

**EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DE UN SISTEMA
INALÁMBRICO DE COMUNICACIÓN DE DATOS PUNTO A PUNTO DE CORTO
ALCANCE EN LA BANDA DE 2.4 GHZ EMPLEANDO BLUETOOTH**



**Diana Carolina Pérez Varela
Brayan Estiven Muñoz Delgado**

Universidad del Cauca

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

**EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DE UN SISTEMA
INALÁMBRICO DE COMUNICACIÓN DE DATOS PUNTO A PUNTO DE CORTO
ALCANCE EN LA BANDA DE 2.4 GHZ EMPLEANDO BLUETOOTH**



**Diana Carolina Pérez Varela
Brayan Estiven Muñoz Delgado**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero en Electrónica y
Telecomunicaciones**

Director: Víctor Manuel Quintero Flórez

Universidad del Cauca

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

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	XIV
1. GENERALIDADES	1
1.1. NOCIONES GENERALES DE LAS REDES INALAMBRICAS DE AREÁ PERSONAL .	1
1.1.1. Ventajas y Desventajas de las Redes Inalámbricas	1
1.1.2. Topologías de Redes Inalámbricas.....	1
1.1.3. Clasificación de las Redes Inalámbricas	4
1.2. TECNOLOGIA BLUETOOTH®	7
1.2.1. La Pila de Protocolos Bluetooth®.....	8
1.2.2. Perfiles Bluetooth®.....	16
1.3. ESPECTRO ENSANCHADO	17
1.3.1. Espectro Ensanchado por Saltos en Frecuencia.....	17
1.3.2. Ventajas de la Técnica FHSS	22
1.4. TÉCNICAS DE MODULACIÓN EMPLEADAS POR BLUETOOTH®	23
1.4.1. Modulación por Desplazamiento de Frecuencia Gaussiana	23
1.4.2. Modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial.....	27
2. HERRAMIENTA DE TRABAJO	31
2.1. CONSIDERACIONES HARDWARE DEL KIT DE DESARROLLO BISDK02BI-02	32
2.1.1. Módulo Serie Inteligente Bluetooth	32
2.1.2. Placa Base de Desarrollo.....	34
2.1.3. Adaptador Bluetooth®.....	36
2.1.4. Software de Aplicación EZURiO	37
2.1.5. Cables y CD de Documentación	38
3. SISTEMA DE COMUNICACIÓN BLUETOOTH®.....	39
3.1. MODOS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA	40
3.2. CONFIGURACIÓN MÓDULO BISMII Y ESTABLECIMIENTO DE UNA CONEXIÓN .	41
3.3. ASPECTOS DE LA COMUNICACIÓN POR RADIO FRECUENCIA	45
3.3.1. Bandas de Frecuencias del Módulo BISMII.....	45
3.3.2. Velocidad de Transmisión de Datos del Enlace Radio	46
3.3.3. Potencia de Transmisión del Módulo BISMII.....	47
3.4. CONFIGURACIÓN DE PARAMETROS EN LA HERRAMIENTA DE PREDICCIÓN DE PROPAGACIÓN WIRELESS INSITE®	47
4. PLAN DE PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS	51
4.1. ESCENARIOS DE PRUEBA	51
4.1.1. Exteriores	51

4.1.2. Interiores.....	52
4.2. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN DIFERENTES ESCENARIOS.....	53
4.2.1. Potencia de Recepción	54
4.2.2. Comparación Potencia de Recepción en Banda Base con los Resultados Obtenidos en Wireless InSite®	60
4.2.3. Pérdidas Básicas de Propagación	66
4.2.4. Comparación Potencia de Recepción en RF con Modelo Teórico de Potencia de Recepción	70
4.2.5. Dispersión del Retardo y Tiempo de Llegada.....	72
4.2.6. Determinación del Ancho de Banda.....	76
4.2.7. Efecto de la Temperatura Sobre el Funcionamiento del Sistema	78
4.2.8. Tasa de Error de Bit.....	79
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	94
5.1. CONCLUSIONES.....	94
5.2. TRABAJOS FUTUROS.....	96
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Red de Infraestructura.	2
Figura 1.2. Redes Ad Hoc.....	3
Figura 1.3. a) Picored con un Esclavo, b) Picored con Varios Esclavos, c) Red Dispersa.	4
Figura 1.4. Clasificación de las Redes Inalámbricas con Rango de Alcance.....	5
Figura 1.5. Relación del Modelo de Referencia OSI con la Arquitectura Bluetooth® y Pila de Protocolos	9
Figura 1.6. Asignación de Canales Banda ISM de 2.4 GHz	10
Figura 1.7. Formato Básico de un Paquete Bluetooth®.	11
Figura 1.8. Formato de un Paquete Bluetooth® Versión 2.0 + EDR.....	11
Figura 1.9. Potencia con Respecto al Tiempo de un Paquete EDR	12
Figura 1.10. Potencia con Respecto al Tiempo de un Paquete EDR II.	13
Figura 1.11. Diagrama en Bloques Sistema FHSS.	18
Figura 1.12. Saltos en Frecuencia de un Sistema FHSS	19
Figura 1.13. Sistema FHSS con Salto Lento en Frecuencia y Modulación 4-FSK.....	21
Figura 1.14. Sistema FHSS con Salto Rápido en Frecuencia y Modulación 4-FSK.	21
Figura 1.15. Modelo de Saltos en Frecuencia de FHSS para 2 Dispositivos.....	22
Figura 1.16. Modulación FSK.....	23
Figura 1.17. Probabilidad de Error para la Modulación FSK Coherente y no Coherente. .	24
Figura 1.18. Espectro FSK y GFSK.	25
Figura 1.19. Densidad Espectral de Potencia de una Señal GFSK para Varios BT.	25
Figura 1.20. Diagrama de Ojo de las componentes en Fase y Cuadratura para GFSK....	26
Figura 1.21. Modulación PSK y DPSK.	27
Figura 1.22. Diagrama de Constelación.....	29
Figura 1.23. Constelación de la Carga útil EDR Utilizando Modulación $\pi/4$ -DQPSK.	29
Figura 1.24. Constelación 8 DPSK.	30
Figura 2.2. Módulo BISMII.	32
Figura 2.3. Diagrama en Bloques Módulo BISMII.	34
Figura 2.4. Placa Base de Desarrollo.....	35
Figura 2.5. Adaptador Bluetooth®.....	36
Figura 3.1. Sistema de Comunicación Bluetooth® Implementado.....	39
Figura 3.2. Selección Parámetros Comunicación Serie.	40
Figura 3.3. Configuración Módulo BISMII.....	43
Figura 3.4. Configuración Módulo BISMII II.....	43
Figura 3.5. Ejecución de Comandos AT, Ejecución 1.	44
Figura 3.6. Ejecución de Comandos AT, Ejecución 2.	45
Figura 3.7. Velocidad de Transmisión de Datos Contra Distancia para Exteriores.....	46

Figura 3.8. Configuración de Potencia.....	47
Figura 4.1. Cancha de Futbol CDU.....	52
Figura 4.2. Escenario de Exteriores Wireless InSite®.....	52
Figura 4.3. Escenario de Interiores Wireless InSite®.....	53
Figura 4.4. Diagrama en Bloques Simplificado del Sistema de comunicaciones.....	54
Figura 4.5. Diagrama en Bloques Simplificado del Sistema de comunicaciones con los Niveles de Banda Base y Radiofrecuencia.	54
Figura 4.6. Potencia de Recepción en Banda Base en Exteriores.	58
Figura 4.7. Potencia de Recepción en Banda Base en Interiores.	60
Figura 4.8. Escenario de Exteriores Wireless InSite® con Ruta de Receptores.	61
Figura 4.9. Comparación Potencia de Recepción en Banda Base con Resultados de Potencia de Recepción en RF Wireless InSite® en Exteriores.....	63
Figura 4.10. Escenario de Interiores Wireless InSite® con Ruta de Receptores.	64
Figura 4.11. Comparación Potencia de Recepción en Banda Base con Resultados de Potencia de Recepción en RF Wireless InSite® en Interiores.....	65
Figura 4.12. Perdidas de Propagación en Exteriores.	67
Figura 4.13. Comparación Pérdidas de Propagación Reales con Pérdidas de Propagación Teóricas en Exteriores.....	68
Figura 4.14. Perdidas de Propagación en Interiores.	69
Figura 4.15. Comparación Pérdidas de Propagación Reales con Pérdidas de Propagación Teóricas en Interiores.	70
Figura 4.16. Comparación Potencia de Recepción en RF con Potencia de Recepción Teóricas en Exteriores.....	71
Figura 4.17. Comparación Potencia de Recepción en RF con Potencia de Recepción Teóricas en Interiores.	72
Figura 4.18. Potencia de Recepción vs. Retardo para 20 Puntos Receptores Ubicados en Exteriores.	73
Figura 4.19. Dispersión del Retador vs Distancia.....	74
Figura 4.20. Tiempo de Llegada.	75
Figura 4.21. Ancho de Banda de 30 dB.	77
Figura 4.22. Ancho de Banda de 30 dB II.	77
Figura 4.23. Sistema de Comunicación Bluetooth® Implementado Bajo el Efecto de la Temperatura.	78
Figura 4.24. Relación Potencia de Ruido a la Entrada y a la Salida del Receptor.....	80
Figura 4.25. Velocidad de Transmisión Datos Respecto a la Distancia hasta 100 m.	82
Figura 4.26. Velocidad de Transmisión de Datos Respecto a la Potencia de Recepción en RF.	82
Figura 4.27. BER vs Eb/No en Exteriores.	85
Figura 4.28. BER vs Eb/No en Interiores.	87
Figura 4.29. BER vs Eb/No en Exteriores e Interiores.....	88

Figura 4.30. Tasa de Error de Bit (BER) en Función de la Relación E_b/N_0 de un Sistema de Comunicaciones Basado en FHSS.	89
Figura 4.31. Tasa de Error de Bit (BER) en Función de la Relación E_b/N_0 del Sistema Simulado y el Sistema Implementado.	90
Figura 4.32 Montaje del Sistema para Evaluar la Tasa de Error de Bit bajo Condiciones de Interferencia.....	91
Figura 4.33. BER VS C/I.	93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Clasificación de las Redes Inalámbricas por Velocidad de Transmisión de Datos.....	4
Tabla 1.2. Comparación de las Tecnologías WPAN.	7
Tabla 1.3. Clases de Dispositivos Bluetooth®.....	10
Tabla 1.4. Cambio de Fase DQPSK y $\pi/4$ - DQPSK.....	28
Tabla 2.1. Características de Implementación del Módulo BISMII.	33
Tabla 2.2. Voltaje de Alimentación Placa Base de Desarrollo.....	36
Tabla 2.3. Descripción de Pines del Conector DB-9	36
Tabla 2.4. Características del Adaptador Bluetooth® USB.	37
Tabla 2.5. Configuración Comunicación Serie.	38
Tabla 3.1. Modos de Operación del Sistema.	41
Tabla 3.2. Registros de Configuración del Módulo BISMII.	42
Tabla 3.3. Comandos AT para el Establecer Conexión	44
Tabla 3.4. Frecuencias Centrales de los Canales Bluetooth®.	46
Tabla 3.5. Parámetros para el Modelo Completo Full 3D.....	48
Tabla 3.6. Configuración Antenas.....	49
Tabla 3.7. Configuración Forma de Onda.....	49
Tabla 3.8. Configuración del Transmisor.	50
Tabla 3.9 Configuración del Receptor.....	50
Tabla 4.2. Potencia de Recepción en Banda Base en Exteriores.	58
Tabla 4.3. Potencia de Recepción en Banda Base en Interiores.....	59
Tabla 4.4. Potencia de Recepción en Banda Base y Potencia de Recepción en RF Wireless Insite® en Exteriores.....	62
Tabla 4.5. Potencia de Recepción en Banda Base y Potencia de Recepción en RF Wireless Insite® en Interiores.....	64
Tabla 4.6. Pérdidas de Propagación en Exteriores.	66
Tabla 4.7. Pérdidas de Propagación en Interiores.	69
Tabla 4.8. Resultados de Eb/No en Exteriores.	83
Tabla 4.9. Resultados de Eb/No en Interiores.....	84
Tabla 4.10. Resultados de BER en Exteriores.....	84
Tabla 4.11. Resultados de BER en Interiores.	86
Tabla 4.12. Resultados del Número de Bits Errados, BER y Señal Portadora a Interferencia.....	92

LISTADO DE ACRONIMOS

ACL	<i>Asynchronous Connection Less</i> , Asíncrono sin Conexión.
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> , Conversor Analógico Digital.
AES	<i>Advanced Encryption Standard</i> , Estándar Avanzado de Encriptación.
AP	<i>Access Point</i> , Punto de Acceso.
ASB	<i>Active Slave Broadcast</i> , Difusión para Esclavo Activo.
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i> , Código Estándar Estadounidense para el Intercambio de Información.
AT	<i>Attention</i> , Atención.
BB	<i>Baseband</i> , Banda Base.
BC04	<i>BlueCore04</i> .
BER	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bits.
BISMII	<i>Bluetooth Intelligent Serial Module</i> , Módulo Serie Inteligente Bluetooth.
BLER	<i>Block Error Rate</i> , Tasa de Error de Bloque.
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria.
CD	<i>Compact Disc</i> , Disco Compacto.
CDU	Centro Deportivo Universitario.
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i> , Semiconductor de Óxido Metálico Complementario.
CSMA-CA	<i>Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance</i> , Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisiones.
CSR	<i>Cambridge Silicon Radio</i> .
CTS	<i>Clear to Send</i> , Libre para Envío.

C/I	<i>Carrier to Interference Ratio</i> , Relación Portadora a Interferencia.
DCD	<i>Data Carrier Detect</i> , Detección de Portadora.
DPSK	<i>Differential Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial.
DQPSK	<i>Differential Quaternary Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase Cuaternario Diferencial
DSR	<i>Data Set Ready</i> , Conjunto de Datos Listo.
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> , Espectro Ensanchado por Secuencia Directa.
DTR	<i>Data Terminal Ready</i> , Terminal de Datos Listo.
DUN	<i>Dial Up Networking</i> , Acceso Telefónico a Redes.
Eb/No	<i>Energy per Bit to Noise Power Spectral Density Ratio</i> , Relación Energía de Bit a Densidad Espectral de Potencia de Ruido.
EDR	<i>Enhanced Data Rate</i> , Velocidad de Datos Mejorada.
eSCO	<i>Extended Synchronous Connection – Oriented</i> , Conexión Síncrona Extendida – Orientada.
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i> , Espectro Ensanchado por Saltos en Frecuencia.
FIET	Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca.
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento en Frecuencia.
FTP	<i>File Transfer Protocol</i> , Protocolo de Transferencia de Archivos.
GAP	<i>Generic Access Profile</i> , Perfil de Acceso Genérico.
GFSK	<i>Gaussian Frequency Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Frecuencia Gaussiana.
GPIO	<i>General Purpose Input / Output</i> , Entrada / Salida de Propósito General.
GND	<i>Ground</i> , Tierra.

GNTT	Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones.
GOEP	<i>Generic Object Exchange Profile</i> , Perfil Genérico de Intercambio de Objetos.
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i> , Servicio General de Paquetes Vía Radio.
GRIAL	Grupo de Radio e InALámbricas.
HCI	<i>Host Controller Interface</i> , Interfaz Controlador de Anfitrión.
HCTL	<i>Host Controller Transport Layer</i> , Nivel de Transporte Controlador de Anfitrión.
HS	<i>High Speed</i> , Alta Velocidad.
HSP	<i>Head Set Profile</i> , Perfil de Auriculares.
ISI	<i>Intersymbol Interference</i> , Interferencia Intersimbólica.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
ISM	<i>Industrial, Scientific, and Medical</i> , Industrial, Científica y Médica.
ISO	<i>International Standard Organization</i> , Organización de Estandarización Internacional.
L2CAP	<i>Logical Link Control and Adaptation Protocol</i> , Protocolo de Control y Adaptación del Enlace Lógico.
LEDs	<i>Light Emitting Diodes</i> , Diodos Emisores de Luz.
LLC	<i>Logical Link Control</i> , Control de Enlace Lógico.
LMP	<i>Link Manager Protocol</i> , Protocolo de Gestión de Enlace.
LPI	<i>Low Probability Intercept</i> , Baja Probabilidad de Interceptación.
MAC	<i>Medium Access Control</i> , Control de Acceso al Medio.
M2M	<i>Machine to Machine</i> , Máquina a Máquina.
OBEX	<i>Object Exchange Protocol</i> , Protocolo de Intercambio de Objetos.
OQPSK	<i>Offset Quaternary Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase Cuaternario Compensado.

OSI	<i>Open System Interconnection</i> , Modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos.
P2P	<i>Peer to Peer</i> , Punto a Punto.
PCM	<i>Pulse Code Modulation</i> , Modulación por Pulsos Codificados.
PDA	<i>Personal Digital Assistant</i> , Asistente Digital Personal.
PH	<i>Hydrogen Potential</i> , Potencial de Hidrógeno.
PHY	<i>Physical Layer</i> , Nivel Físico.
PIN	<i>Number Personal Identification</i> , Número de Identificación Personal.
PN	<i>Pseudo Noise</i> , Pseudo Ruido.
PSB	<i>Parked Slave Broadcast</i> , Difusión para Esclavo Estacionado.
QoS	<i>Quality of Service</i> , Calidad de Servicio.
QPSK	<i>Quaternary Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase Cuaternario.
RD	<i>Receive Data</i> , Recepción de Datos.
RF	<i>Radio Frequency</i> , Radio Frecuencia.
RFCOMM	<i>Radio Frequency Communication</i> , Comunicación por Radio Frecuencia.
RI	<i>Ring Indicator</i> , Indicador de Llamada.
RoHS	<i>Restriction of use of certain Hazardous Substances</i> , Restricción de Uso de Ciertas Sustancias Peligrosas.
ROM	<i>Read Only Memory</i> , Memoria de Solo Lectura.
RS	<i>Recommended Standard</i> , Estándar Recomendado.
RTS	<i>Request to Send</i> , Solicitud de Envío.
SAR	<i>Segmentation And Reassembling</i> , Segmentación y Ensamblado.
SBR	<i>Shooting and Bouncing Ray</i> , Disparo y Rebote de Rayo.
SCO	<i>Synchronous Connection Oriented</i> , Síncrono Orientado a Conexión.

SDAP	<i>Service Discovery Application Profile</i> , Perfil de Aplicación para el Descubrimiento de Servicios.
SDP	<i>Service Discovery Protocol</i> , Protocolo de Descubrimiento de Servicios.
SIG	<i>Special Interest Group</i> , Grupo de Interés Especial.
SPP	<i>Serial Port Profile</i> , Perfil de Puerto Serial.
SS	<i>Spread Spectrum</i> , Espectro Ensanchado.
SSID	<i>Service Set Identifier</i> , Identificador de Conjunto de Servicios.
TD	<i>Transmit Data</i> , Transmisión de Datos.
TDD	<i>Time Division Duplex</i> , Duplexación por División de Tiempo.
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Tiempo.
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Tiempo.
THSS	<i>Time Hopping Spread Spectrum</i> , Espectro Ensanchado por Salto en Tiempo.
TICs	Tecnologías de la Información y Comunicación.
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i> , Transmisor Receptor Asíncrono Universal.
USB	<i>Universal Serial Bus</i> , Bus Universal en Serie.
UTD	<i>Uniform Theory of Diffraction</i> , Teoría Uniforme de Difracción.
UWB	<i>Ultra Wide Band</i> , Ultra Banda Ancha.
WISM	<i>Wireless Intelligent Serial Module</i> , Módulo Serie Inteligente Inalámbrico.
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> , Red de Área Local Inalámbrica.
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i> , Red de Área Personal Inalámbrica.
WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i> , Red de Área Metropolitana Inalámbrica.
WWAN	<i>Wireless Wide Area Network</i> , Red de Área Amplia Inalámbrica.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la expresión “sociedad de la información” ha sido utilizada para hacer referencia a una sociedad en la cual las tecnologías que facilitan la creación, el procesamiento y distribución de la información juegan un papel primordial en el desarrollo cultural, social, político y económico. Uno de los principales motores de esta sociedad han sido, sin duda, las tecnologías inalámbricas, las cuales facilitan la comunicación siempre que exista cobertura en cualquier momento y desde cualquier lugar, sin necesidad de medios de transmisión cableados o guiados.

Bluetooth®¹ es una tecnología asociada a las Redes de Área Personal Inalámbricas (WPAN, *Wireless Personal Area Network*) que ha evolucionado positivamente, ganando popularidad y reconocimiento, permitiendo la implementación de sistemas de comunicaciones inalámbricos que día a día toman mayor fuerza en las actividades diarias del común de las personas, gracias a su bajo costo, baja complejidad, y bajo consumo de energía. Bluetooth® ofrece además protección de la información mediante el empleo de la técnica de Espectro Ensanchado por Saltos en Frecuencia (FHSS, *Frequency Hopping Spread Spectrum*) en la transmisión de datos.

En el presente trabajo de grado se presenta la evaluación y análisis del desempeño a nivel físico en escenarios reales de operación y en simulación de un sistema inalámbrico de comunicación de datos punto a punto de corto alcance en 2.4 GHz, haciendo uso de la tecnología inalámbrica Bluetooth®.

El documento final de trabajo de grado incluye 5 capítulos: el primer capítulo corresponde a una contextualización en torno a la temática de la tecnología Bluetooth® y sus características; en el segundo capítulo se presentan las características y especificaciones del kit de desarrollo BISK02BI-02 de EZURiO² utilizado para la implementación del sistema de comunicación de datos Bluetooth®; en el tercer capítulo se presenta la implementación del sistema Bluetooth®, sus características y la configuración de parámetros en la herramienta Wireless InSite®³ para su simulación; en el cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas al sistema de comunicación en diferentes escenarios reales y ante interferencia, y de los modelos teóricos usados, junto con el análisis correspondiente y la comparación de resultados en los escenarios propuestos, con los resultados obtenidos en simulación haciendo uso de la herramienta Simulink® de Matlab®⁴ y la herramienta de predicción de propagación Wireless InSite®; finalmente en el quinto capítulo se encuentran las conclusiones y los trabajos futuros.

¹ <http://www.bluetooth.com>.

² Marca adquirida por Laird Technologies en el año 2008, <http://www.lairdtech.com/Products/>.

³ <http://www.remcom.com/wireless-insite>.

⁴ <http://www.mathworks.com/>.

Acompaña al documento un anexo A con la simulación del sistema en la herramienta Matlab[®] que se utilizó para comparar los resultados ideales de desempeño con los obtenidos experimentalmente en los escenarios considerados.

1. GENERALIDADES

Este capítulo tiene como objetivo presentar al lector los aspectos introductorios y teóricos concernientes a las Redes de Área Personal Inalámbricas (WPAN), la tecnología Bluetooth®, el Espectro Ensanchado por Saltos en Frecuencia (FHSS) y los tipos de modulación empleados por Bluetooth®.

1.1. NOCIONES GENERALES DE LAS REDES INALAMBRICAS DE AREA PERSONAL

En los últimos años el panorama tecnológico ha dado un giro sorprendente. Un sin número de personas de toda clase y condición han experimentado este cambio haciendo uso de las redes inalámbricas, las cuales constituyen una eficaz y poderosa herramienta que permite la transferencia de voz, datos y video.

1.1.1 Ventajas y Desventajas de las Redes Inalámbricas

Las principales ventajas que brindan las redes inalámbricas son: escalabilidad (capacidad para extender el margen de operación sin perder calidad en los servicios ofrecidos), movilidad (facilidad de desplazamiento de los nodos dentro de la red), flexibilidad (disposición de acceso a una red en entornos de difícil cableado) y facilidad de acceso (cualidad que poseen los nodos para acceder de manera rápida y eficaz a los recursos de la red), entre otras con respecto a las redes cableadas. Sin embargo, todas estas ventajas conllevan también una serie de problemas, tales como: inseguridad (otros dispositivos que se encuentren en su rango de cobertura pueden intentar acceder a la red o captar información de ellas), interferencia (producida por dispositivos inalámbricos que operen en la misma banda de frecuencia, redes inalámbricas cercanas o incluso por otros equipos conectados inalámbricamente a la misma red), limitado ancho de banda y disminución en la velocidad de transmisión de datos (afectada por la distancia entre los nodos y el número de usuarios en la red).

No se espera que las redes inalámbricas lleguen a remplazar a las redes cableadas, debido a las ventajas de cada una de ellas. Sin embargo, pueden mezclarse dando lugar a las redes híbridas, logrando la satisfacción de las necesidades de conectividad tanto fijas como móviles [1].

1.1.2. Topologías de Redes Inalámbricas

Una red inalámbrica puede ser implementada tanto en pequeños espacios como en amplias extensiones territoriales; es por esto que al desplegar una red basada en equipos inalámbricos, las necesidades de movilidad, costos, etc. definen las topologías requeridas; existen dos topologías de modo general, descritas a continuación.

- **Redes de Infraestructura**

Estas redes se caracterizan por tener un elemento de “coordinación” o Punto de Acceso (AP, *Access Point*). Cuando se utiliza esta topología, los nodos deben comunicarse con los Puntos de Acceso (AP) y a través de ellos lograr la conexión con otros nodos de la red (no existe comunicación directa entre nodos) o con una red cableada. Los Puntos de Acceso (AP) realizan las tareas de administración requeridas para permitir que todos los nodos accedan a los diferentes recursos de la red.

Para brindar cobertura y con ello movilidad en las redes de infraestructura se utilizan varios Puntos de Acceso (AP) para una zona grande o un solo Punto de Acceso (AP) para una zona pequeña. Todos los nodos deben encontrarse dentro del área de cobertura del Punto de Acceso (AP). En la figura 1.1 se observa la representación de una red de infraestructura.

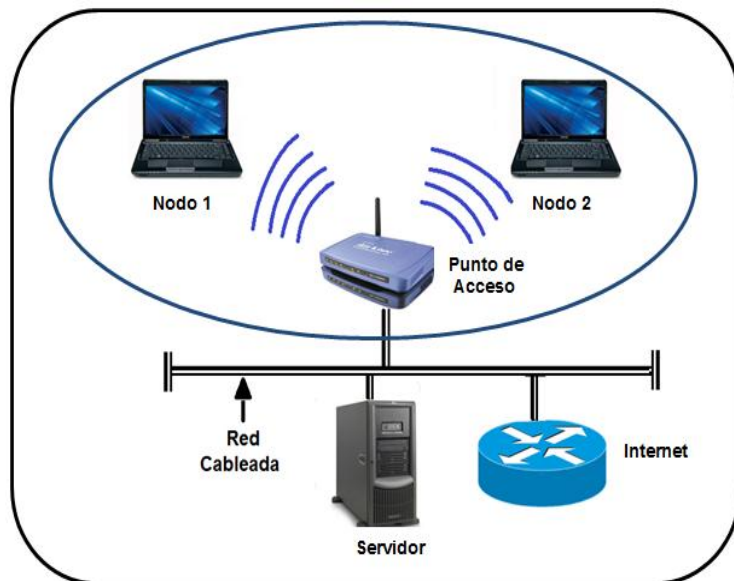


Figura 1.1. Red de Infraestructura.

- **Redes Ad Hoc**

Una red Ad Hoc es un tipo de red descentralizada, constituida por dos o más terminales móviles, tal y como se observa en la figura 1.2, en la cual cada nodo está preparado para enviar datos a los demás, con la capacidad de iniciar, controlar y terminar una sesión de comunicación. Las conexiones no requieren de un Punto de Acceso (AP) a diferencia de las redes de infraestructura.

Las redes Ad Hoc se comunican independientemente por medio de sus tarjetas inalámbricas, sin ninguna diferencia entre los nodos de la red, es decir todos los nodos

son iguales. Bajo estas características, cualquier nodo puede actuar como un servidor, si tiene recursos o servicios para ofrecer, y como un cliente si desea solicitar recursos o servicios de otros nodos.

Otra particularidad de estas redes es la movilidad con la que cuentan los nodos, ya que estos pueden acceder a los servicios de una red siempre y cuando estén dentro del área de cobertura radioeléctrica de por lo menos uno de los nodos que la conforman. Cada red posee un Identificador de Conjunto de Servicios (SSID, *Service Set Identifier*), usado por los dispositivos para identificarse en la red y forma parte de ella.

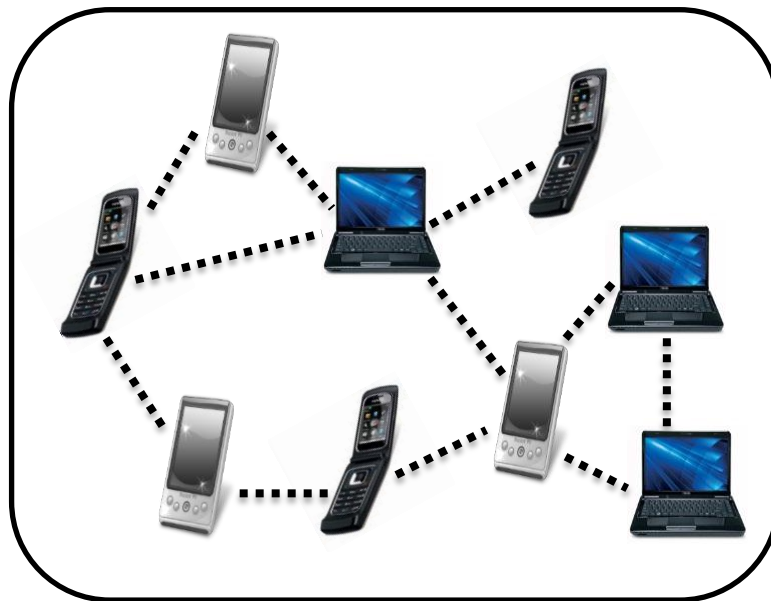


Figura 1.2. Redes Ad Hoc.

Las redes Ad Hoc se basan en diferentes clases de tecnologías de transmisión de datos, entre estas se encuentra la tecnología Bluetooth®.

La tecnología Bluetooth ofrece servicios que permite a los usuarios formar pequeñas redes inalámbricas Punto a Punto (P2P, *Peer to Peer*) y punto a multipunto donde dos o más dispositivos que comparten el mismo canal físico utilizando la misma secuencia de salto de frecuencia conforman una red Ad Hoc, también denominada picored (*piconet*). Cada picored admite 1 maestro y hasta 7 esclavos.

El maestro es el dispositivo cuyo reloj y secuencia de saltos se utilizan para sincronizar a los demás dispositivos de la picored, llevando a cabo de manera predeterminada el procedimiento de búsqueda y establecimiento de la conexión. Los esclavos simplemente se sincronizan y siguen la secuencia de saltos determinada por el maestro [2] [3].

Bluetooth® permite la interconexión de varias picoredes formando una red dispersa (*scatternet*), como se muestra en la figura 1.3. Aunque no existe sincronización entre picoredes, un dispositivo puede pertenecer a varias de ellas haciendo uso de la Multiplexación por División de Tiempo (TDM, *Time Division Multiplexing*), pero el dispositivo sólo está activo en una picored a la vez. Un maestro en una picored puede ser esclavo en otras picoredes [2] [4].

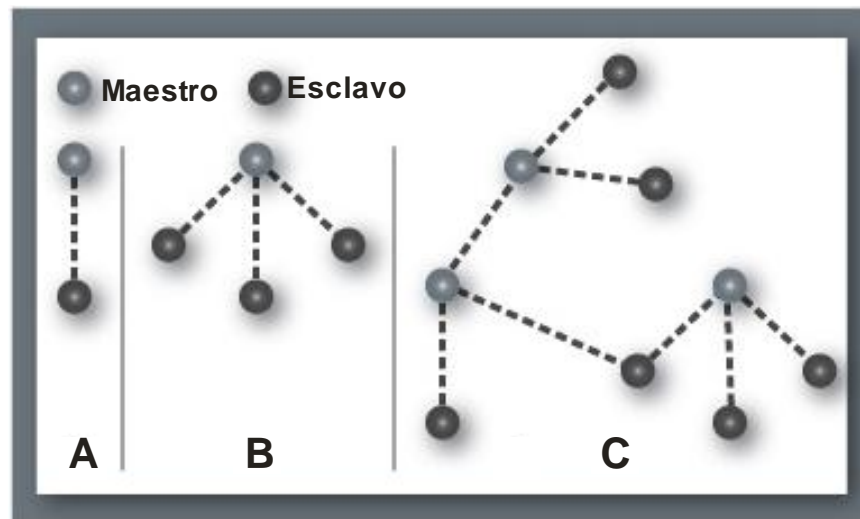


Figura 1.3. a) Picored con un Esclavo, b) Picored con Varios Esclavos, c) Red Dispersa.

1.1.3. Clasificación de las Redes Inalámbricas

Los diferentes tipos de redes inalámbricas se presentan a continuación, estas se diferencian unas de otras por la velocidad de transmisión de datos (tabla 1.1) y por el rango de alcance (figura 1.4).

Redes Inalámbricas	Velocidad de Transmisión de Datos Máxima
WWAN	42 Mbps
WMAN	128 Mbps
WLAN	600 Mbps
WPAN	55 Mbps

Tabla 1.1. Clasificación de las Redes Inalámbricas por Velocidad de Transmisión de Datos [5].

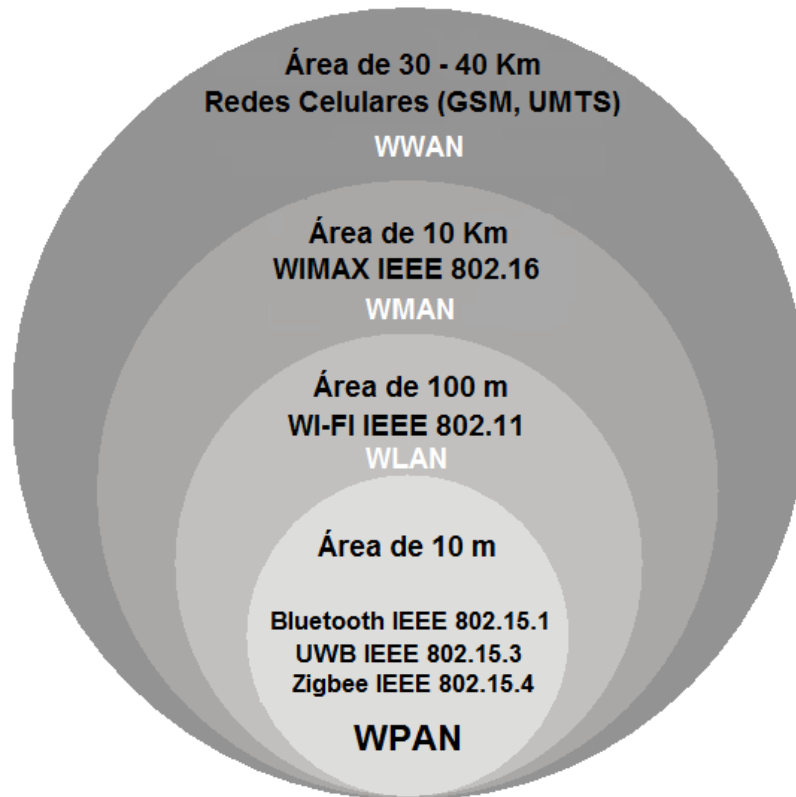


Figura 1.4. Clasificación de las Redes Inalámbricas según su Rango de Alcance.

