13 MHz. El rango de frecuencia configurado en el anizador fue (899 MHz – 918 MHz). En la Figura 4.36, se observa el marcador M2 en la frecuencia igual a 916.669 MHz y M1 en la frecuencia igual a 900.882 MHz. La diferencia de frecuencias es señalada por el resultado del marcador D2 el cual es igual a 15.734 MHz que corresponde a un ancho de banda de 20 dB.

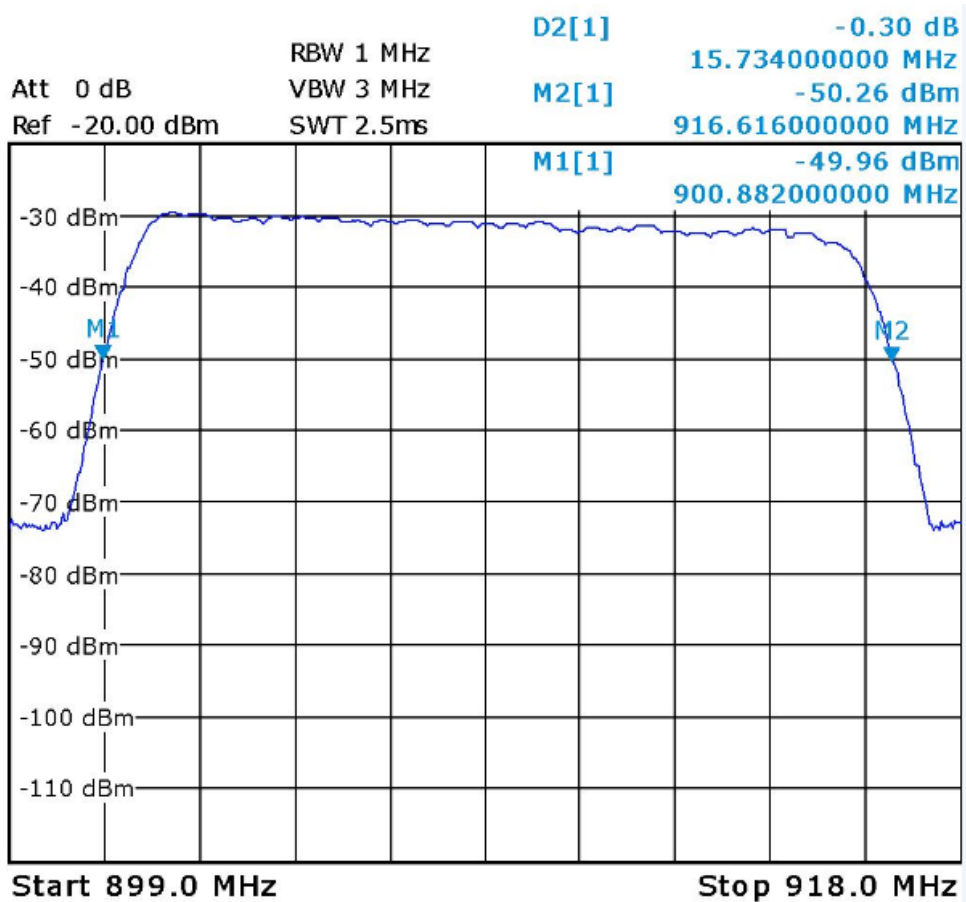


Figura 4.36 Ancho de Banda de 20 dB para la Banda Baja.

¹⁸ Para mayor información visite: <http://www2.rohde-schwarz.com>

- Banda Alta (Configuración de Banda 1)

La segunda prueba fue realizada en el canal 10 de la configuración de banda 1 o banda alta de trabajo del SDK AC4790 (902 MHz – 928 MHz) el ancho de banda esperado es de 26 MHz. El rango de frecuencia configurado en el analizador fue (899 MHz – 931 MHz). En la Figura 4.37 se observa el marcador M2 en la frecuencia igual a 928.669 MHz y M1 en la frecuencia igual a 900.882 MHz. La diferencia de frecuencias es señalada por el resultado del marcador D2 el cual es igual a 27.786 MHz, que corresponde a un ancho de banda de 20 dB.

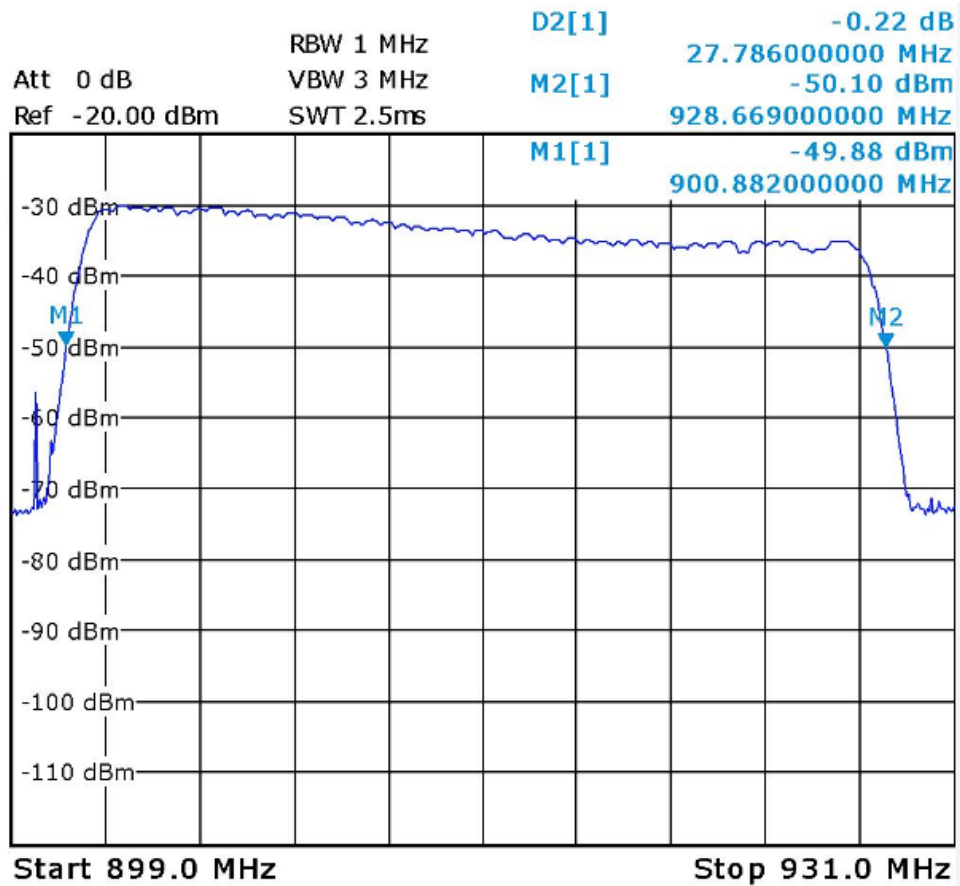


Figura 4.37 Ancho de Banda de 20 dB para la Banda Alta.

- Ancho de Banda de Canal

En la Figura 4.38 se observa el espectro de una frecuencia equivalente a un salto de frecuencia con frecuencia central igual a 907.5 MHz (Canal 11 – 0x0B), en la cual se configuró una separación (*span*) de 600 KHz el cual equivale aproximadamente a 60 KHz por división. El marcador M2 se ubica en 907.6604 MHz e indica el punto de 20 dB de frecuencia superior y el marcador M1 igual a 907.4198 MHz indica el punto de 20 dB de frecuencia inferior, de manera que entre los dos puntos se obtuvo una diferencia registrada por el marcador D2 igual a 160.4 KHz, que corresponde a un ancho de banda

de 20 dB. También se ilustran los puntos mas altos del espectro que corresponden a la frecuencia de marca y de espacio, y dado que la desviación de frecuencia Δf se expresa como la mitad de la diferencia de la frecuencia de marca f_{marca} y espacio f_{espacio} , a partir de la diferencia de estos dos puntos se puede calcular el ancho de banda del canal haciendo uso de la regla de Carson para la modulación FSK, presentada en la ecuación 4.19.

$$B_{FSK}[\text{Hz}] = 2\Delta f_{\text{ch}}[\text{Hz}] + 2R_b[\text{Hz}] \quad (4.19)$$

En donde:

B_{FSK} : Ancho de banda del sistema digital FSK

Δf_{ch} : Desviación de frecuencia pico de la portadora

R_b : Velocidad de transmisión de datos

Reemplazando la velocidad de transmisión de datos, valor dado por el fabricante, $R_b = 76.8$ Kbps para el sistema implementado y el valor de desviación de frecuencia $2\Delta f_{\text{ch}} = 110$ KHz en la ecuación 4.19, se obtuvo que el ancho de banda del canal es 263.6 KHz, que es un valor que está por debajo del ancho de banda estándar, de un sistema FHSS en la banda de 900 MHz, igual a 500 KHz.

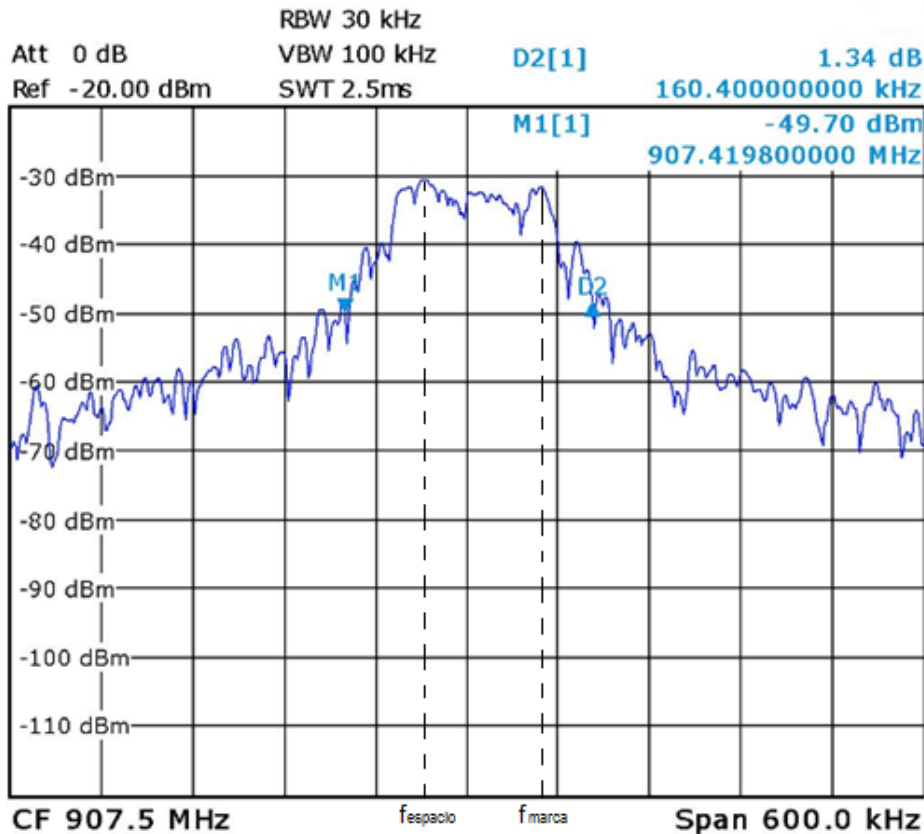


Figura 4.38 Ancho de Banda de 20 dB del canal 11.

4.3.3.2. Niveles de Intensidad de Potencia Recibida

4.3.3.2.1. Intensidad de Potencia Recibida en exteriores

Las pruebas en el escenario de exteriores fueron realizadas a lo largo de la cancha de fútbol del CDU (Centro Deportivo Universitario Tulcán), transmitiendo a una potencia de 1 mW (0 dBm). Las medidas de campo real fueron realizadas variando la distancia entre el radio transmisor y el receptor cada 10 m, hasta llegar a una distancia máxima de 110 m. En la Tabla 4.7 se aprecia los resultados obtenidos, los cuales son representados en la Figura 4.39, en la cual se observa un decremento en la medida de RSSI a mayor diferencia de distancia entre los radios.

Tabla 4.7 Intensidad de Potencia Recibida en exteriores

Distancia (m)	RSSI (dBm)
10	-52
20	-56
30	-60
40	-63
50	-66
60	-68
70	-70
80	-72
90	-74
100	-76
110	-79

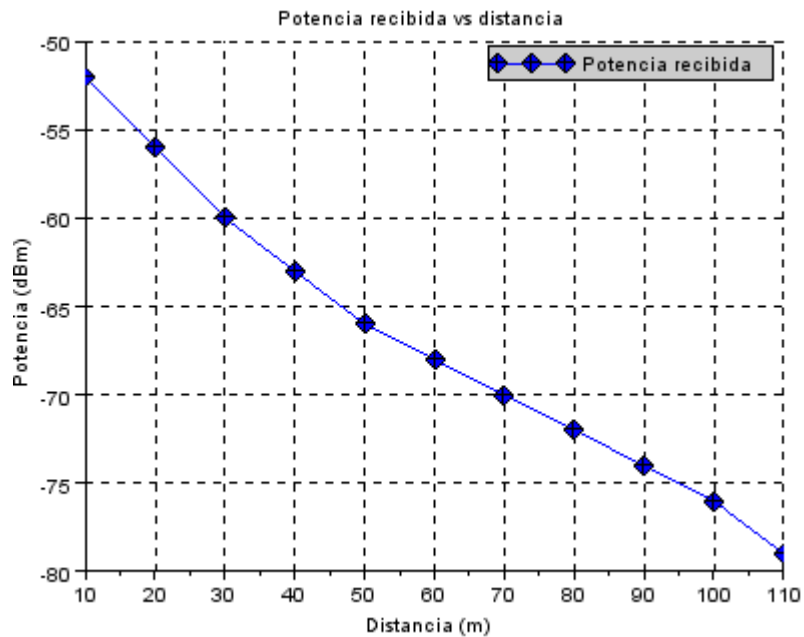


Figura 4.39 Potencia recibida en exteriores.

4.3.3.2. Intensidad de Potencia Recibida en Interiores

El escenario de interiores se conforma por un pasillo principal angosto y un secundario más amplio, que se convierten en los espacios de interés para analizar los efectos de la multitrayectoria en el escenario de interiores. Con el fin de obtener y evaluar el nivel de potencia recibida en interiores, se llevaron a cabo múltiples pruebas a lo largo de los dos pasillos. El valor de potencia de transmisión se estableció en la potencia mínima igual a 0 dBm. El radio que envía los datos se ubica frente a la puerta del salón 319 y el radio que recibe los datos se encuentra a 10 m del primero. Esta es la distancia inicial del radio receptor, por lo tanto en el pasillo principal se dispone de una ruta de recepción con una longitud igual a 40 m y para el pasillo secundario se define una ruta de recepción de 10 m. La distancia de separación entre el transmisor y el receptor se incrementó en pasos de 5 m a lo largo del corredor para cada nueva prueba. Los niveles de RSSI obtenidos a partir de la ejecución del API de recepción en las pruebas realizadas, se muestran en la Tabla 4.8 y la Figura 4.40 presenta la curva de intensidad de potencia recibida correspondiente.

Tabla 4.8 Intensidad de Potencia Recibida en Interiores

Distancia (m)	RSSI (dBm)
10	- 46
15	- 50.8
20	- 49
25	- 49
30	- 50.8
35	- 49
40	- 50.8
45	- 52
50	- 58.5
55	- 74
60	- 76

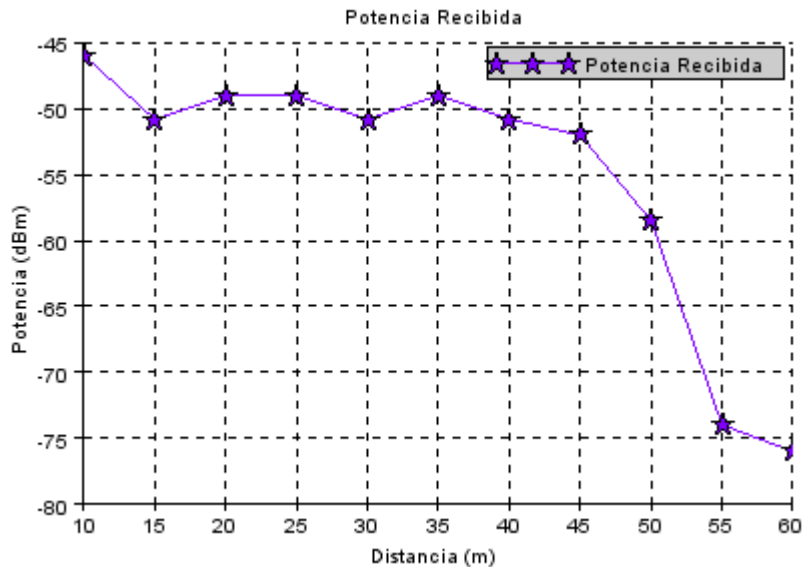


Figura 4.40 Potencia Recibida en Interiores.

4.3.3.3. Pérdidas Básicas de Propagación en Exteriores e Interiores

Haciendo uso de la ecuación 4.4 para ganancias de antena de transmisión y recepción igual a 2 dBi, pérdidas adicionales iguales a 2 dB, potencia de transmisión igual a 0 dBm, y a partir del valor de potencia recibida entregado por el SDK AC4790 para cada distancia de referencia, tal como aparece en la Tabla 4.7 para exteriores y en la Tabla 4.8 para interiores, se calculan las pérdidas de propagación obtenidas experimentalmente en exteriores e interiores que se registran en las Tablas 4.9 y 4.10 respectivamente, y en las Figuras 4.41 y 4.42 se muestran las curvas de pérdidas de propagación correspondientes. Asimismo en las Tablas 4.10 y 4.11 y en las Figuras 4.41 y 4.42 se presentan las curvas de pérdidas de propagación obtenidas a partir de la ecuación de pérdidas básicas y generales de propagación en función de la distancia que se definen como se expresa en la ecuación 4.20 [41] y en unidades logarítmicas en la ecuación 4.21.

$$l(d) = k * d^n \quad (4.20)$$

Donde:

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

n: Exponente de pérdidas de propagación

d: Distancia en metros

$$L(dB) = 10\log k + 10n\log d(m) \quad (4.21)$$

Cuando *d* es igual a 1 m se obtiene el valor de pérdida básica unitaria L_0 como se indica en la ecuación 4.22.

$$L(dB) = 10\log k = L_0(dB) \quad (4.22)$$

Y reemplazando en la ecuación 4.21 se obtiene la ecuación 4.23.

$$L(dB) = L_0(dB) + 10n\log d(m) \quad (4.23)$$

Dado que la distancia mínima entre los radios cuando están transmitiendo debe ser al menos de 3.05 m, no se puede obtener de forma experimental la pérdida de potencia a un 1 m de distancia, por tanto el valor del factor de corrección *k* se obtiene a partir de un proceso de ensayo y error que permite aproximar la curva teórica a la curva real.

Con base en los datos obtenidos experimentalmente de las pérdidas de propagación consignadas en las Tablas 4.10 y 4.11, se procede a calcular los valores teóricos de pérdidas de propagación para cada escenario en cada distancia con el valor de *k* determinado y los valores de *n* correspondientes a las condiciones específicas de los escenarios de prueba considerados que se presentan en la Tabla 4.9 [37].

Tabla 4.9 Exponentes típicos de pérdidas de propagación.

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

Mediante un proceso de ensayo y error para cada escenario considerado, se determina el valor de k y de acuerdo a la ecuación 4.22 se obtiene el valor pérdida básica unitaria L_0 .

Para el escenario de exteriores se considero n igual a 2.

Con $k = 4500$, se obtiene un valor de $L_0 = 36.53$ dB.

Y para el escenario de interiores se considero n igual a 1.7.

Con $k = 1000$, se obtiene un valor de $L_0 = 30$ dB.

Tabla 4.10 Pérdidas de Propagación en Exteriores.

Distancia (m)	L_b (dB) (Medidas reales)	L (dB) (Valores teóricos)
10	54	56.53
20	58	62.55
30	62	66.07
40	65	68.57
50	68	70.51
60	70	72.10
70	72	73.43
80	74	74.59
90	76	75.62
100	78	76.53
110	81	77.36

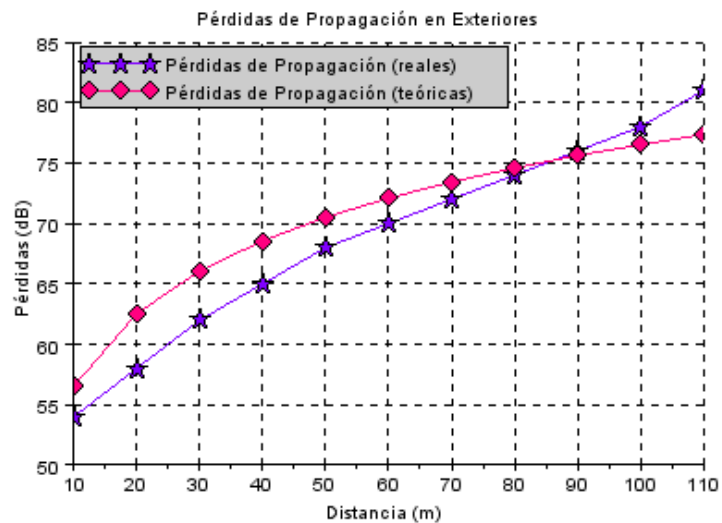


Figura 4.41 Pérdidas de propagación en Exteriores.

Tabla 4.11 Pérdidas de Propagación en Interiores.

Distancia (m)	L_b (dB) (Medidas reales)	L (dB) (Valores teóricos)
10	48	47
15	52.8	49.99
20	51	52.12
25	51	53.76
30	52.8	55.11
35	51	56.25

40	52.8	57.24
45	54	58.10
50	60.5	58.88
55	76	-
60	78	-

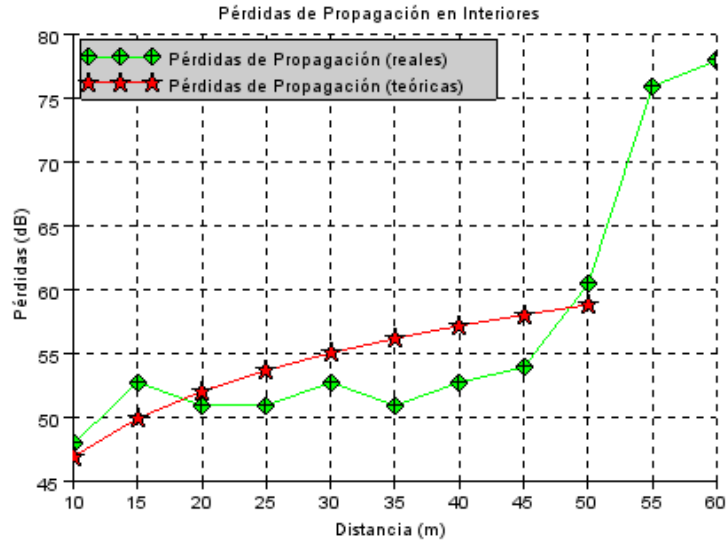


Figura 4.42 Pérdidas de propagación en Interiores.

4.3.3.4. Niveles de Potencia de Ruido y Densidad Espectral de Potencia de Ruido en exteriores e interiores

A partir del procedimiento descrito para determinar la medida de la potencia de ruido y mediante la Tabla 4.4 se pueden obtener los valores de P_N para los 2 escenarios, estos valores se presentan en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12 Medidas de la Potencia de ruido para los escenarios considerados

Escenario	Potencia de ruido P_N (dBm)
Exteriores	-82
Interiores	-80

Mediante la ecuación 4.15 se puede calcular la densidad espectral de potencia de ruido a la salida del receptor N_0' , para el escenario de espacio libre y de interiores, utilizando el valor de potencia de ruido P_N de la Tabla 4.12 para cada escenario, la figura de ruido igual a 5 dB y el ancho de banda de un canal igual a 500 KHz (de acuerdo a las reglas para los sistemas de salto en frecuencia: FCC sección 15.247), se obtienen los valores de N_0' utilizados para el cálculo de la relación E_b/N_0 que se presentan en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13 Densidad espectral de potencia de ruido para los escenarios considerados.

Escenario	N_0' (dBm/Hz)
Exteriores	-134
Interiores	-132

4.3.3.5. Desempeño a Nivel Físico del Sistema

La Figura 4.43 representa el desempeño de un sistema de comunicaciones basado en FHSS simulado en MATLAB. (Vea los detalles de la simulación del sistema en el Anexo B). La simulación fue realizada con el fin de comparar los resultados de BER para un sistema FHSS ideal con los obtenidos en las medidas de campo real de los dos escenarios.

