EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DE DATOS DE CORTO ALCANCE VÍA RADIO EN 2.4 GHZ BASADO EN ESPECTRO ENSANCHADO POR SECUENCIA DIRECTA (DSSS)

YAMITH ENRIQUE NARVÁEZ MATITUY
ANDRÉS FERNANDO ORDÓÑEZ HURTADO

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 DE COMUNICACIÓN DE DATOS DE CORTO ALCANCE VÍA RADIO EN 2.4 GHZ BASADO EN ESPECTRO ENSANCHADO POR SECUENCIA DIRECTA (DSSS)

YAMITH ENRIQUE NARVÁEZ MATITUY
ANDRÉS FERNANDO ORDÓÑEZ HURTADO

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

Director
Víctor Manuel Quintero Flórez

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
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 1
1. ESPECTRO ENSANCHADO POR SECUENCIA DIRECTA 3
1.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE ESPECTRO ENSANCHADO 3
1.2 CÓDIGOS DE ENSANCHAMIENTO 7
1.2.1 Códigos Gold 7
1.2.2 Códigos Walsh-Hadamard 8
1.3 VENTAJAS DE LOS SISTEMAS DE ESPECTRO ENSANCHADO 9
1.4 DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS DE ESPECTRO ENSANCHADO 12
2. KIT DE DESARROLLO CY3653 WIRELESSUSB PROC 15
2.1 SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE TRABAJO 15
2.2 CARACTERÍSTICAS HARDWARE 15
2.2.1 Módulo PRoC SiP 16
2.2.2 Módulo de Desarrollo PRoC 17
2.2.3 Tarjeta de Evaluación PSoC 21
2.2.4 MiniProg PSoC 22
2.2.5 Fuente de Alimentación 22
2.2.6 Cable Flex POD 22
2.2.7 Cable USB 23
2.2.8 Paquete de Cables y Resistencias 23
2.2.9 Módulo LCD 23
2.2.10 CD-ROM 23
2.3 CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE 23
2.3.1 PSoC Designer Version 5.1 Service Pack 2 23
2.3.2 PSoC Programmer 26
3. DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN 27
3.1 COMPONENTES DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN 27
3.1.1 Módulo de Transmisión 27
3.1.2 Módulo de Recepción 28
3.1.3 Canal de Transmisión 29
3.2 ESQUEMA DE MODULACIÓN 30
3.3 PROTOCOLO DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN 32
3.3.1 Preámbulo 33

3.3.2 Sincronización 33
3.3.3 Longitud de Datos 33
3.3.4 Datos 33
3.3.5 Suma de Verificación 33
3.3.6 Fin de Trama 33
4. PLAN DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN 34
4.1 MEDIDA DE LA PRECISIÓN Y LA ESTABILIDAD DE LA FRECUENCIA PORTADORA 34
4.2 MEDIDA DEL ANCHO DE BANDA DE LA SEÑAL DE RADIOFRECUENCIA 37
4.3 MEDIDA DE LA POTENCIA DE RECEPCIÓN 40
4.3.1 Medida de la Potencia de Recepción en el Escenario Exterior 41
4.3.2 Medida de la Potencia de Recepción en el Escenario Interior 44
4.3.3 Simulación de la Cobertura del Sistema de Comunicación 46
4.3.3.1 Simulación del Sistema de Comunicación en el Escenario Exterior 47
4.3.3.2 Simulación del Sistema de Comunicación en el Escenario Interior 49
4.3.4 Análisis Comparativo de los Resultados 52
4.4 EVALUACION Y ANALISIS DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN 56
4.4.1 Simulación del Sistema de Comunicación para la Evaluación del Desempeño Teórico 58
4.4.2 Evaluación y Análisis del Desempeño en el Escenario Exterior 60
4.4.3 Evaluación y Análisis del Desempeño en el Escenario Interior 64
4.4.4 Análisis Comparativo del Desempeño del Sistema de Comunicación 68
4.4.5 Evaluación y Análisis del Desempeño ante Interferencia 72
5. APLICACIONES DE LOS DISPOSITIVOS PROC 79
5.1 SISTEMAS DE COMUNICACIÓN DE DATOS 80
5.2 SISTEMAS DE TELEMETRÍA, MONITOREO Y CONTROL 80
6. CONCLUSIONES 82
6.1 CONCLUSIONES 82
6.2 TRABAJOS FUTUROS 84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama en Bloques de un Transmisor DSSS 3
Figura 1.2. Señal de Información y Secuencia Pseudo-aleatoria..... 4
Figura 1.3. Ancho de Banda de la Señal Original y la Señal de Espectro Ensanchado..... 4
Figura 1.4. Diagrama en Bloques de un Receptor DSSS..... 5
Figura 1.5. Generación de un Conjunto de Códigos Gold 8
Figura 1.6. Ensanchamiento de la Interferencia de Banda Estrecha en el Receptor 11
Figura 1.7. Receptor *Rake*..... 12
Figura 1.8. Relación entre SIR y Número de Usuarios Activos 14

Figura 2.1. CY3653 *WirelessUSB*™ PRoC™ Development Kit..... 16
Figura 2.2. Diagrama en Bloques del PRoC CYWUSB6953..... 17
Figura 2.3. Diagrama en Bloques del Radio Transceptor CYWUSB6935..... 18
Figura 2.4. Antena PIFA incluida en los módulos PRoC 19
Figura 2.5. Patrón de Radiación de la Antena PIFA 20
Figura 2.6. Orientación Ideal de las Antenas Tipo F..... 20
Figura 2.7. Sensibilidad en Recepción vs Precisión en Frecuencia..... 21
Figura 2.8. Tarjeta de Evaluación PSoC 21
Figura 2.9. MiniProg PSoC y Cable USB 22
Figura 2.10. Interfaz del Editor a Nivel de Chip del *PSoC Designer* 24
Figura 2.11. Interfaz del Editor de Código del *PSoC Designer* 25
Figura 2.12. Interfaz del *PSoC Programmer*..... 26

Figura 3.1. Diagrama General del Sistema de Comunicación..... 27
Figura 3.2. Espectro de la Señal FSK 31
Figura 3.3. Tramas Implementadas en los Dispositivos PRoC 32

Figura 4.1. Ubicación del Transmisor PRoC y el Analizador de Redes ZLV 35
Figura 4.2. Espectro de la Frecuencia Portadora a Temperatura Ambiente..... 36
Figura 4.3. Espectro de la Frecuencia Portadora ante Incremento de Temperatura..... 36
Figura 4.4. Espectro en Frecuencia de la Señal GFSK de Baja Velocidad..... 38
Figura 4.5. Ancho de Banda Útil de 6 dB 39
Figura 4.6. Ancho de Banda Práctico de 20 dB 40
Figura 4.7. Ubicación de los Dispositivos PRoC en el Escenario Exterior..... 41
Figura 4.8. RSSI de las Senales Recibidas en el Escenario Exterior 41
Figura 4.9. Potencia de Recepción en el Escenario Exterior..... 42
Figura 4.10. Pérdidas de Propagación en el Escenario Exterior 43
Figura 4.11. Pérdidas de Propagación Teóricas y Medidas 43

Figura 4.12. RSSI de las Señales Recibidas en el Escenario Interior 44
Figura 4.13. Potencia de Recepción en el Escenario Interior 45
Figura 4.14. Pérdidas de Propagación en el Escenario Interior 45
Figura 4.15. Pérdidas de Propagación Teóricas y Experimentales 46
Figura 4.16. Disposición del Transmisor y Multiples Receptores en el Escenario Exterior 47
Figura 4.17. Potencia de Recepción en la Simulación del Escenario Exterior 48
Figura 4.18. Perdidas de Propagación en la Simulación del Escenario Exterior 48
Figura 4.19. Disposición del Transmisor y Multiples Receptores en el Escenario Interior 49
Figura 4.20. Potencia de Recepción en la Simulación del Escenario Interior 50
Figura 4.21. Pérdidas de Propagación Producto de la Simulación 50
Figura 4.22. Trazado de Rayos a lo Largo del Pasillo 51
Figura 4.23. Dispersión de Retardo en el Escenario Interior 52
Figura 4.24. Potencia de Recepción Medida en Escenarios Exterior e Interior 53
Figura 4.25. Perdidas de Propagación Medida en Escenarios Exterior e Interior 53
Figura 4.26. Potencia de Recepción Medida y Simulada en Escenario Exterior 54
Figura 4.27. Pérdidas de Propagación Medidas y Simuladas en Escenario Exterior 54
Figura 4.28. Potencia de Recepción Medida y Simulada en Escenario Interior 55
Figura 4.29. Perdidas de Propagación Medidas y Simuladas en Escenario Interior 55
Figura 4.30. Diagrama en Bloques del Sistema Simulado 59
Figura 4.31. Desempeño Teórico del Sistema de Comunicación 60
Figura 4.32. BER vs E_b/N_0 en Escenario Exterior 62
Figura 4.33. FER vs E_b/N_0 en Escenario Exterior 63
Figura 4.34. BER vs E_c/N_0 en Escenario Exterior 63
Figura 4.35. FER vs E_c/N_0 en Escenario Exterior 64
Figura 4.36. BER vs E_b/N_0 en Escenario Interior 66
Figura 4.37. FER vs E_b/N_0 en Escenario Interior 67
Figura 4.38. BER vs E_c/N_0 en Escenario Interior 67
Figura 4.39. FER vs E_c/N_0 en Escenario Interior 68
Figura 4.40. BER vs E_b/N_0 en Escenarios Exterior e Interior a 16 kbps 69
Figura 4.41. BER vs E_b/N_0 en Escenarios Exterior e Interior a 32 kbps 69
Figura 4.42. BER vs E_b/N_0 en Escenarios Exterior e Interior a 64 kbps 70
Figura 4.43. FER vs E_b/N_0 en Escenarios Exterior e Interior a 16 kbps 70
Figura 4.44. FER vs E_b/N_0 en Escenarios Exterior e Interior a 32 kbps 71
Figura 4.45. FER vs E_b/N_0 en Escenarios Exterior e Interior a 64 kbps 71
Figura 4.46. Interferencia con el Enrutador Inalámbrico Marca Encore 73
Figura 4.47. BER vs E_c/I_0 ante Interferencia de Enrutador Inalámbrico 74
Figura 4.48. FER vs E_c/I_0 ante Interferencia de Enrutador Inalámbrico 75
Figura 4.49. BER vs E_c/I_0 ante Interferencia de Dispositivo Nordic 77
Figura 4.50. FER vs E_c/I_0 ante Interferencia de Dispositivo Nordic 77

Figura 5.1. Sensor Inteligente junto con Módulo Radio PRoC 81

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Potencia de Transmisión de los módulos PRoC 19
Tabla 2.2. Requisitos Mínimos de Instalación 25

Tabla 4.1. Parámetros de los Dispositivos PRoC para las Medidas de Precisión y Estabilidad en Frecuencia 35
Tabla 4.2. Parámetros de los Dispositivos PRoC para las Medidas de Potencia de Recepción 40
Tabla 4.3. Parámetros de los Dispositivos PRoC para las Medidas de Errores 58
Tabla 4.4. Medidas de E_b/N_0 y E_c/N_0 en Escenario Exterior 60
Tabla 4.5. Medidas de BER en Escenario Exterior 61
Tabla 4.6. Medidas de FER en Escenario Exterior 61
Tabla 4.7. Medidas de E_b/N_0 y E_c/N_0 en Escenario Interior 65
Tabla 4.8. Medidas de BER en Escenario Interior 65
Tabla 4.9. Medidas de FER en Escenario Interior 65
Tabla 4.10. Medidas de E_c/I_0 ante Interferencia del Enrutador Inalámbrico 73
Tabla 4.11. Medidas de BER ante Intereferencia del Enrutador Inalámbrico 73
Tabla 4.12. Medidas de FER ante Interferencia del Enrutador Inalámbrico 74
Tabla 4.13. Medidas de E_c/I_0 ante Interferencia de Dispositivo Nordic 76
Tabla 4.14. Medidas de BER ante Interferencia de Dispositivo Nordic 76
Tabla 4.15. Medidas de FER ante Interferencia de Dispositivo Nordic 76

LISTA DE ACRONIMOS

AC	*Alternating Current*, Corriente Alterna.
ADC	*Analog-to-Digital Converter*, Conversor Analógico a Digital.
AP	*Access Point*, Punto de Acceso.
API	*Application Programming Interface,* Interfaz de Programación de Aplicaciones.
AWGN	*Additive White Gaussian Noise*, Ruido Gaussiano Blanco Aditivo.
BER	*Bit Error Rate*, Tasa de Error de Bits.
CDMA	*Code Division Multiple Access,* Acceso Múltiple por División de Código.
CDU	Centro Deportivo Universitario.
CNR	*Carrier-to-Noise Ratio*, Relación Portadora a Ruido.
CSV	*Comma Separated Values*, Valores Separados por Coma.
DC	*Direct Current*, Corriente Directa.
DSSS	*Direct Sequence Spread Spectrum,* Espectro Ensanchado por Secuencia Directa.
FDMA	*Frequency Division Multiple Access,* Acceso Múltiple por División de Frecuencia.
FER	*Frame Error Rate*, Tasa de Error de Tramas.
FIET	Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.
FM	*Frequency Modulation*, Modulación en Frecuencia.
FR	*Flammability Ratings*, Grados de Inflamabilidad.
FSK	*Frequency Shift Keying,* Modulación por Desplazamiento de Frecuencia.
GFSK	*Gaussian Frequency Shift Keying*, Modulación por Desplazamiento de Frecuencia Gaussiana.
HID	*Human Interface Devices*, Dispositivos de Interfaz Humana.
IDE	*Integrated Development Environment*, Entorno de Desarrollo Integrado.
IF	*Intermediate Frequency*, Frecuencia Intermedia.
ISI	*Inter Symbol Interference*, Interferencia Inter Símbolo.
ISM	*Industrial Scientific, and Medical,* Industrial, Científica y Médica.
ISSP	*In-System Serial Programming*, Programación Serial Dentro del Sistema.
LCD	*Liquid Crystal Display*, Pantalla de Cristal Líquido.
LPI	*Low Probability of Intercept*, Baja Probabilidad de Interceptación.
LFSR	*Linear Feedback Shift Register*, Registros de Desplazamiento con Realimentación Lineal.
MAI	*Multiple Access Interference*, Interferencia de Acceso Múltiple.
MEMS	*MicroElectroMechanics Systems*, Sistemas MicroElectroMecánicos.
MLS	*Maximum Length Sequences*, Secuencias de Máxima Longitud.
MUD	*Multi User Detection*, Detección Multi Usuario.
NF	*Noise Figure*, Figura de Ruido.

OVSF	*Orthogonal Variable Spreading Factor*, Factor de Ensanchamiento Variable Ortogonal.
PC	*Power Control,* Control de Potencia.
PG	*Processing Gain*, Ganancia de Procesamiento.
PIFA	*Planar Inverted F Antenna*, Antena Plana Tipo F Invertida.
PN	*Pseudo Noise*, Pseudo Ruido.
PPM	*Parts Per Million*, Partes Por Millón.
PSoC	*Programmable System-on-Chip,* Sistema Programable en un Chip.
PRoC	*Programmable Radio System-on-Chip,* Sistema de Radio Programable en un Chip.
RRM	*Radio Resources Management*, Gestión de Recursos Radio.
RSSI	*Received Signal Strength Indicator*, Indicador de Intensidad de la Señal Recibida.
SF	*Spreading Factor*, Factor de Ensanchamiento.
SiP	*System-in-Package*, Sistema Empaquetado.
SIR	*Signal-to-Interference Ratio*, Relación Señal a Interferencia.
SNR	*Signal-to-Noise Ratio*, Relación Señal a Ruido.
SRAM	*Static Random Access Memory,* Memoria Estática de Acceso Aleatorio.
TCXO	*Temperature Compensated Crystal Oscillator*, Oscilador de Cristal Compensado en Temperatura.
TDMA	*Time Division Multiple Access*, Acceso Múltiple por División de Tiempo.
TIC	Tecnologías de la Información y la Comunicación.
USB	Universal Serial Bus, Bus Universal en Serie.
VCO	*Voltage-Controlled Oscilator,* Oscilador Controlado por Voltaje.
WLAN	*Wireless Local Area Networks,* Redes Inalámbricas de Area Local.
WPAN	*Wireless Personal Area Networks*, Redes Inalámbricas de Área Personal.
XOR	*Exclusive Or*, O Exclusivo.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen diferentes sistemas de comunicación creados por el hombre para satisfacer la necesidad de compartir y transferir información de manera fácil, confiable y efectiva. Esto ha llevado al auge y desarrollo del campo de las telecomunicaciones, causando gran impacto en la evolución de la humanidad. En este sentido, una de las áreas de las telecomunicaciones que mayor incremento ha tenido a nivel mundial han sido las comunicaciones inalámbricas, cuyo desarrollo ha permitido el envió y recepción de información sin necesidad de usar ningún tipo de cables, logrando así la creación de redes que ofrecen ventajas en cuanto a movilidad, flexibilidad, escalabilidad y bajo costo. Sin embargo, los sistemas de comunicación inalámbrica presentan diferentes desventajas en cuanto a la disponibilidad espectral para la transmisión de las señales, la vulnerabilidad ante los efectos de la interferencia en el entorno, el acceso al sistema por parte de usuarios no autorizados y la seguridad de la información transmitida, entre otras.

En el esfuerzo por mejorar cada vez más los sistemas inalámbricos, ampliamente se han estudiado, evaluado y desarrollado diferentes técnicas, para que la transmisión de datos a través de ondas radioeléctricas se realice de manera adecuada, pues las señales transmitidas se ven sometidas a diferentes fenómenos presentes en el canal de transmisión inalámbrico tales como atenuación, desvanecimiento, ruido e interferencia entre otros, que afectan considerablemente el desempeño de este tipo de sistemas.

Con el fin de analizar el desempeño de un sistema inalámbrico, en este trabajo de grado se implementó un sistema prototipo de comunicación de datos de corto alcance vía radio en 2.4 GHz basado en la técnica de transmisión de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*), técnica que consiste en la transmisión de una señal con un ancho de banda mucho mayor que el de la señal de información original. Las principales razones por las cuales se utiliza un ancho de banda mayor son una alta inmunidad ante la interferencia y una baja probabilidad de interceptación, ya que la señal de espectro ensanchado presenta un bajo nivel de densidad espectral de potencia.

El sistema prototipo de comunicación de datos hace uso de dispositivos basados en Sistemas de Radio Programables en un Chip (PRoC, *Programmable Radio System-on-Chip*) incluidos en el kit de desarrollo CY3653[1] del fabricante *Cypress Semiconductor Corp*[2], el cual está conformado por diferentes módulos analógicos y digitales, que en conjunto hacen uso de la técnica DSSS para transmisión y recepción de la información. El kit incluye una herramienta software que permite configurar diferentes parámetros de los dispositivos, de tal forma que ha sido posible evaluar y analizar el desempeño a nivel físico del sistema de comunicación de datos implementado.

Una vez evaluado el desempeño del sistema se analizaron las potenciales aplicaciones del dispositivo PRoC, tales como sistemas de comunicación de datos, telemetría, monitoreo y control, con el fin de generar interés en la creación y el desarrollo de sistemas

[1] Este kit de desarrollo ha sido adquirido con los recursos económicos del proyecto de investigación "PROTOTIPO DE COMUNICACIÓN DE DATOS MULTIPROPÓSITO VÍA RADIO DE CORTO ALCANCE EN 2.4 GHZ" aprobado y financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Cauca.
[2] Disponible en: http://www.cypress.com.

y dispositivos electrónicos que funcionen de manera inalámbrica, tales como instrumentos multifuncionales, de comunicación personal, sistema de alarmas, sensores u otros, en ambientes industriales, comerciales y también en los hogares.

De esta manera, se logró una mayor profundización en el área de evaluación y análisis de sistemas de comunicación de datos vía radio a nivel físico, desarrollando también un proceso investigativo en torno a la tecnología utilizada por el sistema que involucra la manipulación de componentes hardware y software.

El presente trabajo de grado se encuentra estructurado en seis capítulos recopilados de la siguiente manera:

Capítulo 1. Espectro Ensanchado por Secuencia Directa.

Describe y resume las características asociadas al funcionamiento, y las ventajas y desventajas de los sistemas basados en la técnica de transmisión DSSS.

Capítulo 2. Kit de Desarrollo CY3653 WirelessUSB PRoC.

Recopila las características físicas y operativas de los dispositivos PRoC, y las capacidades/limitaciones de las herramientas con las cuales se contó para su configuración.

Capítulo 3. Descripción Detallada del Sistema de Comunicación

Describe detalladamente el sistema prototipo de comunicación de datos vía radio de corto alcance en 2.4 GHz basado en la técnica de transmisión DSSS, implementado en este trabajo de grado.

Capítulo 4. Plan de Pruebas y Análisis del Desempeño del Sistema de Comunicación.

Incluye el diseño del plan de pruebas y presenta los resultados obtenidos, realizando las respectivas interpretaciones y análisis del comportamiento del sistema de comunicación de datos en diferentes escenarios y bajo diferentes condiciones de propagación.

Capítulo 5. Aplicaciones de los Dispositivos PRoC.

Analiza las potenciales aplicaciones de los dispositivos PRoC en sistemas de comunicación de datos, telemetría, monitoreo y control.

Capítulo 6. Conclusiones.

Presenta las conclusiones del trabajo de grado, y posibles trabajos futuros e investigaciones en esta temática.

1. ESPECTRO ENSANCHADO POR SECUENCIA DIRECTA

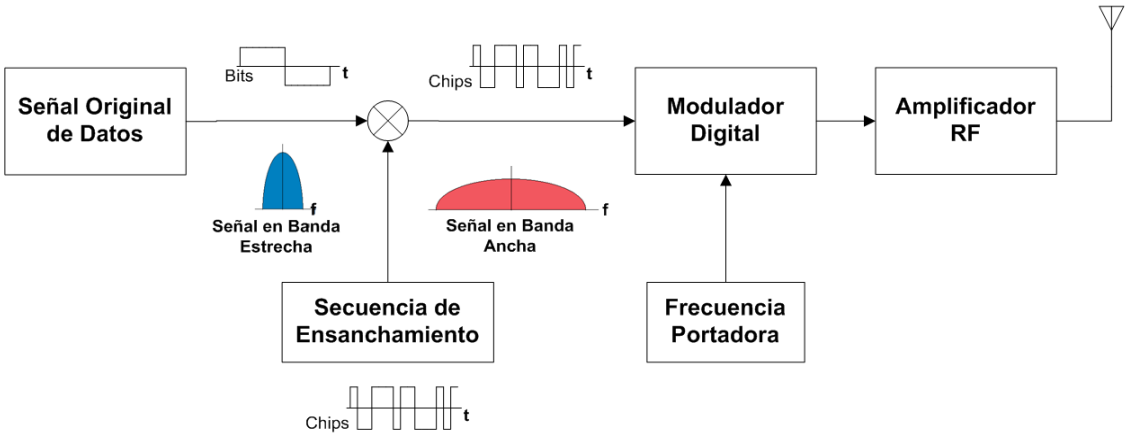
La técnica de transmisión de DSSS consiste en la expansión de la señal de información a un valor en frecuencia mucho mayor que el requerido para transmitir la señal en banda base. Este proceso se denomina ensanchamiento y se logra a través de la combinación entre la información de usuario y una secuencia de ensanchamiento [1], denominada secuencia pseudo-aleatoria o de Pseudo Ruido (PN, *Pseudo Noise*), que como su nombre lo indica, posee propiedades aleatorias similares a las del ruido. La misma secuencia pseudo-aleatoria se utiliza en el receptor para desensanchar la señal recibida.

Los sistemas de espectro ensanchado inicialmente fueron implementados en aplicaciones militares, con el objetivo de dificultar la interceptación de las señales transmitidas por parte de usuarios no autorizados, ya que la densidad espectral de potencia disminuye con el ensanchamiento hasta llegar a un nivel comparable con la densidad de potencia de ruido [2]. Debido a esta y otras ventajas que ofrece esta técnica de transmisión, diferentes sistemas de comunicación hacen uso de ella, con el propósito de incrementar la robustez y la confidencialidad de las comunicaciones. Entre estos sistemas se destacan las Redes de Área Local Inalámbricas (WLAN, *Wireless Local Area Networks*) basadas en los estándares IEEE 802.11b e IEEE 802.11g, las Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN, *Wireless Personal Area Networks*) basadas en el estándar IEEE 802.15.4 y los sistemas de comunicación móvil celular que hacen uso de la técnica de Acceso Múltiple por División de Código (CDMA, *Code Division Multiple Access*).

1.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE ESPECTRO ENSANCHADO

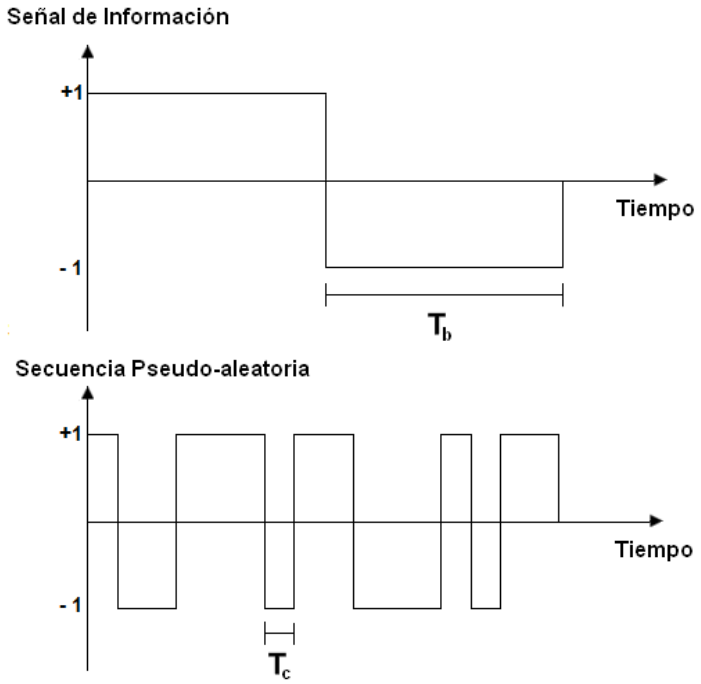
Un sistema de comunicación que hace uso de la técnica DSSS se caracteriza porque la información original de baja velocidad de transmisión es combinada con una secuencia pseudo-aleatoria de mayor velocidad de transmisión, lo que origina una señal aparentemente aleatoria de alta velocidad y por lo tanto con una ancho de banda mayor. En el transmisor, luego de realizar el ensanchamiento, es posible realizar los demás procesos necesarios para la transmisión de la información. En la Figura 1.1 se presenta el diagrama en bloques de un transmisor DSSS.

Figura 1.1. Diagrama en Bloques de un Transmisor DSSS



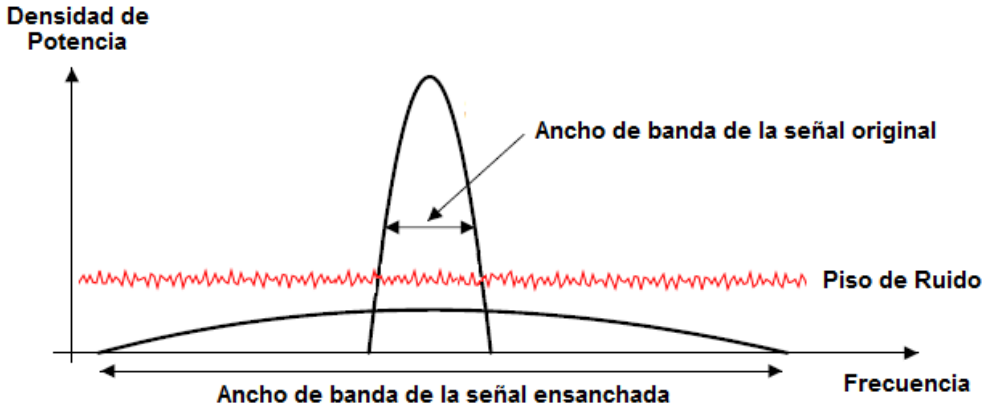
Las secuencias PN no son completamente aleatorias, puesto que se conforman por una serie periódica de símbolos denominados *chips*. En la Figura 1.2 se presentan las formas de la señal de información y la secuencia pseudo-aleatoria, que están representadas mediante codificación digital polar, donde al símbolo binario 1 se asigna el valor +1 y al símbolo 0 el valor -1.

Figura 1.2. Señal de Información y Secuencia Pseudo-aleatoria



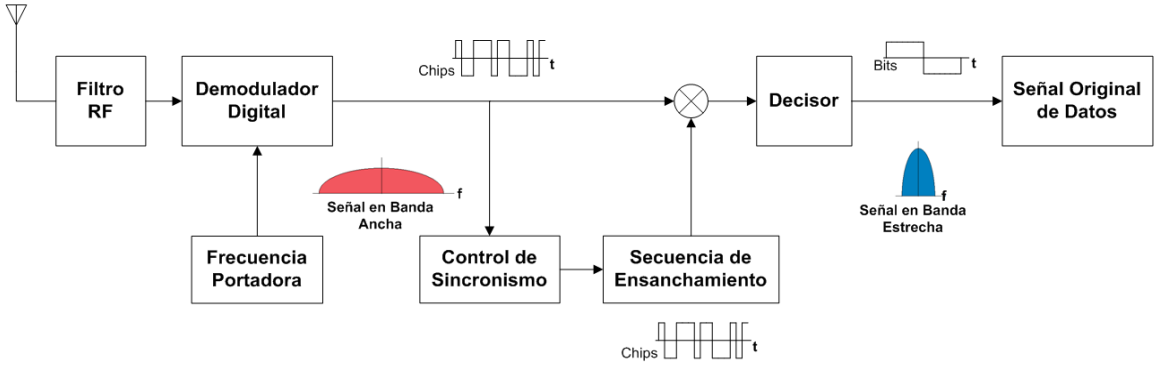
La duración de los símbolos de la señal de información (T_b) es mayor que la duración de los símbolos de la secuencia pseudo-aleatoria (T_c), lo que en el dominio de la frecuencia corresponde a un mayor ancho de banda para la secuencia pseudo-aleatoria. En la Figura 1.3 se presenta la diferencia entre el ancho de banda de la señal antes y después del proceso de ensanchamiento.

Figura 1.3. Ancho de Banda de la Señal Original y la Señal de Espectro Ensanchado [1]



El desensanchamiento se efectúa en el receptor y consiste en realizar el proceso inverso desarrollado en el transmisor. Como se muestra en el diagrama en bloques de la Figura 1.4, una vez que la señal recibida ha pasado por un filtro de banda ancha se combina de manera sincronizada con una réplica de la secuencia pseudo-aleatoria, para generar una reducción en el ancho de banda de la señal [1]. Si la sincronización es correcta, se debe recuperar la información original, siempre y cuando la secuencia pseudo-aleatoria sea la misma utilizada en el proceso de ensanchamiento. Si la señal recibida se combina con una secuencia diferente, a la salida del sistema se obtiene una señal aleatoria de alta velocidad o con un gran ancho de banda. Esto implica que para interpretar exitosamente la información se requiere que el receptor conozca la secuencia utilizada por el transmisor.

Figura 1.4. Diagrama en Bloques de un Receptor DSSS



Se denomina Factor de Ensanchamiento (SF, *Spreading Factor*) o Ganancia de Procesamiento (PG, *Processing Gain*) a la relación que existe entre el ancho de banda de la información y el ancho de banda de la secuencia de ensanchamiento, y consiste en el número entero de *chips* que existen por cada símbolo o bit de información [3]. El Factor de Ensanchamiento se representa mediante la Ecuación 1.1[3].

$$SF = \frac{T_b}{T_c} = \frac{BW_c}{BW_b} = \frac{R_c}{R_b} \tag{1.1}$$

Donde:

- BW_c [Hz]: Ancho de banda de la secuencia pseudo-aleatoria.
- BW_b [Hz]: Ancho de banda de la señal de datos.
- R_c [cps]: Velocidad de transmisión de la secuencia pseudo-aleatoria.
- R_b [bps]: Velocidad de transmisión de datos.

A mayor número de *chips* por símbolo se garantiza un mayor rechazo ante posible interferencia, debido a que cada elemento de la señal de información original estará compuesto por un número superior de símbolos con comportamiento aleatorio similar al del ruido, lo cual a su vez genera mayores exigencias de sincronismo en los procesos de ensanchamiento y desensanchamiento de las señales. Por esta razón se considera que

[3] Esta ecuación muestra la relación directa entre el ancho de banda y la velocidad de transmisión de datos del sistema.

SF es una medida aproximada de la capacidad para rechazar la interferencia [3]. Al igual que en otros sistemas de comunicación de datos vía radio, en los sistemas DSSS también está presente el Ruido Blanco Aditivo Gaussiano (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*) que afecta las señales transmitidas limitando el desempeño de la comunicación. A pesar de que los sistemas DSSS cuentan con capacidades para evitar la interferencia, esta técnica no se constituye en un mecanismo de combate ante el fenómeno del AWGN.

Para que no existan posibles errores en los procesos de sincronismo, se debe garantizar que los códigos posean propiedades adecuadas de autocorrelación y correlación cruzada, lo cual permite diferenciar comunicaciones simultáneas en un mismo canal. La autocorrelación hace referencia a la similitud de una señal con una versión retardada de sí misma, mientras que la correlación cruzada se refiere a la similitud entre dos señales diferentes. La correlación cruzada mide qué tan similares o diferentes son las secuencias pseudo-aleatorias entre sí [4]. Por lo general, estas secuencias se caracterizan por poseer altos valores de autocorrelación de tal forma que el receptor sea capaz de sincronizar la señal recibida para desensancharla correctamente, y también se caracterizan por poseer bajos valores de correlación cruzada con el objetivo de proporcionar una discriminación adecuada entre diferentes señales simultaneas en un mismo canal en sistemas de acceso múltiple [5].

Para analizar el desempeño a nivel teórico de un sistema, en particular un sistema DSSS, se define la relación energía de bit de información (E_b) con respecto a densidad espectral de potencia de ruido (N_0) mediante la Ecuación 1.2.

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_R/BW_b}{N_0} \tag{1.2}$$

Donde:

- P_R [W] Potencia de recepción.
- N_0 [W/Hz]: Densidad espectral de potencia de ruido.

N_0 está dado por la Ecuación 1.3.

$$N_0\left[\frac{W}{Hz}\right] = k * T * NF = \frac{P_N}{B} = \frac{P_N}{BW_c} \tag{1.3}$$

Donde:

- *K*: Contante de Boltzmann[4].
- *T* [ºK]: Temperatura ambiente.
- *NF:* Figura de Ruido (NF, *Noise Figure*)
- *B*[Hz]: Ancho de banda del sistema[5].
- P_N [W] Potencia de ruido.

[4]La constante de Boltzmann (*k*) es igual a $1.3806504 \times 10^{-23}$ J/ºK.
[5] En los sistemas de espectro ensanchado es posible asumir el ancho de banda del sistema como en ancho de banda de la secuencia pseudo-aleatoria.

Reemplazando 1.3 en 1.2 se obtiene la Ecuación 1.4.

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_R/BW_b}{P_N/BW_c} = \frac{P_R}{P_N} * \frac{BW_c}{BW_b} \tag{1.4}$$

En la Ecuación 1.4 se aprecia que la relación entre los dos anchos de banda corresponde al valor de SF presentado en la Ecuación 1.1. Por otra parte, en un sistema analógico la relación entre la potencia recibida y la potencia de ruido se denomina Relación Portadora a Ruido *(*CNR*, Carrier-to-Noise Ratio)*, pero en esta situación, en donde se trata de un sistema de transmisión digital se hace referencia a la Relación Señal a Ruido (SNR, *Signal-to-Noise Ratio*). Por lo tanto la relación E_b/N_0 queda representada mediante la Ecuación 1.5.

$$\frac{E_b}{N_0} = SNR * SF \tag{1.5}$$

En la Ecuación 1.6 se representa la Ecuación 1.5 en unidades logarítmicas.

