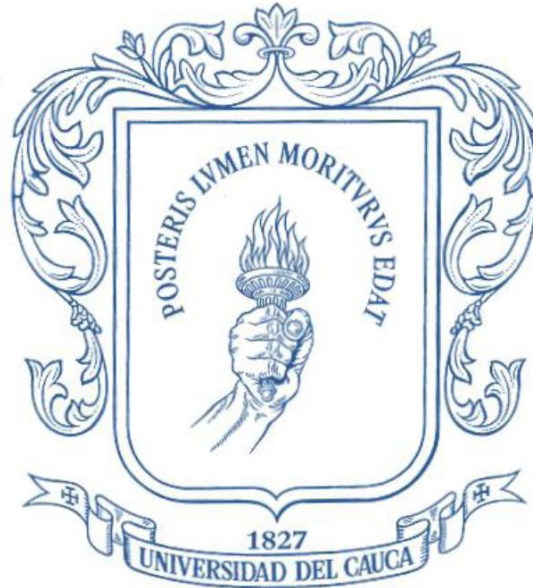


**EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DE UN
SISTEMA DE COMUNICACIÓN DE DATOS DE CORTO ALCANCE VÍA RADIO
EN 2.4 GHZ QUE UTILIZA CODIFICACIÓN MANCHESTER**

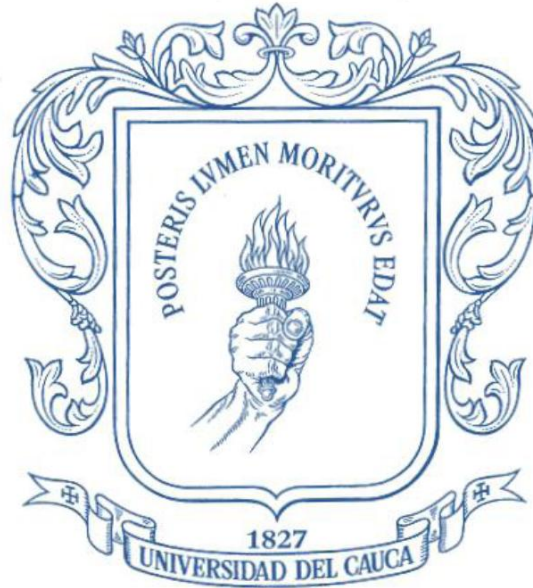


**MERY EVELYN CERON IBARRA
LUIS FERNANDO LEIVA BENACHI**

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 QUE UTILIZA CODIFICACIÓN MANCHESTER



**MERY EVELYN CERON IBARRA
LUIS FERNANDO LEIVA BENACHI**

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

**Director
Pablo Emilio Jojoa**

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. CODIFICACIÓN MANCHESTER	3
1.1 CÓDIGOS DE LÍNEA	3
1.2 CODIFICACIÓN MANCHESTER	5
1.2.1 Descripción	5
1.2.2 Espectro	7
1.2.3 Ventajas y desventajas	9
2. KIT DE DESARROLLO CY8CKit-001 PSoC	10
2.1 CARACTERÍSTICAS HARDWARE DEL KIT DE DESARROLLO CY8CKIT-001 PSoC	10
2.1.1 Tarjeta de Desarrollo	11
2.1.1.1 Interfaz RS232.....	11
2.1.1.2 Interfaz USB	11
2.1.1.3 Interfaz inalámbrica 12 Pines.....	11
2.1.1.4 Potenciómetro	11
2.1.1.5 CapSense	12
2.1.1.6 LCD.....	12
2.1.1.7 Botón Reset	12
2.1.1.8 Puertos de expansión P5, P6, P7, P8	12
2.1.1.9 Socket para procesador PSoC.....	12
2.1.2 Procesador PSoC CY8C28	12
2.1.3 Procesador PSoC CY8C38	13
2.1.4 Procesador PSoC CY8C55	14
2.1.5 Programador MiniProg3.....	15
2.1.6 Cable USB	15
2.1.7 Adaptador de energía 12V.....	16
2.1.8 Paquetes de Cables.....	16
2.1.9 Documentos.....	16
2.1.10 CD-ROM software PSoC 1	16
2.1.11 CD-ROM software PSoC 3 y PSoC 5.....	16

2.2	CARACTERÍSTICAS SOFTWARE DEL KIT DE DESARROLLO CY8CKIT-001 PSoC	16
2.2.1	PSoC Designer.....	17
2.2.2	PSoC Creator	20
3.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN.....	22
3.1	COMPONENTES DEL SISTEMA PROTOTIPO DE COMUNICACIÓN.....	22
3.1.1	Bloque Transmisor	23
3.1.2	Bloque Receptor	24
3.1.3	XBee	25
3.1.3.1	Direccionamiento.....	26
3.1.3.2	Modos de Operación	27
3.1.3.3	Modos de transmitir la información	28
3.1.3.4	Software X-CTU	29
3.2	CANAL DE TRANSMISIÓN	29
3.3	ESQUEMA DE MODULACIÓN	30
3.4	PROTOCOLO DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN.....	32
4.	PLAN DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN.....	34
4.1	ESCENARIOS DE PRUEBA	34
4.1.1	Escenario Exterior (<i>Outdoor</i>).....	34
4.1.2	Escenario Interior (<i>Indoor</i>).....	34
4.2	MEDIDA DEL ANCHO DE BANDA DE LA SEÑAL DE RADIOFRECUENCIA	34
4.3	MEDIDA DE POTENCIA DE RECEPCIÓN Y PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN	36
4.3.1	Escenario Exterior	37
4.3.2	Escenario Interior	42
4.3.3	Simulación en WIRELESS INSITE®	47
4.3.3.1	Simulación en Escenario Exterior	48
4.3.3.2	Simulación en Escenario Interior	52
4.3.4	Comparación de Medidas de Potencia y Pérdidas.....	57
4.4	EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN.....	64

4.4.1	Simulación del Sistema de Comunicación para la Evaluación del Desempeño Teórico	65
4.4.2	Evaluación y Análisis de Desempeño en el Escenario Exterior	66
4.4.3	Evaluación y Análisis de Desempeño en el Escenario Interior	68
4.4.4	Evaluación y Análisis de Desempeño ante Interferencia.....	70
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	73
5.1	CONCLUSIONES.....	73
5.2	TRABAJOS FUTUROS.....	74
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Codificación Manchester de 0 y 1 binario	6
Figura 1.2. Ejemplo de una señal de codificación Manchester	6
Figura 1.3. Densidad de potencia espectral de la codificación Manchester	7
Figura 1.4. Probabilidad de bit errado	8
Figura 2.1. Kit de Desarrollo CY8CKit-001 PSoC	10
Figura 2.2. Tarjeta de Desarrollo PSoC	11
Figura 2.3. PSoC CY8C28	12
Figura 2.4. Diagrama de Bloques PSoC CY8C28	13
Figura 2.5. PSoC CY8C38	13
Figura 2.6. Diagrama de Bloques PSoC CY8C38	14
Figura 2.7. PSoC CY8C55	14
Figura 2.8. Diagrama de Bloques PSoC CY8C55	15
Figura 2.9. MiniProg3	15
Figura 2.10. Interfaz del Editor de Nivel de Chip del PSoC Designer	17
Figura 2.11. Interfaz del Editor de Nivel de Sistema del PSoC Designer.....	19
Figura 2.12. Interfaz PSoC Creator.....	20
Figura 3.1. Diagrama General del Sistema de Comunicación	23
Figura 3.2. Diagrama del bloque transmisor	23
Figura 3.3. Adaptador módulo XBee.....	24
Figura 3.4. Diagrama del bloque receptor	24
Figura 3.5. Módulo Transceptor XBee	25
Figura 3.6. Modos de Operación.....	27
Figura 3.7. Estructura Comandos AT	28
Figura 3.8. Constelación QPSK	30
Figura 3.9. Formas de Ondas en Fase y Cuadratura en Modulación O-QPSK	31
Figura 3.10. Espectro de la Señal QPSK	32
Figura 3.11. Trama IEEE 802.15.4.....	33
Figura 3.12. Formato SFD	33
Figura 4.1. Ancho de Banda	35
Figura 4.2. Potencia recibida en escenario exterior con y sin codificación Manchester....	38

Figura 4.3. Pérdidas de propagación en escenario exterior con y sin codificación Manchester.....	40
Figura 4.4. Pérdidas de propagación en escenario exterior sin codificación Manchester .	41
Figura 4.5. Pérdidas de propagación en escenario exterior con codificación Manchester	42
Figura 4.6. Potencia recibida en escenario interior con y sin codificación Manchester.....	45
Figura 4.7. Pérdidas de propagación en escenario interior con y sin codificación Manchester.....	45
Figura 4.8. Pérdidas de propagación en escenario interior sin codificación Manchester ..	46
Figura 4.9. Pérdidas de propagación en escenario interior con codificación Manchester .	47
Figura 4.10. Ubicación del transmisor y receptores para el escenario exterior.....	48
Figura 4.11. Potencia recibida en exterior con Wireless Insite	50
Figura 4.12. Potencia recibida utilizando grilla de receptores en Wireless Insite.....	51
Figura 4.13. Pérdidas de propagación en exterior con Wireless Insite	51
Figura 4.14. Caminos de propagación en Wireless Insite	52
Figura 4.15. Escenario interior para Wireless Insite	53
Figura 4.16. Ubicación del transmisor y receptores para el escenario interior.....	54
Figura 4.17. Potencia recibida en escenario interior con Wireless Insite	55
Figura 4.18. Pérdidas de propagación en escenario interior con Wireless Insite.....	56
Figura 4.19. Dispersión de retardo para escenario interior en Wireless Insite	57
Figura 4.20. Potencia recibida en escenario Interior y Exterior	59
Figura 4.21. Pérdidas de propagación en Interior y Exterior.....	60
Figura 4.22. Potencia recibida en escenario exterior.....	61
Figura 4.23. Pérdidas de propagación en escenario exterior	62
Figura 4.24. Potencia recibida en escenario interior	62
Figura 4.25. Pérdidas de propagación en escenario interior	63
Figura 4.26. Desempeño Teórico del Sistema de Comunicación	66
Figura 4.27. PER vs E_b/N_0 en Escenario Exterior.....	67
Figura 4.28. BER vs E_b/N_0 en Escenario Exterior.....	68
Figura 4.29. Sistema con Interferencia	70
Figura 4.30. Canales estándar IEEE 802.11b y IEEE 802.15.4.....	70
Figura 4.31. Relación Portadora Interferencia vs. BER	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Características PSoC	15
Tabla 2.2. Requerimientos Mínimos de Instalación de PSoC Designer	20
Tabla 2.3. Requerimientos Mínimos de Instalación de PSoC Creator	21
Tabla 3.1. Especificaciones del Módulo Transceptor XBee	25
Tabla 3.2. Definición de Pines	26
Tabla 3.3. Características Generales IEEE 802.15.4	32
Tabla 4.1. Parámetros de configuración de XBee-PRO	36
Tabla 4.2. Potencia recibida en exterior con y sin codificación Manchester	37
Tabla 4.3. Pérdidas de propagación en escenario exterior con y sin codificación Manchester	39
Tabla 4.4. Valor de n para pérdidas de propagación	40
Tabla 4.5. Potencia recibida en escenario interior con y sin codificación Manchester	42
Tabla 4.6. Pérdidas de propagación en escenario interior con y sin codificación Manchester	44
Tabla 4.6. Parámetros configurados para exterior	49
Tabla 4.7. Parámetros configurados para escenario interior	53
Tabla 4.8. Parámetros del Sistema de Comunicación para las Medidas de Errores	65
Tabla 4.9. Medida de BER en Escenario Exterior sin Codificación Manchester	66
Tabla 4.10. Medida de BER en Escenario Exterior con Codificación Manchester	67
Tabla 4.11. Medida de E_b/N_0 en Escenario Interior sin Codificación Manchester	68
Tabla 4.12. Medida de E_b/N_0 en Escenario Interior con Codificación Manchester	69
Tabla 4.13. Resultados desempeño sistema de comunicación sin Codificación Manchester bajo condiciones de interferencia	71
Tabla 4.14. Resultados desempeño sistema de comunicación con Codificación Manchester bajo condiciones de interferencia	71

LISTA DE ACRÓNIMOS

AC	<i>Alternating Current</i> , Corriente Alterna.
ACK	<i>ACKNOWLEDGEMENT</i> , Acuse de Recibo.
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i> , Conversor Analógico a Digital.
AP	<i>Access Point</i> , Punto de Acceso.
API	<i>Application Programming Interface</i> , Interfaz de Programación de Aplicaciones.
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i> , Ruido Gaussiano Blanco Aditivo.
BER	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bits.
CDU	Centro Deportivo Universitario.
DC	<i>Direct Current</i> , Corriente Directa.
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i> , Memoria de Solo Lectura Programable y Borrable Electricamente.
FIET	Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> , Entorno de Desarrollo Integrado.
ISI	<i>Inter Symbol Interference</i> , Interferencia Inter Símbolo.
ISM	<i>Industrial Scientific, and Medical</i> , Industrial, Científica y Médica.
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> , Pantalla de Cristal Líquido.
MIPS	Millones de Instrucciones por Segundo.
NF	<i>Noise Figure</i> , Figura de Ruido.
OQPSK	<i>Offset quadrature phase-shift keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura Compensada.
PER	<i>Packet Error Rate</i> , Tasa de Error de Paquete
PN	<i>Pseudo Noise</i> , Pseudo Ruido.
PSoC	<i>Programmable System-on-Chip</i> , Sistema Programable en un Chip.

QPSK	<i>Quadrature phase-shift keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura.
RRM	<i>Radio Resources Management</i> , Gestión de Recursos Radio.
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i> , Indicador de Intensidad de la Señal Recibida.
SBR	<i>Shooting and Bouncing Ray</i> , Disparo y Rebote de Rayo.
SF	<i>Spreading Factor</i> , Factor de Ensanchamiento.
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i> , Memoria Estática de Acceso Aleatorio.
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i> , Transmisor-Receptor Asíncrono Universal
USB	<i>Universal Serial Bus</i> , Bus Universal en Serie.
WLAN	<i>Wireless Local Area Networks</i> , Redes Inalámbricas de Area Local.
WPAN	<i>Wireless Personal Area Networks</i> , Redes Inalámbricas de Área Personal.
XOR	<i>Exclusive Or</i> , Or Exclusiva.