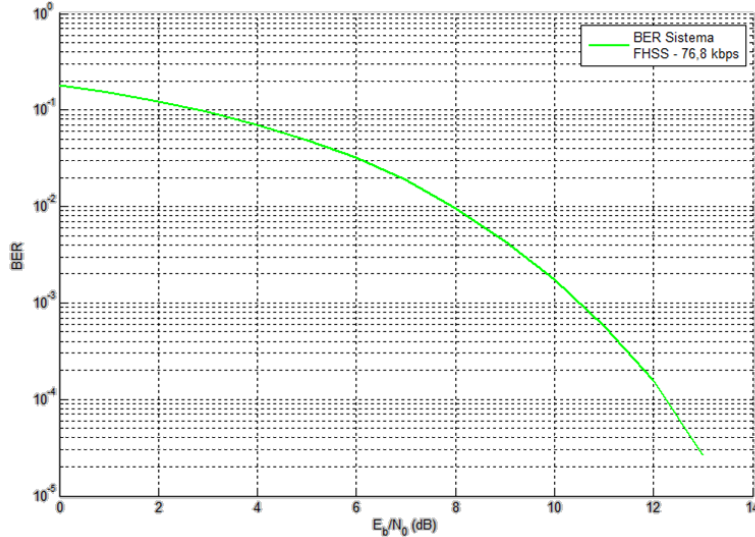


Figura 4.43 Desempeño de un sistema de comunicaciones basado en FHSS

4.3.3.5.1. Desempeño a Nivel Físico del Sistema de Comunicación de Datos en exteriores

En la Tabla 4.14 se observan los resultados obtenidos del sistema de comunicación de datos en el escenario de exteriores, al transmitir 1000 paquetes sin considerar retransmisiones de los mismos en caso de error, para las diferentes distancias presentes en la columna 1. La segunda columna registra los datos de la potencia recibida, que se utilizan para obtener la relación E_b/N_0 , calculada con la ecuación 4.18 donde la densidad espectral de potencia de ruido es de -134 dBm/Hz como lo señala la Tabla 4.13 y la velocidad de transmisión de datos R_b es igual a 78.6 Kbps como lo indican las especificaciones del kit de evaluación utilizado. La BER se calcula como lo indica la ecuación 4.9, con n igual al número de bits por paquete, la cual se encuentra basada en la ecuación 4.7 correspondiente al cálculo de la PER, parámetro obtenido de las pruebas realizadas como se indicó en la Tabla 4.5, en la columna correspondiente al número de errores. El formato del paquete transmitido incluye un encabezado de 7 bytes (56 bits) que adicionan a los bytes de carga útil de datos igual a 58 bytes (464 bits), por tanto se tiene un total de 65 bytes o 520 bits transmitidos. En la Figura 4.44 y la Figura 4.45 se grafican los datos de PER y BER obtenidos en la Tabla 4.14, en la cual también se incluye dos columnas más con los resultados que describen el comportamiento del sistema al operar con 4 retransmisiones, con el fin de evaluar y comparar el desempeño del sistema de comunicación implementado, basado en las ventajas que ofrece el protocolo de comunicación del kit de evaluación utilizado. Al comparar los resultados, se apreció un incremento en el número de paquetes recibidos con éxito como era de esperarse, ya que

el radio transmisor al no recibir un reconocimiento por parte del radio receptor, tiene 4 oportunidades más, hasta que se agote el contador de la sesión actual, para retransmitir el paquete y aumentar la probabilidad de éxito de la recepción, es decir, al configurar el sistema con un valor de retransmisiones diferente de cero, se obtuvo un mejor desempeño del sistema, pero a expensas de una mayor cantidad de tiempo necesaria para transmitir los datos.

Tabla 4.14 Resultados de desempeño del sistema de comunicación en exteriores.

Distancia (m)	Potencia Recibida (dBm)	E_b/N_0 (dB)	PER	BER	PER (4 retx)	BER (4 retx)
10	-52	33	0.190	4.051E-04	0.110	1.078E-04
20	-56	29	0.230	5.024E-04	0.155	1.559E-04
30	-60	25	0.317	7.329E-04	0.237	2.504E-04
40	-63	22	0.448	1.142E-03	0.317	3.529E-04
50	-66	19	0.525	1.430E-03	0.395	4.651E-04
60	-68	17	0.582	1.676E-03	0.470	5.876E-04
70	-70	15	0.668	2.118E-03	0.541	7.207E-04
80	-72	13	0.723	2.465E-03	0.588	8.207E-04
90	-74	11	0.755	2.701E-03	0.630	9.201E-04
100	-76	9	0.782	2.925E-03	0.655	9.848E-04
110	-79	6	0.815	3.239E-03	0.672	1.031E-03

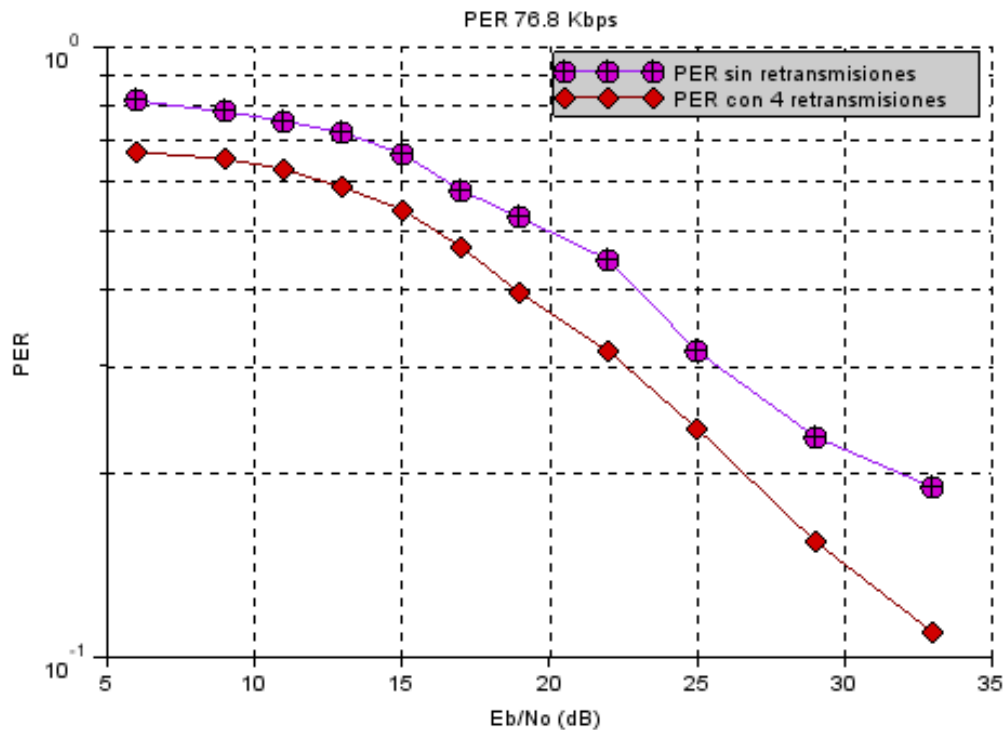


Figura 4.44 Curva de desempeño del sistema de comunicación de datos en términos de la PER en exteriores.

La Figura 4.45 presenta cuatro curvas. La curva en color azul, describe los resultados de BER obtenidos en exteriores para banda ancha (sub-banda baja) de la tesis mencionada en [1], tesis en la cual también fue realizado un análisis de desempeño de la técnica FHSS en la banda de 900 MHz. La curva morada refiere los datos de BER sin retransmisiones para exteriores registrados en la tabla 4.14, la curva roja describe el comportamiento del sistema al configurar un número máximo de retransmisiones igual a 4, resultados registrados en la tabla 4.14 y la curva en color verde corresponde a la presentada en la Figura 4.43 de un sistema de comunicaciones ideal basado en FHSS.

En la Figura 4.45 se observa que las curvas morada y roja presentan valores muy diferentes de E_b/N_0 a los que describe la curva azul, puesto que esta última toma en cuenta la potencia teórica de ruido térmico normalizada a un ancho de banda de 1 Hz igual a -174 dBm/Hz, la cual se encuentra por debajo del valor más bajo de potencia medido en la práctica que fue considerado para exteriores y consignado en la tabla 4.12. Además, las curvas verde y morada refelejan las ventajas del SDK AC4790, mediante el cual fue implementado el sistema de comunicación de datos. Entre las más importantes se encuentra el intervalo de tiempo que utilizan los radios para el establecimiento y control de la sesión y sincronización antes de transmitir un paquete. Además, la arquitectura Sin Maestro que emplea, definida como una arquitectura *peer-to-peer*, elimina la necesidad de asignar un transceptor como maestro que realice el control de la comunicación o el flujo de datos, lo cual se tradujo un mejor desempeño.

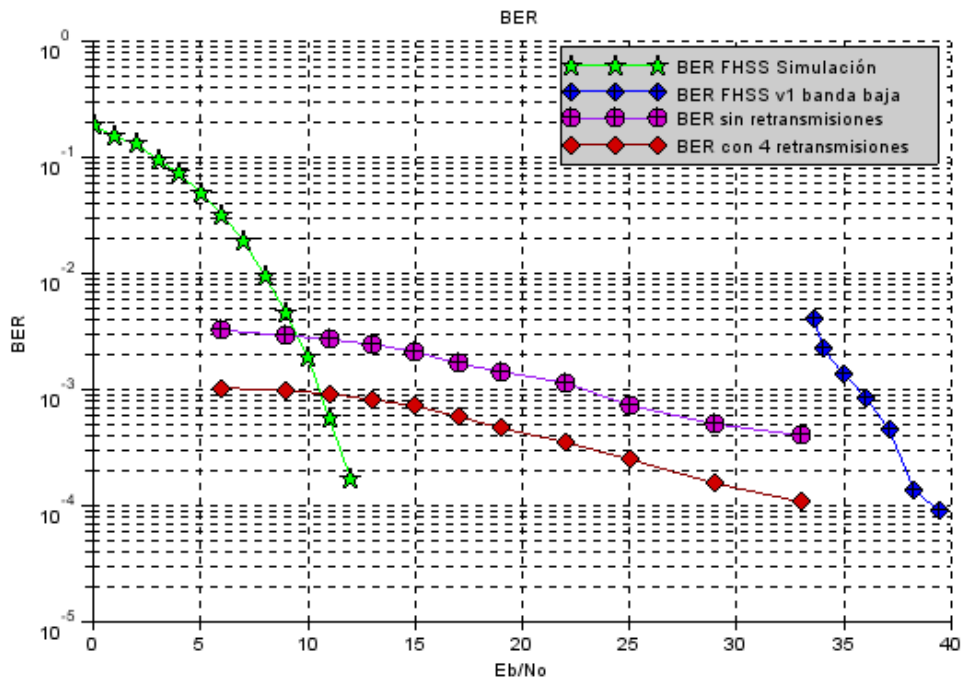


Figura 4.45 Curva de desempeño del sistema de comunicación de datos en términos de la BER en exteriores.

La Figura 4.46 y la Figura 4.47 permiten una comparación de los resultados obtenidos del sistema de comunicación, en términos de la PER y de la BER en exteriores respectivamente, al incrementar la carga útil de los paquetes de datos. Las medidas de

campo se realizaron para una carga útil de 58 bytes (464 bits) y 128 bytes (1024 bits), que es el tamaño máximo de un paquete.

Cuando se incrementó la cantidad de carga útil del paquete, se observó que el número de errores en el receptor fue mucho mayor, dado que ante el incremento del tamaño del paquete de datos hay una mayor probabilidad de obtener errores y además al no contar con retransmisiones, el receptor necesita de un tiempo superior al establecido, que fue de 60 ms, para poder recibir el paquete de manera satisfactoria y no optar por descartarlo como un error fuera de tiempo (*DataTimeout*). En la Figura 4.46 las curvas morada y azul describen las curvas de PER para un paquete con carga útil igual a 58 bytes (464 bits) y 128 bytes (1024 bits) respectivamente.

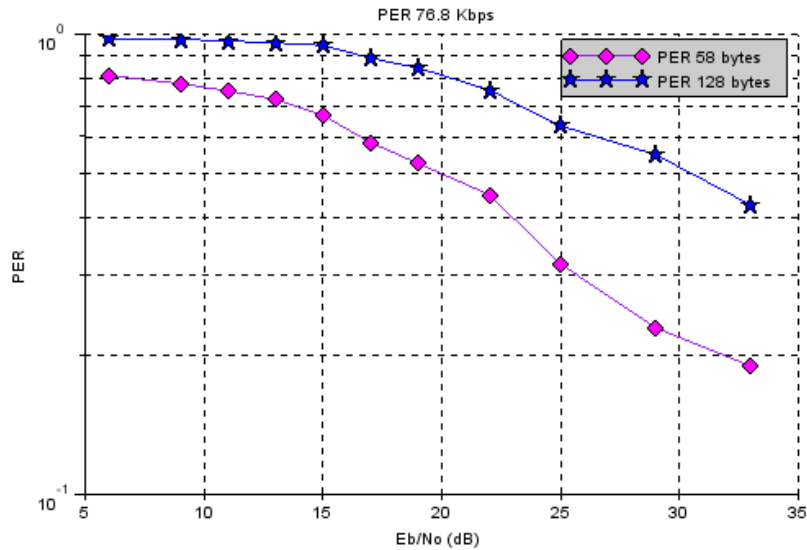


Figura 4.46 Curvas de desempeño en términos de la PER en exteriores para variaciones de la carga útil de 58 bytes a 128 bytes.

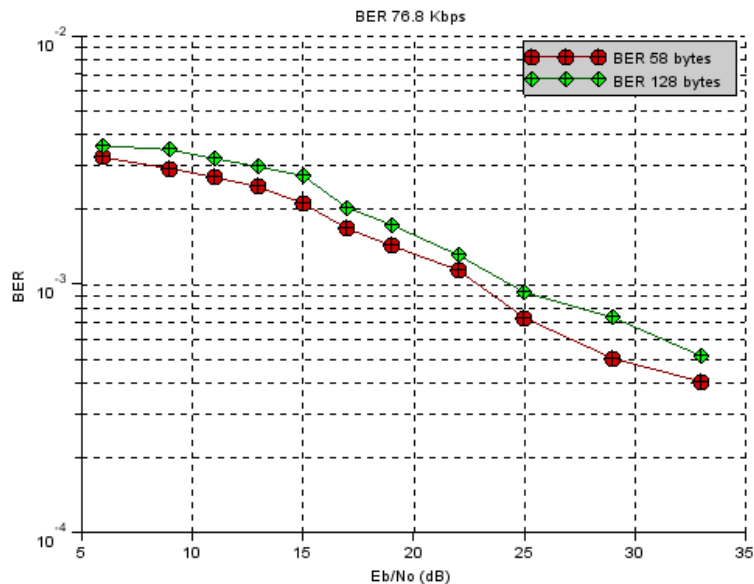


Figura 4.47 Curvas de desempeño en términos de la BER en exteriores para variaciones de la carga útil de 58 bytes a 128 bytes.

4.3.3.5.2. Desempeño a Nivel Físico del Sistema de Comunicación de Datos en Interiores

La relación de energía de bit a densidad espectral de potencia de ruido E_b/N_0' se calcula mediante la ecuación 4.18, a partir de los niveles de potencia registrados en la Tabla 4.8, el valor de N_0' para interiores de la Tabla 4.13 y la velocidad de transmisión de datos RF R_b igual a 76800 bps, se calculan los valores de E_b/N_0' cada 5 m a través de los pasillos considerados. La tasa de error de paquete (PER), se calcula mediante el parámetro *errores* desplegado por el software SDK mediante la ecuación 4.7 y con un número de paquetes transmitidos igual a 1000. La tasa de error de bit (BER), se obtiene a partir de la ecuación 4.9 con n igual al número de bits por paquete. El formato del paquete transmitido incluye un encabezado de 7 bytes (56 bits) que se suman a los bytes de la carga útil de datos, dado que la longitud de la carga útil de los datos es igual a 58 bytes, se tiene un total de 65 bytes o 520 bits transmitidos. Los resultados de las pruebas para interiores se muestran en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15 Resultados de desempeño del sistema de comunicación en interiores.

Distancia (m)	Potencia Recibida (dBm)	E_b/N_0' (dB)	PER	BER	PER (4 retx)	BER (4 retx)
10	-46	37	0.187	3.98E-04	0.032	6.25E-05
15	-50.8	32.2	0.215	4.65E-04	0.04	7.85E-05
20	-49	34	0.263	5.87E-04	0.065	1.29E-04
25	-49	34	0.242	5.33E-04	0.05	9.86E-05
30	-50.8	32.2	0.32	7.41E-04	0.085	1.71E-04
35	-49	34	0.349	8.25E-04	0.12	2.46E-04
40	-50.8	32.2	0.387	9.41E-04	0.219	4.75E-04
45	-52	31	0.414	1.03E-03	0.243	5.35E-04
50	-58.5	24.5	0.49	1.29E-03	0.328	7.64E-04
55	-74	9	0.646	2.00E-03	0.39	9.50E-04
60	-76	7	0.734	2.54E-03	0.547	1.52E-03

La Tabla 4.15 contiene dos columnas adicionales que corresponden a los valores de PER y BER obtenidos, al configurar 4 intentos de retransmisión. La Figura 4.48 ilustra las curvas de la PER, sin retransmisiones y con 4 retransmisiones. Se puede observar que la probabilidad de error en un paquete disminuye con el aumento de las retransmisiones, ya que al incrementar la distancia entre los radios existe una mayor probabilidad de que los paquetes enviados, se pierdan, se descarten, lleguen incompletos o con errores al receptor si no se utilizan retransmisiones; al utilizar 4 intentos de retransmisión, se tienen cuatro posibilidades más de retransmitir el paquete en caso de no recibir un reconocimiento del mismo o en caso de que contenga errores.

A continuación, en la Figura 4.49 se muestran las curvas de la tasa de error de bit (BER) con la relación E_b/N_0' sin retransmisiones y con 4 retransmisiones, además se presenta la curva de desempeño obtenida en [1] a nivel de bit en interiores en la banda baja de frecuencia (902 - 915 MHz), y la curva de desempeño de un sistema FHSS ideal ilustrada en la Figura 4.43, a fin de comparar el desempeño de los tres sistemas de comunicaciones basados en FHSS.

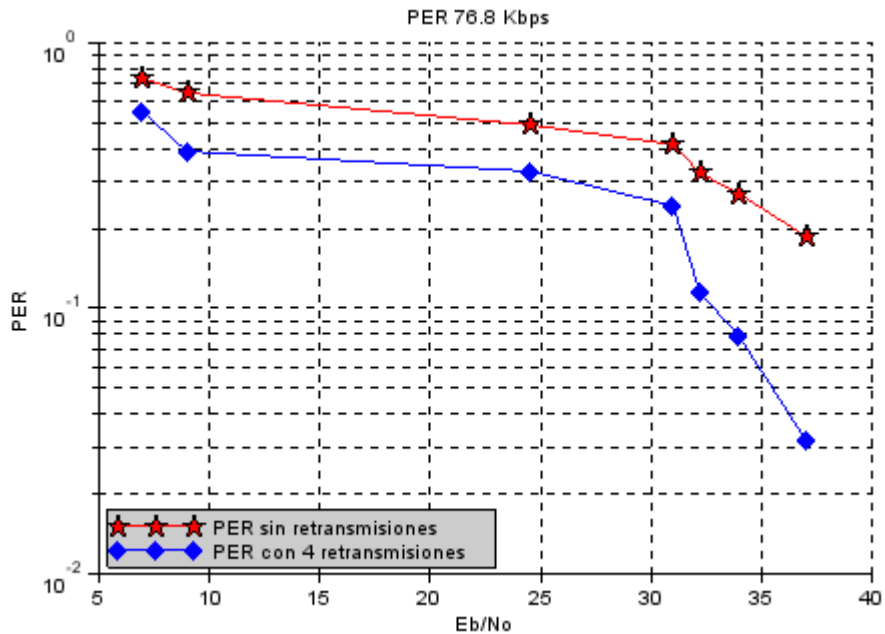


Figura 4.48 Curva de desempeño del sistema de comunicación de datos en términos de la PER para interiores.

Las curvas de la tasa de error de bit (BER) con la relación E_b/N_0 del sistema implementado (curva azul y roja) siguen un comportamiento aproximado al de la curva de un sistema FHSS ideal (curva rosa), es decir la probabilidad de error de bit se disminuye con el aumento de la relación E_b/N_0 .

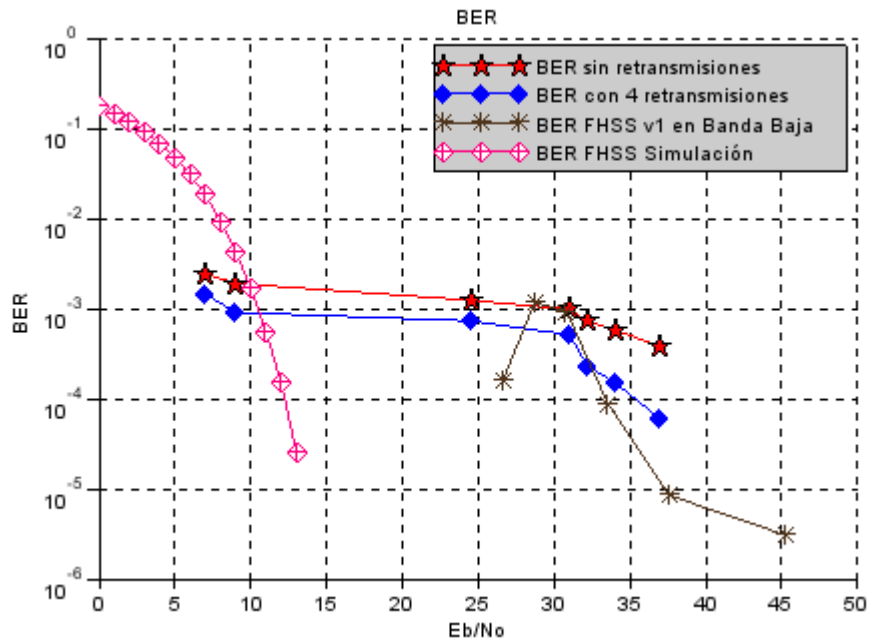


Figura 4.49 Curva de desempeño del sistema de comunicación de datos en términos de la BER para interiores.

Por otra parte, cuando se incrementa la distancia entre los radios existe una mayor probabilidad que se pierdan los datos o se generen errores, por lo tanto si existe un número de intentos de retransmisión mayor a cero, se incrementa la posibilidad de que los paquetes lleguen al receptor sin errores y por lo tanto se obtenga un mejor desempeño en comparación al obtenido sin utilizar retransmisiones, como se ilustra en las curvas de BER sin y con retransmisiones. Sin embargo incrementar demasiado el número de intentos de retransmisión puede generar un aumento considerable de la latencia del sistema.

Al comparar los resultados obtenidos del desempeño del sistema implementado en este trabajo y los resultados del sistema FHSS v1, se puede observar que inicialmente este último sistema presenta un comportamiento contrario al de un sistema FHSS ideal, es decir, al principio la BER se incrementa con el aumento de la relación E_b/N_0 , a partir de una relación E_b/N_0 igual a 30.8 dB la curva comienza a decrecer y con el aumento de esta relación se obtienen menores valores para la tasa de error de bit (BER), que alcanzan los valores del sistema FHSS ideal pero que requieren valores de E_b/N_0 muy altos. Dado que en el presente trabajo se hizo uso de medidas más reales de la densidad espectral de potencia de ruido N_0' y por tanto de la relación E_b/N_0' , y que también este sistema tiene una arquitectura *Peer to Peer* que implementa sincronización en cada transmisión y características como los intentos de retransmisión, el desempeño del sistema utilizando retransmisiones tiene una BER menor a 10^{-3} con valores de E_b/N_0 a partir de 9 dB, similar al ideal, en el que los valores de E_b/N_0 mayores a 10 dB tienen una tasa de error de bit (BER) menor a 10^{-3} y mejor que el desempeño del sistema FHSS v1, en el cual para obtener una BER menor a 10^{-3} se requieren valores de E_b/N_0 mayores a 25 dB.