- Redes de Área Amplia Inalámbricas (WWAN, *Wireless Wide Área Network*).
- Redes de Área Metropolitana Inalámbricas (WMAN, *Wireless Metropolitan Área Nerwork*).
- Redes de Área Local Inalámbricas (WLAN, *Wireless Local Área Network*).
- Redes de Área Personal Inalámbricas (WPAN).

Se tratan únicamente las Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN) debido a que la tecnología Bluetooth® forma parte de este tipo de redes.

1.1.3.1. Redes de Área Personal Inalámbricas

Las Redes de Área Personal Inalámbricas (WPAN), definidas por el estándar del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 802.15, son el fundamento principal del trabajo de grado realizado. Según [2],

este tipo de redes permiten la comunicación a cortas distancias de diferentes dispositivos, tales como Asistentes Digitales Personales (PDA, *Personal Digital Assistant*), computadores portátiles, teléfonos móviles, etc). A diferencia de una WLAN, una conexión a través de una WPAN implica poca o ninguna infraestructura, un menor consumo de energía y soluciones de bajo costo para ser implementadas en diferentes dispositivos de corto alcance [6].

IEEE 802.15 soporta una amplia gama de aplicaciones, incluyendo: el control y monitoreo industrial; seguridad pública: detección y determinación de la localización de personas en lugares de desastres; medición en automóviles: presión neumática en las llantas; tarjetas o placas inteligentes; agricultura de precisión: medición del nivel de humedad en el suelo, niveles de Potencial de Hidrógeno (PH, *Hydrogen Potential*). Sin embargo, las mayores oportunidades de desarrollo están orientadas a la automatización del hogar: calefacción, ventilación, aire acondicionado, iluminación, seguridad y el control de objetos como ventanas, cortinas, puertas, y cerraduras [7].

Las tecnologías inalámbricas que permiten la construcción de redes WPAN son: Bluetooth®, Ultra Banda Ancha (UWB, *Ultra Wide Band*) y Zigbee, cuyas características principales se presentan en la tabla 1.2.

	802.15.1	802.15.4	802.15.3
	Bluetooth®	ZIGBEE	UWB
Espectro Radio	2.4 GHz	868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz	3.1 GHz -10.6 GHz
Máxima Velocidad de Transmisión de Datos	55 Mbps	250 Kbps	500 Mbps
Potencia de Transmisión	< 100 mW	> 1 Mw	1 mW
Máximo Alcance	10 m - 100 m	1 m - 100 m	10 m
Topologías de Red	Picored, Red Dispersa	Estrella, Punto a Punto, Malla	Punto a Punto

Técnicas de Modulación	GFSK ⁵ π/4-DQPSK ⁶ 8DPSK	BPSK ⁷ OQPSK ⁸	BPSK QPSK
Técnicas de Acceso al Medio	TDMA ⁹	CSMA-CA ¹⁰ , TDMA	CSMA-CA, TDMA
Características Opcionales de Seguridad	Mayor Seguridad, Clave de Negociación	AES ¹¹ -128, Autoridad de Clave	AES-128, Clave de Negociación

Tabla 1.2. Comparación de las Tecnologías WPAN.

1.2. TECNOLOGIA BLUETOOTH®

Bluetooth® forma parte de las tecnologías creadas para proveer la comunicación inalámbrica en áreas de uso personal. Sin embargo, su uso va más allá de la eliminación de cables, ya que es lo suficientemente flexible para permitir la creación de gran variedad de aplicaciones.

El nombre de Bluetooth® procede del rey danés y noruego Harald Blåtand, cuya traducción al inglés es Harold Bluetooth®, conocido por ser un buen comunicador y por unificar las tribus noruegas, suecas y danesas. La traducción textual al idioma español es "diente azul", aunque el término en danés era utilizado para denotar que Blåtand era de "tez oscura" y no "dientes azules" [8]. Esta tecnología fue creada en 1994 por ingenieros de Ericsson¹². Entre 1998 y 1999, un grupo de empresas se comprometieron a trabajar juntas usando la tecnología Bluetooth®, como una manera de conectar sus productos. Estas empresas componen el Grupo de Interés Especial (SIG, *Special Interest Group*) de Bluetooth®, una organización dedicada al mantenimiento de la tecnología.

La norma IEEE 802.15.1 es una formalización de la tecnología inalámbrica Bluetooth®, cuyas características fundamentales son la robustez, bajo consumo de energía y bajo

⁵ Modulación por Desplazamiento de Frecuencia Gaussiana (GFSK, *Gaussian Frequency Shift Keying*).

⁶ Modulación por Desplazamiento de Fase Cuaternario Diferencial (DQPSK, *Differential Quaternary Phase Shift Keying*).

⁷ Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria (BPSK, *Binary Phase Shift Keying*).

⁸ Modulación por Desplazamiento de Fase Cuaternario Compensado (OQPSK, *Offset Quaternary Phase Shift Keying*).

⁹ Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*).

¹⁰ Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisiones (CSMA-CA, *Carrier Sense Multiple Access-Collision Avoidance*).

¹¹ Estándar Avanzado de Encriptación (AES, *Advanced Encryption Standard*).

¹² <http://www.ericsson.com/>.

costo [2]. Esta tecnología permite la transmisión de voz y datos al mismo tiempo entre dispositivos, mediante un enlace por Radio Frecuencia (RF, *Radio Frequency*).

Bluetooth® opera en la banda no licenciada para aplicaciones Industriales, Científicas y Médicas (ISM, *Industrial, Scientific and Medical*) de 2.4 GHz a 2.4835 GHz, banda utilizada a nivel mundial haciendo uso de diferentes tecnologías y técnicas de transmisión. En la actualidad las aplicaciones y/o dispositivos que operan en bandas ISM cuentan con un alto grado de popularidad en el mercado. No obstante, aunque dichas aplicaciones y dispositivos operen correctamente respetando los límites impuestos por las normas, producen interferencias, lo que implica el uso de técnicas de transmisión que reduzcan este fenómeno y su afecto sobre el desempeño de la red. Es por ello que Bluetooth® emplea FHSS para combatir la interferencia, el desvanecimiento y proporcionar un nivel de seguridad limitado en la transmisión [6].

La tecnología Bluetooth® ha pasado por diferentes especificaciones a través de la historia, cada una de ellas incorpora notables mejoras respecto al consumo de energía y velocidad de transmisión de datos: Las versiones Bluetooth® 1.1 y 1.2 especifican la velocidad de transmisión de datos de hasta 1 Mbps (720 Kbps efectivos). Las versiones Bluetooth® 2.0 + Velocidad de Datos Mejorada (EDR, *Enhanced Data Rate*) y 2.1 + EDR especifican una velocidad de transmisión de datos de hasta 3 Mbps. La versión 3.0 + Alta Velocidad (HS, *High Speed*) especifica una velocidad de transmisión de hasta 24 Mbps y la versión 4.0 especifica una velocidad de transmisión de hasta 55 Mbps.

1.2.1. La Pila de Protocolos Bluetooth®

La pila de protocolos (*stack*) se basa en el Modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, *Open System Interconnection*) de la Organización de Estandarización Internacional (ISO, *International Standard Organization*). La especificación Bluetooth® utiliza una arquitectura de protocolos que divide las diversas funciones de la red en un sistema de niveles lógicos, tal y como se presenta en la figura 1.5. Estos niveles lógicos permiten el intercambio transparente de información entre aplicaciones diseñadas y fomentan la interoperabilidad entre los productos de diferentes fabricantes [9]. La pila está constituida por los protocolos propios de Bluetooth® o específicos y por el conjunto de protocolos adoptados de otras especificaciones [7].

La arquitectura de protocolos consta de dos subsistemas [3]:

- Controlador Bluetooth®, conocido también como *hardware* o módulo Bluetooth®, del que forman parte los tres niveles inferiores: radio Bluetooth®, Banda Base (BB, *Baseband*) y el Protocolo de Gestión de Enlace (LMP, *Link Manager Protocol*).
- Anfitrión, al que pertenece el nivel de Protocolo de Control y Adaptación del Enlace Lógico (L2CAP, *Logical Link Control and Adaptation Protocol*) y los demás niveles superiores.

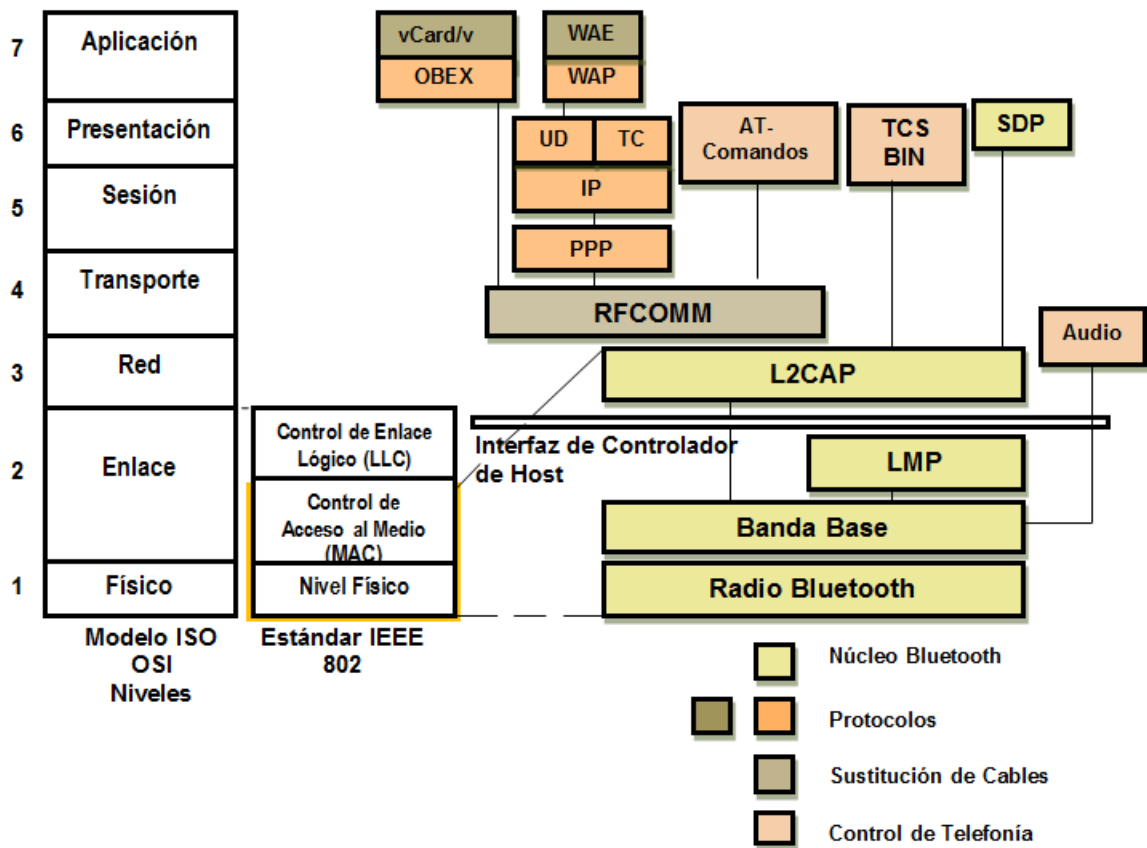


Figura 1.5. Relación del Modelo de Referencia OSI con la Arquitectura Bluetooth® y Pila de Protocolos [3].

Los protocolos del núcleo de Bluetooth® son requeridos por la mayoría de los dispositivos de esta tecnología, mientras que los demás se utilizan sólo cuando es necesario. Los niveles lógicos de sustitución de cables, de control de telefonía y de protocolos adoptados agrupan a los protocolos orientados a aplicación, permitiendo así a los diferentes sistemas existentes o futuros correr sobre el núcleo de Bluetooth®.

A continuación se realiza una descripción de los protocolos que emplea Bluetooth® en su núcleo, los cuales son la base de su funcionamiento.

1.2.1.1. Radio Bluetooth®

El nivel radio Bluetooth® tiene como función principal permitir el enlace físico por radio frecuencia entre unidades Bluetooth® dentro de una picored. Este nivel actúa como

intermediario entre el nivel físico y banda base transformando el flujo de datos al formato requerido [2].

Bluetooth® opera en la banda de frecuencia de 2.4 GHz, con 79 canales de RF, donde la frecuencia central de cada canal es igual a $f \text{ (MHz)} = 2402 + k$, siendo $k = 0, \dots, 78$ con una separación entre canales de 1 MHz, tal y como se muestra en la figura 1.6 [4].

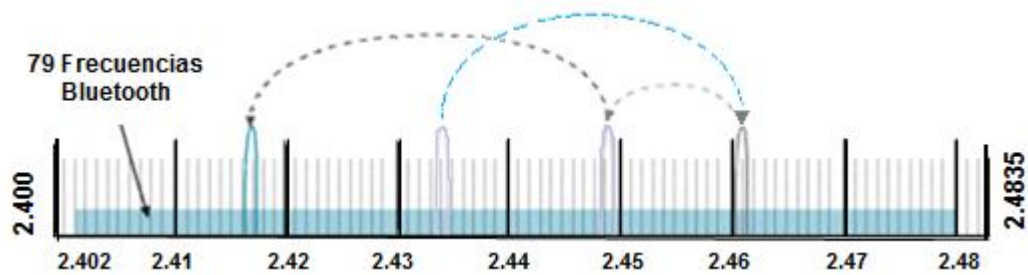


Figura 1.6. Asignación de Canales Banda ISM de 2.4 GHz [10].

Con el fin de cumplir con las regulaciones de cada país el IEEE 802.15.1 maneja márgenes de protección respecto al ancho de banda de trabajo, así pues, la banda de guarda superior es de 3 MHz y la inferior es de 1.5 MHz [4].

Los dispositivos Bluetooth pueden ser de tres clases, de acuerdo a su potencia de transmisión como se observa en la tabla 1.3. Con base en esto, se debe tener en cuenta que el alcance efectivo de un dispositivo se extiende cuando se conecta a un transceptor de mayor potencia.

Clase	Máxima Potencia Permitida	Alcance
Clase 1	100 mW (20 dBm)	~100 m
Clase 2	2.5 mW (4 dBm)	~10 m
Clase 3	1 mW (0 dBm)	~1m

Tabla 1.3. Clases de Dispositivos Bluetooth® [2] [11].

Bluetooth® emplea modulación GFSK, alcanzando velocidades de transmisión de datos de 1 Mbps. Con la introducción de la versión 2.0 + EDR se soportan velocidades de transmisión de datos superiores, al incorporar dos nuevos sistemas de modulación, lo que permite aumentar de dos a tres veces el número de bits por símbolo transmitidos. El incremento en la velocidad de transmisión de datos por encima del valor básico de 1 Mbps se consigue al modular la portadora de RF mediante uno de los dos esquemas posibles de Modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial (DPSK): $\pi/4$ Modulación por Desplazamiento de Fase Cuaternario Diferencial ($\pi/4$ - DQPSK) y Modulación por

Desplazamiento de Fase 8 Diferencial (8DPSK), proporcionando respectivamente velocidades máximas de transmisión de datos de 2 Mbps y 3 Mbps [12] [4].

En el diseño de un radioenlace, uno de los parámetros con mayor importancia es la sensibilidad del equipo receptor, el cual determina fundamentalmente el alcance del sistema. En Bluetooth® según [2] para una Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*) del 0.1%, la sensibilidad de recepción debe ser inferior o igual a -70 dBm.

1.2.1.2. Banda Base

El nivel banda base controla las operaciones sobre los bits y paquetes, proporcionando servicios tales como: información de conexión, control de flujo de la transmisión, corrección y detección de errores, composición y descomposición de paquetes Bluetooth®, selección de canales y seguridad [13] [14].

El estándar IEEE 802.15.1 [2] establece que el esquema TDD es usado cuando maestro y esclavo transmiten datos haciendo uso de la misma frecuencia pero en diferentes instantes de tiempo. De acuerdo con este esquema, el maestro y los esclavos alternan sus transmisiones. Los 79 canales de radiofrecuencia se acceden de acuerdo a una secuencia de saltos, con un valor de saltos estándar de 1600 saltos por segundo. El canal físico está dividido en ranuras o intervalos de tiempo (*slots* o *timeslots*), cada ranura de tiempo corresponde a una frecuencia de salto y tiene una duración estándar de 625 μ s. En una transmisión, cada paquete (figura 1.7 y 1.8) debe estar alineado con el inicio de una ranura.

En la figura 1.7 se presenta el formato básico de un paquete Bluetooth®, el cual consta de tres campos, y en la figura 1.8 el formato de un paquete Bluetooth® definido para la versión 2.0 + EDR [4] [15].

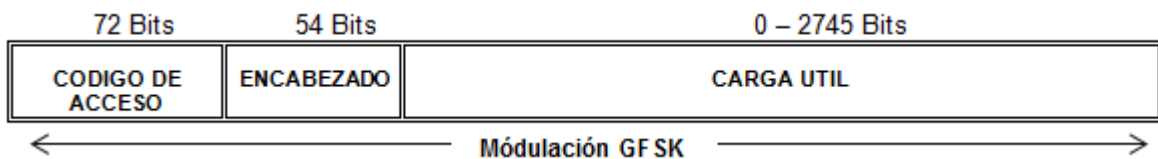


Figura 1.7. Formato Básico de un Paquete Bluetooth®.

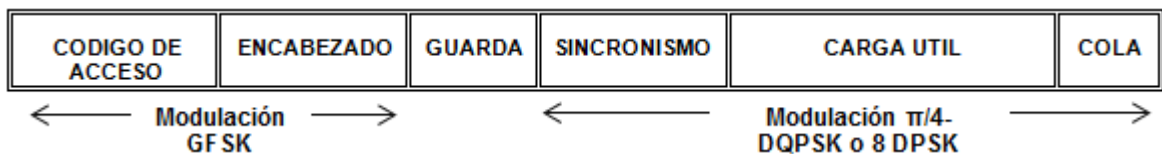


Figura 1.8. Formato de un Paquete Bluetooth® Versión 2.0 + EDR.

En los sistemas Bluetooth® versión 2.0 + EDR, para mantener la compatibilidad con versiones anteriores, la información de código de acceso y encabezado son moduladas utilizando el esquema de modulación GFSK, la secuencia de sincronismo, la carga útil y la secuencia de cola son moduladas empleando $\pi/4$ - DQPSK u 8DPSK.

El código de acceso se utiliza para identificar las comunicaciones asociadas a un canal físico determinado, y para excluir o ignorar los paquetes correspondiente a un canal físico distinto, con la misma portadora RF [14]. El encabezado contiene información de control específica del nivel banda base. Debido al cambio de modulación en el paquete EDR, es necesaria más información de temporización y control para poder sincronizarse con el nuevo formato de modulación, por lo tanto después del encabezado hay un breve periodo que permite al dispositivo Bluetooth® prepararse para el cambio de modulación. Este breve periodo, o tiempo de guarda, está definido entre 4.75 μs y 5.25 μs . El tiempo de guarda va seguido de una secuencia de sincronismo que contiene un símbolo de referencia y diez símbolos DPSK [16]. La carga útil contiene voz y datos y puede también incluir información para detección y/o corrección de errores, dependiendo del tipo de paquete transmitido. Para finalizar la transmisión de la carga útil, se agregan dos símbolos EDR en la cola, correspondientes a secuencias de valor 0 [4] [15].

Como ejemplo del uso de dos esquemas de modulación en un paquete EDR, la figura 1.9 muestra la potencia con respecto al tiempo de duración del paquete empleando modulación GFSK en el código de acceso y el encabezado, así como modulación 8DPSK en la carga útil. La duración del paquete es de aproximadamente 450 μs , valor que se encuentra dentro de la duración de una ranura de tiempo (625 μs) [15] [16].

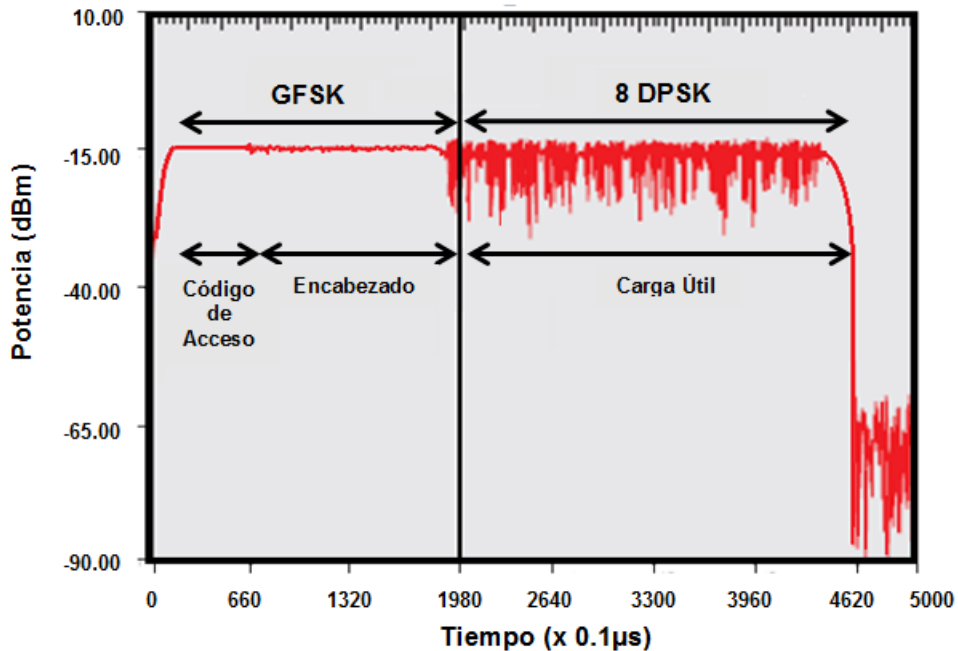


Figura 1.9. Potencia con Respecto al Tiempo de un Paquete EDR [16].

En la figura 1.10 se presenta la potencia con respecto al tiempo de duración de un paquete EDR, señalando el tiempo de guarda y los once bits de sincronismo al comienzo de la carga útil [15] [16].

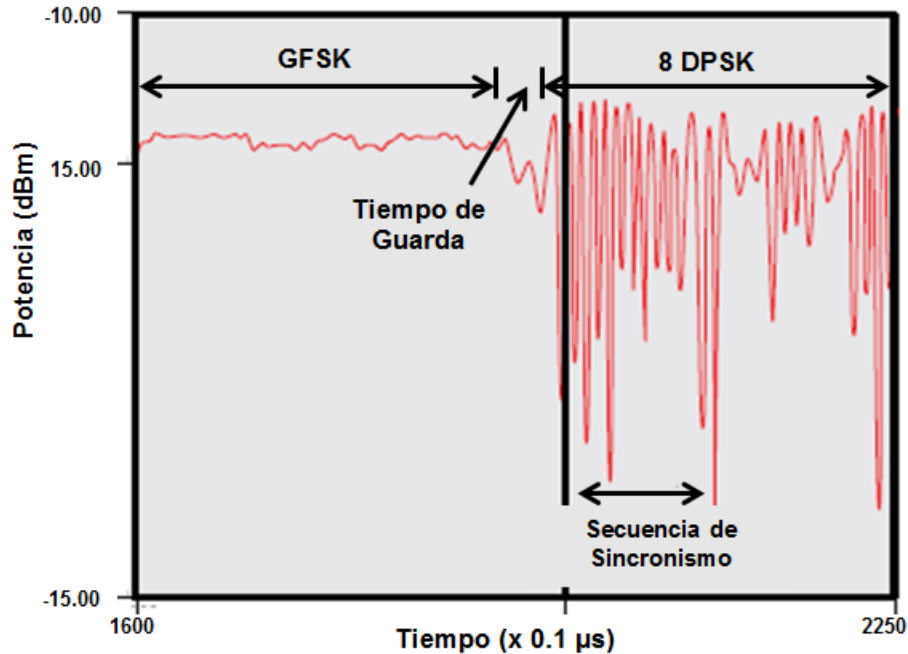


Figura 1.10. Potencia con Respecto al Tiempo de un Paquete EDR II [16].

El nivel de banda base maneja dos tipos de transportes lógicos básicos entre maestro y esclavos [14] [15]:

- Sincrono Orientado a Conexión (SCO, *Synchronous Connection Oriented*): es un transporte lógico simétrico, punto a punto entre maestro y un esclavo de la picored. Empleado para el envío de información síncrona (voz), para lo que realiza una reserva de ranuras de transmisión.
- Asíncrono sin Conexión (ACL, *Asynchronous Connection Less*): es un transporte lógico simétrico o asimétrico, punto a multipunto entre el maestro y uno o más esclavos activos en la picored. Empleado para el envío de información asíncrona (datos) que puede ocupar las ranuras disponibles, no utilizadas para conexiones SCO.

Los siguientes tipos de transportes lógicos fueron incorporados en la versión 2.0 + EDR y versiones posteriores [14] [15]:

- Conexión Síncrona Extendida - Orientada (eSCO, *Extended Synchronous Connection - Oriented*): es un transporte lógico simétrico o asimétrico, punto a punto entre el

maestro y un esclavo de la piconet. Empleado para el envío de información síncrona. Al igual que en SCO, eSCO reserva ranuras.

- **Difusión para Esclavo Activo (ASB, *Active Slave Broadcast*):** es un transporte lógico empleado por el maestro cuando transmite a todos los esclavos activos.
- **Difusión para Esclavo Estacionado (PSB, *Parked Slave Broadcast*):** es un transporte lógico empleado por el maestro para comunicarse con los esclavos que se encuentran sincronizados a la red.

Además se distingue tres entidades en el nivel banda base de la versión 2.0 + EDR [14]:

- **Administrador de dispositivos:** es la entidad responsable de controlar el comportamiento general del dispositivo Bluetooth® y de todas aquellas funciones que no están directamente relacionadas con el transporte de datos, tales como la búsqueda de dispositivos o el establecimiento de conexiones.
- **Administrador de recursos banda base:** es la entidad responsable del acceso al medio radio, desempeñando dos funciones principales: la negociación de los parámetros de calidad de servicio con las entidades que van a hacer uso del medio físico, y la planificación de tareas con el fin de garantizar los criterios de calidad acordados.
- **Controlador de enlace:** es la entidad encargada de la codificación y decodificación de paquetes Bluetooth® y de la señalización del protocolo relativa al control de flujo y retransmisiones.

1.2.1.3. Protocolo de Gestión de Enlace

El nivel LMP, es el protocolo responsable de la configuración, el establecimiento y control de conexión entre dispositivos a través de Bluetooth®. Se utiliza para comunicar los gestores de enlace que unen los dispositivos a través del enlace orientado a la conexión asíncrona [2]. Este nivel controla el funcionamiento de los dispositivos en la piconet y proporciona servicios de gestión en los niveles inferiores del modelo de referencia OSI: radio Bluetooth® y banda base. Esto se lleva a cabo mediante mensajes enviados en la carga útil y no en los mensajes de datos del L2CAP, logrando el establecimiento del enlace en ambos dispositivos. Los mensajes LMP son separados de los demás por medio de un valor reservado en uno de los campos del encabezado y son extraídos e interpretados por el nivel LMP del receptor, esto significa que ningún mensaje es enviado a niveles superiores.

LMP también se encarga de las tareas relacionadas con la seguridad: autenticación y cifrado; generación, intercambio y comprobación de las claves de enlace [3]; control de paquetes; control de potencia y Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*).

1.2.1.4. Interfaz del Controlador de Anfitrión

El nivel de Interfaz Controlador de Anfitrión (HCI, *Host Controller Interface*) proporciona a los niveles integrados en el anfitrión una interfaz de comandos para la comunicación con el controlador Bluetooth®.

El nivel HCI está constituido, por tres componentes:

- HCI controlador (*driver*): se encuentra en el anfitrión, siendo el encargado de enviar comandos HCI al HCI firmware y recibir asincrónicamente notificaciones de eventos HCI e interpretarlos.
- Nivel de Transporte Controlador de Anfitrión (HCTL, *Host Controller Transport Layer*): permite el intercambio de información entre el driver HCI y firmware HCI. Existen tres posibles implementaciones: UART, RS232 y USB.
- HCI *Firmware*: *software* grabado en una Memoria de Solo Lectura (ROM, *Read Only Memory*), que establece la lógica de más bajo nivel que configura y gestiona el *hardware* en un sistema.

La especificación de esta interfaz de comunicación define [14] [17]:

- Comandos HCI: son generados por el anfitrión para consultar registros *hardware* o iniciar una tarea, como por ejemplo, la búsqueda de dispositivos, el establecimiento de una conexión, o la configuración de parámetros de una conexión.
- Eventos HCI: son generados por el controlador Bluetooth® en respuesta a los comandos HCI, o bien, para notificar la ocurrencia de un evento.
- El formato de los paquetes utilizados para la transferencia de datos ACL y SCO entre el anfitrión y el controlador Bluetooth®.
- El mecanismo de control de flujo usado en la comunicación entre el anfitrión y el controlador Bluetooth®.

1.2.1.5. Protocolo de Control y Adaptación del Enlace Lógico

El nivel L2CAP se encarga de adaptar los protocolos superiores al protocolo de banda base. Este nivel brinda servicios orientados o no orientados a la conexión en niveles superiores y proporciona los siguientes servicios [14] [17]:

- Multiplexación de los protocolos de niveles superiores con el fin de enviar varios protocolos sobre un canal banda base.

- Segmentación y Ensamblado (SAR, *Segmentation And Reassembling*), para dar soporte a aplicaciones que generen un formato de datos demasiado grande.
- Gestión de grupos, para proyectar o mapear eficientemente los grupos de protocolos de nivel superior en picoredes.
- Negociación de los requisitos de calidad de servicio entre dispositivos.

1.2.1.6. Protocolo de Descubrimiento de Servicios

El nivel de Protocolo de Descubrimiento de Servicios (SDP, *Service Discovery Protocol*) proporciona un mecanismo que permite a las aplicaciones descubrir cuáles son los servicios disponibles en otros dispositivos Bluetooth® cercanos y determinar las características específicas de éstos [7].

Las unidades Bluetooth® que usan el SDP pueden ser vistas como un servidor y un cliente. El servidor posee los servicios y el cliente es quien desea acceder a ellos. En el SDP esto es posible ya que el cliente envía una petición al servidor y el servidor responde con un mensaje. El SDP solamente soporta el descubrimiento del servicio, no la llamada del servicio [18].

1.2.2. Perfiles Bluetooth®

Los perfiles Bluetooth® fueron definidos por el SIG para evitar diferentes interpretaciones del estándar IEEE 802.15.1, acerca de cómo un tipo específico de aplicación debería ser implementada [18], y de esta forma garantizar que dos dispositivos de diferentes fabricantes interactúen correctamente, permitiendo que no sea obligatorio implementar en un dispositivo toda la pila de protocolos, sólo los necesarios para esa aplicación.

Existen cuatro perfiles generales descritos a continuación.

- **Perfil de Acceso Genérico**

El Perfil de Acceso Genérico (GAP, *Generic Access Profile*) define los procedimientos generales para descubrimiento y establecimiento de conexión entre dispositivos Bluetooth®, siendo indiferente su aplicación o fabricante. También define los aspectos relacionados con la seguridad del dispositivo y determina cuales son los servicios que soportan su conexión, para el intercambio de datos.

- **Perfil de Aplicación del Descubrimiento de Servicio**

El Perfil de Aplicación para el Descubrimiento de Servicios (SDAP, *Service Discovery Application Profile*) define los requerimientos necesarios para la comunicación entre

unidades con características similares, con el fin de descubrir los servicios registrados en otros dispositivos Bluetooth® y obtener información con respecto a estos servicios, por medio del protocolo SDP.

- **Perfil de Puerto Serie**

El Perfil de Puerto Serial (SPP, *Serial Port Profile*) define los requerimientos específicos que permiten la emulación del puerto serie en los dispositivos Bluetooth® usando el protocolo de Comunicación por Radio Frecuencia (RFCOMM, *Radio Frequency Communication*).

- **Perfil Genérico de Intercambio de Objetos**

El Perfil Genérico de Intercambio de Objetos (GOEP, *Generic Object Exchange Profile*) define los protocolos y el medio por el cual los dispositivos Bluetooth® deben soportar los modelos de intercambio de objetos. Este perfil incluye la transferencia de archivos (*file transfer*), carga de objetos (*object push*) y sincronización, basados en el Protocolo de Intercambio de Objetos (OBEX, *Object Exchange Protocol*).

1.3. ESPECTRO ENSANCHADO

El Espectro Ensanchado (SS, *Spread Spectrum*) es una técnica de transmisión que consiste en distribuir la potencia de la señal en un ancho de banda mayor que el mínimo necesario para transmitir la misma información en banda base [19].

Las principales técnicas de transmisión de espectro ensanchado son: Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*), Espectro Ensanchado por Saltos en Frecuencia (FHSS), y Espectro Ensanchado por Saltos en Tiempo (THSS, *Time Hopping Spread Spectrum*).

A continuación se trata únicamente la técnica FHSS, usada por la tecnología Bluetooth®, siendo esta el objetivo de estudio de este trabajo de grado.

1.3.1. Espectro Ensanchado por Saltos en Frecuencia

En esta técnica la banda de frecuencias asignada se divide en varias sub-bandas de menor frecuencia llamadas canales. Un transmisor utiliza cada canal durante un periodo corto de tiempo antes de pasar a un canal diferente. Es decir, se transmite una parte de la información en una determinada frecuencia durante un intervalo de tiempo (*dwell time*) inferior a 400 ms, pasado este tiempo se cambia de canal y se sigue transmitiendo en otra frecuencia [13].

El orden en los saltos en frecuencia, se determina según una secuencia pseudo aleatoria o de Pseudo Ruido (PN, *Pseudo Noise*), que tanto el emisor como el receptor deben conocer. Esta secuencia se define como un conjunto de señales binarias, periódicas y de cierta longitud de tal forma que, dentro de un determinado periodo, la señal puede aproximarse a una señal aleatoria.