INTRODUCCIÓN

El aumento en la automatización y digitalización del mundo que nos rodea, trae consigo exigencias mayores en la complejidad de los requerimientos y la necesidad de una solución integral en aplicaciones como sistemas de control embebidos para la industria, la medicina, robótica y comunicaciones. Para esto se exigen mejoras en la capacidad de procesamiento, acondicionamiento de señales, reducción del tamaño y costo del dispositivo. Anteriormente este nivel de integración sólo existía en equipos grandes, por lo que las ventajas de integración eran pocas en comparación con el precio añadido y la complejidad. Un Sistema Programable en un Chip (PSoC, *Program System on Chip*) representa un nuevo concepto en el desarrollo del microcontrolador fabricado por Cypress Semiconductor, el cual es muy versátil y dinámico, con unos bloques básicos (analógicos y digitales), configurables e interconectados internamente que permiten implementar: filtros analógicos y digitales, amplificadores, conversores análogo/digitales, etc., sin la necesidad de adicionar nuevos periféricos [1].

Con la integración de tecnologías digitales a los sistemas de radiofrecuencia, se ha logrado tener una mayor robustez en la señales de información y mejorar el desempeño de las comunicación frente a fenómenos presentes en el canal de transmisión inalámbrico tales como atenuación, desvanecimiento, ruido e interferencia.

Con el fin de analizar el desempeño de un sistema inalámbrico en el cual se hace la apropiación y uso del kit de desarrollo CY8CKIT-001PSoC para el procesamiento digital de la señal, se implementa un sistema de comunicación de datos de corto alcance vía radio en 2.4 GHz que utiliza codificación Manchester, técnica que le permite a la señal ser autosincronizable ya que la señal de reloj viene embebida en la señal de datos.

El sistema de comunicación de datos hace uso del kit de desarrollo CY8CKIT-001PSoC en el cual se implementa la codificación y decodificación Manchester, así como la comunicación con el transceptor RF.

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

Capítulo 1: Codificación Manchester.

Describe y resume las características asociadas al funcionamiento, y a las ventajas y desventajas de la codificación Manchester.

Capítulo 2: Kit de Desarrollo CY8CKIT-001PSoC

Recopila las características físicas y operativas del kit de desarrollo, descripción general de los procesadores PSoC y las capacidades 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 que utiliza codificación Manchester, 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 PSoC.

Analiza las potenciales aplicaciones de los dispositivos PSoC 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. CODIFICACIÓN MANCHESTER

La continúa y rápida evolución de las comunicaciones exige una ágil adaptación a los nuevos sistemas. Los materiales, la disponibilidad en el espectro, las capacidades de transferencia, entre otras características, hacen que se adopten nuevas estrategias para evolucionar conjuntamente con las necesidades y las posibilidades.

La codificación nace con la necesidad de optimizar los sistemas de comunicaciones, mejorar la eficiencia en la transmisión, y al mismo tiempo la calidad de la información. La codificación aporta al sistema de comunicación una forma más adecuada de la señal a transmitir, adaptándola a las características del canal, haciendo que esta sea más robusta ante el ruido, la interferencia y las características propias del medio de transmisión.

El proceso de codificación transforma la señal de información contenida en forma digital (unos y ceros), en una serie de estados o eventos que representan cada símbolo binario. Sin embargo, "la máxima ventaja sobre los efectos de ruido en un medio de transmisión se obtiene utilizando un código binario, debido a que un símbolo binario soporta un nivel relativamente alto de ruido y es fácil de regenerar" [2].

1.1 CÓDIGOS DE LÍNEA

Con la necesidad de transmitir información en formato digital a través de las líneas telefónicas surgen los códigos de línea, de allí su nombre. Sin embargo, este concepto se aplica para cualquier canal de transmisión.

Los códigos de línea se utilizan comúnmente para la transmisión de información en formato digital, para facilitar el procesamiento digital de la información y contribuir en la optimización de la comunicación haciendo que la forma de onda sea acorde a las propiedades del canal físico que se utiliza. Por ejemplo, los códigos de línea brindan la capacidad de un sistema auto-sincronizable¹, hacen posible el control de la componente de corriente directa (DC, *Direct Current*) y permiten la transmisión a altas velocidades teniendo un ancho de banda limitado.

La codificación de línea consiste en asociar o establecer una correspondencia entre los datos de información contenida en una secuencia de ceros y unos digitales y una forma de onda específica. Esta forma de onda influye directamente en la potencia de transmisión, el ancho de banda, la facilidad de recuperación del reloj en el receptor, la detección y corrección de errores, etc.

Las diferentes características del canal, la aplicación, el requerimiento de desempeño, la complejidad del codificador/decodificador o el factor económico influyen en la selección del código de línea a utilizar. Cada código de línea tiene diferentes propiedades y dependiendo de su uso, una propiedad puede ser más importante que otra.

¹ Auto-sincronizable: capacidad de decodificar la señal en el receptor sin la necesidad de una fuente de sincronización adicional. Generalmente la información de reloj se encuentra embebida con la señal de datos transmitida.

Las consideraciones deseadas más comúnmente aceptadas a tener en cuenta en el momento de elegir un código de línea son [3]:

- Auto-sincronización: La forma de onda que genera un código debe contener información suficiente, tal que permita en el extremo receptor recuperar la señal de reloj, identificar el tiempo al que corresponde un bit de información y sincronizar el receptor con el transmisor para lograr la adecuada decodificación de la señal.
- Contenido DC: La posibilidad de controlar el contenido de corriente continua en la forma de onda producida por un código de línea dado, es una característica necesaria en algunos sistemas donde se requiere que este nivel sea cero. Los medios de comunicación de larga distancia no pueden transmitir una componente DC, por lo tanto casi todos los códigos de línea tratan de eliminar esta componente antes de iniciar la transmisión. Estos códigos son llamados DC-cero o DC-equalizado.
- Potencia espectral: El ancho de banda dado por el espectro de potencia de la señal codificada deben corresponder a la respuesta en frecuencia del canal para evitar que se presente distorsión significativa. La mayor cantidad de energía de la señal codificada debe estar contenida en el menor ancho de banda posible, es decir, el ancho de banda de la señal debe ser lo suficientemente pequeño comparado con el del canal para evitar que se presente Interferencia Inter-Simbólica² (ISI, *InterSymbol Interference*).
- Detección de errores: Se refiere a la capacidad de monitorear el desempeño mediante la detección de errores causados por ruido en el canal de transmisión. Esto permite la supervisión de la transmisión mientras el canal esta en uso sin que sea necesario suspender la transmisión.
- Probabilidad de error: La probabilidad de error de bit medida en el receptor debe ser lo más pequeña posible para una potencia de transmisión dada, teniendo en cuenta que la señal recibida está deteriorada por efectos del canal. Esto determina la confiabilidad del código de línea.

² Interferencia Inter-Simbólica: Es una forma de interferencia dependiente de la señal que se produce debido a las desviaciones en la respuesta en frecuencia de un canal. El resultado de estas desviaciones hacen que el pulso recibido correspondiente a un símbolo de datos particular, resulte afectado por los extremos de las colas de los pulsos que representan a los símbolos previos y los extremos delanteros de los pulsos que representan a los símbolos subsecuentes.[2]

- Transparencia: Independencia de las características del código con relación a la secuencia de unos y ceros, cada secuencia posible debe ser recibida de forma transparente y fiel en el receptor.

Entre los códigos de línea más utilizados están: NRZ-polar (No Retorno a Cero), NRZ-unipolar, RZ-unipolar (Retorno a Cero), AMI (Inversión de Marca Alterna- RZ bipolar), Manchester, entre otros.

1.2 CODIFICACIÓN MANCHESTER

Un sistema de comunicaciones que usa codificación binaria directa con 0 voltios para un bit 0 y 5 voltios para un bit 1 presenta ambigüedades, pues no es posible diferenciar entre un transmisor inactivo (0 Volts) y un bit 0 [4].

La codificación Manchester es un método de codificación de datos digitales de una serie de bits arbitrarios, sin que se presenten largas cadenas de ceros y unos, evitando así ambigüedades en la recepción. Además, es una codificación que tiene la señal de reloj embebida en los datos transmitidos. Estas dos características permiten la recuperación de datos con receptores de bajo costo, debido a su baja complejidad. Es un código de línea ampliamente aplicado en redes de área local Ethernet, en sistemas inalámbricos de bajo costo o en sistemas de comunicación de campo cercano.

Esta codificación debe su nombre a la universidad donde fue desarrollado, La Universidad de Manchester, donde se utilizó para almacenar información en el tambor magnético de la computadora Manchester Mark I. Fue publicado por primera vez en 1949. [5]

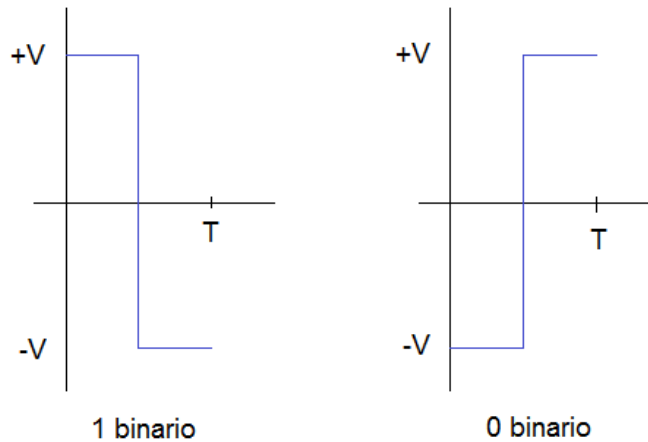
Existen dos convenciones opuestas, para la representación de datos, que han coexistido por muchos años. La primera fue publicada por G. E. Thomas en 1949 y es seguida por numerosos autores, entre ellos Andrew S. Tanenbaum [4]. Y la segunda convención también aceptada por varios autores como William Stallings [6] y aplicada en los estándares IEEE 802.4 (Token bus) y IEEE 802.3 (Ethernet 10 Mbps y 10Base-T). En este trabajo de grado, se adopta la primera convención.

1.2.1 Descripción

En la codificación Manchester, cada bit de información es transmitido en un tiempo fijo (periodo T), el periodo de bit se divide en dos intervalos iguales, donde (ver Figura 1.1):

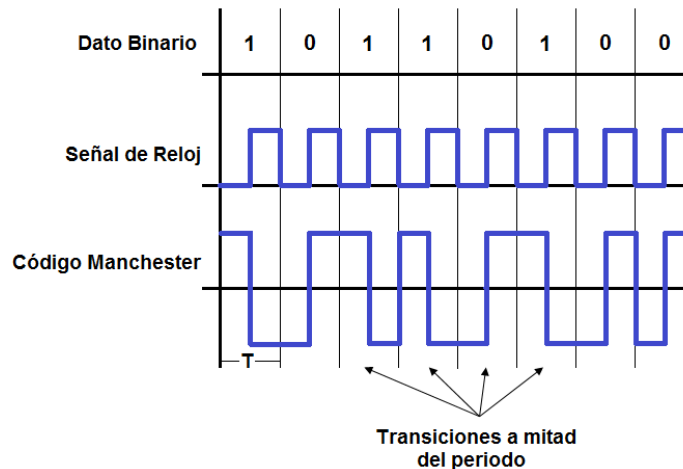
- Un 1 binario es representado por un pulso donde la primera mitad del periodo tiene un estado alto (nivel de voltaje positivo +V) y la segunda mitad un estado bajo (nivel del voltaje negativo -V).
- Y un 0 binario se representa por un pulso donde la primera mitad del periodo tiene un estado bajo y la segunda mitad es un estado alto.

Figura 1.1. Codificación Manchester de 0 y 1 binario [7]



Este método asegura que cada periodo de bit codificado tenga una transición a la mitad, esta transición prácticamente contiene la información, así: para un 1 binario se realiza una transición alto-bajo y para un 0 binario una transición bajo-alto, como se observa la Figura 1.2. No siempre ocurre una transición al inicio o al final del periodo del bit codificado, cuando ocurre solo sirve para ubicar la señal en el estado correcto para la transición de la mitad del periodo. Estas transiciones tienen como objetivo realizar dos funciones simultáneas: sincronizar la información y transmitir los datos.

Figura 1.2. Ejemplo de una señal de codificación Manchester [7]



La codificación Manchester es una codificación sin memoria, pues no requiere información del anterior bit codificado. También es conocida como una codificación bifase³, donde un

³ **Codificación bifase:** Es una variación de la codificación polar, que funciona cambiando la señal en la mitad del intervalo del bit, sin embargo, la señal no vuelve a cero si no que sigue al polo opuesto. Es una respuesta efectiva a los problemas de sincronización.

1 binario se representa por una onda cuadrada con una fase 0° y un 0 binario es representado por una onda cuadrada con una fase de 180° .

1.2.2 Espectro

La forma de pulso de la codificación Manchester está dada por la Ecuación 1.1 [8].

$$f(t) = \pi \left(\frac{t+T/4}{T/2} \right) - \pi \left(\frac{t-T/4}{T/2} \right), \quad (1.1)$$

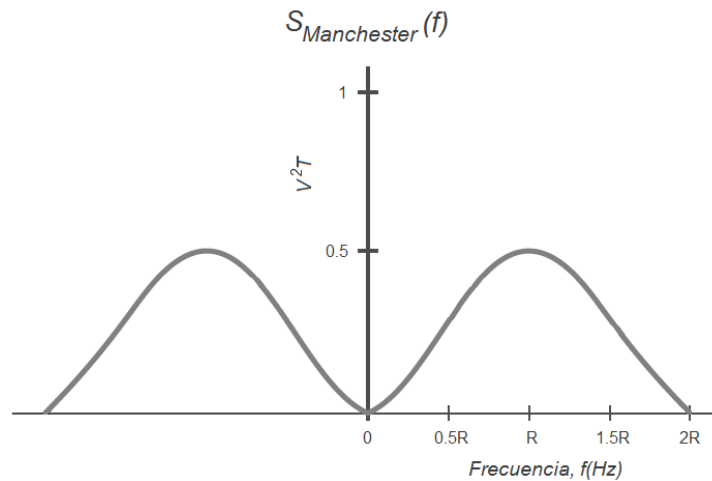
donde $f(t)$ es el símbolo de la forma de pulso y T es el tiempo que se toma para enviar un bit.

La densidad espectral de potencia de una señal con codificación Manchester con igual probabilidad de enviar ceros y unos (Equiprobable⁴), está dada por la Ecuación 1.2 [8].

$$S_{Manchester}(f) = V^2 T \left(\frac{\sin \pi f T/2}{\pi f T/2} \right)^2 \sin^2(\pi f T/2), \quad (1.2)$$

donde V es el nivel de voltaje de la señal codificada.

Figura 1.3. Densidad de potencia espectral de la codificación Manchester [7]



En la gráfica de espectro de la codificación Manchester Figura 1.3, el ancho de banda de la señal está dado por el primer nulo, ubicado en la frecuencia $2R$, donde R es la velocidad de transmisión y $R=1/T$.