Con el fin de estimar el efecto que tiene la cantidad de bytes contenidos en el paquete transmitido sobre el desempeño del sistema, se realizaron pruebas variando la longitud de la carga útil de datos de 58 bytes a 128 bytes, que es el tamaño máximo de un paquete. En la Figura 4.50 se muestran las curvas de la tasa de error de paquete (PER), transmitiendo paquetes con una carga útil de 58 bytes y de 128 bytes para interiores. Al comparar las dos curvas se observa que al incrementar el tamaño del paquete, la posibilidad de que los paquetes se pierdan, lleguen con errores o incompletos al receptor aumenta.

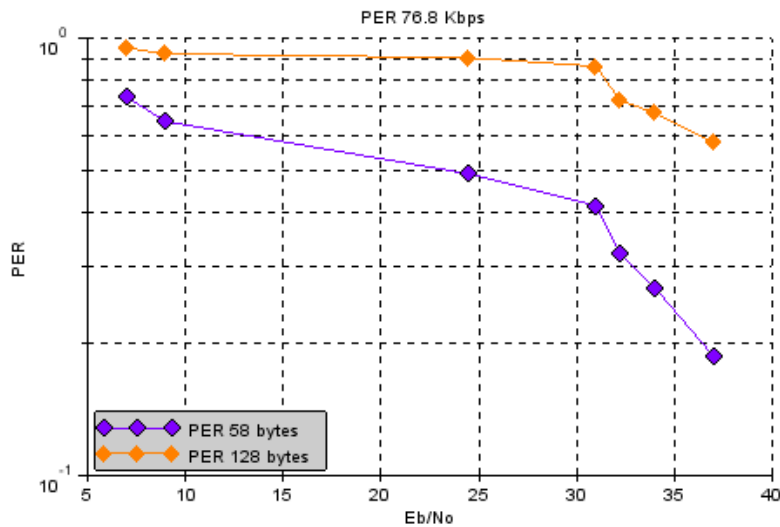


Figura 4.50 Desempeño en términos de la PER para variaciones de la carga útil de datos de 58 bytes a 128 bytes en interiores.

En la Figura 4.51 se observan las curvas de la BER al enviar 1 paquete con una carga útil de 58 bytes (464 bits) y de 128 bytes (1024 bits) en el escenario de interiores. Cuando se envía un paquete de 58 bytes de datos, se alcanza una BER menor a 10^{-3} con un valor de E_b/N_0 mayor o igual a 30 dB y con el valor máximo de la relación E_b/N_0 se alcanza una tasa de error igual a 3.98×10^{-4} ; en tanto, cuando se envía el paquete de 128 bytes o 1024 bits y no se utilizan intentos de retransmisión, el desempeño del sistema se ve afectado, ya que una tasa de error de bit menor o igual a 10^{-3} solo se obtiene a partir de una relación E_b/N_0 igual a 34 dB, y para el mayor valor de E_b/N_0 se tiene una BER igual a 8.01×10^{-4} dos veces mayor a la obtenida para el paquete de 58 bytes. Esto se presenta porque un incremento en el tamaño de la carga útil de 128 bytes, resulta en una mayor probabilidad de paquetes errados y en su mayoría perdidos, debido a que este incremento requiere un retardo entre transmisiones (*Tx Delay*) y un tiempo de espera de recepción (*Rx Timeout*) mayor que para un paquete de 58 bytes, sin embargo esto representa un aumento significativo del tiempo de cada prueba y a su vez compromete el desempeño del sistema.

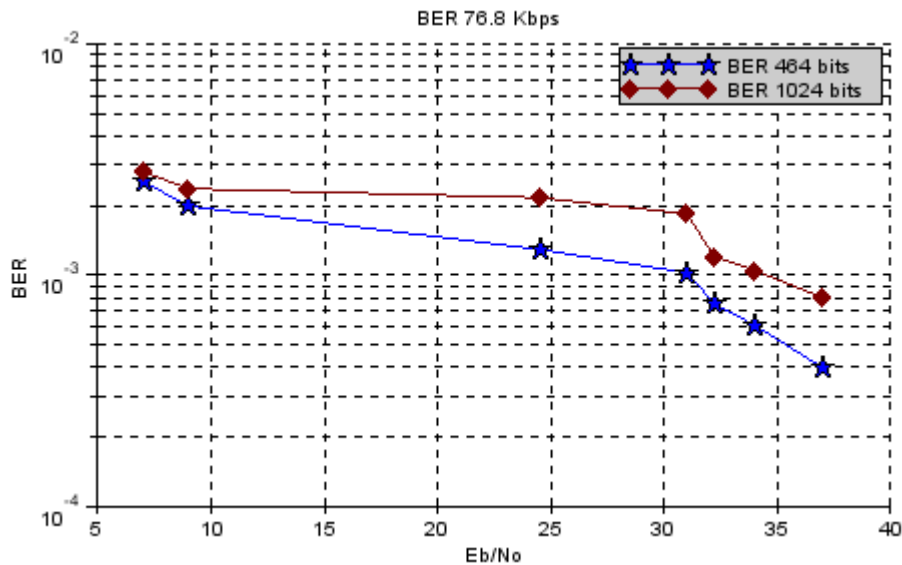


Figura 4.51 Curvas de desempeño en términos de la BER en interiores para variaciones de la carga útil de datos de 464 bits y 1024 bits en interiores.

4.3.3.5.3. Comparación del desempeño del Sistema de Comunicación de Datos en Interiores y Exteriores

A fin de comparar el desempeño del sistema de comunicación en los dos escenarios considerados: interiores y exteriores, en la Figura 4.52 se presentan las curvas de la tasa de error de paquete (PER) para cada escenario. En esta figura se observa que la PER para los dos escenarios disminuye con el aumento de la relación E_b/N_0 , sin embargo esta disminución es diferente de acuerdo al escenario, la PER en exteriores disminuye con pequeños incrementos de la relación E_b/N_0 y la PER en interiores disminuye con mayores incrementos de E_b/N_0 . También se observa que a partir de una relación E_b/N_0 igual a 19 dB se tienen menores valores de PER para exteriores que los obtenidos en interiores con mayores valores de E_b/N_0 . Asimismo en la Figura 4.53, se muestran las curvas de la tasa de error de bit (BER) para interiores y exteriores, que indican que en exteriores se alcanza

una BER menor o igual a 10^{-3} con menores valores de E_b/N_0 , que los se requieren en interiores para obtener la misma BER.

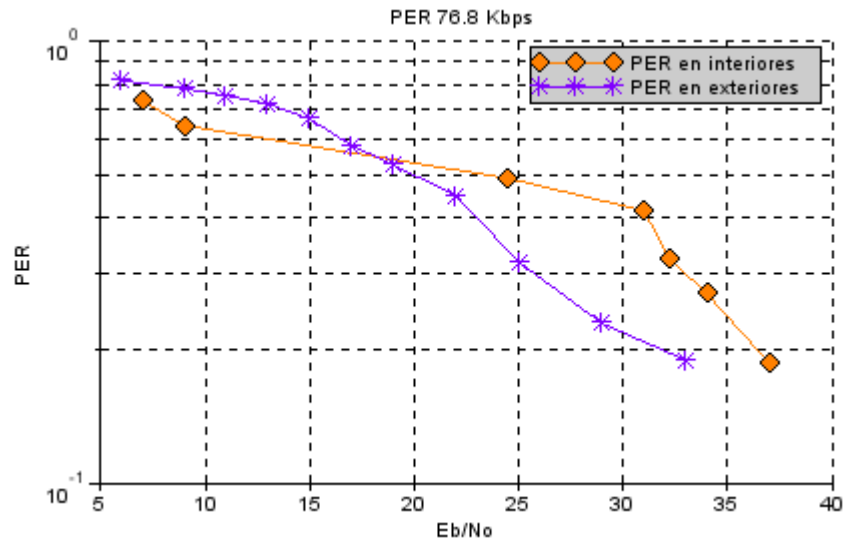


Figura 4.52 Curvas de desempeño en términos de la PER para interiores y exteriores.

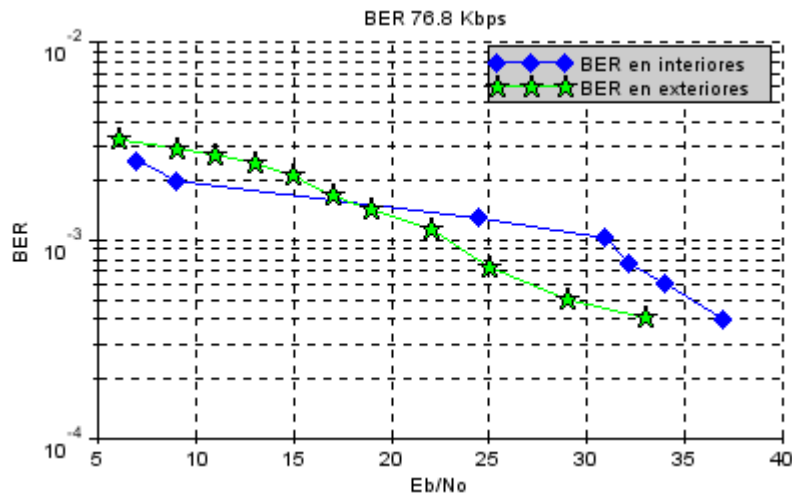


Figura 4.53 Curvas de desempeño en términos de la BER en interiores y exteriores.

4.3.3.5.4. Desempeño a Nivel Físico del Sistema de Comunicación de Datos Bajo Condiciones de Interferencia

Para evaluar el desempeño del sistema de comunicación via radio implemetando mediante el SDK AC4790 bajo condiciones de interferencia, se adecuó el sistema como se indica en la Figura 4.54, de esta manera el receptor se ubica a la misma distancia (mayor o igual a la distancia mínima entre los dos radios: 10 pies =3.048 m) del radio transmisor y del generador de interferencia, y a continuación mediante la variación del

nivel de potencia de la señal interferente observar como se afecta la recepción de la señal.

Inicialmente, se configuró el generador de interferencia para el canal 0x01 de la configuración de banda 0 que fue descrita en la Tabla 3.8, con un ancho de banda igual a 500 KHz y una frecuencia central de 902.16 MHz igual a la configuración deseada, el cual mantuvo un valor constante de potencia de transmisión igual a 0 dBm durante las pruebas. Posteriormente, se realizaron pruebas con el analizador de espectro para determinar en donde se concentraba la mayor cantidad de espectro de la señal transmitida y de la señal interferente.

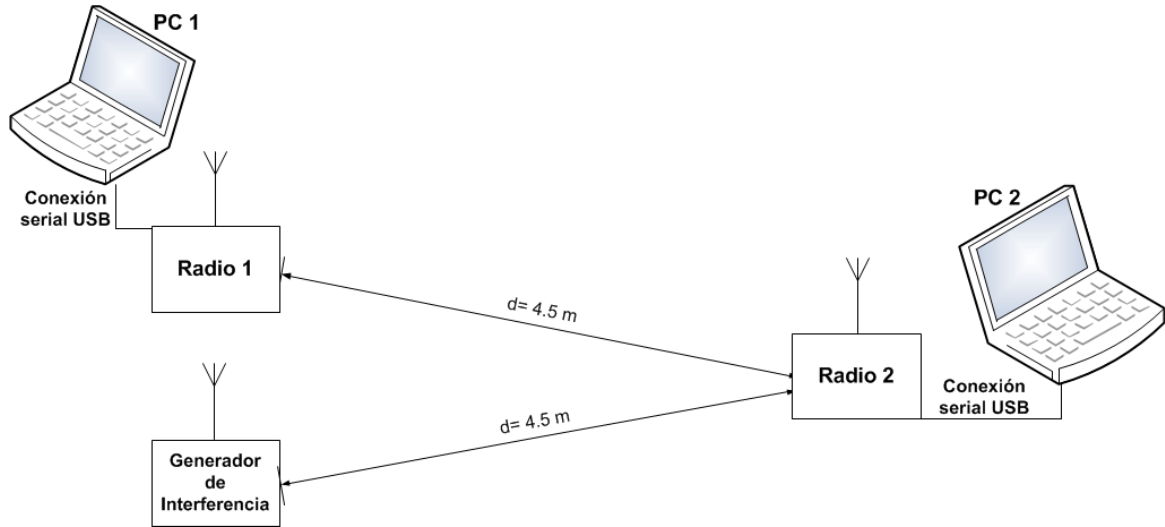


Figura 4.54 Montaje del sistema para evaluar el desempeño bajo condiciones de interferencia.

Para observar los efectos de la señal interferente y dado que la potencia de recepción tiene una relación directa con la tasa de error BER, en el lado del receptor se tomó una medida de los paquetes errados para valores diferentes de la potencia de transmisión de la señal interferente y se calcularon las relaciones PER y BER y la relación C/I que se registran en la Tabla 4.16. Se consideraron pruebas con nueve valores de potencia diferentes, desde -23 dBm hasta 17 dBm para el transmisor interferente. La incidencia de esta señal sobre el desempeño del sistema de comunicación, se observa en la Figura 4.55 y en la Figura 4.56, en donde se ven representadas las relaciones PER y BER con respecto a la relación de la potencia de la portadora a la potencia de la señal interferente, obtenida a partir de la ecuación 4.24, debido a que el transmisor interferente y deseado se encuentran a la misma distancia del receptor.

$$C/I[\text{dB}] = P_{TXS}[\text{dBm}] - P_{TXI}[\text{dBm}] \quad (4.24)$$

Dónde:

C/I : Relación portadora – interferencia.

P_{TXS} : Potencia de transmisión de la señal.

P_{TXI} : Potencia de transmisión de la señal interferente.

Tabla 4.16 Resultados de desempeño del sistema de comunicación bajo condiciones de interferencia.

Potencia de Interferencia (dBm)	C/I (dB)	PER	BER
17	-17	0.888	4,20E-03
10	-10	0.874	3,98E-03
7	-7	0.86	3,77E-03
0	0	0.833	3,44E-03
-7	7	0.752	2,68E-03
-10	10	0.743	2,61E-03
-17	17	0.535	1,47E-03
-23	23	0.47	1,22E-03
-26	26	0.416	1,03E-03

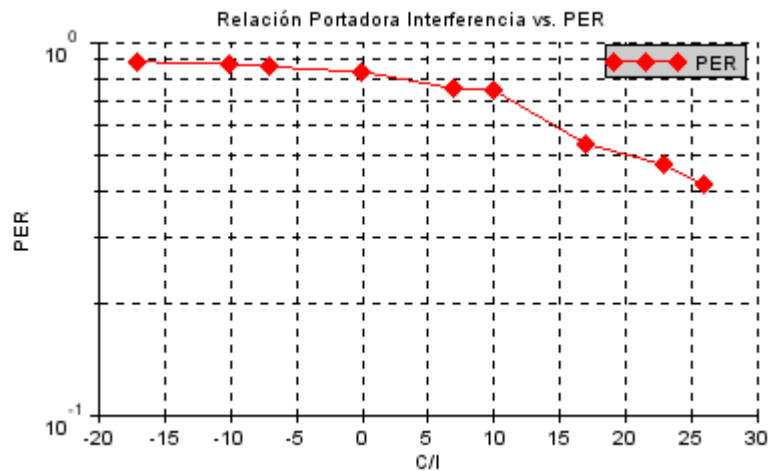


Figura 4.55 Relación Portadora Interferencia vs. Tasa de Error de Paquete (PER).

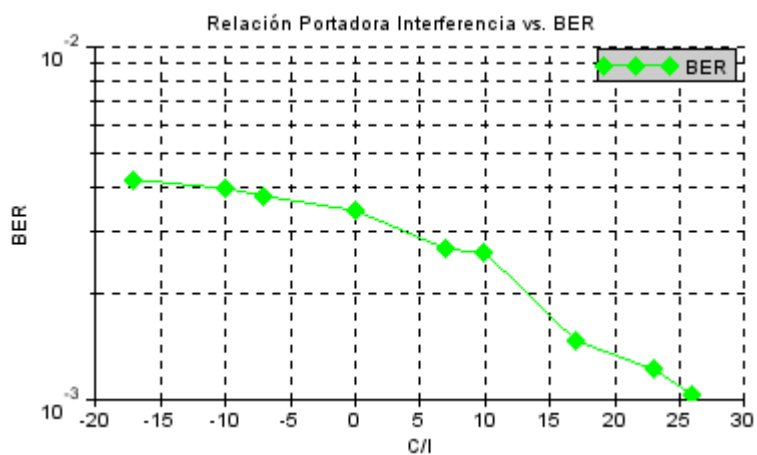


Figura 4.56 Relación Portadora Interferencia vs. Tasa de Error de Bit (BER).

4.3.4. Comparación del Nivel de Potencia

En esta sección se realiza la comparación de los resultados prácticos de nivel de potencia recibida en los dos escenarios propuestos, con los resultados obtenidos al inicio del capítulo a partir del uso de la herramienta de predicción de propagación *Wireless InSite*.

- Comparación del Nivel de Potencia en Exteriores

En la Tabla 4.17 se realiza la comparación del nivel de potencia recibido en la implementación real, con la predicción realizada por la herramienta software, como se presentó al inicio del capítulo en los resultados de las dos simulaciones realizadas en el escenario de exteriores, la primera empleando el modelo de espacio libre, cuyos resultados se asemejan a los valores iniciales de potencia medidos en la práctica y la segunda empleando el modelo Full 3D, que utiliza la técnica de trazado de rayos SBR. En la Figura 4.57 se grafican los datos obtenidos en la Tabla 4.17.

Tabla 4.17 Niveles de potencia recibida real y de simulación para exteriores

Distancia (m)	Potencia recibida real (dBm)	Potencia recibida Wireless Insite S1 (dBm)	Potencia recibida Wireless Insite S2 (dBm)
10	-52	-49.39	-46.39
20	-56	-56.08	-53.08
30	-60	-59.81	-56.81
40	-63	-62.41	-59.41
50	-66	-64.41	-61.41
60	-68	-66.04	-63.04
70	-70	-67.4	-64.4
80	-72	-68.59	-65.59
90	-74	-69.63	-66.63
100	-76	-70.56	-67.56
110	-79	-71.39	-68.39

Se observan las 3 curvas de potencia: la curva azul corresponde a los niveles de RSSI medido en las prácticas de campo, la curva verde presenta los valores obtenidos de la simulación 1 y la curva roja contiene los niveles de potencia estimados en la simulación 2.

En la Figura 4.57 se observa que los valores de potencia recibida para las distancias 20, 30 y 40 m de la curva verde del modelo de espacio libre, coinciden con los obtenidos en la curva azul y aunque los otros resultados obtenidos en las medidas reales no presentan los mismos valores de potencia recibida, siguen la tendencia de las curvas obtenidas en la simulación.

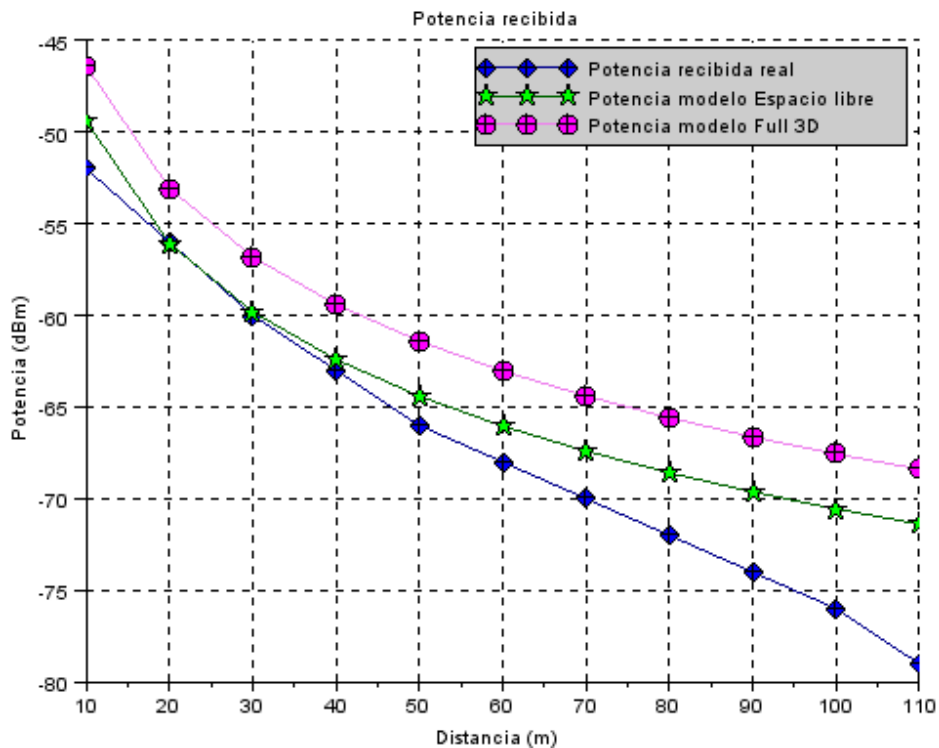


Figura 4.57 Comparación del Nivel de Potencia Recibido Real y de *Wireless Insite* en Exteriores.

- Comparación del Nivel de Potencia en Interiores

La comparación de la potencia recibida en el escenario de interiores se realizó teniendo en cuenta los valores de potencia obtenidos en la simulación 1 y 2 de *Wireless Insite*, y los niveles de intensidad de la señal recibida obtenidos en las pruebas del sistema de comunicación de datos implementado con el SDK AC4790.

Dado que para las pruebas reales no es práctico un incremento en la separación de los radios en pasos de 7 cm, se toma un espaciamiento mayor, igual a 5 m, en el cual todavía se notan los efectos del multirayecto. La Tabla 4.18 contiene los valores de potencia recibida obtenidos de las dos simulaciones y los medidos en las pruebas reales a lo largo del escenario. La Figura 4.58 contiene las 3 curvas de potencia recibida de la Tabla 4.18. La curva azul corresponde a los niveles de campo real, la curva roja contiene los niveles de potencia estimados en la simulación 1 que utiliza la técnica de trazado de rayos SBR y la curva verde los niveles obtenidos de la simulación 2 con la técnica de trazado Eigenray. Se observa que las curvas obtenidas de los resultados de simulación tienen valores de potencia que difieren entre 3 y 8 dB de las medidas de potencia reales y una forma similar. En la distancia igual a 10 m se tiene un nivel de potencia de -46 dBm que esta 3.3 dB por debajo del nivel de potencia de la simulación 1 y 3.4 dB por encima del nivel de la simulación 2. En tanto se incrementa la distancia se presentan variaciones del nivel de intensidad recibida cada 5 m, debidas a los efectos de la multirayectoria y que son similares para los tres casos hasta la distancia igual a 45 m para las medidas reales y 50 m para los resultados de simulación.

Tabla 4.18 Niveles de potencia recibida real y de simulación para Interiores

Distancia (m)	Potencia Recibida Real (dBm)	Potencia Recibida Simulación 1 <i>Wireless Insite</i> (dBm)	Potencia Recibida Simulación 2 <i>Wireless Insite</i> (dBm)
10	-46	-42.71	-49.4
15	-50.8	-47.65	-47.37
20	-49	-47.12	-47.57
25	-49	-46.59	-47.78
30	-50.8	-51.11	-51.3
35	-49	-48.67	-48.52
40	-50.8	-49.16	-52.17
45	-52	-51.07	-52.83
50	-58.5	-49.39	-56.06
55	-74	-88.29	-86.26
60	-76	-85.51	-90.75

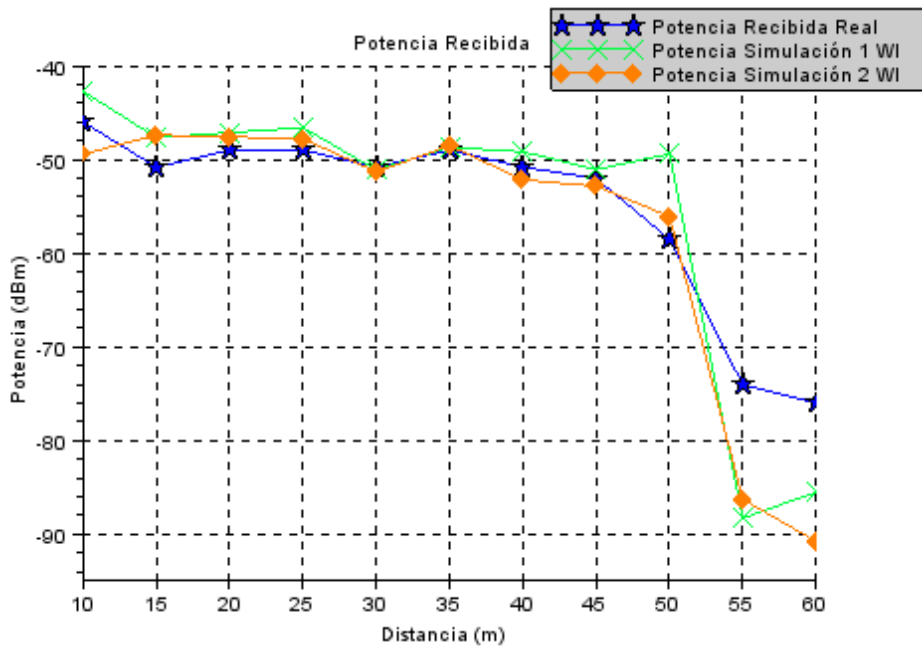


Figura 4.58 Comparación del nivel de potencia recibido real y de simulación en *Wireless Insite* en Interiores.