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{dB} = (SNR)_{dB} + (SF)_{dB} \tag{1.6}$$

De aquí se muestra que el receptor deseado puede aprovechar las ventajas de SF, ya que permite incrementar el valor de la potencia de la señal recibida por encima del nivel de ruido para recuperar la información, mientras que un receptor no deseado no cuenta con estas mismas capacidades.

1.2 CÓDIGOS DE ENSANCHAMIENTO

La principal característica de los sistemas DSSS es el uso de códigos que permiten realizar ensanchamiento en el dominio de la frecuencia de las señales que se desean transmitir. Existen diferentes tipos de códigos utilizados para realizar el ensanchamiento, entre ellos se encuentran los Códigos Gold y los Códigos Walsh-Hadamard, los cuales se describen a continuación.

1.2.1 Códigos Gold

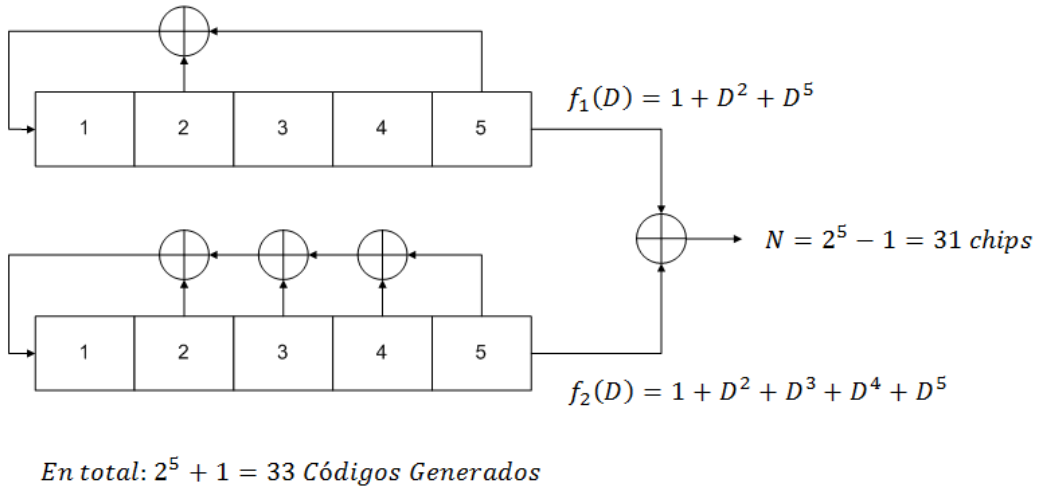
Los códigos Gold se derivan de una familia de secuencias pseudo-aleatorias denominadas Secuencias de Máxima Longitud (MLS, *Maximum Length Sequences*) o secuencias m (*m-sequences)* que se generan mediante Registros de Desplazamiento con Realimentación Lineal (LFSR, *Linear Feedback Shift Register*), donde el número de registros determina la longitud de la secuencia. Las secuencias MLS se caracterizan por su fácil implementación, lo que hace posible que un receptor no deseado pueda interceptar y recuperar la señal de información sin mayor dificultad [6].

Debido a este problema se desarrollaron los códigos Gold, los cuales se caracterizan por poseer mejores propiedades de correlación cruzada. Un conjunto de códigos Gold se

deriva de la operación O Exclusiva (XOR, *Exclusive Or*) entre una secuencia MLS fija, y una secuencia MLS desplazada en las diferentes posiciones del registro [1].

La Figura 1.5 muestra un esquema básico para la generación de códigos Gold a partir de dos secuencias MLS, cada una con periodo igual a 2^n-1, donde *n* corresponde al número de elementos del registro [7], que en este caso es 5. Combinando estas dos secuencias, a la salida se obtiene como resultado un conjunto de 2^n+1 códigos Gold, es decir que en total se obtienen 33 códigos. Las dos secuencias que generan el conjunto de códigos Gold son definidas por sus polinomios característicos, $f_1(D)$ y $f_2(D)$, donde D constituye un elemento de retardo de cada registro [8].

Figura 1.5. Generación de un Conjunto de Códigos Gold [8]



1.2.2 Códigos Walsh-Hadamard

Los códigos Walsh-Hadamard se basan en la técnica de Factor de Ensanchamiento Variable Ortogonal (OVSF, *Orthogonal Variable Spreading Factor*). Este es un conjunto de códigos perfectamente ortogonales entre sí, que se definen a partir de un árbol de códigos, donde cada una de sus ramas representa un valor de SF diferente. Los códigos OVSF garantizan protección de la señal de espectro ensanchado ante otras señales radiadas por el sistema, ya que la ortogonalidad de estos códigos permite diferenciar las señales transmitidas sin que exista interferencia entre ellas [9]. El árbol de códigos OVSF se genera a partir de la matriz de Hadamard, de dimensiones $2^n x 2^n$, donde las filas de esta matriz conforman los códigos ortogonales. Es posible generar esta matriz a partir de arreglos repetitivos de la matriz de menor dimensión [7], como se aprecia en las siguientes expresiones:

$$\boldsymbol{H_1} = [1]$$

$$\boldsymbol{H_2} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{H_1} & \boldsymbol{H_1} \\ \boldsymbol{H_1} & -\boldsymbol{H_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

En las matrices $\boldsymbol{H_1}$ y $\boldsymbol{H_2}$ el símbolo 1 representa un estado de 1 lógico, y -1 representa un 0 lógico. Para el caso de la matriz de dimensión 2^n, es necesario hacer referencia a la matriz de dimensión 2^{n-1} de la Ecuación 1.7.

$$\boldsymbol{H_{2^n}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{H_{2^{n-1}}} & \boldsymbol{H_{2^{n-1}}} \\ \boldsymbol{H_{2^{n-1}}} & -\boldsymbol{H_{2^{n-1}}} \end{bmatrix} \tag{1.7}$$

La ortogonalidad de los códigos OVSF se obtiene si el resultado del producto escalar o producto punto entre dos códigos es igual a cero. Por ejemplo, una matriz de Hadamard de dimensiones *4x4* está dada por la expresión:

$$\boldsymbol{H_4} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

Haciendo el producto elemento a elemento entre las filas $\boldsymbol{F_1}$ y $\boldsymbol{F_3}$ de la matriz anterior el resultado es cero. Lo mismo sucede para cualquier otro par de filas de este tipo de matrices.

$$\boldsymbol{F_1} \cdot \boldsymbol{F_3} = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1] \cdot [1 \quad 1 \quad -1 \quad -1]$$

El resultado del producto se muestra a continuación:

$$\boldsymbol{F_1} \cdot \boldsymbol{F_3} = (1 \cdot 1) + (1 \cdot 1) + \big(1 \cdot (-1)\big) + \big(1 \cdot (-1)\big) = 0$$

Los códigos Walsh-Hadamard son utilizados comúnmente en sistemas móviles actuales para separar diferentes señales provenientes desde un mismo transmisor gracias a las características de ortogonalidad que poseen, lo que permite reducir la interferencia producida por los demás usuarios en un mismo punto de recepción, denominada Interferencia de Acceso Múltiple (MAI, *Multiple Access Interference*). Sin embargo, las limitaciones de estos códigos se encuentran en el hecho de que el número de códigos ortogonales que se pueden obtener a partir de la matriz de Hadamard es reducido, comparado con el número de códigos Gold, debido a que se debe mantener la condición de ortogonalidad entre los códigos.

1.3 VENTAJAS DE LOS SISTEMAS DE ESPECTRO ENSANCHADO

- Baja Probabilidad de Interceptación.

Una de las principales ventajas asociadas a los sistemas DSSS es la protección de la información, debido a que se transmite con muy baja densidad espectral de potencia, lo suficiente como para quedar enmascarada por el ruido de fondo del canal o ruido térmico en el receptor, sin que se pierda la información. Se dice que este tipo de señales tienen Baja Probabilidad de Interceptación (LPI, *Low Probability of Intercept*) porque la presencia de la señal no puede ser detectada por un usuario no autorizado al estar por debajo del nivel de ruido [2], y si es detectada no puede ser interpretada debido al desconocimiento de la secuencia de ensanchamiento. Si el receptor conoce perfectamente la secuencia correspondiente, recuperará la información incluso si la señal recibida tiene un nivel de

densidad espectral de potencia muy bajo, gracias a la acción del SF. Esto se aprecia mediante la Ecuación 1.6, ya que si el SF es mayor que E_b/N_0, entonces la SNR es menor que 0, lo que implica directamente que la potencia de la señal es menor que la del ruido. El proceso de ensanchamiento mediante códigos Gold y OVSF garantiza que cada usuario detecte e interprete su señal de información correspondiente dentro de un sistema CDMA, debido a las características de correlación y ortogonalidad con que cuentan estas familias de códigos.

A medida que se incrementa el valor del SF (es decir, a mayor número de *chips* por cada bit de información), mayor es la probabilidad de recuperar la señal en el receptor deseado en presencia de interferencia, aunque para ello se requiere sacrificar aspectos relacionados con la eficiencia espectral y velocidad de transmisión de bits, para brindar confiabilidad y disponibilidad al sistema de comunicación.

- Técnica de Acceso Múltiple

La técnica de transmisión DSSS es el soporte principal de los sistemas CDMA, debido a que facilitan la transmisión de información de diferentes usuarios, compartiendo los mismos recursos de tiempo y frecuencia, diferenciándose unos de otros mediante la asignación de secuencias pseudo-aleatorias con bajos valores de correlación cruzada u ortogonalidad entre sí, de forma que sea posible establecer varias comunicaciones independientes en el mismo ancho de banda del canal de manera simultánea [10]. La información destinada a cada uno de los usuarios es interpretada por cada uno de ellos, sin embargo no podrán comprender la información de los demás usuarios, debido a que cada uno de ellos solamente conoce su secuencia correspondiente, la cual permite diferenciar sus mensajes. Esta característica de privacidad de la información no está disponible en las técnicas de Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA, *Frequency Division Multiple Access*), y Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*).

- Resistencia ante Interferencia

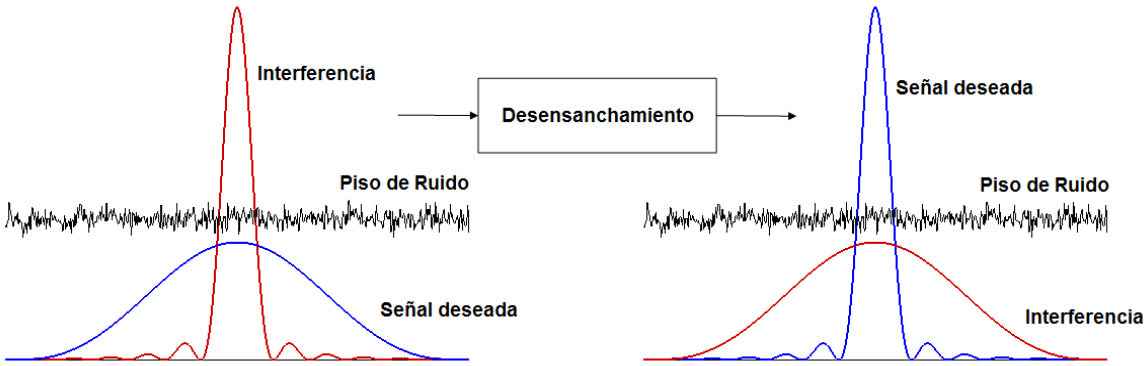
Los sistemas basados en DSSS tienen la capacidad de operar en entornos de ruido e interferencia, tanto intencional (*jamming*[6]) como no intencional. Cualquiera que sea la naturaleza de la interferencia, el efecto que causa es la destrucción de una parte o de la totalidad de la señal transmitida. La interferencia se puede clasificar como interferencia de banda estrecha o de banda ancha, dependiendo de la forma en que interfiere a la señal de interés, ya sea mediante un tono, o a través de señales con un ancho de banda comparable o mayor al de la señal de espectro ensanchado.

La técnica de transmisión DSSS se encarga de combatir la interferencia de banda estrecha, debido a que las señales interferentes no se encuentran dentro de la totalidad del ancho de banda de la señal de espectro ensanchado, como es el caso de un tono. Cuando esta señal aparece en el canal y llega al receptor se combina con una copia de la secuencia pseudo-aleatoria, dando como resultado una señal de espectro ensanchado con un nivel de densidad espectral de potencia reducido, en comparación con la señal de

[6] El *jamming* consiste en la propagación intencionada de señales interferentes de alta densidad espectral de potencia con el objetivo de minimizar la efectividad de los sistemas de comunicación.

información correctamente desensanchada [6]. Este proceso se muestra en la Figura 1.6, en donde el ancho de banda de la información transmitida (azul) se reduce, mientras que la densidad espectral de potencia de la interferencia (roja) se distribuye sobre un ancho de banda determinado por la secuencia pseudo-aleatoria [1]. La señal interferente ensanchada será considerablemente atenuada por un filtro pasa bajo ubicado después del módulo de desensanchamiento, que se encarga de remover las componentes no deseadas. A mayor valor de SF del sistema, las señales interferentes de banda estrecha logran un mayor ensanchamiento en el receptor y por lo tanto pueden ser rechazadas con mayor facilidad. Por otra parte, si el ancho de banda de la señal interferente es superior al ancho de banda del sistema DSSS, esta técnica no podrá contrarrestar los efectos de la interferencia y el sistema se verá considerablemente afectado debido al incremento del piso de ruido.

Figura 1.6. Ensanchamiento de la Interferencia de Banda Estrecha en el Receptor



En los sistemas CDMA la interferencia de banda ancha corresponde en la mayoría de los casos a las señales de usuarios del sistema, debido a que se comparte el mismo ancho de banda simultáneamente, ocasionando la aparición de múltiples señales ensanchadas en frecuencia, que para los receptores no deseados se convierten en interferencia. Una solución para este tipo de inconvenientes es la Detección Multi Usuario (MUD, *Multi User Detection*), que permite la detección y discriminación de las señales deseadas entre el conjunto de señales que se encuentran simultáneamente en el canal de transmisión, y que el receptor interpreta como interferencia. Este tipo de detector es comúnmente implementado en las estaciones base, debido a que ellas tienen conocimiento acerca de todas las secuencias pseudo-aleatorias utilizadas en el sistema. El uso de este tipo de detectores permite incrementar la capacidad de los sistemas CDMA, ya que estos sistemas son limitados por la interferencia de banda ancha. Otros métodos para la reducción de la interferencia se presentan más adelante.

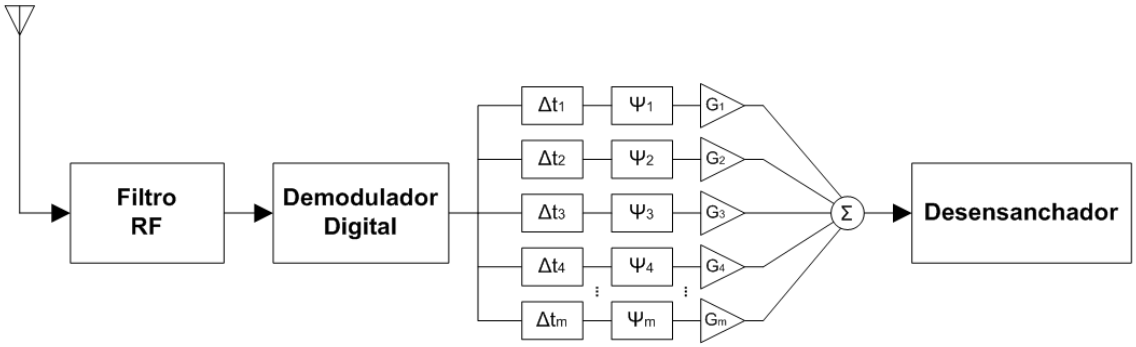
En algunos sistemas CDMA existen procesos que mejoran la capacidad de rechazo a la interferencia, como son la Codificación para el Control de Errores y el Entrelazado (*Interleaving*). Sin embargo la complejidad de estos procesos puede ser un factor significativo dentro del sistema.

- Comunicaciones a través de Canales Multitrayecto

El multitrayecto consiste en la transmisión de una señal de un transmisor a un receptor a través de rutas distintas, debido a los fenómenos de reflexión, difracción y dispersión que sufren las ondas electromagnéticas en el entorno. Los ecos de una misma señal recibidos por caminos distintos se caracterizan por tener diferentes valores de amplitud, retardo y fase. Esto hace que el multitrayecto sea perjudicial para algunas técnicas de transmisión ya que en el peor de los casos las señales que llegan al receptor por diferentes trayectorias se interfieren de manera destructiva.

En los canales multitrayecto la técnica de transmisión DSSS tiene una forma particular de aprovechar los diferentes ecos recibidos de una misma señal, por medio de un receptor especial denominado Receptor Rastrillo (*Rake*) que está formado por un conjunto de dedos (*fingers*) o ramas, cada una de ellas con diferente correlación acorde a cada trayecto independiente en el canal de comunicaciones, todo esto con el objetivo de discriminar los diferentes ecos de una misma señal, siempre y cuando los retardos entre los ecos sean menores que la duración del periodo de símbolo, en este caso, el periodo de *chip*. El receptor *Rake* compensa la atenuación, los retardos y los cambios de fase para combinar los ecos de manera coherente [9], como se muestra en la Figura 1.7. Este aprovechamiento de los diferentes ecos provenientes a través de varios trayectos es lo que se conoce en sistemas CDMA como Diversidad Multitrayecto o Microdiversidad.

Figura 1.7. Receptor Rake



Donde:

- *Δt*: Componente de Retardo.
- *Ψ*: Componente de Fase.
- *G*: Componente de Amplitud o Ganancia.

1.4 DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS DE ESPECTRO ENSANCHADO

- Efecto Cerca-Lejos

Se conoce como efecto cerca-lejos al fenómeno generado cuando alguna de las estaciones móviles transmite a una elevada potencia estando en las proximidades de la estación base, generando una interferencia considerable a las demás señales y por lo tanto ocasionando la saturación o bloqueo de la estación base [9]. Cuando diferentes

usuarios acceden en el mismo espectro de frecuencias, existe la posibilidad de que una sola señal sea capaz de enmascarar a los otras en el receptor si su nivel de potencia es muy alto [9].

En sistemas CDMA se puede controlar este fenómeno haciendo uso del procedimiento de Control de Potencia (PC, *Power Control*) en el enlace de subida, para garantizar que las señales de los móviles que inciden en el receptor de la estación base lleguen con igual intensidad, sin que ningún móvil sature a la estación base con su señal. La estación base envía comandos de control de potencia a los móviles para indicarles la potencia con la que deben transmitir, de acuerdo a una estimación continua del canal. Esta técnica permite incrementar la capacidad en este tipo de sistemas, pues disminuye los niveles de MAI con el objetivo de proporcionar la calidad requerida de los servicios [9]. Visto desde la estación base y con el procedimiento de PC, el canal se comporta como si no sufriera efectos de desvanecimiento [9], es decir, como si fuese un canal plano.

El procedimiento de PC hace parte de los mecanismos de Gestión de Recursos Radio (RRM, *Radio Resources Management*), definidos como un conjunto de técnicas que buscan hacer uso eficiente de los recursos radioeléctricos con el fin de garantizar una alta capacidad en los sistemas móviles actuales.

En un sistema CDMA donde se implemente el procedimiento de PC, se garantiza que las señales transmitidas por las estaciones móviles lleguen a la estación base con niveles de potencia similares. En este caso, la Relación Señal a Interferencia[7] (SIR, *Signal-to-Interference Ratio*) medida en una de las estaciones móviles dentro de un sistema de N usuarios es la indicada en la Ecuación 1.8.

$$SIR = \frac{S}{(N-1) * S + \eta} \tag{1.8}$$

Donde

- η [W]*:* Potencia de ruido térmico en el receptor.
- *N:* Número de usuarios activos.

Si se asume que el nivel de potencia de la interferencia de los demás usuarios es mucho mayor que el nivel de potencia de ruido, es posible despreciar η de la Ecuación 1.8, dando como resultado la Ecuación 1.9.

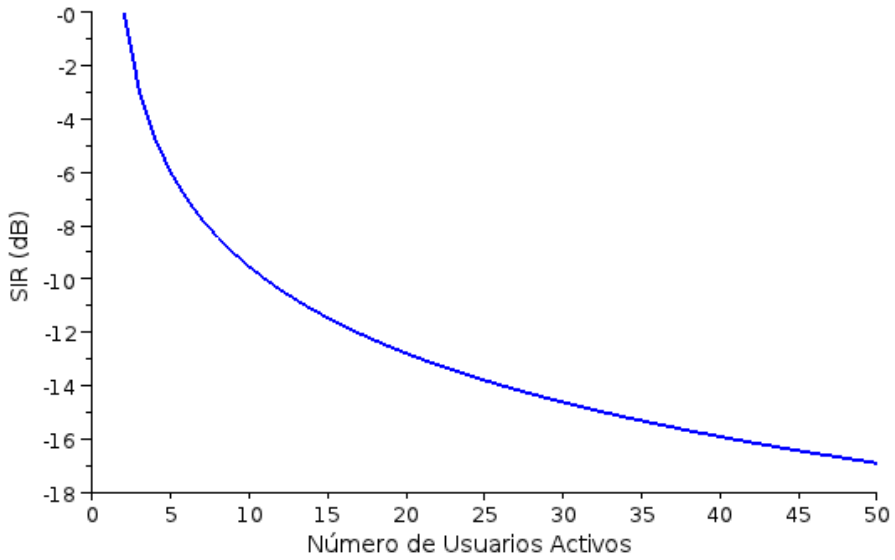
$$SIR = \frac{1}{N-1} \tag{1.14}$$

De la Ecuación 1.14 se observa que al incrementar el número de usuarios del sistema, la SIR disminuye, afectando el desempeño del sistema, como se presenta en la Figura 1.8.

[7] Debido a que en un sistema CDMA, para un usuario en particular, el procesamiento de las señales de los demás usuarios se analiza como si se tratara de interferencia. La relación de calidad se asume en términos de SIR en lugar de SNR.

Esto implica que en un sistema de DSSS el desempeño depende directamente del número de usuarios activos, ya que ellos determinan la intensidad de la interferencia [1]. Dependiendo de los requisitos de calidad para un determinado servicio, se define el número de usuarios que pueden ser atendidos, con el objetivo de mantener una determinada SIR. Si el sistema se somete a condiciones de sobrecarga de usuarios, estos deberán estar dispuestos a tolerar un menor desempeño del sistema.

Figura 1.8. Relación entre SIR y Número de Usuarios Activos



- Interferencia de Acceso Múltiple

En un sistema CDMA, la MAI corresponde a la interferencia producida por otros usuarios que transmiten simultáneamente su información dentro de un mismo ancho de banda. Este tipo de interferencia se puede generar si las secuencias de ensanchamiento no son lo suficientemente ortogonales, por lo cual es necesario seleccionar correctamente las secuencias pseudo-aleatorias para sintonizar adecuadamente el desensanchador en el Receptor *Rake*.

Para minimizar el nivel de MAI se requieren propiedades adecuadas de correlación cruzada u ortogonalidad en las secuencias pseudo-aleatorias, para mejorar la capacidad de distinguir la señal deseada entre las demás señales transmitidas simultáneamente en el mismo ancho de banda. Si las secuencias pseudo-aleatorias no poseen valores de correlación cruzada bajos, o si no son completamente ortogonales entre sí, como resultado se tiene la aparición de MAI en el receptor [9]. En los sistemas basados en DSSS con ancho de banda limitado, el valor máximo de SF es reducido, y no se puede aprovechar totalmente las ventajas ofrecidas por esta técnica de transmisión.

2. KIT DE DESARROLLO CY3653 WIRELESSUSB PROC

2.1 SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE TRABAJO

La evolución de la electrónica en los últimos años ha sido uno de los aspectos de mayor relevancia en el ámbito de las comunicaciones, debido a que gracias a ella ha sido posible diseñar y construir dispositivos sofisticados que facilitan la transmisión de la información, ya sea por medio cableado o inalámbrico, con un muy buen desempeño y una alta eficiencia. Dicha evolución ha permitido la aparición de nuevas tecnologías en el campo de las telecomunicaciones, que garantizan una comunicación fiable y de alta calidad. Esto ha atraído la atención de muchos fabricantes de equipos y dispositivos, ya que son ellos quienes buscan satisfacer las necesidades de los usuarios.

Para lograr los objetivos propuestos en este trabajo de grado fue necesario seleccionar un dispositivo que se adaptara a los requerimientos, de tal forma que fuera posible implementar un sistema de comunicación de datos vía radio de corto alcance en 2.4 GHz, mediante la técnica de transmisión DSSS. En el mercado se pueden encontrar múltiples equipos y dispositivos para implementar este sistema de comunicación, con diferentes características y opciones configurables. Uno de ellos es el kit de desarrollo CY3653 *WirelessUSB* PRoC del fabricante *Cypress Semiconductor Corp.*, el cual se muestra en la Figura 2.1. Este kit cuenta con un sistema embebido que posee las capacidades de un Sistema Programable en un Chip (PSoC, *Programmable System-on-Chip*) en conjunto con un bloque de radiofrecuencia basado en DSSS, que le otorga al dispositivo capacidades de comunicación inalámbrica en baja potencia.

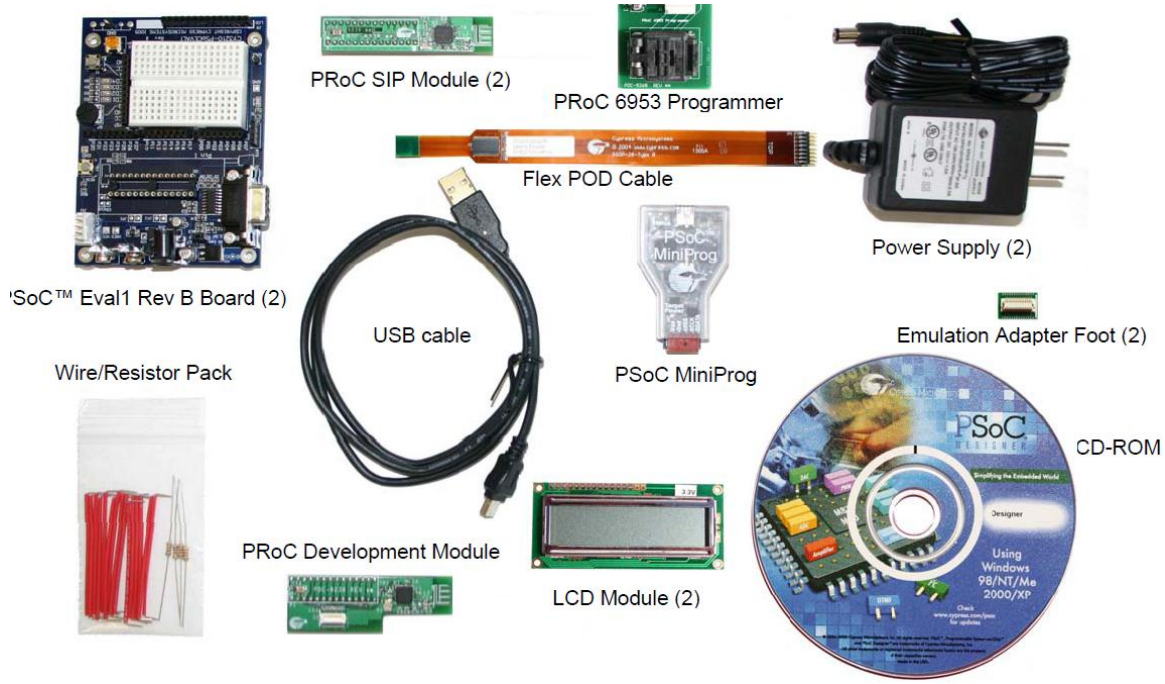
Por otra parte, el kit de desarrollo se caracteriza por su fácil configuración, debido a que contiene una herramienta software que permite programar los dispositivos PRoC en un lenguaje de programación de alto nivel. Además, el kit contiene los manuales necesarios con la información acerca de la sintaxis del lenguaje de programación, las especificaciones técnicas de los microcontroladores y varios ejemplos que sirven como guía para la configuración inicial de los dispositivos.

Debido a la robustez, la fácil configuración y las capacidades para evaluar el desempeño de un sistema de comunicaciones basado en DSSS, se seleccionó el kit de desarrollo CY3653 *WirelessUSB* PRoC de *Cypress Semiconductor Corp.,* como la herramienta ideal para lograr los objetivos del presente trabajo de grado.

2.2 CARACTERÍSTICAS HARDWARE

Los elementos que componen el kit de desarrollo CY3653 permiten implementar un sistema completo de comunicación de datos vía radio de corto alcance, ya que cuenta principalmente con dos módulos transceptores, los cuales tienen la capacidad de funcionar en entornos con interferencia, debido a que operan bajo su propio estándar. Cada uno de los elementos que aparecen en la Figura 2.1 se describen a continuación.

Figura 2.1. CY3653 WirelessUSB™ PRoC™ Development Kit [11]

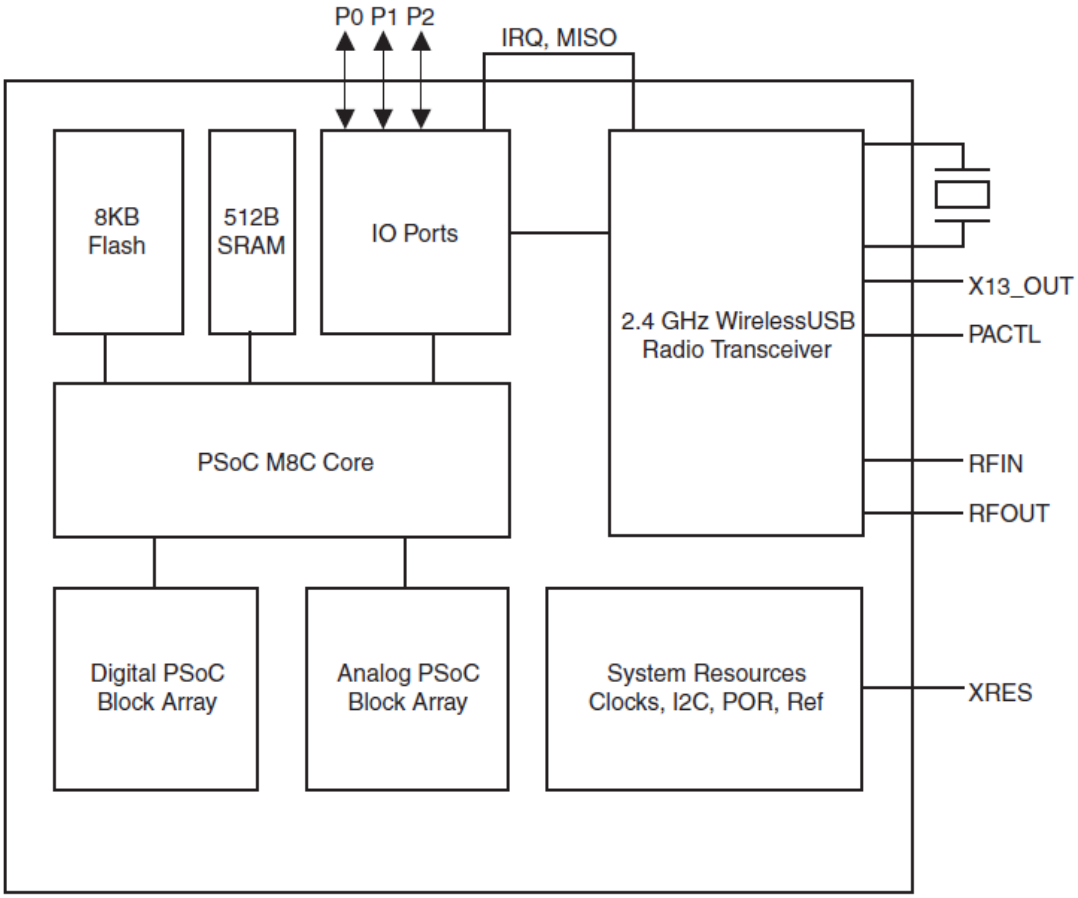


2.2.1 Módulo PRoC SiP

Los módulos del Sistema Integrado (SiP, *System-in-Package*) PRoC hacen parte del núcleo de funcionamiento del kit de desarrollo, e incluyen dos de las tecnologías más destacadas de *Cypress*: PSoC y *WirelessUSB*, dentro del circuito integrado CYWUSB6953, que cuenta con cuatro bloques analógicos y digitales programables, una memoria de almacenamiento *flash* de 8 KB, Memoria Estática de Acceso Aleatorio (SRAM, *Static Random Access Memory*) de 512 Bytes para almacenamiento de datos, un microcontrolador de 8 bits y un sistema radio en 2.4GHz que hace uso de la técnica de transmisión DSSS [12], todo integrado en un chip de 48 pines. Este microcontrolador pertenece a la familia PSoC con arquitectura *Harvard*, cuenta con un procesador de núcleo M8C y alcanza velocidades de hasta 24 MHz. Las características del radio transceptor se describen más adelante.

El alto grado de diseño del dispositivo PRoC y su operación en una de las bandas definidas para aplicaciones Industriales, Científicas y Médicas (ISM, *Industrial, Scientific and Medical*), hace que los dispositivos PRoC sean de gran utilidad en el desarrollo de aplicaciones en diferentes áreas de trabajo. El diagrama en bloques de un PRoC CYWUSB6953 se muestra en la Figura 2.2.

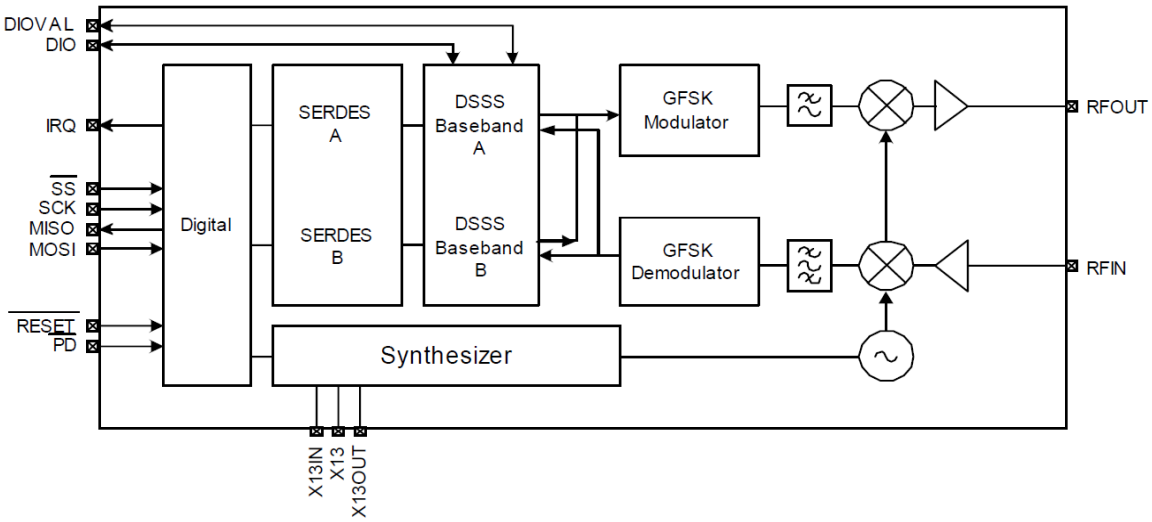
Figura 2.2. Diagrama en Bloques del PRoC CYWUSB6953 [12]



2.2.2 Módulo de Desarrollo PRoC

El módulo de Desarrollo PRoC es similar al módulo PRoC SiP, con la diferencia de que el módulo de desarrollo posee capacidades de interconexión con dispositivos de otros kits de desarrollo del mismo fabricante y permite simular las funcionalidades del circuito integrado CYWUSB6953, en conjunto con el circuito integrado de referencia 21x34 y el cable *Flex POD*. Este módulo cuenta con el circuito integrado CYWUSB6935 que pertenece a la primera generación de PRoC de *Cypress* y hace uso de la técnica de transmisión DSSS [13]. El CYWUSB6935 contiene un radio transceptor que opera en la banda de 2.4 GHz, el cual puede sintetizar y sintonizar 78 canales diferentes, cada uno de ellos con un ancho de banda de 1 MHz. Este es el mismo radio transceptor incluido dentro del CYWUSB6953 en el módulo PRoC SiP descrito en la sección anterior. El diagrama en bloques del radio transceptor para los dispositivos PRoC se muestra en la Figura 2.3.