Cuando la información no es equiprobable, es decir cuando la probabilidad p para un 1 binario es diferente de 0,5, implica que en la gráfica de densidad espectral de potencia,

⁴ Equiprobable: Cuando la probabilidad que los datos enviados sea la misma. Es decir, en un sistema binario (dos posibles datos), la probabilidad que el dato enviado sea un 0 es 0,5 (la mitad de las posibilidades) y la de enviar un 1 es 0,5. Ambos sucesos tienen la misma probabilidad.

el lóbulo principal se reduce en amplitud y los componentes discretos aparecen en múltiplos enteros de la velocidad de transferencia $R=1/T$. La densidad espectral de potencia está representada por la Ecuación 1.3. [3]

$$S_{Man-p}(f) = V^2 T 4p(1-p) \left(\frac{\sin \pi f T / 2}{\pi f T / 2} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\pi f T}{2} \right) + V^2 (1-2p)^2 \sum_{n=-\infty, n \neq 0}^{\infty} \left(\frac{2}{n\pi} \right)^2 \delta(f - nR) \quad 1.3$$

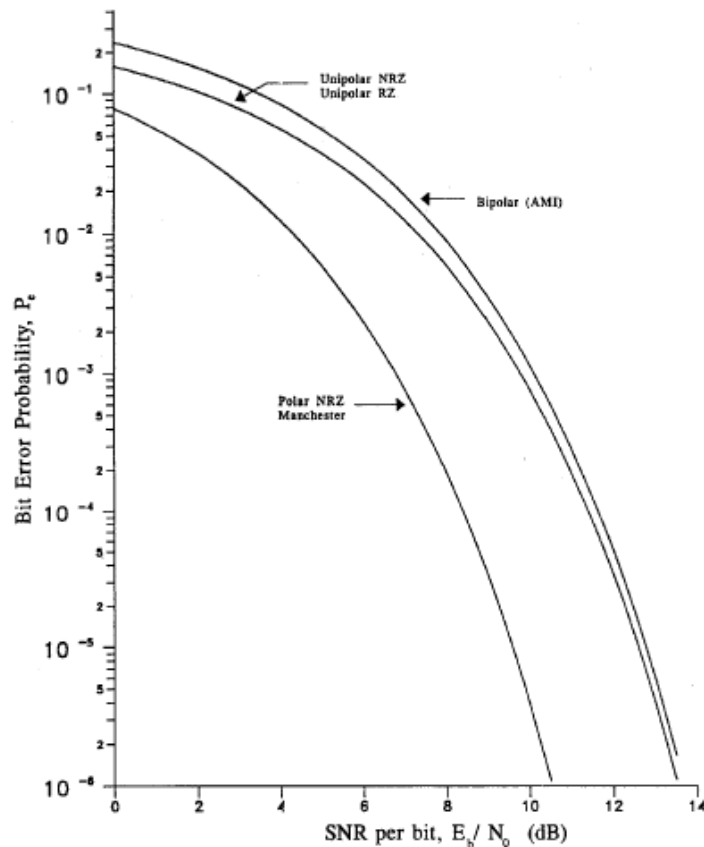
La tasa de error de la forma de onda de la codificación Manchester cuando la probabilidad de cada dato binario es $p=0,5$ (equiprobable), es similar a la del código polar NRZ, y esta dado por la Ecuación 1.4. [3]

$$P_e \approx \frac{3}{4} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{2N_0}} \right), \quad E_b/N_0 > 2, \quad (1.4)$$

donde erfc es la función de error complementario.

La tasa de error también se observa en la Figura 1.4.

Figura 1.4. Probabilidad de bit errado [3]



1.2.3 Ventajas y desventajas

Algunas de las ventajas significativas de este código de línea son [3]:

- Capacidad de auto-sincronización, esto gracias a las transiciones que siempre realiza a la mitad del periodo del bit, lo cual permite que el receptor pueda sincronizarse en caso de ser necesario y no se pierda esta capacidad debido a una larga cadena de ceros o unos.
- Detección de retardos, esto debido a que la forma de onda de la señal resultante asegura una transición al menos cada periodo de bit codificado. Las violaciones de código se pueden detectar mediante hardware o software configurado para tal fin y que permiten lograr la adecuada sincronización.
- La forma de onda de esta codificación tiene un componente de voltaje DC igual a cero, debido a que en cada bit de datos codificados se anula esta componente, por ello es independiente de la secuencia de datos codificados.
- Las componentes de bajas frecuencias son relativamente insignificantes, independientemente de la secuencia de datos codificados, esta característica es importante para algunas aplicaciones.
- La codificación Manchester presenta una probabilidad de error baja comparada con otros códigos de línea.
- También cuenta con muy buena inmunidad al ruido.

Las desventajas que presentan son:

- El código Manchester ocupa un ancho de banda mayor al de otros códigos como unipolar NRZ o polar NRZ, porque las transiciones son a la mitad del periodo, lo que hace que el ancho de banda de la codificación sea el doble al utilizado por estos códigos. Este aumento en el ancho de banda implica que la señal sea más vulnerable ante la diafonía de extremo cercano y la Interferencia Inter Simbólica.
- La codificación Manchester no tiene capacidad de detección de errores y, por lo tanto, no es posible la supervisión de la información mientras el sistema está operando. Es posible detectar violaciones al código por medio de software o hardware configurado para tal fin una vez que la información se ha recibido.

2. KIT DE DESARROLLO CY8CKit-001 PSoC

El kit de desarrollo CY8CKit-001 PSoC es fabricado por la empresa Cypress Semiconductor®, el cual proporciona una plataforma de desarrollo donde se pueden crear prototipos y soluciones para múltiples sistemas. Con el objetivo de dar a conocer las características técnicas y de funcionamiento del kit adquirido, la información documentada fue tomada del manual del Kit, e incluye la información general de la tarjeta de desarrollo, los módulos de procesadores PSoC y descripción del software de configuración.

2.1 CARACTERÍSTICAS HARDWARE DEL KIT DE DESARROLLO CY8CKIT-001 PSoC

Figura 2.1. Kit de Desarrollo CY8CKit-001 PSoC [9]



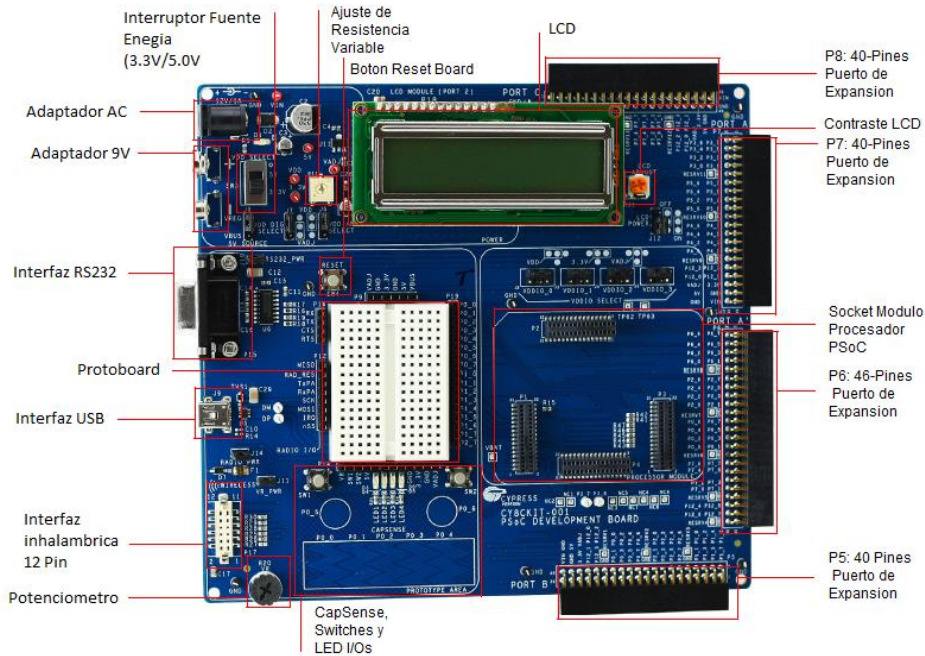
Contenido del Kit:

- Tarjeta de Desarrollo
- PSoC 1: Procesador PSoC CY8C28
- PSoC 3: Procesador PSoC CY8C38
- PSoC 5: Procesador PSoC CY8C55
- Programador MiniProg3
- Cable USB
- Adaptador de energía 12V
- Paquete de cables
- Documentos: Guía de Inicio, Esquema de diseño de la Board de desarrollo.
- CD software para PSoC 1
- CD software para PSoC 3 y PSoC 5

2.1.1 Tarjeta de Desarrollo

La tarjeta permite a los desarrolladores la construcción de sistemas alrededor de los procesadores PSoC.

Figura 2.2. Tarjeta de Desarrollo PSoC [10]



2.1.1.1 Interfaz RS232

Conector estándar DB9 hembra de comunicación serial. Para conectar la señal de datos con el PSoC se utilizan los pines P16 de la tarjeta.

2.1.1.2 Interfaz USB

Conector USB mini-B. La conexión con el PSoC se hace directamente al socket del módulo del procesador PSoC.

2.1.1.3 Interfaz inalámbrica 12 Pines

Es utilizado específicamente para el módulo Artaflex AWP24S WirelessUSB⁵.

2.1.1.4 Potenciómetro

Resistencia variable de 10 KΩ.

⁵ El módulo Artaflex AWP24S WirelessUSB no se encuentra incluido dentro del kit de desarrollo CY8CKit-001 PSoC.

2.1.1.5 CapSense

Elementos de detección capacitiva, consta de un deslizador y dos botones.

2.1.1.6 LCD

LCD alfanumérico de 2x16, está conectado a dos puertos del PSoC y dirigido al socket P2 del módulo del procesador. La señal para el LCD debe ser de 5V pero puede reconocer hasta 1.8V.

2.1.1.7 Botón Reset

Botón interruptor para restablecer el PSoC, puede configurarse para estado alto o bajo.

2.1.1.8 Puertos de expansión P5, P6, P7, P8

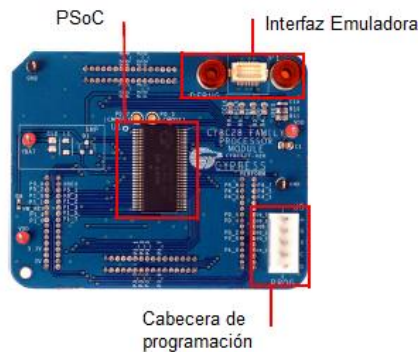
Puertos de dos filas cada uno con 3 puertos de 8 bits (uno con 4 puertos). Los puertos son utilizados para unir la tarjeta a otros módulos de procesamiento.

2.1.1.9 Socket para procesador PSoC

Socket donde va conectado el módulo procesador PSoC a la tarjeta, todas las entradas y salidas analógicas y digitales están conectados a estos puertos.

2.1.2 Procesador PSoC CY8C28

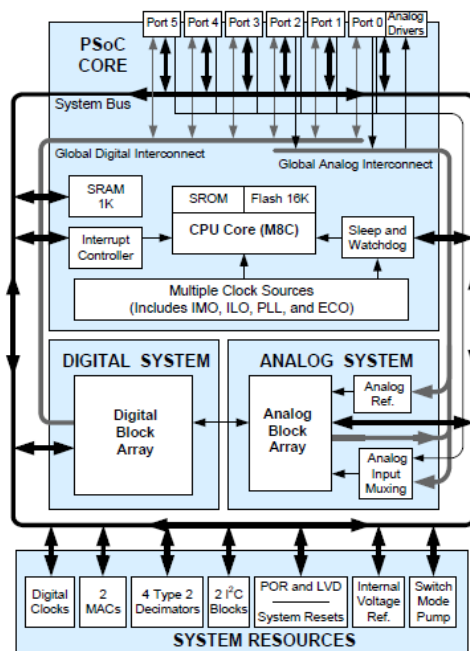
Figura 2.3. PSoC CY8C28 [10]



El núcleo PSoC incluye una CPU, memorias, relojes y entradas y salidas de propósito general. El procesador es M8C con velocidades hasta 12 MHz. La memoria consta de 16 KB de memoria flash para almacenamiento de programas y 1 KB de SRAM para almacenamiento de datos. Los generadores de reloj incluyen un oscilador de 24 MHz interno principal, otro de 32 MHz de bajo consumo para temporizador de apagado

automático y un temporizador *watchdog*⁶. Las entradas y salidas proporcionan conexión entre la CPU y los recursos digitales y analógicos. También, tienen la capacidad de generar interrupciones de bajo y alto nivel y de cambio de información.

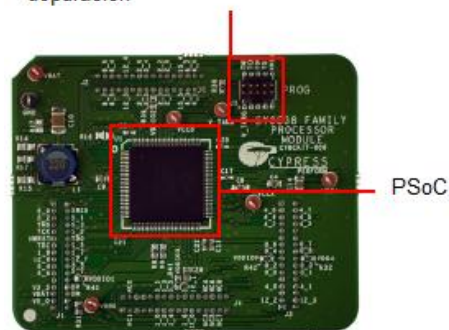
Figura 2.4. Diagrama de Bloques PSoC CY8C28 [11]



2.1.3 Procesador PSoC CY8C38

Figura 2.5. PSoC CY8C38 [10]

Cabecera de programación y depuración

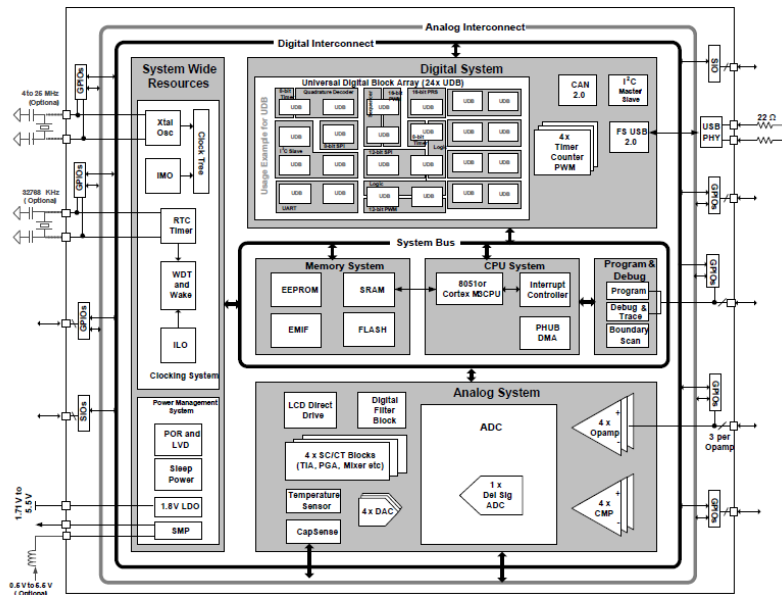


PSoC3, tiene una verdadera unidad microcontroladora (MCU), memorias, funciones periféricas analógicas y digitales. El procesador 8051 tiene velocidades hasta 67 MHz,

⁶ Watchdog: Temporizador utilizado en microcontroladores para habilitar el dispositivo a partir de un estado de reposo o falla.

además cuenta con 64 KB de memoria flash para almacenamiento de programas, 8 KB de memoria SRAM para almacenamiento de datos y 2 KB de memoria EEPROM.