La transmisión mediante saltos en frecuencia en un espectro ensanchado implica tener procesos de sincronización eficientes para que el receptor detecte correctamente la portadora y realice una adecuada detección de la información transmitida [20]. Permitiendo que aunque se cambie de canal físico, a nivel lógico se mantenga un solo canal por el que se realiza la comunicación.

El proceso de FHSS empieza cuando la señal de información es modulada, entre tanto el sintetizador genera una de las muchas frecuencias de acuerdo a un bloque de bits que proporciona el generador de secuencias pseudo aleatorias. La señal generada por el sintetizador es multiplicada mediante un mezclador con la señal de información modulada, trasladando esta última a la frecuencia de la señal del sintetizador [20]. En la figura 1.11, se muestra el diagrama en bloques de un sistema FHSS.

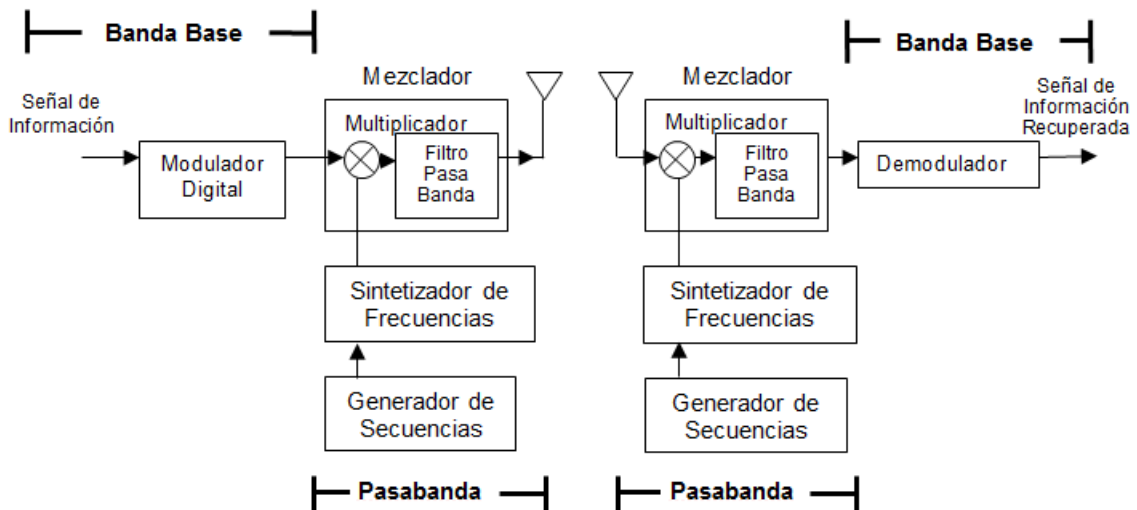


Figura 1.11. Diagrama en Bloques Sistema FHSS.

Por su parte el receptor para recibir correctamente la señal debe disponer del mismo patrón de salto y estar en sincronía con el transmisor para sintonizar cada una de las frecuencias en el momento correcto, es decir, el generador de secuencias debe estar sincronizado con la señal recibida y así generar la misma secuencia que le fue aplicada a la información al ser transmitida, para que el demodulador obtenga la información original [21] [22].

La información es transmitida en canales que tienen un ancho de banda Δf_{ch} , como se observa en la figura 1.12.

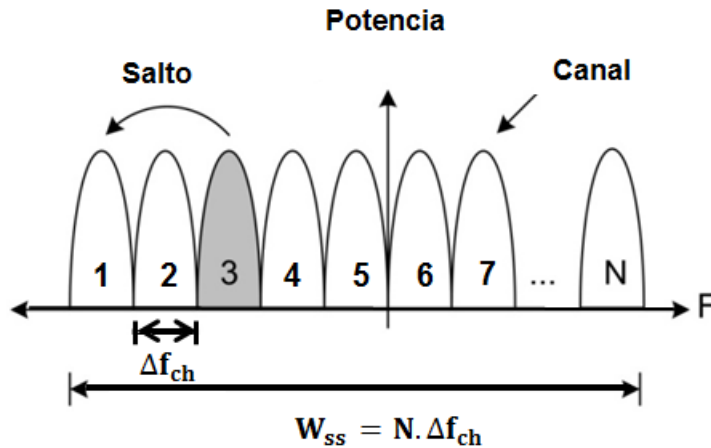


Figura 1.12. Saltos en Frecuencia de un Sistema FHSS [20].

El ancho de banda de RF disponible, está representado por la ecuación 1.1 [20].

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

Donde

W_{ss} : Ancho de banda espectral disponible.
 Δf_{ch} : Ancho de banda de canal.

El número de canales disponibles está determinado por la longitud de la secuencia pseudo aleatoria, tal y como se expresa en la ecuación 1.2 [20].

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

Donde

k : Número de bits de la secuencia pseudo aleatoria, siendo $k=7$ para sistemas Bluetooth.
 N : Número de canales disponibles.

1.3.1.1 Tipos de Saltos en Frecuencia

FHSS maneja dos tipos de saltos en frecuencia:

- Salto en frecuencia lento: consiste en transmitir múltiples símbolos en cada canal de salto, por lo cual la tasa de saltos del sistema es menor o igual que la tasa de

símbolos [19], y por lo tanto el tiempo de salto es mayor o igual al tiempo de símbolo, tal y como se expresa en las ecuaciones 1.3 y 1.5.

$$R_h[\text{saltos/s}] \leq R_s[\text{símbolo/s}] \quad (1.3)$$

$$\frac{1}{T_h[\text{s}]} \leq \frac{1}{T_s[\text{s}]} \quad (1.4)$$

$$T_h[\text{s}] \geq T_s[\text{s}] \quad (1.5)$$

- Salto en frecuencia rápido: consiste en transmitir cada símbolo en múltiples frecuencias, por lo cual la tasa de saltos del sistema es mayor o igual que la tasa de símbolos, y por lo tanto el tiempo de salto es menor o igual al tiempo de símbolo, tal y como se expresa en las ecuaciones 1.6 y 1.8.

$$R_h[\text{saltos/s}] \geq R_s[\text{símbolo/s}] \quad (1.6)$$

$$\frac{1}{T_h[\text{s}]} \geq \frac{1}{T_s[\text{s}]} \quad (1.7)$$

$$T_h[\text{s}] \leq T_s[\text{s}] \quad (1.8)$$

Siendo R_s , tal y como se expresa en la ecuación 1.9.

$$R_s[\text{símbolo/s}] = \frac{R_b[\text{bit/s}]}{K[\text{bit/símbolo}]} \quad (1.9)$$

Donde

R_h : Tasa de datos.

T_h : Tiempo de saltos.

R_s : Tasa de símbolos.

T_s : Tiempo de símbolos.

R_b : Tasa de bits.

K : Número de bits por símbolo, determinado por la ecuación 1.10.

$$K = \log_2 M \quad (1.10)$$

Donde

M : Orden de modulación.

En la figura 1.13, se presenta los saltos de un sistema FHSS con salto lento en frecuencia y modulación 4-FSK. El número de bits de la secuencia pseudo aleatoria es de 2, por lo tanto según la ecuación 1.2 el número de canales disponibles es 4. En la figura 1.13 se aprecia como la portadora salta en canal después de transmitir dos símbolos (T es la duración de un bit de la señal de entrada).

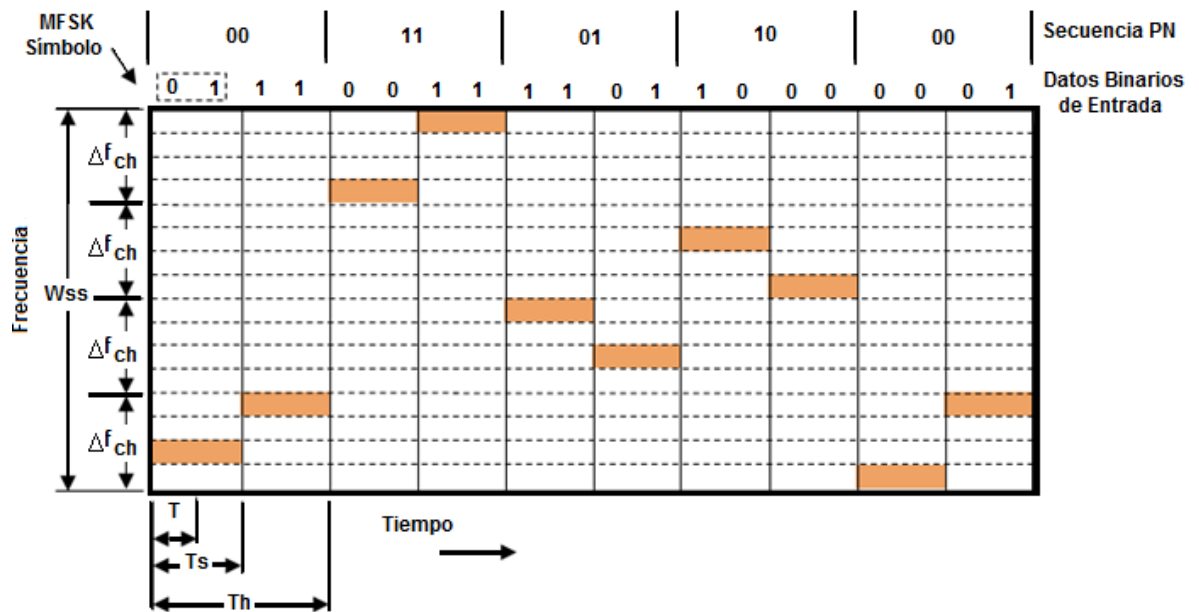


Figura 1.13. Sistema FHSS con Salto Lento en Frecuencia y Modulación 4-FSK.

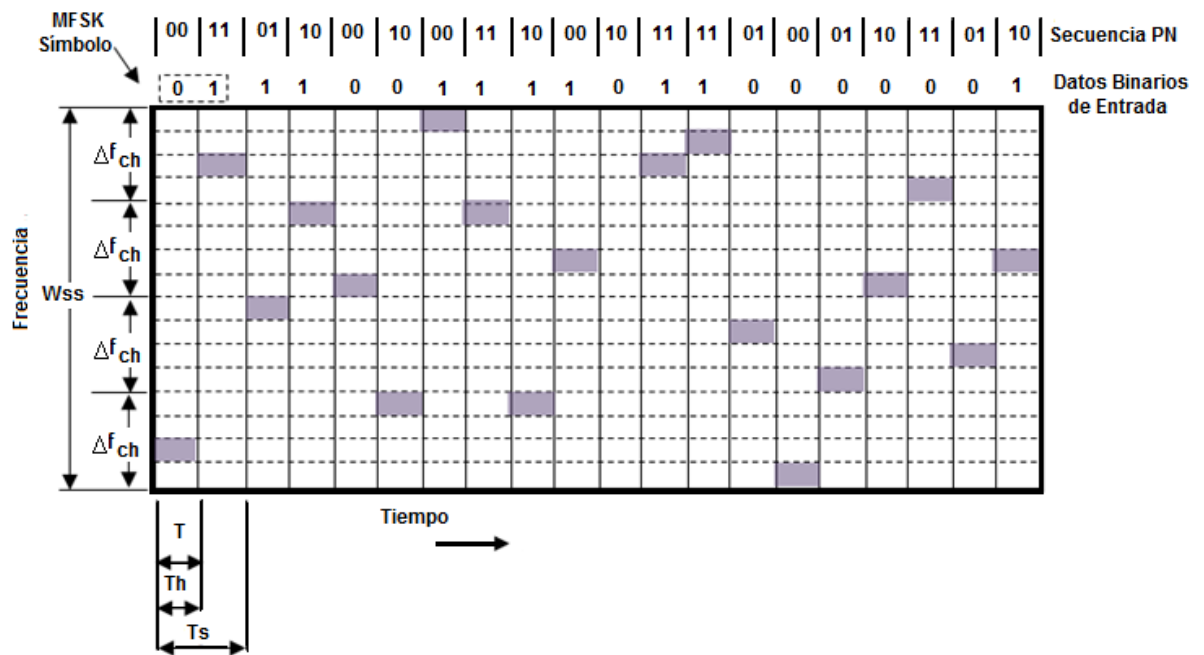


Figura 1.14. Sistema FHSS con Salto Rápido en Frecuencia y Modulación 4-FSK.

En la figura 1.14, se presenta los saltos de un sistema FHSS con salto rápido en frecuencia y modulación 4-FSK. El número de bits de la secuencia pseudo aleatoria es de 2, por lo tanto según la ecuación 1.2 el número total de canales es 4. En la figura 1.14 se aprecia como la portadora salta dos veces en frecuencia para transmitir un símbolo.

1.3.2. Ventajas de la Técnica FHSS

Al desarrollar sistemas de comunicaciones siempre se debe tratar de emplear el ancho de banda del canal de comunicación disponible en forma eficiente. Para lograr dicho objetivo se debe tener en cuenta la inmunidad ante las interferencias y el ruido y la protección de la información transmitida [21].

La técnica FHSS ofrece la posibilidad de que varios usuarios empleen la misma banda de frecuencia con una mínima presencia de interferencia. En la figura 1.15 se observa la operación en tiempo y frecuencia de dos sistemas transmitiendo de manera simultánea pero con una secuencia de salto diferente [23] [24]; 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 ve afectado en caso de que ambas señales coincidan en la misma frecuencia y en el mismo instante de tiempo.

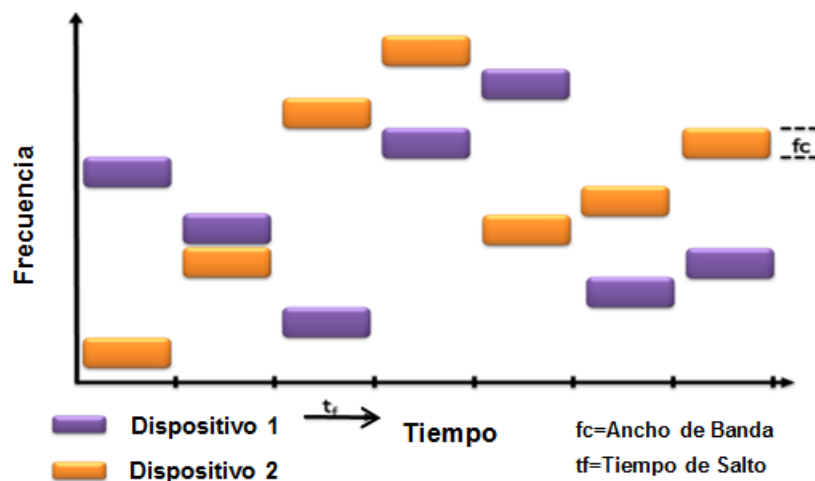


Figura 1.15. Modelo de Saltos en Frecuencia de FHSS para 2 Dispositivos [21].

Por otra parte FHSS brinda Baja Probabilidad a Interceptación (LPI, *Low Probability Intercept*) gracias a que utiliza todo el espectro de frecuencias disponible para transmitir la información, en canales que son seleccionados de manera pseudo aleatoria. Por éste motivo si un intruso desea interceptar una comunicación debe analizar un amplio espectro de frecuencias, o tener conocimiento de las secuencias pseudo aleatorias utilizadas [23].

Al transmitir señales en radio frecuencia, estas pueden tomar más de una ruta debido a fenómenos como la reflexión, refracción, dispersión y difracción, generando distorsión en la señal de datos recibida por el receptor. Los sistemas FHSS tienen una alta inmunidad al efecto producido por este tipo de fenómenos.

Es importante resaltar que esta técnica implementa diversidad en frecuencia dado que se utilizan múltiples canales con lo cual se evitan posibles problemas en algunos de ellos, tales como desvanecimiento profundo o interferencia elevada.

1.4. TÉCNICAS DE MODULACIÓN EMPLEADAS POR BLUETOOTH®

Se denomina modulación al proceso mediante el cual ciertas características de una onda denominada portadora, se modifican en función de otra denominada moduladora, que contiene información, para que esta última pueda ser enviada a través del canal de comunicación hasta el receptor. La onda en condiciones de ser transmitida. Se denomina señal modulada. En el receptor es realizado el proceso inverso (demodulación). Bluetooth® emplea los siguientes tipos de modulación.

1.4.1. Modulación por Desplazamiento de Frecuencia Gaussiana

GFSK es una versión mejorada de la Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (FSK, *Frequency Shift Keying*). Siendo FSK una técnica de modulación de frecuencia donde la señal de datos o moduladora es digital. Los dos valores binarios se representan con dos frecuencias diferentes f_1 y f_2 próximas a las frecuencia de la señal portadora f_p , tal y como se observa en la figura 1.16 y en la ecuación 1.11 [22] [25].

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_1 t) & \text{para un "1" binario} \\ A \cos(2\pi f_2 t) & \text{para un "0" binario} \end{cases} \quad (1.11)$$

Donde f_1 y f_2 , generalmente corresponden a desplazamientos de igual magnitud pero en sentidos opuestos de la frecuencia de la señal portadora.

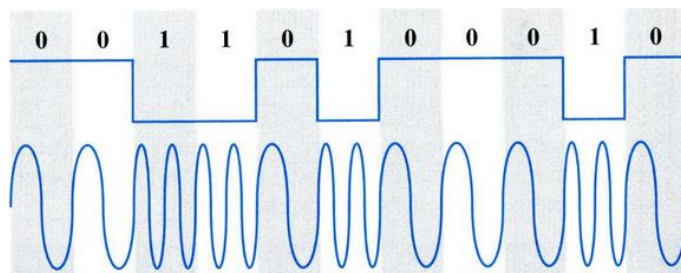


Figura 1.16. Modulación FSK [25].

Existen dos tipos de modulación FSK: coherente y no coherente, descritas a continuación.

- **FSK coherente**

En FSK coherente no se produce cambio de fase de la señal cuando se presenta una conmutación de frecuencia, es decir, al pasar de f_1 a f_2 , la fase de la primera permanece. Igual ocurre al pasar de f_2 a f_1 .

- **FSK no coherente**

En FSK no coherente se produce cambio de fase de la señal cuando se presenta una conmutación de frecuencia, es decir, al pasar de f_1 a f_2 , la fase de la primera no permanece. Igual ocurre al pasar de f_2 a f_1 , produciéndose un cambio sistemático con cada conmutación.

En la figura 1.17 se muestran las curvas de la probabilidad de error teórico para FSK coherente y no coherente. Se determina que la probabilidad de error para FSK no coherente es mayor que la de FSK coherente.

La demodulación coherente FSK es poco empleada, contrario a la demodulación coherente comúnmente empleada por su facilidad en la detección de la señal.

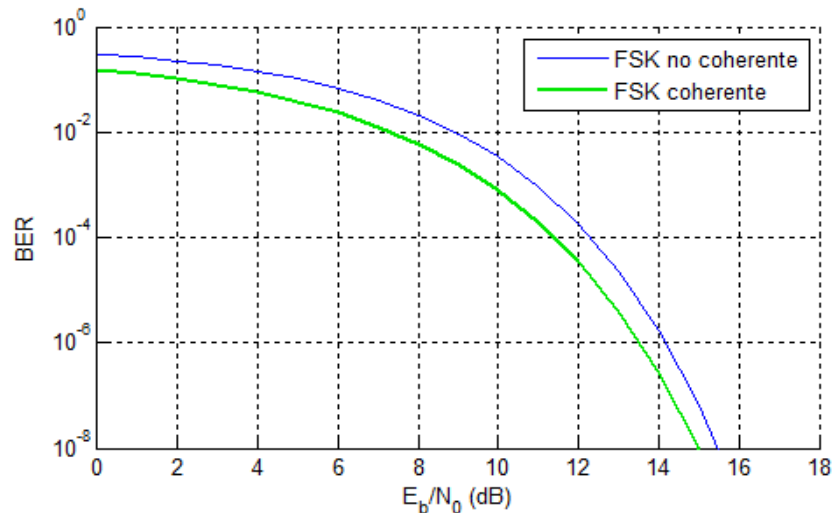


Figura 1.17. Probabilidad de Error para la Modulación FSK Coherente y no Coherente.

El objetivo de la modulación GFSK es obtener un sistema más eficiente con respecto a FSK en cuanto al uso del ancho de banda, para lo cual hace uso de un filtro Gaussiano para suavizar las transiciones entre ceros y unos [26]. tal como se representa en la figura 1.18, en donde se observa un espectro de frecuencias significativamente más angosto

para GFSK, lo cual permite incrementar la eficiencia espectral dada por la ecuación 1.12 [27].

$$n = \frac{R_b}{BW} \quad (1.12)$$

La ecuación 1.12 relaciona la velocidad de transmisión de datos R_b y el ancho de banda BW ocupado por la señal, permitiendo de esta manera mayores velocidades de transmisión de datos con el mismo ancho de banda en comparación a FSK. En redes inalámbricas, el uso del espectro de frecuencias es limitado, por lo tanto esta característica resulta favorable.

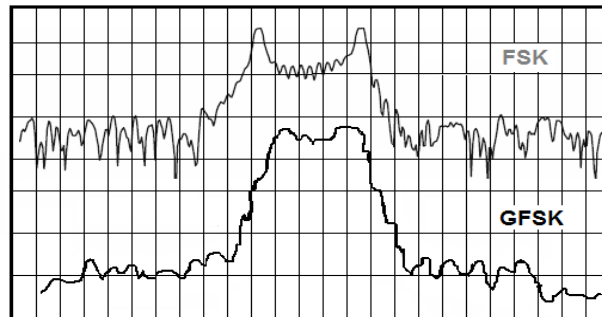


Figura 1.18. Espectro FSK y GFSK.

La figura 1.19 presenta la variación del espectro de una señal modulada GFSK en el dominio de la frecuencia para diferentes valores de Ancho de Banda por Tiempo (BT). Se observa que a medida que BT disminuye, los niveles de los lóbulos se atenúan rápidamente.

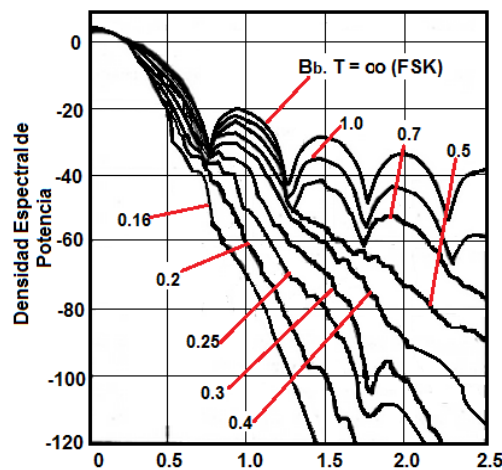


Figura 1.19. Densidad Espectral de Potencia de una Señal GFSK para Varios BT [28].

La disminución del ancho de banda del filtro mejora el desempeño global de los sistemas de comunicaciones reduciendo el ancho de banda requerido (mayor eficiencia espectral) [29], pero incrementa la Interferencia Intersimbólica (ISI, *Intersymbol Interference*), como se observa en la figura 1.20, donde el diagrama de ojo se encuentra perfectamente abierto para $BT=0.6$ y a medida que este valor disminuye el diagrama va cerrando su apertura paulatinamente.

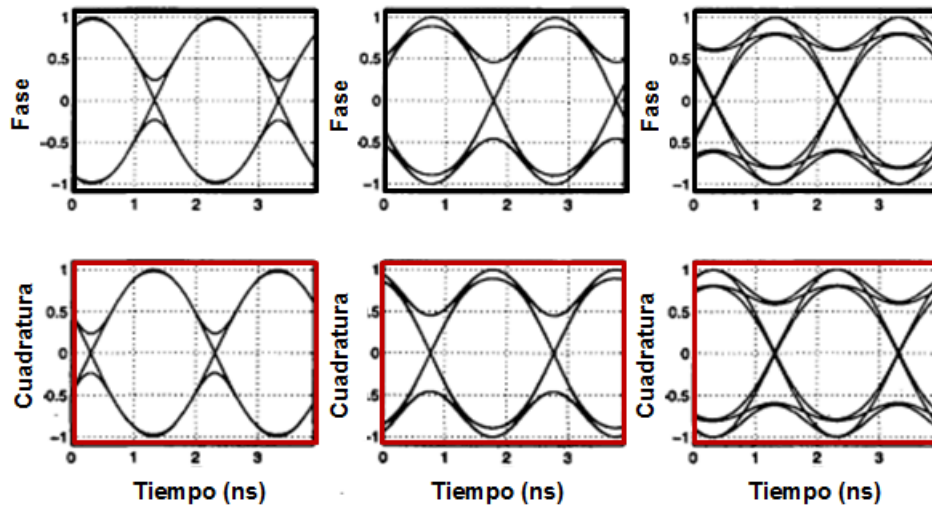


Figura 1.20. Diagrama de Ojo de las componentes en Fase y Cuadratura para GFSK. a) $BT=0.6$, b) $BT=0.35$, c) $BT=0.25$ [30].

El filtro gaussiano pasa bajo utilizado en la modulación GFSK por Bluetooth® limita las componentes de frecuencia de acuerdo al valor del parámetro BT :

$$BT = 0.5$$

En la modulación GFSK, se tiene que un 1 lógico se representa mediante una desviación positiva o incremento de la frecuencia de la onda portadora, y un 0 lógico se representa mediante una desviación negativa o decremento de la frecuencia de la misma. De esta manera, las frecuencias que representan un 1 y un 0 se denominan frecuencias de marca (f_1) y espacio (f_2) respectivamente, y se encuentran separadas entre sí $2\Delta f$, en donde Δf se denomina desviación de frecuencia.

El índice de modulación para GFSK digital, está dado por la ecuación (1.13) [31]:

$$MI = \frac{2\Delta f[\text{Hz}]}{R_b[\text{Hz}]} \quad (1.13)$$

Donde

MI : Índice de modulación.

Δf : Desviación de frecuencia pico de la portadora.
 R_b : Velocidad de transmisión de datos.

Bluetooth® proporciona una velocidad máxima de transmisión de datos con GFSK de 1 Mbps mediante la modulación de un bit por símbolo. El índice de modulación debe estar entre 0.28 y 0.35 y la desviación de frecuencia máxima entre 140 Kbps y 175 Kbps.

1.4.2. Modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial

La Modulación por Desplazamiento de Fase Diferencia (DPSK) es una técnica derivada de la modulación PSK, donde la fase de una portadora de amplitud constante es el parámetro que se varía para la transmisión de información. En PSK la fase de la señal portadora varía entre 0° y 180° . Una fase de salida representa un 0 lógico, y la otra un 1 lógico. Cuando la señal de entrada digital cambia de estado, la fase de la portadora de salida varía entre los dos ángulos, tal y como se observa en la ecuación 1.14.

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t + \pi) & \text{para un "1" binario} \\ A \cos(2\pi f_c t) & \text{para un "0" binario} \end{cases} \quad (1.14)$$

En DPSK, la referencia de fase para la modulación se deriva a partir de la fase de la portadora en el intervalo de señalización anterior, el receptor decodifica la información digital basada en dicha diferencia de fase. La fase es codificada, no con respecto a un valor absoluto como en PSK; 0° para un "0 binario" y 180° para un "1 binario", sino por codificación diferencial en términos del cambio de fase entre intervalos sucesivos, por ejemplo, 0° de desfase en el intervalo anterior puede designar un "0 binario", mientras que un desfase de 180° puede designar un "1 binario".

La figura 1.21 presenta el comportamiento de la señal modulada con PSK y DPSK.

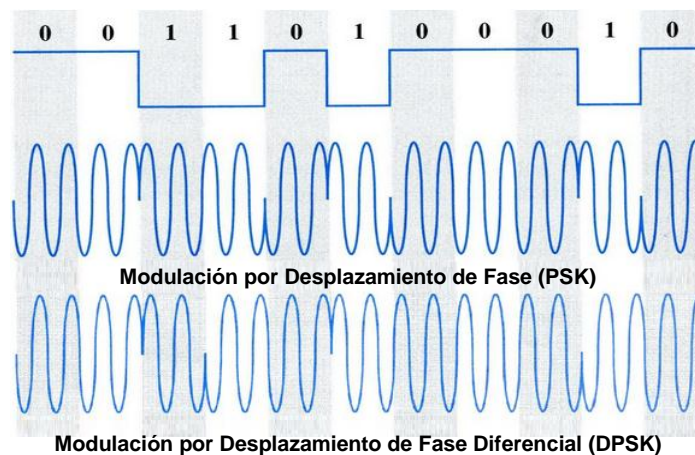


Figura 1.21. Modulación PSK y DPSK.

Nótese que el número de transiciones en DPSK disminuye en relación con el número de transiciones en PSK; en efecto, en la secuencia de 11 dígitos binarios la señal PSK tiene 6 transiciones y al codificarla diferencialmente el número de transiciones disminuye a 4. Teniendo en cuenta que las transiciones producen efectos indeseables que perjudican la sincronización de temporización, es evidente que en DPSK la disminución de estas corresponde a un aspecto favorable para los sistemas que emplean esta modulación.

La modulación PSK emplea demodulación coherente a diferencia de DPSK que utiliza demodulación no coherente, por lo tanto DPSK usa circuitos de detección menos complejos que en PSK.

Como ya había sido mencionado, Bluetooth® emplea dos esquemas posibles de Modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial (DPSK): $\pi/4$ Modulación por Desplazamiento de Fase Cuaternario Diferencial ($\pi/4$ - DQPSK) y Modulación por Desplazamiento de Fase 8 Diferencial (8DPSK), presentados a continuación.

- **Modulación por Desplazamiento de Fase Cuaternario Diferencial**

La modulación $\pi/4$ - DQPSK corresponde a uno de los dos esquemas de modulación empleados por Bluetooth® en la versión 2.0 + EDR. La modulación $\pi/4$ - DQPSK es una variación de la Modulación por Desplazamiento de Fase Cuaternario Diferencial (DQPSK), en la cual se utilizan 4 fases de salida trasladados entre sí 90° . En la modulación $\pi/4$ - DQPSK estos símbolos son desplazados 45° entre sí, proporcionando velocidades de transmisión de datos de hasta 2 Mbps.

En la tabla 1.4 se presenta los diferentes cambios de fase DPSK y $\pi/4$ – DPSK.

Cambio de Fase DPSK (grado)	Cambio de Fase $\pi/4$ - DPSK (grado)	Símbolo
0	45	00
+90	135	01
-90	-45	10
180	-135	11

Tabla 1.4. Cambio de Fase DQPSK y $\pi/4$ - DQPSK.

En la figura 1.22 se presenta el diagrama de constelación para DQPSK y $\pi/4$ – DQPSK.

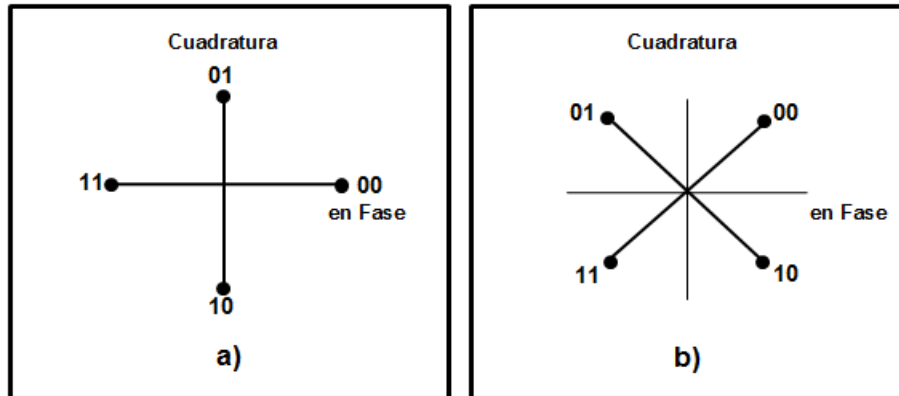


Figura 1.22. Diagrama de Constelación. a) DQPSK. b) $\pi/4$ - DQPSK.

La constelación $\pi/4$ -DQPSK puede considerarse como la superposición de dos constelaciones QPSK desplazadas 45 grados entre sí. Para cada tiempo de símbolo, las fases de símbolo se seleccionan alternativamente de una constelación QPSK a la otra. De este modo, los símbolos sucesivos tienen una diferencia de fase relativa que coincide con uno de los cuatro ángulos $\pm\pi/4$ y $\pm3\pi/4$. Las transiciones de símbolo de una constelación a la otra garantizan que siempre haya un cambio de fase entre símbolos, lo que facilita la recuperación de reloj [16]. La figura 1.23 muestra la constelación $\pi/4$ -DQPSK, presentando una medida obtenida de muchos símbolos que desenlazan en la conformación de los ocho puntos de constelación deseados. Cabe resaltar que durante un tiempo de símbolo específico, sólo hay disponibles cuatro puntos de constelación o transiciones, lo que produce la transmisión de dos bits por símbolo.

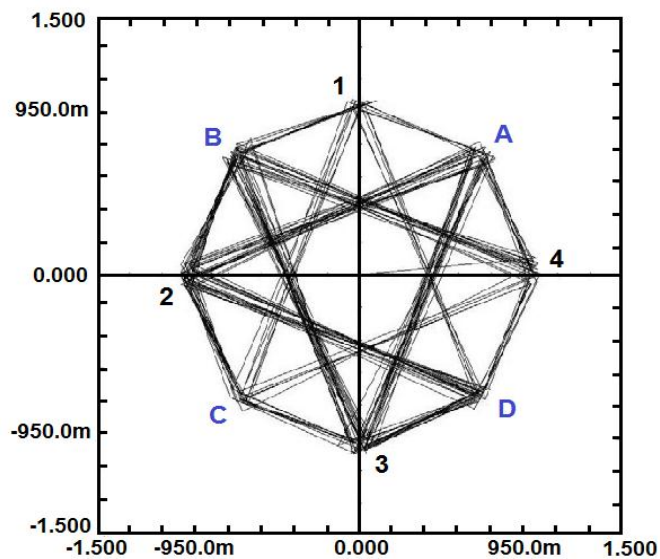


Figura 1.23. Constelación de la Carga útil EDR con Modulación $\pi/4$ -DQPSK [15].

- **Modulación 8 DPSK**

La modulación 8 DPSK es el segundo esquema de modulación empleado por Bluetooth en la versión 2.0 + EDR. Definido para proporcionar velocidades de transmisión de datos de hasta 3 Mbps. En 8 DPSK son usadas 8 fases de salida como se muestra en el diagrama de constelación presente en la figura 1.24, permitiendo la transmisión de tres bits por símbolo, lo que implica multiplicar por tres la velocidad de transmisión de datos si se compara con el sistema de modulación GFSK.