En esta última distancia (final del pasillo principal y al inicio del siguiente), se observa que las tres curvas comienzan a decrecer en mayores y a diferentes niveles, debido a que ya no se tiene línea de vista con el radio transmisor y la intensidad de señal que llega al receptor depende del número de reflexiones y difracciones sobre las estructuras presentes en el escenario. Las medidas reales de intensidad de potencia recibida disminuyen hasta -76 dBm al final del pasillo y para las simulaciones se obtienen niveles de potencia recibida más bajos de -85.51 dBm y -90.75 dBm para la simulación 1 y 2 respectivamente. En general en los tres casos se tienen valores muy próximos de potencia recibida a lo largo del segmento de recepción establecido, lo que indica que los resultados de predicción de potencia obtenida en las dos simulaciones son una buena aproximación de las medidas reales de intensidad de señal recibida.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a partir del uso de la herramienta de predicción de propagación Wireless InSite® ofrecen una buena aproximación de la distribución que siguen los resultados del nivel de intensidad recibida en los dos escenarios considerados exteriores e interiores.

Las funciones que dispone el kit de evaluación para el inicio y control de sesión y el establecimiento de la sincronización de los radios antes de transmitir un paquete de información, fueron fundamentales para determinar que de manera general en todas las pruebas realizadas en los escenarios tanto exteriores como interiores, predominó un mejor desempeño que superó las limitaciones encontradas en la tesis mencionada en [1].

La aplicación de características de la arquitectura Peer to Peer ofrecidas por el SDK AC4790, tales como, la cuenta de sesión, los intentos de retransmisión y el tiempo de espera en recepción permiten mejorar el desempeño del sistema de comunicación de datos en los dos escenarios escogidos. Como se observa en la Tabla 5.1, cuando se utilizan intentos de retransmisión, se alcanzan valores de BER iguales o menores a 10^{-3} con niveles de energía de bit a densidad espectral de potencia de ruido más bajos que los requeridos para obtener el mismo valor de BER sin utilizar retransmisiones.

Tabla 5.1 Niveles de la relación E_b/N_0 para obtener una BER de 10^{-3} .

Escenario	E_b/N_0 (dB)	E_b/N_0 (dB)
	Sin retransmisiones	Con 4 retransmisiones
Exteriores	23	9
Interiores	32.2	9

A partir de la comparación del desempeño del sistema en exteriores e interiores se puede decir que se alcanzan valores de PER y BER aproximados pero con diferentes niveles de E_b/N_0 debido a que en exteriores se obtienen niveles de intensidad recibida menores que los obtenidos en interiores, ya que la estructura de este escenario hace que las señales estén fuertemente confinadas a lo largo del pasillo generando un efecto de guía de onda donde se experimentan los efectos de la interferencia constructiva y destructiva de las

señales como resultado de la multitrayectoria en cada uno de los puntos elegidos para la recepción, lo cual no ocurre en exteriores al considerar un escenario libre de obstáculos.

Los resultados obtenidos de las medidas reales y representados en las curvas de desempeño a nivel de BER en exteriores e interiores son diferentes a los valores de la curva de BER obtenidos para un sistema FHSS ideal, pero siguen la tendencia de la curva y se encuentran dentro del rango de valores de BER obtenidos en la simulación.

El aumento de la cantidad de datos incluidos en la carga útil del paquete resulta en un incremento significativo de la tasa de error de paquetes (PER) que puede corregirse con el aumento del tiempo de espera en recepción, pero que aumentaría el tiempo de simulación de la prueba y a su vez la latencia del sistema.

Con respecto al desempeño del sistema de comunicación de datos bajo condiciones de interferencia, se obtuvo una tasa de error de paquetes (PER) considerablemente alta para niveles de la relación portadora a interferencia (C/I) menores a 10 dB, y solo se alcanza una BER igual a 10^{-3} con un valor de C/I mayor a 26 dB.

5.2. TRABAJO FUTURO

Implementar un sistema de comunicación que permita analizar características como el acceso equitativo a la red y la libre contención de la comunicación, propias de la arquitectura *Peer to Peer*, teniendo en cuenta que el sistema debe tener una topología conformada por más de dos nodos.

Considerando que el protocolo incluido en el SDK AC4790 no permite acceder a algunos parámetros que hacen posible una medición más precisa de la tasa de error de bit (BER), en tanto se trata de un protocolo propietario; se propone como trabajo futuro el diseño e implementación de un protocolo de código abierto que permita llevar a cabo la captura de la información que es transparente al anfitrión OEM en la implementación propietaria de *Laird*.

Evaluar el desempeño de los módulos radio AC4790 en un entorno de movilidad.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] J. F. Lasso and H. F. Vargas, "Evaluación del desempeño de un sistema de comunicación punto–punto vía radio con transmisión FHSS en 900 MHz," Universidad del Cauca, Trabajo de Grado 2010.
- [2] K. Fazel and S. Kaiser, *Multi-Carrier and Spread Spectrum Systems: From OFDM and MC-CDMA to LTE and WIMAX, 2nd Edition*. United Kingdom: John Wiley and Sons Ltd., 2008.
- [3] V. Vasilevskiy and V. Antropov, "Practical aspects of FHSS-based ISM band wireless telemetry system development," Radioengineering Department, Omsk State Technical University, Rusia, 2009. Disponible en:
<http://as.utia.cas.cz/files/101.pdf> - Diciembre 2010
- [4] H. Córdova and P. Chávez, "Estudio, Modelamiento y Simulación de Sistemas de Espectro Ensanchado Secuencia Directa y Salto De Frecuencia," Revista Tecnológica ESPOL, Ecuador, Voumen 18, No. 1, 2005.
- [5] K. Pahlavan and P. Krishnamurthy, *Networking Fundamentals: Wide, Local and Personal Area Communications*. United Kingdom: John Wiley and Sons Ltd, 2009.
- [6] O. Sallent, J. L. Valenzuela, and R. Agustí, *Principios de Comunicaciones Móviles*. Barcelona: Edicions UPC, S.L., 2003.
- [7] J. Tecuanhuehue, "Sistemas CDMA: cdmaOne, cdma2000," Puebla, 2006. Disponible en:
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/tecuanhuehue_r_j/capitulo_2.html
- [8] C.S.R. Prabhu and A. Reddi Prathap, *Bluetooth Technology and Its Applications with JAVA and J2ME*. India: Prentice-hall Of India Pvt Ltd, 2006.
- [9] T. Wayne, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Cuarta Edición*. Mexico: Prentice Hall, 2000.
- [10] I. Henne and P. Thorvaldsen, *Planificación de Radioenlaces de Visibilidad Directa, Segunda Edición* ed.: Nera, 2002, pp 76-78.

- [11] R. Panez, M. Makeev, A. Arroyo, and E. Schwartz, "A Centralized Associative Behavioral Robotic System," USA, 2003. Disponible en:
<http://www.mil.ufl.edu/publications/fcrar03/Panez.pdf>
- [12] M. Dubreuil, C. Gagné, and M. Parizeau, "Analysis of a Master-Slave Architecture for Distributed Evolutionary Computations," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, no. Volumen 36, No. 1, pp. 229-235, 2006.
- [13] I. Ahmad, A. Rahim, A. Javed, K. Haseeb, and G. Qasim, "A Comparative Study of Parallelization Paradigms," University of Cambridge, Reino Unido, 2008.
- [14] K. B. Manwade and G. A. Patil, "Performance Analysis of Parallel Client-Server Model Versus Parallel Mobile Agent Model," World Academy of Science, Engineering and Technology, India, 2008. Disponible en:
<http://www.waset.org/journals/waset/v38/v38-68.pdf>.
- [15] M. A. Al-Mouhamed, I. A. Khan, and S. N. Firdous, "A Reliable Peer-to-Peer Protocol for Mobile Ad-Hoc Wireless Networks," Dhahran - Arabia Saudita, 2010. Disponible en:
<http://faculty.kfupm.edu.sa/coe/mayez/Publications%28pdf%29/aiccsa-2010-2011-2.pdf>
- [16] R. Schollmeier, "A Definition of Peer-to-Peer Networking for the Classification of Peerto-Peer Architectures and Applications," Institute of Communication Networks, Technische Universität München, Germany, 2001. Disponible en:
<http://csdl2.computer.org/comp/proceedings/p2p/2001/1503/00/15030101.pdf>
- [17] F. Brabec and H. Samet, "Client-Based Spatial Browsing on the World Wide Web," University of Maryland, USA, 2007. Disponible en:
<http://www.cs.umd.edu/~hjs/pubs/brabecic07.pdf>
- [18] B. Hallberg, "Networking, A Beginner's Guide, Fifth Edition," in *Networking, A Beginner's Guide, Fifth Edition*. Estados Unidos: McGraw-Hill Osborne Media, 2009, pp. 18-21.
- [19] MaxStream, "Peer-to-peer FHSS Technology Application Note," North America, 2003. Disponible en:

<ftp://ftp1.digi.com/support/images/XST-AN002a-MaxStreamPeer2Peer.pdf>

- [20] Nelson Minar and Marc Hedlund, "A Network of Peers: Peer-to-Peer Models Through the History of the Internet," in *Peer to Peer: Harnessing the Power of Disruptive Technologies.*: O'Reilly, 2001, pp. 8-18.
- [21] Remcom, "The Wireless InSite R Users Manual," 2009.
- [22] L.W. (Editor) Barclay, *Propagation of Radiowaves 2nd Edition*. London, United Kingdom: Lightning Source UK Ltd., 2003.
- [23] Zhong Ji, Bin-Hong Li, Hao-Xing Wang, Hsing-Yi Chen, and Tapan K. Sarkar, "Efficient Ray-Tracing Methods for Propagation Prediction for Indoor Wireless Communications," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, China, Volumen 43, No. 2, 2001. Disponible en:
- http://www.cis.syr.edu/~tksarkar/pdf/2001_Apr.pdf
- [24] Greg Durgin, Neal Patwari, and Theodore S. Rappaport, "An Advanced 3D Ray Launching Method for Wireless Propagation Prediction," *Mobile and Portable Radio Research Group at Virginia Polytechnic Institute and State University Bradley Department of Electrical and Computer Engineering, Town of Blacksburg, Virginia, 1999.*
- [25] Jian Ming Jin, *Theory and Computation of Electromagnetic Fields*. Estados Unidos de America: John Wiley & Sons, INC., 2010.
- [26] Magdy F. Iskander and Zhengqing Yun, "Propagation Prediction Models for Wireless Communication Systems," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Volumen 50, No. 3, 2002. Disponible en :
- <http://hcac.hawaii.edu/pdfs/6.pdf>
- [27] Tapan K. Sarkar, Zhong Ji, Kyungjung Kim, Abdellatif Medour, and Magdalena Salazar, "A Survey of Various Propagation Models for Mobile Communication," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Volumen 45, No. 3, 2003. Disponible en:
- http://conan.diei.unipg.it/webt/c/dispense/survey_propagation.pdf
- [28] D. N. Schettino, Cássio G. Rego, and Fernando J. S. Moreira, "Efficient Ray Tracing for Radio Channel Characterization of Urban Scenarios," *IEEE Transactions on*

- Magnetics, Brazil, Volumen 43, No. 4, 2007. Disponible en:
<http://www.cpdee.ufmg.br/~fernando/artigos/ieeeMAG07a.pdf>
- [29] Javier Teodoro Treviño, "Propagación de RF en las bandas: LF, MF, HF, VHF, UHF y VHF," Universidad de las Américas Puebla, Puebla, Mexico, 2003. Disponible en:
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/trevino_c_jt/indice.html
- [30] J. L. Camargo, "Modelo de Cobertura para Redes Inalámbricas de Interiores," Universidad de Sevilla, España, 2009. Disponible en:
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11761>
- [31] Nicolás Beltrán and Salomón Dibán, "Aplicación del Modelo Ray-Tracing para Determinar el Comportamiento de la Propagación al Interior de Edificios," Universidad de Chile, Santiago, 2002. Disponible en:
<http://ingeborda.com.ar/biblioteca/Biblioteca%20Internet/Articulos%20Tecnicos%20de%20Consulta/Telecomunicaciones/Articulos%20de%20telecomunicaciones/ID021.pdf>
- [32] Frank Sabath, *Ultra- Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 7, Volumen 7.*, 2007.
- [33] Lambert M. Surhone, Mariam T. Tennoe, and Susan F. Henssonow, "Uniform Theory of Diffraction," 6131374988, 9786131374982, 2010. Disponible en:
http://books.google.com.co/books/about/Uniform_Theory_of_Diffraction.html?id=VuJAYgEACAAJ&redir_esc=y
- [34] Valery P. Ipatov, *Spread Spectrum and CDMA Principles and Applications*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [35] Aerocomm, "Manual de Usuario del Kit de Desarrollo," Lenexa, 2005.
- [36] Aerocomm, "Manual de Usuario AC 4790 V 1.7," Lenexa, 2007.
- [37] Andrea Goldsmith, *Wireless Communications*, Primera ed. Cambridge New York, Estados Unidos: Cambridge University Press, 2005.
- [38] Chipcon Products from Texas Instruments, "Single Chip Low Cost Low Power RF Transceiver CC1100," Texas Instruments, Dallas, Texas, 2006.

- [39] Kavé Salamatian and Ramin Khalili, "Evaluation of Packet Error Rate in Wireless Networks," Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 2004.
- [40] Ken Chan, "Evaluations and Enhancements in 802.11n WLANs – Error-Sensitive Adaptive Frame Aggregation," San Jose State University, California - Estados Unidos, 2009.
- [41] J. M. Hernando Rábanos, *Transmisión por Radio*, Sexta ed. Madrid, España: Universitaria Ramón Areces, 2008.

PROCEDIMIENTO PARA MODELAR ENTORNOS EN ESPACIO LIBRE E INTERIORES USANDO WIRELESS INSITE

A.1. Espacio Libre (Exteriores)

A.1.1. Generación de un nuevo proyecto

La herramienta *Wireless InSite* maneja una interfaz no muy compleja junto a una gran variedad de opciones que facilitan la realización del diseño de diferentes tipos de escenarios, tanto en interiores como en exteriores, para este caso en particular el diseño de los escenarios fue llevado a cabo paso a paso para el escenario de exteriores como se puede apreciar a continuación:

1. Para crear un nuevo proyecto, en la ventana principal (*Main Window*) se debe poner el cursor en la pestaña Proyecto (*Project*), seleccionar Nuevo (*New*) y al dar clic en Proyecto (*Project*) se despliega una ventana llamada Propiedades del Proyecto (*Project Properties*) donde se puede especificar el nombre del proyecto que en este caso es *Project_Espacio_Libre*.

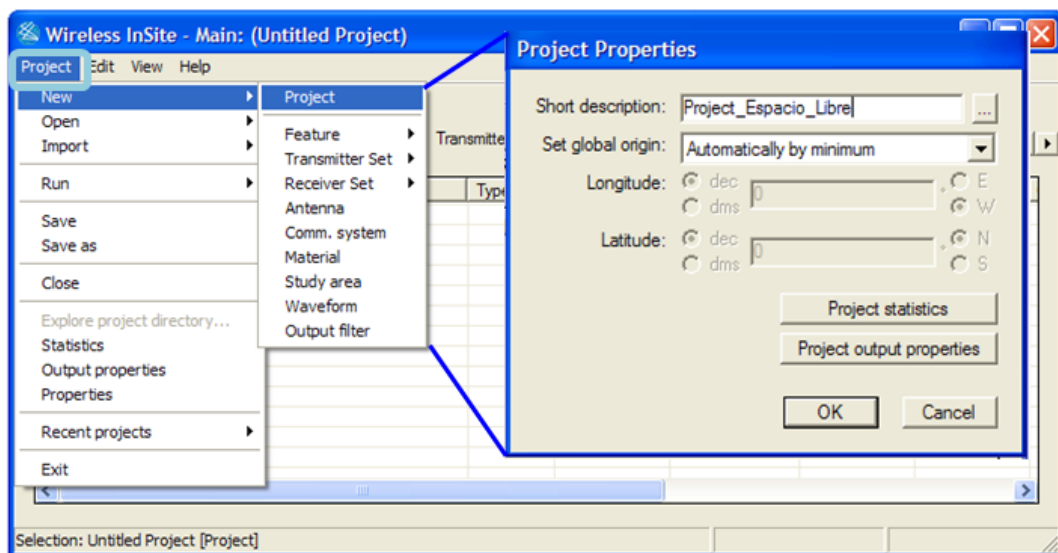


Figura A.1 Creación de un nuevo proyecto.

2. En el escenario de exteriores primero debe crearse un Terreno, para ello se ubica el cursor en la pestaña Proyecto (*Project*), seleccionar Nuevo (*New*) y al dar clic en Terreno (*Terrain*), se despliega una ventana llamada Crear Nuevo Terreno (*Create New Terrain*) donde se elige la opción especificar la ubicación y el tamaño, como se observa en la Figura A.2.

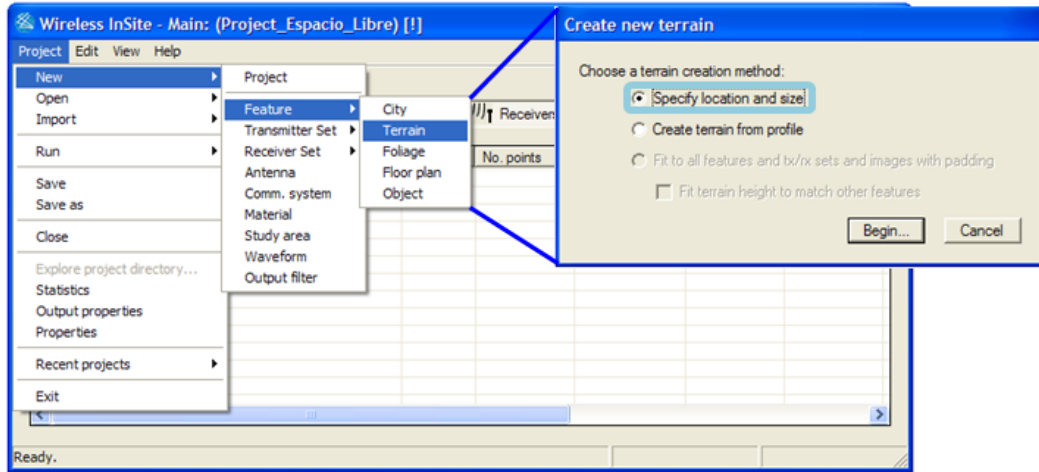


Figura A.2 Creación de un nuevo terreno.

De esta manera fue posible nombrar el terreno y diseñarlo con las dimensiones requeridas, en este caso fue nombrado como Terrain_Espacio_Libre y las dimensiones fueron 120 m de largo por 80m de ancho como se nota en la figura 1.3, además se especificó el material del terreno, el cual fue tierra mojada. El terreno especificado se observa en la Figura A. 3.

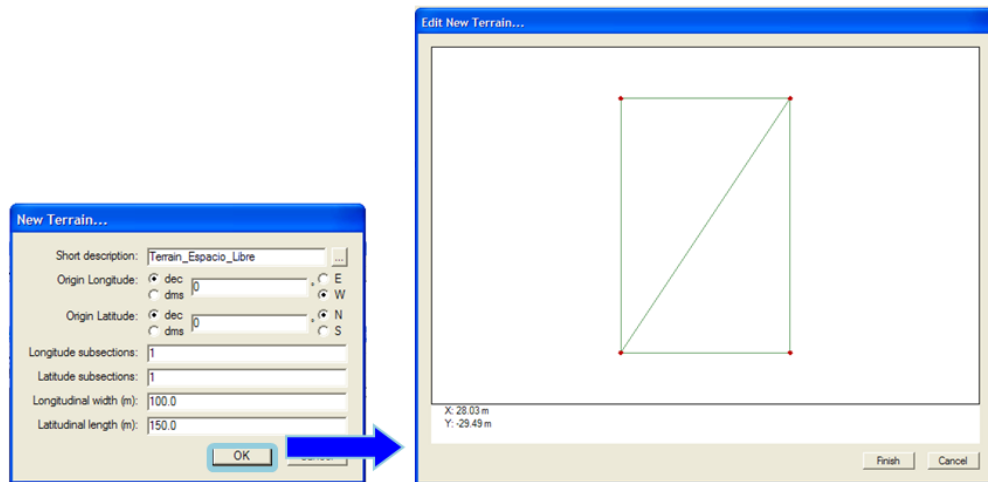


Figura A. 3 Vista del editor del Terreno.

3. Una vez finalizado el terreno se creó una franja de hierba o pasto llamada follaje, para crearla, se ubica el cursor en la pestaña Proyecto (*Project*), se selecciona Nuevo (*New*), Característica (*Feature*) y al dar clic en Follaje (*Foliage*), se

despliega una ventana llamada Propiedades Características (*Feature Properties*) como se observa en la Figura A.4.

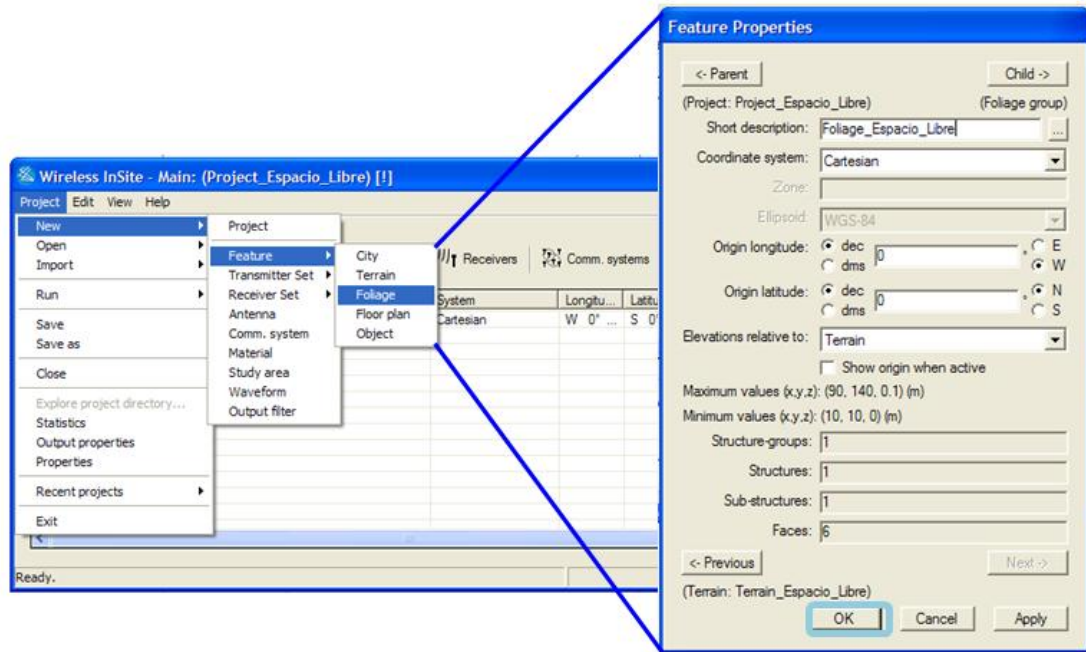


Figura A.4 Creación de Follaje sobre un terreno.

Además, en la Figura A.5 se puede observar el editor de follaje, en el que se especifican las propiedades como por ejemplo el material a usar, el cual fue hierba (*grass*) y las dimensiones, 130m de largo por 80m de ancho, aproximadamente semejantes a las de un campo de futbol como lo requería el proyecto.