Figura 2.3. Diagrama en Bloques del Radio Transceptor CYWUSB6935 [13]



El ensanchamiento de la información se consigue mediante una de las posibles 49 secuencias pseudo-aleatorias de la familia de códigos Gold disponibles para estos circuitos integrados. Teóricamente es posible obtener una capacidad máxima de 3822 transmisiones simultáneas[8]. El ensanchamiento se puede realizar con secuencias de 16, 32 y 64 *chips*, lo que origina velocidades de transmisión de 64 kbps, 32 kbps y 16 kbps, respectivamente. Además, el CYWUSB6935 hace uso del esquema de Modulación por Desplazamiento de Frecuencia Gaussiana (GFSK, *Gaussian Frequency Shift Keying)*, con un ancho de banda del filtro gaussiano igual a $1/2T_c$, que permite representar cada símbolo de la señal de espectro ensanchado mediante una variación en la frecuencia de una portadora generada por un Oscilador Controlado por Voltaje (VCO, *Voltage-Controlled Oscilator*) el cual permite obtener a su salida señales sinusoidales que representan los símbolos de marca y espacio, cuya desviación en frecuencia (Δf) corresponde a 320 kHz por encima y por debajo de la frecuencia portadora, respectivamente. En el demodulador también se utiliza un VCO para representar las variaciones en frecuencia de las señales sinusoidales recibidas mediante los símbolos binarios de marca y espacio. El ancho de banda útil para las señales GFSK generadas por los dispositivos PRoC corresponde a 860 kHz, y consiste en el ancho de banda medido entre los puntos en donde la densidad espectral de potencia se encuentra 6 dB por debajo del nivel de la portadora [13].

El transmisor tiene una potencia máxima de transmisión de 0 dBm, lo cual le permite alcanzar distancias de 50 metros o más, en conjunto con una sensibilidad en el receptor de -95 dBm y un valor de NF igual a 13.3 dB. Los valores de potencia de transmisión se especifican en la Tabla 2.1.

[8] La capacidad se logra combinando los 49 códigos Gold en los 78 canales de 1 MHz.

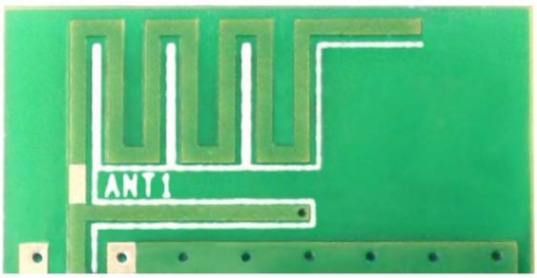
Tabla 2.1. Potencia de Transmisión de los módulos PRoC [13]

Configuración de Potencia	Potencia de Transmisión Típica (dBm)
7	0
6	-2.4
5	-5.6
4	-9.7
3	-16.4
2	-20.8
1	-24.8
0	-29.0

Por otra parte, el CYWUSB6935 posee las capacidades para medir la intensidad de la señal recibida por medio de la variable Indicador de Intensidad de la Señal Recibida (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*) que se almacena en uno de sus registros internos. El RSSI corresponde a un estimativo de la intensidad de la señal, representada mediante un voltaje interno, muestreado y digitalizado por un Conversor Analógico-Digital (ADC, Analog-to-*Digital Converter*) de 5 bits, de tal manera que el RSSI logra tomar valores entre 0 y 32, en donde los valores entre 0 y 10 (potencia de recepción menor que -95 dBm) indican que probablemente el canal no está siendo usado. Si el RSSI es mayor que 10 indica que el canal está siendo usado. Finalmente, si el RSSI es superior a 28 (potencia de recepción mayor que -40 dBm) indica la presencia de una señal intensa [13].

Tanto el módulo PRoC SiP como el módulo de desarrollo PRoC cuentan con una pequeña antena de microcinta (*microstrip*), denominada Antena Plana Tipo F Invertida (PIFA, *Planar Inverted F Antenna*), fabricada con material FR-4[9] de bajo costo [14], la cual se muestra en la Figura 2.4.

Figura 2.4. Antena PIFA incluida en los módulos PRoC [14]



El patrón de radiación de la Figura 2.5 muestra que la antena PIFA radia con mayor intensidad en ciertas regiones del plano polar, para las cuales la ganancia alcanza valores cercanos a 0 dBi. Con el fin de maximizar la adaptación entre un par de antenas F, estas deben estar orientadas como se muestra en la Figura 2.6 [15].

[9]Grados de Inflamabilidad (FR, *Flammability Ratings*) del material para la elaboración del circuito impreso. Clasificación de 1 a 5, siendo 1 el más inflamable y 5 el menos inflamable. FR-4 se utiliza habitualmente en equipos de calidad industrial, mientras que FR-2 se utiliza en aplicaciones de alto consumo.

Figura 2.5. Patrón de Radiación de la Antena PIFA [15]

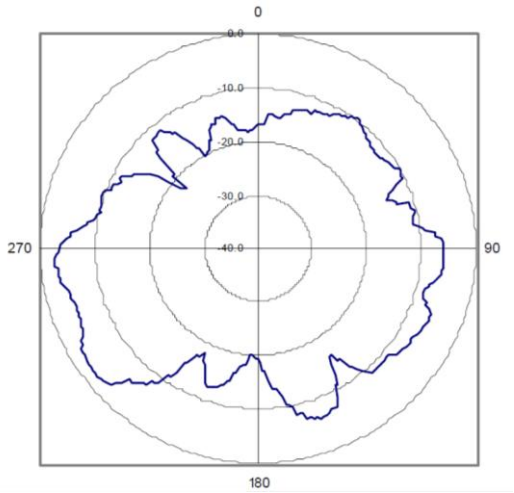
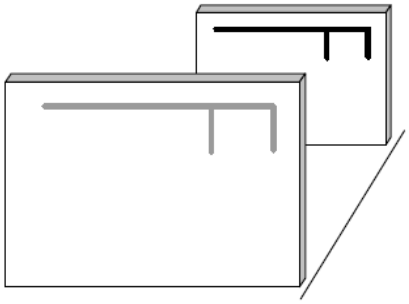


Figura 2.6. Orientación Ideal de las Antenas Tipo F [15]



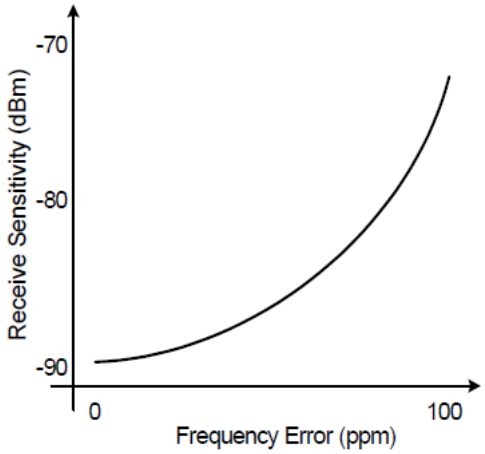
Los módulos de desarrollo PRoC cuentan con un Oscilador de Cristal Compensado en Temperatura (TCXO, *Temperature Compensated Crystal Oscillator*) que permite sintonizar estos módulos con bastante precisión en la frecuencia de operación. Para los dispositivos que operan bajo la tecnología *WirelessUSB* la frecuencia de oscilación del cristal es igual a 13 MHz, y consiste en la señal de reloj que sirve como referencia para el módulo radio. Sin embargo es posible que esta señal de referencia presente errores en la precisión en frecuencia. Típicamente la precisión en frecuencia de los osciladores se mide en Partes Por Millón (PPM, *Parts Per Million*)[10].

La precisión en frecuencia requerida para los dispositivos PRoC que operan bajo la tecnología *WirelessUSB* debe satisfacer, aparte de la frecuencia de referencia de 13 MHz, un error en frecuencia de hasta ±30 PPM, que para las aplicaciones en radiofrecuencia equivale a ±72 kHz para la banda de 2.4 GHz. Estos errores en frecuencia generalmente son ocasionados por los cambios de temperatura y los efectos de envejecimiento del

[10] Para la frecuencia de referencia de 13 MHz, un error de 1 PPM es equivalente a 13 Hz.

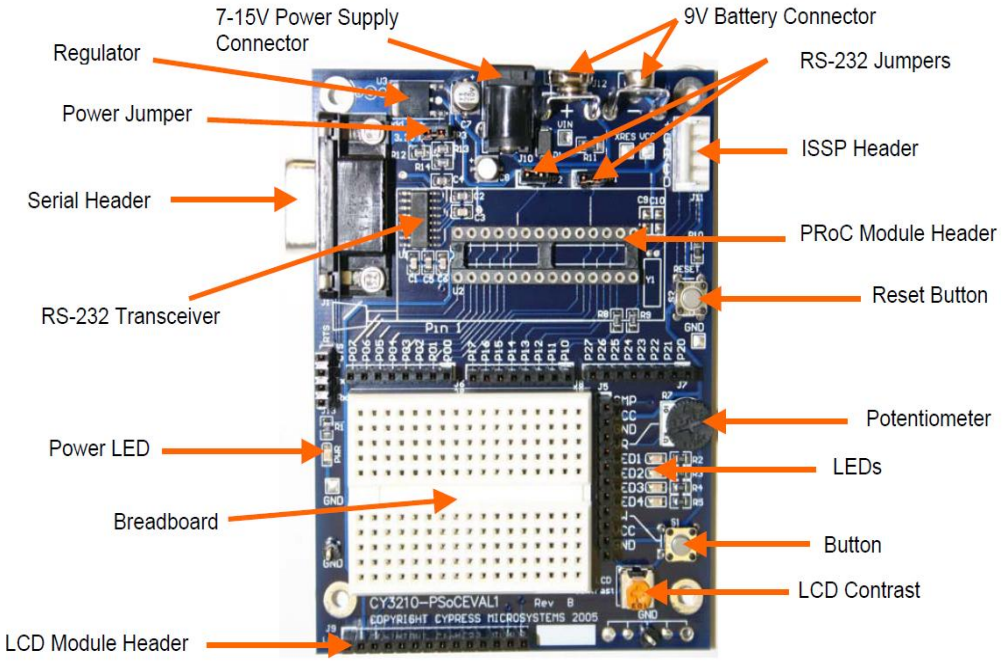
cristal [16]. La Figura 2.7 muestra la aproximación de la degradación de sensibilidad en un receptor cuando disminuye la precisión en frecuencia en los dispositivos PRoC [15].

Figura 2.7. Sensibilidad en Recepción vs Precisión en Frecuencia [15]



2.2.3 Tarjeta de Evaluación PSoC

Figura 2.8. Tarjeta de Evaluación PSoC [11]



La tarjeta de evaluación PSoC está diseñada con los elementos necesarios para configurar y establecer un sistema de comunicación vía radio. Los componentes principales con que cuenta la tarjeta de evaluación son: una ranura para la localización del

módulo PRoC, dos entradas de suministro de energía (Fuente de Voltaje y Batería), un regulador de voltaje, entradas y salidas de los puertos del microcontrolador, un puerto RS232 para comunicación con el computador, un puerto de Programación Serial del Sistema (ISSP, *In-System Serial Programming*) para la programación del microcontrolador y una tarjeta de pruebas (*protoboard)* para conexión de elementos circuitales externos. En la Figura 2.8 se muestra una imagen detallada con los componentes principales de la tarjeta de evaluación PSoC.

2.2.4 MiniProg PSoC

El MiniProg PSoC proporciona una solución de programación fácil, de bajo costo y efectiva, con un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE, *Integrated Development Environment*) que permite la programación del PRoC. El MiniProg PSoC consta de una interfaz de Bus Serial Universal (USB, *Universal Serial Bus*) para conectar al computador en el que se encuentra instalado el software de desarrollo y programación, que mediante un adaptador de 5 pines se conecta a la tarjeta de evaluación en el puerto ISSP para programar el CYWUSB6953. La Figura 2.9 muestra el MiniProg PSoC y el cable USB para la interconexión con el computador.

Figura 2.9. MiniProg PSoC y Cable USB [11]

2.2.5 Fuente de Alimentación

La fuente de alimentación consiste de una fuente que suministra energía a la tarjeta de evaluación y al microcontrolador. La fuente opera con un voltaje de entrada de 100-240V de Corriente Alterna (AC, *Alternating Current*), corriente de 0.3A y frecuencia de trabajo de 50-60Hz, para obtener a la salida un valor de voltaje de 12V de Corriente Directa (CD, *Direct Current*) y corriente de 1.0A.

2.2.6 Cable Flex POD

El Flex POD es un cable usado para conectar el ICE Cube[11] con el módulo de desarrollo PRoC, además de permitir la adquisición de datos entre el computador y dicho módulo.

[11]El dispositivo ICE Cube no se encuentra incluido dentro del kit de desarrollo CY3653.

2.2.7 Cable USB

Cable que permite la interconexión del computador con el MiniProg PSoC para programación del microcontrolador del PRoC.

2.2.8 Paquete de Cables y Resistencias

Paquete de resistencias y cables para implementación de circuitos exteriores en la *protoboard* incluida en la tarjeta de evaluación.

2.2.9 Módulo LCD

El modulo de Pantalla de Cristal Liquido (LCD, *Liquid Crystal Display*) de dimensión pequeña permite visualizar los parámetros del sistema de comunicación que se desean obtener, tales como los datos recibidos, la secuencia pseudo-aleatoria seleccionada o el canal de transmisión, entre otros.

2.2.10 CD-ROM

El CD-ROM incluye los siguientes elementos:

- Herramientas de Programación y Desarrollo (*PSoC Designer* y *PSoC Programmer*).
- Esquemas de los módulos y circuitos del kit.
- Ejemplos de código fuente.
- Manuales de usuario.
- Notas de la versión.

2.3 CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE

Como se mencionó anteriormente, las herramientas software se encuentran dentro del CD-ROM incluido en el kit de desarrollo CY3653. Sin embargo para el desarrollo del trabajo de grado se descargó la última versión del IDE directamente de la página de *Cypress Semiconductor Corp.* [12], para trabajar con las versiones actualizadas de las siguientes herramientas.

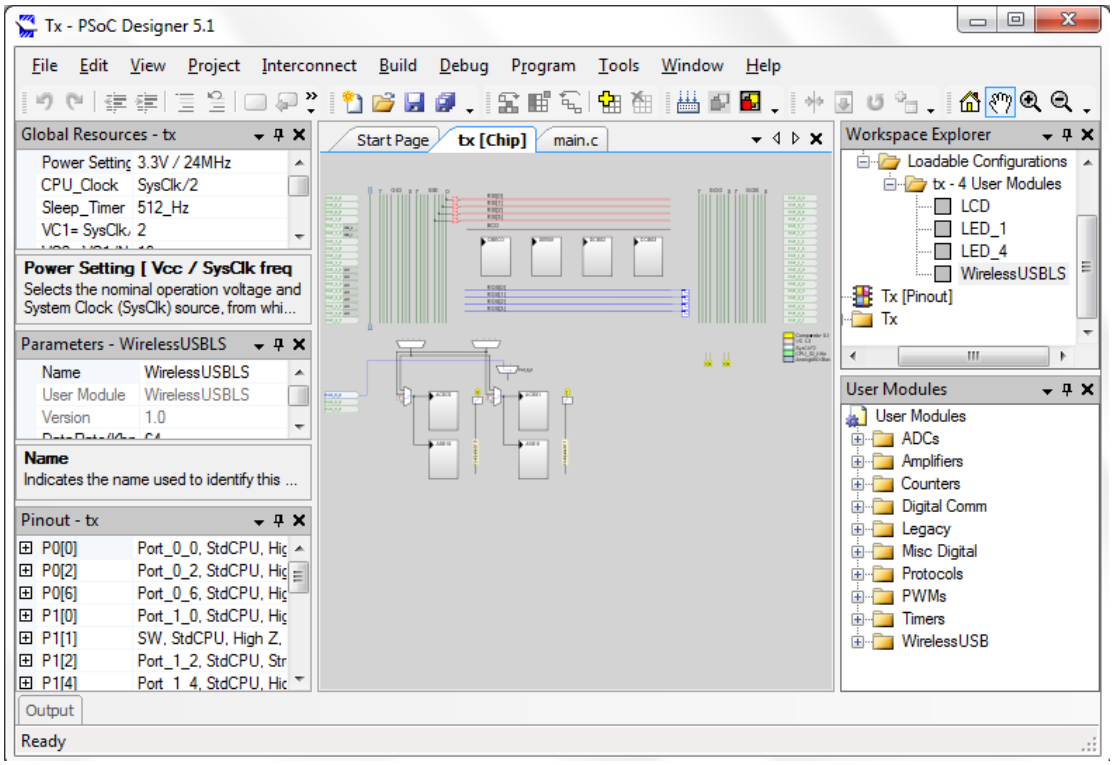
2.3.1 PSoC Designer Version 5.1 Service Pack 2

La herramienta software Diseñador PSoC (*PSoC Designer*, en inglés) es el soporte para la programación de múltiples dispositivos PSoC. Esta herramienta contiene varios subsistemas dentro de los cuales se destacan: el Editor a Nivel de Chip (*Chip-Level Editor*), Editor de Código (*Code Editor*), Administrador de Ejecución (*Build Manager*), Administrador de Proyectos (*Project Manager*), Monitor de Tarjeta (*Board Monitor*), y Depurador (*Debugger*) [17]. Estos subsistemas se combinan para conformar un completo IDE, permitiendo un ambiente de desarrollo agradable entre el programador y el software.

[12] Página oficial de descarga de *PSoC Designer*: http://www.cypress.com/?rID=41083.

En la Figura 2.10 se muestra la interfaz del *Chip Editor*. Allí se muestran los recursos del dispositivo utilizado para el desarrollo del proyecto (*Workspace*), las características de configuración del dispositivo, el acceso y control sobre las funciones del sistema y los dispositivos.

Figura 2.10. Interfaz del Editor a Nivel de Chip del PSoC Designer



De manera general, el proceso que se debe seguir para crear un proyecto usando dispositivo PSoC es el siguiente[13] [17]:

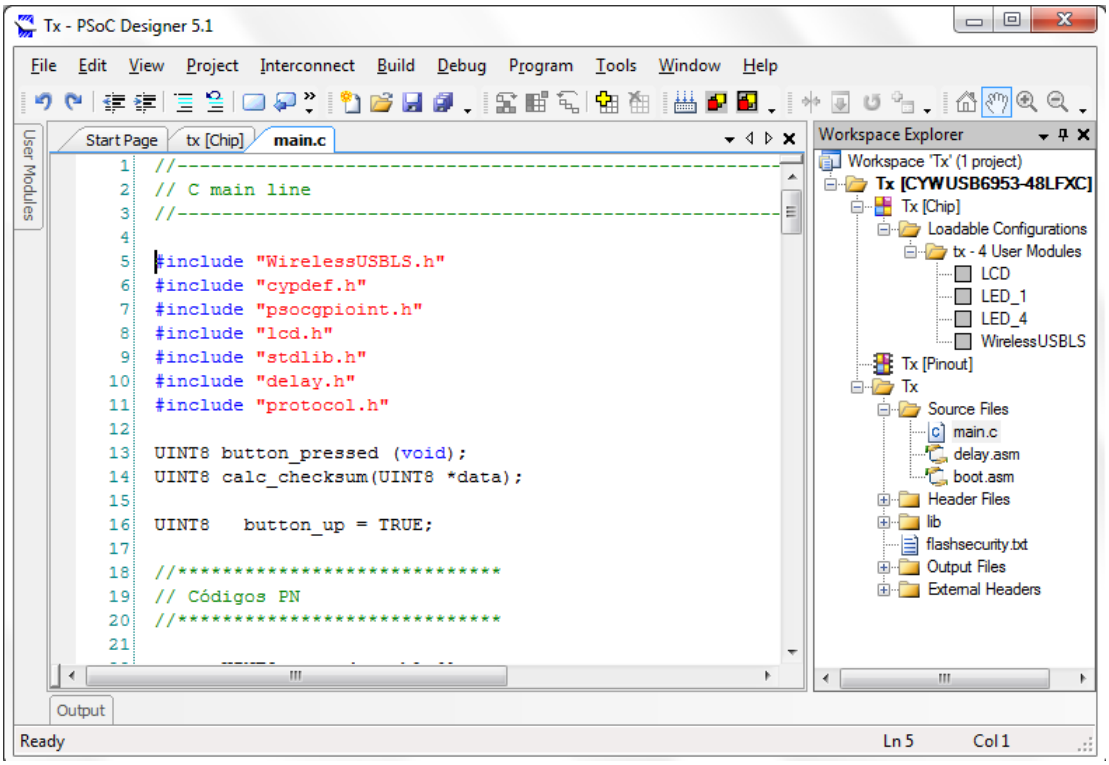
a) Se selecciona el dispositivo de base para trabajar.
b) Se seleccionan los módulos del catálogo para configurar el dispositivo PSoC con las funcionalidades requeridas en el proyecto.
c) Se configuran e interconectan los módulos analógicos y digitales de acuerdo a las necesidades del proyecto.
d) Se genera el proyecto. Se adiciona al proyecto la Interfaz de Programación de Aplicaciones (API, *Application Programming Interface*) necesarias y las librerías que se utilizarán en el programa de la aplicación.
e) Se desarrolla un programa en lenguaje C para su rápida ejecución, o en lenguaje Ensamblador para obtener mayores niveles de desempeño del código.

El *Code Editor* es un editor de texto con muchas de las características necesarias para la edición de un proyecto en lenguaje C y en ensamblador. Se puede utilizar este editor para

[13] En el Anexo A se detalla el proceso para la creación de un proyecto con la herramienta *PSoC Designer*.

crear y editar los archivos de cualquier aplicación. El diseño de la ventana por defecto contiene el *Code Editor* y una ventana para la búsqueda de resultados. También hay otras ventanas disponibles en el menú, que muestran detalles de los diferentes aspectos del PSoC, como se aprecia en la Figura 2.11.

Figura 2.11. Interfaz del Editor de Código del PSoC Designer



El software *PSoC Designer* no requiere ningún tipo de licencia, únicamente se debe cumplir con especificaciones y recomendaciones técnicas de la Tabla 2.2 en el equipo donde se va a instalar.

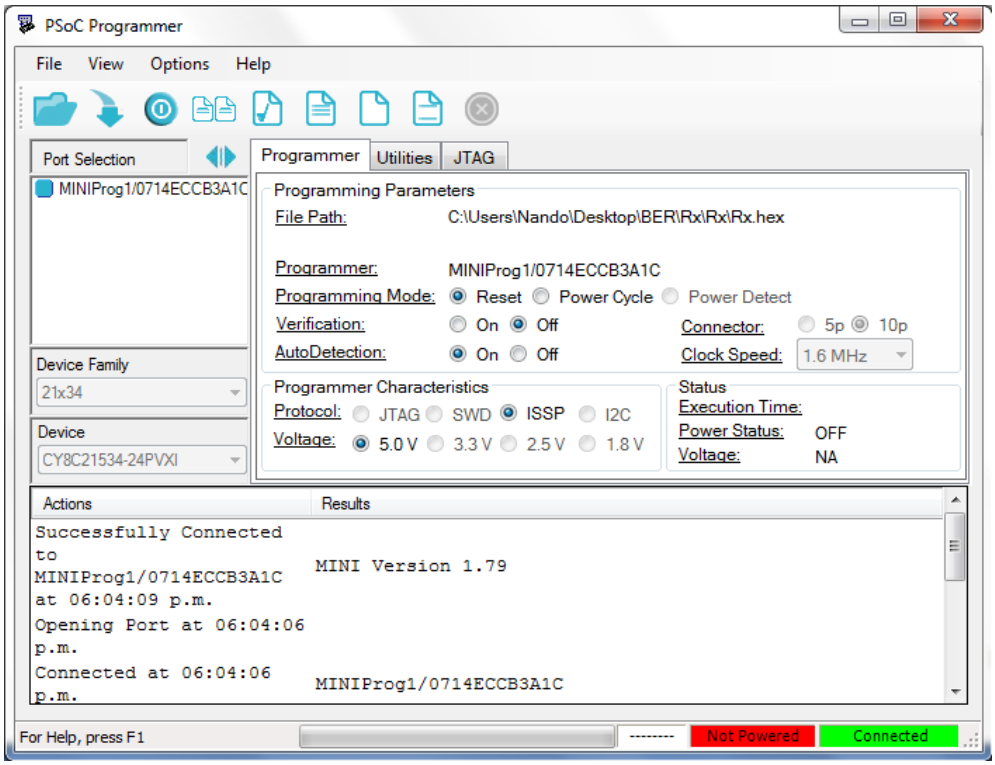
Tabla 2.2. Requisitos Mínimos de Instalación

Requerimientos del Sistema	Mínimo	Recomendado
Velocidad del Procesador	2 GHz	2 GHz (Doble Núcleo)
MB de RAM	2 GB	3 GB
Espacio Libre en el Disco	1 GB	1 GB
Resolución de Pantalla	1024 x 768	1280 x 1024
Unidad de CD-ROM	No necesariamente	✓
Puerto USB	✓	Preferiblemente USB 2.0
Windows XP, Vista o 7	✓	✓
Microsoft Internet Explorer	7.0	Superior a 7.0
.NET Framework	2.0 SP1	Superior a SP1
Adobe Reader	6	Superior a 9
Programador PSoC	3.13	

2.3.2 PSoC Programmer

El Programador PSoC (*PSoC Programmer*, en inglés) es una herramienta software que ofrece al usuario una sencilla interfaz gráfica que facilita la programación del microcontrolador mediante el MiniProg PSoC. El Programador PSoC también incluye el Puente del Panel de Control (*Bridge Control Panel*), el cual puede ser utilizado para depurar, graficar y registrar las comunicaciones vía puerto serial usando software de *Cypress*. Una imagen de la interfaz de esta herramienta se muestra en la Figura 2.12.

Figura 2.12. Interfaz del PSoC Programmer



3. DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN

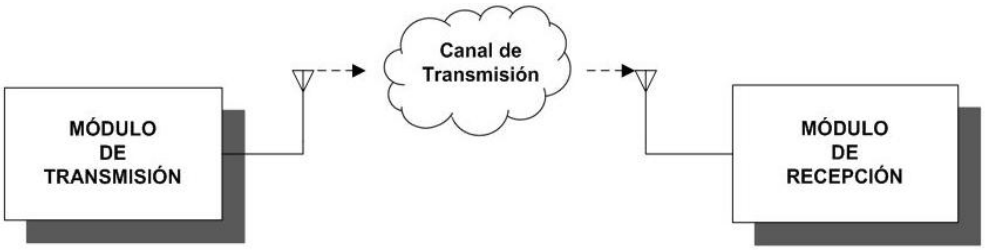
El kit de desarrollo descrito en el capitulo anterior, ha sido seleccionado de tal forma que se constituye en el componente principal para satisfacer uno de los objetivos de este trabajo de grado, el cual corresponde a la implementación de un prototipo de comunicación vía radio de corto alcance en 2.4 GHz haciendo uso de la técnica de transmisión DSSS. A pesar de que los dispositivos PRoC cuentan con un conjunto de bloques analógicos y digitales para utilizar en una gran variedad de aplicaciones, el sistema de comunicación hace uso principalmente del transceptor radio que opera en la banda ISM de 2.4 GHz, y algunos otros módulos que facilitan el procesamiento de la información.

Por otra parte, la definición de los requerimientos que debe cumplir el prototipo de comunicación, implica realizar un estudio de las características físicas y operativas de cada uno de los elementos que constituyen el sistema de comunicación, de tal forma que sea posible diseñar y posteriormente ejecutar un plan de pruebas que permita verificar el correcto funcionamiento del sistema prototipo, y además realizar la medición de los parámetros necesarios para examinar el comportamiento del sistema de comunicación en el dominio del tiempo y de la frecuencia, para finalmente evaluar y analizar el desempeño del sistema de comunicación en los diferentes escenarios y en situaciones donde se presente interferencia.

3.1 COMPONENTES DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN

Fundamentalmente un sistema de comunicación inalámbrico se conforma por tres módulos, un Transmisor y un Receptor, los cuales se comunican mediante señales radioeléctricas que viajan a través de un Canal de Transmisión, como se muestra en la Figura 3.1.

Figura 3.1. Diagrama General del Sistema de Comunicación



Los módulos de Transmisión y Recepción se implementan en cada uno de los dispositivos PRoC del kit de desarrollo, aprovechando sus capacidades mediante la programación de los microcontroladores de acuerdo a las necesidades del sistema de comunicación, junto con la configuración adecuada de las características operativas de los módulos radio.

3.1.1 Módulo de Transmisión

Este módulo es el encargado de realizar el proceso de ensanchamiento y modulación de la información, con el fin de transmitirla de manera inalámbrica a través de una banda de

frecuencia con ancho de banda de 1 MHz hasta el otro extremo del sistema de comunicación. Para la implementación de este módulo se cuenta con uno de los dispositivos PRoC que debe estar configurado con la secuencia pseudo-aleatoria que realiza el ensanchamiento de la información y que determina el valor del SF, la frecuencia portadora por la cual se transmite la información y la potencia de transmisión.

La información que se puede transmitir mediante los dispositivos PRoC puede ser:

- La medida de una magnitud física obtenida mediante un sensor externo.
- Un arreglo de bytes de longitud fija o variable almacenado dentro de la memoria del microcontrolador.
- Un archivo o una cadena de caracteres transmitida desde un computador a través del puerto serial.

Para efectos de verificación de errores en el receptor, se ha decidido transmitir un arreglo de bytes de longitud fija almacenado en la memoria del microcontrolador. El receptor debe conocer la información transmitida para determinar el número de bits erróneos que existen en la información que ha sido recibida.

3.1.2 Módulo de Recepción

Este módulo es el encargado de detectar e interpretar la información que ha sido recibida mediante los procesos de desensanchamiento y demodulación. Este módulo se implementa en otro de los dispositivos PRoC con que cuenta el kit de desarrollo, por lo que es necesario configurar la misma secuencia pseudo-aleatoria y la misma frecuencia portadora usada en el módulo de transmisión, con el objetivo de recibir satisfactoriamente la información proveniente desde el otro extremo del sistema. Para la detección de la señal GFSK el módulo PRoC SiP cuenta con un VCO que permite representar los cambios de frecuencia de la señal GFSK por símbolos binarios de marca y espacio. Este proceso de detección es similar al utilizado por los sistemas de Modulación en Frecuencia (FM, *Frequency Modulation*).

Este módulo también cuenta con la capacidad de determinar el número de bits erróneos en cada una de las tramas recibidas, haciendo una comparación bit a bit entre la información original almacenada en la memoria y los datos recibidos. Este resultado se logra mediante la operación XOR entre cada byte recibido y su respectivo byte en la información almacenada en el receptor. Si el resultado de esta operación es diferente de 0, significa que al menos hay un error a nivel de bit. El número total de bits erróneos es el acumulado de los bits fijados en 1 que aparecen en cada operación XOR.

Finalmente, este modulo se encarga de estimar y almacenar la intensidad de la señal recibida en el registro del RSSI. La intensidad con que llega la señal al receptor depende de factores externos a los dos módulos, como son la distancia entre los módulos, los niveles de interferencia en el entorno y las condiciones del escenario de implementación del sistema de comunicación; así mismo, depende también de factores internos tales como la potencia de transmisión, la longitud de la secuencia pseudo-aleatoria y la frecuencia portadora.

3.1.3 Canal de Transmisión

El canal de transmisión corresponde al medio por donde se propagan las ondas electromagnéticas radiadas desde el módulo de transmisión hasta el de recepción. Las características del medio pueden variar de acuerdo al escenario en donde se implemente el sistema de comunicación, ya que dependiendo del entorno las señales transmitidas se pueden ver afectadas por algunos efectos de propagación que reducen el desempeño del sistema y la calidad de la señal recibida. Estos fenómenos son principalmente la reflexión, difracción y dispersión, los cuales generan cambios de amplitud, fase y retardo en cada una de las réplicas o ecos de la señal recibida. Todos estos efectos ocasionan variaciones en la potencia de la señal recibida, junto con las pérdidas de propagación, que corresponden a la disminución de la potencia de la onda electromagnética a lo largo de su recorrido. Estas pérdidas dependen directamente de la distancia de separación entre el transmisor y el receptor, la frecuencia portadora y las características del entorno. Matemáticamente se pueden simplificar las pérdidas básicas de propagación mediante el modelo de la Ecuación 3.1 [18].

$$l_b = kd^n \tag{3.1}$$

Donde:

- *d* [m]: Distancia de separación entre el transmisor y el receptor.
- *k*: Factor que depende del tipo del terreno, la frecuencia de operación del sistema de comunicación y la altura de las antenas.
- *n*: Exponente que depende del medio de propagación y la altura de las antenas.

En unidades logarítmicas se pueden expresar las perdidas básicas de propagación mediante la Ecuación 3.2.

$$L_b[dB] = 10\log(k) + 10n\log(d) = L_0 + 10n\log(d) \tag{3.2}$$

Donde:

- L_0 [dB]: Pérdidas de propagación a una distancia unitaria de referencia.

Este modelo de pérdidas permite completar la ecuación general de balance del enlace, dada por la Ecuación 3.3.

$$P_{Rx}[dBm] = P_{Tx} - L_{Tx} + G_{Tx} - L_b + G_{Rx} - L_{Rx} \tag{3.3}$$

Donde:

- P_{Rx} [dBm]: Potencia de recepción.
- P_{Tx} [dBm]: Potencia de transmisión.
- L_{Tx} [dB]: Pérdidas en el transmisor.
- G_{Tx} [dBi]: Ganancia de la antena de transmisión.
- G_{Rx}: [dBi]: Ganancia de la antena de recepción.
- L_{Rx} [dB] Pérdidas en el receptor.

De acuerdo a las necesidades de este trabajo de grado, el primer escenario dispuesto para la operación del sistema de comunicación consistió en un entorno exterior libre de obstáculos, donde fue posible localizar el transmisor en línea de vista directa con el receptor, sin que ningún elemento externo impidiera la propagación directa de las señales. Para satisfacer esta condición se escogió un sector despejado del Centro Deportivo Universitario (CDU) de la Universidad del Cauca. El segundo escenario se encuentra al interior de una edificación de forma que las señales radiadas viajen a lo largo de uno de los pasillos, donde fue posible analizar el efecto de multitrayecto, ya que la energía de la señal se encuentra confinada a lo largo del corredor. Para ello se seleccionó el pasillo del tercer piso del edificio de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET) de la Universidad del Cauca.

Por último, para evaluar y analizar el desempeño del sistema de comunicación vía radio de corto alcance en escenarios en donde estén presentes señales interferentes, fue necesario contar con elementos externos que emitieran señales en la misma banda de frecuencias para lograr diferentes niveles de interferencia sobre las señales deseadas. Por esta razón fueron seleccionados como dispositivos interferentes un enrutador (*router)* inalámbrico comunicándose constantemente con un computador portátil y un kit de desarrollo de características similares, debido a que todos ellos se comunican de manera inalámbrica en 2.4 GHz.