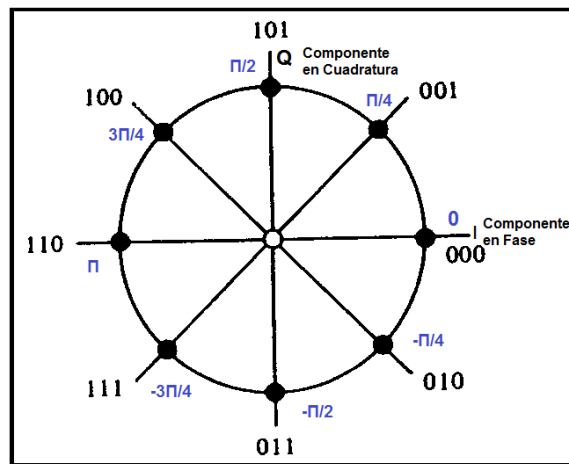


Figura 1.24. Constelación 8 DPSK.

2. HERRAMIENTA DE TRABAJO

Con el pasar del tiempo surgen necesidades que en gran medida son creadas por el hombre con el objetivo principal de facilitar el desarrollo de sus actividades cotidianas. Para dar solución a estas necesidades, la humanidad hace uso de la tecnología como herramienta principal. Entre las diferentes tecnologías se encuentran las de Información y Comunicación (TIC), las cuales agrupan muchos de los elementos, sistemas, técnicas y procedimientos, que posibilitan el diseño y construcción de una gran variedad de dispositivos utilizados en la transmisión y visualización de la información.

En el sector de las telecomunicaciones, existe una gran cantidad de empresas que ofertan a sus clientes múltiples equipos y dispositivos con los cuales es posible implementar un sistema de comunicaciones, con diferentes características y opciones configurables. Es por ello, que con el propósito de cumplir los objetivos propuestos en este trabajo de grado, fue necesario seleccionar una herramienta, cuyas características permitieran implementar un sistema inalámbrico de comunicación de datos punto a punto de corto alcance en la banda de 2.4 GHz empleando Bluetooth®. Para tal propósito fue elegido el kit inalámbrico de desarrollo BISDK02BI-02 de EZURiO, el cual se aprecia en la figura 2.1. Este kit proporciona una completa plataforma para la creación rápida de prototipos de la tecnología inalámbrica, ofreciendo opciones para el desarrollo de aplicaciones Bluetooth®, WLAN y Servicio General de Paquetes Vía Radio (GPRS, *General Packet Radio Service*).

En el presente capítulo, se realiza una descripción detallada del kit BISDK02BI-02 de tecnología Máquina a Máquina (M2M, *Machine to Machine*), que funciona en la banda de 2.4 GHz mediante la técnica de transmisión FHSS, con el objetivo de dar a conocer las características técnicas y de funcionamiento del kit adquirido. Toda la información presentada a continuación fue tomada del Disco Compacto (CD, *Compact Disc*) de documentación del kit de desarrollo.



Figura 2.1. Kit de Desarrollo BISDK02BI-02 de EZURiO.

2.1. CONSIDERACIONES HARDWARE DEL KIT DE DESARROLLO BISDK02BI-02

El kit de desarrollo BISDK2BI-02 permite establecer tres tipos de conexiones a partir de diferentes tecnologías como son: Bluetooth®, WLAN y GPRS. En este trabajo de grado se utiliza la primera tecnología mediante el Módulo Serie Inteligente Bluetooth® (BISMII, *Bluetooth Intelligent Serial Module*) que incluye el kit [32].

El kit cuenta además con: una placa base de desarrollo, un cable USB, un cable serial, un adaptador Bluetooth®, un software de aplicación EZURiO y un CD de documentación. Todos los elementos que componen el kit están diseñados para apoyar la implementación de un sistema de comunicación de datos vía radio. Cada uno de los elementos que aparecen en la figura 2.1 se describen a continuación [32].

2.1.1. Módulo Serie Inteligente Bluetooth

El Módulo Serie Inteligente Bluetooth® (BISMII) de referencia TRBLU23-00200, certificado como Bluetooth versión 2.0, está específicamente diseñado para aplicaciones donde se requiere conectividad en espacios cortos. El módulo BISMII Soporta comunicaciones de voz y datos.

El módulo Bluetooth® EZURiO emplea el concepto de registros, usados para el almacenamiento de los parámetros del sistema. El control de este dispositivo se logra a través del puerto serie mediante un amplio conjunto de comandos llamados Atención (*AT, Attention*), que conforman un lenguaje de comunicación entre anfitrión y módulo Bluetooth, permitiendo el acceso a datos, la configuración de parámetros y la gestión de una determinada acción. El módulo BISMII incluye una antena con 2 dBi de ganancia y con un consumo de corriente promedio menor a 36 mA para distancias de hasta 250 m (figura 2.2) [33].

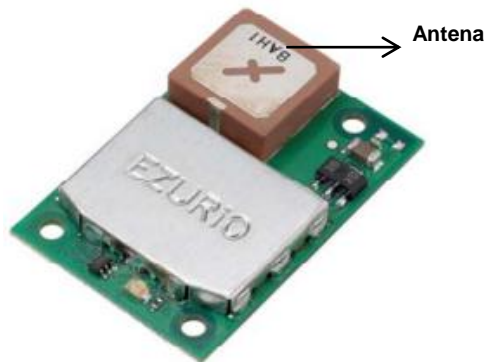


Figura 2.2. Módulo BISMII [34].

Además de la funcionalidad Bluetooth®, el módulo BISMII brinda el acceso a nueve líneas de Entrada / Salida de Propósito General (GPIO, General Purpose *Input / Output*) digitales y a dos entradas del Conversor Analógico Digital (ADC, *Analog to Digital Converter*) de 8 bits. Estas se pueden configurar para proporcionar la conexión de dispositivos simples, tales como interruptores o Diodos Emisores de Luz (LEDs, *Light Emitting Diodes*) sin necesidad de elementos adicionales externos [34].

En la tabla 2.1 se presentan las características del módulo BISMII.

Clase Bluetooth®	1
Frecuencia	2.400 – 2.485 GHz
Máxima / Mínima Potencia de Transmisión en Banda Base	+6 dBm / -27 dBm
Sensibilidad	≥ -86 dBm
Alcance	250 m (espacio libre)
Interfaz de Comunicación	RS ¹³ -232 bi-direccional para comandos AT y datos
Perfiles	FTP ¹⁴ , GAP, SDAP, SPP, DUN ¹⁵ , HSP ¹⁶ , HFP, <i>Audio Gateway</i>
Temperatura de Operación	-40°C a +85°
Consumo de Corriente	Modo inactivo = 13mA Conectado como maestro = 20mA Conectado como esclavo = 30mA
Velocidad de Transmisión de Datos	Superior a 300 Kbps
Tamaño Físico	22.8 x 33.8 x 7.6 mm, 8g
Protocolos de Comunicación	UART Comandos AT
Voltaje de Alimentación	3.6 Voltios – 7.0 Voltios
Multipunto	Máximo 7 esclavos
Normativa de Derecho Comunitario	RoHS ¹⁷

Tabla 2.1. Características de Implementación del Módulo BISMII [34].

¹³ Estándar Recomendado (RS, *Recommended Standard*).

¹⁴ Protocolo de Transferencia de Archivos (FTP, *File Transfer Protocol*).

¹⁵ Acceso Telefónico a Redes (DUN, *Dial Up Networking*).

¹⁶ Perfil de Auriculares (HSP, *HeadSet Profile*).

¹⁷ Restricción de Uso de Ciertas Sustancias Peligrosas (RoHS, *Restriction of use of certain Hazardous Substances*) en la fabricación de equipos eléctricos y electrónicos.

El módulo BISMII se basa en un *chip* Semiconductor de Óxido Metálico Complementario (CMOS¹⁸, *Complementary Metal Oxide Semiconductor*) llamado BlueCore04 (BC04), el cual integra el nivel de radio frecuencia, banda base y la pila de protocolos de comunicaciones y contiene las interfaces: Transmisor Receptor Asíncrono Universal (UART, *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*), GPIO, ADC, Modulación por Pulsos Codificados (PCM, *Pulse Code Modulation*) y Bus Universal en Serie (USB, *Universal Serial Bus*). Suministrado por CSR (*Cambridge Silicon Radio*)¹⁹, uno de los principales proveedores de dispositivos Bluetooth. El módulo contiene además una memoria *flash* ROM y un oscilador de cristal. En la figura 2.3 se presenta el diagrama funcional del módulo BISMII [34].

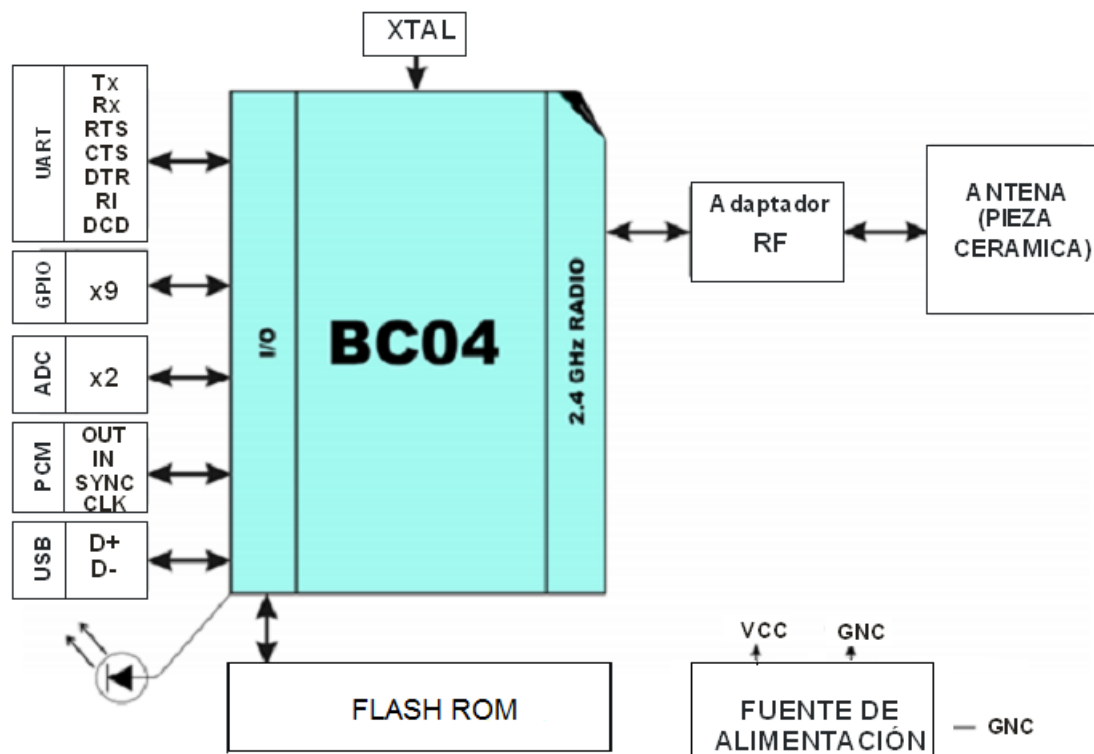


Figura 2.3. Diagrama en Bloques Módulo BISMII [34].

2.1.2. Placa Base de Desarrollo

La placa base de desarrollo se utiliza para montar el módulo BISMII, permitiendo que este sea conectado a un equipo anfitrión mediante la interfaz RS-232 a través de un conector

¹⁸ Tecnología para la construcción de semiconductores que utiliza transistores para la fabricación de circuitos integrados que consumen poca energía y permite un alto nivel de integración.

¹⁹ Empresa con sede en Cambridge, Inglaterra. Dedicada al diseño y suministro de soluciones tecnológicas.

tipo DB-9. La placa permite el acceso a 40 pines de un conector tipo *Hirose* utilizado para la conexión del módulo Bluetooth® en la placa [32].

La placa base de desarrollo cuenta además con un conector *Hirose* de 50 pines que posibilita la conexión de un Módulo Serie Inteligente Inalámbrico (WISM, *Wireless Intelligent Serial Module*) LAN, no incluido en el kit de desarrollo y un puerto para el desarrollo rápido de aplicaciones de audio PCM, usado con el módulo Bluetooth® [32].

En la figura 2.4 se observa la placa base de desarrollo.

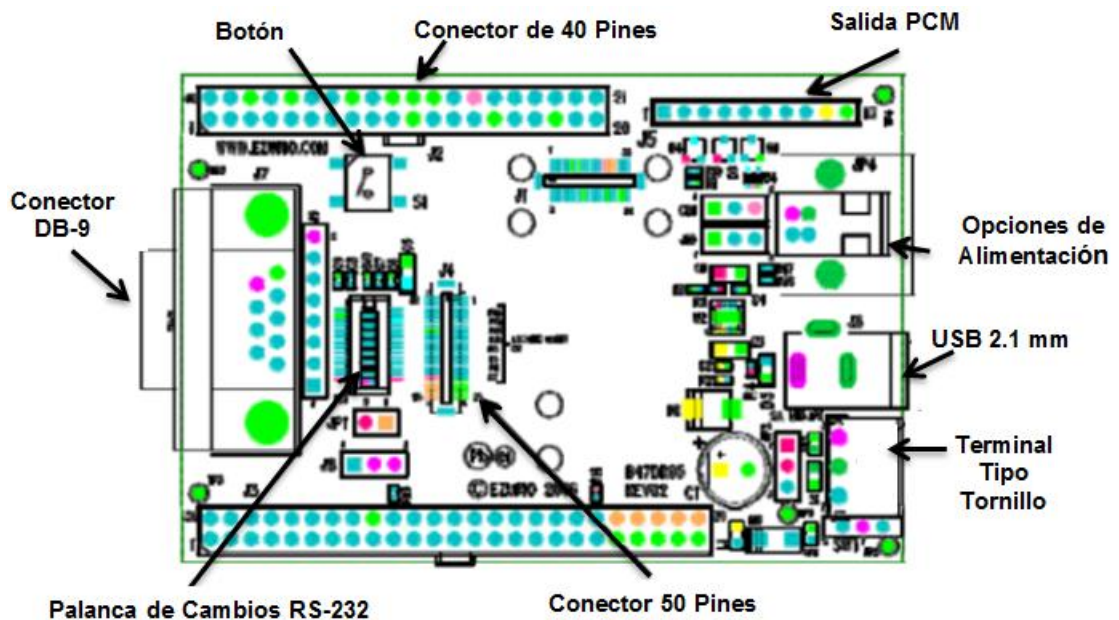


Figura 2.4. Placa Base de Desarrollo [32].

La placa base de desarrollo ofrece una serie de opciones de alimentación al módulo BISMII:

- 5V obtenidos del puerto USB.
- Alimentación a través del pin 9 del adaptador RS232.
- Alimentación a través de una fuente de 5V externa con terminal tipo tornillo, no incluye la fuente de alimentación con terminal tipo tornillo.

Los niveles de voltaje aplicables a la placa base de desarrollo son mostrados en la tabla 2.2.

	Mínimo	Típico	Máximo
Voltaje de Alimentación	3.6 V	5 V	6 V

Tabla 2.2. Voltaje de Alimentación Placa Base de Desarrollo.

En la tabla 2.3 se muestra la descripción de los pines del conector DB-9 de la placa base de desarrollo, el cual es utilizado para las conexiones RS-232.

Pin	Descripción	Señal	Dirección
1	Detección de Portadora (DCD, <i>Data Carrier Detect</i>)	DCD	Salida
2	Transmisión de Datos (TD, <i>Transmit Data</i>)	TD	Salida
3	Recepción de Datos (RD, <i>Receive Data</i>)	RD	Entrada
4	Conjunto de Datos Listo (DSR, <i>Data Set Ready</i>)	DSR	Entrada
5	Tierra (GND, <i>Ground</i>)	GND	-----
6	Terminal de Datos Listo (DTR, <i>Data Terminal Ready</i>)	DTR	Salida
7	Libre para Envío (CTS, <i>Clear to Send</i>)	CTS	Entrada
8	Solicitud de Envío (RTS, <i>Request to Send</i>)	RTS	Salida
9	Indicador de Llamada (RI, <i>Ring Indicator</i>)	RI	Salida

Tabla 2.3. Descripción de Pines del Conector DB-9 [32].

2.1.3. Adaptador Bluetooth®



Figura 2.5. Adaptador Bluetooth®.

El adaptador Bluetooth® brinda conectividad a dispositivos con entradas USB, ofreciendo protección contra interferencias y seguridad en el envío de datos. El dispositivo es certificado como Bluetooth® versión 2.0 + EDR y contiene todo el *hardware* y *firmware* necesario y una antena integrada. Este dispositivo sólo puede operar como esclavo. En la tabla 2.4 se presentan las principales características del adaptador Bluetooth® [35].

La interfaz USB se encuentra configurada para presentar el dispositivo como un adaptador Bluetooth® genérico, lo cual permite que este sea conectado directamente al nivel más alto de la pila de protocolos Bluetooth®, donde se realiza el proceso de enumeración, en el cual el equipo anfitrión solicita al dispositivo la presentación de sus parámetros y donde el dispositivo comienza a operar.

Clase Bluetooth®	1
Frecuencia	2.400 – 2.485 GHz
Máxima / Mínima Potencia de Transmisión en Banda Base	+6 dBm / -25 dBm
Sensibilidad	≥ - 86dBm
Alcance	250 m (espacio libre)
Interfaz de Comunicación	USB 1.2
Temperatura de Operación	- 40°C a + 85°C
Consumo de Corriente	Menor a 25 mA (transmisión)
Velocidad de Transmisión de Datos	2.0 Mbps
Tamaño Físico	64.0mm x 20.0mm x 10.7mm, 12g
Voltaje de Alimentación	Línea USB (3.3 Voltios – 6.0 Voltios)
Normativa de Derecho Comunitario	RoHS

Tabla 2.4. Características del Adaptador Bluetooth® USB [35].

2.1.4. Software de Aplicación EZURiO

Desde el equipo anfitrión puede lograrse la comunicación con el módulo BISMII usando un software emulador de terminal incluido en el kit de desarrollo, llamado EZURiO Terminal, diseñado específicamente para el desarrollo y prueba de módulos EZURiO.

EZURiO Terminal es capaz de funcionar con Windows 98, Me (*Millenium edition*), 2000 y XP (*eXPerience*). Configurado por defecto para comunicarse a través de un puerto serial a 9600 bps, ninguna paridad, 8 bits de datos, 1 bit de paridad, o con cualquier combinación de los parámetros de comunicación mostrados en la tabla 2.5.

Puerto COM	1 a 255.
Velocidad de Transmisión de Datos	1200 – 921600 bps.
Paridad	Ninguno, Impar, Par.
Bits de Datos	7 u 8.
Bits de Parada	1 o 2.

Apretón de Manos (<i>handshaking</i>) ²⁰	Ninguno o CTS/RTS ²¹ .
--	--------------------------------------

Tabla 2.5. Configuración Comunicación Serie [32].

2.1.5. Cables y CD de Documentación

El cable USB es utilizado como una de las opciones para proporcionar energía al kit de desarrollo a través del conector a bordo.

El cable RS-232 proporciona la comunicación entre el equipo anfitrión y el módulo BISMII. El cable serial puede usarse también como una opción de alimentación a la placa base de desarrollo a través del pin 9 de RS232.

El CD de documentación incluye una guía de usuario para el uso del kit de desarrollo, diagramas de circuitos y una guía de inicio rápido.

²⁰Procedimiento automatizado de negociación que establece de forma dinámica los parámetros de un canal de comunicaciones establecido entre dos entidades antes de que comience la comunicación por el canal.

²¹ El método *handshaking* utiliza las líneas de hardware CTS / RTS. Cuando el receptor está listo para recibir datos, cambia la línea RTS a estado alto; este valor es leído por el transmisor en la línea CTS, indicando que el envío de datos puede realizarse.

3. SISTEMA DE COMUNICACIÓN BLUETOOTH®

En este capítulo se presenta el diseño del sistema inalámbrico de comunicación de datos punto a punto de corto alcance en la banda de 2.4 GHz empleando Bluetooth®, implementado con el kit de desarrollo BSDK02BI-02, presentado en el capítulo 2. La documentación presente en este capítulo incluye la información relacionada con los modos de operación del sistema, los comandos AT y registros usados, aspectos de la comunicación radio, la configuración del sistema en un entorno real y la configuración de parámetros en la herramienta de propagación Wireless Insite®.

Para lograr la implementación del sistema de comunicación Bluetooth® usado para el desarrollo de las pruebas se creó una red punto a punto entre el módulo BISMII (transmisor) y el adaptador Bluetooth® (receptor). La comunicación del anfitrión 1 con el módulo BISMII se realizó a través de un puerto serial RS232, para lo cual fue necesario usar un cable adaptador de protocolo de RS232 a USB. La comunicación del anfitrión 2 con el adaptador Bluetooth® se realizó a través del puerto USB. La figura 3.1 presenta el sistema de comunicación Bluetooth® Implementado.

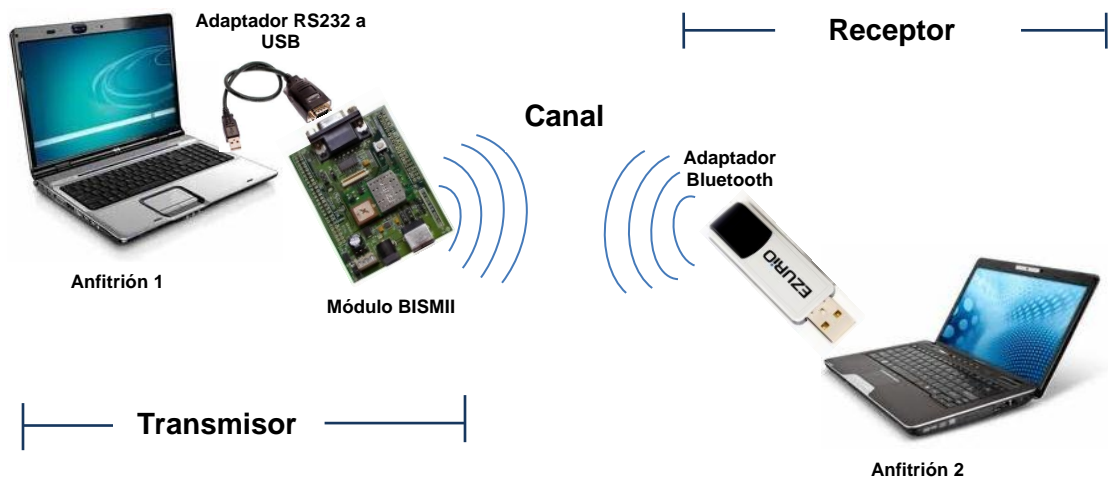


Figura 3.1. Sistema de Comunicación Bluetooth® Implementado.

En cada uno de los anfitriones es ejecutado el software emulador de terminal EZURiO en entorno Windows, siendo necesario seleccionar los parámetros de la comunicación serie y abrir el puerto de comunicación de cada uno de los dispositivos inalámbricos, tal y como se muestra en la figura 3.2.

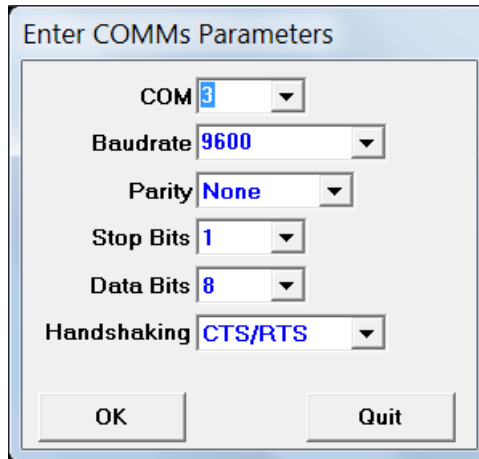


Figura 3.2. Selección Parámetros Comunicación Serie.

3.1. MODOS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA

Una vez es abierto el puerto de comunicación de cada uno de los dispositivos inalámbricos, el módulo BISMII inicia su operación en un modo denominado modo comandos local, en el que el módulo responde a los comandos AT enviados desde el anfitrión 1. Estos comandos permiten, entre otras cosas, acceder a los registros de configuración del módulo, realizar la búsqueda de dispositivos y establecer una conexión.

A partir del modo comandos local, el módulo puede cambiar a otros modos de operación. Sin embargo, para que sea posible esto es necesario que previamente, se establezca una conexión con el adaptador Bluetooth® conectado al anfitrión 2. Una vez realizada esta conexión se establece un segundo modo de operación denominado modo datos en el que cualquier información que reciba el módulo BISMII de su anfitrión será enviada al adaptador Bluetooth®, siendo visualizada en su respectivo terminal EZURIO. En el modo datos el módulo BISMII no procesa la información, simplemente la transmite por RF al adaptador Bluetooth®. Para regresar al modo comandos local a partir del modo datos es necesario enviar una secuencia de escape al módulo BISMII. Esta secuencia consiste en repetir tres veces un Código Estándar Estadounidense para el Intercambio de Información (ASCII, *American Standard Code for Information Interchange*). En la configuración empleada durante las pruebas realizadas el carácter ASCII usado es '+', por lo tanto la secuencia de escape es '+++' (ver registro 2 tabla 3.2).

El módulo BISMII también puede ser controlado por medio de comandos AT enviados desde el equipo anfitrión 2. Para esto existe un tercer modo de operación llamado modo comandos remoto. Para cambiar a este modo se debe entrar primero al modo datos. Una vez en el modo datos es necesario enviar una segunda secuencia de escape desde el equipo anfitrión 2 al módulo BISMII. Al igual que la primera secuencia de escape, esta consiste en repetir tres veces un carácter ASCII especial. En este caso se trata del

carácter ‘!’ de tal manera que la secuencia de escape para cambiar al modo comandos remoto es ‘!!!’.

La tabla 3.1 resume los modos de operación del módulo BISMII indicando si es posible la operación en este modo (SI/NO) de acuerdo con la existencia o inexistencia de una conexión RF con el adaptador Bluetooth.

	RF Conectado	RF Desconectado
Modo Comandos Local	SI	SI
Modo Comandos Remoto	SI	NO
Modo Datos	SI	NO

Tabla 3.1. Modos de Operación del Sistema [35].

3.2. CONFIGURACIÓN MÓDULO BISMII Y ESTABLECIMIENTO DE UNA CONEXIÓN

En esta sección se describen los comandos AT y los registros usados para la configuración del sistema y el establecimiento de una conexión.

El uso del conjunto de comandos AT es familiar para los usuarios de módems. EZURIO ha ampliado este concepto mediante la integración de un conjunto completo de comandos AT para el control y configuración de sus módulos Bluetooth®.

En la tabla 3.2 se presentan en detalle los registros con mayor importancia del sistema. Mediante la lectura y modificación de los parámetros establecidos en ellos se realiza la configuración del módulo BISMII.

Registro	Por Defecto	Rango	Descripción
S0	1	0...15	Número de llamadas que el módulo BISMII espera antes de una respuesta automática.
S2	0x5E	0x20...0x7E	Define el carácter ASCII usado como secuencia de escape: “+” o “^”.
S12	100	40...5000	Define el tiempo mínimo en incrementos de 20 ms que precede y sigue a un código de escape, sin que se hayan transmitido o recibido datos.
S500	0	0...1	Si S500=1, es habilitada la autenticación para las conexiones salientes. Si S500=0, es deshabilitada la autenticación para las conexiones salientes.
S502	0	0...1	Si S502=1, es habilitada la autenticación

			para las conexiones entrantes. Si S502=0, es deshabilitada la autenticación para las conexiones entrantes.
S501	0	0...1	Si S501=1, es habilitada la encriptación para las conexiones salientes. Si S501=0, es deshabilitada la encriptación para las conexiones salientes.
S503	0	0...1	Si S503=1, es habilitada la encriptación para las conexiones entrantes. Si S503=0, es deshabilitada la encriptación para las conexiones entrantes.
S512	4	0..4	Si S512=4, el módulo BISMII puede ser detectado por otros dispositivos.
S520	960	1200..11520 0	Define la velocidad de transmisión de datos en baudios del puerto serie.
S522	1	1	Si S522=1, es activado CTS/RTS <i>handshaking</i> .
S523	1	1...2	Bits de parada.
S524	0	0...2	Si S524=0, no se usa ninguna paridad. Si S524=1, se usa paridad impar. Si S524=2, se usa paridad par.
S536	0	0...1	1, el dispositivo remoto puede capturar "!!!" como secuencia de escape.
S538	0	0...1	1, si un emparejamiento ocurre el PIN ²² de enlace es almacenado automáticamente.
S542	6	-50...6	Nivel de potencia de transmisión tal y como se establece en banda base, dBm.

Tabla 3.2. Registros de Configuración del Módulo BISMII [36].

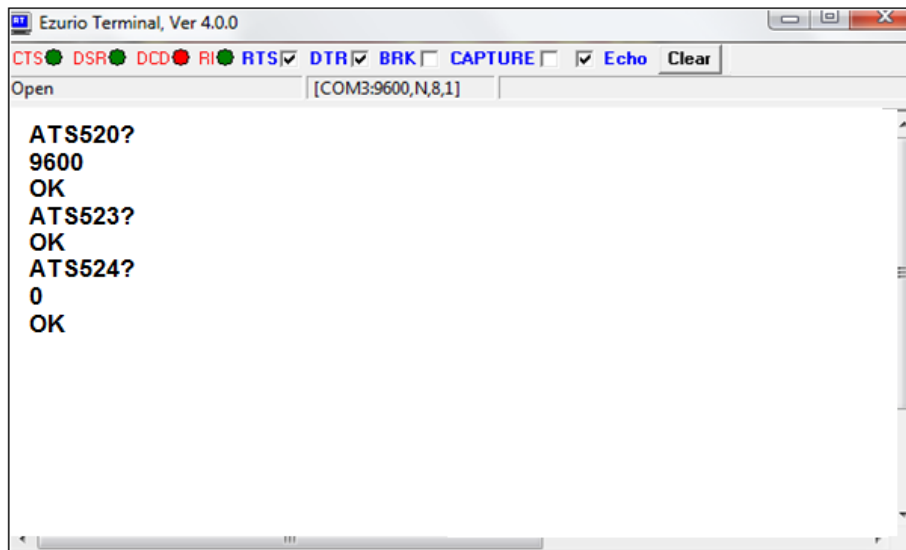
En la figuras 3.3 y 3.4 se muestran los registros configurados, haciendo uso del comando $ATS_n = m$, donde n representa el número del registro y m el valor en el que se desea establecer el registro, m puede ser introducido como un valor decimal o hexadecimal si es precedido por el carácter '\$'. Haciendo uso del comando $AT\&W$ se almacenan los cambios realizados en la memoria *flash* ROM [36].

²² La primera vez que dos dispositivos intentan comunicarse, se genera un Número de Identificación Personal (PIN, *Personal Identification Number*) común seguro.



```
Ezurio Terminal, Ver 4.0.0
CTS  DSR  DCD  RI  RTS  DTR  BRK  CAPTURE  Echo  Clear
Open [COM3:9600,N,8,1]
AT
OK
ATS0=1
OK
ATS2=20
OK
ATS512=40
OK
ATS500=1
ATS501=1
OK
ATS512=4
OK
ATS536=1
OK
ATS538=1
OK
```

Figura 3.3. Configuración Módulo BISMII.



```
Ezurio Terminal, Ver 4.0.0
CTS  DSR  DCD  RI  RTS  DTR  BRK  CAPTURE  Echo  Clear
Open [COM3:9600,N,8,1]
ATS520?
9600
OK
ATS523?
OK
ATS524?
0
OK
```

Figura 3.4. Configuración Módulo BISMII II.

Para el establecimiento de una conexión de uso general en el sistema Bluetooth® se utilizan los comandos AT mostrados en la tabla 3.3. Si los comandos son aceptados se observa OK en el terminal EZURiO, tal y como se muestra en las figura 3.5 y 3.6, en las cuales se puede apreciar la ejecución de cada uno de los comandos con su respectiva respuesta en el terminal EZURiO del anfitrión 1.

Comandos	Función
AT	Comprobar que el módulo BSMII esté disponible.
AT+BTIN	Buscar y encontrar otros dispositivos Bluetooth®, estos presentan el siguiente formato: (<bd_addr> ²³ , <devclass> ²⁴ , nombre anfitrión).
AT+BTK=<string> ²⁵	Crear PIN de emparejamiento.
AT+BTW <bd_addr>	Iniciar emparejamiento con el adaptador Bluetooth® u otro dispositivo, cuya dirección sea <bd_addr> ²⁶ . <ul style="list-style-type: none"> • Si el emparejamiento es correcto se visualizará el mensaje "PAIR0 <bd_addr>". • Si el emparejamiento falla se visualizará el mensaje "NO CARRIER".
AT+BTT	Almacenar el PIN de enlace permanentemente en la memoria no volátil.
ATD<bd_addr>.	Establecer conexión con el adaptador Bluetooth u otro dispositivo, cuya dirección es <bd_addr>.
ATH	Cerrar una conexión Bluetooth®.
ATO	Cambiar del modo comandos al modo datos.

Tabla 3.3. Comandos AT para el Establecer Conexión [36].

```

Ezurio Terminal, Ver 4.0.0
CTS DSR DCD RI RTS DTR BRK CAPTURE Echo Clear
Open [COM3:9600,N,8,1]
AT
OK
AT+BTIN
008098F54195, 2A010C, "DIANA"
6CD68A22FD10,5*0204, "LG KP500"
OK
AT+BTK="123"
OK
AT+BTW008098F54195
OK
PAIR 0 008098F54195
AT+BTT
OK
AT+BTP
OK

```

Figura 3.5. Ejecución de Comandos AT, Ejecución 1.

²³ 12 caracteres hexadecimales de la dirección Bluetooth.

²⁴ 6 caracteres hexadecimales de la clase de dispositivo Bluetooth.

²⁵ Cadena de caracteres delimitada por comillas dobles. Por ejemplo, "Hola".

²⁶ La dirección correspondiente al adaptador Bluetooth es 008098F5495.