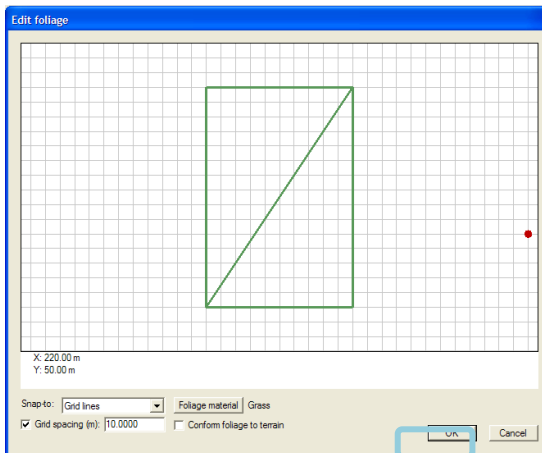


Figura A.5 Vista del editor de follaje.

A medida que se crean las diferentes características del escenario, en la ventana principal se generan los detalles de cada aspecto diseñado o especificado, en la Figura A.6 se puede observar que en la pestaña características (*Features*), se encuentran

detallados tanto el terreno como el follaje creado y en la pestaña materiales (*Materials*), los materiales con que fueron especificados.

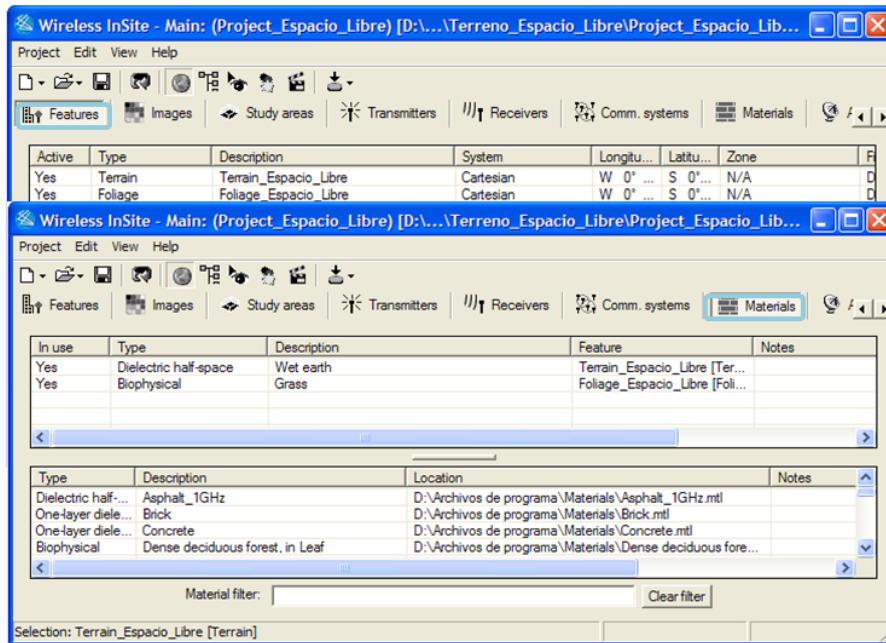


Figura A.6 Generación de detalles en la ventana principal

- a) En la Figura A.7 se puede observar levemente la superficie de la capa de follaje creado sobre el terreno de tierra mojada, para tener una mejor apreciación, se ubica el cursor en la pestaña vista (*view*) y se selecciona la opción cuerpo solido (*solid body*), de manera que se pueda visualizar mejor el espacio creado, en un color verde claro el terreno y en un verde más oscuro el follaje o hierba, como se aprecia en la parte derecha.

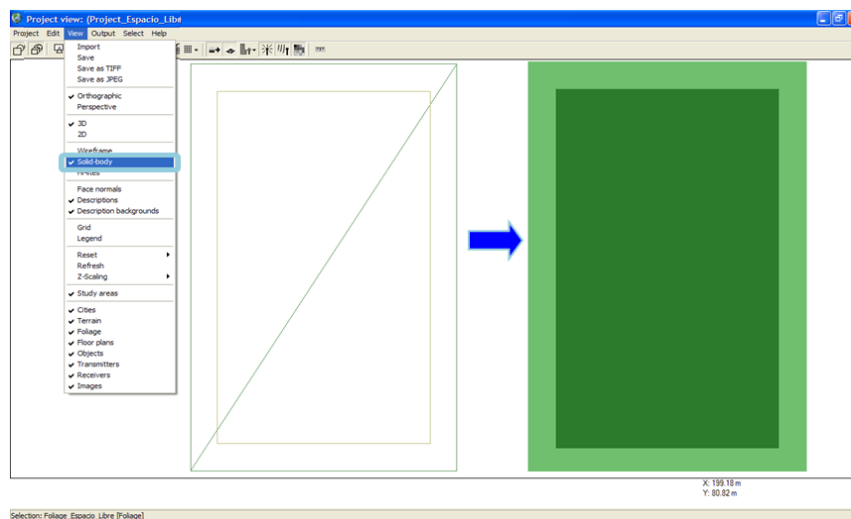


Figura A.7 Visualización del terreno con follaje.

- b) Para tener una visión más real del diseño, se puede seleccionar la opción de visualización en tres dimensiones o 3D, para ello, se ubica el cursor en la pestaña vista (*view*) y se selecciona la opción 3D como se nota en la Figura A.8.

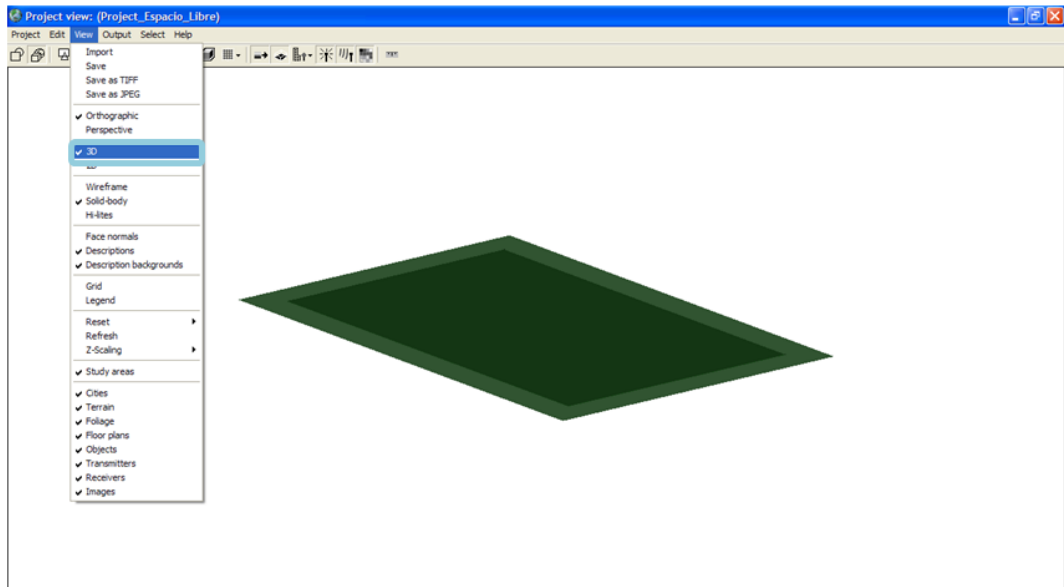


Figura A.8 Visualización en 3D del terreno con follaje.

4. Una vez creado el escenario, debe especificarse las propiedades de la forma de onda, antenas, receptores y transmisores; se inició indicando la forma de onda en la pestaña para ello se ubica el cursor en la pestaña Proyecto (*Project*), seleccionar Nuevo (*New*) y al dar clic en Forma de Onda (*Waveform*), se despliega una ventana llamada Crear nueva forma de onda (*Create new waveform*), en donde se configuro el tipo de onda de la señal como sinusoidal y luego en la ventana de propiedades de esta señal llamada (*Sinusoid properties*), se establecio la frecuencia de trabajo y el ancho de banda en Mhz y la fase, con los valores mostrados en la Figura A.9.

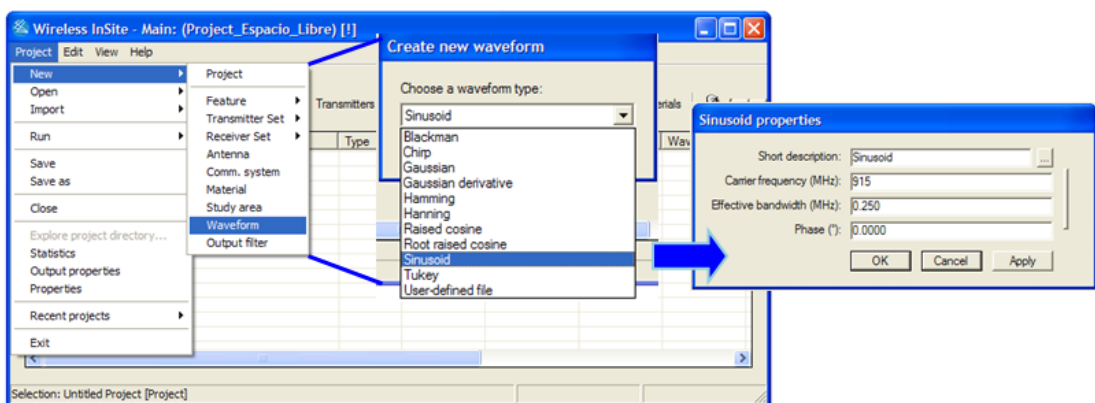


Figura A.9 Creación de la forma de onda.

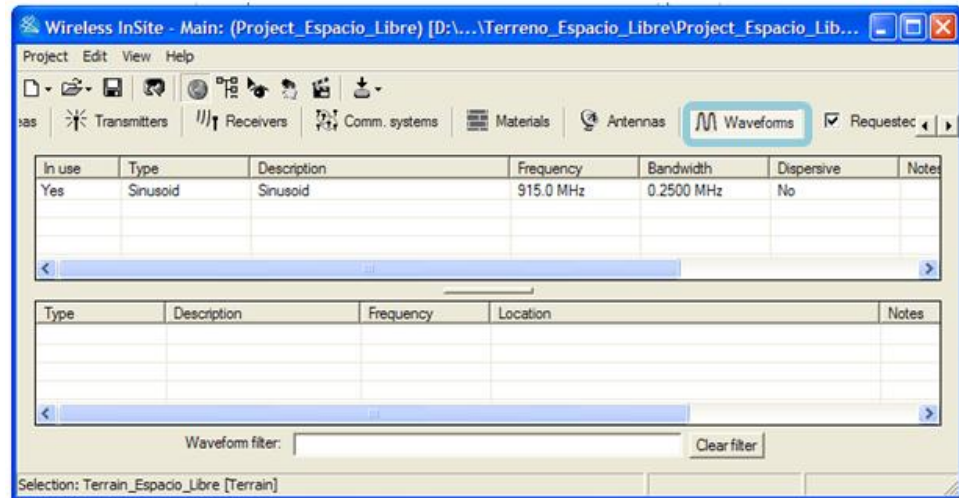


Figura A.10 Generación de detalles de la forma de onda en la ventana principal

5. Para ingresar las especificaciones de la antenas se ubica el cursor en la pestaña Proyecto (*Project*), seleccionar Nuevo (*New*) y al dar clic en Antena (*Antenna*), se despliega una ventana llamada Crear nueva antena (*Create new antenna*) donde se procedió a seleccionar el tipo de antena como dipolo lineal.

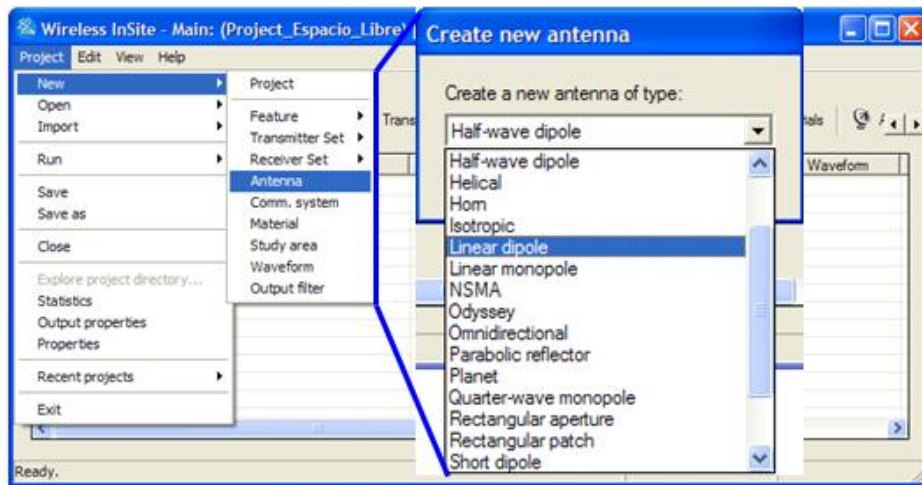


Figura A.11 Creación de una antena

En la Figura A.12 se observa la ventana de configuración de los parámetros de la antena, los que aparecen son los establecidos por defecto en el software pero pueden variarse, además, puede observarse la representación de los detalles de la antena generada, al seleccionar la pestaña antenas (*Antennas*) de la ventana principal.

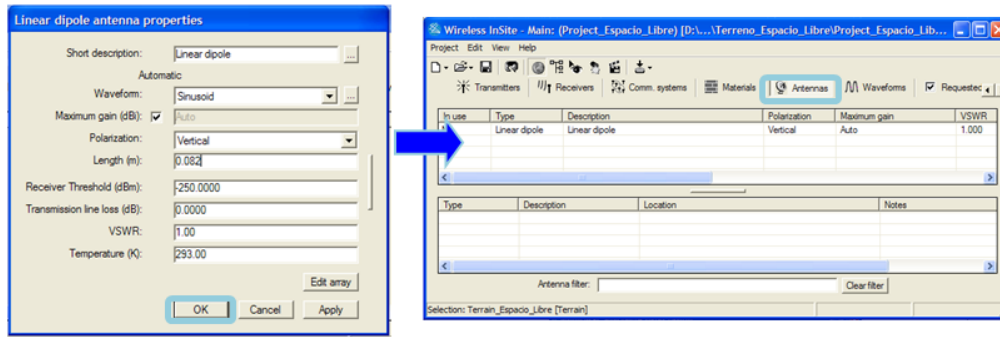


Figura A.12 Configuración de parámetros de la antena

- Posteriormente y de acuerdo a las recomendaciones en el manual de la herramienta, debe crearse primero los receptores, una de las formas es dar clic derecho sobre el terreno y se selecciona Nuevo (*New*), Conjunto Receptor (*Receiver Set*) y al dar clic en Ruta (*Route*), se despliega una ventana llamada propiedades del receptor (*Receiver properties*) representada en la Figura A.13 donde se seleccionó la antena, el distanciamiento entre receptores y la figura de ruido.

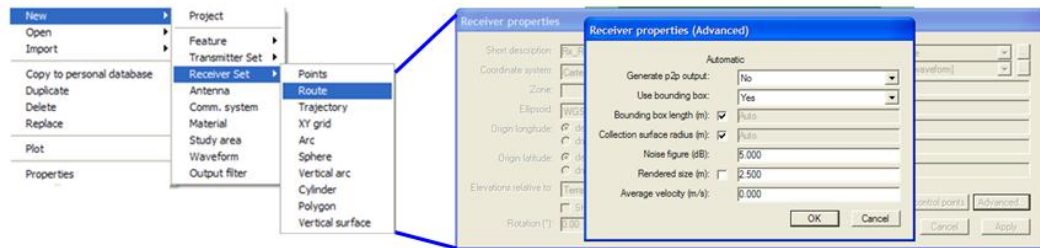


Figura A.13 Configuración de parámetros de los receptores.

En la Figura A.14, se observa la ruta de receptores trazada a lo largo del terreno, de acuerdo a las especificaciones de la configuración en la Figura A.13.

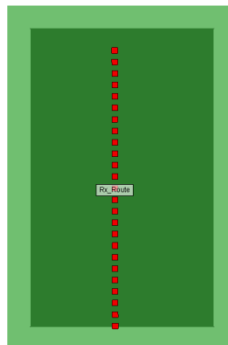


Figura A.14 Representación de la ruta de receptores.

- Luego, se procedió a crear el transmisor, dado que en exteriores solo se hizo uso de un transmisor, una de las formas es dar clic derecho sobre el terreno y se

selecciona Nuevo (*New*), Conjunto Transmisor (*Transmitter Set*) y al dar clic en Puntos (*Points*), se despliega una ventana llamada propiedades del transmisor (*Transmitter properties*) representada en la Figura A.15 donde se seleccionó la antena y se incluyó un valor de 0 dBm como potencia de entrada. A continuación en la Figura A.16 se observa el transmisor ubicado al frente y delante de la línea de receptores ubicados de norte a sur.

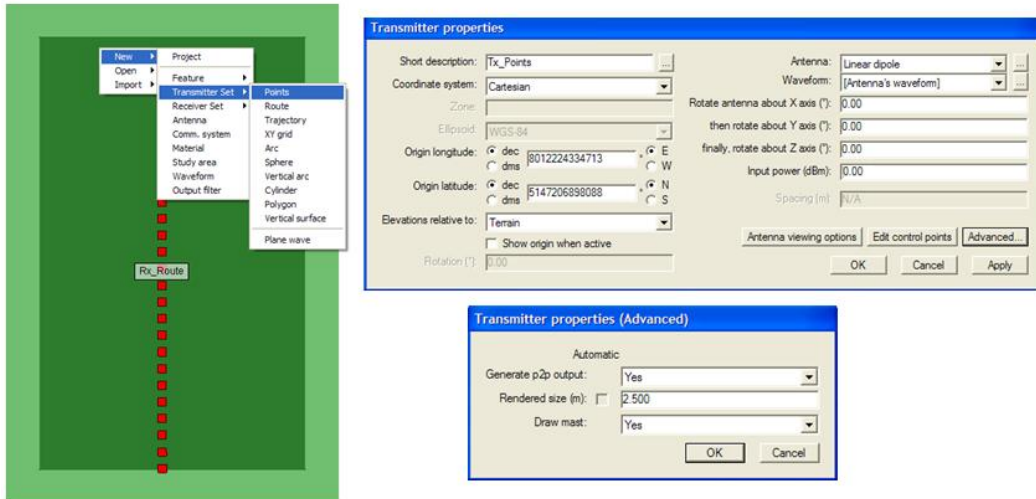


Figura A.15 Configuración de parámetros del transmisor

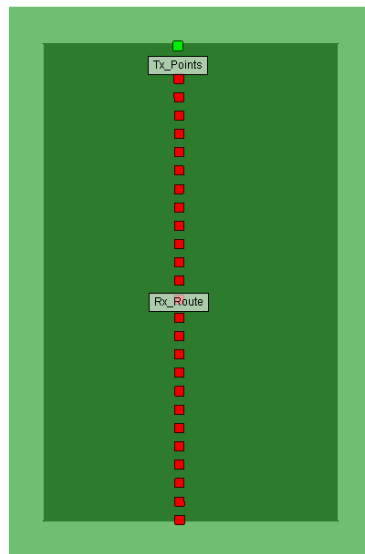


Figura A.16 Visualización de la ubicación del transmisor.

8. También se estableció un área de estudio en donde se llevó a cabo el análisis de la transmisión y recepción del sistema. Para ello, se selecciona Nuevo (*New*) y al dar clic en Área de estudio (*Study Area*), se despliega una ventana llamada creación del area de estudio donde se selecciona la opción especificación de ubicación y tamaño para crear respectivamente el área de estudio donde se

deseo, la cual se representa con un color amarillo, sobre el terreno, además también se abre una ventana llamada Propiedades del área de estudio (*Study area properties*) donde se escogió el modelo de propagación y el método de trazado de rayos, todo ello se observa en la Figura A.17 y la Figura A.18 respectivamente.

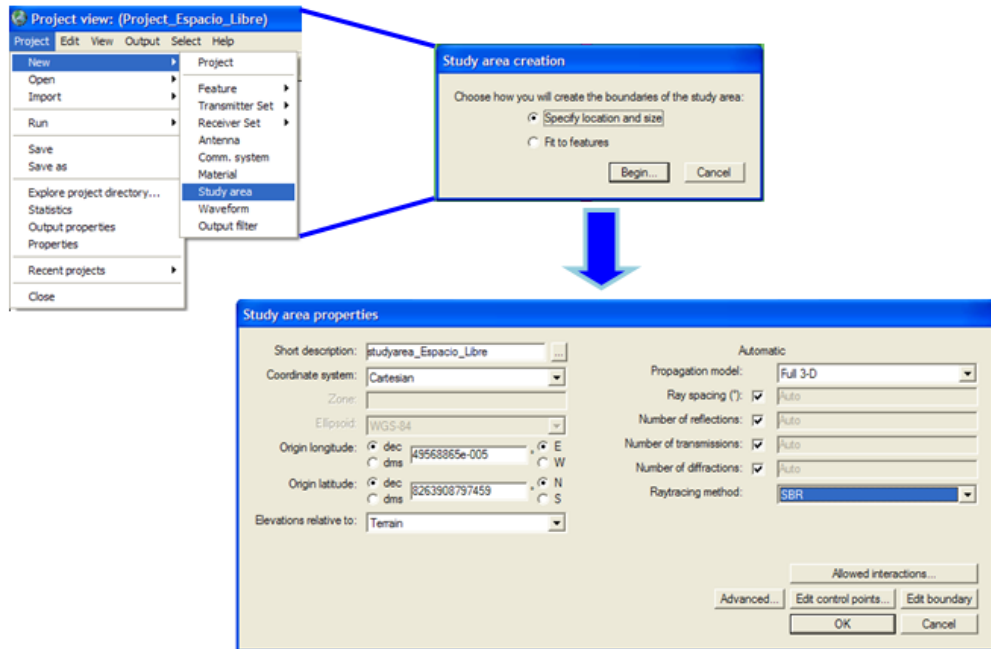


Figura A.17 Configuración de parámetros del área de estudio.

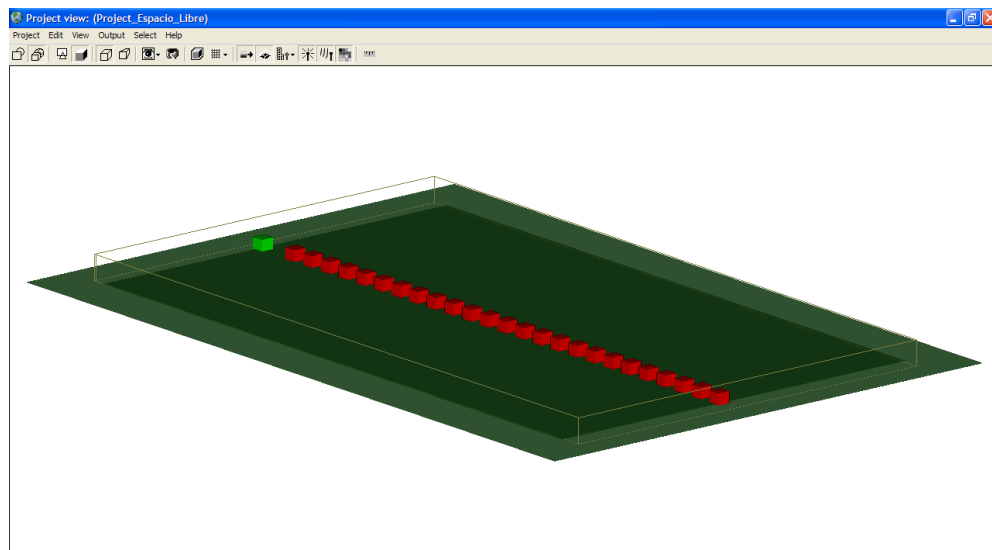


Figura A.18 Visualización de la ubicación el área de estudio.

9. Una vez se tenga listo el escenario, entonces se dispone a realizar la simulación, para ello se ubica el cursor en la pestaña Proyecto (*Project*), seleccionar Ejecutar (*Run*) y al dar clic en Nuevo (*New*), se despliega una ventana llamada Calculo de

registro (*Calculation log*), en la que se muestra los cálculos realizados por el software para un proyecto en particular.