3.2 ESQUEMA DE MODULACIÓN

Para realizar la transmisión de los datos vía radio es necesario adaptar la información al canal de comunicación mediante un esquema de modulación digital, de forma que se garantice la correcta detección de la información en el otro extremo del sistema. Los esquemas de modulación permiten modificar los parámetros más importantes de una señal analógica de radiofrecuencia denominada portadora, de acuerdo a las características de una señal moduladora, que en este caso se trata de la señal digital de información. Por otra parte, se debe garantizar que ninguno de los procesos de modulación modifique la integridad de la información.

Los dispositivos PRoC seleccionados para la implementación del sistema de comunicación hacen uso del esquema de modulación GFSK, el cual es un tipo de esquema de Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (FSK, *Frequency Shift Keying*). La señal FSK en el dominio del tiempo se puede describir matemáticamente mediante la Ecuación 3.4.

$$x(t) = Asen(2\pi(f_c \pm \Delta f)t) \tag{3.4}$$

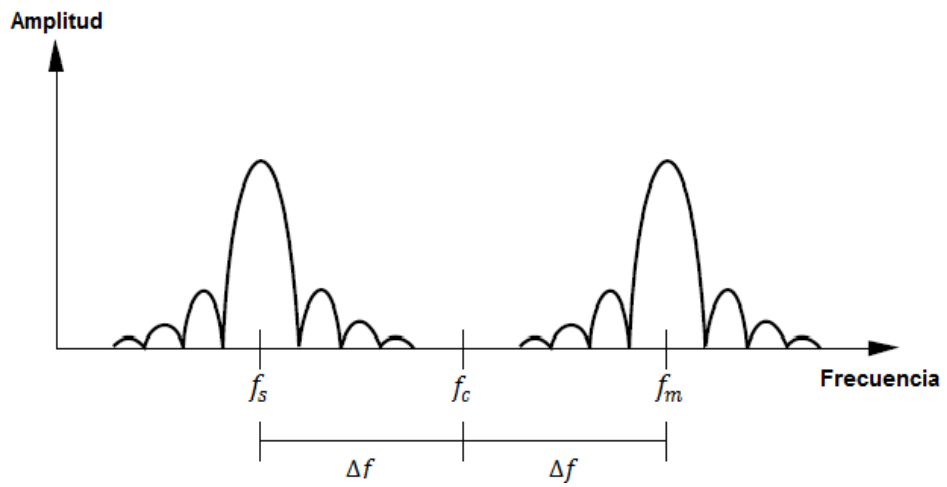
Donde:

- A [V]: Amplitud de la señal FSK.
- f_c [Hz]: Frecuencia de portadora.
- Δf [Hz]: Separación entre la frecuencia central y la frecuencia de marca o de espacio, denominada desviación en frecuencia.[14]
- t [s]: Tiempo.

[14] El signo de este parámetro depende del dígito binario a transmitir.

En el dominio de la frecuencia, una señal FSK se representa mediante la Figura 3.2, en donde se muestran las componentes de la señal en las frecuencias de marca y espacio, y la separación entre ellas.

Figura 3.2. Espectro de la Señal FSK [19]



El ancho de banda teórico de la señal FSK se mide entre los nulos de los lóbulos principales, y corresponde al valor representado en la Ecuación 3.5:

$$B[Hz] = \left(f_m + \frac{1}{T_c}\right) - \left(f_s - \frac{1}{T_c}\right) = f_m - f_s + \frac{2}{T_c} \tag{3.5}$$

De la Figura 3.2 se aprecia que la diferencia entre f_m y f_s corresponde a $2\Delta f$. Por lo tanto, el ancho de banda de la señal FSK se representa mediante la Regla de Carlson modificada, tal como se muestra en la Ecuación 3.6.

$$B[Hz] = 2\left(\Delta f + \frac{1}{T_c}\right) = 2(\Delta f + R_c) \tag{3.6}$$

Un modulador GFSK consiste en una versión modificada de un modulador FSK, al cual se le adiciona a la entrada un filtro gaussiano que se encarga de disminuir el ancho entre los lóbulos laterales del espectro en frecuencia [20], permitiendo una transición suave entre las frecuencias de marca (f_m) y de espacio (f_s), que corresponden a los valores binarios 1 y 0, respectivamente. El filtro gaussiano permite limitar el ancho de banda de la señal que se desea transmitir conformada por los *chips*, disminuyendo la potencia de las componentes menos significativas del espectro de la señal. Esta técnica se conoce como conformación de pulsos (del inglés *pulse shaping*), y permite cambiar la forma de las señales de pulsos transmitidos, limitando el ancho de banda de la señal FSK.

El filtro gaussiano del modulador GFSK posee un ancho de banda igual a *1/2*T_c, lo que significa que el parámetro BT_c del filtro es igual a 0.5[15]. Esto indica que se ha disminuido en la mitad en ancho entre los nulos de los lóbulos principales de la señal FSK original de la Figura 3.2. Por lo tanto, el ancho de banda teórico de la señal GFSK, se representa mediante la Ecuación 3.7.

$$B[Hz] = 2\Delta f + R_c \tag{3.7}$$

3.3 PROTOCOLO DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN

Para realizar la transmisión de la información se requiere agrupar un determinado número de bytes en diferentes tramas, de forma que se garantice la recepción de la información de forma íntegra. Las tramas incluyen información de sincronización y detección de errores, lo que permite detectar la forma en la que están llegando los bytes al receptor, y además estimar el número de bits y tramas que llegan de forma incorrecta. La adición de información redundante a la carga útil garantiza una mayor robustez del sistema.

Los dispositivos PRoC utilizan el protocolo *WirelessUSB* propietario de *Cypress Semiconductor Corp,* el cual se caracteriza principalmente por contar con mecanismos de retransmisión de tramas, verificación de tramas recibidas y selección automática de canal, que para el caso de esta aplicación no es un requisito indispensable. Por esta razón, fue necesario definir un nuevo protocolo diferente a *WirelessUSB*, que facilite el envío y la recepción de la información de acuerdo a las exigencias del sistema de comunicación, donde principalmente se requiere que la información transmitida por el canal radio viaje en forma de tramas que puedan ser procesadas adecuadamente en el receptor, para determinar la integridad de la información recibida. Por esta razón, el protocolo de comunicación establecido tiene como objetivo facilitar la detección de errores en las tramas recibidas, de tal forma que sea posible realizar la evaluación y el análisis del desempeño del sistema. El protocolo se basa en tramas de información conformadas por seis campos con diferente longitud, tal como se muestra en la Figura 3.3.

Figura 3.3. Tramas Implementadas en los Dispositivos PRoC

La duración de cada uno de estos campos puede variar de acuerdo al número de *chips* que se tiene por cada bit de información. La Ecuación 3.8 expresa la duración de una trama en función del SF.

$$Duración\ de\ Trama\ [s] = 264\ Bits * T_b = 264\ Bits * SF * T_c \tag{3.8}$$

[15] El valor del parámetro BT_c se obtuvo con la colaboración del personal de soporte de *Cypress Semiconductor Corp*.

3.3.1 Preámbulo

El preámbulo de la trama se compone de un conjunto de 24 bits (3 bytes), que contienen una secuencia de unos y ceros alternados. Esta secuencia le permite al receptor identificar el inicio de cada una de las tramas. En la práctica no importa que algunos de los bits del preámbulo se pierdan, ya que su propósito únicamente es identificar el inicio de las tramas.

3.3.2 Sincronización

El campo de sincronización es un complemento al preámbulo de la trama, y consta de una secuencia de 8 bits (1 byte). Como su nombre lo indica, este campo permite realizar la sincronización de los bits recibidos, de tal manera que al detectar este campo, el receptor interpreta los demás bits de la trama como la carga útil. Se debe tener en cuenta que la palabra almacenada en este campo no debe aparecer en otra parte de la trama, para disminuir la probabilidad de error.

3.3.3 Longitud de Datos

El campo de Longitud de los datos indica la longitud de la carga útil, es decir la cantidad de bits que han sido enviados desde el transmisor dentro de cada trama. Este campo tiene un tamaño de 8 bits suficientes para ofrecer una longitud máxima de hasta 256 bits de información en el campo de datos.

3.3.4 Datos

En el campo de datos se almacenan los bits que contienen la información (carga útil) que ha sido enviada por el transmisor. Se ha definido un tamaño de 200 bits de datos por cada trama, de forma que es posible enviar 25 bytes de información útil.

3.3.5 Suma de Verificación

El campo de Suma de Verificación (*Checksum)* se compone de una secuencia de 8 bits (1 byte). La función de este campo es detectar la presencia de errores dentro de la trama. El valor de este campo corresponde a la operación XOR de los bytes que conforman el campo de datos de la trama. Para detectar la presencia de errores, el receptor calcula el valor de la suma de verificación a partir de los datos recibidos, y compara el valor calculado con el del campo *Checksum*. Si los valores son iguales, significa que la trama ha sido recibida sin ningún error.

3.3.6 Fin de Trama

Este campo indica el final de cada trama de información. Corresponde a una secuencia de 8 bits con valor igual a 1. Cuando el receptor detecta la presencia de una secuencia de múltiples bits en 1, interpreta que la trama ha llegado a su fin.

4. PLAN DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN

Una vez descritos todos los elementos del sistema de comunicación y los escenarios para la implementación y evaluación del sistema de comunicación, fue necesario establecer un plan de pruebas que permitió verificar el correcto funcionamiento del sistema, de forma que se logró analizar y evaluar el desempeño a partir de los resultados obtenidos. Por medio de las combinaciones de los parámetros más importantes del sistema y de las características del entorno se obtuvieron los resultados que se muestran en esta Seccion.

La operación del sistema de comunicación se realizó en los dos escenarios de prueba descritos en el Capitulo 3. En el primer escenario de prueba (campo abierto) se operó en condiciones de línea de vista directa entre los módulos de transmisión y recepción. Los factores externos modificados en este escenario fueron: la distancia de separación entre los dos módulos y la velocidad de transmisión de los módulos. Para el segundo escenario de prueba (interior), los módulos fueron ubicados a lo largo de uno de los pasillos de la FIET, de manera que fue posible realizar las mediciones a partir de las variaciones de los parámetros, tal y como se realizó en el primer escenario de prueba, agregando la condición de interferencia del entorno para la evaluación del desempeño ante estas condiciones.

Es necesario tener en cuenta que las condiciones de la FIET son diferentes de acuerdo al momento en que se ejecute el plan de pruebas, pues es posible que haya momentos en los cuales los pasillos se encuentren con mayor tránsito de personas. Por esta razón se realizaron las mediciones de los parámetros a lo largo del pasillo despejado.

Para los dos escenarios, las mediciones se efectuaron modificando la distancia de separación en múltiplos de 1 m, para analizar el comportamiento de la señal en una escala prudente. En cada uno de estos puntos las mediciones se realizaron en repetidas ocasiones (alrededor de 20 o más) para obtener un valor válido estadísticamente, el cual corresponde al valor que se repite con mayor frecuencia.

4.1 MEDIDA DE LA PRECISIÓN Y LA ESTABILIDAD DE LA FRECUENCIA PORTADORA

En un sistema de comunicación inalámbrica es de gran importancia la precisión de la frecuencia portadora en ambos extremos, por lo que tanto el transmisor como el receptor deben estar sintonizados en la misma frecuencia. Se debe garantizar la estabilidad en la frecuencia para evitar el corrimiento de la portadora, ya sea por envejecimiento o deterioro de los componentes electrónicos. Debido a que los dispositivos PRoC cuentan con un oscilador de cuarzo TXCO, fue necesario analizar su comportamiento sometiendo el dispositivo a cambios de temperatura para determinar la precisión y estabilidad en la frecuencia de oscilación de los módulos, que finalmente corresponde a la estabilidad de la portadora de radiofrecuencia.

En la Figura 4.1 se presenta un diagrama acerca de la ubicación del transmisor PRoC y del Analizador de Redes Vectoriales ZLV del fabricante Rohde & Schwarz® con que cuenta el departamento de Telecomunicaciones de la FIET, para realizar las mediciones de precisión y estabilidad de frecuencia.

Figura 4.1. Ubicación del Transmisor PRoC y el Analizador de Redes ZLV

Los parámetros configurados en los dispositivos PRoC para la ejecución de las medidas de precisión y estabilidad en frecuencia se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Parámetros de los Dispositivos PRoC para las Medidas de Precisión y Estabilidad en Frecuencia

Parámetro	Valor
Frecuencia de Operación	2.402 GHz
Potencia de Transmisión	0 dBm
Esquema de Modulación	GFSK
Factor de Ensanchamiento	64
Velocidad de Transmisión de Datos	16 kbps
Estabilidad en Frecuencia	±30 PPM

La precisión en la frecuencia portadora de los módulos PRoC se especifica en PPM mediante la Ecuación 4.1 [21].

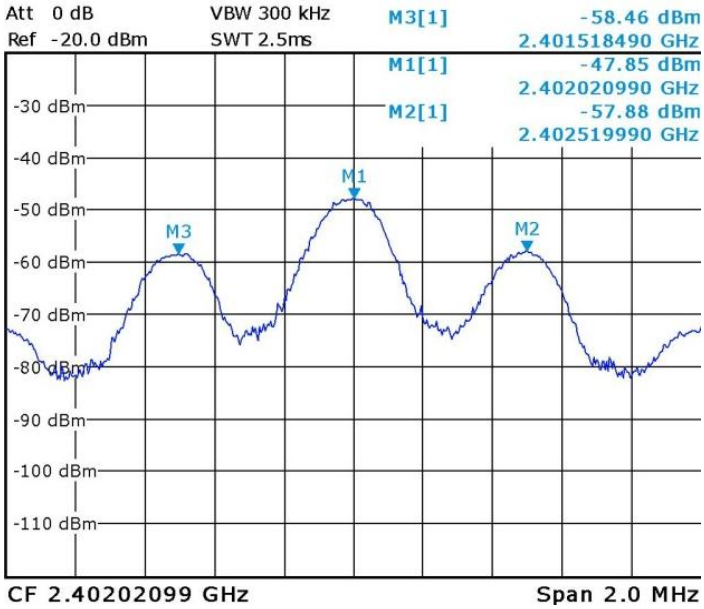
$$Precisión\ [PPM] = \frac{|Frecuencia\ Teórica - Frecuencia\ Medida|}{Frecuencia\ Teórica} * 10^6 \qquad (4.1)$$

Para el montaje de la Figura 4.1 fue necesario tener en cuenta que ambos dispositivos estuvieran ubicados a una distancia prudente (2 m), para que con la ayuda de una antena omnidireccional conectada al Analizador de Redes Vectoriales, se obtuviesen niveles de potencia adecuados con el fin de observar el espectro de la frecuencia portadora de manera clara, tal como se muestra en Figura 4.2.

Según el marcador *M1* de la Figura 4.2, la frecuencia portadora está localizada en 2.402020990 GHz. Es decir que la portadora presentó un corrimiento igual a:

$$Corrimiento\ [kHz] = |2.402\ GHz - 2.402020990\ GHz| = 20.99$$

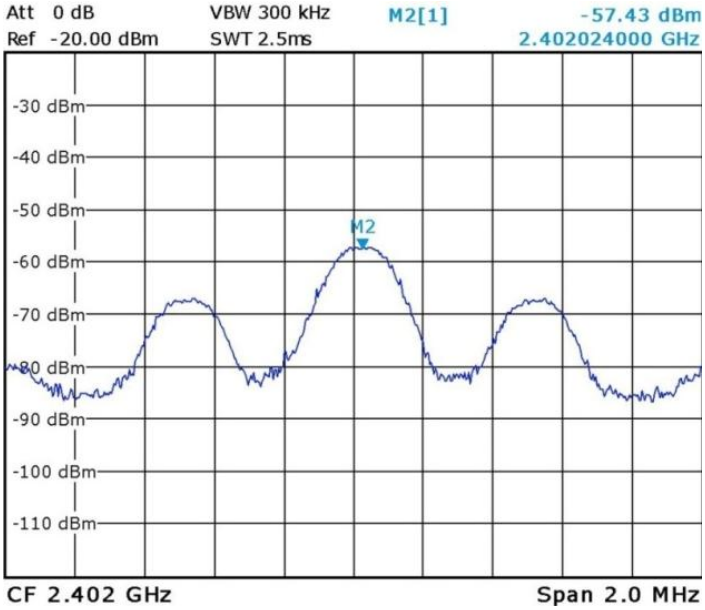
Figura 4.2. Espectro de la Frecuencia Portadora a Temperatura Ambiente



Al reemplazar los valores de frecuencia en la Ecuación 4.1, la precisión en la medida de la frecuencia portadora a temperatura ambiente corresponde a:

$$Precisión\ [PPM] = \frac{|2.402\ GHz - 2.402020990\ GHz|}{2.402\ GHz} * 10^6 = 8.738$$

Figura 4.3. Espectro de la Frecuencia Portadora ante Incremento de Temperatura



Según las especificaciones técnicas de los dispositivos PRoC, el oscilador presenta un margen de estabilidad en frecuencia de hasta ±30 PPM, que para aplicaciones de radiofrecuencia en 2.402 GHz corresponden a ±72 kHz.

A pesar de que existe un corrimiento de la frecuencia portadora en las dos situaciones anteriores, estos dos valores se encuentran dentro del margen permitido por el fabricante. El leve corrimiento de la frecuencia portadora en ambos casos ocurrió debido a que la frecuencia del cristal siempre presenta variaciones ante cambios de temperatura, a pesar de la acción correctiva del TCXO, la cual garantiza la precisión y estabilidad en frecuencia del dispositivo PRoC, aún estando presente en entornos con altas y bajas temperaturas.

4.2 MEDIDA DEL ANCHO DE BANDA DE LA SEÑAL DE RADIOFRECUENCIA

Las señales transmitidas por los dispositivos PRoC se caracterizan porque ocupan un ancho de banda útil aproximado a 1 MHz [13]. Este ancho de banda debe contener la mayor parte de la potencia de la señal transmitida. Es claro que una señal de espectro ensanchado ocupa un ancho de banda superior que la señal de información original, por esta razón el propósito de esta prueba es analizar el comportamiento espectral de las señales transmitidas y estimar mediante el Analizador de Redes ZLV el ancho de banda de la señal de espectro ensanchado. Los dispositivos PRoC fueron configurados con los mismos parámetros que en las pruebas de la sección anterior, y la ubicación del transmisor y el Analizador de Redes se muestra en la Figura 4.1.

Para encontrar los valores correspondientes a la precisión de las medidas realizadas con el Analizador de Redes ZLV en porcentaje de error, se dispone de la Ecuación 4.2 [22].

$$Error = \frac{|Valor\ Teórico - Valor\ Experimental|}{Valor\ Teórico} * 100\% \tag{4.2}$$

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, previamente al proceso de transmisión de las señales ensanchadas realizó un proceso de modulación GFSK, que convierte la señal de espectro ensanchado de banda base a radiofrecuencia. Las componentes espectrales que representan los símbolos de marca (*M2*) y espacio (*M1*) se muestran en el espectro de la Figura 4.4. Para obtener este espectro en frecuencia se realizó el ensanchamiento de la información con todos los 64 *chips* de la secuencia pseudo-aleatoria fijados en 1, lo que permitió obtener una señal de radiofrecuencia de baja velocidad de transmisión en la cual fue posible visualizar claramente las dos componentes del espectro.

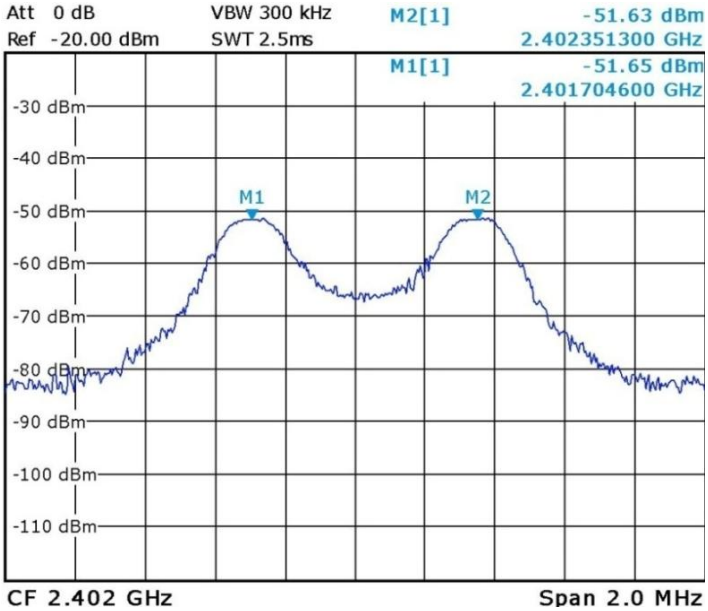
Con relación a la Figura 4.4, la diferencia entre las frecuencias de marca y espacio representa el doble del valor de la desviación en frecuencia (*2Δf*), y tiene un valor igual a:

$$2\Delta f\ [kHz] = M2 - M1 = 2.402351300\ GHz - 2.401704600\ GHz\ =\ 646.7$$

Según las especificaciones del fabricante [13], el valor teórico de la desviación en frecuencia corresponde a:

$$2\Delta f\ [kHz] = 640$$

Figura 4.4. Espectro en Frecuencia de la Señal GFSK de Baja Velocidad



Al reemplazar los valores teórico y experimental de *2Δf* en la Ecuación 4.2, es posible determinar el porcentaje de error en la medida de la desviación en frecuencia, como aparece en la siguiente expresión:

$$Error = \frac{|640\ kHz - \ 646.7kHz\ |}{640\ kHz} * 100\% = 1.05\%$$

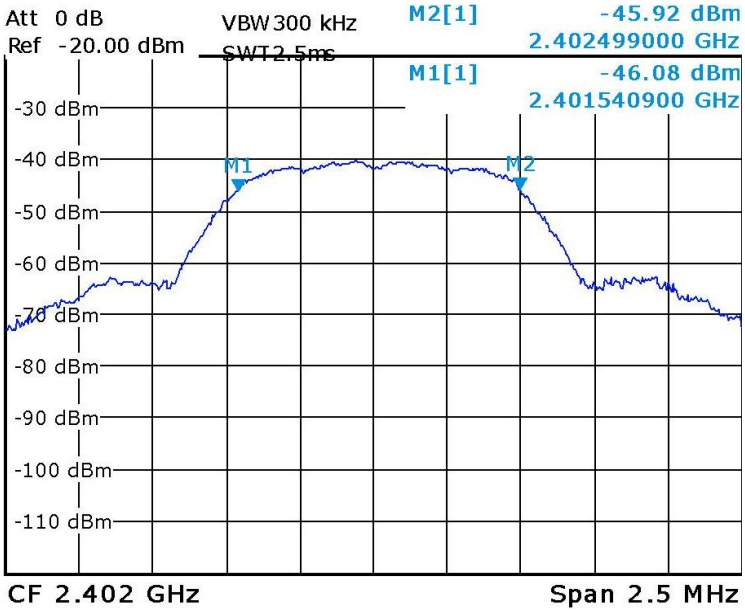
El ancho de banda de la señal transmitida se mide en el espectro de la señal de espectro ensanchado a nivel de radiofrecuencia, realizando el ensanchamiento con una de las secuencias pseudo-aleatorias disponibles de los dispositivos PRoC, de forma que se obtenga una señal cuya densidad espectral de potencia esté distribuida sobre un rango mayor de frecuencias. El ancho de banda útil corresponde a la separación en frecuencia entre los puntos en donde la densidad espectral de potencia se encuentra 6 dB por debajo del nivel de la frecuencia portadora[16]. Por otra parte, el ancho de banda práctico de la señal GFSK se mide entre los puntos en donde la densidad espectral de potencia ha caído 20 dB por debajo del nivel máximo[17], que gráficamente corresponde a los primeros nulos del espectro, como se demostró mediante la Ecuación 3.7.

Calculando la diferencia entre los puntos en donde la potencia de la señal ha caído 6 dB por debajo del nivel de la frecuencia portadora, representados en el espectro de la Figura 4.5 mediante los marcadores *M1* y *M2*, se obtiene el ancho de banda útil de 6 dB:

$$BW\ [kHz] = M2 - M1 = 2.402499000\ GHz - 2.401540900\ GHz\ =\ 958.11$$

[16] Ancho de banda ocupado según las especificaciones del radio transceptor CYWUSB6953 [13].
[17] Al considerar las componentes espectrales hasta los 20 dB por debajo del valor máximo se están despreciando las componentes de magnitud cien veces menor [23].

Figura 4.5. Ancho de Banda Útil de 6 dB



Según las especificaciones de los dispositivos PRoC [13], el ancho de banda útil de 6 dB corresponde a 860 kHz. Por lo tanto, al reemplazar los valores teórico y experimental del ancho de banda de 6 dB en la Ecuación 4.2, es posible obtener el porcentaje de error en la medida, tal como se muestra a continuación:

$$Error = \frac{|860\ kHz - \ 958.11\ kHz\ |}{860\ kHz} * 100\% = 11.41\%$$

Por otra parte, los marcadores *M1* y *M2* que se encuentran sobre el espectro de la Figura 4.6 indican la ubicación de los primeros nulos de la señal GFSK. Calculando la diferencia entre ellos, el ancho de banda práctico de 20 dB de la señal GFSK es igual a:

$$B\ [kHz] = M2 - M1 = 2.402733500\ GHz - 2.401301400\ GHz\ = \ 1432.1$$

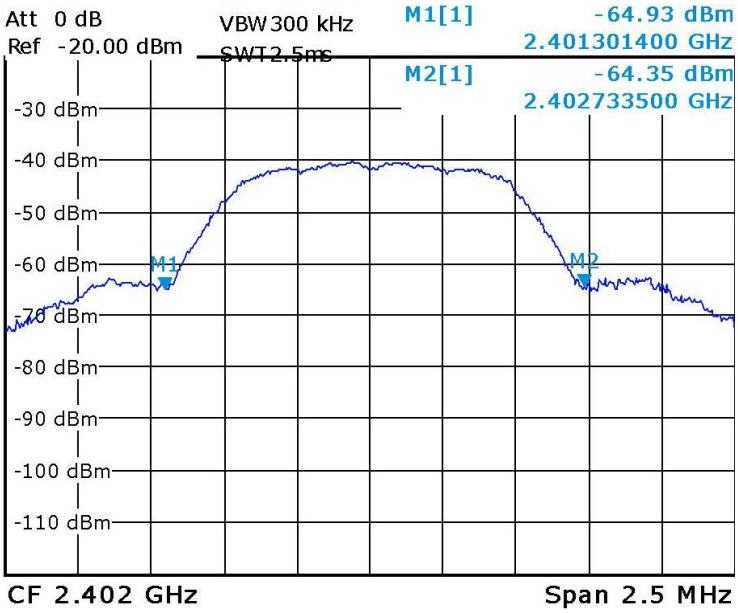
A partir de la Ecuación 3.7, es posible determinar el ancho de banda teórico de la señal GFSK producida por los dispositivos PRoC, como se muestra a continuación.

$$B[kHz] = 640\ kHz + 1024\ kcps = 1664$$

Al reemplazar los valores teórico y experimental del ancho de banda práctico de 20 dB de la señal GFSK en la Ecuación 4.2, es posible obtener el porcentaje de error en la medida, tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$Error = \frac{|1.664\ MHz - 1.4321 MHz\ |}{1.664\ MHz} * 100\% = 13.94\%$$

Figura 4.6. Ancho de Banda Práctico de 20 dB



4.3 MEDIDA DE LA POTENCIA DE RECEPCIÓN

A medida que las señales de radiofrecuencia se propagan desde el transmisor hasta el receptor, la energía de las señales transmitidas disminuye por los fenómenos presentes en el canal de comunicación[18], ocasionando la atenuación y degradación de las señales. Dependiendo del escenario de propagación, la potencia de recepción puede variar considerablemente. El parámetro usado para estimar la potencia de recepción es RSSI, lo que implica que los valores obtenidos representan la intensidad de la señal recibida. Los parámetros configurados en los dispositivos PRoC para la ejecución de las medidas de potencia de recepción en los dos escenarios se muestra en la Tabla 4.2[19].

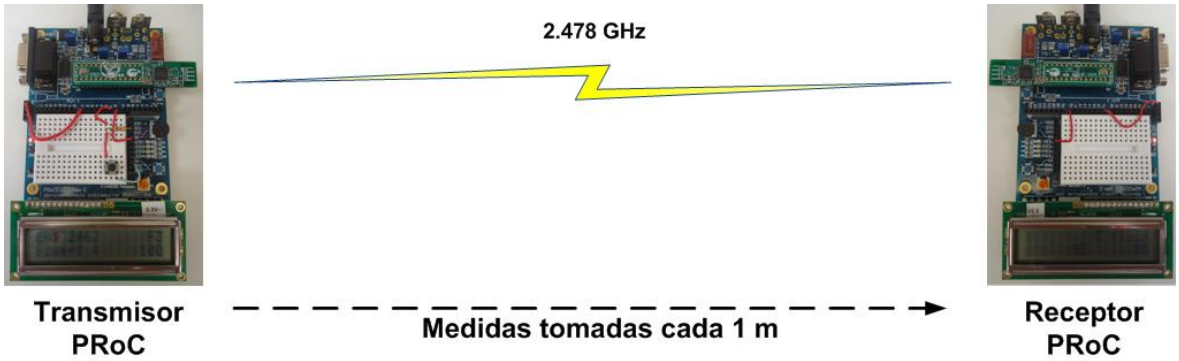
Tabla 4.2. Parámetros de los Dispositivos PRoC para las Medidas de Potencia de Recepción

Parámetro	Valor
Frecuencia de Operación	2.478 GHz
Potencia de Transmisión	-9.7 dBm
Ganancia de las Antenas	0 dBi
Orientación	Vertical[20]

[18] Dentro de estos fenómenos son de gran interés la reflexión, difracción, dispersión y absorción, ya que generan variaciones en el desempeño de los sistemas de comunicación a nivel físico.
[19] La velocidad de transmisión de datos es un parámetro irrelevante en las medidas de potencia de recepción, pues estos corresponden a la potencia de la señal portadora.
[20] Se escogió la orientación vertical de las antenas de los módulos PRoC de acuerdo a las recomendaciones de *Cypress Semiconductor* [15].

La escala de medición de la potencia de recepción se especifica para cada uno de los escenarios, teniendo en cuenta que en los dos escenarios los dispositivos deben estar ubicados como se muestra en la Figura 4.7.

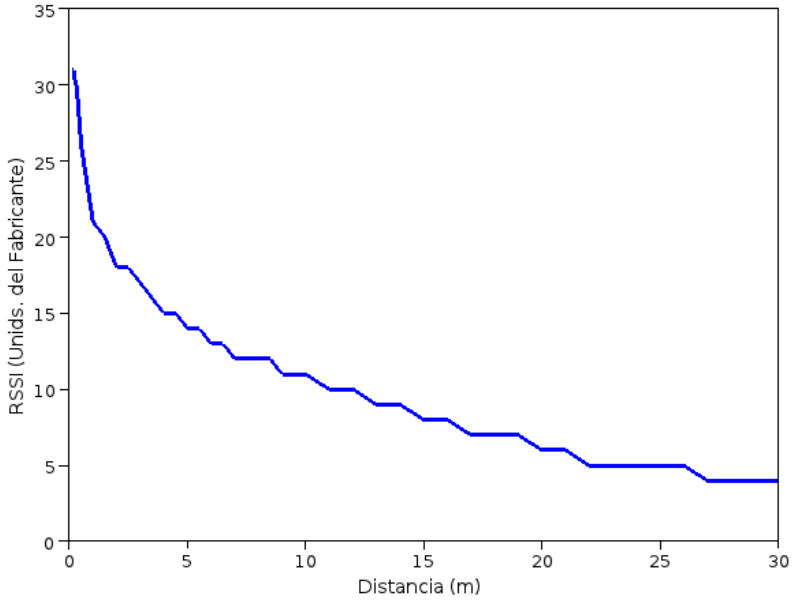
Figura 4.7. Ubicación de los Dispositivos PRoC en el Escenario Exterior



4.3.1 Medida de la Potencia de Recepción en el Escenario Exterior

Las medidas de potencia de recepción en el escenario exterior fueron tomadas primero cada 0.5 m hasta los 10 m y luego cada 1 m, hasta lograr el alcance máximo, que corresponde a la ubicación en donde el nivel de potencia medido es comparable al nivel de potencia de ruido. En este escenario se alcanzó una distancia máxima de 30 m.

Figura 4.8. RSSI de las Senales Recibidas en el Escenario Exterior

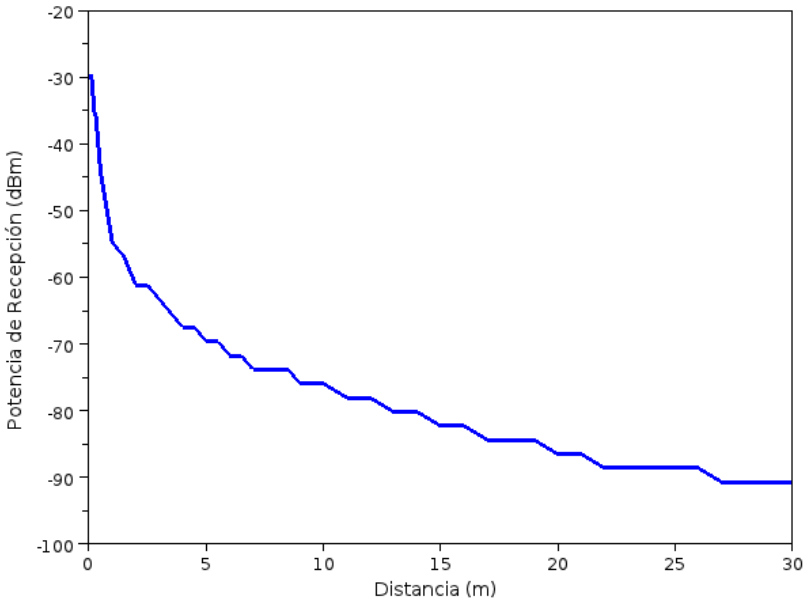


La Tabla B.2 del Anexo B contiene las medidas obtenidas de RSSI en el escenario exterior, usadas para realizar la representación grafica del comportamiento de RSSI en unidades del fabricante, en función de la distancia, la cual se muestra en la Figura 4.8, en donde se observa que los valores de RSSI tienden a disminuir exponencialmente con la

distancia. Esta situación corresponde al modelo de pérdidas de propagación representado por la Ecuación 3.2. Por lo tanto fue posible asumir una relación lineal entre la potencia recibida en términos de RSSI y la potencia de recepción en dBm. Para ello fue preciso realizar una interpolación lineal a partir de los valores de RSSI dados en la hoja de especificaciones del transceptor radio [13]. La conversión de los valores de potencia de recepción se especifica en el Anexo B. Cabe aclarar que todos los niveles de energía posibles no pudieron ser representados por un valor entero de RSSI [24].

De acuerdo a los valores de la Tabla B.1 del Anexo B que asocian RSSI en unidades del fabricante con potencia de recepción en dBm, se representó gráficamente la potencia de recepción en función de la distancia mediante la Figura 4.9.