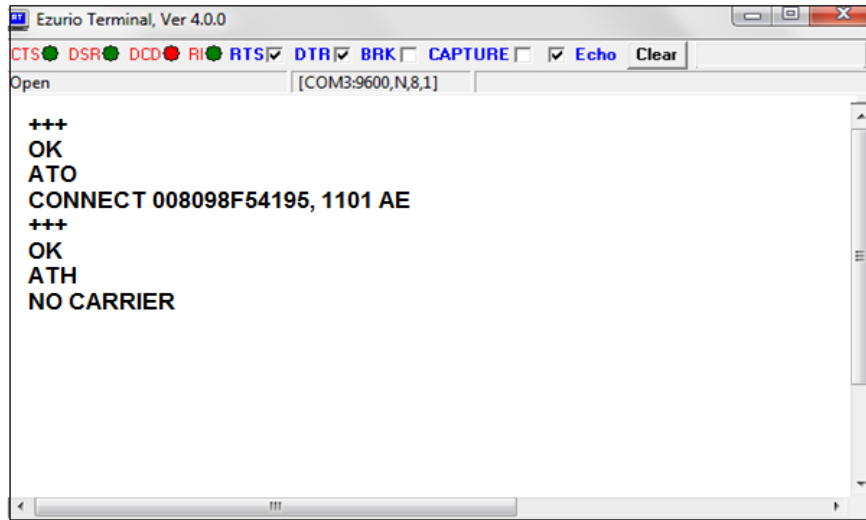


Figura 3.6. Ejecución de Comandos AT, Ejecución 2.

Como es posible observar en la figura 3.6, una vez establecida la comunicación entre los dispositivos mediante el uso del comando ATD<bd_addr>, el estado de detección de portadora DCD se activa automáticamente y al ejecutar el comando ATH se desactiva.

3.3. ASPECTOS DE LA COMUNICACIÓN POR RADIO FRECUENCIA

3.3.1. Bandas de Frecuencias del Módulo BISMII

Como se había mencionado en el capítulo 1, el sistema Bluetooth implementado utiliza la técnica FHSS, dividiendo la banda de frecuencia asignada en 79 canales individuales de 1 MHz cada uno, tal y como se presenta en la tabla 3.4.

Canal	Frecuencia [GHz]	Canal	Frecuencia [GHz]	Canal	Frecuencia [GHz]	Canal	Frecuencia [GHz]
0	2.402	20	2.422	40	2.442	60	2.462
1	2.403	21	2.423	41	2.443	61	2.463
2	2.404	22	2.424	42	2.444	62	2.464
3	2.405	23	2.425	43	2.445	63	2.465
4	2.406	24	2.426	44	2.446	64	2.466
5	2.407	25	2.427	45	2.447	65	2.467
6	2.408	26	2.428	46	2.448	66	2.468
7	2.409	27	2.429	47	2.449	67	2.469
8	2.41	28	2.43	48	2.45	68	2.47

9	2.411	29	2.431	49	2.451	69	2.471
10	2.412	30	2.432	50	2.452	70	2.472
11	2.413	31	2.433	51	2.453	71	2.473
12	2.414	32	2.434	52	2.454	72	2.474
13	2.415	33	2.435	53	2.455	73	2.475
14	2.416	34	2.436	54	2.456	74	2.476
15	2.417	35	2.437	55	2.457	75	2.477
16	2.418	36	2.438	56	2.458	76	2.478
17	2.419	37	2.439	57	2.459	77	2.479
18	2.42	38	2.44	58	2.46	78	2.48
19	2.421	39	2.441	59	2.461		

Tabla 3.4. Frecuencias Centrales de los Canales Bluetooth®.

3.3.2. Velocidad de Transmisión de Datos del Enlace Radio

El fabricante brinda la variación de la velocidad de transmisión de datos en función de la distancia para enlaces establecidos en exteriores, tal y como se puede ver en la figura 3.7.

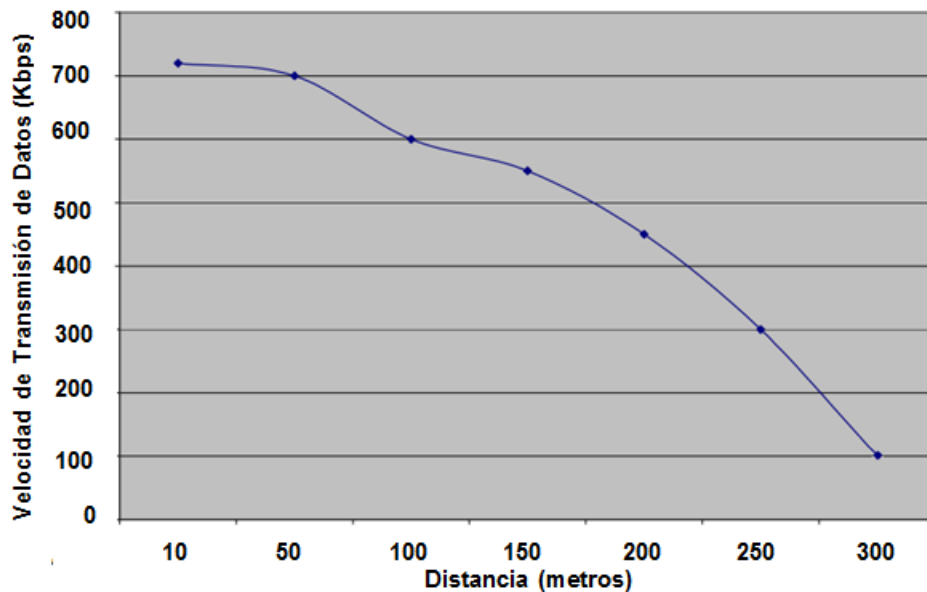
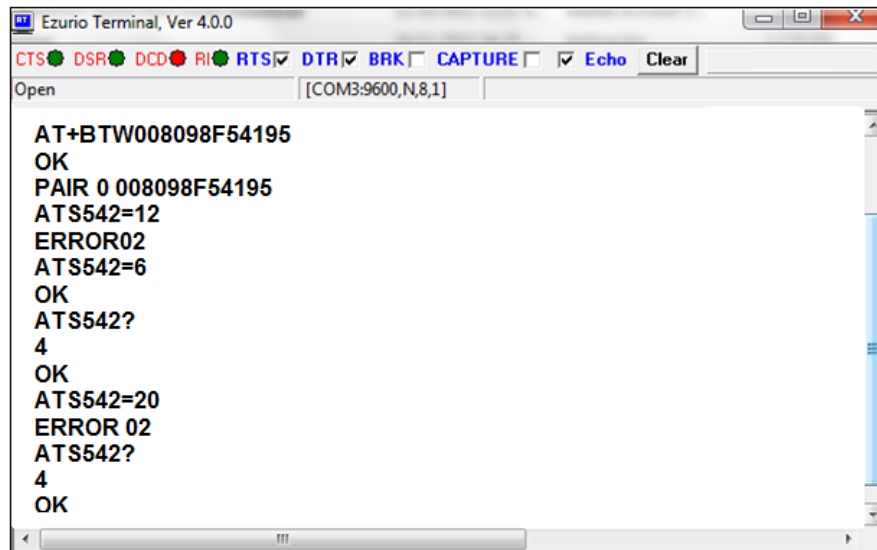


Figura 3.7. Velocidad de Transmisión de Datos Contra Distancia para Exteriores [34].

3.3.3. Potencia de Transmisión del Módulo BISMII

Según las especificaciones del fabricante mostradas en la tabla 2.1, la máxima potencia de transmisión del módulo BISMII corresponde a 6 dBm en banda base. Mediante la lectura del registro S542, se observa que la potencia de transmisión es 4 dBm, aunque previamente el registro haya sido configurado en 6 dBm, tal y como se puede ver en la figura 3.8. Basado en esto se determina que existe una diferencia de 2 dB entre el valor configurado y el valor entregado por el módulo BISMII.



```
Ezurio Terminal, Ver 4.0.0
CTS DSR DCD RI RTS DTR BRK CAPTURE Echo Clear
Open [COM3:9600,N,8,1]

AT+BTW008098F54195
OK
PAIR 0 008098F54195
ATS542=12
ERROR02
ATS542=6
OK
ATS542?
4
OK
ATS542=20
ERROR 02
ATS542?
4
OK
```

Figura 3.8. Configuración de Potencia.

Teniendo en cuenta lo anterior, se espera que al establecer la potencia máxima de transmisión en banda base, a nivel de radio frecuencia se obtenga el máximo valor permitido para su alcance con una diferencia de 2 dB al igual que en banda base, es decir 18 dBm debido a que el dispositivo es clase 1, como se presentó en la tabla 1.2. Es necesario el manejo de dicha analogía ya que ni el fabricante ni el dispositivo proporcionan el valor de este parámetro a nivel de radio frecuencia.

3.4. CONFIGURACIÓN DE PARAMETROS EN LA HERRAMIENTA DE PREDICCIÓN DE PROPAGACIÓN WIRELESS INSITE®

Con el objetivo de comparar los resultados obtenidos experimentalmente es necesario apoyarse en una herramienta de predicción de propagación de ondas electromagnéticas en sistemas de comunicaciones inalámbricos. Wireless InSite® es la herramienta usada para cumplir con este objetivo, permitiendo el análisis y diseño del sistema de comunicación Bluetooth® implementado en escenarios de simulación similares a los reales.

Esta herramienta posee características y modelos de propagación empleados en la predicción de cobertura en los escenarios considerados, encargados de predecir la pérdida de potencia que sufre la señal a una determinada distancia del transmisor [20]. Dentro de los diferentes modelos de propagación que brinda esta herramienta se encuentran cuatro modelos basados en la técnica de trazado de rayos: cañón urbano (*urban canyon*), urbano rápido 3D (*fast urban 3D*), completo 3D (*full 3D*) y plano vertical (*vertical plane*), los cuales combinan algoritmos de trazado de rayos con la Teoría Uniforme de Difracción (UTD, *Uniform Theory of Diffraction*)²⁷ [37].

Dentro de estas cuatro alternativas el modelo *full 3D* es el único modelo que se puede aplicar 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.

Otra característica importante es que el modelo *full 3D* no presenta limitaciones sobre la forma del objeto, es decir soporta estructuras planas e inclinadas [20]. El modelo tiene en cuenta transmisiones a través de las superficies de los objetos y reflexiones en pisos, paredes y techos, convirtiéndose en uno de los modelos más importantes.

La tabla 3.5 presenta los parámetros para la aplicación del modelo completo 3D [37].

Máximas Reflexiones	30, asumiendo que no hay traspaso de señal en la superficie
Máximas Difracciones	4 (SBR)
Transmisiones Máximas	30, asumiendo que no hay reflexiones
Ambiente	Todos
Terreno	Todos
Interiores	Todos
Objetos	Todos
Alcance	Varía de acuerdo a la aplicación
Altura de las Antenas	Todas
Tipo de Antenas	Todos
Trazado de Rayos	SBR
Frecuencia Mínima	100 MHz.
Frecuencia Máxima	Depende de la aplicación.

Tabla 3.5. Parámetros para el Modelo Completo Full 3D.

²⁷ Disparo y Rebote de Rayo (SBR, *Shooting and Bouncing Ray*).

A continuación se presentan las características y parámetros que se tuvieron en cuenta para modelar el sistema de comunicaciones Bluetooth en la herramienta descrita.

- **Antenas**

Las antenas son configuradas con los parámetros que se muestran en la tabla 3.6.

Característica	Valor
Ganancia	2 dBi
Perdidas	0 dB
Forma de Onda	Sinusoidal
Temperatura	299°K
Umbral de Recepción	-86 dBm

Tabla 3.6. Configuración Antenas.

- **Forma de Onda**

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 como se ilustra en la tabla 3.7.

Característica	Valor
Frecuencia de Trabajo	2400 MHz
Ancho de Banda de Operación	1 MHz
Fase	0°

Tabla 3.7. Configuración Forma de Onda.

- **Transmisores y Receptores**

Estas opciones permiten seleccionar diferentes tipos de transmisores y receptores, entre los cuales se identifican los más importantes como: puntos, ruta, red xy, polígono, arco horizontal y vertical. En el tipo punto, la ubicación del transmisor y el receptor puede ser modificada de forma independiente, ya que el software ofrece la opción de ubicar los transmisores y receptores en cualquier lugar dentro del escenario de simulación. En las tablas 3.8 y 3.9 se presentan los parámetros establecidos para configurar cada elemento.

Nombre del Equipo Transmisor	TX Módulo BISMII
Tipo de Transmisor	Punto
Potencia de Transmisión	18 dBm
Altura de Antena	1 m
Sistema de Coordenadas	Cartesiano

Tabla 3.8. Configuración del Transmisor.

Nombre del Equipo Receptor	RX Adaptador
Tipo de Transmisor	Ruta
Sensibilidad del Receptor	-86 dBm
Altura de Antena	1 m
Sistema de Coordenadas	Cartesiano

Tabla 3.9 Configuración del Receptor.

4. PLAN DE PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS

De acuerdo con los objetivos del presente trabajo de grado, en este capítulo se realiza la descripción del plan de pruebas establecido para lograr la evaluación y el análisis del desempeño a nivel físico del sistema inalámbrico de comunicación de datos punto a punto de corto alcance en la banda de 2.4 GHz empleando Bluetooth®, en distintos escenarios: exteriores e interiores y bajo condiciones de interferencia y se describen las medidas obtenidas a partir de las pruebas desarrolladas con el sistema Bluetooth®, tales como la potencia de recepción, las pérdidas de propagación asociadas a dichas potencias, el cálculo de ancho de banda, la BER, la Relación Energía de Bit a Densidad Espectral de Potencia de Ruido (E_b/N_0 , *Energy per Bit to Noise Power Spectral Density Ratio*), la Relación Portadora a Interferencia (C/I , *Carrier to Interference Ratio*), junto al análisis y comparación de resultados con la herramienta Wireless InSite® y Simulink® de Matlab®.

4.1. ESCENARIOS DE PRUEBA

La evaluación del desempeño de los sistemas de comunicaciones, tiene como objeto el estudio del efecto producido por los diversos fenómenos que afectan la BER, y la relación E_b/N_0 , bajo determinadas características de propagación. Entre estos fenómenos se tienen: las pérdidas por espacio libre, el desvanecimiento generado por multitrayectoria y las interferencias intencionales y no intencionales. Es por ello que el sistema de comunicaciones Bluetooth® implementado fue puesto a prueba en dos escenarios descritos a continuación y ante interferencia para la evaluación de su desempeño.

4.1.1. Exteriores

El escenario de exteriores escogido para el desarrollo de las pruebas del sistema fue el Centro Deportivo Universitario (CDU) de la Universidad del Cauca, ya que este cuenta con las características de un escenario de exteriores. Siendo posible determinar el desempeño del sistema en ambientes libres de obstáculos y evaluar el efecto de las pérdidas de propagación en exteriores. En la figura 4.1 se puede apreciar la cancha de fútbol de aproximadamente 100 m de largo ubicada en dicha instalación y en la cual fueron realizadas las pruebas.



Figura 4.1. Cancha de Futbol CDU.

4.1.1.1. Simulación Cancha de Futbol CDU en Wireless InSite®

En el trabajo de grado titulado “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” [20], se modeló la cancha de futbol del CDU con graderías al lado izquierdo del escenario y una zona de árboles al lado derecho, como se observa en la figura 4.2.

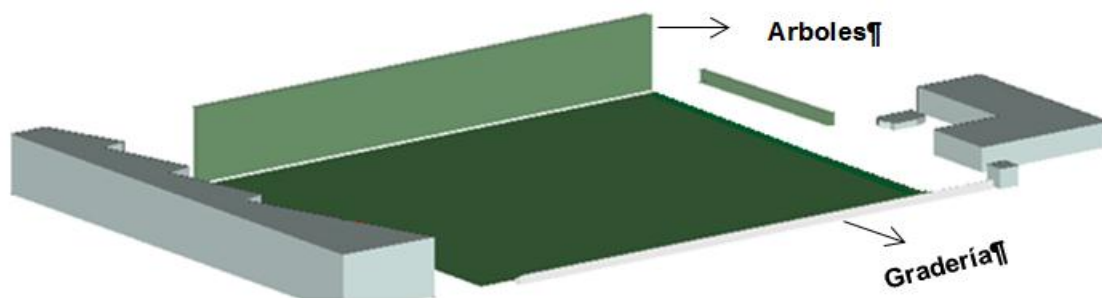


Figura 4.2. Escenario de Exteriores Wireless InSite®.

4.1.2. Interiores

El escenario de interiores escogido para el desarrollo de las pruebas del sistema, fue el pasillo del segundo piso del edificio de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca (FIET), ya que este cuenta con las características de un escenario de interiores; puertas, ventanas, paredes, piso, techo, entre otros. Siendo posible determinar el desempeño del sistema en ambientes de interiores y evaluar el efecto producido por el desvanecimiento generado por multitrayectoria en sitios cerrados.

El pasillo escogido está compuesto por dos corredores: uno principal de 51 m de largo por 2 m de ancho y uno secundario al final del principal de 9 m de largo por 4 m de ancho. Si el transmisor es ubicado en el corredor principal y el receptor en el siguiente, los dispositivos no cuentan con línea de vista.

4.1.2.1. Simulación Pasillo Segundo Piso FIET en Wireless InSite®

En el trabajo de grado titulado “Análisis de Cobertura de un Sistema Wi-Fi en Interiores, Mediante la Técnica de Trazado de Rayos” [38], se modeló el pasillo del segundo piso de la FIET mediante el editor de plano de planta de Wireless InSite®, como se observa en la figura 4.3.

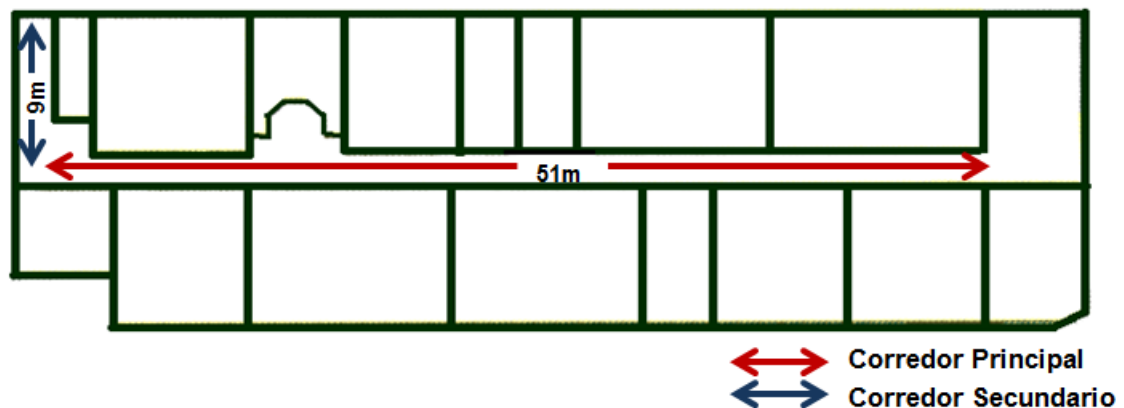


Figura 4.3. Escenario de Interiores Wireless InSite®.

4.2. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN DIFERENTES ESCENARIOS

Una vez los dispositivos son encendidos y conectados a su respectivo anfitrión, se ejecuta en cada uno de ellos el software emulador terminal EZURiO, y se realiza el proceso de conexión entre dispositivos descrito en el capítulo 3. En el terminal EZURiO del anfitrión 1 es ejecutado un *script*, mediante el cual se repite 15 veces una secuencia de instrucciones que permiten: solicitar al módulo BISMII el envío de datos al adaptador Bluetooth® para obtener la medida del RSSI en banda base y el número de bits errados, mediante los comandos AT1101 y AT1111 [36], respectivamente. Para tener validez estadística en la ejecución de las pruebas se realizaron 20 medidas para cada valor de distancia entre transmisor y receptor. En cada distancia fue escogido el valor más repetido del RSSI y del número de bits errados entre los valores obtenidos. Es decir en cada punto evaluado fueron tomadas alrededor de 300 medidas.

4.2.1. Potencia de Recepción

En la figura 4.4 se presenta el diagrama en bloques simplificado del sistema de comunicaciones, mostrando la relación entre la información de la fuente original, el transmisor, el canal o medio de transmisión, el receptor y la información recibida en el destino.

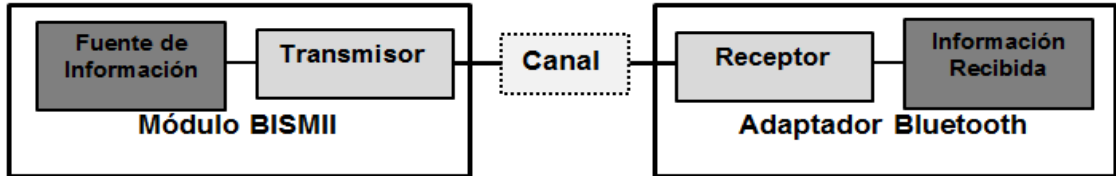


Figura 4.4. Diagrama en Bloques Simplificado del Sistema de comunicaciones.

Haciendo referencia al transmisor y receptor, específicamente en estos equipos son realizados procesos de adaptación de señal, tales como modulación, demodulación, amplificación, entre otros a nivel de banda base y a nivel de radio frecuencia para la transmisión y recepción de la información, en la figura 4.5 se presenta el diagrama en bloques simplificado para un sistema de comunicaciones, mostrando de manera general los niveles banda base y RF presentes tanto en transmisor como en receptor, señalando los niveles de potencia en diferentes puntos del sistema.

El transmisor es la unidad encargada de tomar la señal de información y convertirla en una señal de RF que pueda transmitirse a través de determinadas distancias sobre el canal de comunicaciones. Todo transmisor tiene la función de modular la señal y efectuar la amplificación de potencia para asegurar que el nivel de la señal sea lo suficientemente alto para alcanzar la distancia deseada.

El receptor es la unidad que lleva a cabo la operación inversa del transmisor. Tiene que amplificar una señal de bajo nivel recibida de la antena, separarla lo más posible del ruido y la interferencia que está presente en el canal de comunicaciones, demodularla y amplificar la señal de banda base a un nivel de potencia suficiente para una aplicación específica.

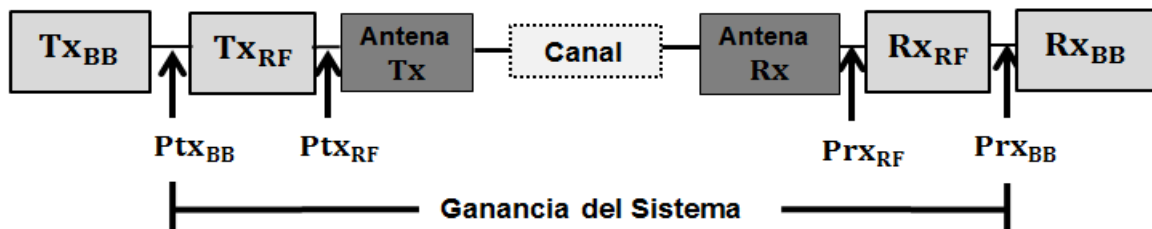


Figura 4.5. Diagrama en Bloques Simplificado del Sistema de comunicaciones con los Niveles de Banda Base y Radiofrecuencia.

Donde

$T_{X_{BB}}$: Transmisor en banda base.

$T_{X_{RF}}$: Transmisor en radio frecuencia.

$R_{X_{RF}}$: Receptor en radio frecuencia.

$R_{X_{BB}}$: Receptor en banda basa.

$P_{t_{X_{BB}}}$: Potencia de transmisión en banda base.

$P_{t_{X_{RF}}}$: Potencia de transmisión en radio frecuencia.

$P_{r_{X_{RF}}}$: Potencia de recepción en radio frecuencia.

$P_{r_{X_{BB}}}$: Potencia de recepción en banda base.

El parámetro usado para estimar la potencia de recepción es el RSSI, siendo este un indicador de la intensidad de potencia de la señal que llega al receptor. Como se mencionó en la sección 4.2, el kit BISDK02BI-02 mediante el uso del comando AT1101 despliega en el terminal EZURiO la medida de este parámetro en banda base. El valor de potencia de transmisión en banda base del módulo BISMII suministrado por el fabricante en el registro S542 es de 4 dBm, teniendo en cuenta lo expresado en la sección 3.3.3, la potencia de transmisión en radiofrecuencia es asumida como 18 dBm.

La ganancia del sistema (G_s) debe ser igual a la suma de todas las ganancias y pérdidas incurridas por la señal, conforme se propaga del transmisor al receptor. En esencia, representa la pérdida neta de un sistema de comunicación radio. La ganancia del sistema se expresa en la ecuación 4.1 [22].

$$G_s[\text{dB}] = G_{t_{X_{RF}}}[\text{dB}] + G_{t_{X_{ant}}}[\text{dBi}] - L_b[\text{dB}] + G_{r_{X_{ant}}}[\text{dBi}] + G_{r_{X_{RF}}}[\text{dB}] \quad (4.1)$$

La ganancia del sistema es expresada también por la diferencia entre la potencia de recepción en banda base y la potencia de transmisión en banda base, tal y como se expresa en la ecuación 4.2.

$$G_s[\text{dB}] = P_{r_{X_{BB}}}[\text{dBm}] - P_{t_{X_{BB}}}[\text{dBm}] \quad (4.2)$$

Donde

$G_{t_{X_{RF}}}$: Ganancia de transmisión de BB a RF.

$G_{t_{X_{ant}}}$: Ganancia de la antena de transmisión.

L_b : Pérdidas de propagación del sistema.

$G_{r_{X_{ant}}}$: Ganancia de la antena de recepción.

$G_{r_{X_{RF}}}$: Ganancia de recepción de RF a BB.

Siendo la ganancia de la antena del módulo BISMII 2 dBi y la ganancia de la antena del adaptador Bluetooth® 0 dBi. Se obtiene la ecuación 4.3 a partir de la ecuación 4.1.

$$G_s[\text{dB}] = G_{t_{X_{RF}}}[\text{dB}] + 2 \text{ dBi} - L_b[\text{dB}] + G_{r_{X_{RF}}}[\text{dB}] \quad (4.3)$$

Las pérdidas de propagación del sistema son representadas mediante la ecuación 4.4, obtenidas a partir de la ecuación 4.3.

$$L_b[\text{dB}] = G_{\text{tx}_{\text{RF}}}[\text{dB}] + 2 \text{ dBi} + G_{\text{rx}_{\text{RF}}}[\text{dB}] - G_s[\text{dB}] \quad (4.4)$$

La ganancia de transmisión en RF es expresada por la diferencia entre la potencia de transmisión en RF y la potencia de transmisión en banda base, tal y como se presenta en la ecuación 4.5.

$$G_{\text{tx}_{\text{RF}}}[\text{dB}] = P_{\text{tx}_{\text{RF}}}[\text{dBm}] - P_{\text{tx}_{\text{BB}}}[\text{dBm}] \quad (4.5)$$

$$G_{\text{tx}_{\text{RF}}}[\text{dB}] = 18 \text{ dBm} - 4 \text{ dBm} = 14 \text{ dB.}$$

La potencia de recepción en RF es obtenida restando a la potencia transmitida en RF las pérdidas de propagación y sumando las ganancias de las antenas, tal y como se expresa en la ecuación 4.6 (balance de enlace).

$$P_{\text{rx}_{\text{RF}}}[\text{dBm}] = P_{\text{tx}_{\text{RF}}}[\text{dBm}] + G_{\text{tx}_{\text{ant}}}[\text{dBi}] - L_b[\text{dB}] + G_{\text{rx}_{\text{ant}}}[\text{dBi}] \quad (4.6)$$

Reemplazando las ganancias de antena se obtiene la ecuación 4.7 a partir de la ecuación 4.6.

$$P_{\text{rx}_{\text{RF}}}[\text{dBm}] = P_{\text{tx}_{\text{RF}}}[\text{dBm}] - L_b[\text{dB}] + 2 \text{ dBi} \quad (4.7)$$

Las pérdidas básicas de propagación teóricas, se obtienen mediante un modelo de pendiente única, siendo este un modelo empírico que predice la variación de l_b con la distancia según la ley de potencias, dada por la expresión 4.8 [39].

$$l_b = k \cdot d[\text{m}]^n \quad (4.8)$$

Donde

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

n : Exponente de propagación que depende del medio, tal y como se muestra en la tabla 4.1 [40].

Entorno	Exponente de Propagación [n]
Espacio libre	2
Urbano	2.7-3.5
Urbano con Grandes Edificios	3-5
Interior de Edificios	1.6-1.8
Interior de Edificios con Sombras	2-3
Entorno Suburbano	2-3
Zonas Industriales	2.2

Tabla 4.1. Valores de n para Diferentes Entornos [40].

La constante k puede determinarse midiendo la pérdida de propagación a una distancia unitaria de referencia, resultando la ecuación 4.9 a partir de la ecuación 4.8.

$$l_b = l_o \cdot d[m]^n \quad (4.9)$$

En unidades logarítmicas las ecuaciones 4.8 y 4.9 quedan expresadas mediante las ecuaciones 4.10 y 4.11.

$$L_b[\text{dB}] = 10 \text{ Log } k + 10n\text{Log}(d[\text{m}]) \quad (4.10)$$

$$L_b[\text{dB}] = L_o + 10n\text{Log}(d[\text{m}]) \quad (4.11)$$

Por lo tanto el modelo teórico de la potencia de recepción está dado por la ecuación 4.12, obtenida a partir de la ecuación 4.7, donde la potencia de transmisión corresponde a 18 dBm y las pérdidas de propagación son las expresadas en la ecuación 4.11.

$$\text{Prx}_{\text{RF}}[\text{dBm}] = 20 - (L_o + 10n\text{Log } d[\text{m}]) \quad (4.12)$$

4.2.1.1. Potencia de Recepción en Banda Base en Exteriores

Las medidas de potencia de recepción en este escenario fueron tomadas ubicando el transmisor a un extremo de la cancha de futbol y el receptor inicialmente a 10 m de distancia del transmisor, posteriormente se aleja cada 5 m hasta alcanzar 60 m, a partir de esta distancia el establecimiento de la conexión entre dispositivos no fue logrado con facilidad, siendo necesario desplazar el equipo receptor hasta 55 m, establecer conexión y posteriormente volver a la distancia deseada. Debido a las desconexiones constantes a partir de 60 m, las medidas fueron tomadas cada 10 m. Los dispositivos fueron situados aproximadamente a una altura de 45 cm del piso. La tabla 4.2 presentada los resultados obtenidos.

Distancia [m]	Potencia de Rx en Banda Base (Prx _{BB} [dBm])
10	-9.62
15	-15.53
20	-16.62
25	-18.51
30	-19.91
35	-22.1
40	-23.3
45	-24
50	-24.3
55	-26
60	-27

70	-27.7
80	-28.3
90	-29.5
100	-30.3

Tabla 4.2. Potencia de Recepción en Banda Base en Exteriores.

En la figura 4.6 se presenta el comportamiento de la potencia de recepción en banda base en función de la distancia a partir de los datos experimentales de la tabla 4.2. Se observa la disminución de la potencia de recepción en banda base con el aumento de la distancia a lo largo de la cancha de fútbol.

Según las especificaciones del módulo BISMII presentadas en la tabla 2.1, el rango de alcance del dispositivo es 250 m en exteriores [34], con base a esto fueron realizadas pruebas a distancias superiores a 100 m (105 m, 110 m, 115m y 120 m) para comprobar este alcance, pero a estas distancias no fue posible bajo ninguna circunstancia establecer conexión entre los dispositivos, evidenciando de esta forma que el alcance máximo del módulo BISMII en exteriores no es el presentado en las especificaciones del kit de desarrollo, comprobando y concluyendo que el alcance máximo del dispositivo en este escenario corresponde a 100 m, tal y como lo especifica el estándar Bluetooth® para dispositivos clase 1 [2], como se presenta en la tabla 1.2.

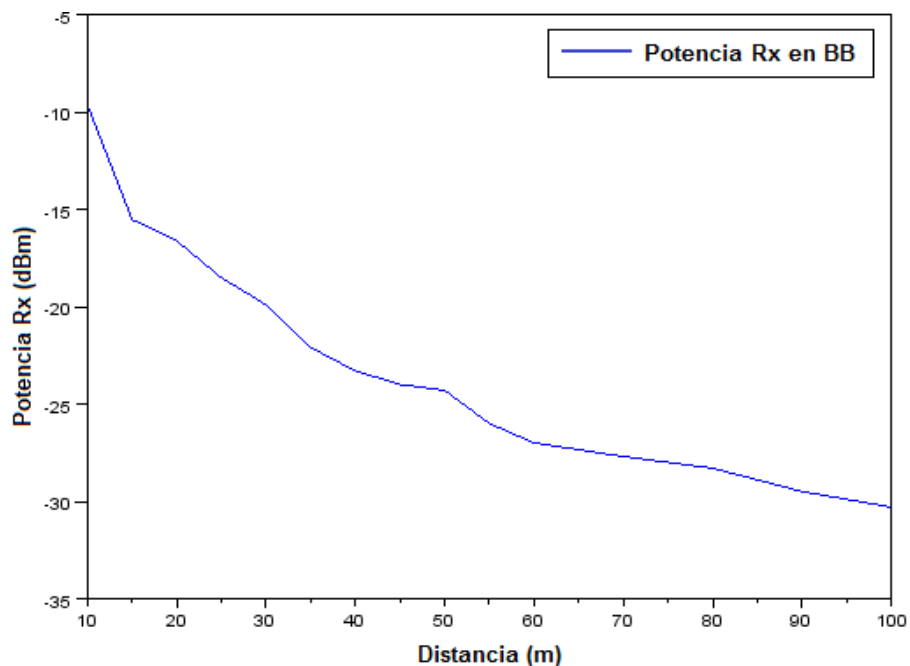


Figura 4.6. Potencia de Recepción en Banda Base en Exteriores.

4.2.1.2. Potencia de Recepción en Banda Base en Interiores

Las medidas de potencia de recepción en este escenario fueron tomadas ubicando el transmisor a un extremo del pasillo y el receptor inicialmente a 3 m de distancia del transmisor, posteriormente cada 3 m hasta llegar a la distancia máxima del pasillo correspondiente a 60 m. Los dispositivos fueron situados a la misma altura del piso que en exteriores. La tabla 4.3 presenta los resultados obtenidos.

Distancia [m]	Potencia de Rx en Banda Base ($P_{rx_{BB}}$ [dBm])
3	0.76
6	-5.5
9	-7.68
12	-5.2
15	-9.48
18	-11.5
21	-10.9
24	-17.7
27	-18.28
30	-21.42
33	-18.36
36	-21.6
39	-16.46
42	-20.28
45	-22.4
48	-23.6
51	-22.5
54	-34.5
57	-35.5
60	-36

Tabla 4.3. Potencia de Recepción en Banda Base en Interiores.

En la figura 4.7 se presenta el comportamiento de la potencia de recepción en banda base en función de la distancia a partir de los datos experimentales de la tabla 4.3.