Figura 2.6. Diagrama de Bloques PSoC CY8C38 [12]



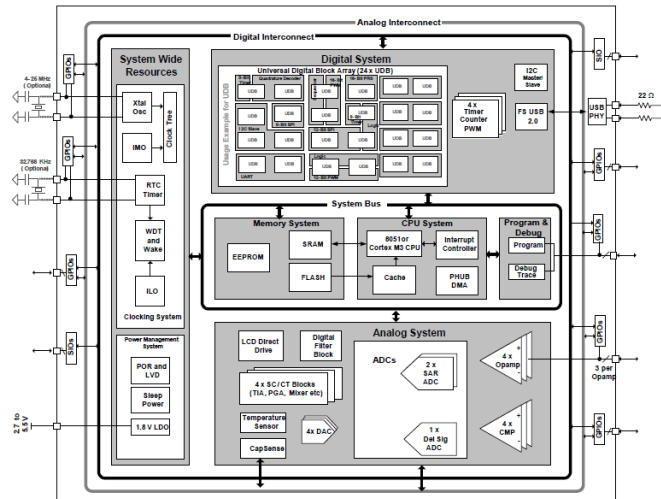
2.1.4 Procesador PSoC CY8C55

Figura 2.7. PSoC CY8C55 [10]



PSoC5, tiene un procesador ARM cortex-M3 de bajo consumo de potencia de 32 bits. La combinación de una CPU con un subsistema flexible analógico y digital, enrutamiento y entradas y salidas permiten una amplia integración con una gran variedad de aplicaciones. Cuenta con 256 KB de memoria flash para almacenamiento de programas, 64 KB de memoria SRAM para almacenamiento de datos, 2 KB de memoria EEPROM. Además, posee un controlador de memoria cache de 128 bytes.

Figura 2.8. Diagrama de Bloques PSoC CY8C55 [13]



En la Tabla 2.1 se muestran las características principales de los dispositivos PSoC.

Tabla 2.1. Características PSoC

Características	PSoC 1	PSoC 3	PSoC 5
Procesador	M8C 8-bits	8051 CPU 8-bits	ARM Cortex-M3 32-bits
Memoria Flash [KB]	16	64	256
Memoria SRAM [KB]	1	8	64
Velocidad [MHz]	12 – 4 MIPS	67 – 33 MIPS	67 – 84 MIPS

2.1.5 Programador MiniProg3

Figura 2.9. MiniProg3 [14]



Miniprogramador, es un mecanismo de conversión de protocolo. Permite al software del Host PC comunicarse a través de USB con la tarjeta de desarrollo para su programación o depuración. La comunicación con el dispositivo utiliza niveles de entrada y salida entre 1.5V a 5.5V.

2.1.6 Cable USB

Cable USB, Adaptador USB – mini USB que permite la comunicación entre el software del Host PC con el MiniProg3.

2.1.7 Adaptador de energía 12V

La fuente de alimentación que suministra energía a la tarjeta y al microcontrolador. La fuente opera con un voltaje de entrada de 100-240V de Corriente Alterna (AC, *Alternating Current*), corriente de 1A y frecuencia de trabajo de 50-60Hz. En la salida se obtiene un valor de voltaje de 12V de DC y corriente de 1A.

2.1.8 Paquetes de Cables

Cables para la conexión entre los puertos y la placa de prueba de la tarjeta de desarrollo.

2.1.9 Documentos

Guía de Inicio, Esquema de diseño de la tarjeta de desarrollo. Se ilustra los primeros pasos para el uso del kit de desarrollo y especificaciones técnicas de los procesadores.

2.1.10 CD-ROM software PSoC 1

El CD-ROM incluye:

- Herramienta de programación y desarrollo (*PSoC Designer* y *PSoC Programmer*)
- *Datasheets* CY8C28
- Notas del kit
- Notas del software
- Archivos de ejemplo de proyectos
- Documentos

2.1.11 CD-ROM software PSoC 3 y PSoC 5

El CD-ROM incluye:

- Herramienta de programación y desarrollo (PSoC Creator y PSoC Programmer)
- Data Sheets CY8C38
- Data Sheets CY8C55
- Notas del kit
- Notas del software
- Archivos de ejemplo de proyectos
- Documentos

2.2 CARACTERÍSTICAS SOFTWARE DEL KIT DE DESARROLLO CY8CKIT-001 PSOC

PSoC Designer y PSoC Creator son un entorno de desarrollo integrado (IDE, *integrated development environment*) que se utilizan para personalizar los requerimientos de aplicaciones específicas. Para el desarrollo se utilizan una serie de librerías prediseñadas de periféricos analógicos y digitales en un entorno de diseño de arrastrar-soltar. Además,

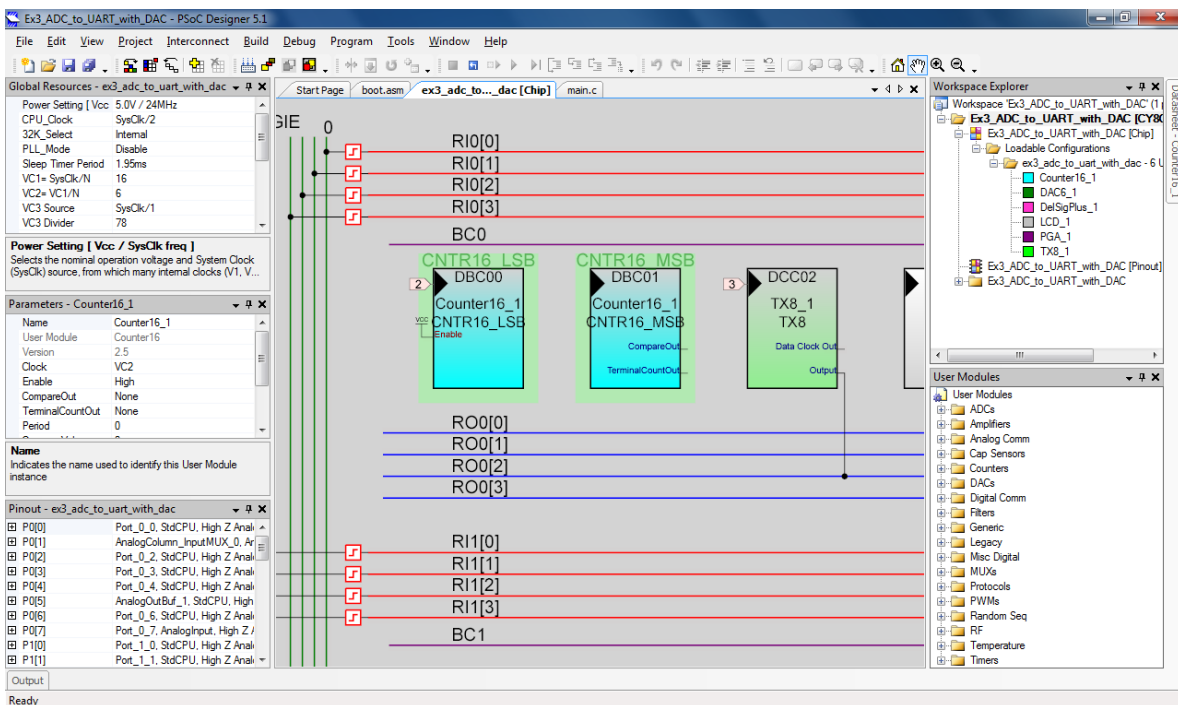
proporcionan una combinación única de hardware y desarrollo de software. Para el desarrollo del trabajo de grado se descargó las últimas versiones de los IDE directamente de la página de *Cypress Semiconductor Corp.*⁷, para trabajar con las versiones actualizadas.

2.2.1 PSoC Designer

PSoC Designer es una herramienta de desarrollo que se utiliza para la configuración y programación del procesador PSoC1 del kit CY8CKit-001 PSoC. La herramienta permite seleccionar dos entornos de desarrollo diferentes, el Editor de Nivel de Chip (*Chip-Level Editor*) y el Editor de Nivel de Sistema (*System-Level Editor*). Los cuales requieren diferentes procesos de diseño.

En la Figura 2.10 se muestra la interfaz del Editor de Nivel de Chip, en el cual se puede especificar exactamente como configurar el dispositivo. Se tiene control total del uso de recursos del sistema, se seleccionan y configuran los módulos de usuario, como conversores analógico a digital (ADC, *Analog-to-Digital Converter*), temporizadores, amplificadores entre otros y las rutas de entradas y salidas del PSoC.

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



⁷ Página oficial de descarga de PSoC Designer: <http://www.cypress.com/?rID=41083>, PSoC Creator: <http://www.cypress.com/?rID=56745>

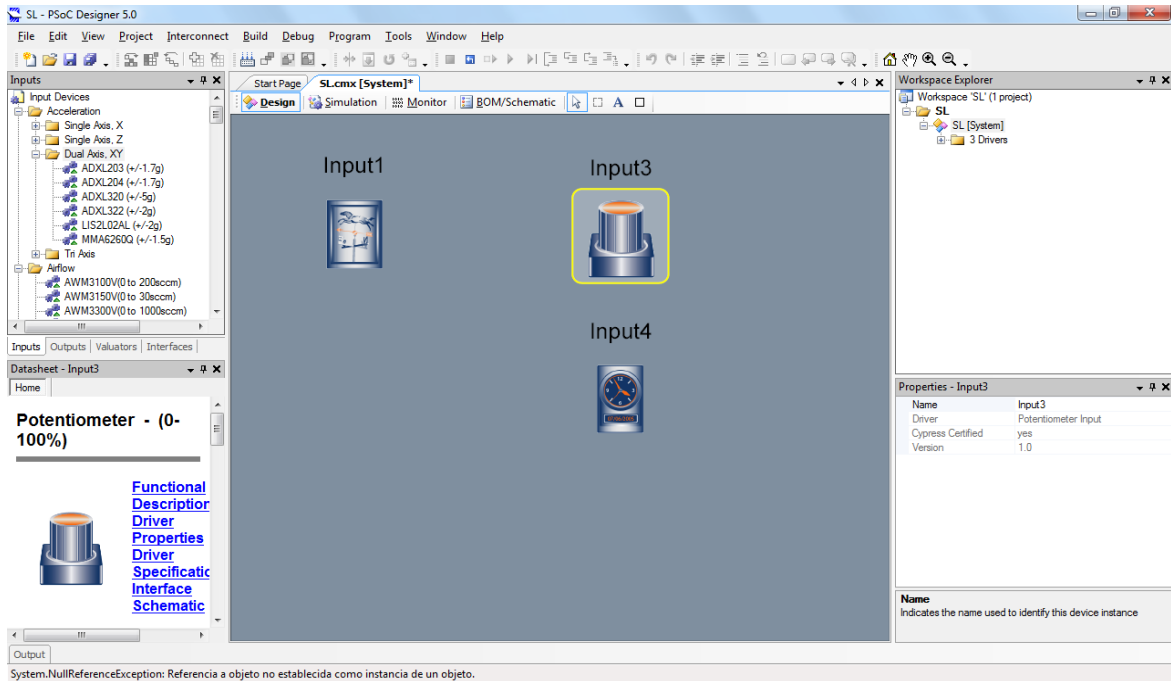
Para crear un proyecto se debe seguir el siguiente procedimiento⁸ [15]:

- Crear un Proyecto: Seleccionar *Chip-Level Project* y seleccionar del catalogo la referencia del PSoC que corresponda al dispositivo.
- Seleccionar los Módulos a usar: Seleccionar los módulos del catalogo y arrastrarlos hacia la Vista del Chip. Cada dispositivo tiene módulos analógicos y digitales programables que se pueden configurar dependiendo de su uso. En algún momento en la programación estos módulos se convierten en periféricos, como conversores análogo-digitales, temporizadores, modulador por ancho de pulso, entre otros.
- Configuración de los Módulos: Cada módulo tiene un conjunto de parámetros que se configuran dependiendo de las necesidades del proyecto.
- Conexión de los Módulos: Cada módulo tiene entradas, salidas e interrupciones, que se pueden conectar internamente entre módulos o externamente a los pines de salida del dispositivo.
- Generar 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.
- Escribir el Programa: El programa se puede programar en lenguaje C para un desarrollo rápido, el lenguaje Ensamblador para mayor rendimiento del MCU, o una combinación de ambos.
- Generar y Depurar el Programa.
- Programar el dispositivo PSoC.

En la Figura 2.11 se muestra la interfaz del Editor de Nivel de Sistema, en el cual se crea rápidamente un proyecto en un entorno de diseño visual, permitiendo seleccionar y configurar varios elementos, como entradas, salidas e interfaces.

⁸ En el Anexo A se detalla el proceso para la creación de un proyecto con la herramienta *PSoC Designer*.

Figura 2.11. Interfaz del Editor de Nivel de Sistema del PSoC Designer



Para crear un proyecto se debe seguir el siguiente proceso [15]:

- Crear un proyecto: Se selecciona *System-Level Project* y automáticamente se crea un espacio de trabajo en blanco que se utiliza para el desarrollo del diseño.
- Crear el Diseño: Se seleccionan los tipos de entradas y salidas que se desean, se agregan las interfaces de comunicación y por último se diseña las funciones lógicas que responden a las entradas y salidas.
- Simular el diseño: Después de tener el modelo lógico, se puede cambiar a vista de simulación y ver si el sistema responde adecuadamente. Se puede alternar entre la vista del diseño y de simulación para ajustar la lógica del desarrollo.
- Seleccionar configuración: Cuando se está en el desarrollo del proyecto, PSoC Designer recomienda los dispositivos PSoC que pueden soportar el diseño.
- Asignación de Pines: Se asignan manualmente las entradas y salidas de los pines o se permite que PSoC Designer asigne los pines automáticamente.
- Generación de Salida: Cuando se desarrolla el diseño, PSoC Designer genera el código embebido, compila el proyecto y relaciona el archivo con un dispositivo PSoC específico.
- Programar el dispositivo PSoC.

PSoC Designer no requiere de alguna licencia, las especificaciones y recomendaciones técnicas del equipo donde se va a instalar se muestran en la Tabla 2.2.