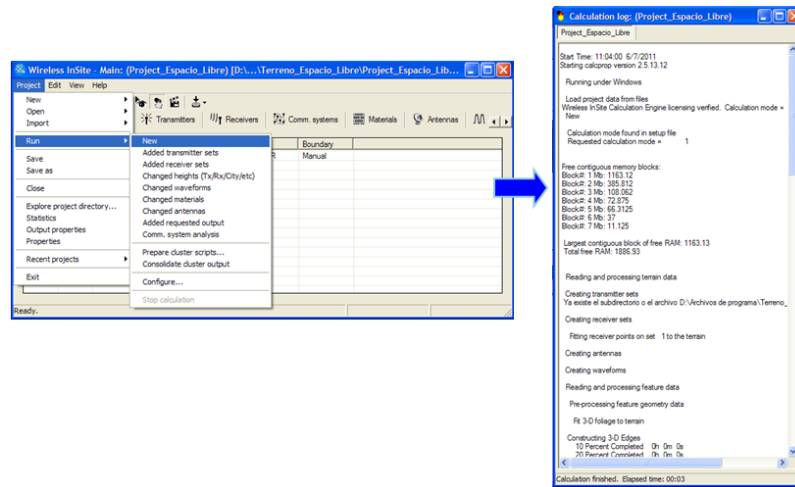


Figura A.19 Pasos para ejecutar la simulación.

- Respectivamente, para observar gráficamente los resultados, en la ventana principal (*Main Window*) se debe poner el cursor en la pestaña Vista (*View*) y al dar clic en Jerarquía de Proyecto (*Project Hierarchy*), se despliega una ventana llamada de igual manera que presenta varias opciones, como se observa en la Figura A.20.

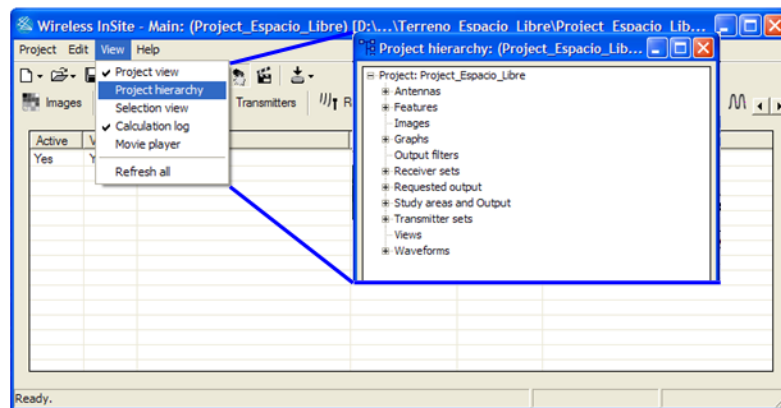


Figura A.20 Pasos para realizar la representación gráfica de los resultados.

- Para seleccionar la característica que se desea graficar, se despliega la opción Áreas de estudio y salidas (*Study areas and Output*) y se escoge la opción indicada, en este caso la de Potencia recibida (*Receiver power*) y al dar clic derecho sobre la opción Jerarquía de Proyecto (*Project Hierarchy*) se despliega una ventana llamada Elección de trazado (*Choose plot*), en este caso se eligió la opción Distancia (*Distance*) y luego en la ventana Eleccion de grafica (*Choose graph*), se selecciona la opción de dibujar en una nueva grafica (To a new graph), en donde se despliega una última ventana denominada propiedades de trazado

(*plot properties*), en la que se selecciona ok y finalmente se obtiene la representación gráfica.

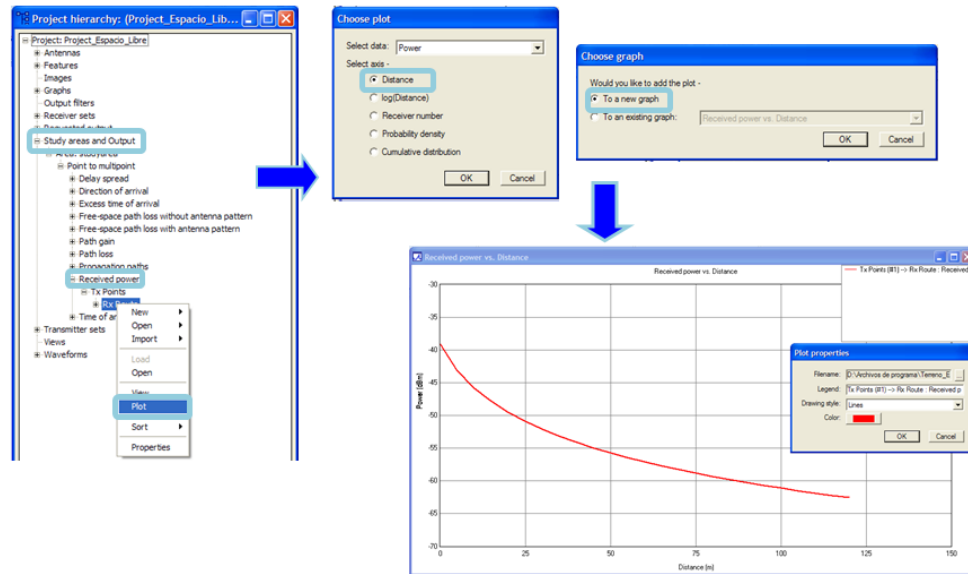


Figura A.21 Representación gráfica de los resultados.

- Para seleccionar la característica que permite realizar el trazado de rayos, se despliega la opción Áreas de estudio y salidas (*Study areas and Output*) y se escoge la opción Trayectos de propagación (*Propagacion paths*) y al dar clic en la opción Vista (*View*), automáticamente se observa el trazado de rayos como se ejemplifica en la Figura A.22.

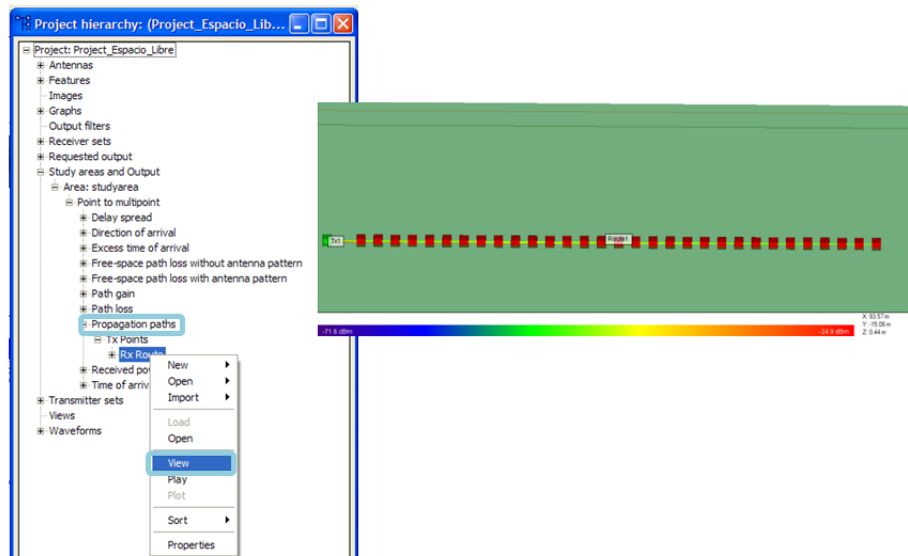


Figura A.22 Configuración del trazado de rayos.

A.2. Interiores

Para crear un escenario de interiores, se inicia generando un nuevo proyecto. El procedimiento requerido para ello es idéntico al explicado en la sección A.1 de este anexo.

A.2.1. Creación de un nuevo Proyecto

Ir a la ventana principal (*Main Window*) y dar clic en la pestaña Proyecto (*Project*), a continuación, clic en Nuevo (*New*) y de aquí en Proyecto (*Project*), entonces aparecerá la ventana Propiedades del Proyecto (*Project Properties*) que permite especificar el nombre del proyecto que en este caso es *Project_Interiores* como se indica en la Figura A.23.

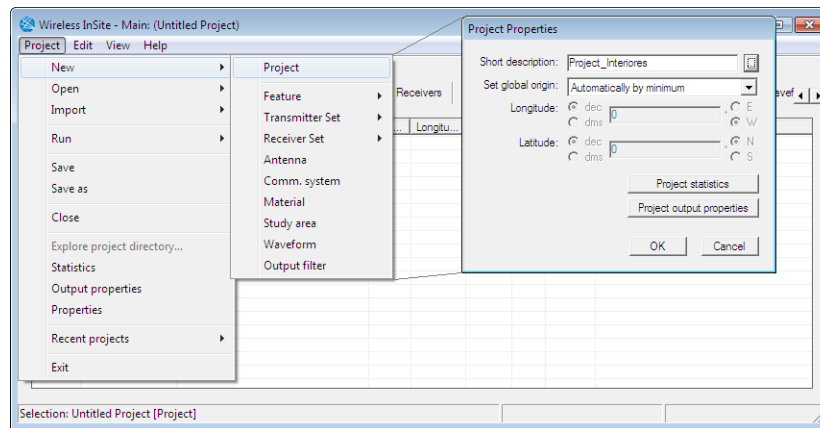


Figura A.23 Creación de un nuevo proyecto.

A.2.2. Creación de un plano de Planta

Para la predicción de propagación en Interiores, Wireless Insite dispone de un editor de Plano de Planta para generar la geometría del entorno. Adicional a esto, existe otra opción para generar planos de interiores complejos la cual consiste en generar archivos en tres dimensiones 3D desde un software de diseño asistido por computadora (CAD, *Computer-Aided Design*) como Autocad, que serán importados en Wireless Insite.

Debido a la ausencia de un archivo CAD en 3D adecuado, se utilizó el editor de la herramienta para crear el Plano de Planta (*Floor Plan*). El editor de Plano de Planta de *Wireless InSite* puede crear un entorno interior con paredes, ventanas, puertas, un piso y un techo. Este editor también puede ser utilizado para editar un plano de planta existente. Los archivos de Plano de Planta son creados como una característica separada y se guardan en un archivo separado cuya extensión es .flp.

Para agregar un Plano de Planta, dar clic en la pestaña Proyecto (*Project*), seleccionar Nuevo (*New*), seleccionar Característica (*Feature*) y a continuación seleccionar Plano de Planta (*Floor plan*), de aquí aparecerá una ventana llamada Altura del Plano de planta (*Floor plan height*) donde se establece la elevación de la planta y el techo, como se observa en la Figura A.24. Después de que se ingresan las Alturas indicadas, el editor de Plano de planta mostrado en la Figura A.25 se inicia automáticamente.

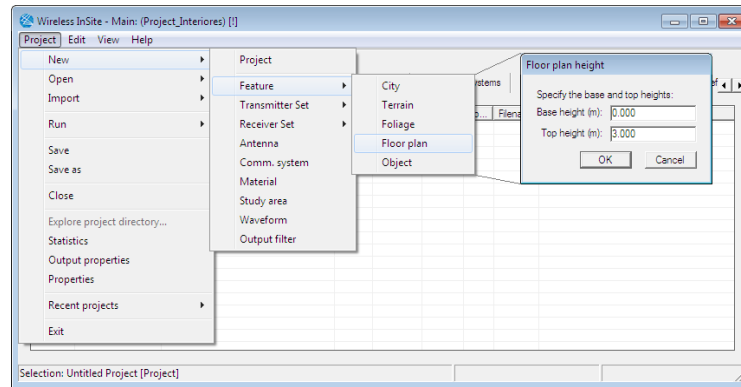


Figura A.24 Creación de un nuevo Plano de Planta.

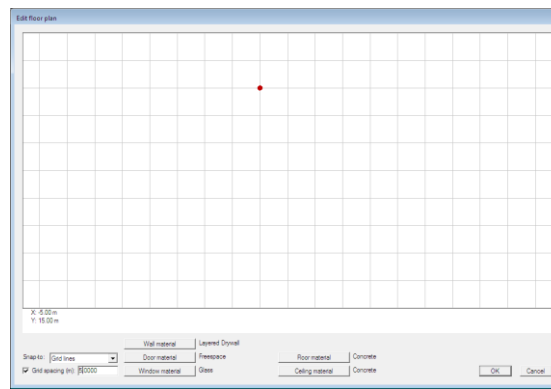


Figura A.25 Editor de Plano de Planta

A continuación se inicia la construcción del entorno definido para interiores a partir del archivo CAD en dos dimensiones 2D, proporcionado por el Área de Edificios de la Universidad del Cauca. Primero se dibujan las paredes de la planta definida. Para construir una pared se hace clic derecho sobre el área de dibujo y después nueva Pared (New Wall), este paso se repite hasta obtener el croquis o un polígono del escenario, como se observa en la Figura A.26.

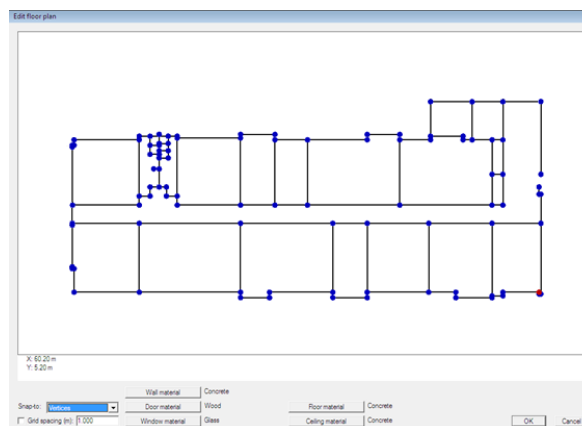


Figura A.26 Paredes del Escenario de Interiores.

En segundo lugar se crean las puertas existentes sobre las paredes previamente creadas, de acuerdo a las propiedades de altura, ancho, materiales y el dintel¹⁹. Para crear una puerta se hace clic derecho sobre el área de dibujo y después nueva Puerta (*New Doorway*), este proceso se repite hasta obtener todas las puertas existentes en el escenario. En la Figura A.27, se observa cómo crear una puerta sobre la estructura ya construida.

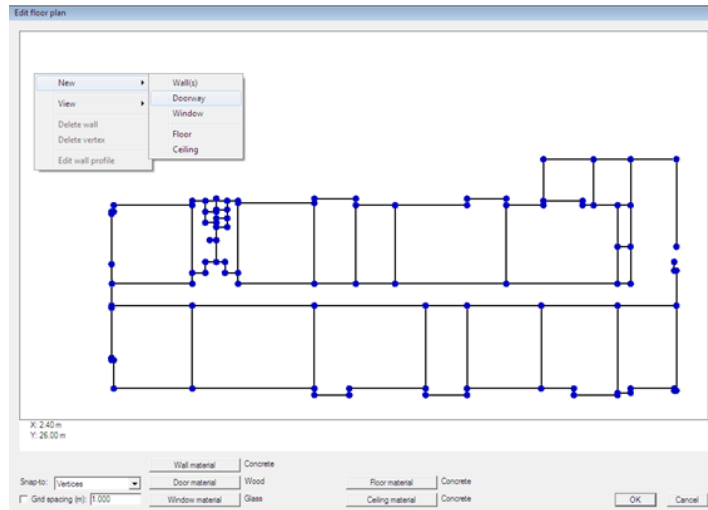


Figura A.27 Creación de una puerta.

Una puerta tiene propiedades como el ancho, la altura, el tipo de material y una corta descripción para identificarla y que son configurables mediante los cuadros de dialogo que se presentan en la Figura A.28. Cuando se establece el ancho de la puerta, se coloca el cursor sobre la pared donde se ubicará dicha puerta y a continuación aparecerá la ventana de edición del perfil de la pared donde se puede definir la altura de la puerta y el material.

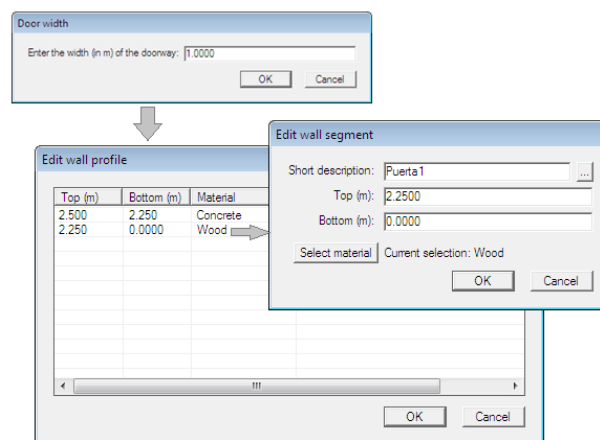


Figura A.28 Propiedades de una puerta.

¹⁹ Dintel: Parte superior de la puertas y ventanas

El paso siguiente es crear las ventanas existentes en el escenario, estas ventanas representan segmentos de las paredes creadas. Entre las propiedades disponibles están el ancho, la altura, los materiales y el área de pared por encima y por debajo de la ventana. Para crear una ventana se da clic derecho sobre el área de dibujo y luego nueva Ventana (New Window), esto se repetirá hasta colocar todas las ventanas existentes en el escenario y la configuración de sus propiedades se realiza como lo indica la Figura A.29. (Igual que la configuración de las propiedades de las puertas).

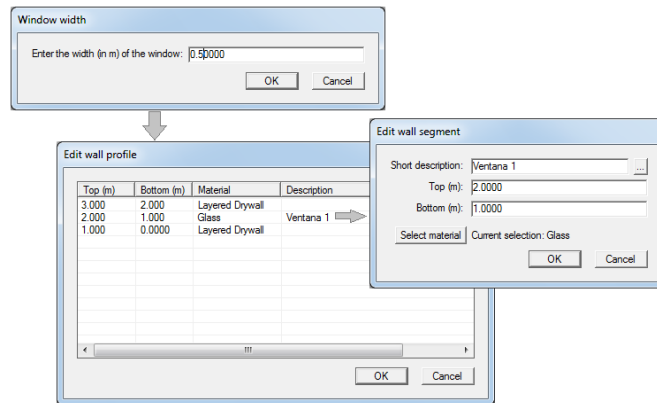


Figura A.29 Propiedades de una ventana.

El paso final es añadir el piso y el techo. Para agregar el piso se hace clic derecho sobre el área de dibujo y se escoge nuevo Piso (New Floor). A continuación se da clic sobre los vértices que definen el polígono del escenario y se define el piso. Para crear el techo se hace clic sobre el área de dibujo y luego clic en nuevo Techo (New Ceiling), a continuación se pasa el cursor por los vértices que definen el polígono de la planta.

Una vez se tiene el esquema del escenario con todas las características incluidas se da clic en el botón OK y finalmente se obtiene el plano de la Planta del escenario definido en la ventana de Vista del Proyecto con la estructura del techo invisible, en 2 dimensiones en la Figura A.30 y tridimensional en la Figura A.31, acompañado de la leyenda donde se especifican los materiales de cada estructura presente en el escenario.

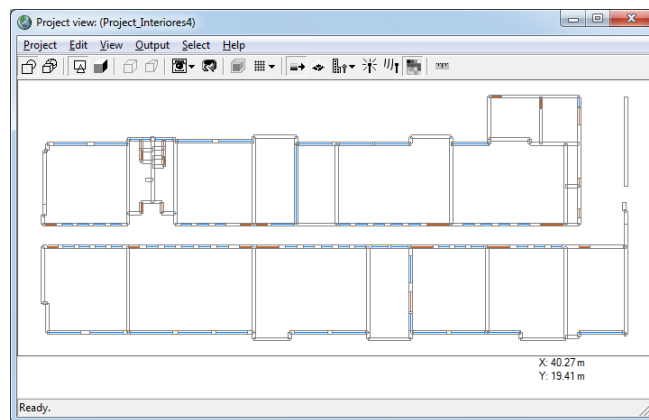


Figura A.30 Plano de la planta en 2D del escenario de interiores.

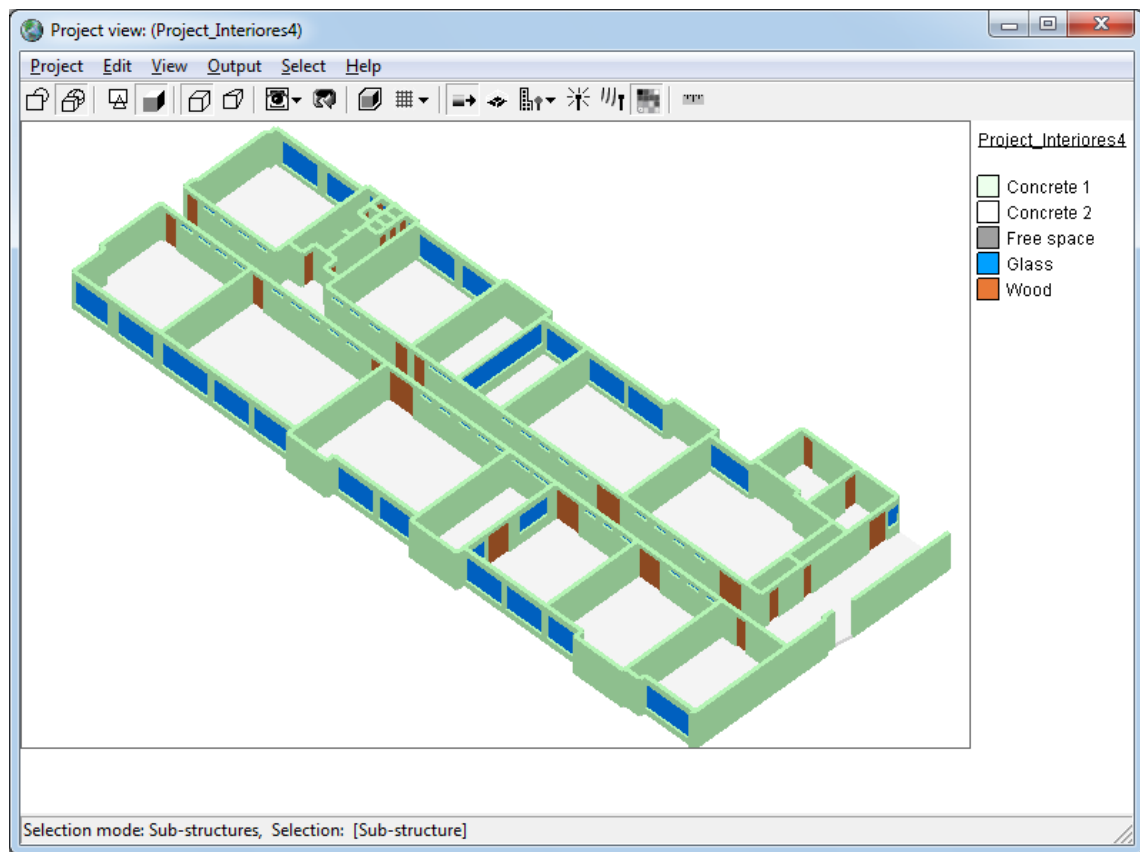


Figura A.31 Plano de la planta en 3D del escenario de interiores.

Para visualizar el tipo de material actual de cada estructura en el Project view, se selecciona la característica Leyenda *Legend* de la pestaña View. También es posible cambiar el tipo y color de material de las partes del plano (paredes, ventanas, puertas, piso y techo), seleccionando la estructura que se desea cambiar, a continuación clic derecho y Cambiar material. Para cambiar el color, se ubica el cursor en la leyenda y se da clic en el material a cambiar, luego en el botón de color y se escoge el color deseado.

A.2.3. Creación de la Forma de Onda y la Antena

Como se indicó en la sección de Espacio Libre, después de crear el escenario es necesario definir la forma de onda y las antenas, y crear los receptores y transmisores del sistema. Primero se crea una Forma de Onda, sinusoidal de 900 MHz. Como se muestra en la figura A.9, se lleva el cursor a la pestaña Proyecto (*Project*), se selecciona Nuevo (*New*) y luego en Forma de Onda (*Waveform*). En la ventana Crear nueva forma de onda (*Create new waveform*) se selecciona el tipo de onda sinusoidal y en la ventana de propiedades (*Sinoid properties*), se ingresan los valores de 915 MHz en la casilla de frecuencia de trabajo y 0.5 MHz en la casilla de ancho de banda. Este procedimiento se ilustra en la Figura A.32.