Figura 4.9. Potencia de Recepción en el Escenario Exterior



Como se mencionó anteriormente, estas medidas se realizaron con una potencia de transmisión de -9.7 dBm. Despejando L_b de la Ecuación 3.3, se tiene que la Ecuación 4.3 representa las pérdidas de propagación del sistema.

$$L_b[dB] = P_{Tx} - P_{Rx} - L_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - L_{Rx} \tag{4.3}$$

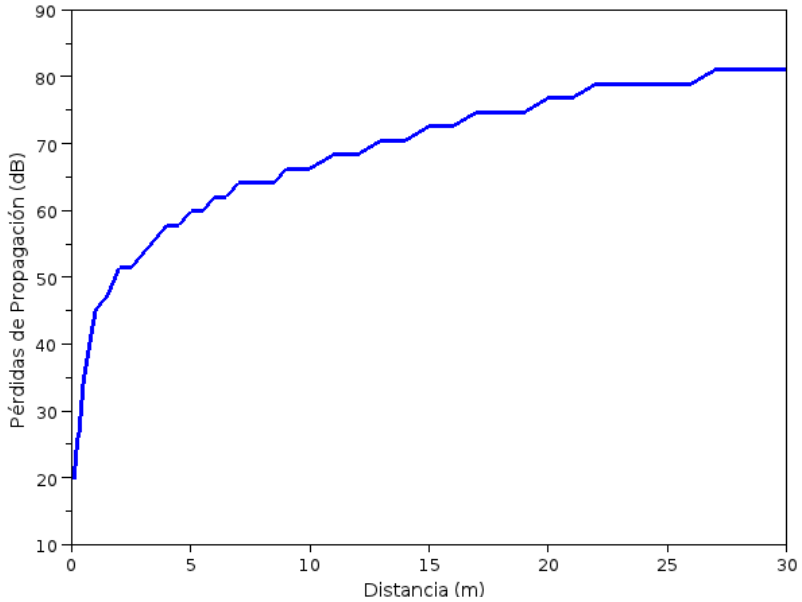
Dado que la antena de los dispositivos PRoC se encuentra incorporada en la placa de circuito impreso, no hay pérdidas por conectores tanto en el transmisor como en el receptor. Por lo tanto, al reemplazar los valores de potencia de transmisión y ganancia de las antenas en la Ecuación 4.3 es posible representar las pérdidas de propagación en función de la potencia de recepción mediante la Ecuación 4.4.

$$L_b[dB] = -9.7\ dBm - P_{Rx}[dBm] \tag{4.4}$$

Reemplazando cada uno de los valores de la potencia de recepción en la Ecuación 4.4 se obtuvieron las pérdidas de propagación en función de la distancia en el escenario exterior, las cuales se muestran en la Figura 4.10.

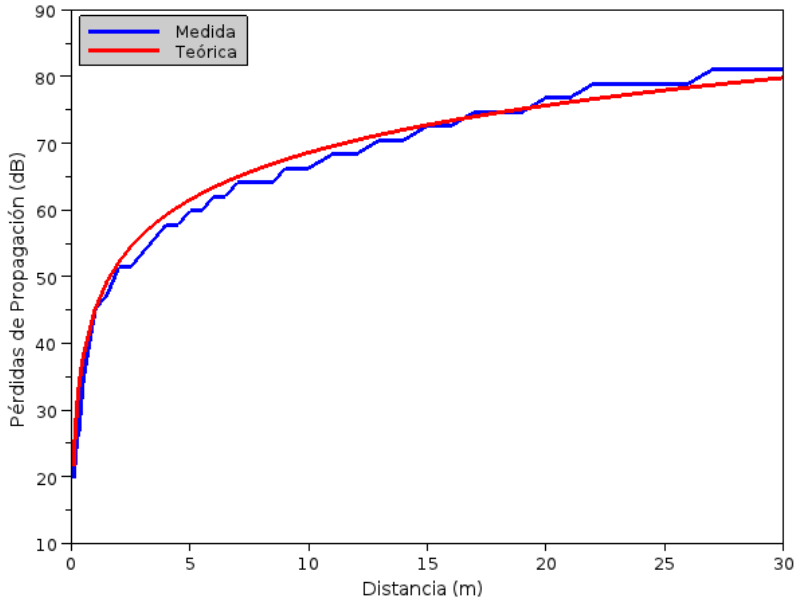
Los valores medidos de RSSI, sus correspondientes valores de potencia de recepción en dBm y pérdidas de propagación para cada uno de los puntos de medición en el escenario exterior se encuentran en la Tabla B.2 del Anexo B.

Figura 4.10. Pérdidas de Propagación en el Escenario Exterior



Para representar las pérdidas de propagación mediante un modelo basado en la Ecuación 3.2 es necesario encontrar valores de L_0 y n que se ajusten de manera aproximada al comportamiento de las pérdidas de propagación encontradas experimentalmente.

Figura 4.11. Pérdidas de Propagación Teóricas y Medidas



El término L_0 de la Ecuación 3.2 corresponde al valor de las pérdidas básicas de propagación en la distancia de referencia de 1 m, y que según la Tabla B.2 del Anexo B este valor corresponde a:

$$L_0[dB] = 45.107692$$

Se determinó empíricamente que el valor del índice *n* que más se acerca a los resultados experimentales corresponde a 2.35. Por lo tanto, el modelo teórico que describe aproximadamente las pérdidas de propagación en el escenario exterior se expresa matemáticamente en la Ecuación 4.5, y en la Figura 4.11 se muestra la comparación entre este modelo teórico y las pérdidas de propagación medidas en el escenario exterior.

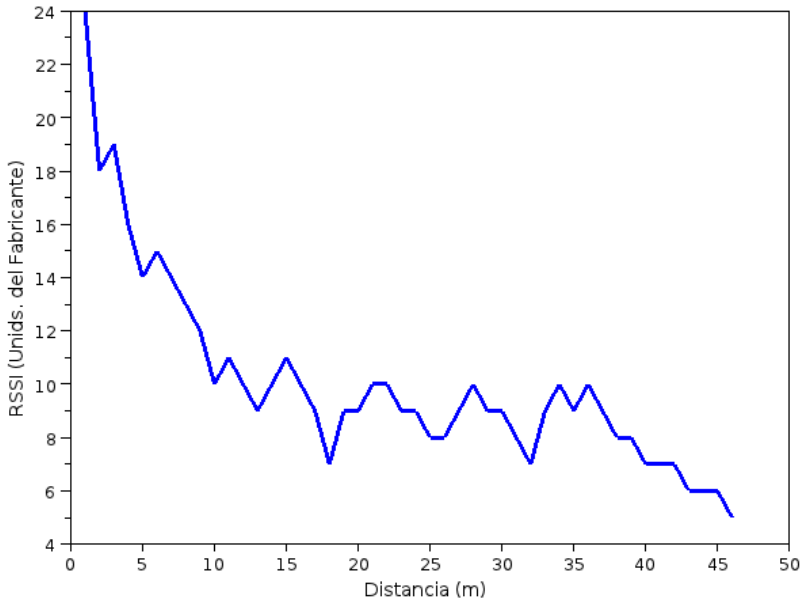
$$L_b[dB] = 45.107692 \ + 23.5\log(d\,[m]) \tag{4.5}$$

4.3.2 Medida de la Potencia de Recepción en el Escenario Interior

Las medidas de potencia de recepción en el escenario interior fueron tomadas cada 1 m hasta lograr el alcance máximo, que corresponde a la ubicación en donde el nivel de potencia medido es comparable al nivel de potencia de ruido, o hasta donde el pasillo lo permitió. En este escenario se alcanzó una distancia máxima de 46 m.

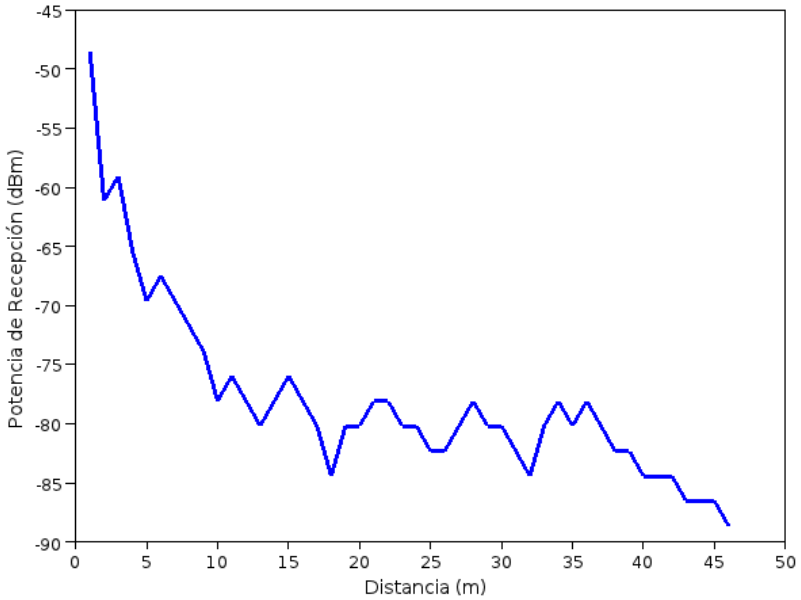
La Tabla B.3 del Anexo B contiene las medidas obtenidas de RSSI en el escenario interior, usadas para representar gráficamente el comportamiento de RSSI en unidades del fabricante, en función de la distancia, como se muestra en la Figura 4.12.

Figura 4.12. RSSI de las Señales Recibidas en el Escenario Interior



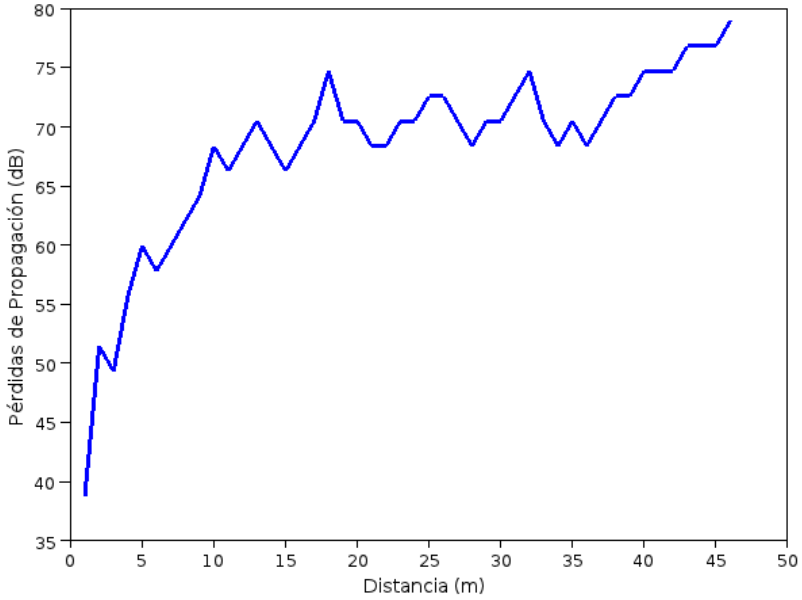
Mediante los valores de la Tabla B.1 del Anexo B que asocian RSSI en unidades del fabricante y potencia de recepción en dBm se representó gráficamente la potencia de recepción en función de la distancia mediante la Figura 4.13.

Figura 4.13. Potencia de Recepción en el Escenario Interior



Reemplazando cada uno de los valores de la potencia de recepción en la Ecuación 4.4 se obtuvieron las pérdidas de propagación en función de la distancia en el escenario interior, las cuales se muestran en la Figura 4.14.

Figura 4.14. Pérdidas de Propagación en el Escenario Interior



Los valores medidos de RSSI y sus respectivos valores de potencia de recepción en dBm y pérdidas de propagación para cada uno de los valores de distancia en el escenario interior se encuentran en la Tabla B.3 del Anexo B.

En el caso del escenario interior, para representar las pérdidas de propagación mediante un modelo basado en la Ecuación 3.2 se determinó empíricamente que las pérdidas básicas de propagación son iguales a[21]:

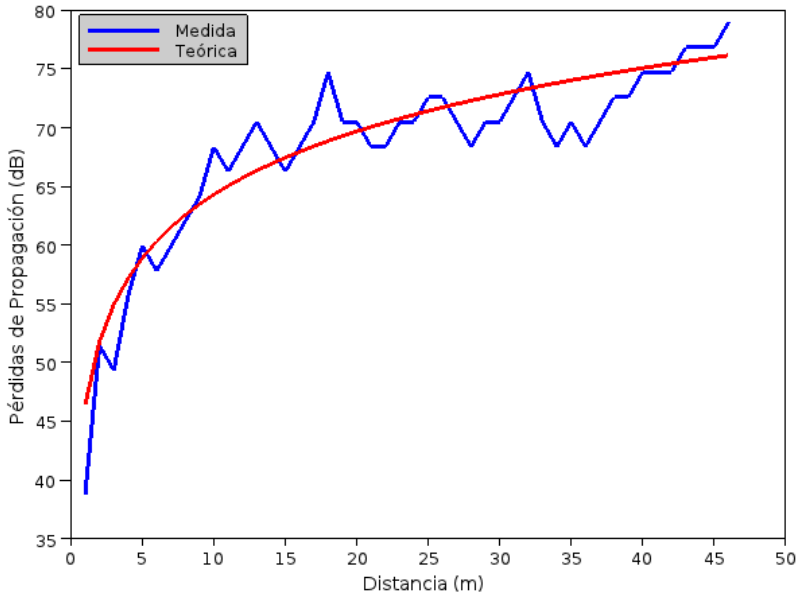
$$L_0\ [dB] = 46.4$$

El valor del índice *n* que permitió la mayor aproximación a los resultados experimentales se determinó empíricamente, y corresponde al valor de 1.79. De esta manera se puede decir que el modelo teórico que describe aproximadamente las pérdidas de propagación en el escenario interior se describe matemáticamente en la Ecuación 4.6.

$$L_b\ [dB] = 46.4 + 17.9 \log d\ [m] \tag{4.6}$$

La Figura 4.15 muestra la comparación entre el modelo teórico de pérdidas de propagación con las pérdidas de propagación medidas en el escenario interior.

Figura 4.15. Pérdidas de Propagación Teóricas y Experimentales



4.3.3 Simulación de la Cobertura del Sistema de Comunicación

La herramienta software Wireless InSite®[22] permite realizar la simulación de diferentes sistemas de comunicación inalámbrica por medio de la técnica de trazado de rayos. Esta herramienta cuenta con las capacidades para diseñar escenarios exteriores e interiores en donde se desea analizar la cobertura y el comportamiento de este tipo de sistemas. Dentro de las principales ventajas de esta herramienta se encuentra la posibilidad de hacer uso de diferentes modelos de propagación, además de configurar características del sistema tales como ancho de banda, potencia de transmisión, patrón de radiación de

[21] Este valor se encontró empíricamente, debido a que las pérdidas básicas a una distancia de 1 m no permitieron encontrar un modelo aproximado de las pérdidas de propagación en el escenario interior.
[22] Página oficial de Wireless InSite®: http://www.remcom.com/wireless-insite.

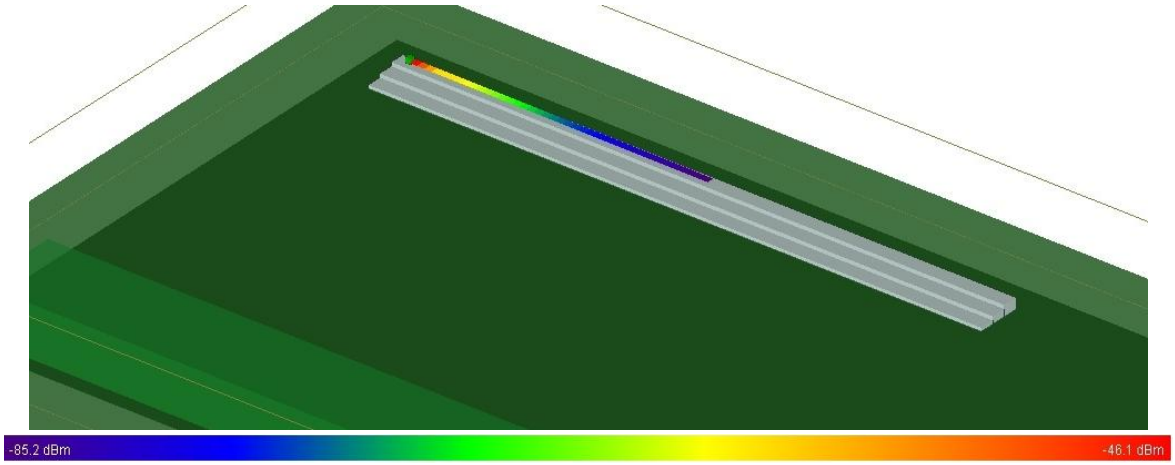
las antenas, así como el número de rayos que se desean analizar y el número de reflexiones y dispersiones permitidas para cada rayo

4.3.3.1 Simulación del Sistema de Comunicación en el Escenario Exterior

Para realizar la simulación en el escenario exterior fue necesario hacer uso del diseño del escenario correspondiente a la gradería del CDU de la Universidad del Cauca. Este diseño se realizó a lo largo del desarrollo del 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"[23] [25], en el cual se realizó un modelo del escenario en Wireless InSite, en donde se incluye la cancha principal, la gradería lateral y los arboles.

Para el desarrollo de la simulación realizada se ubicaron tanto el transmisor como los receptores separados 1 m unos de otros, sobre el último escalón de las graderías laterales, como se muestra en la Figura 4.16. Esta disposición permitió tener una medida de la potencia de recepción a lo largo de la gradería, de la misma forma que se realizaron las pruebas en el escenario real. Un aspecto importante a tener en cuenta es que, dado que las antenas PIFA con las que cuentan los dispositivos PRoC radian en todas direcciones de manera irregular, se trabajó a nivel de simulación con antenas omnidireccionales, lo cual afectó en gran medida los resultados obtenidos.

Figura 4.16. Disposición del Transmisor y Multiples Receptores en el Escenario Exterior



Al ejecutar la simulación se obtiene como resultado la representación gráfica de la potencia de recepción, así como las pérdidas de propagación que sufren las señales transmitidas, en función de la distancia. Estos resultados se muestran en las Figuras 4.17 y 4.18, respectivamente.

[23] Trabajo de grado desarrollado en la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones en la Universidad del Cauca en el año 2011.

Figura 4.17. Potencia de Recepción en la Simulación del Escenario Exterior

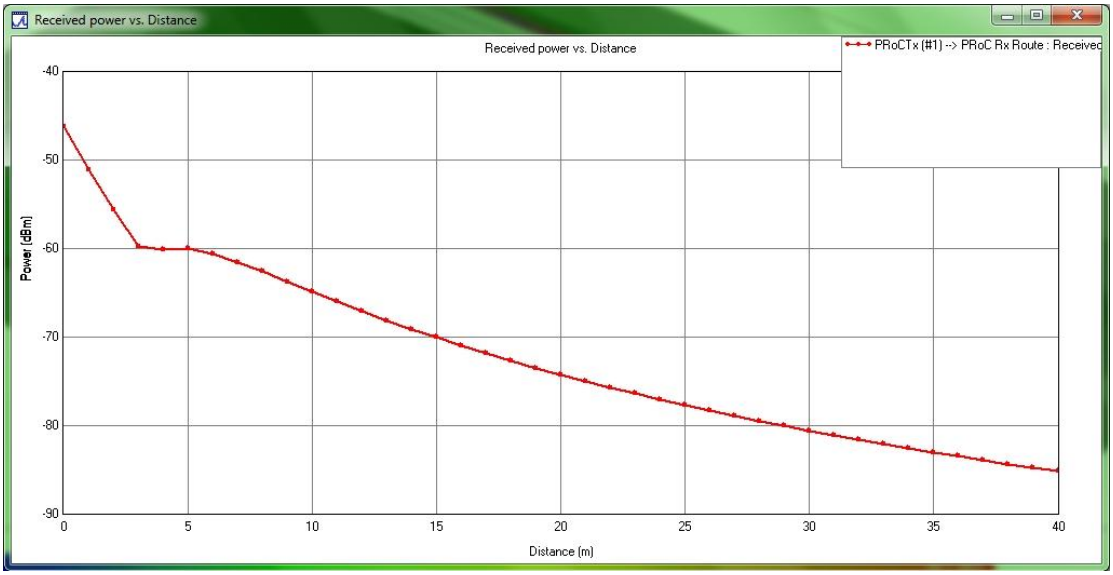
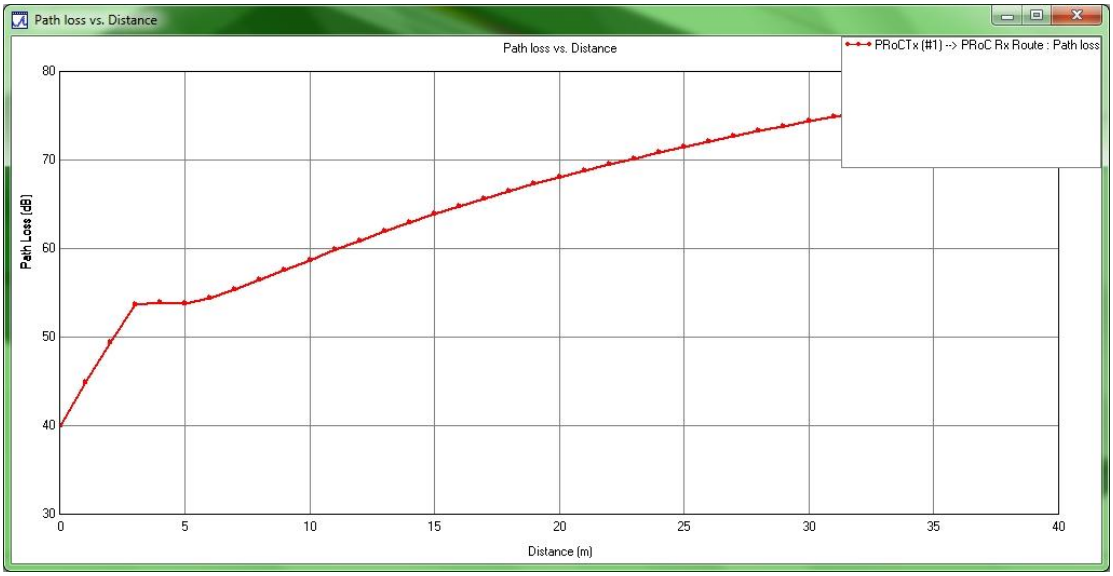


Figura 4.18. Perdidas de Propagación en la Simulación del Escenario Exterior



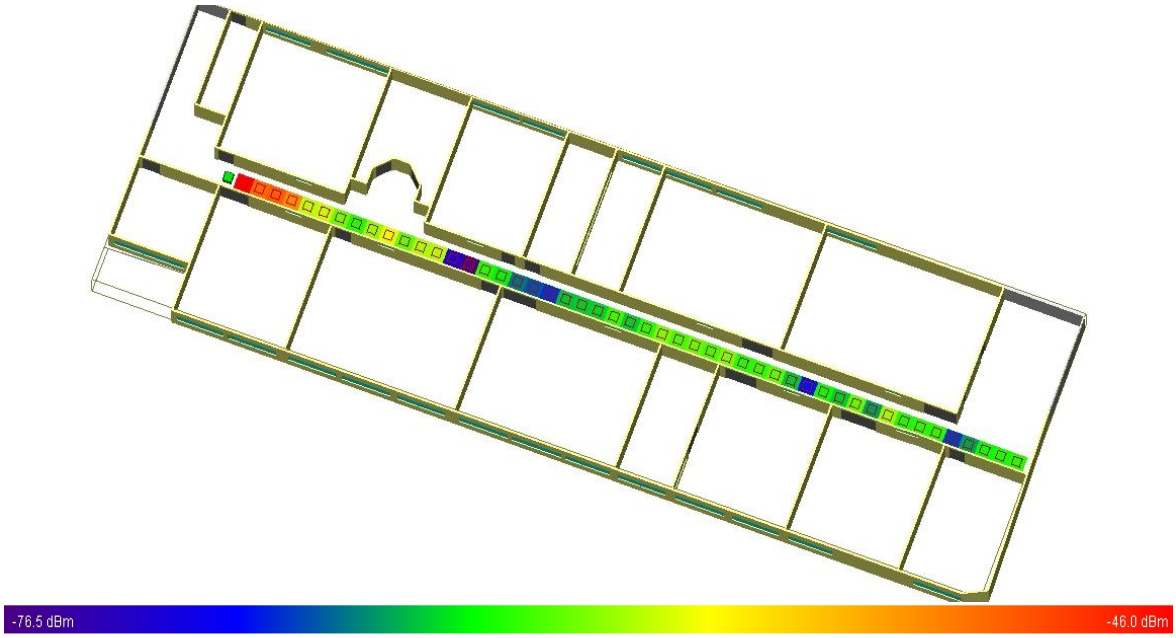
En el escenario exterior el transmisor radia aparentemente en todas las direcciones de acuerdo a las características de la antena. De toda la energía radiada, una parte se absorbe por las partículas de la atmosfera a medida que se propaga, y sólo una pequeña porción llega hasta el receptor. Por esta razón, a medida que se incrementa la distancia de separación, se reciben señales cada vez con menor energía, lo que significa un incremento en las pérdidas de propagación en este escenario.

4.3.3.2 Simulación del Sistema de Comunicación en el Escenario Interior

En el trabajo de grado titulado “Análisis de Cobertura de un Sistema Wi-Fi en Interiores, mediante la Técnica de Trazado de Rayos”[24] [26] se realizó el diseño de los pasillos del edificio de la FIET con el objetivo de simular el comportamiento de un sistema Wi-Fi y determinar la cobertura al interior de la FIET. A pesar de que en el trabajo de grado referenciado se analiza el comportamiento de un sistema Wi-Fi, es posible ajustar los parámetros de la simulación de tal forma que sea posible simular el comportamiento del sistema de comunicación implementado mediante los dispositivos PRoC.

La característica principal de la simulación realizada en el escenario interior consiste en la disposición de los receptores a lo largo del pasillo del tercer piso, separados 1 m unos de otros. Esta disposición permitió tener una medida a nivel de simulación de la potencia de recepción a lo largo del pasillo, de la misma forma que se realizaron las pruebas en el escenario real. El transmisor se encuentra en una posición fija, en el extremo izquierdo del pasillo, como se muestra en la Figura 4.19.

Figura 4.19. Disposición del Transmisor y Multiples Receptores en el Escenario Interior



Al ejecutar la simulación se obtuvo como resultado la representación de la potencia de recepción, así mismo como las pérdidas de propagación que sufrieron las señales transmitidas. Ambas medidas se encuentran en función de la distancia, y se muestran en la Figura 4.20 y Figura 4.21, respectivamente.

[24] Trabajo de grado desarrollado en la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones en la Universidad del Cauca en el año 2011.

Figura 4.20. Potencia de Recepción en la Simulación del Escenario Interior

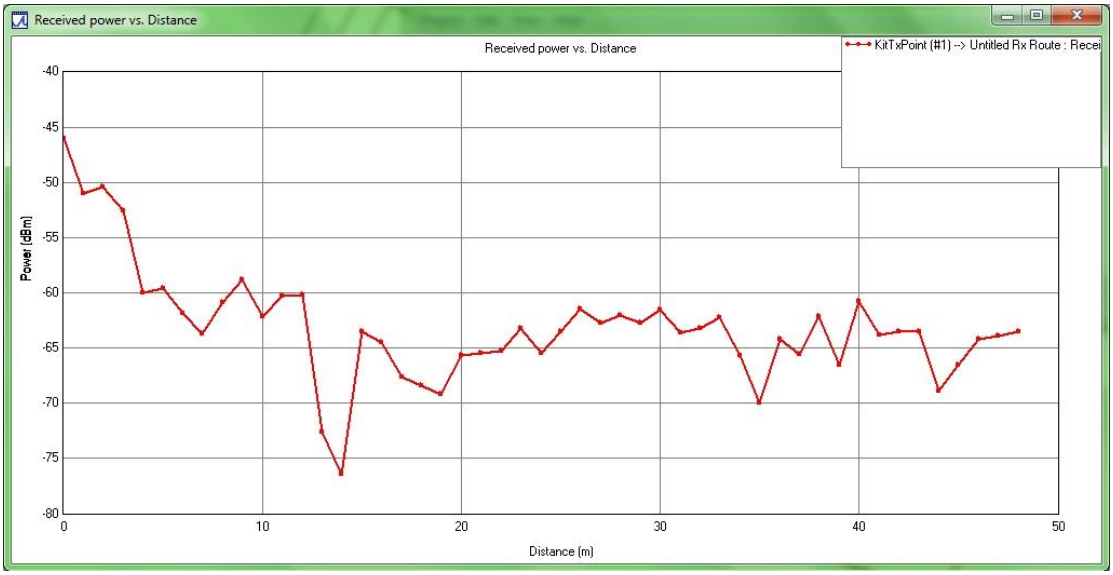
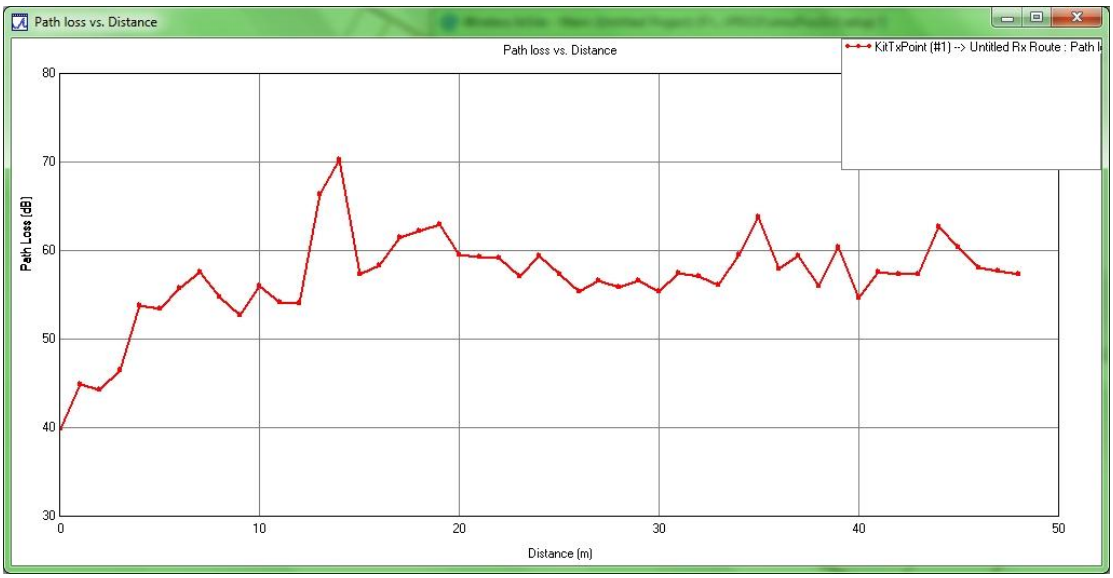
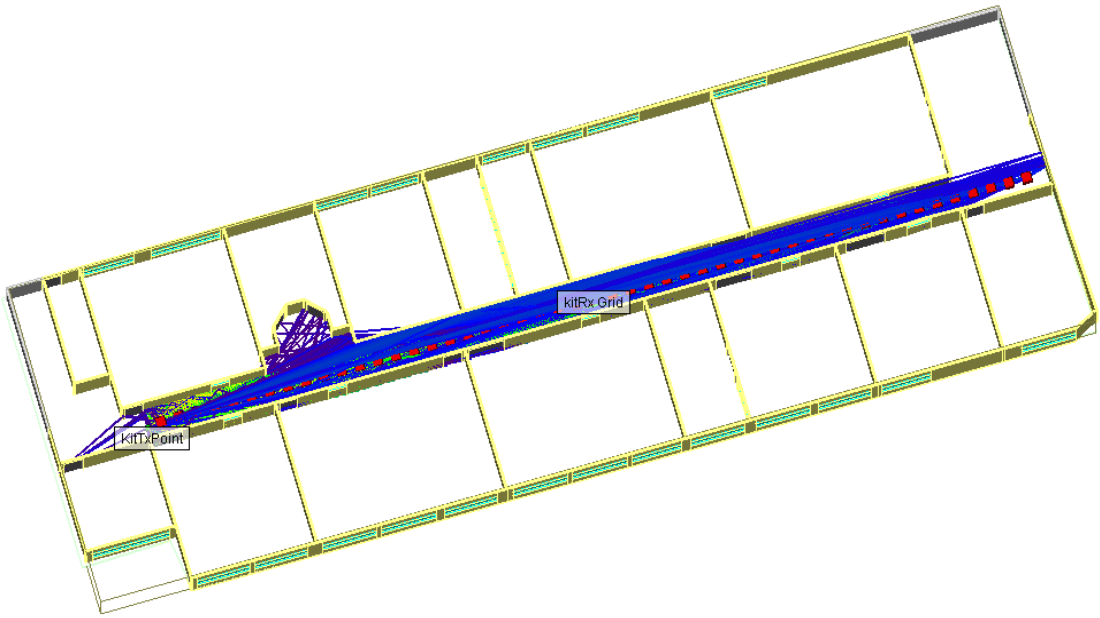


Figura 4.21. Pérdidas de Propagación Producto de la Simulación



En los resultados de la simulación se observa que existe un punto aproximadamente entre los 15 y 20 metros en donde las pérdidas de propagación aumentaron considerablemente. Esto se debe a la uniformidad que tiene el pasillo del segundo piso de la FIET, ya que la depresión en la pared ubicada en el sector de los baños del pasillo ocasionó que la potencia disminuyera considerablemente en las cercanías a este sector, generando un punto de desvanecimiento profundo, en el cual los diferentes ecos de la señal se interfirieron destructivamente.

Figura 4.22. Trazado de Rayos a lo Largo del Pasillo



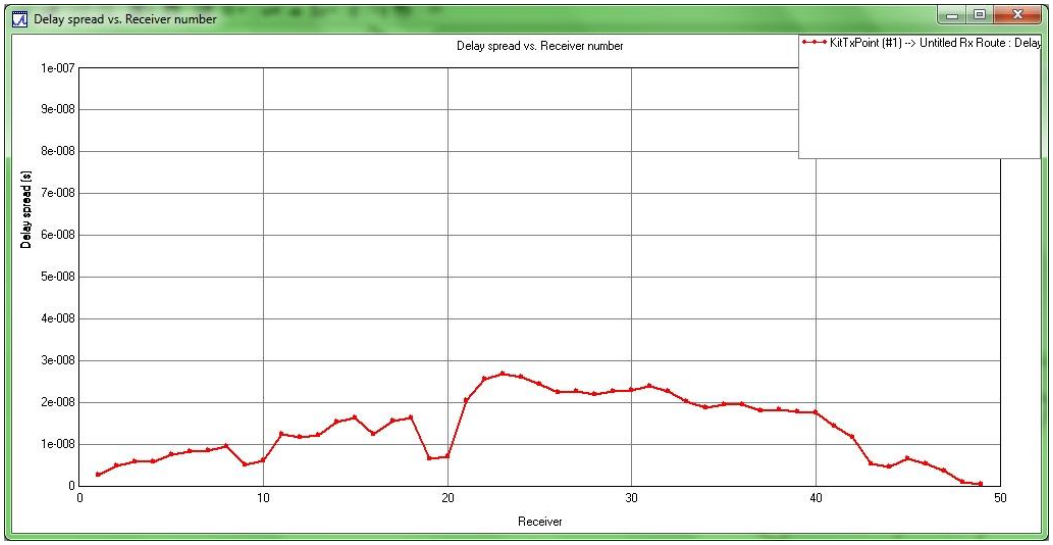
Por otra parte, la propagación de las señales a lo largo de todo el pasillo se caracteriza mediante el modelo de cañón o guía de onda, que consiste en la propagación mediante múltiples reflexiones de las señales de radiofrecuencia en las paredes de los pasillos del escenario, como se muestra en la Figura 4.22. Por esta razón se logró conseguir el alcance a lo largo de todo el pasillo, pues las ondas electromagnéticas logran una trayectoria mayor gracias a dichas reflexiones. Este fenómeno comúnmente es aprovechado para aumentar la cobertura de los sistemas de radiofrecuencia en escenarios en donde las edificaciones y construcciones permiten las reflexiones de las señales transmitidas.