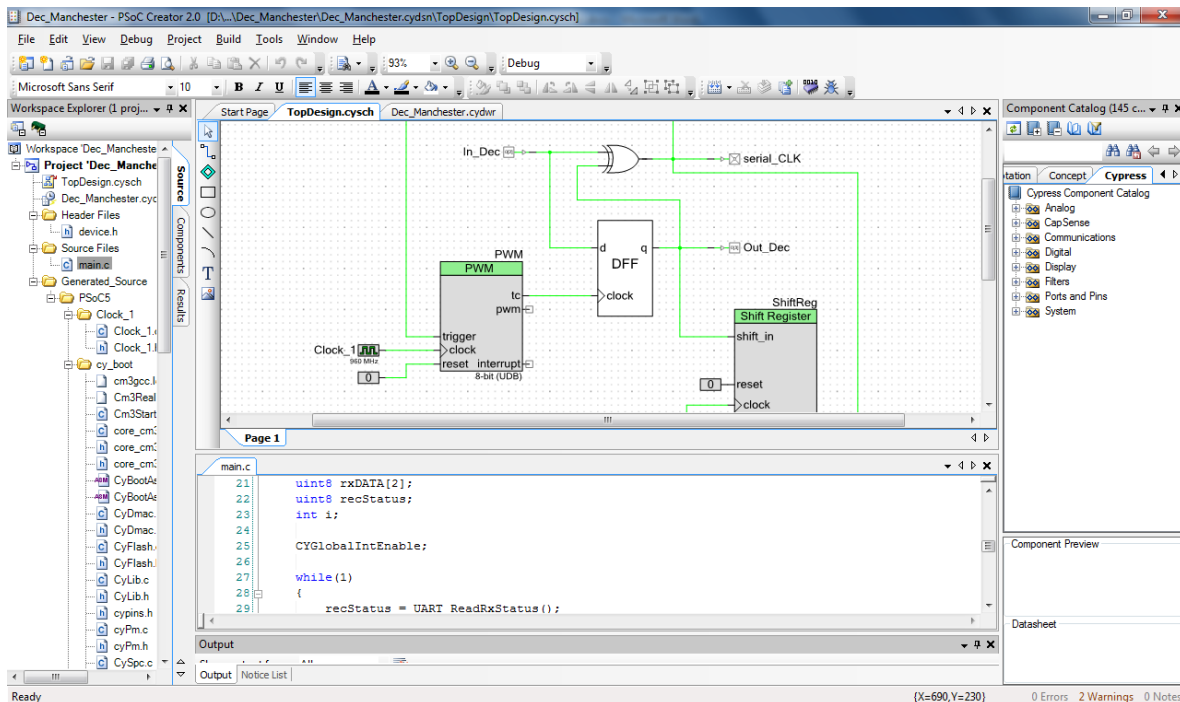
Tabla 2.2. Requerimientos Mínimos de Instalación de PSoC Designer

Requerimientos del Sistema	Mínimo
Sistema Operativo	Windows XP, Vista o 7
Velocidad del Procesador	2 GHz
Memoria RAM	1 GB
Espacio en Disco Duro	1 GB
Puertos	USB
Resolución de Pantalla	1024 x 768
Software Adicional	.NET Framework, Adobe Reader, PSoC Programmer

2.2.2 PSoC Creator

PSoC Creator es una herramienta de desarrollo que se utiliza para la configuración y programación del procesador PSoC3 y PSoC5 del kit CY8CKIT-001 PSoC. La herramienta permite seleccionar el tipo de procesador (PSoC3 o PSoC5) con el cual se va a desarrollar el proyecto.

Figura 2.12. Interfaz PSoC Creator



De manera general, el proceso que se debe seguir para crear un proyecto es el siguiente⁹ [16]:

- En la página de inicio se selecciona "*Create New Project*" y se completa la información solicitada.
- Se seleccionan y arrastran los componentes del Catalogo de Componentes al esquema de diseño.
- Los parámetros de los componentes se configuran para modificar su comportamiento según el diseño.
- Se agregan los pines de entrada y salida, las señales de reloj y otros parámetros para completar el diseño. Si es necesario los componentes se pueden conectar con la herramienta "Alambre".
- *PSoC Creator* permite desarrollar código en lenguaje C para funciones específicas de la aplicación.
- Generar y Depurar el programa.
- Programar el dispositivo PSoC.

PSoC Creator no requiere de alguna licencia, las especificaciones y recomendaciones técnicas del equipo donde se va a instalar se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Requerimientos Mínimos de Instalación de PSoC Creator

Requerimientos del Sistema	Mínimo
Sistema Operativo	Windows XP, Vista o 7
Velocidad del Procesador	1 GHz
Memoria RAM	1 GB
Espacio en Disco Duro	2 GB
Puertos	USB
Resolución de Pantalla	1024 x 768

⁹ En el Anexo A se detalla el proceso para la creación de un proyecto con la herramienta *PSoC Creator*.

3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN

En este capítulo se describe el diagrama detallado de un sistema prototipo de comunicación de corto alcance vía radio en 2.4 GHz, utilizando Codificación Manchester. Para este trabajo de grado se cuenta con dos kit de desarrollo CY8C-KIT001, en uno se implementa el codificador Manchester en el extremo transmisor y en el otro kit, se implementa el decodificador Manchester en el extremo receptor.

Cada kit cuenta con tres PSoC con características diferentes. La selección del procesador a utilizar en el sistema se basa en la velocidad de procesamiento y capacidad de almacenamiento en memoria. Se decide trabajar con el PSoC 5 ya que posee las mejores características de desempeño. Por lo tanto, se optimiza el tiempo de respuesta del sistema permitiendo obtener un prototipo más eficiente.

En ambientes donde se desea establecer una comunicación de corto alcance resulta práctico utilizar las bandas de frecuencias definidas para aplicaciones Industriales, Científicas y Médicas (ISM, *Industrial Scientific Medical*) para establecer la conexión requerida sin necesidad de adquirir algún permiso para el uso del canal. El aprovechamiento de estas bandas ha dado lugar a la aparición y creciente demanda de transceptores radio de bajo costo.

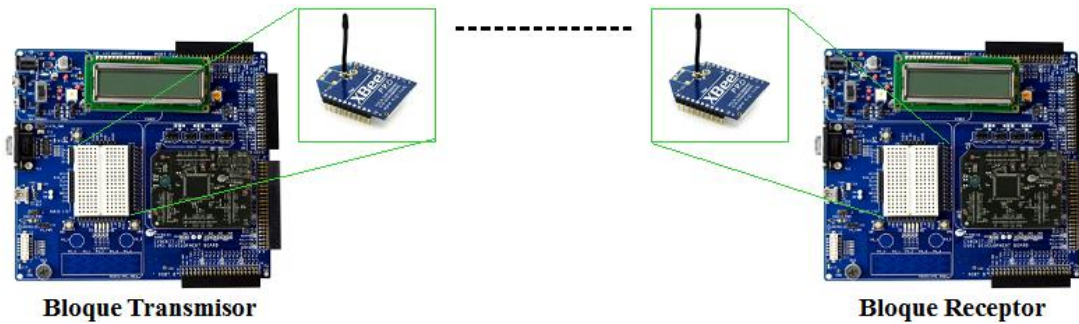
El kit de desarrollo CY8C-KIT001 no cuenta con un módulo transceptor de RF, que permita el envío de información inalámbricamente. Por ello es necesario considerar dispositivos externos que puedan adaptarse a la tarjeta de desarrollo y que permita la comunicación entre los dos puntos. La tarjeta de desarrollo del kit cuenta con una interfaz que permite la conexión de un módulo Artaflex AWP24S Wireless USB que opera en la frecuencia de 2.4 GHz, pero debido a su alto costo no es viable para este trabajo. *Digi International*® desarrolla un módulo transceptor XBee accesible y adaptable de bajo costo y bajo consumo, que opera con el protocolo de comunicación 802.15.4 a una frecuencia de 2.4 GHz y permite la comunicación mediante una sencilla interfaz serial con otros dispositivos. Debido a que este módulo permite ser conectado al kit a través de tarjetas adaptadoras, se considera la mejor opción para dar solución al requerimiento de comunicación en 2.4 GHz

Así, además de utilizar el kit para el desarrollo de la Codificación y Decodificación, también se hace necesaria la implementación de bloques que permitan la interacción del PSoC con los transceptores XBee.

3.1 COMPONENTES DEL SISTEMA PROTOTIPO DE COMUNICACIÓN

Los componentes utilizados en la implementación de sistema de comunicación se muestran en la Figura 3.1. Para el desarrollo de este trabajo es fundamental la descripción de los bloques de transmisión y recepción y el transceptor XBee. En el bloque transmisor se desarrolla la Codificación Manchester de la información en el Kit CY8C-KIT1 y se transmite a través de un módulo XBee. En el bloque receptor, la información codificada se recibe en el módulo XBee y es decodificada en el Kit CY8C-KIT1.

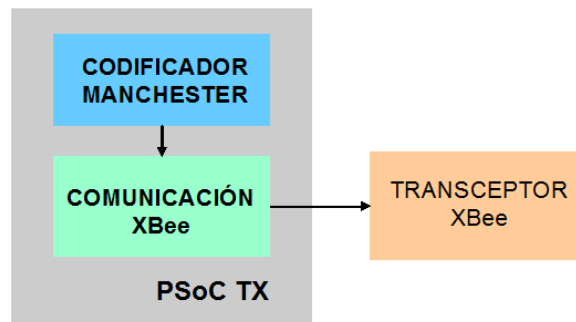
Figura 3.1. Diagrama General del Sistema de Comunicación



3.1.1 Bloque Transmisor

Este bloque es el encargado de realizar la Codificación Manchester de la información y su transmisión inalámbrica en la banda de frecuencia de 2.4 GHz. Para la implementación se cuenta con un Kit CY8C-KIT001, en el cual se desarrolla la Codificación Manchester y se adaptan los datos para ser transmitidos de forma inalámbrica a través del módulo transceptor XBee, como se observa en la Figura 3.2.

Figura 3.2. Diagrama del bloque transmisor

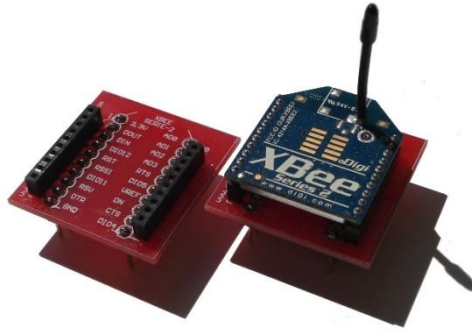


En la etapa del CODIFICADOR MANCHESTER, se desarrolla la aplicación que realiza la codificación de una cadena de bytes que se genera a 9600 bps. A la salida de este bloque se obtiene una señal de la información codificada a 19200 bps (el doble de la velocidad de la información generada) y por cada byte de la información original se obtiene una cadena de 16 bits.

En la etapa de COMUNICACIÓN XBee, se captura la cadena de 16 bits proveniente del CODIFICADOR MANCHESTER y se divide en dos bytes para ser enviados a la interfaz serial del transceptor byte por byte. Esta etapa es necesaria debido a que el formato de la señal entregada por el codificador no puede ser interpretado por el XBee, pues no tiene un estado de inactividad alto ni bits de inicio y parada como lo requiere este módulo.

El TRANSCEPTOR XBee se conecta a la protoboard de la tarjeta de desarrollo del PSoC mediante un adaptador de pines mostrado en la Figura 3.3 y se configura la comunicación serial a 19200 bps.

Figura 3.3. Adaptador módulo XBee

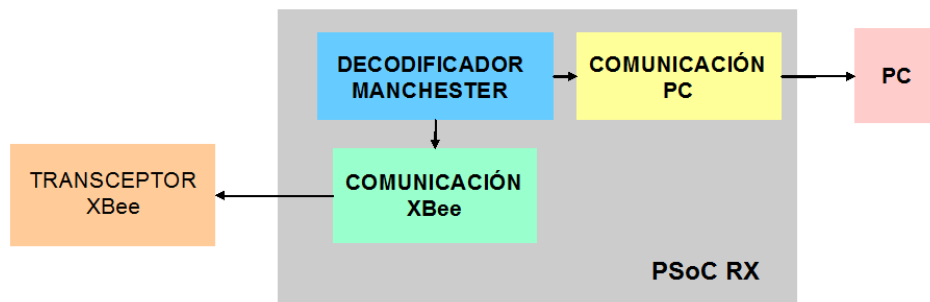


Para verificación de errores en recepción, se transmite un número de bytes fijos los cuales se programan en la memoria del PSoC. En el bloque receptor se conoce esta información para así poder determinar el número de paquetes perdidos y errados durante la comunicación.

3.1.2 Bloque Receptor

Este bloque es el encargado de recibir la información transmitida y decodificarla. Para implementar este bloque se cuenta con otro Kit CY8C-KIT1, en cual se desarrolla la Decodificación Manchester. Para el buen funcionamiento de la decodificación es necesario que se configuren los mismos parámetros de comunicación serial del transceptor XBee tanto en transmisión como en recepción.

Figura 3.4. Diagrama del bloque receptor



El TRANSEPTOR XBee recibe la señal proveniente de la etapa receptora, y la entrega por su interfaz serial configurada a 19200 bps al PSoC. También se utilizó el adaptador de pines mostrada en la Figura 3.3 para la conexión con la protoboard de la tarjeta de desarrollo.

La etapa de COMUNICACIÓN XBee captura la información cada dos bytes¹⁰ y forma una cadena de 16 bits con estado inicial bajo para que pueda ser interpretado por el DECODIFICADOR MANCHESTER.

¹⁰ 1 byte de información sin codificar equivale a 2 bytes de información codificada transmitidos.

La etapa DECODIFICADOR MANCHESTER decodifica la cadena de 16 bits obteniendo el byte de información original a una velocidad de 9600 bps, a la vez recupera la señal de reloj embebida en la señal codificada.

La etapa de COMUNICACIÓN PC toma el dato decodificado haciendo uso de la señal de reloj recuperada y lo adapta para ser transmitido en formato serial al PC. Se hace uso de la interfaz RS232 de la tarjeta de desarrollo para hacer la conexión con el puerto USB del computador.

En PC se determina el número de paquetes perdidos y errados de la información recibida mediante la comparación con la información original byte a byte.

3.1.3 XBee

El sistema implementado utiliza el módulo transceptor XBee fabricado por la empresa *Digi International*®, el cual cumple con el estándar IEEE 802.15.4 y opera dentro de la banda de frecuencia ISM de 2.4 GHz. Es un dispositivo de bajo costo y bajo consumo de energía lo cual permite adaptarlo a sistemas de comunicación de corto alcance.

Figura 3.5. Módulo Transceptor XBee [17]



La Tabla 3.1 contiene las especificaciones principales del XBee.

Tabla 3.1. Especificaciones del Módulo Transceptor XBee

Banda de Frecuencia	ISM 2.4 GHz
Velocidad de Transmisión de Datos Serial	1200 bps – 250 Kbps
Velocidad de Transmisión de Datos RF	250 Kbps
Protocolo de Transmisión	802.15.4
Potencia de Salida	10 mW
Sensibilidad	-100 dBm
Voltaje de Alimentación	2.8 – 3.4 V
Rango Alcance Indoor	90 m
Rango Alcance Outdoor	1600 m
Dimensiones	2.438 cm x 3.294 cm
Temperatura de Operación	-40 a 85°C
Opciones de Antena	Antena Integrada Whip, Antena Embebida PCB, Conector U.FL, Antena RPSMA
Número de Canales	12 Canales en Secuencia Directa

La Tabla 3.2 muestra el número de pin, el nombre y su respectiva descripción.