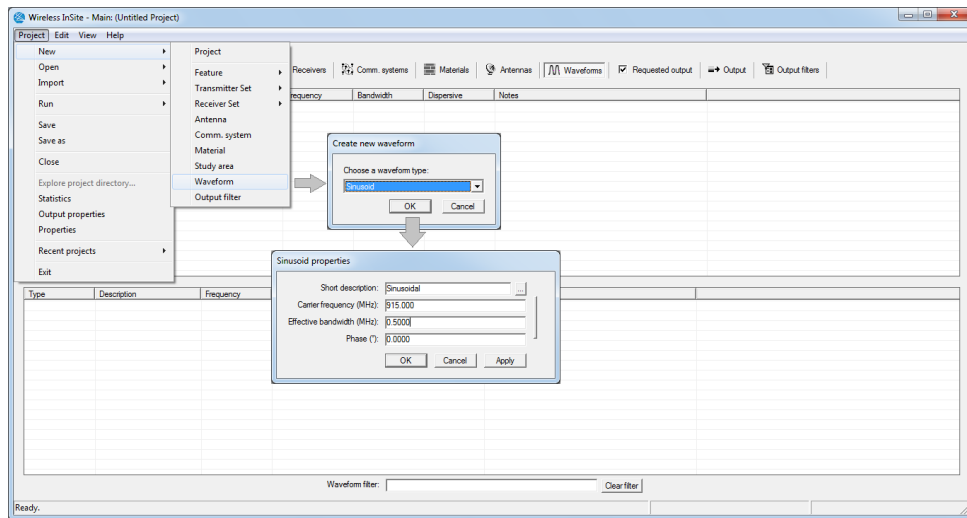


Figura A.32 Creación de una Forma de Onda sinusoidal de 900 MHz.

Ahora que ya se tiene una forma de onda en el proyecto, se crea la Antena. La antena escogida es un Monopolo Lineal Polarizado verticalmente, para obtener una aproximación mayor a la antena contenida en el SDK, de acuerdo a las características de la Tabla 3.12. La describe el proceso para crear una antena, en ella también se puede observar, que es posible mostrar el patrón de radiación de la antena creada dando clic en la barra ubicada a la derecha de la ventana de propiedades de la antena.

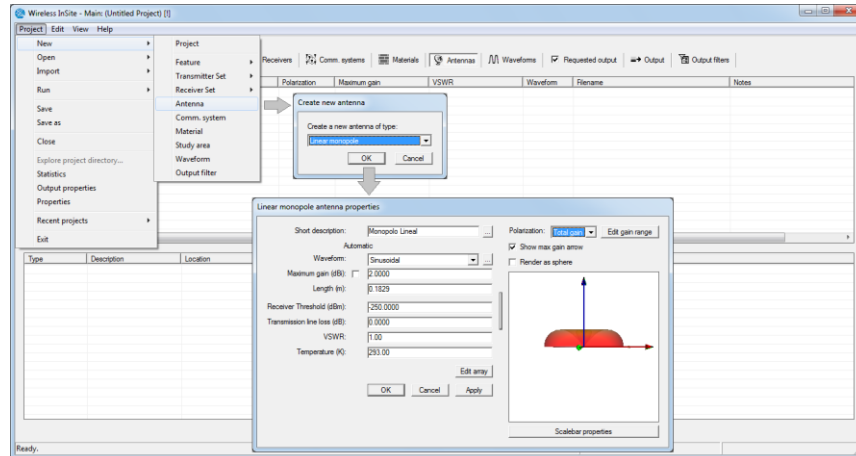


Figura A.33 Creación de una antena y ventana de propiedades.

A.2.4. Creación del punto transmisor y la ruta de recepción

El paso a seguir es la creación del punto de transmisión y la ruta de recepción.

Para crear el transmisor se da clic en la pestaña Proyecto (*Project*), se selecciona Nuevo (*New*), luego en Conjunto de Transmisor (*Transmitter Set*) y a continuación en Puntos (*Points*). Después de esto aparecerá la ventana de mensaje, que indica que debe darse clic en el punto sobre el corredor principal donde se desea ubicar el transmisor en la vista

del proyecto (*Project view*) y para terminar clic derecho. Posteriormente aparecerá la ventana de propiedades del transmisor donde se pueden asignar la antena y su respectiva forma de onda, la potencia de entrada en dBm, la posición, la altura entre otros. La Figura A.34 ilustra la creación de un punto de transmisión y la Figura A.35 muestra la ventana de propiedades de un transmisor Punto, junto con la ventana de propiedades avanzadas donde se configura el tamaño del punto transmisor y la vista del mástil, asimismo se observa la ventana de vista de la antena que permite mostrar el patrón de radiación de la antena y la ventana de edición y vista de vértices, donde se establece la posición y altura del punto.

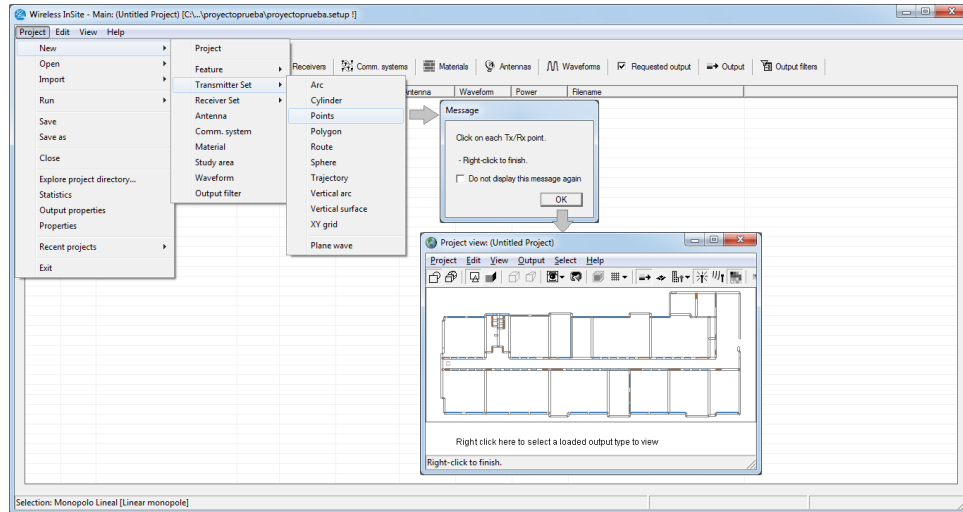


Figura A.34 Creación del punto de transmisión

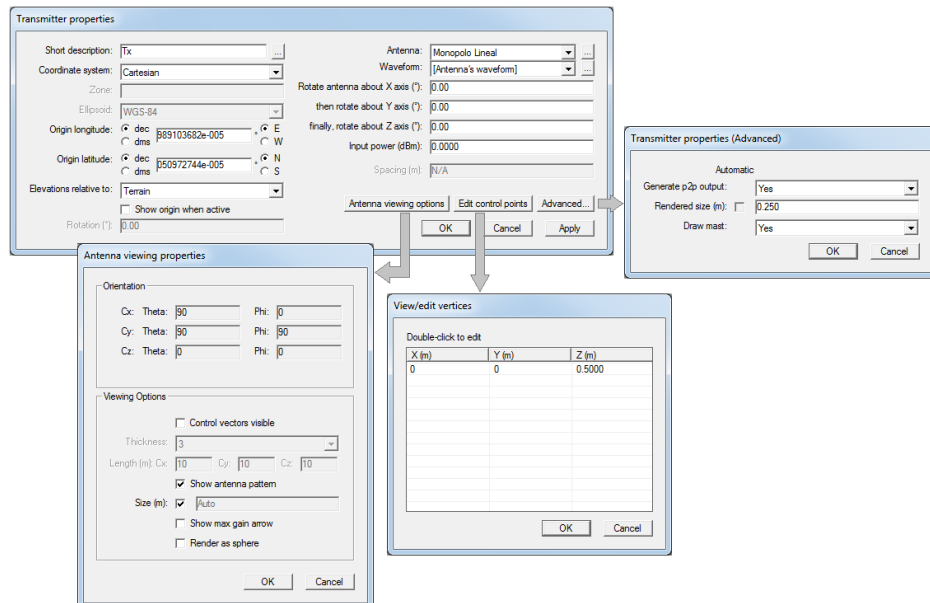


Figura A.35 Ventana de propiedades de un transmisor Punto y ventanas de propiedades avanzadas, de antena y vértices.

A continuación se crea la ruta de recepción. Llevar el cursor a la pestaña Proyecto (Project), Nuevo (New), luego en Conjunto receptor (Receiver Set) y a continuación en Ruta (Route). Después de esto aparecerá la ventana de mensaje, que indica que debe darse clic sobre el escenario en el punto de inicio de la ruta y nuevamente clic para definir los puntos de recepción a lo largo de la ruta y para terminar clic derecho. En la Figura A.36 se observa la creación de la ruta de recepción y la Figura A.37 contiene la ventana de propiedades un receptor Ruta, la ventana de propiedades avanzadas y vista y edición de vértices de la ruta. En la ventana de propiedades se encuentra el campo de espaciamiento que indica la distancia de separación en metros entre los puntos adyacentes de la ruta. Para observar las variaciones debidas al multitrayecto es recomendable utilizar entre 5 y 10 receptores por cada longitud de onda de la señal. Dado que el tiempo de computo incrementa con el número de receptores y de transmisores, se escogen 5 receptores por cada λ , de la ecuación 4.1 se calcula una $\lambda = 0.33$ mt, entonces se tiene que el espaciamiento debe ser igual a $0,0656$ mt y así la ruta de recepción estará conformada por 763 puntos.

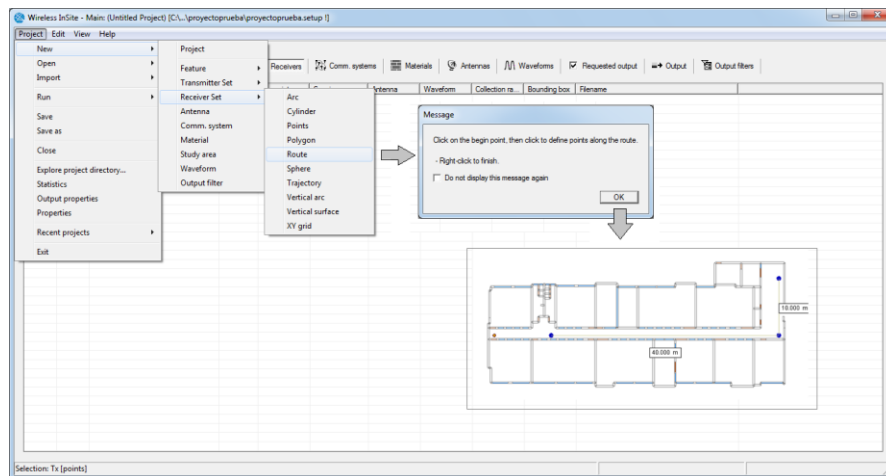


Figura A.36 Creación de la ruta de recepción.

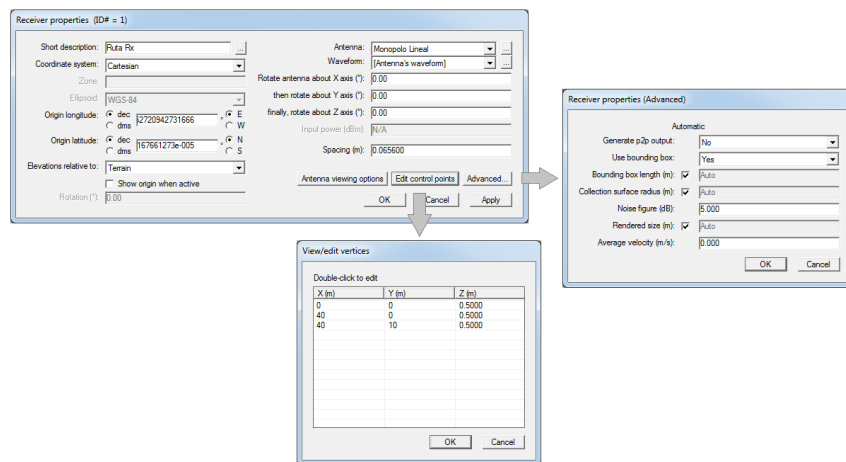


Figura A.37 Ventana de propiedades un receptor Ruta

En la Figura A.39 se observa la ubicación del punto transmisor y la ruta de recepción a lo largo del pasillo del escenario de interiores.

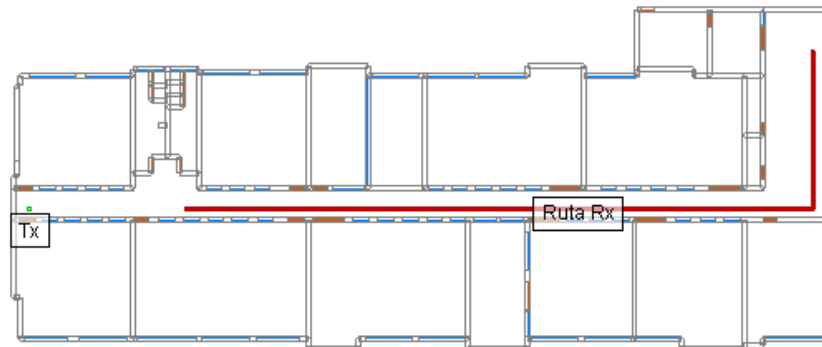


Figura A.38 Ubicación del punto transmisor y la ruta de recepción en el escenario de interiores.

Para llevar a cabo la comparación de potencia recibida estimada en Wireless Insite y mediante las pruebas de campo realizadas se creó otra ruta con la misma posición y altura de los puntos pero que define un espaciamiento menor entre los puntos de recepción, igual al incremento constante definido para las pruebas del sistema de 5 metros. Esta ruta y los puntos que la conforman se observan en la Figura A.39.

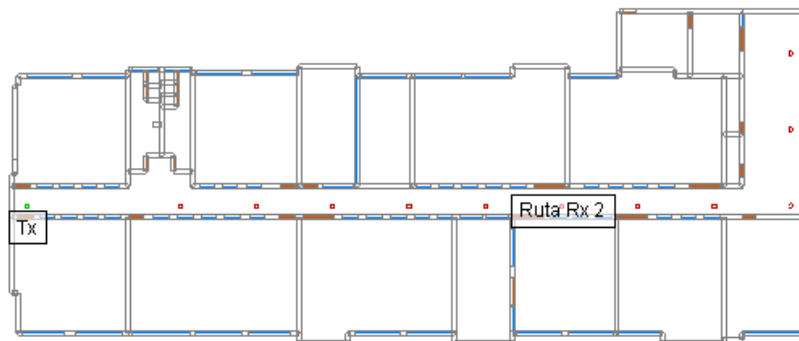


Figura A.39 Punto transmisor y ruta de recepción conformada por 11 puntos.

A.2.5. Defición del área de estudio

Una vez han sido ubicados el transmisor y la ruta de recepción se debe definir el área de estudio que encierre todo el escenario. Llevar el cursor a la pestaña Proyecto (Project), Nuevo (New), y luego clic en área de estudio (Study area), a continuación aparece una ventana donde se puede seleccionar el tipo de área de estudio, ajustada automáticamente o especificando la ubicación y el tamaño. Para incluir todas las características del escenario se escoge el tipo automático, ajustada a las características (*Fit to features*). Luego se muestra la ventana de propiedades del área de estudio definida, como se observa en la Figura A.40, esta ventana contiene muchos parámetros importantes, como el modelo de propagación, el número de cada interacción, reflexiones, transmisiones y difracciones, la técnica de trazado de rayos utilizada y las ventanas de propiedades avanzadas, vista y edición de vértices, edición de límites, entre otros. Si se desea ampliar el tamaño del área de estudio se da clic en el botón edición de límites, que presenta una

ventana de edición que permite modificar los límites de dicha área, esta ventana se muestra en la Figura A.41.

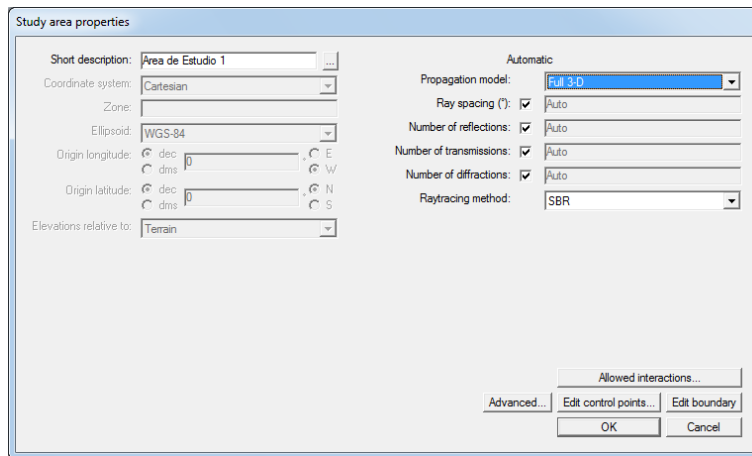


Figura A.40 Ventana de propiedades del área de estudio.

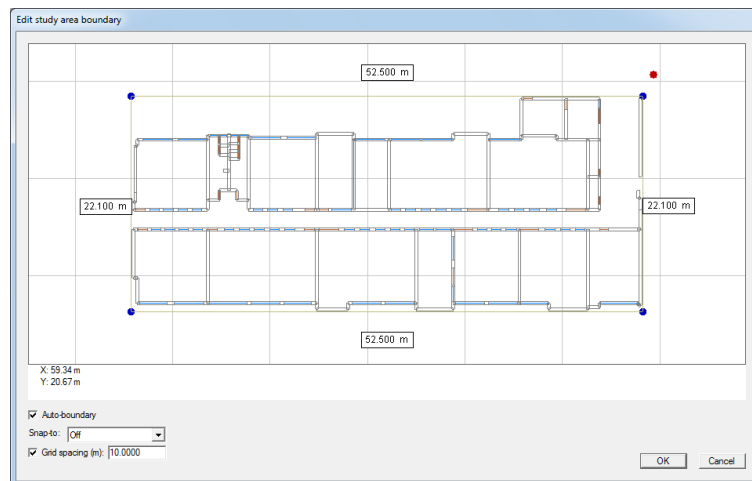


Figura A.41 Ventana de edición de límites del área de estudio.

A.2.6. Selección de Salidas (Outputs)

A continuación antes de empezar la simulación si se quiere se seleccionan las salidas deseadas, de lo contrario los resultados de la simulación tendrán solamente las salidas por defecto. Esto se realiza llevando el cursor a la etiqueta Salidas Requeridas (*Requested Output*), en donde se encuentran todas las salidas disponibles, después de seleccionar las salidas deseadas se puede dar inicio a la simulación.

A.2.7. Ejecución de la Simulación

El siguiente paso es ejecutar los cálculos, se da clic en la pestaña Proyecto (Project), se selecciona ejecución (*Run*) y luego nuevo (*New*), rápidamente aparecerá la ventana de cálculo que es la ventana donde se guarda toda la información generada mientras se

realiza la simulación, incluyendo la fecha y hora de inicio y finalización. La Figura A.42 ilustra los pasos de una nueva ejecución.

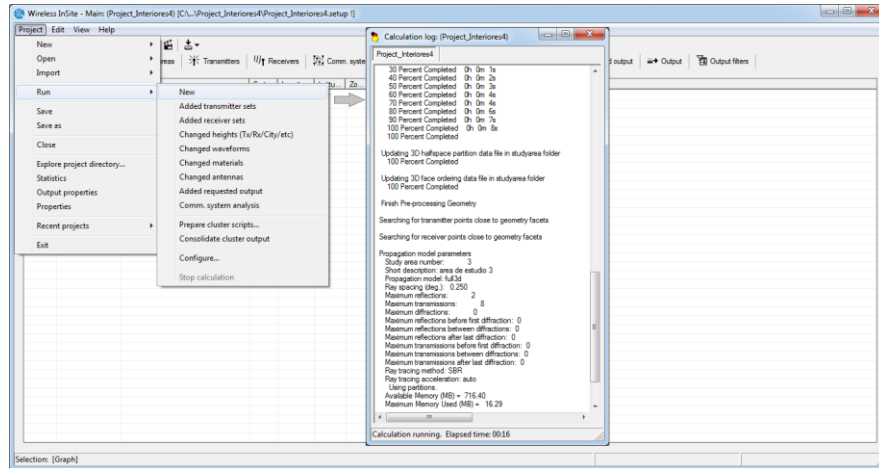


Figura A.42 Ejecución de la simulación en el escenario de interiores.

A.2.8. Visualización y grafica de resultados

Una vez finalizados los cálculos se puede acceder a los resultados seleccionados para la salidas, se da clic en la etiqueta Salidas (Output), luego en el área de estudio activa y se selecciona Punto a Multipunto, entonces se listan todos los parámetros escogidos y posteriormente se grafican los resultados obtenidos como se indica en la Figura A.43. También se pueden visualizar lo trayectos de propagación, las perdidas, la potencia recibida en el plano del escenario, haciendo clic derecho en la ruta de recepción y luego seleccionando ver (view) como se ilustra en la Figura A.44. Así mismo se pueden visualizar los trayectos de mayor potencia como se muestra en la Figura A.45, y manejar la ventana de vista de proyecto para ver el escenario y las salidas de una perspectiva más cercana tal como se observa la Figura A.46.

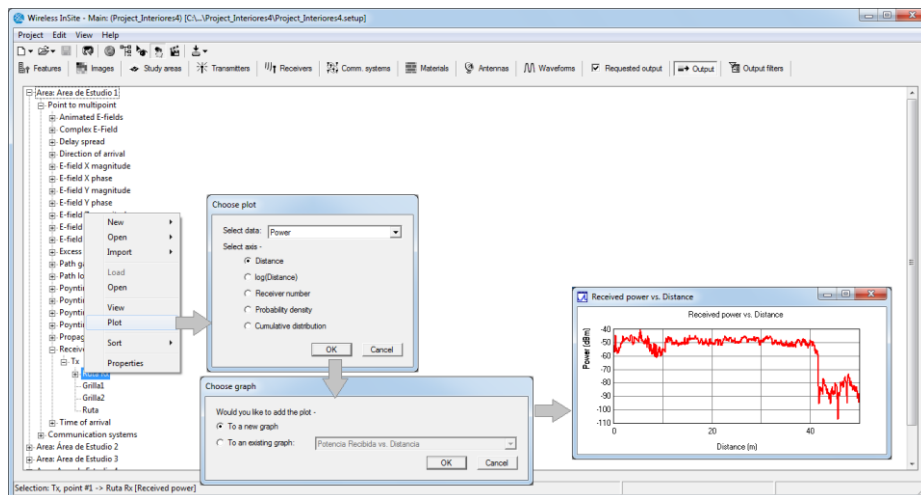


Figura A.43 Pasos para graficar de resultados.

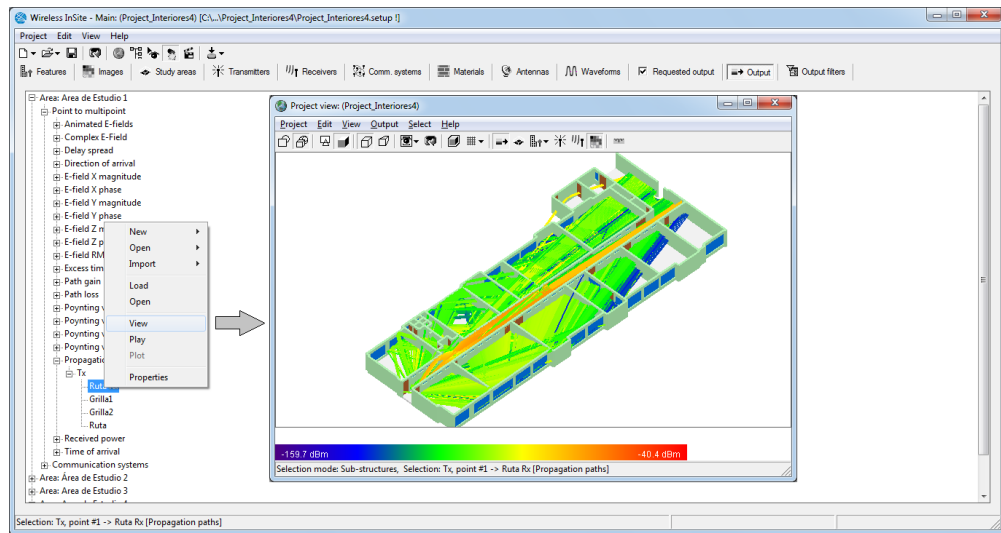


Figura A.44 Vista de trayectos de propagación

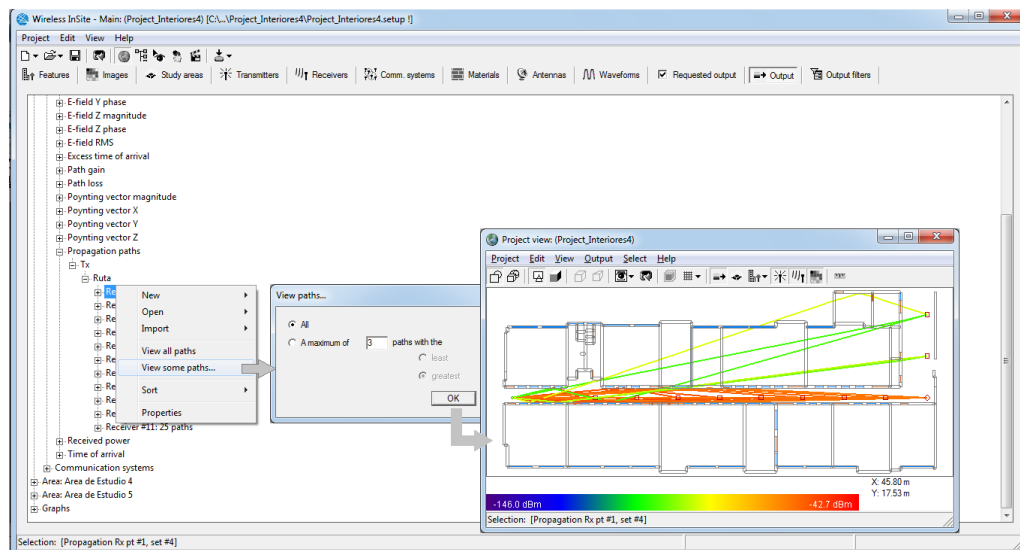


Figura A.45 Visualización de los 3 rayos con la potencia más alta para cada punto de la ruta.