La herramienta Wireless InSite® también permite calcular la diferencia entre el tiempo de llegada de cada uno de los ecos de la señal transmitida dentro del pasillo por efecto de multitrayectoria[25]. Este parámetro es conocido como Dispersión de Retardo (DS, D*elay Spread*), y permite realizar la caracterización del canal, de acuerdo a su valor. Dado que estos ecos llegan al receptor con componentes de amplitud, fase y retardo diferentes, el resultado es la posible combinación destructiva, generando efectos no deseados en el sistema. En la Figura 4.23 se muestran los resultados de dispersión de retardo en el escenario interior.

Mediante la dispersión de retardo es posible calcular el ancho de banda de coherencia, que corresponde al rango de frecuencias sobre el cual el canal puede considerarse plano en frecuencia, es decir que todas las componentes van a sufrir la misma atenuación y los cambios de fase ocurren de manera lineal [26].

[25] En el escenario exterior no es necesario calcular la dispersión de retardo, ya que las posibles reflexiones de la señal se dan en distancias lejanas, las cuales por lo general no ocasionan efectos de multitrayectoria.

Figura 4.23. Dispersión de Retardo en el Escenario Interior



El ancho de banda de coherencia es inversamente proporcional a la dispersión de retardo y se expresa mediante la Ecuación 4.7 [27].

$$B_c = \frac{1}{2\pi D} \tag{4.7}$$

Donde:

- B_c [GHz]: Ancho de banda de coherencia.
- D [ns]: Dispersión de retardo.

De acuerdo a los valores de dispersión de retardo encontrados con Wireless InSite, el máximo valor de dispersión de retardo de 26.654 ns generó un ancho de coherencia mínimo igual a 5.9711 MHz, el cual supera en magnitud al ancho de banda de 1 MHz de operación de los dispositivos PRoC. Por lo tanto, se puede decir que el canal que se está representando en el escenario interior posee un desvanecimiento plano en frecuencia.

4.3.4 Análisis Comparativo de los Resultados

Una vez encontrados los resultados tanto en el escenario exterior como en el interior, es posible hacer un análisis comparativo para determinar en cuál de los dos escenarios se comporta mejor el sistema de comunicación en cuanto a las características físicas de transmisión de las señales radioeléctricas.

A partir de los valores de las Tablas B2 y B3 del Anexo B se representaron de manera unificada la potencia de recepción y las pérdidas de propagación en los dos escenarios usados para la implementación del sistema de comunicación, mediante las Figuras 4.24 y 4.25, respectivamente, en las cuales se observa que en el escenario interior se alcanzaron a cubrir mayores distancias, debido a que las pérdidas de propagación en este escenario son menores que las pérdidas en el escenario exterior. Esto se debe a que en

el escenario interior la energía se encontraba confinada a lo largo del pasillo gracias a las múltiples reflexiones de la señal transmitida, mientras que en el escenario exterior el transmisor radiaba aparentemente en todas las direcciones de acuerdo a las características de la antena. Sin embargo, los diferentes ecos de la señal que llegan al receptor incidían con diferentes componentes de fase, dando como resultado la aparición de interferencia destructiva de las señales en algunos puntos del pasillo.

Figura 4.24. Potencia de Recepción Medida en Escenarios Exterior e Interior

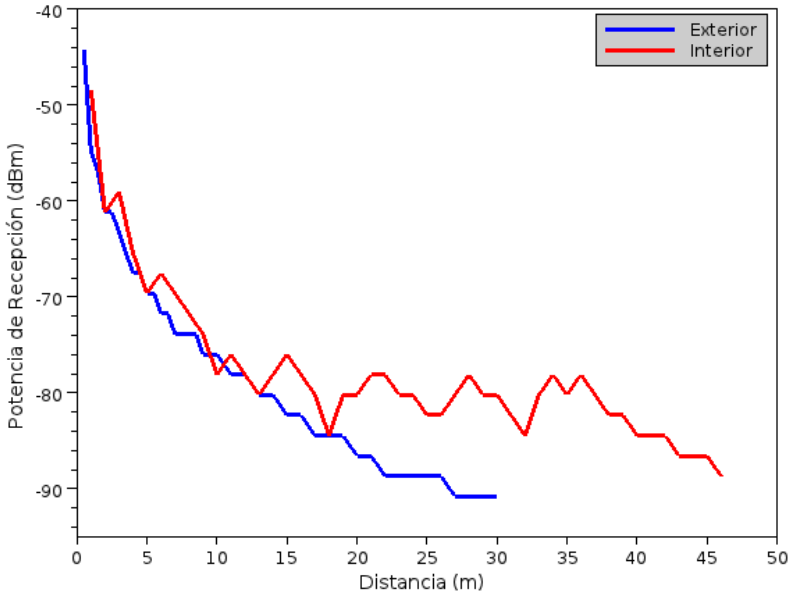
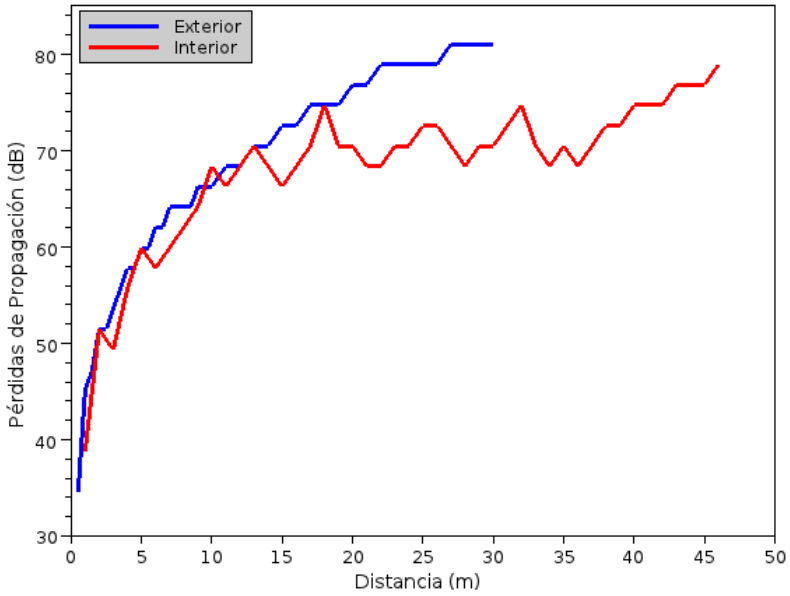


Figura 4.25. Perdidas de Propagación Medida en Escenarios Exterior e Interior



La herramienta Wireless InSite permitió obtener los resultados de potencia y pérdidas de propagación en archivos de extensión *".txt"*. Estos valores se agruparon en forma de Valores Separados por Coma (CSV, *Comma Separated Values*), los cuales se graficaron con ayuda de la herramienta de programación matemática Scilab[26], y se muestran a continuación.

Figura 4.26. Potencia de Recepción Medida y Simulada en Escenario Exterior

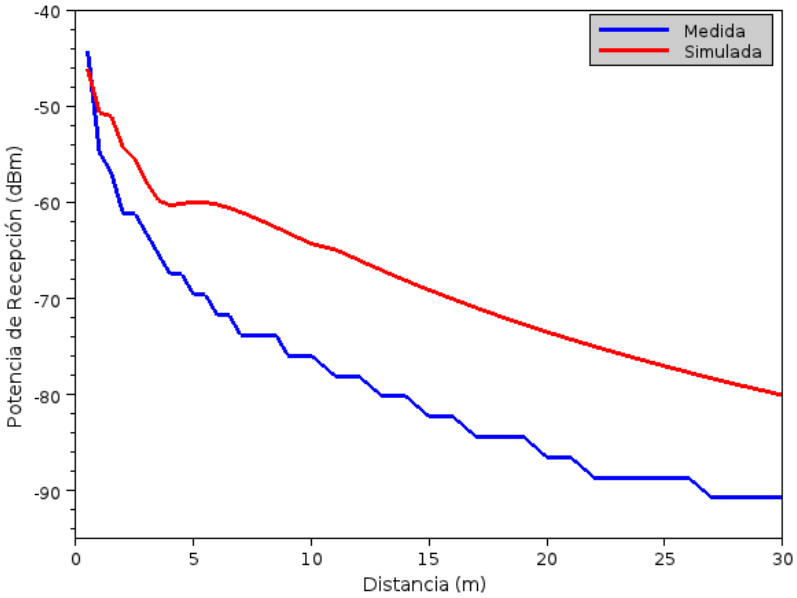
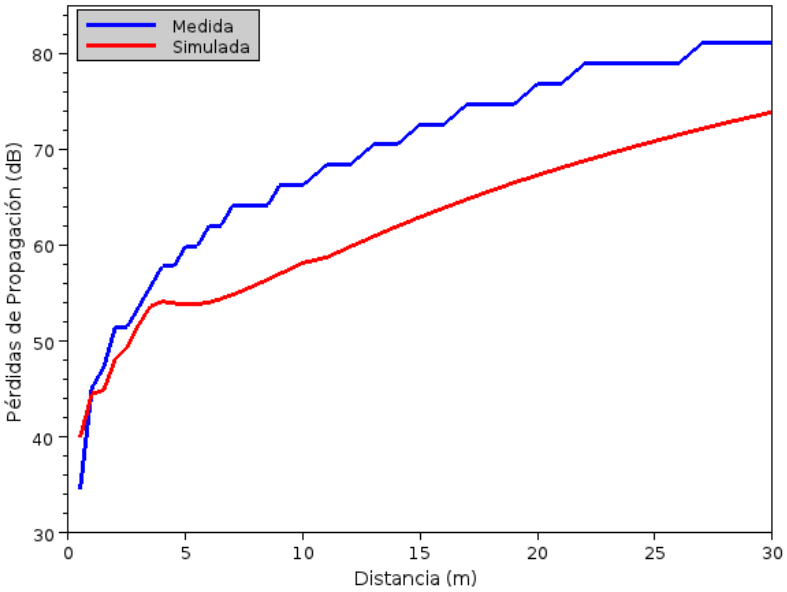


Figura 4.27. Pérdidas de Propagación Medidas y Simuladas en Escenario Exterior



[26] Página oficial de Scilab: http://www.scilab.org/.

En la Figura 4.26 se aprecia que en ambos casos la potencia de recepción disminuyó con la distancia, lo que equivale al incremento de las pérdidas de propagación de acuerdo a la Figura 4.27. No obstante, los valores de potencia de recepción obtenidos en la simulación fueron mayores. Esto se debe a que, a pesar de que se incluyeron los mismos parámetros de configuración de los dispositivos PRoC en la simulación, no se consideró la irregularidad del patrón de radiación de las antenas PIFA, sino que se trabajó con una antena omnidireccional.

Figura 4.28. Potencia de Recepción Medida y Simulada en Escenario Interior

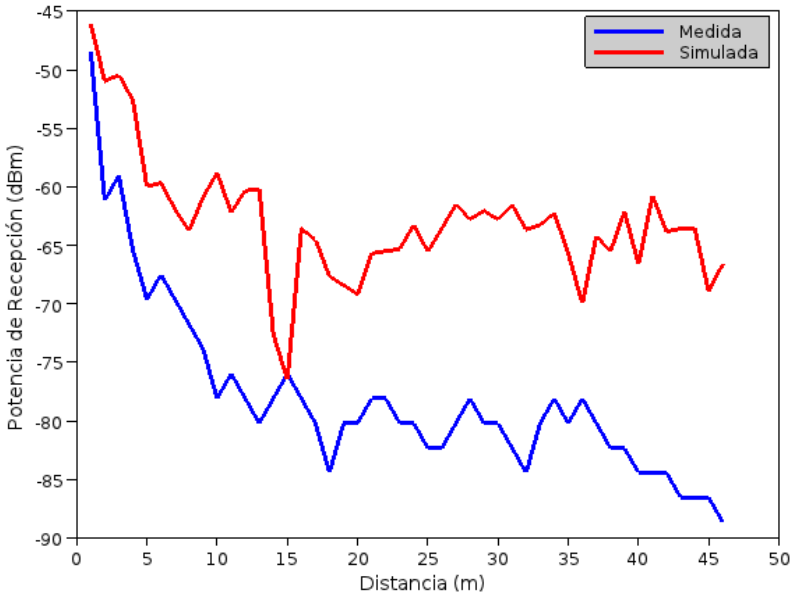
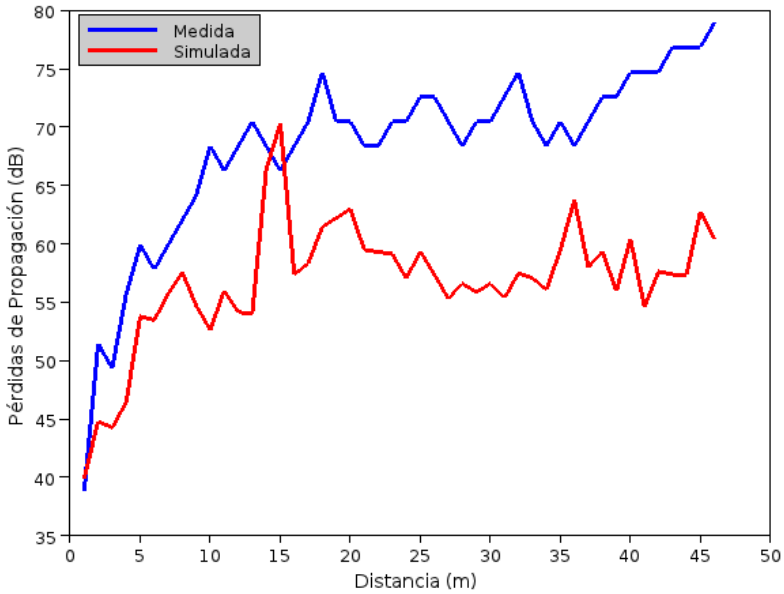


Figura 4.29. Perdidas de Propagación Medidas y Simuladas en Escenario Interior



Los resultados de la simulación en el escenario interior muestran un mejor comportamiento al igual que en el escenario exterior, pues la potencia de recepción alcanza valores mucho más altos, lo que implica menores valores de pérdidas de propagación. De igual forma, el patrón de radiación de las antenas en la herramienta de simulación es un elemento clave, pues al ser omnidireccional, tiene mayores capacidades para radiar en todas las direcciones. Cabe aclarar que el modelo de propagación usado en la herramienta de simulación es un modelo aproximadamente ideal que no considera la totalidad de fenómenos reales, por lo que es posible obtener mejores resultados.

Se observa en los resultados de simulación y en los resultados experimentales un comportamiento mucho mejor en el escenario interior, pues al estar confinadas las señales de radiofrecuencia a lo largo del pasillo, es posible obtener potencias de recepción superiores. A pesar de ello, cerca a los 15 m se presenta un desvanecimiento profundo como se observa en la Figura 4.28, en donde la potencia de recepción disminuye considerablemente para luego incrementar su valor en un rango corto de distancia. Estos desvanecimientos profundos son causados por la multitrayectoria que se genera a partir de las múltiples reflexiones de las señales al interior del pasillo, las cuales se interfieren destructivamente en algunos puntos de medición.

4.4 EVALUACION Y ANALISIS DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN

En los procesos de transmisión de la información vía radio existe la posibilidad de que la información transmitida no sea recibida íntegramente, debido a que las señales que viajan a través del espacio están sometidas a diferentes fenómenos que producen su degradación. La técnica de transmisión DSSS permite contrarrestar algunos de estos fenómenos, como se explicó en el Capitulo 1. Sin embargo, ello no garantiza que la potencia de las señales transmitidas disminuya a lo largo de su trayectoria, ni tampoco que la información recibida esté libre de errores, ya que a pesar de ser una técnica con múltiples ventajas, tiene limitaciones y puntos débiles.

Uno de los parámetros comúnmente utilizados para analizar el desempeño de un sistema de comunicación digital es la relación E_b/N_0 descrita por medio de la Ecuación 1.2.

Despejando la potencia de ruido de la Ecuación 1.3 y transformando la expresión en unidades logarítmicas, se obtiene la potencia de ruido en la Ecuación 4.8.

$$P_N\,[W] = 10\log(K * T * BW_c) \tag{4.8}$$

Al reemplazar el ancho de banda del canal equivalente a 1 MHz y la temperatura igual a 290 °K (temperatura promedio de la superficie de la tierra) en la Ecuación 4.8, se tiene que la potencia de ruido del sistema es igual a:

$$P_N\,[dBW] = 10\log(1.3806504\text{ x }10^{-23} * 290 * 1 \times 10^{6}) = -143.9752$$

A su vez, la potencia de ruido del sistema en dBm corresponde a:

$$P_N[dBm] = -113.9752$$

La potencia de ruido real debe incluir los efectos de NF. Debido a que el receptor posee un valor de NF igual a 13.3 dB, la potencia de ruido a la salida del receptor es igual a:

$$P_N[dBm] = -113.9752 + 13.3 = -100.6752$$

Por otra parte, en los sistemas que implementan la técnica DSSS es conveniente representar la calidad del canal de comunicación en términos de la relación energía de *chip* (E_c) con respecto a la densidad de potencia de ruido denotada por E_c/N_0. Esta relación se puede representar mediante la Ecuación 4.9.

$$\frac{E_c}{N_0} = \frac{P_R/BW_c}{P_N/B} = \frac{P_R}{P_N} = SNR \tag{4.9}$$

Al reemplazar esta expresión en la Ecuación 1.5, se obtiene una relación directa entre E_b/N_0 y E_c/N_0, descrita mediante la Ecuación 4.10.

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{E_c}{N_0} * SF \tag{4.10}$$

Despejando E_c/N_0 y transformando la expresión en unidades logarítmicas se llega a la Ecuación 4.11.

$$\left(\frac{E_c}{N_0}\right)_{dB} = \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{dB} - (SF)_{dB} \tag{4.11}$$

El segundo parámetro utilizado para realizar el análisis del desempeño del sistema de comunicación es la Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*), que representa el número de bits erróneos con respecto al total de bits que fueron recibidos satisfactoriamente[27]. La BER se define mediante la Ecuación 4.12.

$$BER = \frac{Bits\ Recibidos\ con\ Errores}{Bits\ Recibidos} \tag{4.12}$$

La BER es una medida del desempeño de un sistema de comunicación, pues permite determinar la confiabilidad del sistema de comunicación por medio del análisis desde el punto en que se transmiten los bits hasta donde son recibidos [28]. El número de errores que la información recibida puede contener en un escenario particular no se puede determinar con exactitud debido a que las condiciones del canal de transmisión son variables. A medida que dichas condiciones empeoran, es decir, a medida que se tiene una relación E_b/N_0 menor, es muy probable que la información contenga muchos más errores. Con el objetivo de reducir la BER en los sistemas de comunicación se implementan esquemas de modulación digital robustos junto con mecanismos de detección y corrección de errores que permiten mitigar la degradación de las señales,

[27] Debido a que el sistema presenta la pérdida de un número considerable de paquetes, se calcula la BER con el total de bits recibidos mas no con el total de bits transmitidos, para no incrementar los valores de BER.

aunque la implementación de estos mecanismos implica en ciertas ocasiones la reducción de la velocidad de transmisión de datos.

El número de bits erróneos recibidos se obtiene a partir de la comparación entre la información recibida y la información original, teniendo en cuenta que el receptor almacena el conjunto de bytes transmitidos en la memoria del microcontrolador. Al realizar la comparación bit a bit es posible determinar el número de elementos erróneos recibidos, lo cual permite calcular fácilmente la BER del sistema en los diferentes escenarios.

Similar a la BER, otro parámetro comúnmente utilizado para analizar el desempeño del sistema de comunicación es la Tasa de Error de Tramas (FER, *Frame Error Rate*), que representa el número de tramas recibidas con errores junto con las tramas perdidas, con respecto al total de tramas transmitidas. Se define la FER mediante la Ecuación 4.13.

$$FER = \frac{Tramas\ Recibidas\ con\ Errores + Tramas\ Perdidas}{Tramas\ Transmitidas} \tag{4.13}$$

Para detectar directamente el número de tramas que llegan con errores, el receptor calcula la suma de verificación de la información recibida y compara este valor con el campo *Checksum* de la trama. Si estos dos valores coinciden, significa que los datos han sido recibidos exitosamente. Este proceso se realiza para cada una de las tramas recibidas. Para obtener medidas adecuadas de BER y FER en cada prueba, se realizó la transmisión de 100 tramas descritas en la Sección 3.3, de modo que fuera posible la obtención de resultados válidos estadísticamente[28].

Los parámetros configurados en los dispositivos PRoC para la ejecución de las pruebas de desempeño en los dos escenarios se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Parámetros de los Dispositivos PRoC para las Medidas de Errores

Parámetro	Valor
Frecuencia de Operación	2.478 GHz
Potencia de Transmisión	-9.7 dBm
Velocidad de Transmisión de Datos	16 kbps 32 kbps 64 kbps
Factor de Ensanchamiento	64 32 16

4.4.1 Simulación del Sistema de Comunicación para la Evaluación del Desempeño Teórico

Simulink®[29] es una herramienta de simulación a nivel gráfico incluida en el entorno de programación matemática Matlab®, que permite diseñar y simular diferentes tipos de

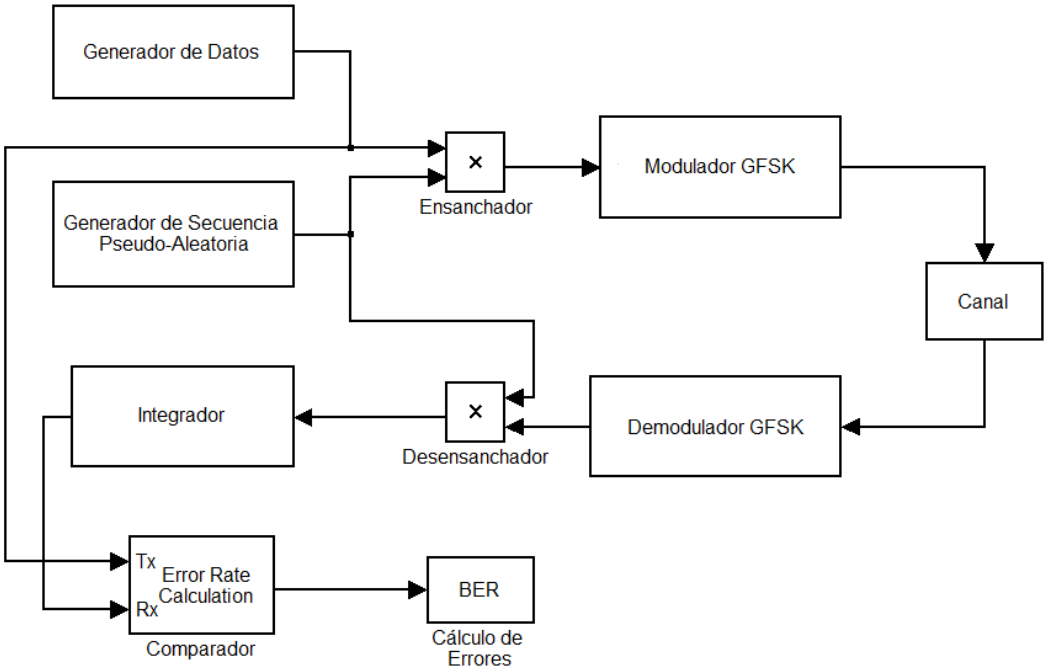
[28] La validez de los resultados se basa en el método estadístico de Montecarlo.
[29] Página oficial de Simulink: http://www.mathworks.com/products/simulink/.

sistemas dentro de los cuales se encuentran los sistemas de comunicación inalámbrica. Los diseños de estos sistemas se realizan mediante la Caja de Herramientas de Sistemas de Comunicaciones (*Communication Systems Toolbox*), que cuenta con diferentes elementos usados para generar datos, aplicar esquemas de modulación y codificación y graficar las señales en cada una de las etapas, entre otros.

En Simulink® se realizó el diseño del sistema de comunicación implementado[30] mediante el uso de bloques que simularon cada uno de los componentes del transceptor PRoC, dentro de los cuales se encuentran las etapas de ensanchamiento, modulación[31] y decisión, las cuales se muestran en la Figura 4.30.

Por otra parte, Matlab® cuenta con otra herramienta que permite calcular el desempeño de diferentes sistemas mediante la ejecución de simulaciones que hacen uso de la técnica de Monte Carlo. Esta herramienta es conocida como BERTool y ha sido usada para determinar el desempeño teórico del sistema de comunicación para cada una de las velocidades de transmisión de datos implementadas en el sistema.

Figura 4.30. Diagrama en Bloques del Sistema Simulado

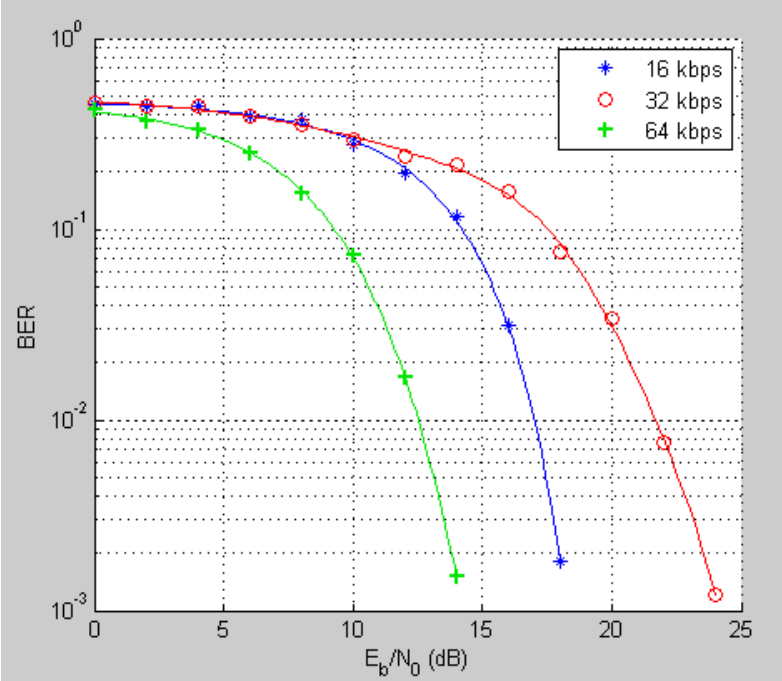


La Figura 4.31 representa el desempeño teórico del sistema de comunicación para cada una de las velocidades de transmisión de datos implementadas, donde es posible apreciar que, para el caso en el cual el sistema opera a 64 kbps, se obtiene un valor de BER igual a 10^{-3} para un valor *de* E_b/N_0 cercano a 15 dB, mientras que para 32 y 16 kbps este valor se logra para valores de E_b/N_0 superiores. A partir de esto se observa un mejor

[30] La descripción detallada de la simulación se describe en el Anexo C
[31] En Simulink se implementó el esquema de modulación GFSK mediante un bloque de Modulación de Fase Continua (CPM, *Continous Phase Modulation*) junto con un filtro gaussiano [29].

comportamiento del sistema en la velocidad de transmisión de datos más alta, lograda mediante el ensanchamiento con secuencias pseudo-aleatorias más cortas.

Figura 4.31. Desempeño Teórico del Sistema de Comunicación



4.4.2 Evaluación y Análisis del Desempeño en el Escenario Exterior

Para calcular la BER se determinó el número de errores en cada uno de los puntos de medida de potencia de recepción en el escenario exterior, con el objetivo de asociar los errores encontrados con las condiciones del canal dadas por la relación E_b/N_0. Las tablas presentadas en esta sección contienen los resúmenes de las medidas realizadas y los resultados, dado que en varios puntos de medida se obtuvieron los mismos valores de potencia de recepción.

En la Tabla 4.4 se muestran los valores de E_b/N_0 para cada una de las velocidades de transmisión de datos del sistema y el valor de E_c/N_0 calculado por medio de la Ecuación 4.11, todos ellos obtenidos en el escenario exterior.

Tabla 4.4. Medidas de E_b/N_0 y E_c/N_0 en Escenario Exterior

RSSI	E_b/N_0 (dB) – 16 kbps	E_b/N_0 (dB) – 32 kbps	E_b/N_0 (dB) – 64 kbps	E_c/N_0 (dB)
26	74.29503161	71.28473165	68.27443169	56.23323187
21	63.71810861	60.70780865	57.69750869	45.65630887
20	61.60272361	58.59242365	55.58212369	43.54092387
18	57.37195461	54.36165465	51.35135469	39.31015487
17	55.25656961	52.24626965	49.23596969	37.19476987

Tabla 4.4. (Continuación)

16	**53.14118561**	**50.13088565**	**47.12058569**	**35.07938587**
15	51.02580061	48.01550065	45.00520069	32.96400087
14	48.91041561	45.90011565	42.88981569	30.84861587
13	46.79503161	43.78473165	40.77443169	28.73323187
12	44.67964661	41.66934665	38.65904669	26.61784687
11	42.56426261	39.55396265	36.54366269	24.50246287
10	40.44887761	37.43857765	34.42827769	22.38707787
9	38.33349261	35.32319265	32.31289269	20.27169287
8	36.21810861	33.20780865	30.19750869	18.15630887
7	34.10272361	31.09242365	28.08212369	16.04092387
6	31.98733861	28.97703865	25.96673869	13.92553887
5	29.87195461	26.86165465	23.85135469	11.81015487
4	27.75656961	24.74626965	21.73596969	9.694769867

La Tabla 4.5 contiene los valores de BER y la Tabla 4.6 contiene los valores de FER obtenidos experimentalmente en el escenario exterior para cada una de las velocidades de transmisión de datos del sistema.

Tabla 4.5. Medidas de BER en Escenario Exterior

BER – 16 kbps	BER – 32 kbps	BER – 64 kbps
0	0	0.00005
0	0	0.00005
0	0	0.00005
0	0	0.00005
0	0	0.0001
0	0	0.00005
0	0	0.00005
0	0.000151515	0.00005
0	0.00020202	0.0001
0	0	0.00005
0	0	0.00015
0.00005	0	0.0001
0.00005	0.001914894	0.000824742
0.00015	0.008589744	0.003370787
0.0025	0.008986487	0.004885058
0.009423077	0.010514706	0.008445946
0.012608696	0.011612903	0.009637681
0.015076923	0.018469388	0.012459016

Tabla 4.6. Medidas de FER en Escenario Exterior

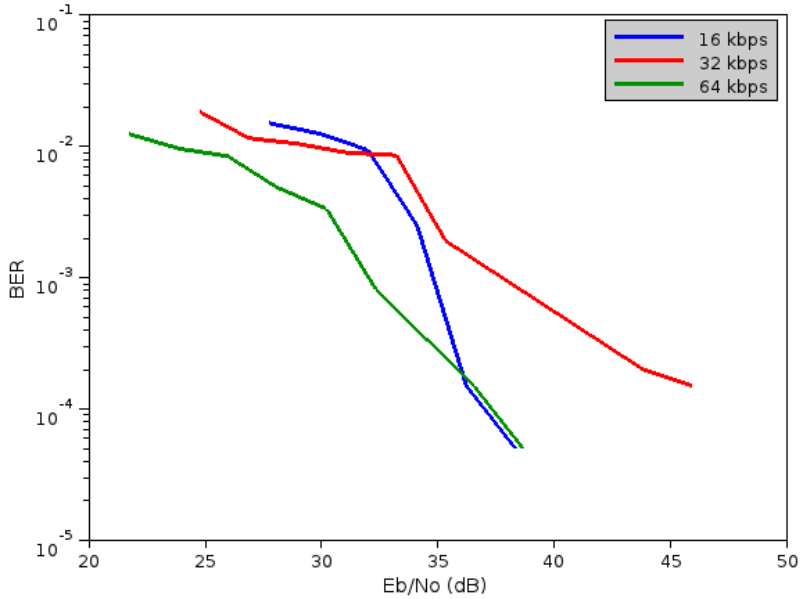
FER – 16 kbps	FER – 32 kbps	FER – 64 kbps
0	0	0.01
0	0	0.01

Tabla 4.6. (Continuación)

0	**0**	**0.01**
0	0	0.01
0	0	0.01
0	0.01	0.01
0	0.01	0.01
0	0.02	0.01
0	0.03	0.01
0	0.01	0.01
0	0	0.02
0.01	0.01	0.01
0.01	0.22	0.11
0.03	0.69	0.42
0.32	0.73	0.46
0.7	0.76	0.72
0.82	0.79	0.8
0.88	0.9	0.86

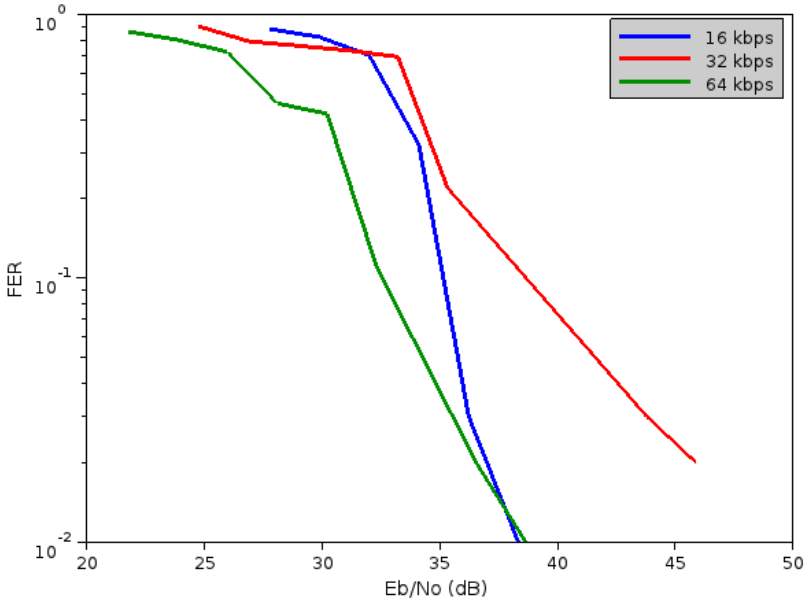
De acuerdo a los valores de las Tablas 4.4 y 4.5, en la Figura 4.32 se muestra la BER del sistema en el escenario exterior en función de la relación E_b/N_0, para cada una de las velocidades de transmisión de datos del sistema.

Figura 4.32. BER vs E_b/N_0 en Escenario Exterior



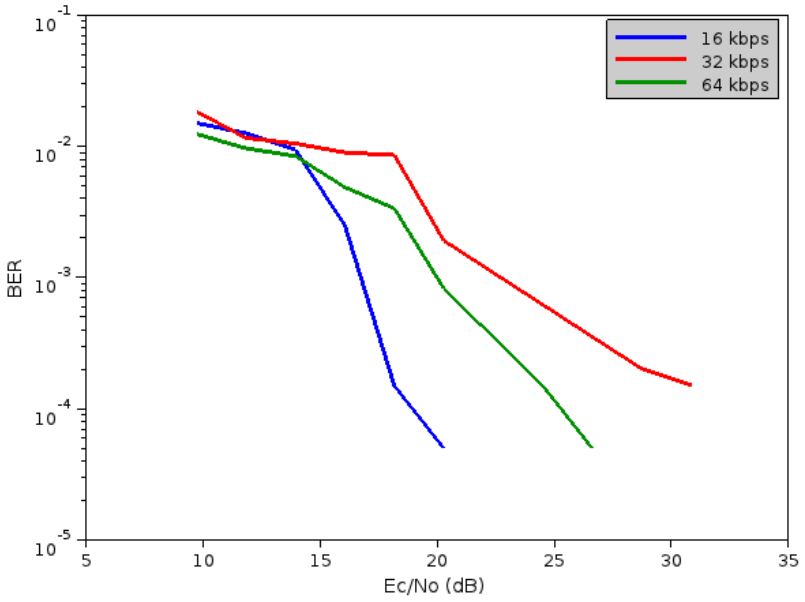
Por otra parte, de acuerdo a los valores de las Tablas 4.4 y 4.6, en la Figura 4.33 se muestra la FER del sistema en el escenario exterior en función de la relación E_b/N_0 para cada una de las velocidades de transmisión de datos del sistema.