Tabla 3.2. Definición de Pines

No. Pin	Nombre	Descripción
1	VCC	Fuente
2	DOUT	Datos de Salida UART
3	DIN / CONFIG	Datos de Entrada UART
4	DO8	Salida Digital 8
5	RESET	Reset del Módulo
6	PWM0/RSSI	Salida PWM 0/Indicador de señal recibida
7	PWM1	Salida PWM 1
8	[reservado]	No conectar
9	DTR/SLEEP_RQ/DI8	Control modo SLEEP/Entrada Digital 8
10	GND	Tierra
11	AD4/DIO4	Entrada Analógica 4 o Digital I/O 4
12	CTS/DIO7	Control de Flujo Limpiar para Enviar o Digital I/O 7
13	ON/SLEEP	Módulo Indicador de Estado
14	VREF	Voltaje de Referencia para entrada A/D
15	Asociado/AD5/DIO5	Indicador Asociado, Entrada Analógica 5, Digital I/O 5
16	RST/DIO6	Control de Flujo Solicitud para Enviar o Digital I/O 6
17	AD3/DIO3	Entrada analógica 3 o Digital I/O 3
18	AD2/DIO2	Entrada analógica 2 o Digital I/O 2
19	AD1/DIO1	Entrada analógica 1 o Digital I/O 1
20	AD0/DIO0	Entrada analógica 0 o Digital I/O 0

Las conexiones mínimas que se necesitan para el funcionamiento del módulo transceptor XBee son VCC, GND, DOUT y DIN.

3.1.3.1 Modos de Direccionamiento

Los módulos XBee pueden ser configurados para transmitir paquetes de dos formas:

1. Modo *Unicast*

La comunicación se hace entre dos nodos de la red con direcciones específicas. El módulo transmisor envía información al módulo receptor, si la información se recibe, el receptor envía un ACK al módulo transmisor. Así, si el módulo transmisor no recibe el ACK volverá a enviar el paquete hasta tres veces o hasta que reciba el ACK.

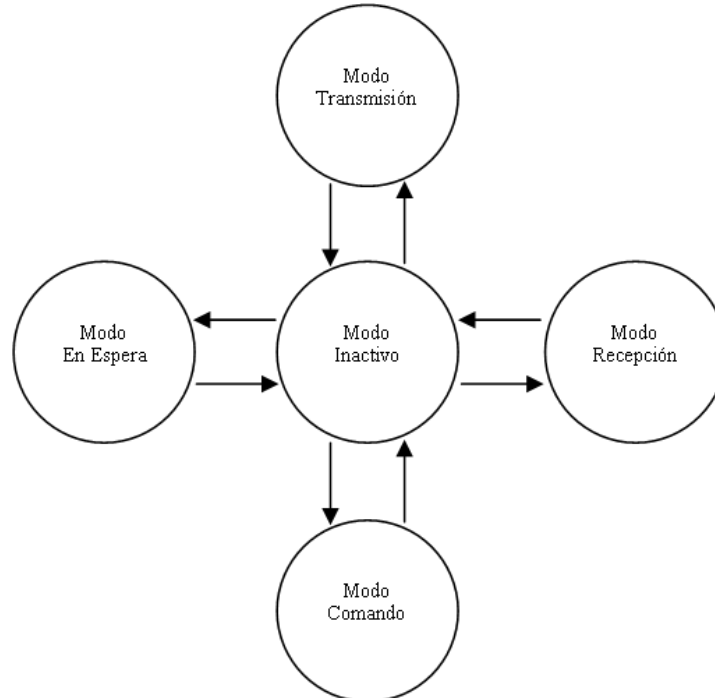
2. Modo *Broadcast*

La comunicación se hace entre un nodo transmisor y todos los nodos de la red. En este tipo de transmisión no hay confirmación de recepción de paquetes ACK.

3.1.3.2 Modos de Operación

El XBee tiene cuatro modos de operación que se muestran en la Figura 3.6.

Figura 3.6. Modos de Operación



1. Modo Inactivo

Cuando el módulo no se encuentra en ninguno de los otros modos de operación, se encuentra en modo inactivo.

2. Modo Recepción/Transmisión

El módulo se encuentra en este modo, si en algún momento recibe o transmite datos a través de la entrada serie DIN o a través de la antena RF.

3. Modo en Espera

El módulo se puede activar en este modo para entrar en bajo consumo cuando no está en uso. Para entrar en Modo en Espera se hace de dos formas:

- El pin SLEEP_EQ debe estar en estado alto y el parámetro SM¹¹ tiene que estar en 1, 2 o 5.

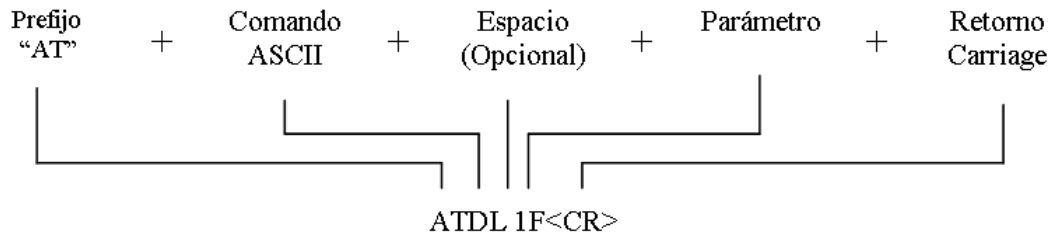
¹¹ Sleep Mode (SM): Comando que se encarga de establecer y leer la configuración del Modo en Espera.

- Estando en el Modo Inactivo, se configura el parámetro ST¹². Después de cumplir con este tiempo el módulo pasa a Modo en Espera, el parámetro SM debe estar en 5 ó 4.

4. Modo Comando

El módulo ingresa a modo comando cuando recibe a través de la interfaz serial, pin DIN el comando "AT+++" o la estructura de comandos AT que se muestra en la Figura 3.4.

Figura 3.7. Estructura Comandos AT



3.1.3.3 Modos de transmitir la información

1. Modo Transparente

Este modo está configurado por defecto en los módulos y es útil cuando no se necesitan tener ningún tipo de control de la información o la red. Todos los datos recibidos a través del UART en el pin DIN se sitúan en cola para la transmisión RF y cuando se reciben los datos por RF, estos son enviados al pin DOUT.

2. Modo API

Este modo permite empaquetar la información a transmitir en tramas que definen las operaciones o eventos dentro del módulo. Por ejemplo, dentro de las tramas se puede enviar información de direccionamiento de la información a través de la red.

La trama de transmisión incluye:

- Información transmitida
- Comandos AT

La trama de recepción incluye:

- Información recibida
- Comando de respuesta
- Notificación de eventos

¹² *Time Before Sleep (ST)*: Comando que se encarga de establecer y leer el periodo de inactividad antes de activar el Modo de Espera.

3.1.3.4 Software X-CTU

Para la administración de los módulos XBee, Digi suministra un software que no requiere licencia, consta de cuatro pestañas: *PC Settings*, *Range Test*, *Terminal*, *Modem Configuration*.

- Configuración PC (*PC Settings*):

Permite seleccionar y configurar el puerto de comunicación del computador al cual está conectado el módulo XBee. Algunas de las características que se pueden configurar son:

- Velocidad de Transmisión Serial
- Control de Flujo
- Bits de Datos
- Paridad
- Bit Stop

- Prueba de Alcance (*Range Test*):

Permite comprobar el alcance de la comunicación radio entre dos módulos XBee mediante el envío de paquetes y la verificación de respuesta. El tamaño o el tipo de información enviada para la prueba pueden ser modificados. En la casilla Crear Datos (*Create Data*) se puede cambiar el tamaño del paquete o en la ventana de transmisión (*Transmit*) se puede escribir el texto a enviar. Si se selecciona la casilla RSSI, se pueden obtener datos de la intensidad de señal recibida de la prueba de alcance de la comunicación.

- Terminal (*Terminal*):

A través del terminal se tiene la capacidad de enviar y recibir datos predefinidos (paquetes ensamble) y datos en formato hexadecimal y ASCII, que se procesan en el módulo XBee. En la ventana principal se muestra la información que se ha enviado y la información que se ha recibido a través del puerto del computador al cual está conectado el transceptor.

- Configuración del Modem (*Modem Configuration*):

Es una interfaz gráfica para leer y configurar las características del firmware de los transceptores XBee. Algunas características para configurar son: Canal de transmisión, Potencia de transmisión, Velocidad de transmisión serial de datos, etc.

3.2 CANAL DE TRANSMISIÓN

El canal de transmisión es el medio por el cual se envía la información, en este caso un canal inalámbrico. La transmisión se inicia en una antena que actúa como unidad de acoplamiento de ondas electromagnéticas entre la fuente de la señal y el espacio libre. Debido al fenómeno de difracción las ondas de radio se propagan incluso más allá de la línea de vista. En el extremo receptor se emplea una antena para captar las ondas radiadas estableciendo un enlace de comunicación. [19]

La banda de frecuencia en la que opera el sistema es 2.4 GHz y se escoge el primer canal de los 16 disponibles del equipo transceptor.

Las características del medio pueden variar de acuerdo al escenario en donde se implemente el sistema de comunicación, debido a que se presentan reflexión, difracción y dispersión de la señal.

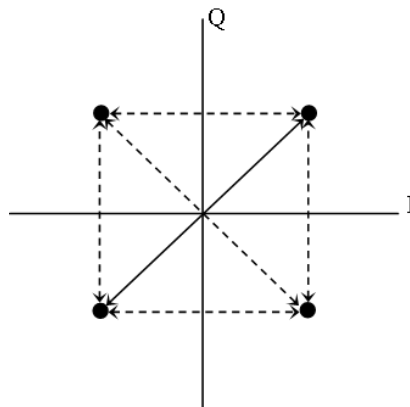
El escenario exterior se encuentra libre de obstáculos y su aproximación teórica está dada por el canal AWGN. En escenario interior por el contrario, se debe considerar efectos adicionales como la multitrayectoria.

3.3 ESQUEMA DE MODULACIÓN

El esquema de modulación digital nos permite transmitir los datos vía radio a través de una señal portadora que cambia sus características dependiendo de la señal de información. El esquema de modulación del sistema prototipo de comunicación viene definido por el módulo transceptor XBee, que hace uso del protocolo IEEE 802.15.4 que trabaja con Modulación O-QPSK (*Offset Quadrature Phase shift keying*), que es un tipo de Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK, *Quadrature Phase shift keying*).

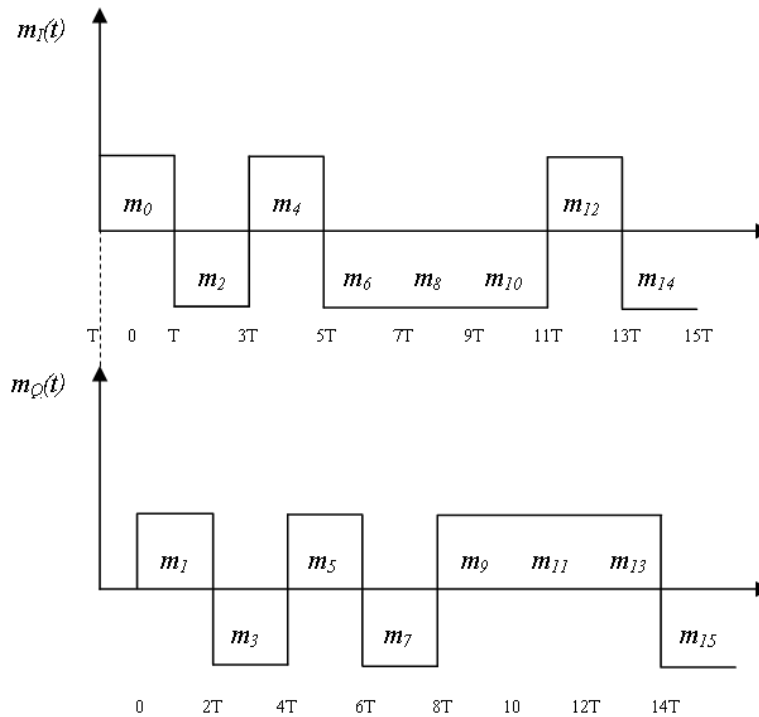
En la modulación QPSK, la información está contenida en la fase de la portadora de la señal que se transmite. Las transiciones de fase se muestran en la Figura 3.5.

Figura 3.8. Constelación QPSK [18]



Las transiciones de fase en la portadora puede tener saltos de $\pm 180^\circ$, si la señal es filtrada durante la transmisión puede ser que estos saltos produzcan cambios en la amplitud de la portadora causando errores de símbolo adicionales en la detección [19]. En la modulación O-QPSK, la secuencia de bits se desfasa la mitad del periodo del símbolo en una de las componentes, como se puede observar en la Figura 3.9 la componente en Q se desfasa medio periodo de bit de la componente en I.

Figura 3.9. Formas de Ondas en Fase y Cuadratura en Modulación O-QPSK [18]



Por lo anterior, los cambios máximos de fase que puede ocurrir en la transmisión de la señal son de $\pm 90^\circ$. Esto permite que la amplitud de la portadora sea constante y evita errores de símbolo en la detección por este fenómeno.

La señal O-QPSK es similar a la señal QPSK, por tanto, en el dominio del tiempo se pueden describir matemáticamente mediante la Ecuación 3.1. [18]

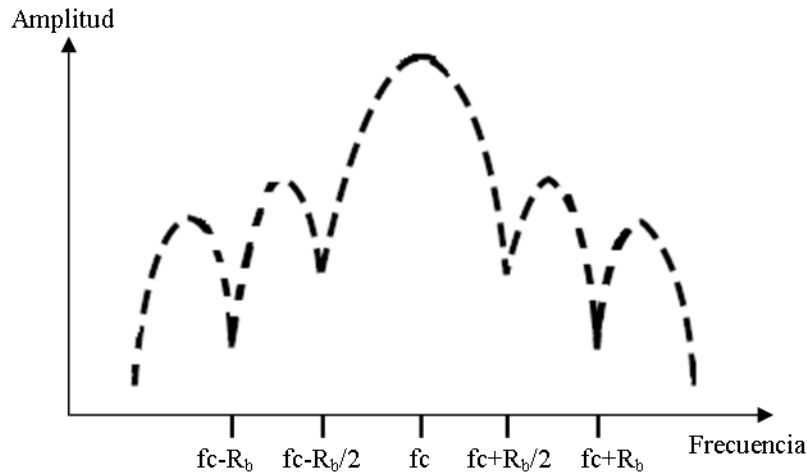
$$S(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos\left[(i-1)\frac{\pi}{2}\right] \cos(2\pi f_c t) - \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \sin\left[(i-1)\frac{\pi}{2}\right] \sin(2\pi f_c t) , \quad (3.1)$$

donde,

- $i = 1, 2, 3, 4$
- E_s : Energía por símbolo de la señal transmitida
- T_s : Duración del símbolo
- f_c : Frecuencia de la portadora

En el dominio de la frecuencia, una señal QPSK se representa mediante la Figura 3.10, en donde se muestra que no hay líneas espectrales discretas y hay nulos en los múltiplos de la velocidad del símbolo R_b [20].