Se observa que para las distancias entre 3 m y 51 m, que corresponden al corredor principal en el que los dispositivos presentan línea de vista, los niveles de potencia de recepción en banda base crecen y decrecen con el aumento de la distancia, debido a que las señales que están confinadas a lo largo del pasillo experimentan los efectos de la interferencia constructiva y destructiva en el receptor como resultado de la multitrayectoria

característica en este tipo de escenarios [41]. Cuando el equipo receptor se encuentra cercano al transmisor capta los mayores niveles de potencia, a su vez, a medida que el receptor se aleja del transmisor el nivel de potencia recibido en banda base disminuye. En promedio la potencia de recepción en banda base disminuye conforme aumenta la distancia a lo largo del corredor, esta disminución se observa en mayor nivel a partir de 51 m, dado que en esta distancia se presenta el cambio de corredor, perdiendo los dispositivos la línea de vista. Por lo tanto la potencia de recepción en banda base cae hasta - 36 dBm.

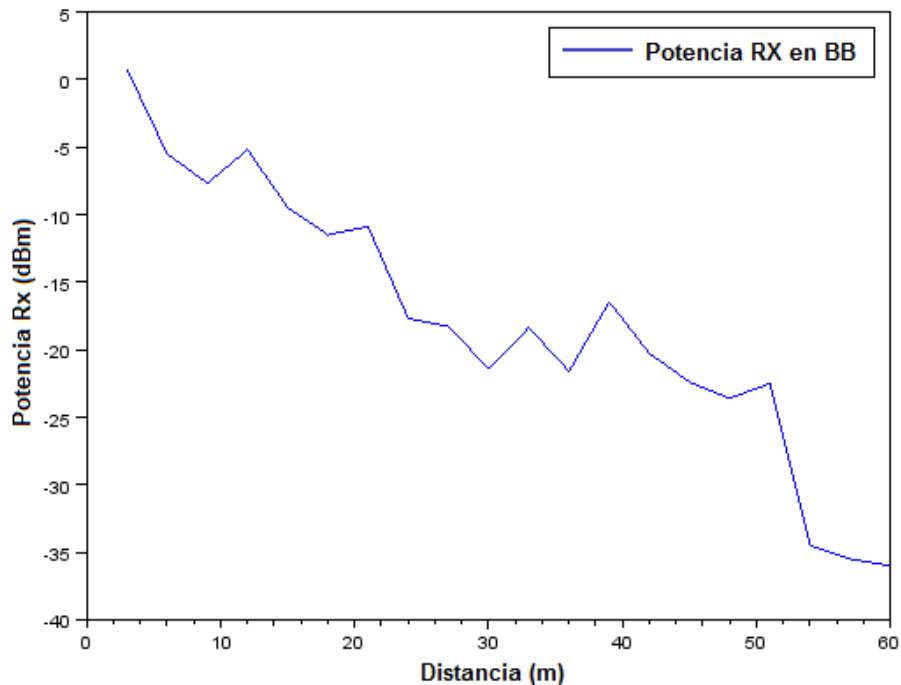


Figura 4.7. Potencia de Recepción en Banda Base en Interiores.

4.2.2. Comparación Potencia de Recepción en Banda Base con los Resultados Obtenidos en Wireless InSite®

En esta sección se realiza la comparación de los resultados experimentales de la potencia de recepción en banda base en exteriores e interiores, con los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas con la herramienta de predicción de propagación de señales RF Wireless InSite®.

Como se mencionó en la sección 4.2.1 entre el nivel RF y el nivel banda base se realizan una serie de procesos de adaptación de señal, entre ellos la amplificación. Por tal motivo es necesario aplicar un factor de corrección (β) para convertir los niveles de potencia de recepción en banda base entregados por el kit de desarrollo a niveles de potencia de recepción en RF. Este factor (β) corresponde a la ganancia producida sobre la señal en

recepción al pasar del nivel RF a el nivel de banda base, tal y como se expresa en la siguiente relación.

$$\beta = G_{RX_{RF}}$$

Debido a lo anterior los resultados de potencia de recepción en banda base mostrados a continuación presentan niveles de potencia de recepción en un rango superior al presentado en la simulación con la herramienta Wireless InSite®.

- **Exteriores**

La simulación del escenario de exteriores, consistió en la definición del transmisor, una ruta de receptores sobre la cancha de futbol y un área de estudio alrededor del escenario, haciendo uso del modelo de propagación Full 3D y la técnica de trazado de rayos SBR. En la figura 4.8 se observa, la ubicación del punto de transmisión y la ruta de receptores dentro del escenario, teniendo en cuenta que la ruta se inicia a 10 m del transmisor, se define a lo largo de los 100 m de la cancha, con una separación entre receptores de 5 metros. Los parámetros de simulación del sistema se establecieron como fue indicado en la sección 3.4.

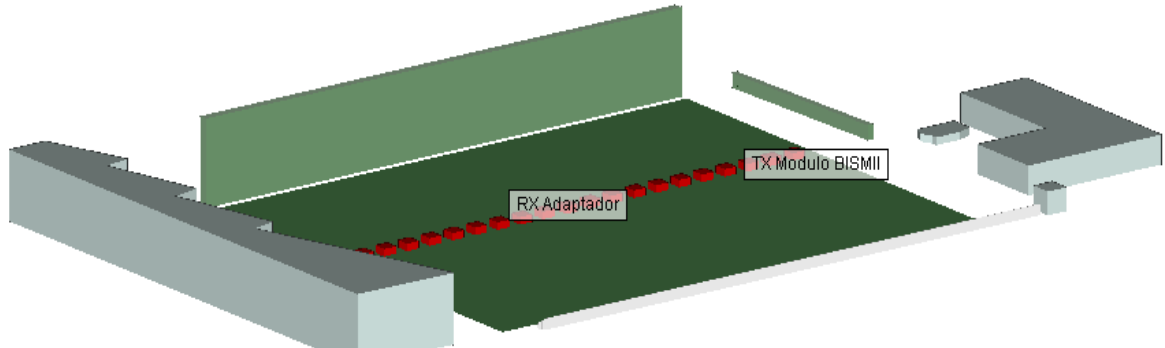


Figura 4.8. Escenario de Exteriores Wireless InSite® con Ruta de Receptores.

En la tabla 4.4 se muestran los resultados de las medidas reales de potencia de recepción en banda base obtenidas con el kit de desarrollo BISDK02BI-02 y las medidas de potencia de recepción en RF estimadas por la herramienta Wireless InSite® en exteriores para las diferentes distancias presentes en la columna 1. La columna 4 registra los valores de β los cuales corresponden a la diferencia entre la potencia de recepción en banda base (columna 2) y la potencia de recepción en RF (columna 3).

Distancia	Potencia de Rx en Banda Base (Prx _{BB} [dBm])	Potencia de Rx en RF Wireless Insite® (Prx _{RF} [dBm])	β [dB] = Grx _{RF} [dB]
10	-9.62	-39.85	30.23
15	-15.53	-43.42	27.89
20	-16.62	-45.95	29.33
25	-18.51	-47.91	29.4
30	-19.91	-49.5	29.59
35	-22.1	-50.85	28.75
40	-23.3	-51.68	28.38
45	-24	-53.43	29.43
50	-24.3	-54.22	29.92
55	-26	-54.83	28.83
60	-27	-55.74	28.74
70	-27.7	-56.9	29.2
80	-28.3	-58.07	29.77
90	-29.5	-58.39	28.89
100	-30.3	-58.9	28.6

Tabla 4.4. Potencia de Recepción en Banda Base y Potencia de Recepción en RF Wireless Insite® en Exteriores.

Al analizar las diferencias entre las potencias de recepción de banda base y RF (columna 4, tabla 4.4) para las diferentes distancias en exteriores, se observa que estas son muy cercanas mas no iguales, por lo tanto es calculado el promedio de las diferencias como un valor de referencia, el cual corresponde 29.13 dB.

En la figura 4.9 se muestra la comparación de los resultados presentados en la tabla 4.4. En donde la curva en color azul representa la potencia de recepción en banda base obtenida con el kit de desarrollo BISK02BI-02 y la curva en color negro corresponde a la potencia de recepción en RF estimada por la herramienta Wireless InSite® en exteriores.

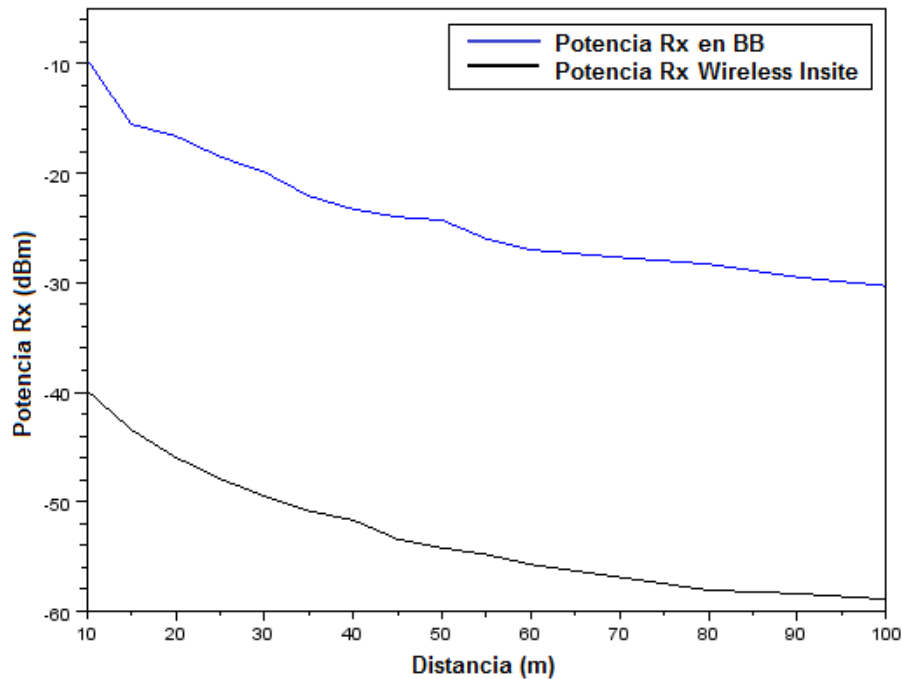


Figura 4.9. Comparación Potencia de Recepción en Banda Base con Resultados de Potencia de Recepción en RF Wireless InSite® en Exteriores.

El sistema simulado con Wireless InSite® presentó una variación de potencia de recepción en RF en un rango de -39.85 dBm a -58.9 dBm.

- **Interiores.**

La simulación del escenario de interiores, consistió en la definición del transmisor, una ruta de receptores sobre el pasillo y un área de estudio alrededor del escenario, haciendo uso del modelo de propagación Full 3D y la técnica de trazado de rayos SBR. En la figura 4.10 se observa, la ubicación del punto de transmisión y la ruta de receptores dentro del escenario, teniendo en cuenta que la ruta se inicia a 3 m del transmisor, se define a lo largo del corredor principal y termina en el corredor siguiente, con una separación entre receptores de 3 metros. Los parámetros de simulación del sistema se establecieron como fue indicado en la sección 3.4.

En la tabla 4.5 se muestran los resultados de las medidas reales de potencia de recepción en banda base obtenidas con el kit de desarrollo BISDK02BI-02 y las medidas de potencia de recepción en RF estimadas por la herramienta Wireless InSite® en interiores para las diferentes distancias presentes en la columna 1. La columna 4 registra la diferencia entre la potencia de recepción en banda base (columna 2) y la potencia de recepción en RF (columna 3).

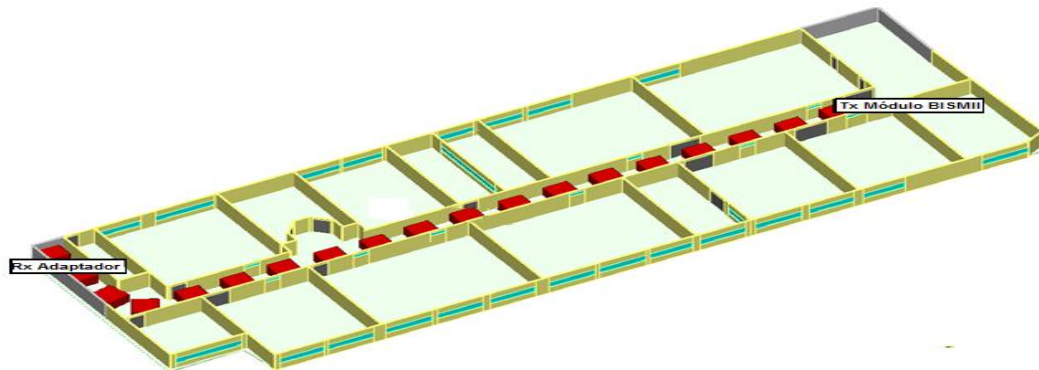


Figura 4.10. Escenario de Interiores Wireless InSite® con Ruta de Receptores [38].

Distancia	Potencia de Rx en Banda Base (Pr _{X_{BB}} [dBm])	Potencia de Rx en RF Wireless Insite® (Pr _{X_{RF}} [dBm])	β [dB] = Gr _{X_{RF}} [dB]
3	0.76	-27.48	28.24
6	-5.5	-36.82	31.32
9	-7.68	-37.61	29.93
12	-5.2	-35.2	30
15	-9.48	-39.76	30.28
18	-11.5	-39.3	27.8
21	-10.9	-43.44	32.54
24	-17.7	-46.57	28.87
27	-18.28	-48.07	30.07
30	-21.42	-49	27.58
33	-18.36	-50.48	32.12
36	-21.6	-49.11	27.51
39	-16.46	-45.69	29.23
42	-20.28	-50.99	30.71
45	-22.4	-49.1	26.7
48	-23.6	-52.44	28.84
51	-22.5	-53.1	30.6
54	-34.5	65.1	30.6
57	-35.5	-66	30.5
60	-36	67	31

Tabla 4.5. Potencia de Recepción en Banda Base y Potencia de Recepción en RF Wireless Insite® en Interiores.

Al analizar las diferencias entre las potencias de recepción de banda base y RF (columna 4, tabla 4.5) para las diferentes distancias en interiores, se observa que estas son muy cercanas mas no iguales, por lo tanto es calculado el promedio de las diferencias como un valor de referencia, el cual corresponde 29.72 dB.

En la figura 4.11 se muestra la comparación de los resultados presentados en la tabla 4.5. En donde la curva en color azul representa la potencia de recepción en banda base obtenida con el kit de desarrollo BISDK02BI-02 y la curva en color negro la potencia de recepción en RF estimada por la herramienta Wireless InSite® en interiores.

Notándose la disminución significativa del nivel de potencia a partir de 51 m. para los primeros metros se registra un mayor nivel de potencia debido a la incidencia directa de transmisor a receptor.

Se pudo determinar que la presencia de obstáculos en el medio de propagación reduce considerablemente la potencia de recepción del sistema de comunicación de datos vía radio. Por esta razón las pruebas presentadas a continuación se realizaron bajo condiciones libres de obstáculos, es decir a lo largo del corredor principal de 51 m.

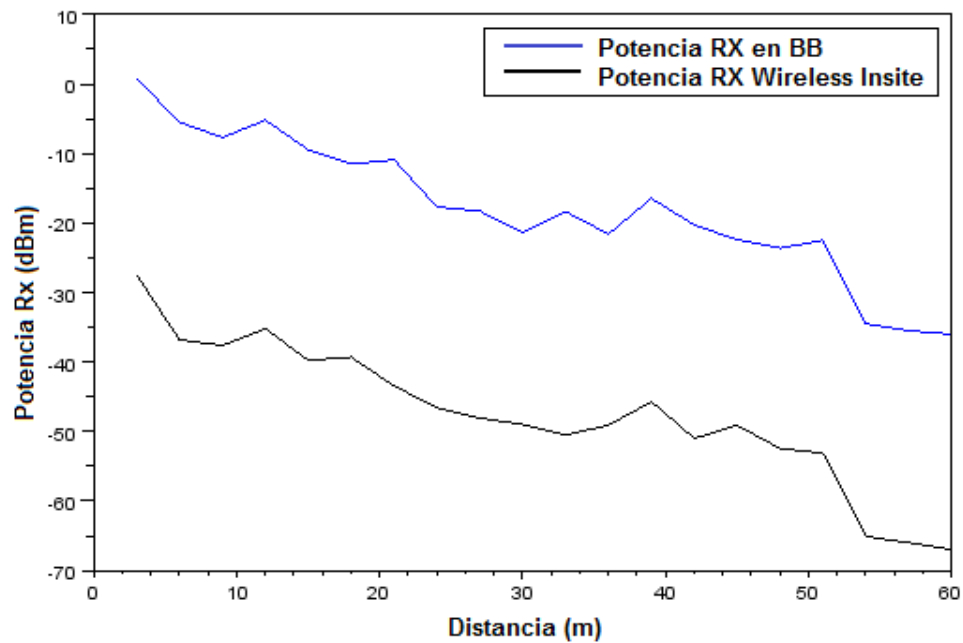


Figura 4.11. Comparación Potencia de Recepción en Banda Base con Resultados de Potencia de Recepción en RF Wireless InSite® en Interiores.

El sistema simulado con Wireless InSite® presentó una variación de potencia de recepción en un rango de - 27.48 dBm a - 67 dBm.

4.2.3. Pérdidas Básicas de Propagación

Cuando una señal viaja en el espacio, se propaga sobre una superficie cada vez mayor a medida que se aleja del transmisor. Por lo tanto es importante conocer las pérdidas de propagación del sistema, las cuales son calculadas mediante la ecuación 4.4. Para lo cual es necesario calcular las ganancias de transmisión en RF para cada uno de los escenarios presentes a continuación.

- **Exteriores**

En la tabla 4.6 se presentan las pérdidas de propagación del sistema en exteriores y cada uno de los parámetros necesarios para calcularlas a partir de la ecuación 4.4. La columna 2 registra la ganancia de transmisión en RF calculada en la ecuación 4.5. La columna 3 registra las ganancias de recepción en RF presentes en la tabla 4.4. La columna 4 y 5 registran la potencia de transmisión en banda base y la potencia de recepción en banda base (tabla 4.2) necesarias para calcular la ganancia del sistema presente en la columna 6 a partir de la ecuación 4.2.

Distancia	G _{tx_{RF}} [dB]	G _{rx_{RF}} [dB]	P _{tx_{BB}} [dBm]	P _{rx_{BB}} [dBm]	G _s [dB]	L _b [dB]
10	14	30.23	4	-9.62	-13.62	59.85
15	14	27.89	4	-15.53	-19.53	63.42
20	14	29.33	4	-16.62	-20.62	65.95
25	14	29.4	4	-18.51	-22.51	67.91
30	14	29.59	4	-19.91	-23.91	69.5
35	14	28.75	4	-22.1	-26.1	70.85
40	14	28.38	4	-23.3	-27.3	71.68
45	14	29.43	4	-24	-28	73.43
50	14	29.92	4	-24.3	-28.3	74.22
55	14	28.83	4	-26	-30	74.83
60	14	28.74	4	-27	-31	75.74
70	14	29.2	4	-27.7	-31.7	76.9
80	14	29.77	4	-28.3	-32.3	78.07
90	14	28.89	4	-29.5	-33.5	78.39
100	14	28.6	4	-30.3	-34.3	78.9

Tabla 4.6. Perdidas de Propagación en Exteriores.

La figura 4.12 presenta el efecto de las pérdidas de propagación en exteriores en función de la distancia.

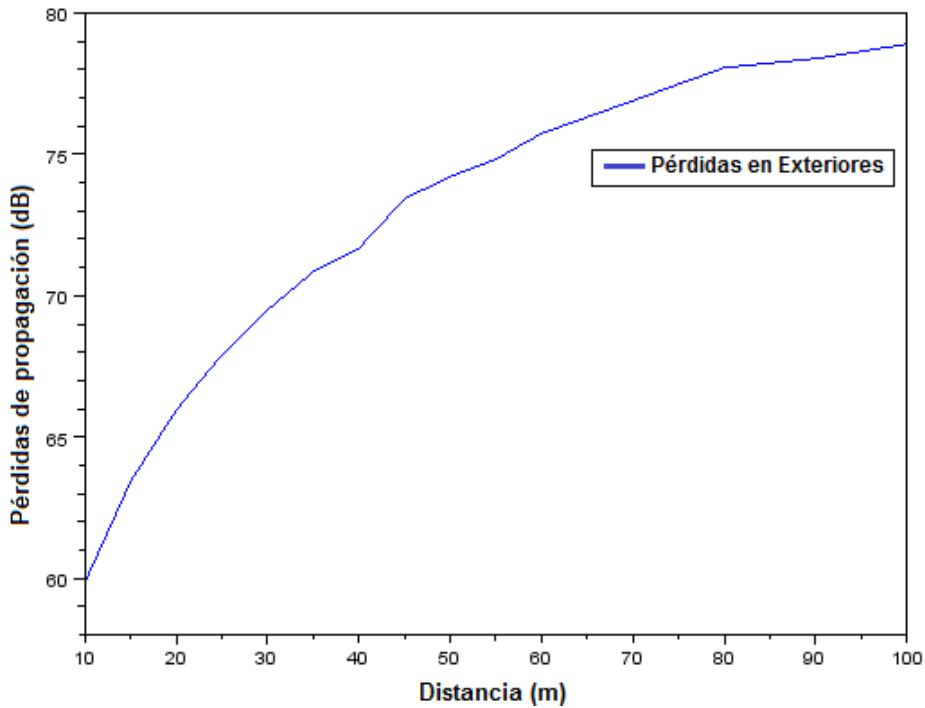


Figura 4.12. Perdidas de Propagación en Exteriores.

Para representar las pérdidas de propagación teóricas mediante la ecuación 4.11, es necesario medir la pérdida básica de propagación a una distancia de 1 m de referencia L_0 [dB]. Para la determinación de esta pérdida, la potencia de recepción en banda base a 1 m corresponden a 5.5 dBm, la potencia de recepción en radio frecuencia a 1 m determinada a partir de Wireless InSite® es igual a -23.5 dBm, Por lo tanto β [dB] = 29. Con base a esto la pérdida de propagación a 1 m es calculada a partir de la ecuación 4.4, resultando L_0 [dB] igual a 43.5.

De la tabla 4.1 se tiene que para exteriores el exponente de propagación n es igual a 2. Sin embargo, con un exponente de propagación $n=1.8$ las pérdidas de propagación de exteriores obtenidas mediante la ecuación 4.12 presentan la mayor coincidencia con los valores obtenidos de pérdidas reales (tabla 4.6), como se observa en la figura 4.13.

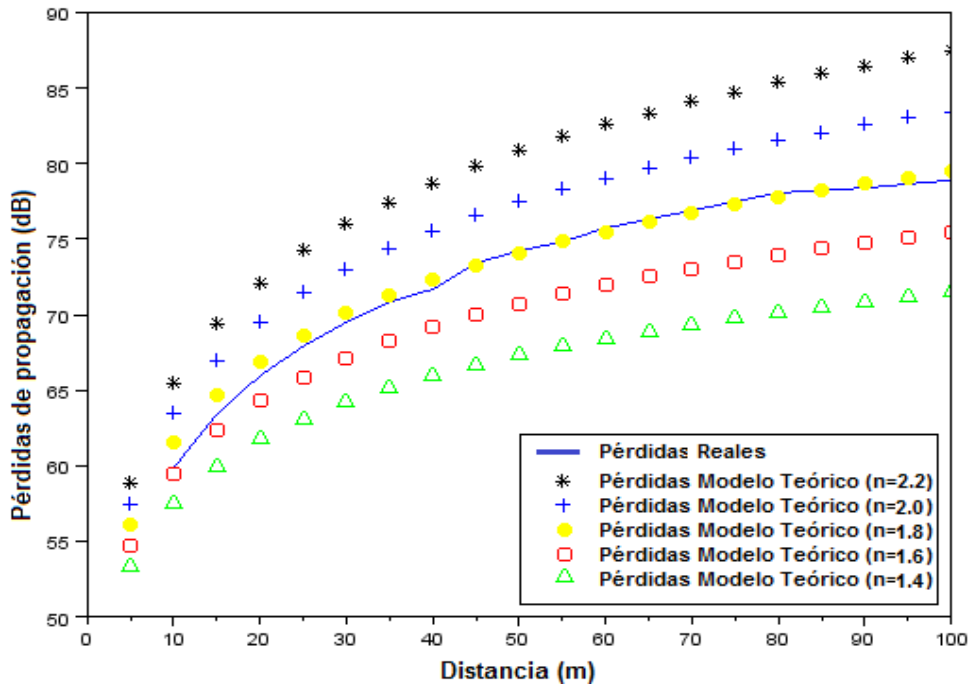


Figura 4.13. Comparación Pérdidas de Propagación Reales con Pérdidas de Propagación Teóricas en Exteriores.

- **Interiores**

En la tabla 4.7 se presenta las pérdidas de propagação del sistema en interiores y cada uno de los parámetros necesarios para calcularlas a partir de la ecuación 4.4. La columna 2 registra la ganancia de transmisión en RF calculada en la ecuación 4.5. La columna 3 registra las ganancias de recepción en RF presentes en la tabla 4.5. La columna 4 y 5 registran la potencia de transmisión en banda base y la potencia de recepción en banda base (tabla 4.3) necesarias para calcular la ganancia del sistema presente en la columna 6 a partir de la ecuación 4.2.

Distancia	G _{tx_{RF}} [dB]	G _{rx_{RF}} [dB]	P _{tx_{BB}} [dBm]	P _{rx_{BB}} [dBm]	G _s [dB]	L _b [dB]
3	14	28.24	4	0.76	-3.24	47.48
6	14	31.32	4	-5.5	-9.5	56.82
9	14	29.93	4	-7.68	-11.68	57.61
12	14	30	4	-5.2	-9.2	55.2
15	14	30.28	4	-9.48	-13.48	59.76
18	14	27.8	4	-11.5	-15.5	59.3

21	14	32.54	4	-10.9	-14.9	63.44
24	14	28.87	4	-17.7	-21.7	66.57
27	14	30.07	4	-18.28	-22.28	68.35
30	14	27.58	4	-21.42	-25.42	69
33	14	32.12	4	-18.36	-22.36	70.48
36	14	27.51	4	-21.6	-25.6	69.11
39	14	29.23	4	-16.46	-20.46	65.69
42	14	30.71	4	-20.28	-24.28	70.99
45	14	26.7	4	-22.4	-26.4	69.1
48	14	28.84	4	-23.6	-27.6	72,44
51	14	30.6	4	-22.5	-26.5	73.1

Tabla 4.7. Pérdidas de Propagación en Interiores.

En la figura 4.14, se puede observar el efecto de las pérdidas de propagación de espacio libre producidas en este escenario.

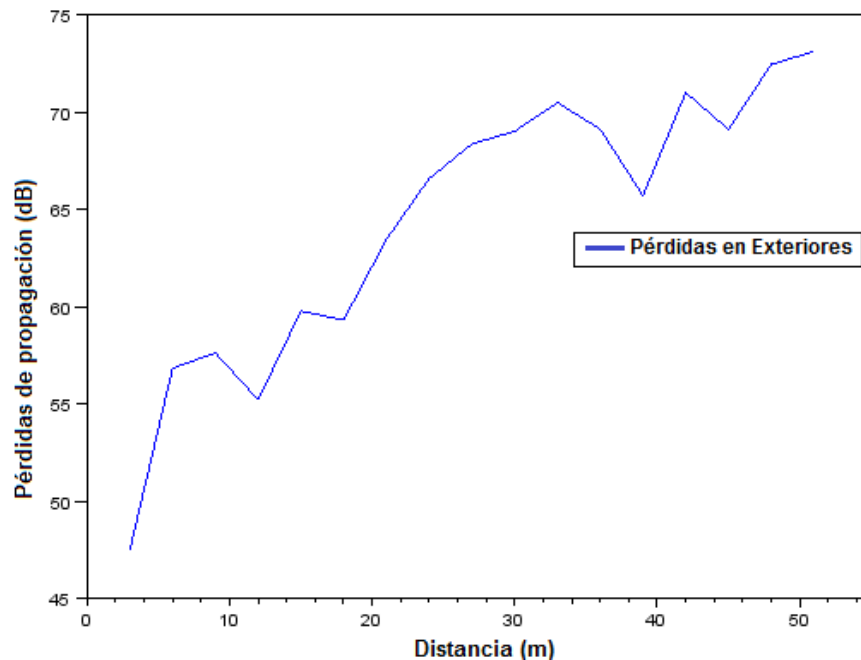


Figura 4.14. Pérdidas de Propagación en Interiores.

Para representar las pérdidas de propagación teóricas mediante la ecuación 4.11, es necesario medir la pérdida básica de propagación a una distancia de 1 m de referencia L_0 .

[dB]. Para la determinación de esta pérdidas, la potencia de recepción en banda base a 1 m corresponde a 9.9 dBm, la potencia de recepción en radio frecuencia a 1 m determinada a partir de Wireless InSite® es igual a -20 dBm, Por lo tanto β [dB] = 29.9. Con base a esto la pérdida de propagación a 1 m es calculada a partir de la ecuación 4.4, resultando L_0 [dB] igual a 40.

De la tabla 4.1 se tiene que para interiores el exponente de propagación n esta entre 1.6 y 1.8. Como se observa en la figura 4.15, con un exponente de propagación $n=1.6$ las pérdidas de propagación en interiores obtenidas mediante la ecuación 4.11, presentan la mayor coincidencia con los valores obtenidos de pérdidas reales (tabla 4.7).

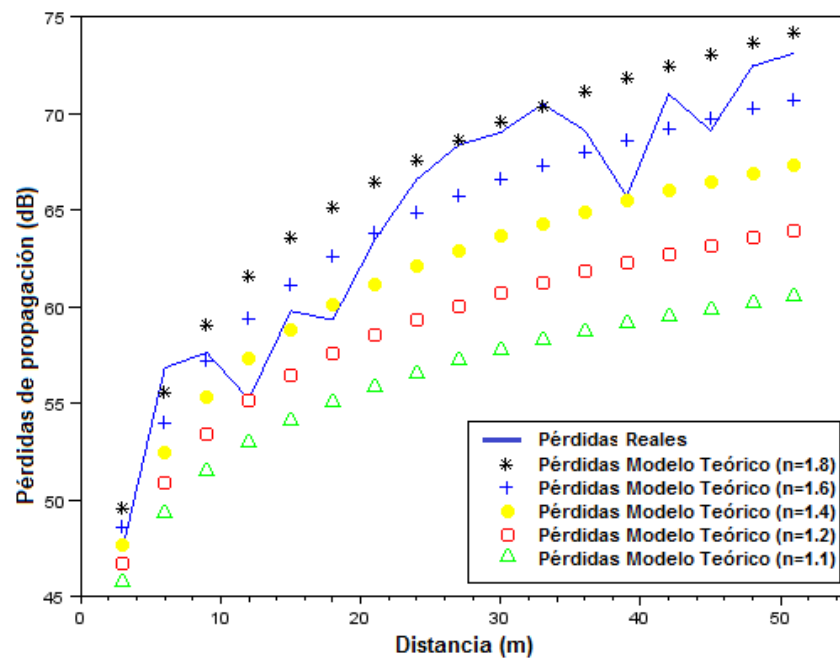


Figura 4.15. Comparación Pérdidas de Propagación Reales con Pérdidas de Propagación Teóricas en Interiores.

4.2.4. Comparación Potencia de Recepción en RF con Modelo Teórico de Potencia de Recepción

- **Exteriores**

Teniendo en cuenta que el valor de n escogido para exteriores es 1.8, el modelo teórico de la potencia de recepción en RF para este escenario está dado por la ecuación 4.13, calculada a partir de la ecuación 4.12.

$$Pr_{RF}[\text{dBm}] = -(23.5 \text{ dBm} + 18\text{Log } d[\text{m}]) \quad (4.13)$$

La figura 4.16 presenta la comparación de la potencia de recepción en RF y la potencia de recepción teórica.

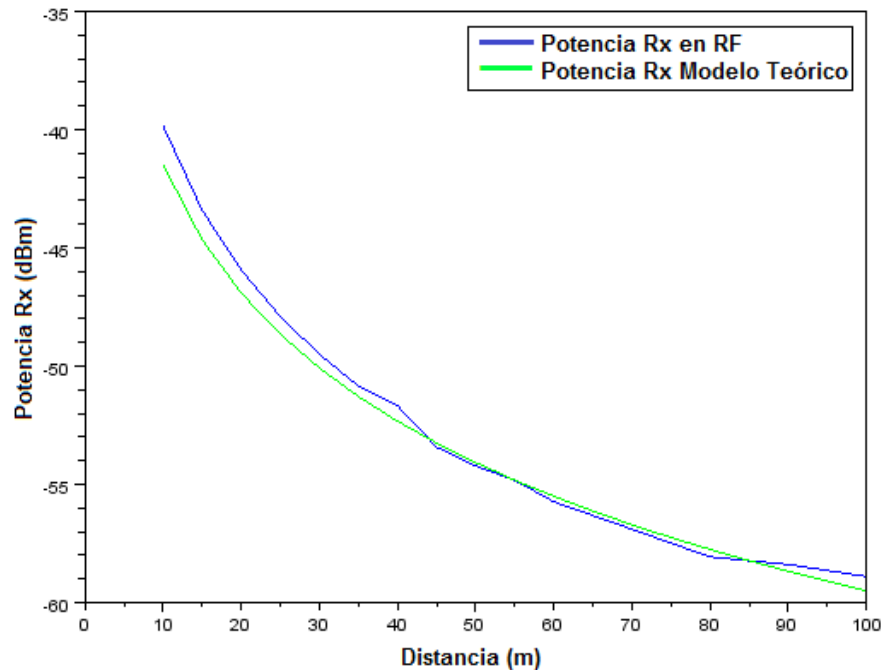


Figura 4.16. Comparación Potencia de Recepción en RF con Potencia de Recepción Teóricas en Exteriores.

En la figura 4.16 se observa el comportamiento representado por la potencia de recepción en radio frecuencia (curva azul) obtenida una vez es aplicado a la potencia de recepción en banda base el factor de corrección β y la potencia de recepción calculada teóricamente a partir de la ecuación 4.13 (curva verde), se observa que las curvas presentan igual comportamiento, ya que a medida que aumenta la distancia entre el transmisor y los puntos receptores la potencia de recepción disminuye debido a que las señales sufren mayores pérdidas de propagación, el comportamiento suave representado en estas curvas son resultado del escenario de exteriores en el que la atenuación producida sobre la señal es productos de las perdidas de espacio libre y no de la multi trayectoria, observándose de esta manera que las señales presentan una similitud en muchos puntos de la curva.

- **Interiores**

Teniendo en cuenta que el valor de n escogido para interiores es 1.6, el modelo teórico de la potencia de recepción para este escenario está dado por la ecuación 4.14, calculada a partir de la ecuación 4.12.

$$P_{Rx}[\text{dBm}] = -(20 + 16\text{Log } d[\text{m}]) \quad (4.14)$$

La figura 4.17 presenta la comparación de la potencia de recepción en RF y la potencia de recepción teórica.