Figura 4.33. FER vs E_b/N_0 en Escenario Exterior



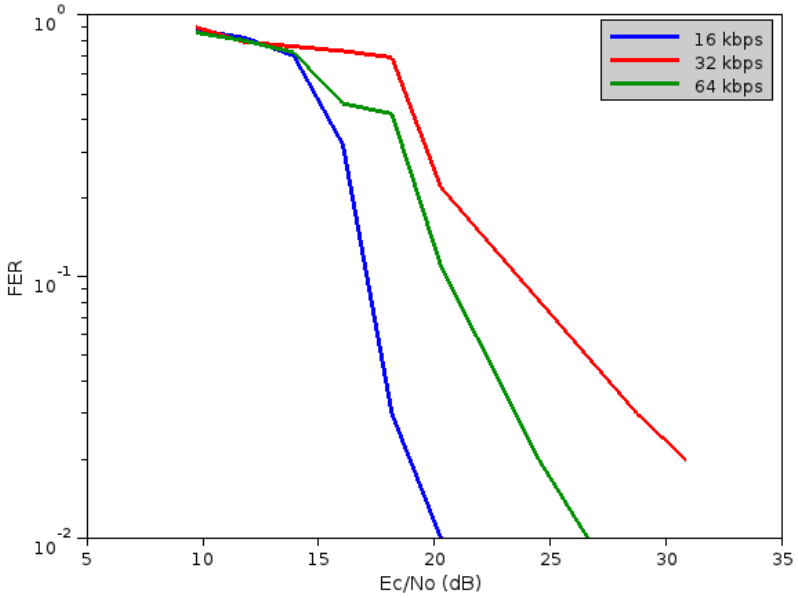
En la Figura 4.32 se observa un mejor desempeño del sistema de comunicación a 64 kbps, ya que se obtuvieron resultados de BER de 10^{-3} para valores de E_b/N_0 cercanos a 33 dB, mientras que para las demás velocidades de transmisión, obtener este valor de BER requiere de valores superiores de E_b/N_0. Este comportamiento es similar al teórico presentado en la Figura 4.31. Por otra parte, la Figura 4.33 muestra un comportamiento similar, con relación a las tramas perdidas y las que llegan con errores al receptor, pues para la velocidad de transmisión de 64 kbps se obtuvo un mejor comportamiento. A pesar de ello, para obtener un número mínimo de errores de tramas se requiere un valor de E_b/N_0 cercano a 39 dB, para 16 y 64 kbps.

Figura 4.34. BER vs E_c/N_0 en Escenario Exterior



De acuerdo a los valores de las Tablas 4.4 y 4.5, en la Figura 4.34 se muestra la BER del sistema en el escenario exterior en función de la relación E_c/N_0, mientras que la Figura 4.35 muestra la FER del sistema en el escenario exterior en función de la relación E_c/N_0, para cada una de las velocidades de transmisión de datos del sistema.

Figura 4.35. FER vs E_c/N_0 en Escenario Exterior



En las Figuras 4.34 y 4.35 se observa un comportamiento diferente con respecto a E_b/N_0, pues en el caso de BER con respecto a E_c/N_0 se obtuvieron mejores resultados de desempeño a 16 kbps. Además se tiene que los valores de E_c/N_0 se encuentran por debajo de los valores de E_b/N_0, lo cual es lógico, debido a la ganancia adicional del sistema dada por SF, lo que origina un corrimiento negativo de las curvas en el eje horizontal. Se aprecia que las curvas no se desplazaron en la misma proporción, sino dependiendo del valor de SF. Por esta razón la curva correspondiente a 16 kbps presenta un mayor corrimiento, originando mejores resultados a nivel de *chip*. Un aspecto similar en las gráficas de BER con respecto a E_b/N_0 y E_c/N_0, es que la velocidad de transmisión de datos igual a 32 kbps presenta el comportamiento menos favorable, pues requiere los valores de E_b/N_0 superiores para alcanzar un número menor de errores, en comparación con las otras velocidades de transmisión.

4.4.3 Evaluación y Análisis del Desempeño en el Escenario Interior

Para calcular la BER se procedió de manera similar que en la situación anterior, encontrando el número de errores en cada uno de los puntos de medida sobre los puntos del escenario interior en donde fueron tomadas las medidas de potencia de recepción. Esto se hace con el objetivo de asociar los errores encontrados con las condiciones del canal dadas por la relación E_b/N_0. Al igual que en la sección anterior, las tablas presentadas a continuación resumen las medidas realizadas y los resultados obtenidos. En la Tabla 4.7 se muestran los valores de E_b/N_0 para cada una de las velocidades de transmisión de datos del sistema y el valor de E_c/N_0 calculado por medio de la Ecuación 4.11, todos ellos obtenidos en el escenario interior.

Tabla 4.7. Medidas de E_b/N_0 y E_c/N_0 en Escenario Interior

RSSI	E_b/N_0 (dB) – 16 kbps	E_b/N_0 (dB) – 32 kbps	E_b/N_0 (dB) – 64 kbps	E_c/N_0 (dB)
24	70.06426261	67.05396265	64.04366269	52.00246287
19	59.48733861	56.47703865	53.46673869	41.42553887
18	57.37195461	54.36165465	51.35135469	39.31015487
16	53.14118561	50.13088565	47.12058569	35.07938587
15	51.02580061	48.01550065	45.00520069	32.96400087
14	48.91041561	45.90011565	42.88981569	30.84861587
13	46.79503161	43.78473165	40.77443169	28.73323187
12	44.67964661	41.66934665	38.65904669	26.61784687
11	42.56426261	39.55396265	36.54366269	24.50246287
10	40.44887761	37.43857765	34.42827769	22.38707787
9	38.33349261	35.32319265	32.31289269	20.27169287
8	36.21810861	33.20780865	30.19750869	18.15630887
7	34.10272361	31.09242365	28.08212369	16.04092387
6	31.98733861	28.97703865	25.96673869	13.92553887
5	29.87195461	26.86165465	23.85135469	11.81015487

La Tabla 4.8 contiene los valores de BER y la Tabla 4.9 contiene los valores de FER obtenidos experimentalmente en el escenario interior, para cada una de las velocidades de transmisión de datos del sistema.

Tabla 4.8. Medidas de BER en Escenario Interior

BER – 16 kbps	BER – 32 kbps	BER – 64 kbps
0	0	0.00005
0	0	0.0001
0	0	0.00005
0	0	0.00005
0	0	0.0001
0	0.00005	0.0001
0	0	0.0001
0.002473118	0.002258065	0.001451613
0.001030928	0.001458333	0.00072165
0.001173469	0.002157895	0.001648936
0.001927083	0.00212766	0.002977528
0.005290698	0.00725	0.004683544
0.012214286	0.010214286	0.006986301
0.013656716	0.009714286	0.011567164
0.021176471	0.013050848	0.016574074

Tabla 4.9. Medidas de FER en Escenario Interior

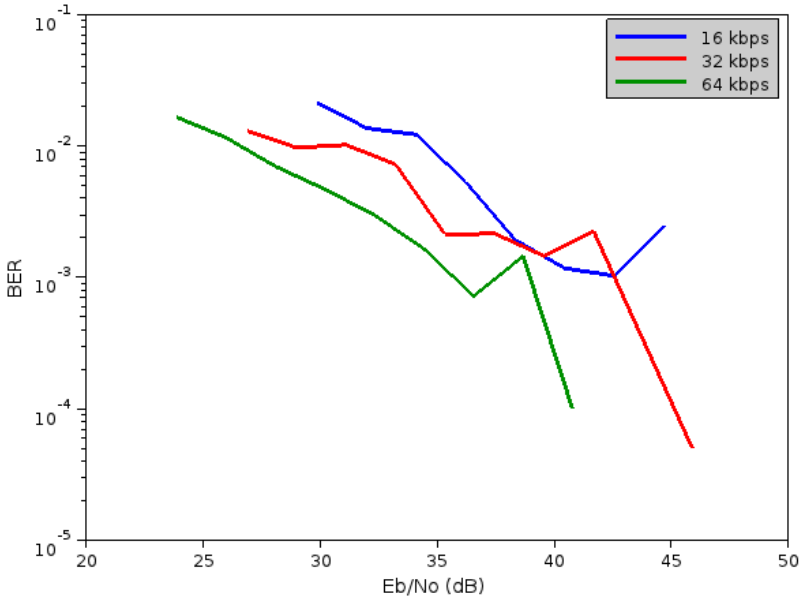
FER – 16 kbps	FER – 32 kbps	FER – 64 kbps
0	0	0.01
0	0	0.01

Tabla 4.9 (Continuación)

0	**0**	**0.01**
0	0	0.01
0	0	0.01
0	0.01	0.01
0	0	0.01
0.29	0.3	0.18
0.15	0.2	0.09
0.19	0.24	0.2
0.24	0.25	0.31
0.49	0.61	0.48
0.77	0.74	0.64
0.82	0.71	0.82
0.88	0.79	0.86

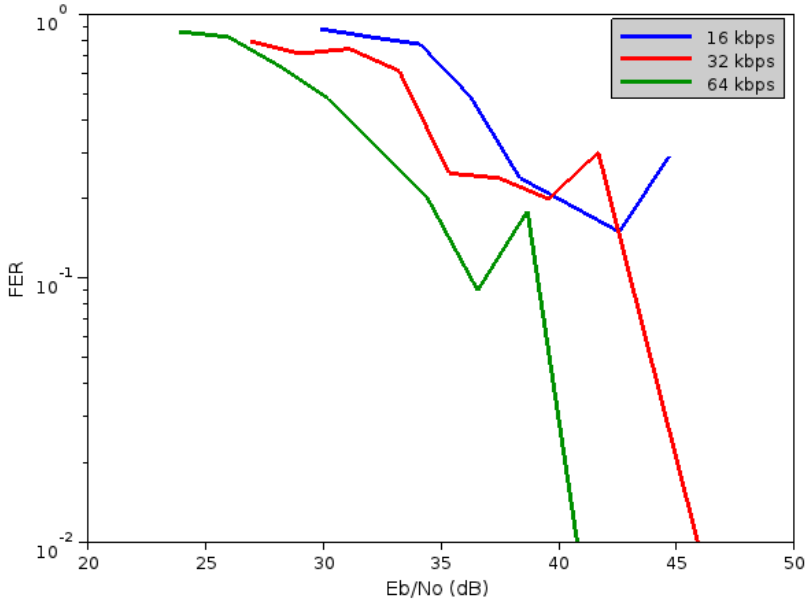
De acuerdo a los valores de la Tabla 4.7 y 4.8, en la Figura 4.36 se muestra la BER del sistema en el escenario interior en función de la relación E_b/N_0, para cada una de las velocidades de transmisión de datos del sistema.

Figura 4.36. BER vs E_b/N_0 en Escenario Interior



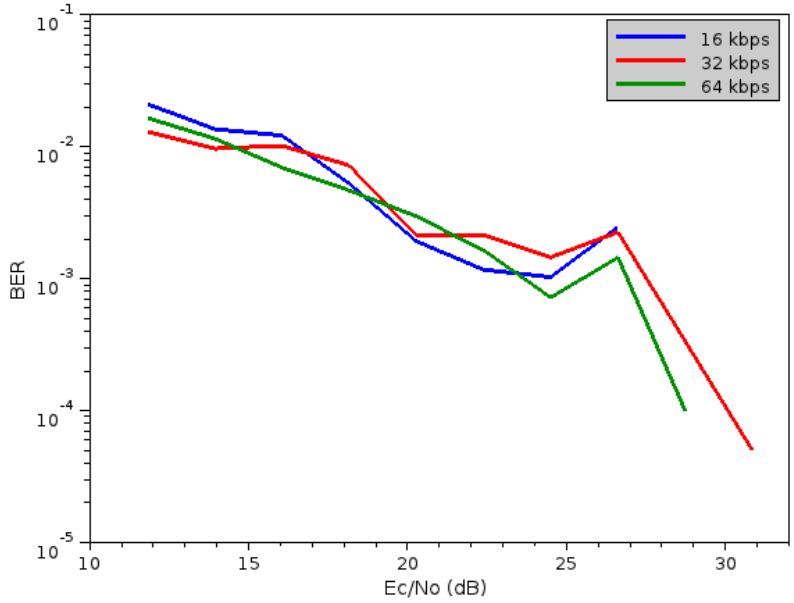
Por otra parte, de acuerdo a los valores de la Tabla 4.7 y 4.9, en la Figura 4.37 se muestra la FER del sistema en el escenario interior en función de la relación E_b/N_0 para cada una de las velocidades de transmisión de datos del sistema.

Figura 4.37. FER vs E_b/N_0 en Escenario Interior



Al igual que en el escenario exterior, el sistema presenta un mejor comportamiento a una velocidad de transmisión de datos igual a 64 kbps, ya que se obtuvieron resultados de BER de 10^{-3} para valores de E_b/N_0 cercanos a 35 dB. En algunos casos se obtuvo mejores resultados a 32 kbps en comparación con 16 kbps. Esto se debe a que en el escenario interior el sistema se ve afectado considerablemente por el multitrayecto, que en algunos puntos se generan desvanecimientos profundos, que pueden a su vez generar Interferencia Inter Simbolo (ISI, *Inter Symbol Interference*), lo que podría incrementar los niveles de BER del sistema.

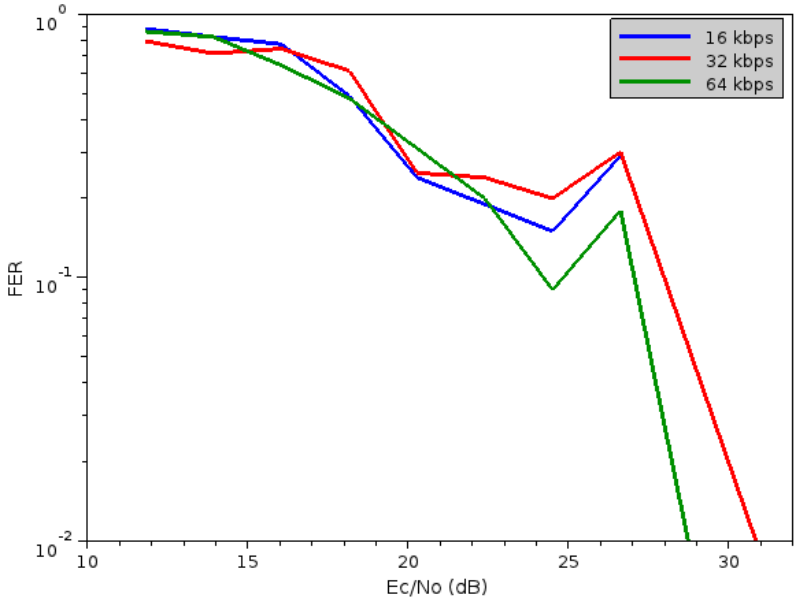
Figura 4.38. BER vs E_c/N_0 en Escenario Interior



De acuerdo a los valores de la Tabla 4.7 y 4.8, en la Figura 4.38 se muestra la BER del sistema en el escenario interior en función de la relación E_c/N_0 para cada una de las velocidades de transmisión de datos del sistema.

Por otra parte, de acuerdo a los valores de la Tabla 4.7 y 4.9, en la Figura 4.39 se muestra la FER del sistema en el escenario interior en función de la relación E_c/N_0 para cada una de las velocidades de transmisión de datos del sistema.

Figura 4.39. FER vs E_c/N_0 en Escenario Interior



El comportamiento de BER y FER con respecto a E_c/N_0 es relativamente similar en los tres casos, como se aprecia en las Figuras 4.38 y 4.39, para valores de E_c/N_0 menores a 22 dB. Como se mencionó anteriormente, en el escenario interior la propagación se ve afectada por las condiciones de multitrayecto debido a las múltiples reflexiones de la señal a lo largo del pasillo. Esto implica que en algunos puntos del pasillo ocurre un incremento del nivel de potencia de las señales recibidas, lo cual incrementó el nivel de E_b/N_0, y de la misma manera se redujo la BER del sistema, teniendo en cuenta que el desvanecimiento presente en algunos puntos implica valores de BER menos favorables.

4.4.4 Análisis Comparativo del Desempeño del Sistema de Comunicación

A partir del análisis del desempeño realizado en las dos secciones anteriores, es posible hacer una comparación entre los resultados obtenidos experimentalmente tanto en el escenario exterior como en el interior, con el objetivo de determinar si existe similitud en el comportamiento del sistema, ya que se espera obtener resultados comparables de BER y FER para valores similares de E_b/N_0 en ambos escenarios.

En las Figuras 4.40, 4.41 y 4.42 se presentan las comparaciones de los resultados de BER con respecto a E_b/N_0 para 16, 32 y 64 kbps, respectivamente.

Figura 4.40. BER vs E_b/N_0 en Escenarios Exterior e Interior a 16 kbps

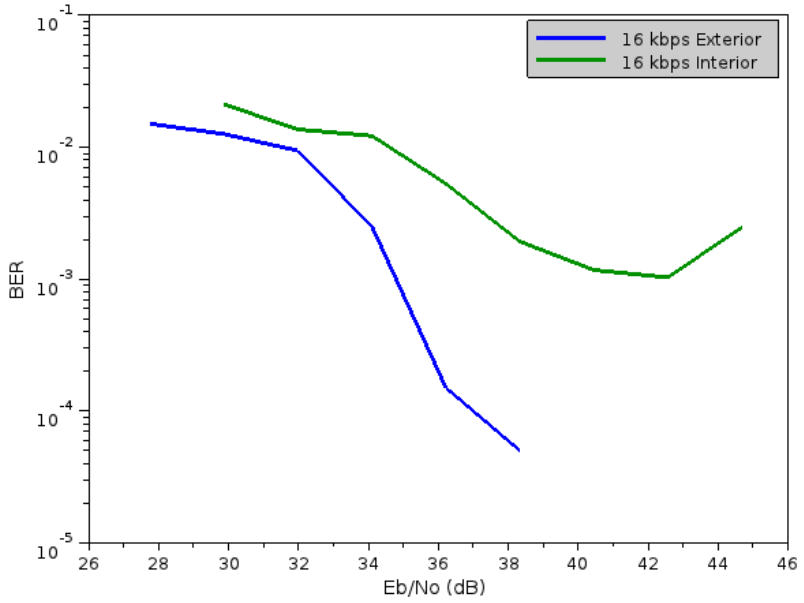
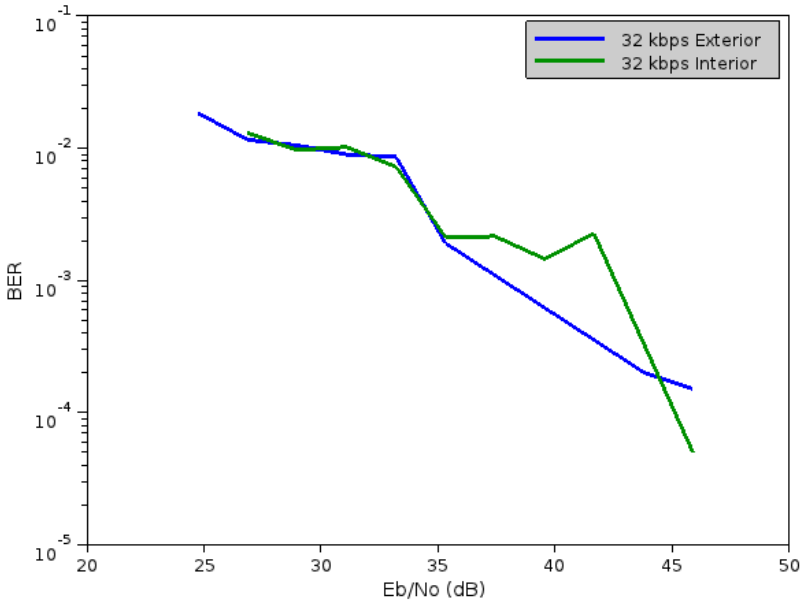
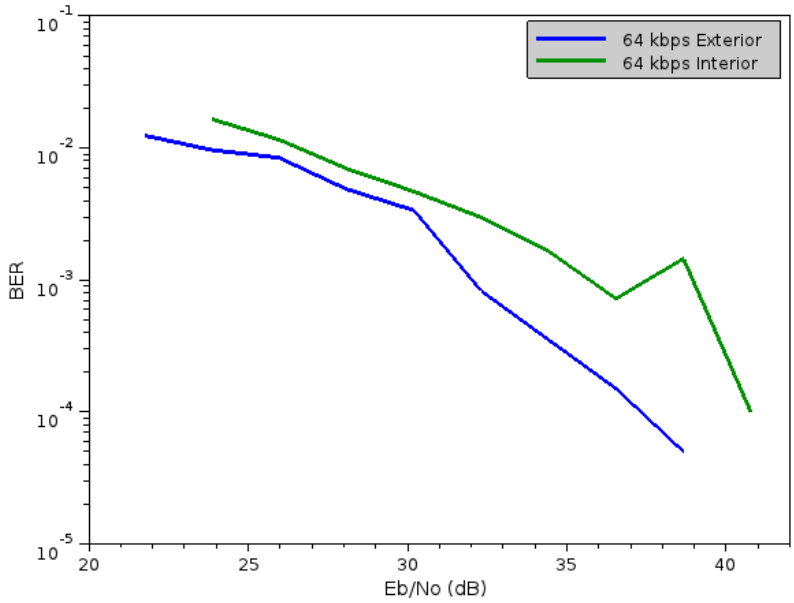


Figura 4.41. BER vs E_b/N_0 en Escenarios Exterior e Interior a 32 kbps



En las figuras comparativas de desempeño en el escenario exterior se observa que para cada valor de E_b/N_0 se tienen diferentes resultados de BER, a pesar de que teóricamente estos deben ser cercanos, ya que los valores de E_b/N_0 deben generar un número similar de errores tanto en el escenario exterior como en el interior. Sin embargo, los resultados obtenidos son aceptables, ya que, a pesar de que su comportamiento es exponencialmente decreciente, los valores de BER son comparables, en el caso de 32 y 64 kbps, para valores de E_b/N_0 menores a 35 dB.

Figura 4.42. BER vs E_b/N_0 en Escenarios Exterior e Interior a 64 kbps



Por otra parte, en las Figuras 4.43, 4.44 y 4.45 se presentan las gráficas comparativas de desempeño con los resultados de FER con respecto a E_b/N_0 para las velocidades de 16, 32 y 64 kbps, respectivamente.

Figura 4.43. FER vs E_b/N_0 en Escenarios Exterior e Interior a 16 kbps

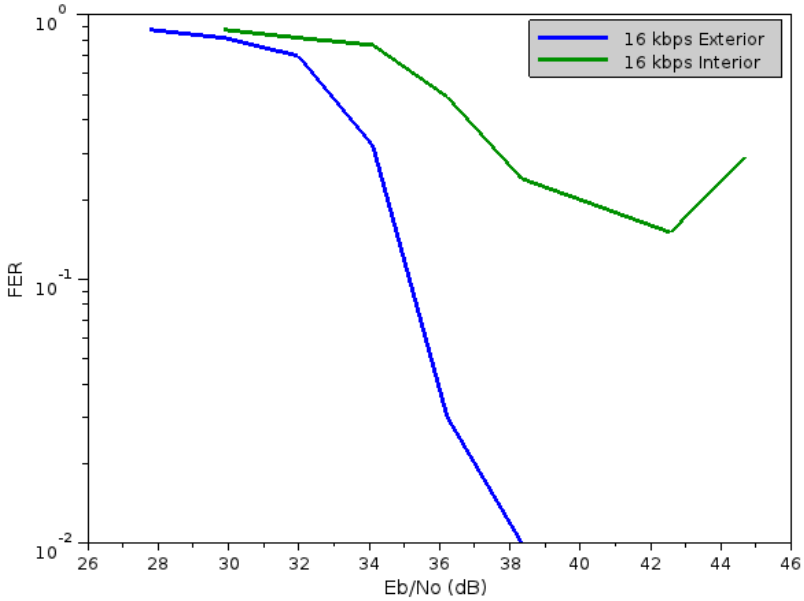


Figura 4.44. FER vs E_b/N_0 en Escenarios Exterior e Interior a 32 kbps

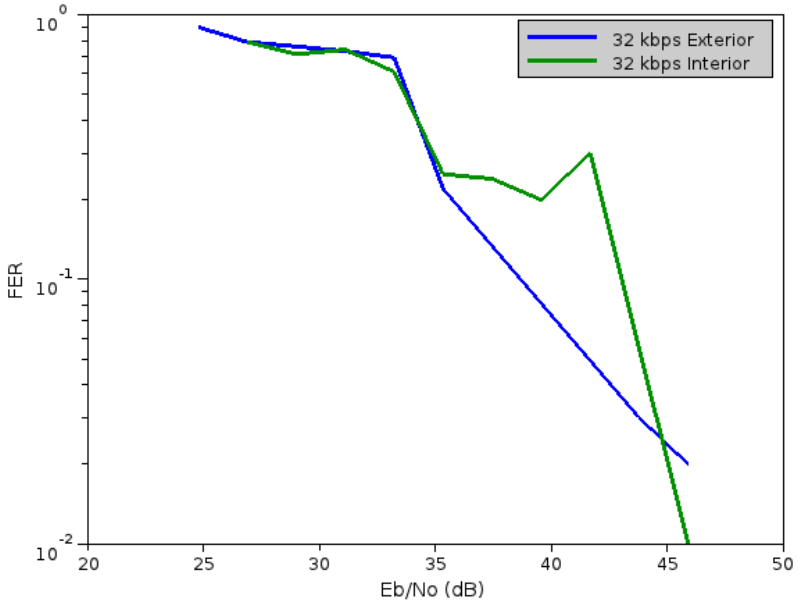
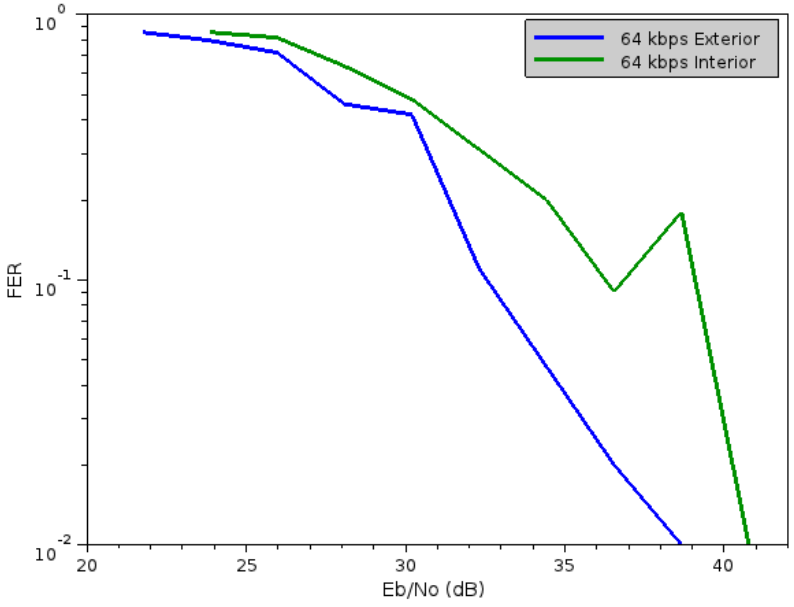


Figura 4.45. FER vs E_b/N_0 en Escenarios Exterior e Interior a 64 kbps



En términos generales, el comportamiento del sistema en cuanto a FER es similar que en la situación en que se evaluó la BER, pues a medida que el sistema posee condiciones menos favorables, el número de bits erróneos se incrementa, lo que implica un mayor número de tramas erróneas. De acuerdo a las tres figuras anteriores, el mejor comportamiento del sistema en cuanto a FER ocurre cuando este toma valores de 10^{-2}, lo que significa que tan solo 1 de las 100 tramas enviadas fue detectada con errores. El sistema logra alcanzar este valor de FER para valores de E_b/N_0 cercanos a 40 dB en los tres casos.

4.4.5 Evaluación y Análisis del Desempeño ante Interferencia

Uno de los aspectos que más afecta a los sistemas DSSS es la interferencia, ya que la presencia de una señal fuerte con un ancho de banda igual o superior al de la señal de interés y en las cercanías del receptor puede bloquear parcial o totalmente la comunicación. Por esta razón, es necesario examinar el comportamiento del sistema de comunicación en presencia de interferencia, y determinar de qué forma la información recibida se ve afectada por este fenómeno.

La situación de mayor interés corresponde al sistema de comunicación ante interferencia en espacios interiores, debido a que con mayor frecuencia al interior de las edificaciones existen dispositivos de comunicación que ocupan la banda ISM de 2.4 GHz, tales como dispositivos de redes inalámbricas como enrutadores o Puntos de Acceso (AP, *Access Points*) inalámbricos, cuyas señales se confinan al interior de las oficinas y los pasillos, por lo que la intensidad de las señales producidas puede llegar a ser mayor en comparación con una disposición similar en un escenario exterior.

En sistemas DSSS, un parámetro utilizado para analizar el desempeño ante interferencia es la relación energía de *chip* con respecto a interferencia E_c/I_0[32], que corresponde a la relación entre la energía por unidad de *chip* y la densidad espectral de potencia de la interferencia presente en el canal. En general la energía de la señal es menor que la interferencia total, lo que origina valores de E_c/I_0 negativos [30]. Tanto la potencia de la portadora deseada como la potencia de la interferencia son medidas por el dispositivo receptor por medio del RSSI. La relación E_c/I_0 se describe mediante la Ecuación 4.14.

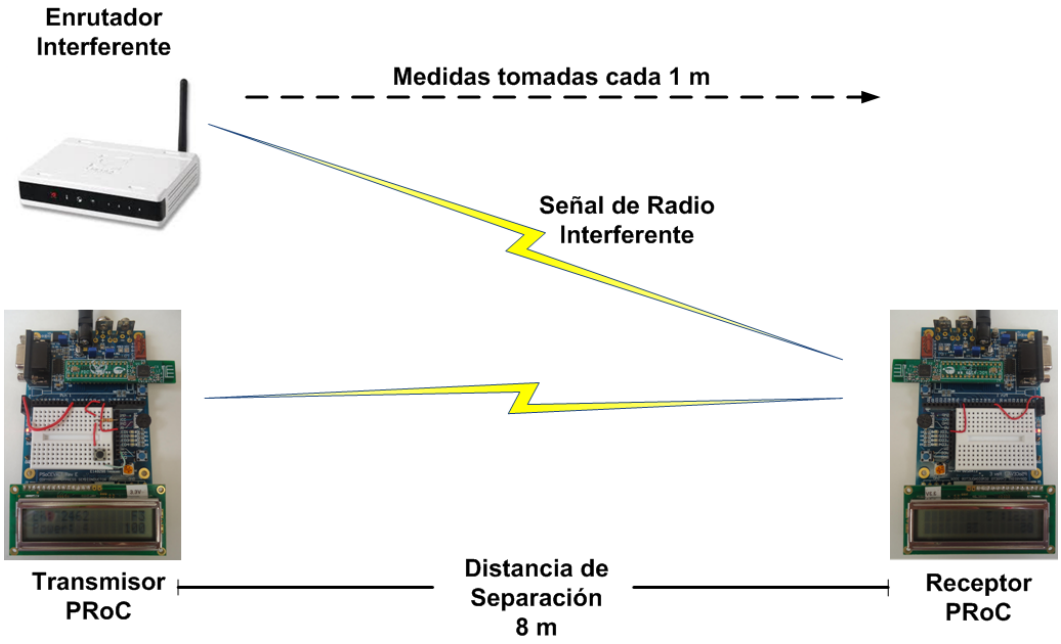
$$\frac{E_c}{I_0} = \frac{P_R/BW_c}{P_I/B} = \frac{P_R}{P_I} \tag{4.14}$$

El primer elemento utilizado para la generación de interferencia fue un enrutador inalámbrico de marca Encore. Este dispositivo se configuró de tal forma que transmitió en el canal 11 del estándar Wi-Fi correspondiente a 2462 MHz, con potencia mínima de transmisión (0 dBm). Las pruebas consisten en modificar la distancia entre el enrutador inalámbrico y el dispositivo PRoC utilizado como receptor, de modo que la intensidad de la potencia de interferencia varíe en función de la distancia.

La separación entre el transmisor y el receptor deseado es de 8 m, y la distancia entre el enrutador y el receptor deseado se modifica en pasos de 1 m. Al igual que en las pruebas de desempeño realizadas en las dos secciones anteriores, se toma un número de medidas alrededor de 20 para obtener resultados válidos estadísticamente. En la Figura 4.46 se observa la ubicación los dispositivos para la realización de las pruebas.

[32] La relación E_c/I_0 corresponde a la relación SIR descrita en la sección 1.4, ya que ambas relacionan la potencia de la señal deseada con respecto al nivel de interferencia presente en el canal.

Figura 4.46. Interferencia con el Enrutador Inalámbrico Marca Encore



La Tabla 4.10 contiene los valores de E_c/I_0 obtenidos a partir de los valores de potencia de recepción de la señal deseada y la señal interferente. La Tabla 4.10 contiene los valores de BER y la Tabla 4.12 contiene los valores de FER, obtenidos en el escenario ante interferencia ocasionada por el enrutador inalámbrico, para cada una de las velocidades de transmisión de datos del sistema. Las tablas presentadas a continuación contienen los resúmenes de las mediciones y los resultados obtenidos, dado que en varios puntos de medida se obtuvieron los mismos valores de E_c/I_0.

Tabla 4.10. Medidas de E_c/I_0 ante Interferencia del Enrutador Inalámbrico

Potencia de Recepción Deseada (dBm)	Potencia de Recepción Interferente (dBm)	E_c/I_0 (dB)
-71.730769	-33.653846	-38.076923
-71.730769	-35.769231	-35.961538
-71.730769	-37.884615	-33.846154
-71.730769	-42.115385	-29.615384
-71.730769	-44.230769	-27.5
-71.730769	-46.346154	-25.384615

Tabla 4.11. Medidas de BER ante Intereferencia del Enrutador Inalámbrico

BER – 16 kbps	BER – 32 kbps	BER – 64 kbps
0.008164557	0.015147059	0.018333333
0.004705882	0.008055556	0.010571429
0.003138686	0.010974026	0.008558559

Tabla 4.11 (Continuación)

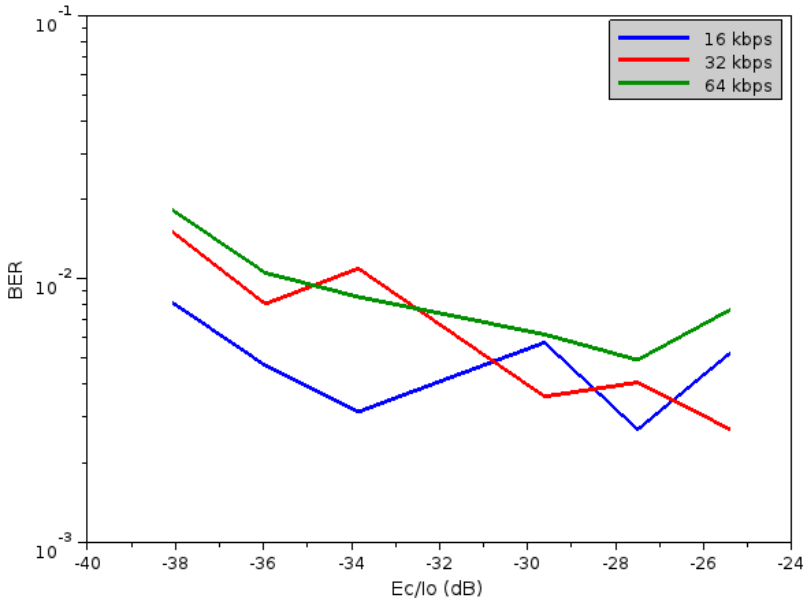
0.005746269	**0.003586957**	**0.006171875**
0.0026875	0.004054054	0.004936709
0.005266667	0.002686567	0.007671233

Tabla 4.12. Medidas de FER ante Interferencia del Enrutador Inalámbrico

FER – 16 kbps	FER – 32 kbps	FER – 64 kbps
72.5	87	85.5
51	72	74
42.5	76.5	67.5
60	65	53
35	47	47
47	48	53

A partir de los valores de las Tablas 4.10 y 4.11, en la Figura 4.47 se muestra la BER del sistema en función de la relación E_c/I_0, mientras que, de acuerdo a las Tablas 4.10 y 4.12, en la Figura 4.48 se muestra la FER en función de la relación E_c/I_0, para cada una de las velocidades de transmisión de datos del sistema, con el enrutador inalámbrico como dispositivo interferente.