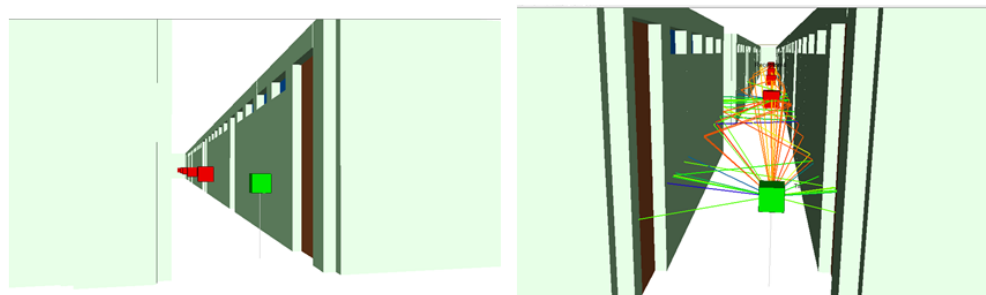


Figura A.46 Vista en perspectiva del escenario de interiores con los trayectos de propagación.

A.2.9. Abrir y guardar resultados en archivos de textos

También se pueden guardar los resultados de una determinada salida en archivos de texto, primero se da clic en la salida deseada, luego clic derecho en la ruta y luego seleccionar Abrir (Open). A continuación como se observa en la Figura A.47 , se abre un archivo de texto que contiene todos los parámetros asociados a la salida, este archivo tiene una extensión propia de la herramienta por lo que es adecuado guardarlo con extensión .txt para conservar los datos. Clic en guardar como (Save to as), en la ventana de dialogo, cambiar el nombre y a continuación guardar (Save).

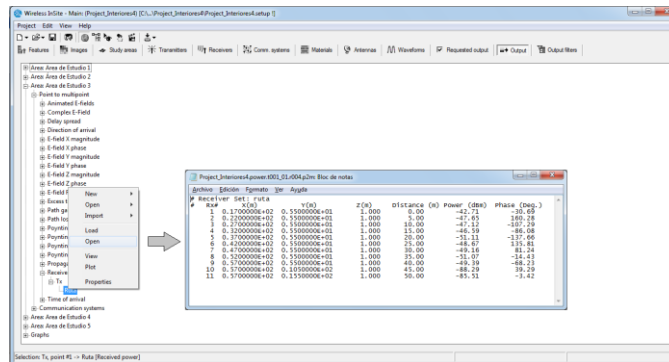


Figura A.47 Archivo de resultados.

A.2.10 Reproductor de Video

Se puede realizar un video de la propagación de la señal a través del escenario mediante el reproductor incluido en la herramienta. Llevar el cursor a la salida trayectos de propagación (Propagation paths), clic derecho y luego seleccionar Play, aparecerá la ventana del reproductor de video donde se selecciona el transmisor, la ruta de recepción y el área de estudio para reproducir el video y grabarlo si se desea. En la Figura A.48 se muestra la ventana del reproductor de video donde se puede ver y grabar un video de la propagación a lo largo del escenario mediante el botón Write MPEG file.

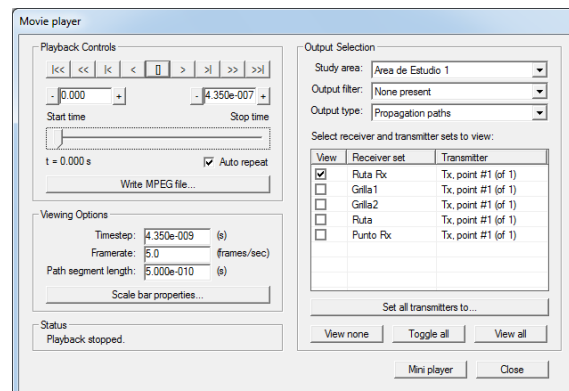


Figura A.48 Ventana de reproducción de video.

SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES BASADO EN FHSS

Para evaluar y analizar los resultados de desempeño del sistema implementado mediante el SDK AC4790 en los dos escenarios considerados: exteriores e interiores, se llevó a cabo la simulación de un sistema de comunicación basado en FHSS que sirve de modelo teórico para realizar una comparación de desempeño en términos de la tasa de error de bit (BER).

Este anexo presenta la descripción de la simulación del sistema de comunicaciones basado en FHSS mediante la herramienta Simulink® de *Matlab*. Esta herramienta permite modelar, simular y analizar sistemas de comunicación de datos. Ofrece una amplia gama de librerías de módulos para diseñar, simular, implementar y probar un sistema determinado que incluye módulos de comunicaciones, control, procesamiento de señales entre otros. Debido a que el objetivo principal del presente trabajo de grado es la evaluación y análisis del desempeño de un sistema de comunicación de datos via radio, Simulink® ofrece el bloque de Cálculo de la Tasa de Error (*Error Rate Calculation*) que permite calcular la tasa de error de bit (BER) y con ella medir el desempeño de todo el sistema de comunicaciones: transmisor, receptor y el medio de comunicación.

B.1. Requerimientos del Sistema

Los módulos radio empleados para la implementación del sistema, utilizan la técnica de transmisión FHSS en la banda de 915 MHz. El sistema salta en 26 frecuencias diferentes de acuerdo a la configuración 0 o de banda baja (902-915 MHz) establecida en los módulos, con un ancho de banda de 13 MHz y utiliza una velocidad de transmisión de datos RF igual a 76.8 kbps.

El sistema FHSS que se implementará en la simulación se basa en el diagrama de bloques de un sistema básico FHSS que se muestra en la Figura B.1.

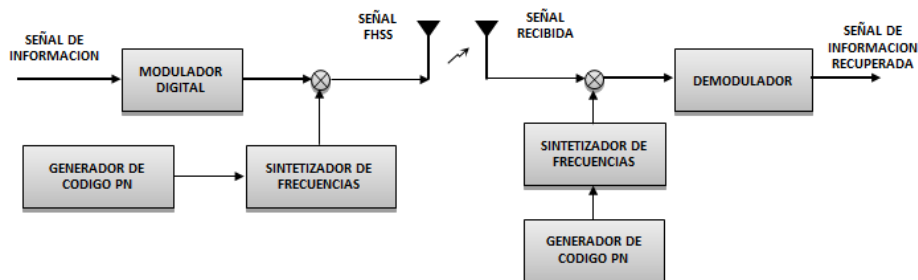


Figura B.1 Diagrama de bloques de un sistema FHSS

El transmisor contiene un modulador de banda base, seguido por un sintetizador de frecuencia que es alimentado por un generador de código de pseudo ruido PN, para generar la secuencia de salto. Después de modular la información inicial en FSK, la señal modulada llega a un mezclador, donde es trasladada a la frecuencia de transmisión, que ha sido generada por el sintetizador de frecuencia que está controlado por el generador de código PN [1].

A continuación la señal FHSS se acopla al medio de propagación mediante una antena que sirve como radiador como se indica en la Figura B.1. En el canal de comunicación o medio de transmisión se introduce retardo e interferencia constructiva o destructiva de las diferentes componentes del multitrayecto, que pueden afectar la integridad de la señal original y por tanto el desempeño del sistema.

Una vez la antena en recepción capta la señal proveniente del canal, el receptor FHSS en sincronización con el transmisor realiza el proceso inverso, mediante un demodulador FSK y un sintetizador que es manejado por la misma secuencia PN que le fue aplicada a la información al ser transmitida, para demodular la señal resultante y de esta forma obtener la información original.

La simulación del sistema FHSS se implementó a partir del Demo de salto en frecuencia de un enlace de datos inalámbrico Bluetooth® incluido en la ayuda de *MATLAB*.

B.2. Módulos del Sistema FHSS

A continuación se realiza una corta descripción de los módulos que hacen parte del sistema basado en FHSS implementado en la simulación.

Cabe aclarar que el entorno de simulación impone algunas limitaciones al grado de precisión con el que se puede representar la señal, en la simulación solo se realiza procesamiento de señales en banda base, por tanto la señal de alta frecuencia llamada portadora, no puede utilizar los valores de frecuencia reales, ya que ello exige mayores requerimientos hardware y mayor tiempo de simulación.

B.2.1. Generador del Salto en Frecuencia

El módulo Out 1 presentado en la Figura B.2, se encarga de generar la secuencia de salto mediante una señal `randi([0 25], 1,100)` que produce una serie de 100 números aleatorios entre 0 y 25 cada 50 ms, la cual es muestreada para generar un índice pseudo-aleatorio de salto (secuencia de 10 números enteros), que constituye la entrada al módulo sintetizador de frecuencias, representado por un modulador FSK 26-ario.

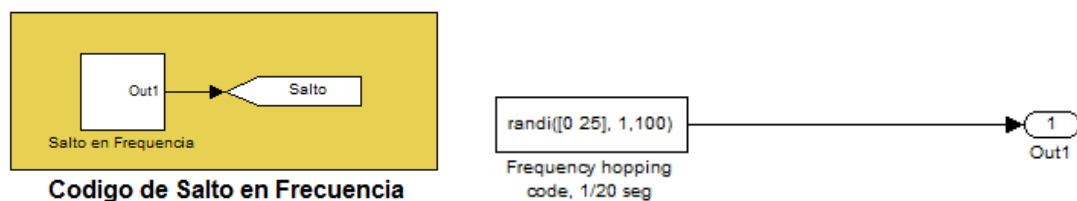


Figura B.2 Modulo generador del salto en frecuencia.

B.2.2. Transmisor

Como se muestra en la Figura B.3, la señal de información se obtiene empleando un generador binario, el cual genera una señal aleatoria (con una distribución Bernoulli) de 10 bits con un periodo de 1.302×10^{-5} seg, correspondiente al inverso de la velocidad de transmisión de datos RF (76800bps) de los módulos radio empleados.

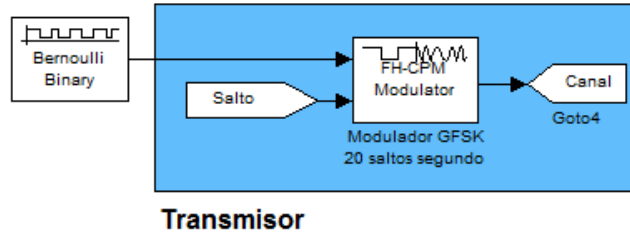


Figura B.3 Transmisor.

El transmisor FHSS consiste en un bloque modulador, constituido por dos submódulos como se observa en la Figura B.4. El primero es un modulador CPM de banda base que procesa la señal de información obtenida del generador binario aleatorio, con un índice de modulación de 1.04, calculado mediante la ecuación 1, con el valor de desviación de frecuencia obtenido en la sección 4.3.3.1 del documento del trabajo de grado. El segundo submódulo, consiste en un modulador FSK 26-ario que representa el sintetizador de frecuencias, el cual genera 26 portadoras (de acuerdo con el índice pseudo-aleatorio de salto) cada una separada 500KHz, en la banda de 912 a 915MHz. Finalmente, las señales de salida de los dos submódulos descritos, pasan a través de un mezclador para generar la señal FHSS, la cual seguidamente es dirigida hacia el canal de comunicación.

$$MI = \frac{\Delta f[\text{Hz}]}{R_b[\text{Hz}]} \quad (1)$$

Donde:

MI : Índice de modulación.

Δf : Desviación de frecuencia pico de la portadora igual a 80.2 kHz.

R_b : Velocidad de transmisión de datos igual 76.8 kbps.

A partir de estos valores se obtiene un índice de modulación igual a 1.04.

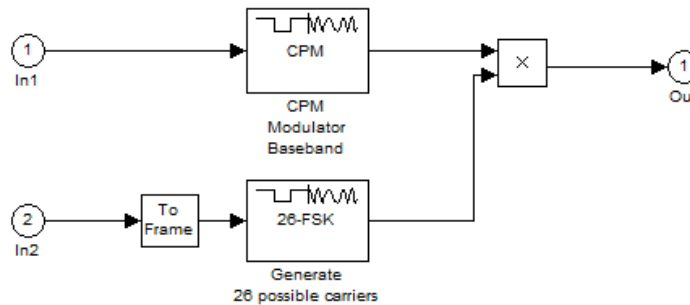


Figura B.4 Bloques del Modulador.

B.2.3. Canal

Un modelo básico y ampliamente adoptado para describir el efecto del ruido térmico en un canal de comunicación, se fundamenta en el siguiente conjunto de supuestos:

- El ruido es aditivo, es decir, la señal recibida consiste en la suma de la señal transmitida más una señal aleatoria de ruido, siendo estas últimas señales estadísticamente independientes.
- El ruido es blanco, esto es, la densidad espectral de potencia es constante, en un ancho de banda fijo.
- La amplitud de la señal de ruido adopta una distribución normal o gaussiana.

Para la simulación del canal de comunicación, se emplea este modelo, denominado Canal con Ruido Blanco Gaussiano Aditivo (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*), el cual está implementado en un bloque disponible en el toolbox de comunicaciones de MATLAB que se muestra en la Figura B.5. En este bloque el modo que especifica la variación del ruido blanco que se adiciona a la señal de entrada, se ajusta en la relación señal a ruido (E_b/N_0), mientras que la relación de Energía de Bit a Densidad Espectral de Potencia de Ruido en decibeles se representa por medio de un arreglo (E_b/N_0) que toma valores entre 0 y 18 dB. Por último, la duración de un símbolo en el canal se configura en 1/76800seg.

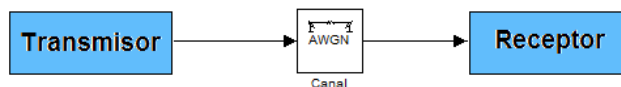


Figura B.5 Canal de Comunicaciones.

B.2.4. Recetor

El receptor FHSS, representado en la Figura B.6 y en bloques en la Figura B.7, revierte el procesamiento llevado a cabo en el transmisor para recuperar la señal de información, modulada y afectada adicionalmente por los efectos del ruido del canal. Para esto se utiliza un sintetizador de frecuencias, el cual toma el mismo índice pseudo-aleatorio de salto empleado en transmisión. Las portadoras generadas en por este sintetizador, son conjugadas y posteriormente pasan a través de un mezclador junto con la señal proveniente del canal, obteniendo de esta manera, la señal de información modulada en banda base. Por último, la señal en banda base se procesa mediante un demodulador CPM, configurado con los parámetros definidos en transmisión, para obtener finalmente, la señal de información original.

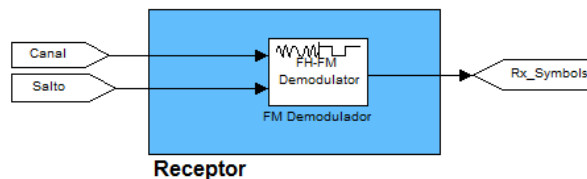


Figura B.6 Receptor.

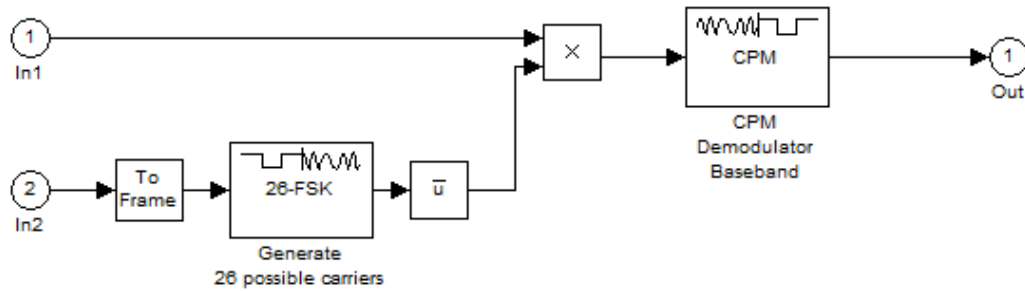


Figura B.7 Bloques del Demodulador.

B.3. Calculo de la Tasa de Error de Bit

Mediante el bloque de Calculo de la Tasa de Error (*Error Rate Calculation*) ilustrado en la Figura B.8, se compara la señal de información de entrada que sale del generador binario con la señal de información obtenida a la salida del receptor y se calcula la tasa de error de bit (BER).

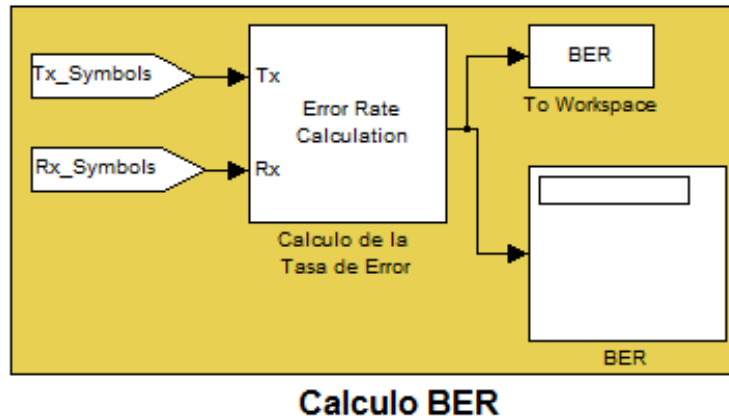


Figura B.8 Modulo para calcular la Tasa de Error de Bit.

B.4. Espectro

Se incluye un módulo de visualización del espectro después del canal para observar los efectos que se producen en la transmisión de la señal de información a través del medio físico. Se utilizan los bloques presentados en la Figura B.9 para visualizar el espectro de la señal a la salida del canal de comunicaciones que salta en 26 diferentes frecuencias. Una vez se corre la simulación se abre la ventana de visualización del espectro y se muestra la señal como se indica en la Figura B.10. El rango de frecuencia configurado en la ventana de propiedades del modulo *Spectrum Scope* es de -15 a 15 MHz.

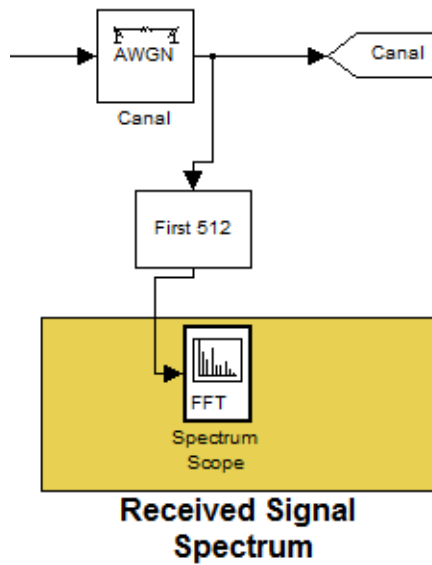


Figura B.9 Modulo para visualizar el espectro de la señal.

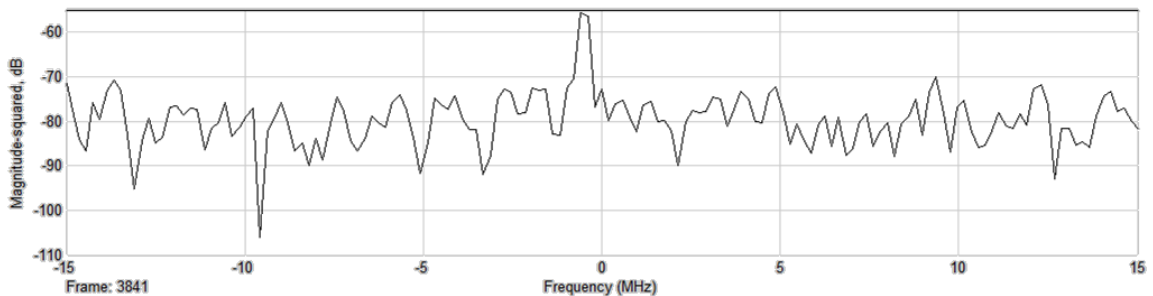


Figura B.10 Espectro de la Señal.

B.5 Ejecución del Sistema y Resultados

Una vez implementados todos los módulos, se ejecuta la simulación para obtener las medidas de desempeño del sistema. Esta ejecución se hace desde la herramienta de análisis de tasa de error de bit *bertool*. Esta herramienta es una interfaz que permite analizar el desempeño del sistema en términos de la BER bajo un enfoque teórico, semi analítico o basado en simulación (Montecarlo).

Después de abrir la interfaz *bertool* desde la ventana de comando se ingresa en la pestaña Montecarlo y se elige el rango de E_b/N_0 con el que se desea ver el comportamiento del sistema, a continuación se carga el archivo de Simulink® que contiene el sistema FHSS y se escribe el nombre de la variable que guarda en el *workspace* el valor de BER. Después de configurar estos parámetros se procede a ejecutar la simulación. En tanto el valor de se incrementa, se va generando la curva de desempeño del sistema FHSS que se muestra en la Figura B.11, se muestra el espectro de la señal y se despliegan los valores de la tasa de error de bit en el módulo BER de la Figura B.7.

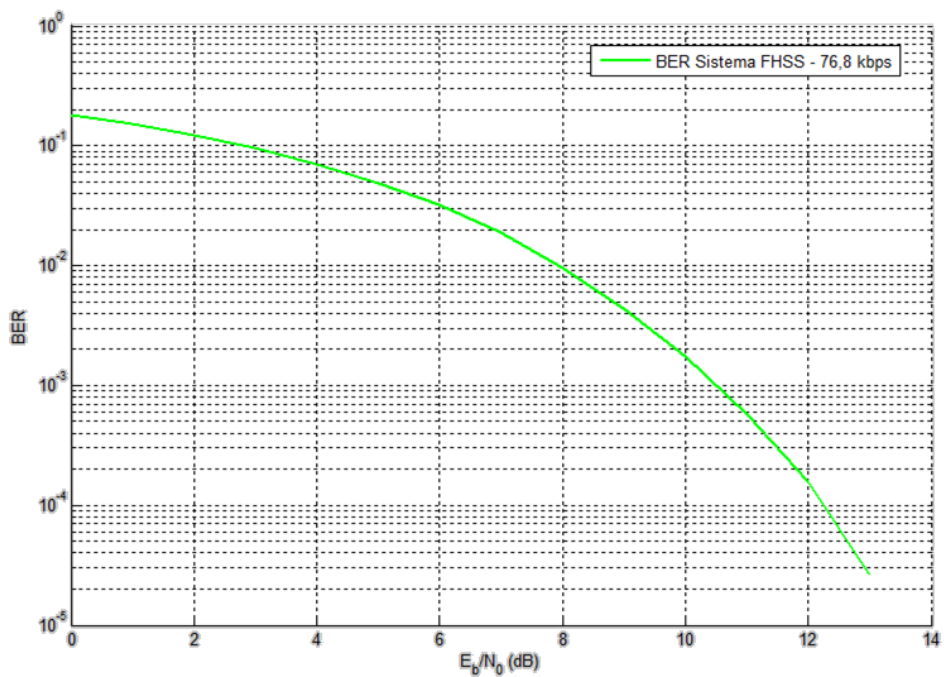


Figura B.11 Curva de desempenho de um sistema de comunicações baseado em FHSS.

Referencia Bibliográfica

[1] J. F. Lasso and H. F. Vargas, "Evaluación del desempeño de un sistema de comunicación punto–punto vía radio con transmisión FHSS en 900 MHz," Universidad del Cauca, 2010.