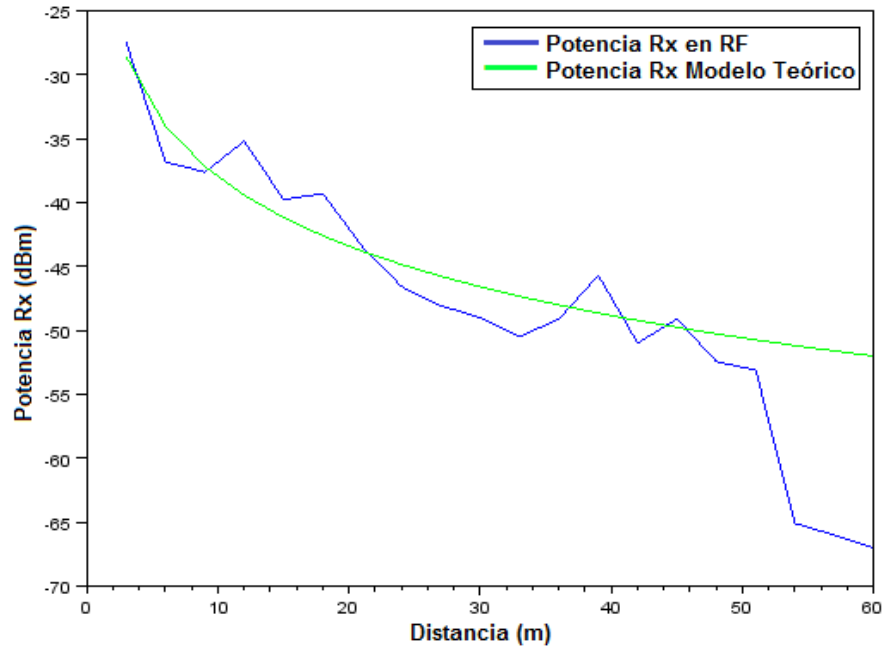


Figura 4.17. Comparación Potencia de Recepción en RF con Potencia de Recepción Teóricas en Interiores.

En la figura 4.17 se puede analizar el comportamiento similar entre las curvas representadas por la potencia de recepción en radio frecuencia (curva azul) y la potencia de recepción calculada a partir de la ecuación 4.14 (curva verde), donde se observa un decremento de la potencia a medida que aumenta la distancia, la curva azul presenta niveles de potencia diferentes a la curva verde que sigue un comportamiento suave, estas variaciones en el nivel de potencia son ocasionados debido al fenómeno de la multi trayectoria. Cabe resaltar que la curva azul depende de todos los elementos involucrados en un escenario de interiores ya que los valores de potencia graficados fueron tomados en escenarios reales de operación, mientras que la curva verde solo depende directamente de la distancia.

4.2.5. Dispersión del Retardo y Tiempo de Llegada

- **Exteriores**

En la figura 4.18 se muestra la diferencia del tiempo de llegada de los rayos a cada punto receptor en exteriores con sus respectivos valores de potencia de recepción, se observa

una única componente de trayectoria directa para cada uno de los receptores, además de la atenuación producida a medida que los puntos se distancian y el tiempo de llegada de los rayos aumenta.

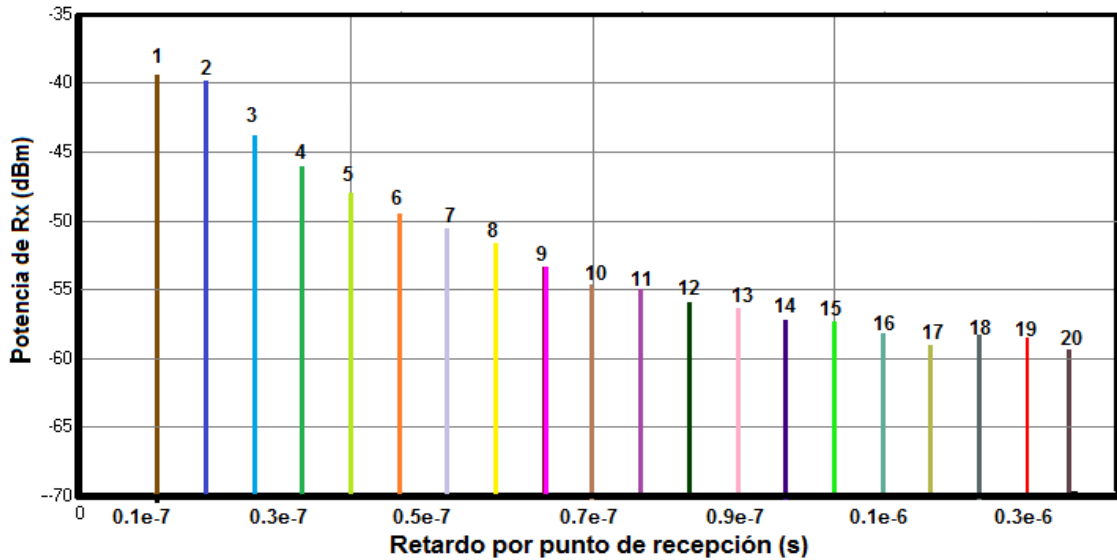


Figura 4.18. Potencia de Recepción vs. Retardo para 20 Puntos Receptores Ubicados en Exteriores.

- **Interiores**

Como ha sido posible observar en anteriores representaciones, en cualquier escenario de interiores se 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. Este fenómeno juega un papel muy importante en las redes inalámbricas de alta velocidad, donde la interferencia ocasiona variaciones en la potencia de recepción [41]. La dispersión del retardo (*delay spread*) es una medida de los efectos relacionados al multitrayecto en el canal de comunicaciones y es un parámetro importante, ya que puede limitar de forma directa la velocidad de transmisión de datos del enlace [20]. Por ello se considera importante representar dicho parámetro a través de la ruta de receptores ubicados en el escenario de interiores, mediante Wireless InSite® como se muestra en la figura 4.19.

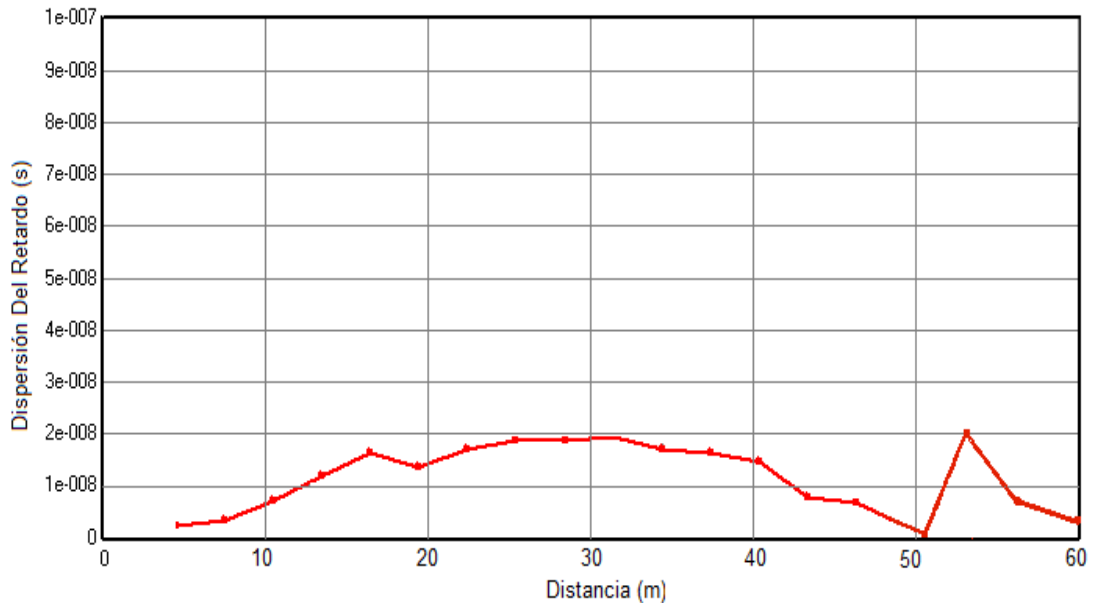


Figura 4.19. Dispersión del Retador vs Distancia.

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. Aproximadamente en 32 m la dispersión del retardo disminuye ya que los trayectos que alcanzan los puntos receptores disminuyen o presentan menos interacciones, pero experimentan mayor atenuación. A partir de 51 m se observa que las señales que llegan a los puntos de la ruta ubicados en ese espacio se retardan significativamente, ya que es a partir de esta distancia donde los dispositivos pierden línea de vista por el cambio de corredor, encontrando los rayos diferentes caminos u obstrucciones y experimentando mayor número de iteraciones con estructuras u objetos, por lo tanto recorren una longitud mayor para llegar al punto de recepción. A partir de 54 m la dispersión de retardo empieza a disminuir, llegando los rayos 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.

La dispersión del retardo influye directamente en la Interferencia Intersimbólica (ISI) en el dominio de la frecuencia, limitando la velocidad de transmisión de datos. Además produce distorsión sobre la señal recibida en el dominio del tiempo y Desvanecimiento Selectivo en Frecuencia (FSF, *Frequency Selective Fading*) para sistemas de banda ancha, el desvanecimiento selectivo en frecuencia de un canal se caracteriza mediante el Ancho de Banda de Coherencia (B_c), calculado a partir de la dispersión del retardo como se indica en la ecuación 4.15, además define el rango de frecuencias sobre las cuales el canal es considerado plano.

$$B_C[\text{KHz}] = \frac{1}{2\pi D[\mu\text{s}]} \quad (4.15)$$

Donde

D : Valor más alto de la dispersión de retardo.

Si el ancho de banda de la señal transmita es menor al ancho de banda de coherencia del canal ($B_{CH} < B_c$) las componentes espectrales de la señal se encuentran correlacionadas y presentan el mismo desvanecimiento es decir desvanecimiento plano.

Por otra parte si el ancho de banda de la señal transmitida es mayor al ancho de banda de coherencia ($B_{CH} > B_c$) habrá componentes que se desvanecen cuando otras no lo hacen, esto se denomina desvanecimiento no correlacionado o desvanecimiento selectivo en frecuencia.

En la figura 4.19 se observa que el valor representado por la mayor dispersión, se produce en la distancia de 54 m y es igual a 2.015 E-08. Empleando la ecuación 4.15 el resultado del ancho de banda de coherencia es 7.898 MHz. Comparando este valor con el ancho de banda de un canal empleado por Bluetooth® (1 MHz), se determinó que el ancho de banda por canal es menor al ancho de banda de coherencia ($B_{CH} < B_c$) esto indica que las componentes espectrales de un canal presentan desvaneciendo plano.

En la figura 4.20 se representa la potencia de recepción de los rayos en relación con sus tiempos de llegada, para ello fueron escogidos 6 puntos de la ruta receptora ubicados a: 3 m, 9 m, 12 m, 21 m, 30 m, 42 m, en la cual se observa como los rayos que llegan en menor tiempo a cada punto de la ruta de recepción son los rayos con mayor potencia, los siguientes rayos presentan retardo y atenuación debido a que son resultado del fenómeno de multitrayectoria.

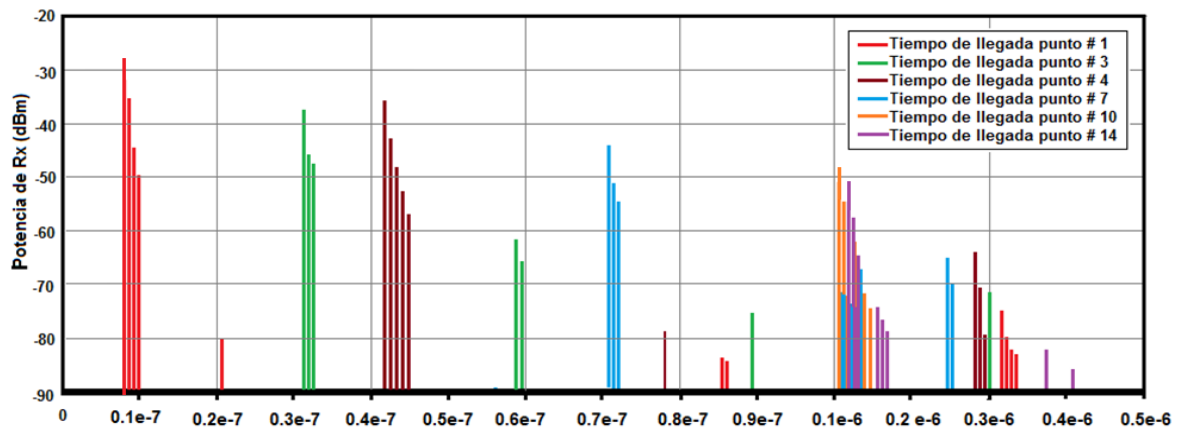


Figura 4.20. Tiempo de Llegada.

4.2.6. Determinación del Ancho de Banda

Gracias a sus numerosas funciones el equipo utilizado para evaluar el ancho de banda del sistema es el analizador vectorial de redes ZLV Rohde & Schwarz²⁸ el cual provee altos estándares de calidad, compatible con diferentes dispositivos hardware y software, proporcionando flexibilidad y amplia funcionalidad. Su rango de operación está entre los 9 KHz y los 6 GHz [42]. Este dispositivo combina las funciones de un analizador de redes, un analizador de espectro y un medidor de potencia en un solo instrumento de medida; supremamente útil para el desarrollo de proyectos de investigación en el área de las redes inalámbricas.

Como se menciona en el capítulo 1, el sistema Bluetooth® emplea la técnica de transmisión FHSS, con un valor de saltos estándar de 1600 saltos por segundo, donde cada ranura de tiempo tiene una duración de 625 μ s, siendo este tiempo inferior a 2.5 ms usados por el analizador vectorial de red para escanear o realizar el barrido del espectro completo en el rango de frecuencias definido. Debido a esto, para visualizar el espectro del sistema se debió esperar un tiempo considerable para que el sistema transmitiera en todos los canales o en la mayoría de ellos.

El analizador vectorial de redes ZLV Rohde & Schwarz fue configurado en el rango de frecuencias de 2.38 GHz a 2.5 GHz, con el objetivo de capturar la mejor representación del espectro del sistema mostrada en la figura 4.21, donde los marcadores M1 y M2 corresponden a los puntos en donde la densidad espectral de potencia se encuentra 30 dB por debajo de la amplitud máxima. Se observa el marcador M2 en la frecuencia igual a 2.48 GHz y el marcador M1 en la frecuencia igual a 2.3988 GHz.

El ancho de banda práctico del sistema corresponde a la separación en frecuencia entre los puntos M2 y M1, siendo posible determinar esta diferencia con el equipo analizador vectorial de redes como se ilustra en la figura 4.22, donde la diferencia de frecuencias es señalada por el resultado del marcador D2.

²⁸ <http://www2.rohde-schwarz.com>

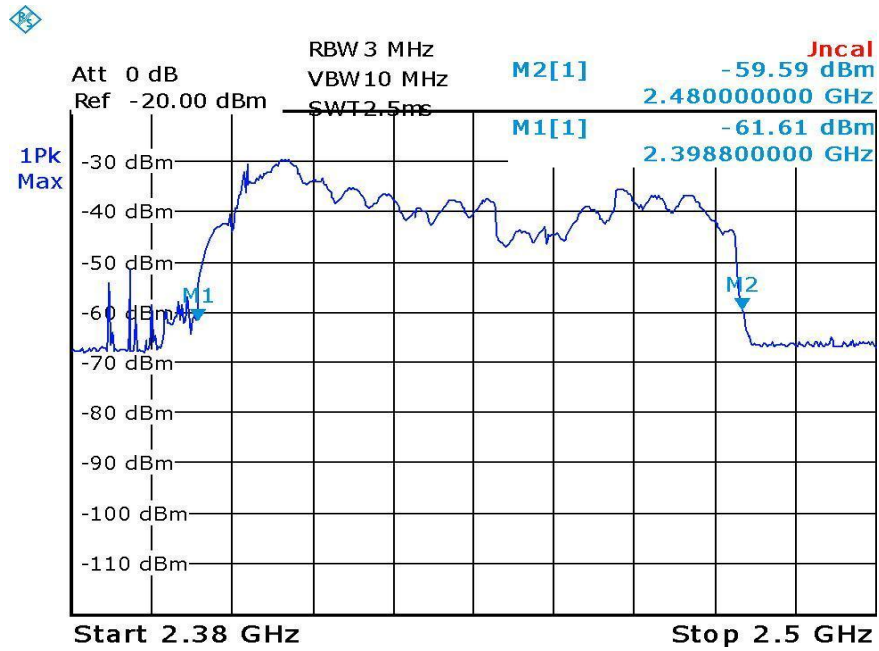


Figura 4.21. Ancho de Banda de 30 dB.

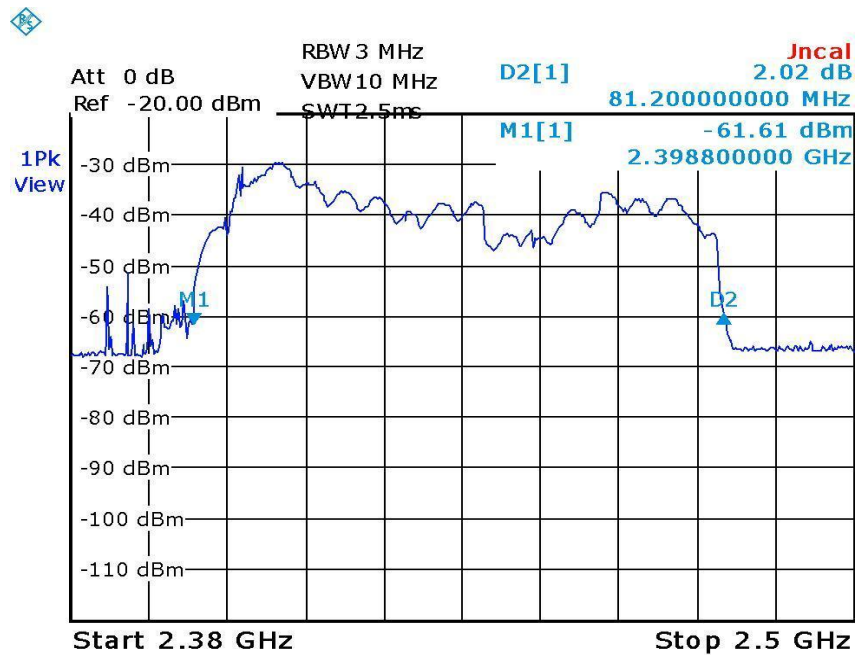


Figura 4.22. Ancho de Banda de 30 dB (2).

Por lo tanto el ancho de banda del sistema es representado mediante la ecuación 4.16.

$$BW = M2 - M1 = 2.48 \text{ GHz} - 2.3988 \text{ GHz} = 81.2 \text{ MHz} \quad (4.16)$$

Con base en la ecuación 1.1 y teniendo en cuenta que el sistema Bluetooth® divide la banda de frecuencia asignada en 79 canales individuales de 1 MHz cada uno, como se expresó en la sección 1.2.1.1, el ancho de banda teórico del sistema corresponde a 79 MHz.

Al reemplazar el valor teórico y práctico del ancho de banda del sistema en la ecuación 4.17 se calcula el error en la precisión de la medida del ancho de banda.

$$\text{Error} = \frac{|\text{Teórico} - \text{Experimental}|}{\text{Teórico}} * 100\% \quad (4.17)$$

$$\text{Error} = \frac{|79 \text{ MHz} - 81.20 \text{ MHz}|}{79 \text{ MHz}} * 100\% = 2.78\%$$

Teniendo en cuenta que el analizador vectorial de redes ZLV Rohde & Schwarz en 2.5 ms realiza el barrido del espectro completo del rango de frecuencias definido, en el sistema implementado no fue posible determinar el ancho de banda del espectro de una portadora completa, debido a la rapidez con la que son producidos los saltos en frecuencia (625 µs). Por lo tanto no es posible visualizar el espectro de un canal de 1 MHz en 2.5 ms.

4.2.7. Efecto de la Temperatura Sobre el Funcionamiento del Sistema

A continuación se analiza el sistema Bluetooth® implementado bajo el efecto de la temperatura (figura 4.23), haciendo uso de un secador para cabello que funciona a 60°C y 5°C.



Figura 4.23. Sistema de Comunicación Bluetooth® Implementado Bajo el Efecto de la Temperatura.

Siguiendo el proceso descrito en 4.2 se obtienen el número de bits errados para la determinación de la BER y la potencia de recepción en banda base (RSSI) ejecutando el *script* 20 veces a temperatura ambiente (25°C). Posteriormente se induce calor (60°C) al dispositivo transmisor y se ejecuta nuevamente el *script* la misma cantidad de veces para obtener el número de bits errados y la potencia de recepción en banda base. Bajo estas condiciones no se presentaron desconexiones durante el periodo de prueba, ni aumento en la Tasa de Bits Errados (BER), ya que los resultados obtenidos en presencia de calor y a temperatura ambiente permanecieron constantes.

Análogamente se realizó la prueba anterior pero induciendo frío (5°C) en vez de calor, los resultados obtenidos también presentaron estabilidad en la conexión y ninguna variación de la potencia de recepción en banda base, permaneciendo constantes los valores de BER y RSSI en comparación a los resultados obtenidos con el sistema a temperatura ambiente (25°C).

Con estas dos pruebas se concluye que el sistema es adecuado para trabajar en diferentes horas del día y a diferentes temperaturas²⁹ ya que los cambios térmicos no presentan ningún efecto que altere el funcionamiento del sistema.

Por otra parte la precisión y estabilidad en frecuencia tanto del equipo transmisor como del receptor en un sistema de comunicaciones, es considerado como un aspecto de gran importancia. Para determinar el efecto de las variaciones de la temperatura en la estabilidad de la portadora de radiofrecuencia es necesario el uso del analizador vectorial de redes ZLV Rohde & Schwarz, con el objetivo de visualizar el espectro de dicha frecuencia. Como se mencionó en la sección 4.2.6 con el sistema implementado no se puede capturar el espectro de una portadora completa, por lo tanto en este trabajo de grado no fue posible concluir acerca de la precisión y estabilidad en frecuencia de los dispositivos.

4.2.8. Tasa de Error de Bit

En cualquier sistema de comunicación vía radio pueden producirse errores, debido a que las señales que viajan en el espacio están sometidas a diferentes fenómenos que afectan su integridad. El nivel de errores en sistemas digitales se especifica mediante la Tasa de Error de Bit (BER), siendo este uno de los parámetros más importantes para analizar el desempeño del sistema de comunicación implementado. La tasa de error de bit se calcula como el cociente entre el número total de bit errados y el número total de bits transmitidos, tal y como se expresa en la ecuación 4.18.

$$BER = \frac{\text{Número total de bits errados}}{\text{Número total de bits transmitidos}} \quad (4.18)$$

²⁹ Entre -40°C y 85°C, según las especificaciones de kit de desarrollo.

Para disponer de un elemento de comparación con la BER, es necesario determinar la Relación Energía de Bit a Densidad Espectral de Potencia de Ruido (E_b/N_0).

El cálculo de la Energía de Bit (E_b) se logra dividiendo la potencia de recepción sobre la velocidad de transmisión de datos en el enlace radio, como lo indica la ecuación 4.19.

$$E_b [\text{mW/bps}] = \frac{Pr_{X_{RF}} [\text{mW}]}{R_b [\text{bps}]} \quad (4.19)$$

E_b en dBm es indicado en la ecuación (4.20).

$$E_b [\text{dBm/bps}] = Pr_{X_{RF}} [\text{dBm}] - 10 \log R_b [\text{bps}] \quad (4.20)$$

Donde

E_b : Energía de bit.

$Pr_{X_{RF}}$: Potencia de recepción en radio frecuencia.

R_b : Velocidad de transmisión de datos.

Para la determinación de N_0 , se debe calcular el valor de la potencia de ruido a la entrada del receptor P'_n , este valor se asume teniendo en cuenta la sensibilidad³⁰ del equipo receptor dada por el fabricante [35], cuyo valor es:

$$P'_n = -86 \text{ dBm}$$

La potencia de ruido a la salida del receptor se obtiene a partir de la Figura de Ruido (NF, *Noise Figure*) del receptor, la cual se define como la relación señal a ruido a la entrada con respecto a la relación señal a ruido a la salida del receptor. Debido a que éste parámetro no es proporcionado por el fabricante, se asume como 7 dB ya que es un valor típico para el tipo de dispositivos utilizado en las pruebas. En la figura 4.24 se puede observar esta relación.

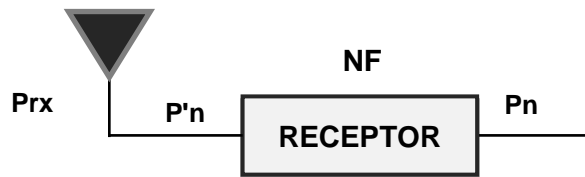


Figura 4.24. Relación Potencia de Ruido a la Entrada y a la Salida del Receptor.

³⁰ Potencia mínima de señal detectable por un receptor, aquélla que es igual a la del ruido, ya que si la señal es más débil que el ruido, quedará enmascarada por éste, mientras que si al menos es un poco mayor podrá ser detectada.

Por lo tanto la potencia de ruido a la salida del receptor se calcula mediante la ecuación 4.21.

$$P_n[\text{dBm}] = P'_n[\text{dBm}] + \text{NF}[\text{dB}] \quad (4.21)$$

Reemplazando P'_n y NF en 4.21, se obtiene el valor de P_n .

$$P_n = -79 \text{ dBm}$$

Reemplazando P_n y el ancho de banda de una portadora (1 MHz) en la ecuación 4.22, se determina la densidad espectral de potencia de ruido N_o .

$$N_o[\text{dBm/Hz}] = P_n[\text{dBm}] - 10 \text{ Log}(\text{BW} [\text{Hz}]) \quad (4.22)$$

$$N_o[\text{dBm/Hz}] = -79 \text{ dBm} - 10 \text{ Log}(1 * 10^6 [\text{Hz}])$$

$$N_o = -139 \text{ dBm/Hz}$$

La relación E_b/N_o se define como lo indica la ecuación 4.23.

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{P_{\text{RXRF}}[\text{mW}]}{R_b[\text{bps}] N_o[\text{mW/Hz}]} \quad (4.23)$$

E_b/N_o en dB es indicado en la ecuación 4.24.

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right) [\text{dB}] = P_{\text{RXRF}}[\text{dBm}] - 10 \text{ Log}(R_b[\text{bps}]) - N_o[\text{dBm/Hz}] \quad (4.24)$$

Para la determinación de la relación E_b/N_o en diferentes escenarios es necesario conocer el valor de la velocidad de transmisión de datos. En el manual de usuario, el fabricante proporciona la variación de este parámetro en función de la distancia para enlaces establecidos en exteriores, como se presenta en la figura 3.7 de la sección 3.3.2 [34].

Para el cálculo de la velocidad de transmisión de datos en interiores, de la figura 3.7 se tomó la porción de la curva que relaciona la velocidad de transmisión de datos y la distancia entre 10 m y 100 m, tal y como se presenta en la figura 4.25.

En la figura 4.25 es asociada a cada distancia una potencia de recepción en RF de exteriores, una vez fue realizada dicha asociación se ubicaron en la escala las potencias de recepción en RF de interiores originando con ello la relación de la velocidad de transmisión de datos con respecto a la potencia de recepción en exteriores (proyección verde) e interiores (proyección roja), tal y como se presenta en la figura 4.26.

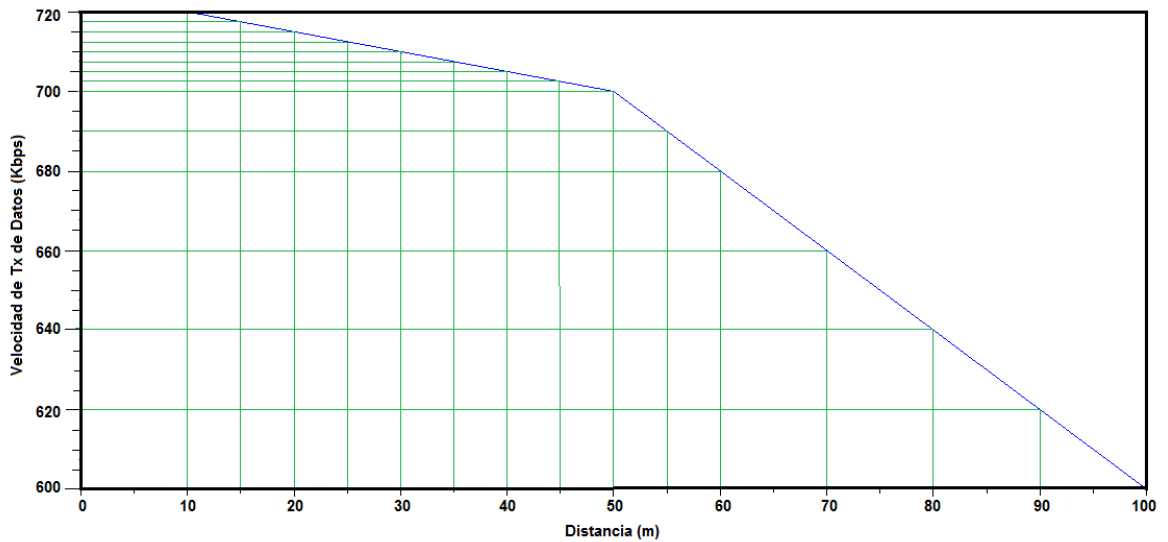


Figura 4.25. Velocidad de Transmisión Datos Respecto a la Distancia hasta 100 m.

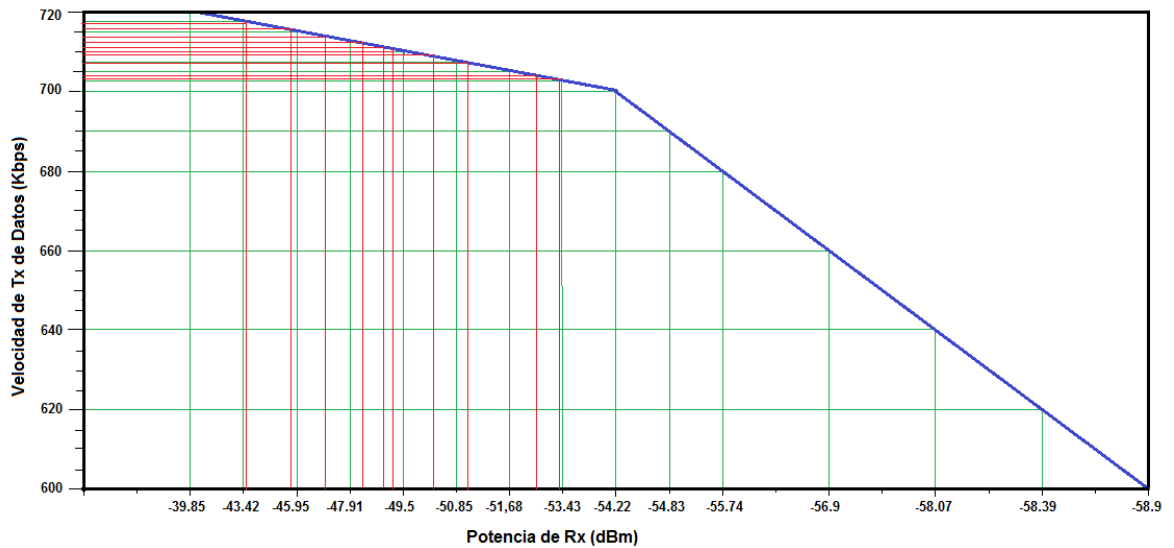


Figura 4.26. Velocidad de Transmisión de Datos Respecto a la Potencia de Recepción en RF.

En las tablas 4.8 y 4.9 se presentan los resultados obtenidos de la relación E_b/N_0 en exteriores e interiores respectivamente, para las diferentes distancias presentes en la columna 1. La columna 2 registra los datos de la potencia de recepción en RF. La columna 3 registra las velocidades de transmisión de datos obtenidas a partir de la figura 4.26. Los parámetros registrados en estas columnas se utilizan para obtener la relación

E_b/N_0 , calculada con la ecuación 4.24 donde la densidad espectral de potencia de ruido es de -139 dBm/Hz calculada anteriormente.

Distancia [m]	Potencia de Recepción en RF Prx_{RF} [dBm]	Velocidad Tx R_b [Kbps]	E_b/N₀ [dB]
10	-39.85	720	40.57
15	-43.42	717.5	37.02
20	-45.95	715	34.50
25	-47.91	712.5	32.56
30	-49.5	710	30.98
35	-50.85	707.5	29.65
40	-51.68	705	28.83
45	-53.43	702.5	27.10
50	-54.22	700	26.32
55	-54.83	690	25.78
60	-55.74	680	24.93
70	-56.9	660	23.90
80	-58.07	640	22.86
90	-58.39	620	22.68
100	-58.9	600	22.31

Tabla 4.8. Resultados de E_b/N_0 en Exteriores.

Distancia [m]	Potencia de Recepción en RF Prx_{RF} [dBm]	Velocidad Tx R_b [Kbps]	E_b/N₀ [dB]
3	-27.48	720	52.94
6	-36.82	720	43.60
9	-37.61	720	42.81
12	-35.2	720	45.22
15	-39.76	720	40.66
18	-39.3	720	41.12
21	-43.44	717	37
24	-46.57	713,75	33.89
27	-48.07	712,5	32.40
30	-49	711,25	31.47
33	-50.48	708,75	30.01
36	-49.11	710	31.37

39	-45.69	716,5	34.75
42	-50.99	708	29.50
45	-49.1	709,75	31.38
48	-52.44	703,75	28.08
51	-53.1	703	27.43

Tabla 4.9. Resultados de Eb/No en Interiores.

El kit BISDK02BI-02 mediante el uso del comando AT1111 despliega en el terminal EZURiO el número de bits errados entre 1 millón de bits transmitidos, siendo este el indicador usado para el cálculo de la BER, parámetro necesario para la determinación del desempeño del sistema. En cada uno de los escenarios se realizó el proceso descrito en 4.2 para la obtención de dicho indicador.

4.2.8.1. Tasa de Error de Bit de Sistema de Comunicación de Datos en Exteriores

En la tabla 4.10 se presentan los resultados obtenidos del parámetro BER del sistema de comunicación de datos en exteriores, calculado a partir de la ecuación 4.18 para las diferentes distancias presentes en la columna 1. La columna 2 registra el número de bits errados.