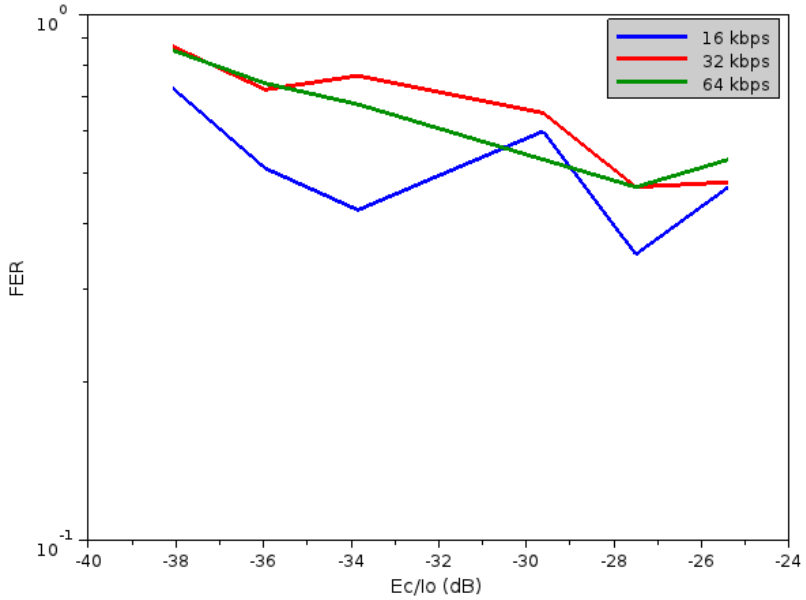
Figura 4.47. BER vs E_c/I_0 ante Interferencia de Enrutador Inalámbrico



Como se aprecia en las Figuras 4.47 y 4.48, el sistema presentó valores muy bajos de E_c/I_0, entre -24 dB y -40 dB. Esto se debe a que la potencia de la señal interferente se encontraba en un nivel superior que la potencia de la señal deseada. Por otra parte, el sistema presenta un mejor desempeño en 16 kbps. Esto se debe a que existe mayor probabilidad de recuperar la información original, ya que se dispone de un número

superior de *chips* por cada bit dado por el valor de SF, lo que mejora las capacidades para realizar la correlación de las señales de espectro ensanchado en el receptor.

Figura 4.48. FER vs E_c/I_0 ante Interferencia de Enrutador Inalámbrico



El segundo elemento utilizado para la generación de interferencia fue uno de los dispositivos Nordic nRF24LU1-DK[33] utilizados en el desarrollo del trabajo de grado titulado "Análisis Y Evaluación de Desempeño de un Sistema de Comunicación de Datos Multipropósito en la Banda de 2.4 GHz"[34] [31], los cuales poseen características similares a los dispositivos PRoC, ya que operan en la banda ISM de 2.4 GHz, con un ancho de banda de 1 MHz, haciendo uso del esquema de modulación GFSK y velocidades de transmisión de datos de hasta 2 Mbps. El motivo por el cual se decidió generar interferencia con los dispositivos Nordic es que cuentan con la posibilidad de configurarlos para operar en uno de los 83 canales separados 1 MHz entre 2.400 GHz y 2.483 GHz. En esta situación se trabajó en la frecuencia de operación igual a 2.478 GHz, tanto para los dispositivos PRoC como para el Nordic, cuya potencia de transmisión fue de -18 dBm, junto con una ganancia de antena igual a 2 dB. La separación entre el transmisor y el receptor deseado es de 8 m, y la distancia entre el dispositivo Nordic y el receptor deseado se modificó en pasos de 1 m.

La Tabla 4.13 contiene los valores de E_c/I_0 obtenidos a partir de la potencia de recepción de la señal deseada y la señal interferente. La Tabla 4.14 contiene los valores de BER y la Tabla 4.15 los valores de FER, obtenidos en el escenario ante interferencia ocasionada por el dispositivo Nordic, para cada una de las velocidades de transmisión de datos del sistema. Las tablas presentadas a continuación contienen los resúmenes de las

[33] Las especificaciones del kit de desarrollo completo se encuentran disponibles en: http://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24LU1.

[34] Trabajo de grado en desarrollo en la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca en 2012.

mediciones y los resultados obtenidos, dado que en varios de los puntos de medida se obtuvieron los mismos valores de E_c/I_0.

Tabla 4.13. Medidas de E_c/I_0 ante Interferencia de Dispositivo Nordic

Potencia de Recepción Deseada (dBm)	Potencia de Recepción Interferente (dBm)	E_c/I_0 (dB)
-71.730769	-48.461538	-23.269231
-71.730769	-61.153846	-10.576923
-71.730769	-63.269231	-8.461538
-71.730769	-67.5	-4.230769
-71.730769	-73.846154	2.115385
-71.730769	-75.961538	4.230769

Tabla 4.14. Medidas de BER ante Interferencia de Dispositivo Nordic

BER – 16 kbps	BER – 32 kbps	BER – 64 kbps
0.0475	0.011702128	0.000833333
0.19	0.009509804	0.000724638
0.3325	0.00754902	0.001985294
0.306666667	0.005510204	0.000410959
0.000966851	0.00251634	0.000918367
0	0.003219178	0.003630952

Tabla 4.15. Medidas de FER ante Interferencia de Dispositivo Nordic

FER – 16 kbps	FER – 32 kbps	FER – 64 kbps
100	60	41
100	56	32.5
100	56	43
100	58	29
22.5	30.5	27.5
0	30	23

De acuerdo a los valores de las Tablas 4.13 y 4.14, en la Figura 4.49 se muestra la BER del sistema en función de la relación E_c/I_0, mientras que según los valores de las Tablas 4.13 y 4.15, en la Figura 4.50 se muestra la FER del sistema en función de la relación E_c/I_0 para cada una de las velocidades de transmisión de datos del sistema, con el dispositivo Nordic como elemento interferente.

Según las Figuras 4.49 y 4.50 el sistema aparentemente presenta un comportamiento desfavorable para la velocidad de transmisión de datos de 16 kbps, mientras que para la velocidad de 64 kbps se obtuvieron mejores resultados de desempeño, ya que la BER se mantiene alrededor de 10^{-3}. En cuanto a FER, se obtuvo que en la mayoría de medidas

los valores fueron iguales a 1, lo que significa que todas las tramas recibidas llegaron con errores.

Figura 4.49. BER vs E_c/I_0 ante Interferencia de Dispositivo Nordic

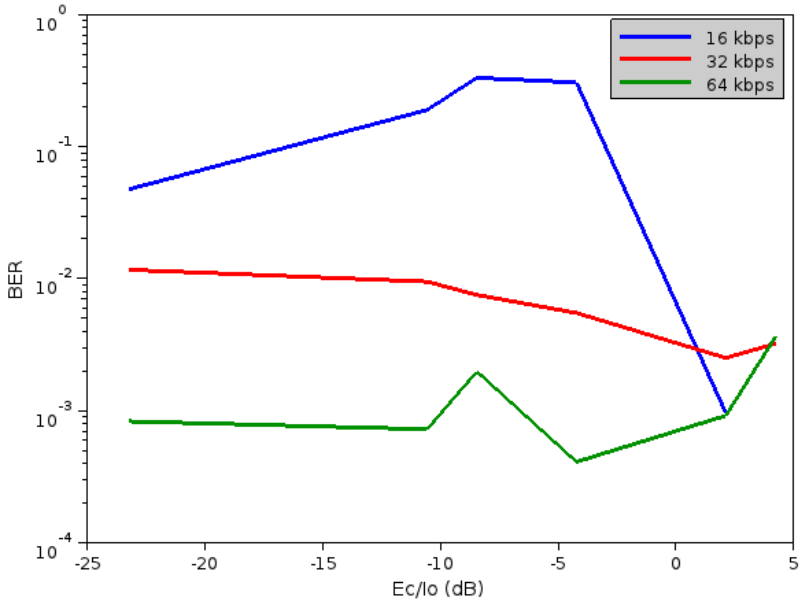
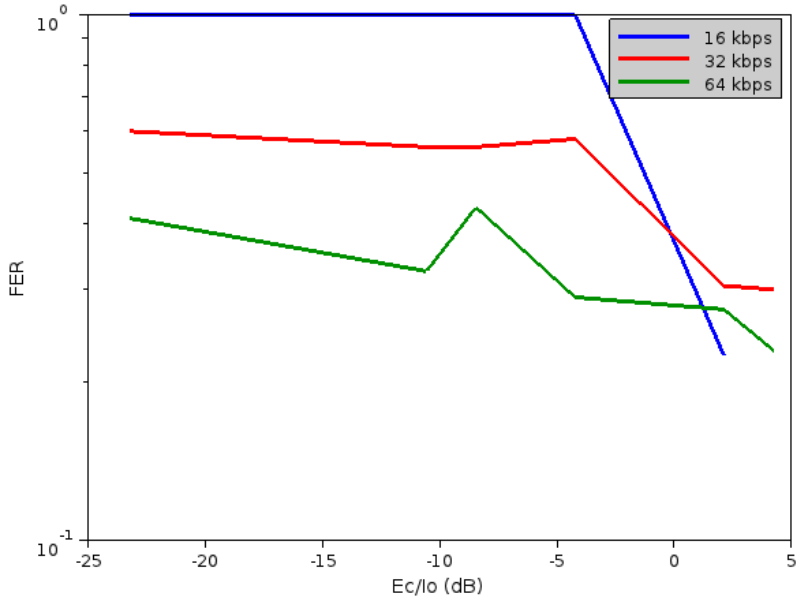


Figura 4.50. FER vs E_c/I_0 ante Interferencia de Dispositivo Nordic



Una diferencia entre los resultados ante la interferencia del enrutador inalámbrico y el dispositivo Nordic se encuentra en que los valores de E_c/I_0 obtenidos en la última situación fueron mayores, pues las señales transmitidas por el dispositivo Nordic poseían un nivel de potencia relativamente inferior en comparación con las señales producidas por el enrutador inalámbrico. Sin embargo, en ambas situaciones de interferencia se obtuvieron

valores negativos de E_c/I_0. Esto significa que en la mayoría de los casos la potencia de la interferencia medida en el receptor fue mayor que la potencia de las señales deseadas, lo que ocasionó el enmascaramiento de las señales de interés por parte de las señales interferentes.

Para mejorar los valores de E_c/I_0 es necesario incrementar la potencia de transmisión para que el sistema posea un mejor comportamiento ante la interferencia causada por otros sistemas, y así obtener un mejor desempeño. Cabe aclarar que los niveles de potencia de transmisión no deben exceder ciertos límites, debido a que el sistema opera en la banda ISM de 2.4 GHz, donde es necesario respetar la regulación para no interferir de manera excesiva a otros sistemas que operen en la misma frecuencia.

5. APLICACIONES DE LOS DISPOSITIVOS PROC

Una vez realizada la evaluación y análisis del desempeño del prototipo de comunicación expuesto en el capítulo anterior, se definen las potenciales aplicaciones de los dispositivos PRoC en sistemas de comunicación de datos, telemetría, monitoreo y control, de tal forma que se aprovechen al máximo las ventajas de la técnica de transmisión DSSS y las prestaciones especiales del kit de desarrollo.

Gracias a las diferentes características y opciones configurables del kit de desarrollo CY3653 del fabricante *Cypress Semiconductor Corp*, y con la experiencia obtenida a lo largo del desarrollo de este trabajo de grado, se comprobó que este kit es una gran herramienta de trabajo con capacidades de un microcontrolador PSoC, en conjunto con un bloque de radiofrecuencia basado en la técnica de transmisión DSSS que otorga capacidades de comunicación inalámbrica de bajo consumo de recursos energéticos tales como baterías, indispensables para el funcionamiento de sistemas en los que no es posible conectar los dispositivos a la red eléctrica.

La implementación de dispositivos PRoC no solo está ligada al entono de la industria y la ingeniería, sino que además existen múltiples aplicaciones en elementos de uso frecuente en los hogares, ya que poseen una interfaz de comunicación inalámbrica, la cual brinda flexibilidad y movilidad a los usuarios. Por otra parte, el hecho de que los PRoC operan en la banda ISM de 2.4 GHz, definidas para aplicaciones industriales, científicas y médicas, hace que sean de gran utilidad en el desarrollo de aplicaciones en estas áreas de trabajo.

Por lo general, las posibles aplicaciones con dispositivos PRoC pueden ser implementadas en escenarios en donde estén presentes señales de interferencia generadas por otros equipos que funcionan en la misma banda de frecuencias, tales como: enrutadores inalámbricos, dispositivos Wi-Fi, teléfonos inalámbricos, dispositivos Bluetooth, entre otros, que interfieren notoriamente en el desempeño, si no se utiliza algún tipo de algoritmo o sistema de protección. Por esta razón es viable el funcionamiento de nuevos componentes electrónicos basados en dispositivos PRoC, porque se comunican bajo el protocolo *WirelessUSB*[35], o si se desea mediante un protocolo particular como el caso presentado en este trabajo de grado.

Los sistemas desarrollados con dispositivos PRoC cuentan con la ventaja de implementar la técnica de transmisión DSSS, la cual se encarga de ensanchar la señal de información original haciendo uso de una secuencia pseudo-aleatoria. Mediante rutinas de código es posible asignar diferentes secuencias pseudo-aleatorias, así como es posible seleccionar un canal para realizar la transmisión de la información potencial. Por esta razón es posible establecer un sistema de comunicación de acceso múltiple CDMA en combinación con FDMA.

Por otro lado, aprovechando la baja potencia empleada por los PRoC y por lo tanto su bajo consumo de energía, la carga de la batería tendría un tiempo de vida más

[35] Para el análisis del desempeño realizado en este trabajo de grado no se implementó en protocolo *WirelessUSB*, sino que se desarrolló un mecanismo simple de envío y detección de tramas mediante la programación del dispositivo PRoC.

prolongado, lo cual influye directamente en los costos de operación de los dispositivos desarrollados con PRoC.

Por último, las características del circuito integrado CYWUSB6953 descritas en el Capitulo 2 permiten desarrollar y crear sistemas inteligentes que requieren ágil procesamiento de grandes cantidades de información.

5.1 SISTEMAS DE COMUNICACIÓN DE DATOS

La aplicación más común de los PRoC corresponde a Dispositivos de Interfaz Humana (HID, *Human Interface Devices*) inalámbricos, los cuales se destacan principalmente por ser elementos utilizados por los seres humanos para el control y operación de los sistemas informáticos y de entretenimiento [32]. Ejemplos típicos de dispositivos de tipo HID incluyen:

- Teclados y dispositivos señaladores, tales como ratón o *mouse* estándar[36] y palancas de mano *(joysticks)*.
- Controles para videojuegos o dispositivos de simulación, por ejemplo: guantes de datos, volantes y pedales del timón.
- Lectores de códigos de barras.
- Juguetes.

Gracias a las ventajas de los sistemas basados en DSSS, es posible que diferentes dispositivos HID funcionen simultáneamente, pues al asignar diferentes secuencias pseudo-aleatorias a cada uno de los dispositivos, no se genera interferencia considerable entre ellos dada la baja densidad espectral de potencia de las otras señales, y en caso de que esto ocurra, los dispositivos pueden cambiar el canal ocupado, midiendo el nivel de interferencia mediante RSSI.

5.2 SISTEMAS DE TELEMETRÍA, MONITOREO Y CONTROL

La telemetría es una tecnología que permite la creación de sistemas encargados de realizar la medición remota de magnitudes físicas y el posterior envío de la información hacia un punto central del sistema. El envío de información hacia el punto central del sistema de telemetría se realiza típicamente mediante comunicación inalámbrica, aunque también se puede realizar por otros medios (teléfono, redes de computadores, enlace de fibra óptica, etc.). Los sistemas de telemetría reciben las instrucciones y los datos necesarios para operar, mediante telecomandos [33].

La telemetría se utiliza en grandes sistemas, tales como naves espaciales, plantas químicas, redes de suministro eléctrico, redes de suministro de gas, entre otras empresas de provisión de servicios públicos, debido a que facilita el monitoreo automático y el registro de las mediciones, así como el envío de alertas o alarmas al centro de control, con el fin de asegurar un funcionamiento seguro y eficiente [34]. Por ejemplo, las agencias espaciales como la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA,

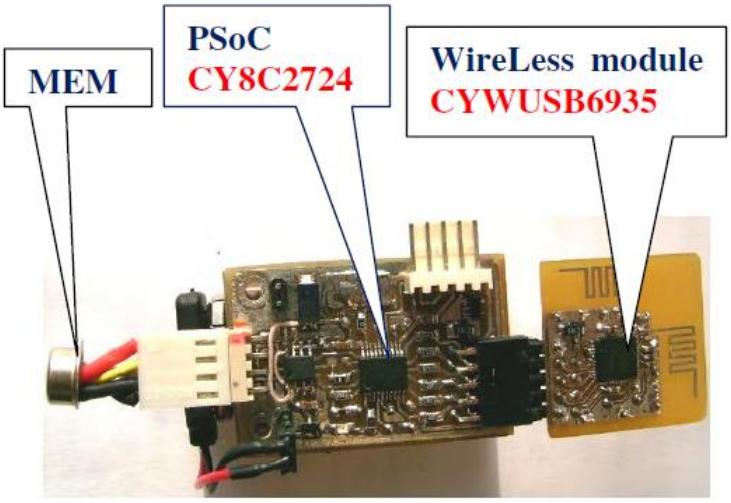
[36] Dentro de sus productos, *Cypress Semiconductor* ofrece una implementación de los dispositivos PRoC en Teclados y *Mouse* inalámbricos, la cual se encuentra disponible en: http://www.cypress.com/?rID=14422.

National Aeronautics and Space Administration)[37] y la Agencia Espacial Europea (ESA, *European Space Agency*)[38] utilizan sistemas de telemetría y de telecontrol para controlar sus satélites y naves espaciales. Otros ejemplos típicos son:

- Redes de monitoreo, compuestas por sensores de variables físicas, codificadores y decodificadores de información de medidas, transmisores de información, para monitorear presión, temperatura, luminosidad, entre otras.
- Sistemas de alarma inteligente
- Sistemas domóticos.
- Sistemas de automatización.
- Aplicaciones industriales.

Dentro de las aplicaciones específicas desarrolladas con dispositivos PSoC y PRoC se encuentran algunos sistemas de medición de variables externas, tales como el Sensor Inteligente de Presión [35] de la Figura 5.1 y el Sensor inteligente de Fuga de Gas [36], los cuales se desarrollaron en el Instituto Politécnico Kyiv de Ucrania, basados en los sistemas PSoC junto con Sistemas Microelectromecanicos (MEMS, *MicroElectroMechanical Systems*)[39]. Estos sensores cuentan con ventajas de alta precisión, estabilidad de características físicas y durabilidad. Al combinar estas características junto con los componentes disponibles de los dispositivos PRoC, es posible obtener un sistema robusto de medición de magnitudes físicas, que incluye la amplificación, digitalización y transmisión vía radio de la información.

Figura 5.1. Sensor Inteligente junto con Módulo Radio PRoC [35]



La utilización de sensores de medición junto a dispositivos PRoC es económica y no es complicada, pues la programación de los microcontroladores es robusta, intuitiva y de alto nivel.

[37] La NASA es una agencia gubernamental responsable de programas espaciales en Estados Unidos
[38] La ESA es una organización intergubernamental Europea dedicada a la exploración espacial.
[39] Tecnología de dispositivos mecánicos muy pequeños controlados por electricidad y construidos sobre películas delgadas.

6. CONCLUSIONES

Tras cumplir con los objetivos propuestos en el presente trabajo de grado, en el que se implementó un sistema prototipo de comunicación de datos vía radio de corto alcance en 2.4 GHz, en el cual se resumieron las ventajas asociadas a los sistemas basados en DSSS y se recopilaron las características físicas y operativas de los dispositivos PRoC, fue posible obtener conocimiento acerca de su funcionamiento, operación a nivel de radiofrecuencia, el comportamiento de las ondas radioeléctricas en diferentes condiciones de propagación y escenarios (interiores y exteriores), y técnicas de modulación necesarias para la transmisión adecuada de la información. Se evaluó el desempeño del prototipo en diferentes escenarios, y se obtuvo experimentalmente diferentes resultados que aportan a las líneas de investigación y desarrollo y al campo técnico y científico del Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca.

Los resultados obtenidos servirán de referencia para aplicaciones posteriores desarrolladas por estudiantes y profesores del Departamento de Telecomunicaciones y sus grupos de investigación (GRIAL y GNTT), para incentivar el desarrollo de diversas aplicaciones que satisfagan las posibles necesidades de comunicación.

Además el desarrollo de este trabajo de grado sirve como soporte al proyecto de investigación “PROTOTIPO DE COMUNICACIÓN DE DATOS MULTIPROPÓSITO VÍA RADIO DE CORTO ALCANCE EN 2.4 GHZ”, el cual es un proyecto que se encuentra actualmente en curso en la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, con la debida aprobación y financiación de la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Cauca.

Finalmente, en este capítulo se presentan las conclusiones y las recomendaciones sobre futuros trabajos de grado, los cuales darán continuidad al estudio de los sistemas inalámbricos para comunicación de datos basados en dispositivos PRoC haciendo uso de la técnica de transmisión DSSS.

6.1 CONCLUSIONES

- La implementación de un sistema de comunicación de datos de corto alcance vía radio en 2.4 GHz basado en DSSS requiere de la configuración necesaria de los parámetros del sistema, de acuerdo a las exigencias que se deben cumplir, en cuanto a calidad y cobertura. La selección adecuada de estos parámetros permitió un mejor desempeño del sistema, en escenarios exteriores, interiores y ante interferencia.

- Los dispositivos PRoC incluidos en el kit de desarrollo CY3653 de *Cypress Semiconductor* son precisos y estables en frecuencia, necesario para establecer exitosamente la comunicación vía radio. En las medidas se obtuvieron corrimientos en la frecuencia portadora ocasionada por el incremento en la temperatura. Sin embargo estos valores son aceptables ya que se encuentran dentro del rango de estabilidad en frecuencia especificado por el fabricante

- El ancho de banda práctico de las señales transmitidas es mayor que el ancho de banda de cada uno de los canales definidos para los dispositivos PRoC. Por esta razón solamente se hace uso de las componentes más significativas del espectro, ya que según las especificaciones, el ancho de banda útil corresponde a la separación en frecuencia entre los puntos del espectro que se encuentran 6 dB por debajo del nivel de la portadora, lo que indica que el sistema desprecia las componentes cuya potencia esté 4 veces por debajo del nivel máximo.

- Los resultados obtenidos a partir de la simulación mediante la herramienta Wireless InSite en los dos escenarios son aceptables, pues son comparables con los resultados obtenidos en las situaciones reales. La diferencia entre estos resultados radica en el hecho de que a nivel de simulación existen aspectos que se toman de manera ideal, como es el caso de los efectos que sufren las señales radioeléctricas en el entorno y la representación ideal de los patrones de radiación de las antenas, que fue uno de los elementos que influyó considerablemente en los resultados de la simulación.

- La cobertura del sistema de comunicación de datos desarrollado en este trabajo de grado fue superior en el escenario interior debido a que se alcanzaron a cubrir distancias superiores a 45 m con una potencia de transmisión de -9.7 dBm, mientras que en el escenario exterior la distancia máxima que se logró fue de 30 m para el mismo valor de potencia de transmisión. Esto se debe al fenómeno de propagación denominado efecto guía de onda, ocasionado por el confinamiento de la energía en un espacio cerrado. Este fenómeno comúnmente es aprovechado para incrementar la cobertura, teniendo en cuenta que el sistema se ve sometido a desvanecimientos profundos en algunos puntos del escenario.

- El multitrayecto presente en el escenario interior producido por las múltiples reflexiones de las señales radioeléctricas en las paredes del pasillo ocasionó que en algunas situaciones los ecos de una misma señal incidieran en el receptor con diferentes componentes de amplitud, retardo y fase, dando como resultado la aparición de desvanecimientos profundos. Sin embargo fue posible determinar que el canal afecta a todas las componentes de manera similar, generando en ellas la misma atenuación y cambio de fase lineal, pues el ancho de banda de coherencia en cada uno de los puntos de medida es superior al ancho de banda ocupado por las señales transmitidas. En otras palabras, el canal modelado en el escenario interior presenta desvanecimiento plano en frecuencia.

- De acuerdo a la evaluación y análisis de desempeño del prototipo de comunicación de datos vía radio desarrollado en este trabajo de grado, se pudo determinar que el desempeño a nivel físico del prototipo de comunicación es aceptable, ya que los resultados obtenidos a nivel de simulación determinaron que se obtienen menores valores de BER a una velocidad de transmisión de 64 kbps correspondiente a un SF igual a 16. De acuerdo a esto, es posible realizar la implementación de diferentes sistemas funcionando a la máxima velocidad de transmisión permitida para los dispositivos PRoC.

- Teóricamente el sistema implementado es capaz de soportar más errores a nivel de *chip* a una velocidad de transmisión de 16 kbps correspondiente a un SF igual a 64, pues se tiene un mayor número de *chips* por cada bit de información. En las medidas de BER ante la interferencia del enrutador se obtuvo el comportamiento anterior, mientras que al generar interferencia con el dispositivo Nordic se obtuvo el comportamiento contrario, pues el sistema presentó un desempeño mejor a 64 kbps. La razón por las cual se presentó este fenómeno fue que la energía de las señales transmitidas por el enrutador se encontraban distribuidas sobre un ancho de banda superior al ancho de banda ocupado por las señales transmitidas por los equipos Nordic, el cual era comparable con el ancho de banda de las señales GFSK producidas por los dispositivos PRoC, por lo que la energía de las señales interferentes se concentró en un ancho de banda reducido, afectando en mayor proporción el desempeño del sistema.

- Para reducir los valores de BER en un escenario ante interferencia es necesario hacer un balance en la configuración de los parámetros de transmisión de los dispositivos PRoC. Uno de las opciones posibles para mejorar el desempeño del sistema ante interferencia es incrementar la potencia de transmisión de los dispositivos PRoC, con el objetivo de mejorar la relación E_c/I_0, aunque este incremento de potencia puede generar interferencia a otros sistemas que operen en la misma frecuencia. Por otra parte, para incrementar la energía por cada bit se requiere disminuir la velocidad de transmisión de datos del sistema, lo que implica una disminución en su capacidad. Otra opción es aumentar el número de *chips* recibidos con errores que el sistema puede tolerar, para que el integrador tenga un rango más amplio para la detección de la información, aunque esto disminuye la integridad de los datos.

- Las aplicaciones de los dispositivos PRoC tienen lugar en la mayoría de los entornos como se mencionó en el Capítulo 5, dado que, gracias a las ventajas de la técnica de transmisión DSSS, es posible diseñar sistemas de comunicación en donde se realice la transmisión simultánea de múltiples señales ensanchadas con diferentes secuencias pseudo-aleatorias, ocupando el mismo ancho de banda. En caso de presentarse niveles considerables de interferencia, los dispositivos PRoC pueden operar en una frecuencia distinta, para minimizar la degradación de las demás señales.

6.2 TRABAJOS FUTUROS

Los resultados obtenidos del presente trabajo de grado y las diferentes prestaciones del kit de desarrollo CY3653, permiten plantear algunos trabajos futuros de investigación que contribuyan al desarrollo de sistemas de comunicación de datos vía radio de corto alcance en 2.4 GHz. Para ello se propone:

- Analizar y evaluar el desempeño de un sistema de comunicación de datos punto a punto basado en DSSS en 2.4 GHz con retransmisiones y el uso de técnicas de detección y/o corrección de errores.

- Implementar un sistema de comunicación de audio en 2.4 GHz basado en dispositivos PRoC.

- Analizar el desempeño del protocolo de comunicación *WirelessUSB* en diferentes escenarios y ante interferencia.

- Diseñar e implementar dispositivos de telemetría y telecontrol basados en dispositivos PRoC.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] K. Fazel and S. Kaiser, *Multi-Carrier and Spread Spectrum Systems*. England: John Wiley & Sons, Ltd, 2003.

[2] J. Proakis and M. Salehi, *Communication Systems Engineering*. United States of America: Prentice-Hall, Inc., 1994.

[3] D. Torrieri, *Principles of Spread-Spectrum Modulation Systems*. United States of America: Springer Science + Business Media Inc., 2005.

[4] Cypress Semiconductor, "WirelessUSB™ LS Theory of Operation", Cypress Semiconductor Corporation, United States of America, 2003.

[5] A. Turkmani and U. Goni, "Performance Evaluation of Maximal-length, Gold and Kasami Codes as Spreading Sequences in CDMA Systems", *2nd International Conference on Universal Personal Communications: Personal Communications: Gateway to the 21st Century*, pp. 970-974, 1993. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org. [Consultado: Mayo 2011].

[6] R. Ziemer, *Fundamentals of Spread Spectrum Modulation*. United States of America: Morgan & Claypool Publishers, 2007.

[7] T. Nazmul and S. Foysol, "Correlation Analysis of the Gold Codes and Walsh Codes in CDMA Technology", *First Asian Himalayas International Conference on Internet*, pp. 1-4, 2009. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org. [Consultado: Junio 2011].

[8] E. Dinan and B. Jabbari, "Spreading Codes for Direct Sequence CDMA and Wideband CDMA Cellular Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, pp. 48-54 United States of America, 1998. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org. [Consultado: Junio 2011].

[9] H. Holma and A. Toskala, *WCDMA for UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communications*. England: Wiley & Sons Ltd, 2004

[10] G. Cooper and C. McGillem, *Modern Communications and Spread Spectrum*. United States of America: McGraw-Hill Inc., 1986.

[11] Cypress Semiconductor, "WirelessUSB PRoC Development Kit Quick Start Guide", Cypress Semiconductor Corporation, United States of America, 2004.

[12] Cypress Semiconductor, "CYWUSB6953 WirelessUSB PRoC Flash Programmable MCU + Radio", Cypress Semiconductor Corporation, United States of America, 2004.

[13] Cypress Semiconductor, “CYWUSB6935 WirelessUSB LR 2.4-GHz DSSS Radio SoC”, Cypress Semiconductor Corporation, United States of America, 2004.

[14] Cypress Semiconductor, “WirelessUSB Antenna Design Layout Guidelines”, Cypress Semiconductor Corporation, United States of America, 2004.

[15] Cypress Semiconductor, “Maximizing Range in WirelessUSB Systems”, Cypress Semiconductor Corporation, United States of America, 2004.

[16] Cypress Semiconductor, “WirelessUSB Crystal Guidelines”, Cypress Semiconductor Corporation, United States of America, 2004.

[17] Cypress Semiconductor, ”PSoC Designer IDE Guide”, Cypress Semiconductor Corporation, United States of America, 2004.

[18] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. United States of America: Cambridge University Press, 2005.

[19] B. Watson, “FSK, Signals and Demodulation”, WJ Communications Tech-note, United States of America, 2001. Disponible en: http://ftp.ing-steen.se/text/tektext/digital-modulation/FSK_signals_demod.pdf. [Consultado: Julio 2011].

[20] L. Alarcón, *Diseño, Implementación y Optimización de un Monitor Inalámbrico en un Invernadero*. Chile: Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, 2009. Disponible en: http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2009/bmfcia321d/doc/bmfcia321d.pdf. [Consultado: Agosto 2011].

[21] V. Quintero, “Nivel Físico WCDMA. Ensanchamiento y Modulación”, notas de clase de Electiva: 3G-WCDMA, Departamento de Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Colombia 2010.

[22] Mr. Clintberg’s Studyphysics, “Lesson 5: Expressing Error in Measurements”, Mr. Clintberg’s Studyphysics. Disponible en: http://www.studyphysics.ca/newnotes/20/unit01_kinematicsdynamics/chp02_intro/lesson05.htm. [Consultado: Enero 2012]

[23] Personal de LabVolt (Quebec) Ltda., “Telecomunicaciones Analógicas. Volumen 1: Instrumentación”, LabVolt Systems Inc., Canada, 1984.

[24] WildPackets, “Converting Signal Strength Percentage to dBm Values”, WildPackets, Inc., United States of America, 2002.

[25] D. Garcia y L. Navarro, “Evaluación y Análisis del Desempeño de un Sistema de Comunicación de Datos Vía Radio en la Banda de 900 MHz basado en Espectro Ensanchado por Saltos en Frecuencia utilizando el Modelo Peer-to-

Peer". Departamento de Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Colombia, 2011.

[26] S. Agredo y J. Luna, "Análisis de Cobertura de un Sistema Wi-Fi en Interiores, mediante la Técnica de Trazado de Rayos". Departamento de Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, 2011.

[27] J.Rabanos, *Comunicaciones Móviles*. España, Editorial Centro de Estudios Ramón Areces, S.A., 2004.

[28] G. Breed, "Bit Error Rate: Funfamental Concepts and Measure Issues", High Frequency Electronics on Summit Technical Media, 2003. Disponible en: http://www.highfrequencyelectronics.com/Archives/Jan03/HFE0103_Tutorial.pdf.

[29] MathWorks, "Bluetooth Voice Simulink® Model", Newsletters, Matlab Digest, 2001. Disponible en: http://www.mathworks.com/company/newsletters/digest/nov01/bluetooth_pt2.html.

[30] TelecomHall, "What is E_c/I_0 (and E_b/N_0)?". TelecomHall Portal. Disponible en: http://www.telecomhall.com/what-is-ecio-and-ebno.aspx.

[31] P. Ortega y M. Tumbajoy, "Y Evaluación de Desempeño de un Sistema de Comunicación de Datos Multipropósito en la Banda de 2.4 GHz". Departamento de Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Colombia, 2012.

[32] USB Implementers Forum, "Device Class Definition for Human Interface Devices (HID)", USB Implementers Forum, 2001. Disponible en: http://www.usb.org/developers/devclass_docs/HID1_11.pdf.

[33] IOCOM, "Sistema de Control y Telemetría", IOCOM Ltda, Colombia. Disponible en: http://iocom.com.co/docs/Telemetria_Iocom.pdf.

[34] Wikipedia, "Telemetría", Wikimedia Inc., 2011. Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Telemetr%C3%ADa.

[35] V. Zavorotnyi, R. Chobik and Y. Yakimenko, "Smart Pressure Sensor based on PSoC", *31st International Spring Seminar on Electronics Technology*, pp. 308-311, 2008. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org. [Consultado: Diciembre 2011].

[36] V. Zavorotnyi and Y. Yakimenko, "Based on PsoC Smart Sensor of Gas Leakage" *32st International Spring Seminar on Electronics Technology*, pp. 1-3, 2009. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org. [Consultado: Diciembre 2011].