Figura 3.10. Espectro de la Señal QPSK [20]



El ancho de banda teórico de la señal QPSK se mide entre los nulos del lóbulo principal, y corresponde al valor presentado en la Ecuación 3.2. [21]

$$B[Hz] = \left(f_c + \frac{R_b}{2} \right) - \left(f_c - \frac{R_b}{2} \right) = R_b \quad (3.2)$$

El ancho de banda de una señal QPSK es la mitad del ancho de banda de una señal BPSK.

3.4 PROTOCOLO DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN

Los dispositivos XBee utilizan el estándar IEEE 802.15.4, el cual se caracteriza por el poco tráfico de datos y baja potencia de transmisión. Generalmente una de sus aplicaciones es en Redes de Área Personal Inalámbricas (WPAN, *Wireless Personal Area Networks*), las cuales transmiten información en distancias cortas, con poca infraestructura y bajo requerimiento de calidad. Por tanto, esto permite que su implementación sea de bajo costo.

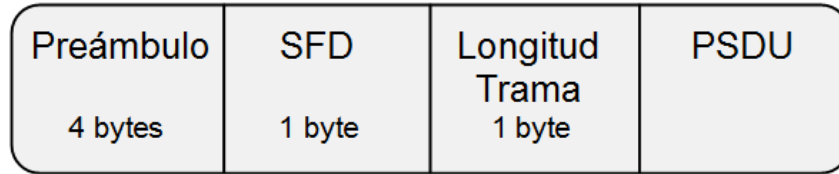
Algunas características se encuentran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Características Generales IEEE 802.15.4

Propiedades	Rango
Frecuencia de Operación	868 MHz / 902 MHz / 2400 MHz
Tasa de Transmisión de Datos	20 Kbps / 40 Kbps / 250 Kbps
Modulación	BPSK / BPSK / O-QPSK
Tasa de Chip	300 Kcps / 600 Kcps / 2000 Kcps

La estructura de la trama se observa en la Figura 3.8.

Figura 3.11. Trama IEEE 802.15.4



3.3.1 Preámbulo

El preámbulo de la trama se compone de un conjunto de 32 bits (4 bytes) y es utilizado por el transceptor para obtener la secuencia de chips del proceso de desensanchamiento y símbolos de sincronización.

3.3.2 Limitador de Inicio de trama (SFD, *Start of Frame Delimiter*)

SFD se compone por 8 bits (1 byte) e indica el final de la sincronización (preámbulo) y el inicio de los datos del paquete. El formato lo indica la Figura 3.12.

Figura 3.12. Formato SFD

Bits:	0	1	2	3	4	5	6	7
	1	1	1	0	0	1	0	1

3.3.3 Longitud de Trama

La longitud de trama se compone por 1 bits y especifica el número total de bytes contenidos en el PSDU (es decir, la carga útil).

3.3.4 Unidad de Datos de Servicio de Capa Física (PSDU, *Physical layer Service Data Unit*)

La PSDU tiene una longitud variable y contiene los datos del paquete.

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

4.1 ESCENARIOS DE PRUEBA

Para evaluar el desempeño del sistema de comunicación de datos vía radio en 2.4 GHz, se consideran dos escenarios distintos: exterior (espacio libre) e interior y el escenario interior bajo condiciones de interferencia. Para las pruebas reales se tomaron medidas del sistema de comunicación con codificación Manchester y sin codificación Manchester, variando en cada uno de los casos la distancia de separación entre los módulos de transmisión y recepción. Los resultados obtenidos de las medidas reales son comparados con la predicción realizada por la herramienta software *Wireless InSite*¹³, en la que se recrearon los dos escenarios.

4.1.1 Escenario Exterior (*Outdoor*)

El escenario exterior considerado en el presente trabajo de grado, fue la cancha de fútbol del Centro Deportivo Universitario TULCAN de la Universidad del Cauca (CDU), que es un espacio que presenta las condiciones necesarias para la realización de las pruebas.

4.1.2 Escenario Interior (*Indoor*)

El escenario interior en el que se llevó a cabo la simulación y las pruebas del sistema, fue el corredor del segundo piso del edificio de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca. Este escenario está conformado por gran cantidad de paredes, puertas y ventanas, un piso y el techo, tiene aproximadamente 45 m de largo por 2 de ancho. Este escenario presenta características de multitrayectoria en la señal transmitida y permite la realización de las pruebas.

4.2 MEDIDA DEL ANCHO DE BANDA DE LA SEÑAL DE RADIOFRECUENCIA

Para determinar el ancho de banda del sistema de comunicación, se utilizó el Analizador de Espectro ZLV, que opera en un rango de frecuencia de 9 KHz a 6 GHz y combina las funciones de un analizador de redes, un analizador de espectro y un medidor de potencia. Debido a que la velocidad de transmisión de la señal del transceptor XBee siempre es de 250 Kbps y a la técnica de espectro ensanchado que usa, no importa la información que se transmita en esta prueba el resultado será el mismo.

Para la modulación OQPSK el ancho de banda corresponde a la diferencia de las frecuencias donde ocurren los primeros nulos. Este ancho de banda contiene la mayor parte de la potencia de la señal transmitida. Para encontrar los valores correspondientes a las medidas realizadas con el Analizador de Espectro ZLV en porcentaje de error, se plantea la Ecuación 4.1.

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

¹³ Información disponible en <http://www.remcom.com/wireless-insite>

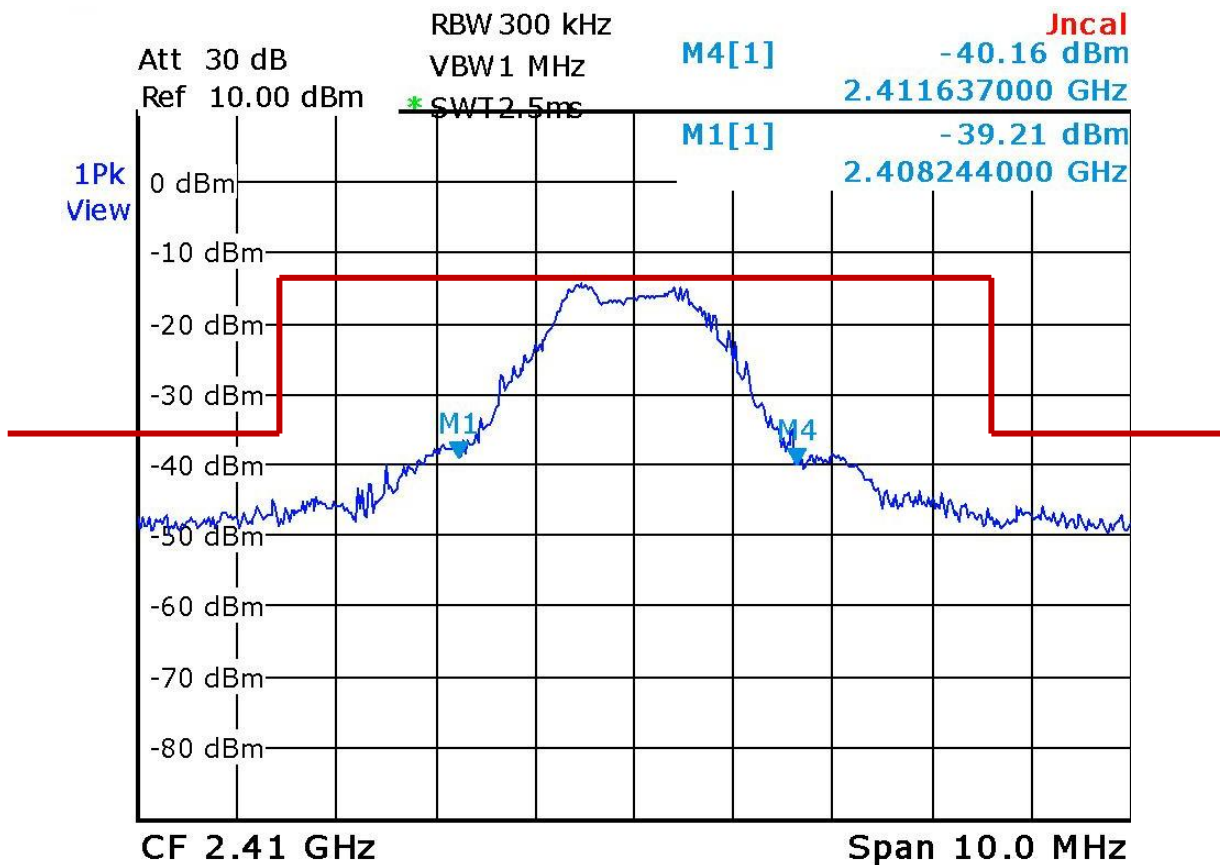
En la Figura 4.1 se observa el espectro de la señal modulada, donde el ancho de banda útil corresponde a la separación en frecuencia de los primeros nullos que están representados por los marcadores M4 y M1¹⁴. En rojo se puede observar la máscara de densidad espectral de potencia que aporta los límites dentro de los cuales debe estar el espectro de la señal transmitida [22].

$$BW[\text{MHz}] = M4 - M1 = 2.411637000 \text{ GHz} - 2.408244000 \text{ GHz} = 3.39$$

Al remplazar el valor teórico y experimental en la Ecuación 4.1, es posible obtener el porcentaje de error en la medida.

$$\text{Error} = \frac{|2 \text{ MHz} - 3.39 \text{ MHz}|}{2 \text{ MHz}} * 100\% = 69.5\%$$

Figura 4.1. Ancho de Banda



¹⁴ Para la ubicación de los marcadores M1 y M4, se desplazan los cursores hasta la caída de señal más baja del lóbulo principal, a partir de donde se aprecia un incremento en el nivel de señal.

4.3 MEDIDA DE POTENCIA DE RECEPCIÓN Y PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN

Para obtener los valores de las medidas de potencia, se hizo uso de la aplicación X-CTU, especialmente desarrollada por el fabricante del transceptor Xbee, *Digi International*®. Esta aplicación permite por medio de comandos de diagnóstico realizar consultas acerca de la operación de los dispositivos por medio de comandos AT [21]. Uno de estos comandos es DB¹⁵, que se utiliza para leer la intensidad de la señal recibida (en dBm) del último paquete RF bueno recibido.

Las medidas de potencia se realizaron en el escenario exterior e interior para el sistema con codificación Manchester y sin codificación Manchester. En la ejecución de las pruebas se realizaron al menos 10 tomas de medida por cada unidad de distancia en cada caso. Fue necesario retirar la antena del transceptor receptor para desacoplar el prototipo de comunicación y generar pérdidas para disminuir el alcance de los módulos XBee ya que es bastante grande (90 mts para interior y 1600 mts para exterior según fabricante) lo que dificultaba la toma de medidas pues los lugares establecidos como escenarios de prueba tienen distancias limitadas.

Para las medidas de potencia de recepción, los módulos XBee se configuran según la tabla 4.1

Tabla 4.1. Parámetros de configuración de XBee-PRO

Parámetro	Valor
Frecuencia de operación	2410MHz (Banda 2.4 GHz / Canal C)
Potencia de transmisión	LOWEST /PL=0 / 10 dBm
Ganancia de antena	1.5 dBi
Tipo de antena	Wire Whip
Modo de operación	Transparente (AP=0)

Para el modo de operación transparente del módulo XBee, está configurado por defecto sin retransmisiones (RR=0) y se transmite un byte de información en cada paquete RF enviado (RO=0).

En el kit de desarrollo CY8CKIT-001 PSoC del bloque transmisor se implementó la aplicación que envía al módulo XBee 5000 bytes de información con codificación Manchester para ser transmitidos, y en el kit del bloque receptor se implementó la aplicación que toma esta información del XBee, la decodifica y la envía al PC.

¹⁵ Comando DB: usado para leer la intensidad de la señal del último paquete RF bueno recibido (RSSI- *Received signal strength indication*). Reporta valores precisos entre -40 dBm y la sensibilidad del módulo receptor (para XBee es -100 dBm). Se reportan valores absolutos en hexadecimal y su equivalente en formato decimal de valor negativo es el valor en dBm de la intensidad de señal. Para un XBee RSSI está entre 0x24 y 0x64 (-36 dBm y -100 dBm). [21]

Debido a que también se realizan pruebas sin codificación, fue necesario implementar en cada Kit de desarrollo la aplicación que envía los 5000 bytes de información sin codificación Manchester al XBee en la transmisión y otra que recibe en el extremo receptor la información y la envía al PC para su análisis. Estas aplicaciones se detallan en el ANEXO B.

Para encontrar el número adecuado de paquetes a transmitir, se realizó una prueba donde se transmitió 10, 100, 1000, 5000 y 10000 paquetes y se observó la cantidad de paquetes recibidos con y sin errores. Se encontró que cuando se envió 1000 paquetes o más la cantidad de bytes entregados correctamente y dañados eran muy similares, mientras que para menos de 1000 estas cantidades variaban mucho. Se descartó el envío de 10000 paquetes debido a que utiliza un mayor tiempo de ejecución. Por lo tanto, el número de paquetes a transmitir se determinó en 5000.