Distancia	Número de Bits Errados	BER
10	297	2.97 E-04
15	521	5.21 E-04
20	682	6.82 E-04
25	1311	1.311 E-03
30	1701	1.701 E-03
35	2056	2.056 E-03
40	2382	2.382 E-03
45	2614	2.614 E-03
50	2709	2.709 E-03
55	3277	3.277 E-03
60	3655	3.655 E-03
70	3750	3.75 E-03
80	3778	3.778 E-03
90	3902	3.902 E-03
100	3843	3.843 E-03

Tabla 4.10. Resultados de BER en Exteriores

En la tabla 4.10 es evidente el aumento de bits errados con el incremento de la distancia entre los dispositivos, debido a la disminución de la relación Energía de Bit a Densidad Espectral de Potencia de Ruido (E_b/N_0), como se apreció en la tabla 4.8. En la figura 4.27 se observa la curva que describe el comportamiento de la BER en función de la relación E_b/N_0 en exteriores.

En la figura 4.27 se observa que con el aumento de la relación E_b/N_0 , la probabilidad de ocurrencia de bits errados tiende a disminuir. Determinándose de esta manera que el desempeño del kit de desarrollo para el escenario de exteriores, es en general bueno, alcanzándose una BER menor a 10^{-3} teniendo valores de E_b/N_0 mayores a 33.5 dB. También es posible considerar que la relación E_b/N_0 depende de la velocidad de transmisión de datos, como lo indica la ecuación 4.24.

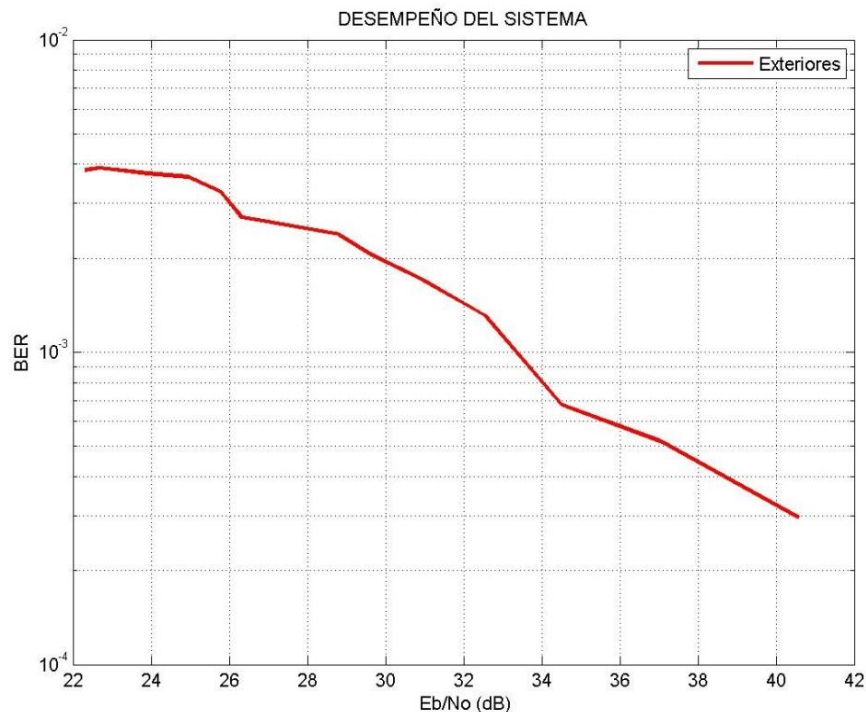


Figura 4.27. BER vs E_b/N_0 en Exteriores.

4.2.8.2. Tasa de Error de Bit del Sistema de Comunicación de Datos en Interiores

En la tabla 4.11 se presentan los resultados obtenidos del parámetro BER del sistema de comunicación de datos en interiores, calculado a partir de la ecuación 4.18 para las diferentes distancias presentes en la columna 1. La columna 2 registra el número de bits errados.

Distancia	Número de Bits Errados	BER
3	290	2.90 E-4
6	464	4.64 E-4
9	489	4.89 E-4
12	430	4.30 E-4
15	550	5.50 E-4
18	540	5.40 E-4
21	685	6.85E-4
24	1090	1.090 E-3
27	1200	1.200 E-3
30	1400	1.400 E-3
33	1500	1.500 E-3
36	1400	1.400 E-3
39	1000	1.000 E-3
42	1600	1.600 E-3
45	1390	1.390 E-3
48	1800	1.800 E-3
51	1950	1.950 E-3

Tabla 4.11. Resultados de BER en Interiores.

Al igual que en exteriores se observa el incremento del número de bit errados con la disminución de la relación Energía de Bit a Densidad Espectral de Potencia de Ruido (E_b/N_0), a medida que la distancia entre dispositivos aumenta, tal como se puede observar en las tablas 4.8 y 4.9 y en la figura 4.28 en la cual al aumentar la relación E_b/N_0 , la probabilidad de ocurrencia de bits errados tiende a disminuir. Determinándose al igual que en exteriores que el desempeño del kit de desarrollo para el escenario de interiores, es en general bueno, alcanzándose una BER menor a 10^{-3} teniendo valores de E_b/N_0 mayores a 34 dB. También es posible considerar que la relación E_b/N_0 depende de la velocidad de transmisión de datos, como lo indica la ecuación 4.24.

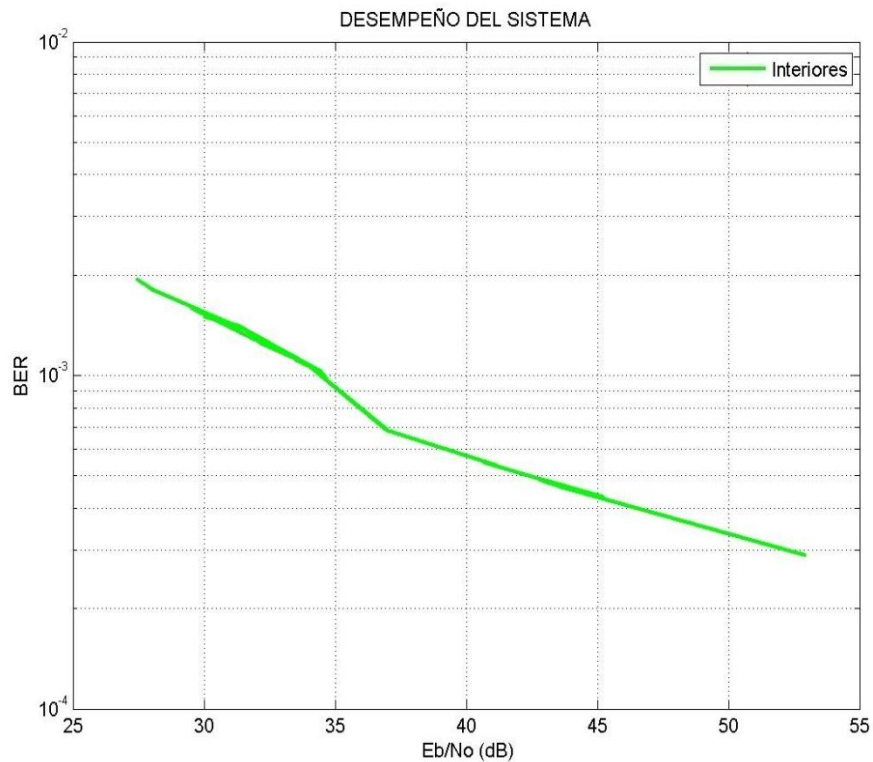


Figura 4.28. BER vs Eb/No en Interiores.

4.2.8.3. Comparación de Tasa de Error de Bit en Exteriores e Interiores

A fin de comparar el desempeño del sistema de comunicación en los dos escenarios considerados: exteriores e interiores. En la figura 4.29 se presentan las curvas de la Tasa de Error de Bit (BER) en función de la relación E_b/N_0 para cada escenario. Se observa en ambos escenarios la disminución de la BER con el aumento de la relación E_b/N_0 , sin embargo esta disminución presenta comportamientos diferentes de acuerdo al escenario: para valores de E_b/N_0 inferiores a 33 dB se tienen menores valores de BER para interiores que los obtenidos en exteriores, en 33 dB se presenta la misma tasa de error de bit para ambos escenarios y para valores de E_b/N_0 superiores a 33 dB se visualiza que en exteriores se alcanzan a partir de mas o menos 33 dB valores de BER iguales que interiores pero con menores valores de E_b/N_0 . Además se observa que tanto para exteriores como para interiores es posible la obtención de valores de BER menores o iguales a 10^{-3} .

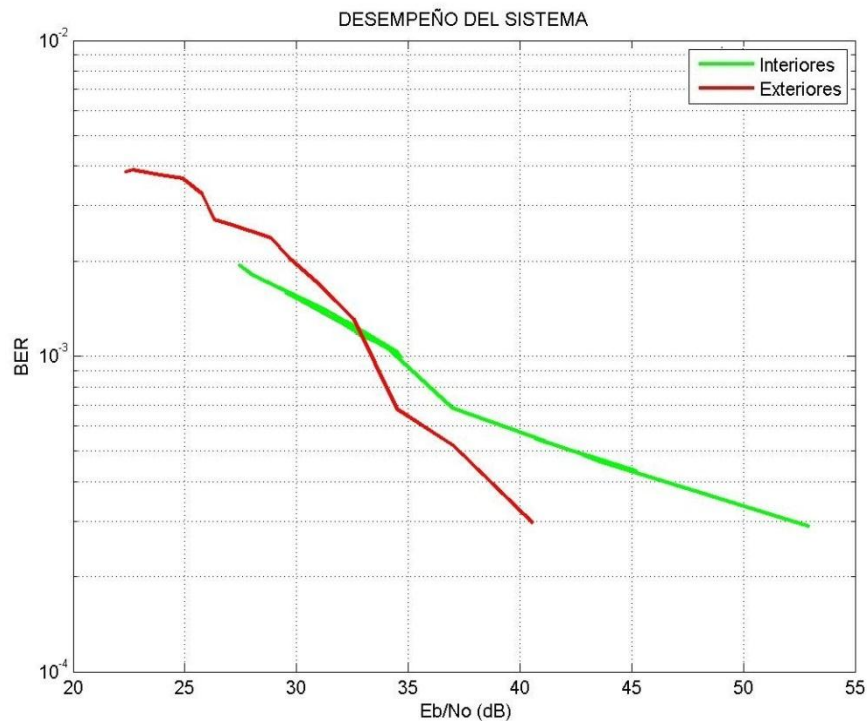


Figura 4.29. BER vs Eb/No en Exteriores e Interiores.

4.2.8.4. Comparación de la Tasa de Error de Bit de Sistema Implementado con la Tasa de Error de Bit de un Sistema de Comunicaciones Basado en FHSS simulado en Matlab®

A fin de comparar los resultados de BER obtenidos experimentalmente con el kit de desarrollo BISDK02BI-02 fue simulado en Matlab® un sistema de comunicaciones basado en FHSS a la velocidad máxima y mínima de transmisión de datos obtenida en los dos escenarios, de acuerdo a las tablas 4.8 y 4.9 (los detalles de la simulación del sistema son presentados en el anexo A). En la figura 4.30 se presentan las curvas de la Tasa de Error de Bit (BER) en función de la relación Eb/No de dicho sistema simulado.

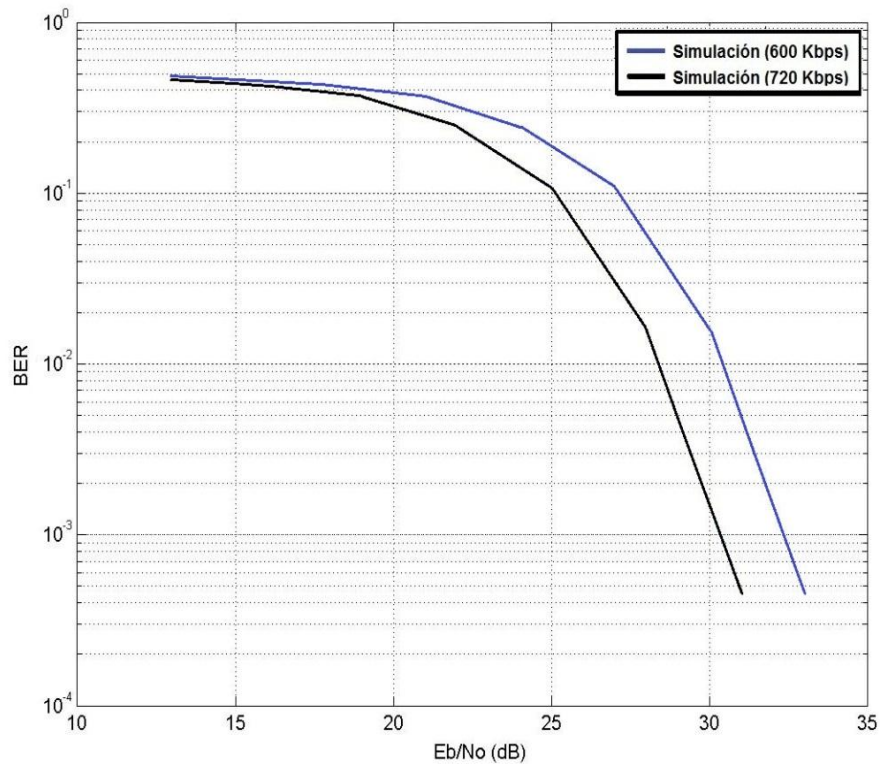


Figura 4.30. Tasa de Error de Bit (BER) en Función de la Relación Eb/No de un Sistema de Comunicaciones Basado en FHSS.

La figura 4.31 se presentan cuatro curvas. La curva en color azul, describe los resultados de BER obtenidos de un sistema de comunicaciones ideal basado en FHSS con una velocidad de transmisión de datos de 600 Kbps. La curva en color negro, describe los resultados de BER obtenidos de un sistema de comunicaciones ideal basado en FHSS con una velocidad de transmisión de datos de 720 Kbps. La curva en color rojo refiere los datos de BER para exteriores registrados en la tabla 4.10. La curva verde refiere los datos de BER para interiores registrados en la tabla 4.11.

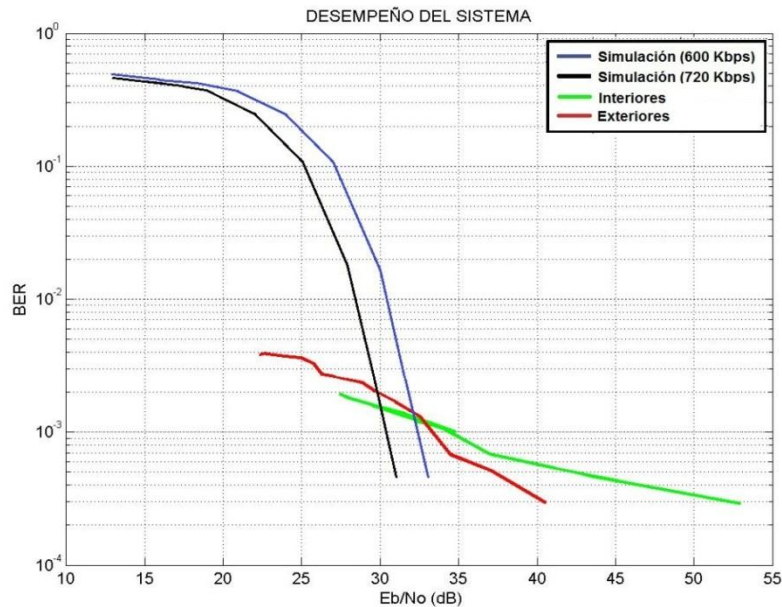


Figura 4.31. Tasa de Error de Bit (BER) en Función de la Relación E_b/N_0 del Sistema Simulado y el Sistema Implementado.

Al comparar los resultados obtenidos del desempeño del sistema implementado en este trabajo de grado (curvas roja y verde) y los resultados del sistema FHSS ideal (curvas negra y azul), se puede observar en ambos sistemas que la probabilidad de error de bit disminuye con el aumento de la relación E_b/N_0 , sin embargo con el sistema implementado mediante el kit de desarrollo de EZURiO no se alcanzan tasas de errores tan altas como las alcanzadas en el sistema ideal, a esto se le atribuye el hecho de que el indicador de número de bits errados entregados por el kit de desarrollo es producto de una conversión estadística en función de la Tasa de Error de Bloque (BLER) realizada por el dispositivo independiente de la cantidad de bits transmitidos, es decir el kit siempre entrega el número de bits errados en 1 millón, de tal forma que el desempeño del sistema implementado está centrado en un nivel de BER correspondiente a 10^{-3} . Además el sistema implementado fue puesto a prueba hasta una distancia máxima de 100 m en exteriores limitando de esta forma la obtención de menores niveles en la relación E_b/N_0 .

El sistema ideal presenta una BER menor a 10^{-3} para valores de E_b/N_0 mayores a 31 dB con una velocidad de transmisión de datos de 720 Kbps y mayores a 32.5 dB para una velocidad de transmisión de datos 600 Kbps.

4.2.8.5. Tasa de Error de Bit a del Sistema de Comunicación de Datos Bajo Condiciones de Interferencia

Uno de los principales problemas que afecta los sistemas de comunicaciones inalámbricas es la interferencia. Por esta razón es necesario estudiar el comportamiento del sistema implementado bajo esta condición, ya que la presencia de señales con frecuencias portadoras similares puede ocasionar pérdidas en la comunicación.

Para realizar la prueba de desempeño del sistema de comunicación en ambientes con interferencia, se utilizó un generador de señales interferentes intencionales (*Jammer*), también conocido como bloqueador de señales, este dispositivo tiene la capacidad de generar señales de frecuencias en la banda de 2.4 GHz, con potencia de 1 W y un ancho de banda de 100 MHz. Esta prueba se llevó a cabo en la oficina 409 de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca.

Al iniciar la prueba las señales generadas por el dispositivo *Jammer* bloqueaban totalmente el funcionamiento del adaptador Bluetooth (receptor), debido a su alta potencia de transmisión (30 dBm). La solución a este inconveniente fue la conexión de 2 atenuadores equivalentes a 30 dB en el *Jammer*, resultando una potencia de transmisión de aproximadamente 1 mW (0 dBm).

Para realizar la prueba se ubicó cada uno de los elementos del sistema como se muestra en la figura 4.32.

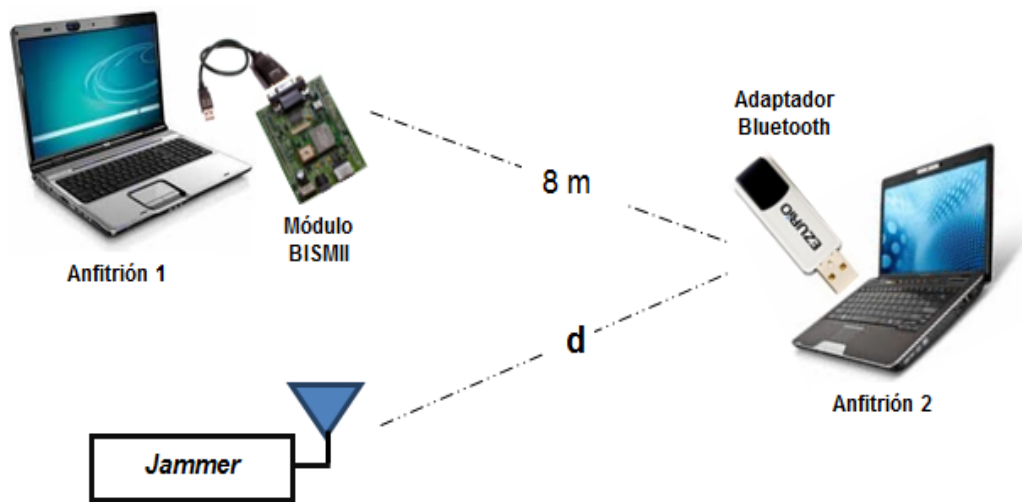


Figura 4.32 Montaje del Sistema para Evaluar la Tasa de Error de Bit bajo Condiciones de Interferencia.

La Relación Portadora a Interferencia (C/I) es usada para analizar el desempeño del sistema en condición de interferencia, esta relación es obtenida a partir de la ecuación 4.25.

$$C/I[\text{dB}] = Pr_{X_{RF}S}[\text{dBm}] - Pr_{X_{RF}I}[\text{dBm}] \quad (4.25)$$

Donde

C/I : Relación portadora a interferencia.

$Pr_{X_{RF}S}$: Potencia de recepción de la señal deseada.

$Pr_{X_{RF}I}$: Potencia de recepción de la señal interferente.

Cuatro niveles de potencia interferente fueron considerados y obtenidos mediante la variación de la distancia entre el dispositivo *Jammer* y el adaptador Bluetooth utilizado como receptor. La separación entre el transmisor y el receptor deseado fue de 8 m, y la distancia entre el *Jammer* y el receptor se modifica cada 2 m. Para esta prueba fueron realizadas 10 transmisiones para cada valor de C/I.

En la tabla 4.12 se presentan resultados de BER obtenidos en un ambiente con interferencia para valores de C/I entre -18 dB y 0 dB.

C/I [dB]	BER
-18	2.875 E-2
-13	2.689 E-2
-9	2.135 E-3
0	1.998 E-3

Tabla 4.12. Resultados del Número de Bits Errados, BER y Señal Portadora a Interferencia.

En la figura 4.33 se presenta el desempeño del sistema bajo condiciones de interferencia, se observa que para bajos valores de C/I, la presencia de señales interferentes deterioran el desempeño del sistema de comunicación, pero a medida que aumenta la relación C/I el sistema de comunicación representa mejoras significativas de desempeño.

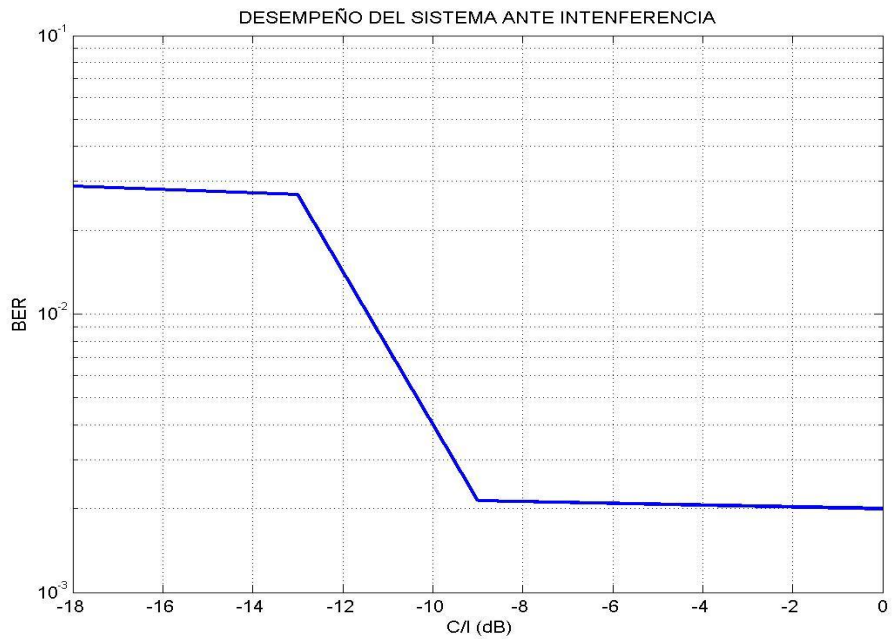


Figura 4.33. BER VS C/I.

La técnica FHSS usada por Bluetooth como ya se había mencionado ofrece la posibilidad de que varios usuarios empleen la misma banda de frecuencia con una mínima presencia de interferencia, si los usuarios hacen uso de una secuencia de saltos diferentes. Sin embargo a pesar del uso de esta técnica de transmisión para combatir la interferencia, el dispositivo *Jammer* es capaz de generar interferencias en toda la banda de frecuencias usada sin una secuencia de saltos específica causando el deterioro general del desempeño del sistema.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

5.1. CONCLUSIONES

Con respecto al desempeño del sistema de comunicación de datos bajo condiciones de interferencia, se logró determinar que para valores de C/I entre -18 dB y -11.5 dB la presencia de señales interferentes deteriora el desempeño del sistema de comunicaciones. Sin embargo, a partir de - 11.5 dB, a medida que aumenta la relación C/I mejora considerablemente el desempeño del sistema de comunicación, obteniendo valores de BER menores a 10^{-3} .

A partir de la comparación del desempeño del sistema en exteriores e interiores se puede decir que se alcanzan valores de 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 las curvas siguen la misma tendencia al disminuir la tasa de error de bit con el aumento de la relación E_b/N_0 .

La evaluación y análisis de desempeño del prototipo de comunicación de datos vía radio permitió determinar que su desempeño a nivel físico es aceptable. En los resultados de las pruebas realizadas se obtuvieron mejores valores de BER que los establecidos por el estándar Bluetooth.

El multitrayecto presente en el escenario interior hace que los ecos de una misma señal se combinen en algunas situaciones generando desvanecimientos profundos.

Respecto al alcance máximo del módulo BISMII (100 m) del kit de desarrollo BISDK02BI-02 se determina que este es considerablemente bueno en dispositivos inalámbricos de área personal, aunque no se haya alcanzado el alcance especificado por el fabricante corresponde a 250 m en exteriores.

Las variaciones en temperatura dentro de los rangos de operación no tienen ningún efecto sobre el desempeño del sistema implementado y su funcionamiento.

Se verificó de manera práctica que la potencia de recepción varía en función de la distancia, es decir a medida que aumenta la distancia de separación entre los dispositivos este parámetro decrece.

Tanto el módulo BISMII, como el adaptador Bluetooth, según el fabricante corresponden a dispositivos versión 2 + EDR de Bluetooth, en los cuales la máxima velocidad de transmisión de datos corresponde a 2 Mbps y 3 Mbps, de acuerdo al tipo de modulación empleada en la secuencia de sincronismo, la carga útil y secuencia de cola datos. Sin embargo, las especificaciones brindadas por el fabricante presentan la variación de la velocidad de transmisión de datos en función de la distancia (figura 3.5) mostrando que el máximo valor de este parámetro es el alcanzado por dispositivos Bluetooth versión 1.1 y 1.2, correspondiente a 720 Kbps efectivos de 1 Mbps, alcanzados con modulación GFSK. Además el dispositivo no permite el cambio de modulación a $\pi/4$ - DQPSK u 8DPSK para lograr la velocidad de transmisión de datos correspondiente a la versión 2 + EDR.

Teniendo en cuenta que el indicador de número de bit errados entregados por el kit de desarrollo corresponde al número de errores producidos en un millón de bits, se concluye que dicho indicador es producto de una conversión estadística en función de la Tasa de Error de Bloque (BLER, *Block Error Rate*) realizada por el dispositivo independiente de la cantidad de bits transmitidos, es decir el kit siempre entrega el número de bits errados en 1 millón.

5.2. TRABAJOS FUTUROS

A continuación se presentan los trabajos futuros sugeridos:

Implementación de un sistema inalámbrico de comunicación de voz punto a punto en la banda de 2.4 GHz empleando Bluetooth.

Evaluación y análisis del desempeño a nivel físico de un sistema inalámbrico de comunicación de datos punto a punto de corto alcance en la banda de 2.4 GHz empleando Bluetooth versión 3.0+HS y versión 4.0.

Evaluación y análisis del desempeño a nivel físico de un sistema inalámbrico de comunicación de datos punto a punto de corto alcance en la banda de 2.4 GHz empleando Bluetooth, haciendo uso de un kit de desarrollo y evaluación que permita la configuración de la secuencia pseudo aleatoria, además de parámetros tales como la potencia de transmisión y el tipo de modulación empleada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Sánchez and J. Diaz, "Las Redes Inálambricas, más Ventajas que Desventajas," Facultad de Contaduría y Administración, Universidad Veracruzana, Veracruz, Mexico, Artículo Diciembre 2008. [En Línea]. <http://www.uv.mx/iiesca/revista/documents/redes2008-2.pdf>, [Consultado Noviembre 15, 2012]
- [2] Institute of Electrical and Electronic Engineers, "IEEE Standard for Information Technology, Telecommunications and Information Exchange Between Systems, Local and Metropolitan Area Networks, Specific Requirements," Department of Commerce, IEEE Computer Society, Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPAN), 2005.
- [3] A. Moreno, "Seguridad Bluetooth," Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, Tesis de Grado 2006.
- [4] Bluetooth, "Bluetooth Specification Versión 2.0 + EDR," Volumén 0, 2004.
- [5] R. Montañana, "Redes Inalambricas 802.11," Departamento de Informática, Universidad de Valencia, 2011,.
- [6] K. Scarfon and J. Padgette, "Guide to Bluetooth Security," Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Recommendations Special Publication 800-121, 2008.
- [7] M. Acosta, "Estudio del Estandar IEEE 802.15.4 "Zigbee" para Comunicaciones Inálambricas de Área Personal de Bajo Consumo de Energía y su Comparación con el Estándar IEEE 802.15.1 "Bluetooth", Departamento de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Tesis de Grado 2006.
- [8] ECURED, "Origen del Nombre Bluetooth," Enero 2012. [En Línea]. <http://www.ecured.cu/index.php/Bluetooth>, [Consultado Noviembre 24, 2012].
- [9] Tutorial-Reports. (2012, Febrero) Tutorial-Reports. [En Línea]. <http://www.tutorial-reports.com/wireless/bluetooth/protocolstack.php>, [Consultado Marzo 7, 2012].
- [10] Hewlett Packard. Bluetooth Wireless Technology Basics. [En Línea]. <http://h10032.www1.hp.com/ctg/Manual/c00186949.pdf>, [Consultado Enero 30, 2012].
- [11] J. Gil, "Visión General de una Red Inálambrica," Facultad de Ingeniería Informática, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2004.
- [12] G. Hackmann, "802.15 Personal Área Networks," Universidad de Washington, 2006.
- [13] M. Utrilla, "IEEE 802.15.1 Bluetooth," Comunicaciones Industriales Avanzadas, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, Curso 2009-2010.
- [14] J. Luque, "Modelado del Retardo de Transmisión en Bluetooth 2.0 + EDR," Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad de Málaga, Tesis Doctoral 2010.
- [15] Agilent Technologies. Bluetooth Enhanced Data Rate (EDR): The Wireless Evolution. [En Línea]. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-4204EN.pdf>, [Consultado Marzo 9, 2012].

- [16] Agilent Technologies, "Funcionamiento y Pruebas de un Sistema Radio Equipado con Bluetooth EDR," División de Productos Inalambricos, Agilent Technologies, Artículo 2006.
- [17] M. Morón, "Estudio del Rendimiento de Perfiles Bluetooth en Redes de Área Personal," Escuela Técnica Superior de Ingeniero de Telecomunicación, Universidad de Málaga, Málaga, Tesis Doctoral 2008.
- [18] O. Rodriguez and R. Maya, "Implementación de una Red Inálambrica Bluetooth," Departamento de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Cali, Tesis de Grado 2003.
- [19] S. Haykin, *Communication Systems*, 4th ed.: Jhon Wiley & Sons, 1995.
- [20] D. Garcia and L. Navarro, "Evaluación y Análisis del Desempeño de un Sistema de Comunicación de Datos Vía Radio en la Banda de 900 MHz Basado en Espectro Ensanchado por Saltos en Frecuencia Utilizando el Modelo Peer-to-Peer," Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Tesis de Grado 2011.
- [21] J. Lasso and F. Vargas, "Evaluación del Desempeño de un Sistema de Comunicación Punto - Punto Vía Radio por FHSS 900 MHz," Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Tesis de Grado 2010.
- [22] T. Wayne, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, 4th ed.: Prentice Hall, 2000.
- [24] J. Sallent, L. Valenzuela, and R. Agustí, *Principios de Comunicaciones Móviles*, S.L, Ed. Barcelona: Edicions UPC, 2003.
- [25] A. Lopéz and C. Calvete, "Transmisión por Desplazamiento de Frecuencia, Amplitud y en Fase por Cuadratura en Cambio Mínimo," Semillero de Comunicación de Datos Alexander Graham Bell, Universidad Autonoma de Bucaramanga, Bucaramanga, 2006.
- [26] Portal para Investigadores y Profesionales "El Prisma", "Redes de Datos,". [En Línea]. http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_de_sistemas/redesdatos/default7.asp, [Consultado Febrero 25, 2012].
- [27] L. Martinez and P. Sevilla, "Evaluación y Análisis del Desempeño de un Sistema de Comunicación de Datos Punto a Punto Vía Radio que Utiliza Codificación Reed-Solomon," Departamento de Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Trabajo de Grado 2012.
- [28] "Módulación GFSK ("Gaussian Minimum Shift Keying"),". [En Línea]. <http://ceres.ugr.es/~alumnos/alonso/p3.html>, [Consultado Diciembre 28, 2011]
- [29] O. Roig, J. Valenzuela, and R. Agustí, *Principios de Comunicaciones Moviles*. Barcelona: Ediciones UPC, 2003.
- [30] D. Sanchez, "Metodos no Lineales en Comunicación de Datos de Alta Velocidad," Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, Tesis Doctoral 2000.
- [31] J. Hurtarte, "Condiciones Necesarias para la Conexión de Dispositivos Inalambricos en Guatemala a Través del Protocolo Bluetooth," Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, Trabajo de Grado 2005.
- [32] Laird Technologies, "Wireless Development Kit - User Guide," 2007.

- [33] Laird Technologies, "Bluetooth Serial Module BISMII," Part No: TRBLU23-00200,.
- [34] Laird Technologies, "BISM2 Bluetooth Version 2.0 Serial Module," 2007.
- [35] Laird Technologies, "Bluetooth Versión 2.0 + EDR USB Adaptor," 2007.
- [36] Laird Technologies, "AT Command Set," 2007.
- [37] Remcom, "The Wireless InSite R Users Manual," 2009.
- [38] S. Agredo and J. Luna, "Análisis de Cobertura de un Sistema WI -FI en Interiores, Mediante la Técnica de Trazado de Rayos," Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Trabajo de Grado 2011.
- [39] J. Hernando, *Transmisión por Radio*, 3rd ed.: Centro de Estudios Ramón Areces, S.A., 1998.
- [40] T. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed.: Prentice HALL, 2002.
- [41] A. Frenzel, A. Monachesi, and E. Charle, "Física de las Ondas Radioeléctricas dentro del Estándar IEEE 802.11b," Facultad Regional Tucumán, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, Proyecto de Investigación 2010.
- [42] RHOED&SCHWARS http://www2.rohde-schwarz.com/file_12085/ZVL_bro_en.pdf, "ZVL Vector Network Analyzer," Datasheet 2009. [En Línea]. http://www2.rohde-schwarz.com/file_12085/ZVL_bro_en.pdf, [Consultado Marzo 10, 2012].