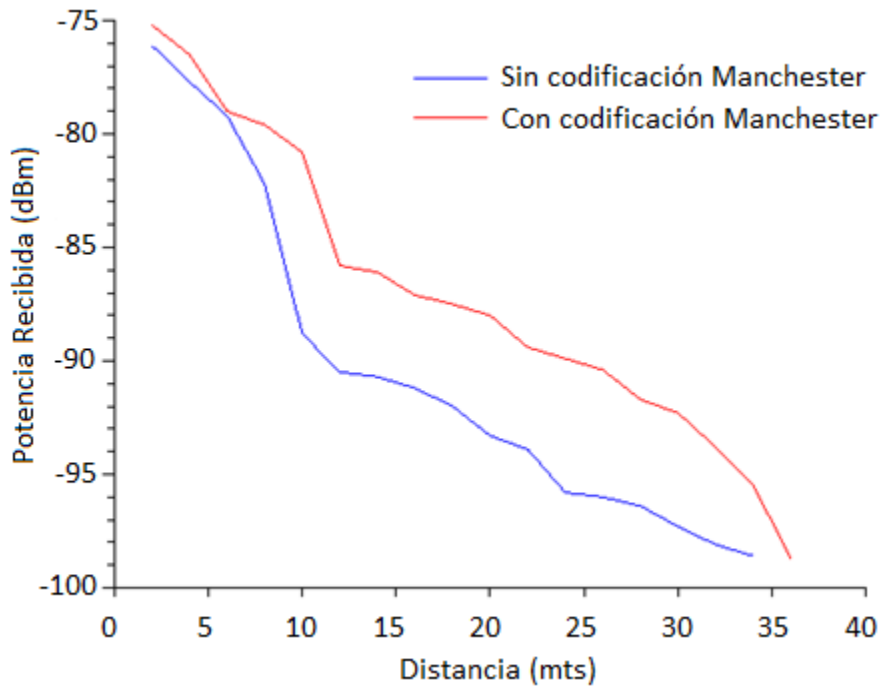
4.3.1 Escenario Exterior

Las medidas de potencia en el escenario exterior se tomaron garantizando siempre línea de vista, cada 2 metros, hasta la distancia donde se dejan de recibir paquetes con éxito. Para este escenario se lograron recibir paquetes hasta los 34 metros para el sistema sin codificación Manchester y 36 metros para el sistema con codificación Manchester. Estas medidas están consignadas en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Potencia recibida en exterior con y sin codificación Manchester

Distancia (mts)	Potencia Recibida sin codificación (dBm)	Potencia Recibida con codificación Manchester (dBm)
2	-76,1	-75,2
4	-77,7	-76,5
6	-79,2	-79
8	-82,2	-79,6
10	-88,8	-80,8
12	-90,5	-85,8
14	-90,7	-86,1
16	-91,2	-87,1
18	-92	-87,5
20	-93,3	-88
22	-93,9	-89,4
24	-95,8	-89,9
26	-96	-90,4
28	-96,4	-91,7
30	-97,3	-92,3
32	-98,1	-93,8
34	-98,6	-95,5
36		-98,7

Figura 4.2. Potencia recibida en escenario exterior con y sin codificación Manchester



En la Figura 4.2 se observan el comportamiento de las curvas de potencia recibida en el escenario exterior, para el sistema implementado sin codificación (línea azul) y con codificación Manchester (línea roja). Se observa que aunque los valores medidos son similares se puede percibir una mejor cobertura para el sistema con codificación Manchester, debido a que la adición de esta técnica proporciona robustez al sistema.

Se hallaron las pérdidas de propagación haciendo uso de la ecuación de balance [22], a partir de la cual se obtuvo la ecuación 4.2.

$$L_b [dB] = P_{TX} - P_{RX} - L_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{RX} \quad (4.2)$$

Las pérdidas L_{TX} están relacionadas con las pérdidas aportadas por los conectores utilizados entre la antena y el transmisor, en este sistema las pérdidas se descartan debido a que la antena está incorporada en el equipo transmisor XBee. De forma similar, en la etapa receptora L_{RX} se considera despreciable por la misma razón.

Según especificaciones del fabricante, la ganancia de la antena tipo Wire Whip¹⁶ es 1.5 dBi. En el sistema se utilizó antena solo para el equipo transmisor, debido a que el alcance con la antena en el equipo receptor era demasiado grande. Al retirar la antena el módulo receptor actúa como un radiador isotrópico por tanto su ganancia es 0 dBi. De esta forma, la ganancia aportada por antenas es $G = G_{TX} + G_{RX} = 1.5 \text{ dBi}$.

¹⁶ Típicamente las antenas utilizadas por el módulo Xbee tienen los valores de ganancia, para la antena integrada tipo Whip de 1.5 dBi y para antena tipo Dipolo de 2.1 dBi [21].

La potencia de transmisión es 10 dBm como se mencionó anteriormente, este valor corresponde a la menor de las potencias configurables del módulo XBee.

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones en la ecuación 4.2 las pérdidas de propagación están dadas por la ecuación 4.3.

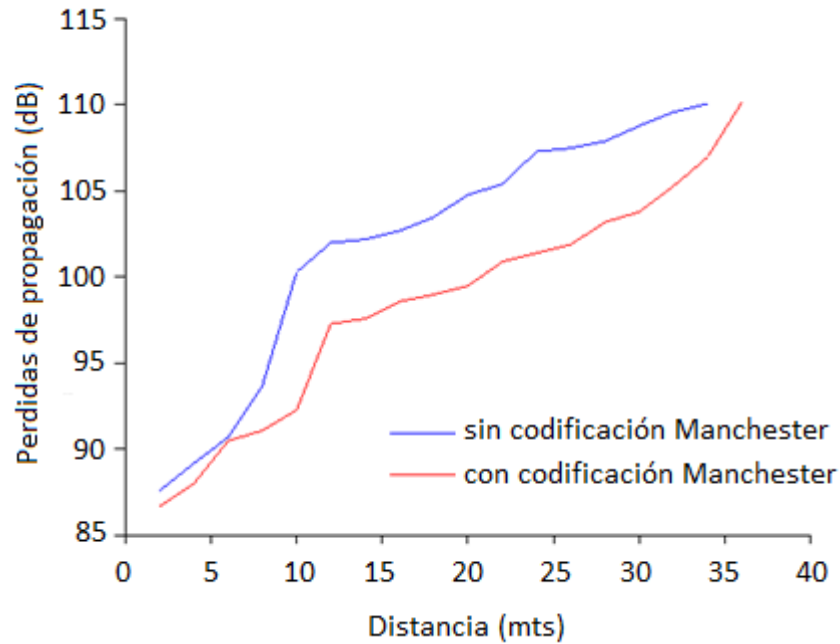
$$L_b[dB] = 11.5 dBm - P_{RX}[dBm] \quad (4.3)$$

Con la ecuación 4.3 y con los valores de potencia de recepción medidos, se obtiene las pérdidas de propagación prácticas para los dos casos (sin codificación y con codificación Manchester) y para diferentes valores de distancia. Ver Tabla 4.3, columnas 2 y 3. Figura 4.2

Tabla 4.3. Pérdidas de propagación en escenario exterior con y sin codificación Manchester

Distancia (mts)	Valores Prácticos		Valores Teóricos	
	Pérdidas sin codificación (dBm)	Pérdidas con codificación Manchester (dBm)	Pérdidas sin codificación (dBm)	Pérdidas con codificación Manchester (dBm)
2	87,6	86,7	84,22	79,92
4	89,2	88	90,24	85,94
6	90,7	90,5	93,76	89,46
8	93,7	91,1	96,26	91,96
10	100,3	92,3	98,20	93,90
12	102	97,3	99,78	95,48
14	102,2	97,6	101,12	96,82
16	102,7	98,6	102,28	97,98
18	103,5	99	103,31	99,01
20	104,8	99,5	104,22	99,92
22	105,4	100,9	105,05	100,75
24	107,3	101,4	105,80	101,50
26	107,5	101,9	106,50	102,20
28	107,9	103,2	107,14	102,84
30	108,8	103,8	107,74	103,44
32	109,6	105,3	108,30	104,00
34	110,1	107	108,83	104,53
36		110,2		105,03

Figura 4.3. Pérdidas de propagación en escenario exterior con y sin codificación Manchester



Para encontrar una referencia teórica que se ajuste a las características del sistema implementado, se recurre al modelo de pérdidas básicas de propagación en función de la distancia [23], dada en unidades logarítmicas por la ecuación 4.4.

$$L_b [dB] = 10 \log(k) + 10n \log(d) = L_0 + 10n \log(d), \quad (4.4)$$

donde L_0 es el valor de pérdidas de propagación para la potencia de recepción establecida a una distancia unitaria ($d = 1m$). Este valor se obtuvo experimentalmente para el escenario exterior, debido a que según especificaciones del fabricante el área mínima para localizar otro dispositivo es 20 centímetros [21]. El valor de L_0 corresponde a 78.2 dB ($P_{RX}=-66.7$ dBm) para el sistema sin codificación Manchester, y para el sistema con codificación Manchester es 73.9 dB ($P_{RX}=-62.4$ dBm).

Tabla 4.4. Valor de n para pérdidas de propagación

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

El valor del índice n que depende de las características del medio de propagación y el escenario donde se realizó las pruebas, se determinó a partir de los valores de la tabla 4.4. Se consideró para el escenario en espacio libre el valor de $n = 2$, para ambos casos, en los sistemas con y sin codificación Manchester.

Remplazando los valores de L_0 y n en la ecuación 4.4, se tiene que para el sistema sin codificación Manchester y con codificación Manchester, el modelo de pérdidas teóricas esta dado por las ecuaciones 4.5 y 4.6 respectivamente:

$$L_b [dB] = 78.2 + 20 \log(d [m]) \quad (4.5)$$

$$L_b [dB] = 73.9 + 20 \log(d [m]) \quad (4.6)$$

En la Tabla 4.3, columnas 2 y 4, y la Figura 4.4 se muestran las pérdidas de propagación para el sistema implementado sin codificación con los valores hallados en la práctica y los valores del modelo teórico de pérdidas de la ecuación 4.5.

En la Figura 4.5 se comparan los valores de pérdidas experimentales y teóricas según la ecuación 4.6, para el sistema implementado con codificación Manchester. Estos valores se resumen en la Tabla 4.3, columnas 3 y 5.

Las Figuras comparativa 4.4 y 4.5 que representan las pérdidas de propagación muestran una similitud entre los modelos teóricos y los valores prácticos, asemejándose en la tendencia de la curva.

Figura 4.4. Pérdidas de propagación en escenario exterior sin codificación Manchester

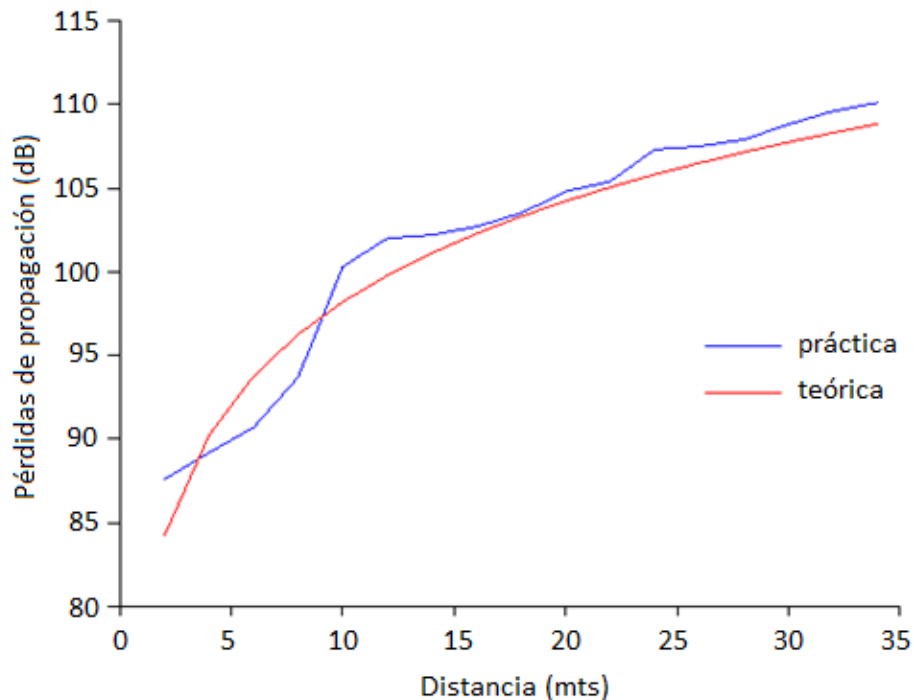
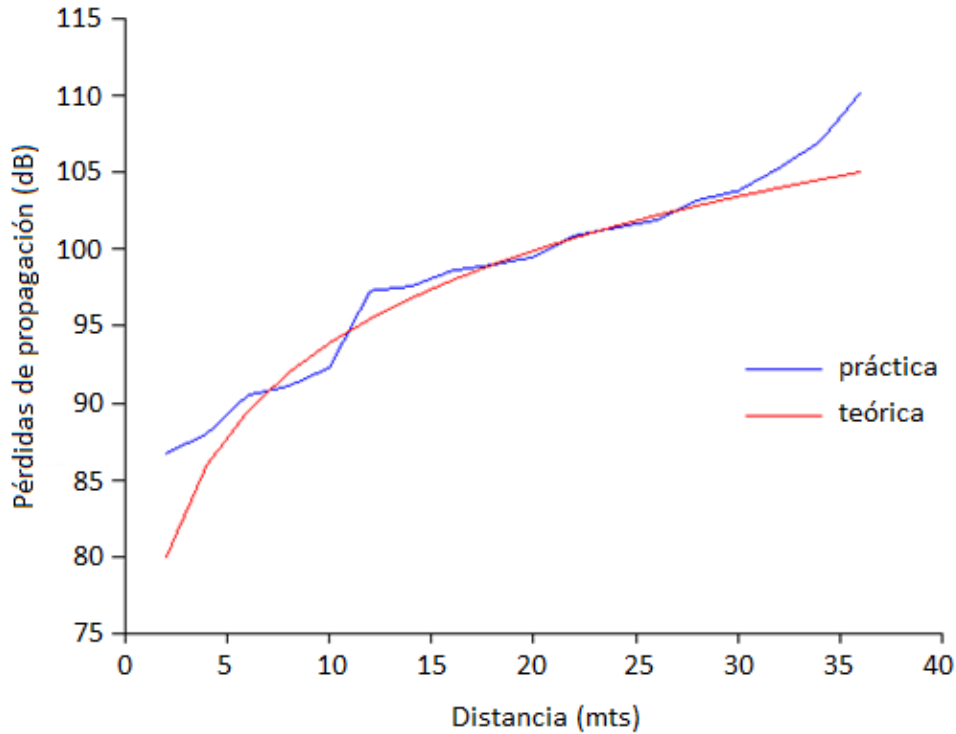


Figura 4.5. Pérdidas de propagación en escenario exterior con codificación Manchester



4.3.2 Escenario Interior

Para el escenario interior, las medias de potencia de recepción se tomaron cada 2 metros, hasta la distancia donde la potencia de recepción es menor a la sensibilidad del receptor, X-CTU (-100 dBm). Solo se consideraron las medidas en las que los equipos tenían línea de vista. Se tomaron medidas hasta 46 metros en los dos tipos de sistema, con y sin codificación Manchester. Estos valores se muestran en la Figura 4.6, Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Potencia recibida en escenario interior con y sin codificación Manchester

Distancia (mts)	Potencia Recibida sin codificación (dBm)	Potencia Recibida con codificación Manchester (dBm)
2	-67,5	-68
4	-74,2	-71,4
6	-74,1	-72,1
8	-76,8	-73,9
10	-78,7	-75,5
12	-81,2	-78,7

Tabla 4.5. (Continuación)

Distancia (mts)	Potencia Recibida sin codificación (dBm)	Potencia Recibida con codificación Manchester (dBm)
14	-83,5	-81,8
16	-87,6	-82,2
18	-81,3	-80,1
20	-84,1	-85,6
22	-92,5	-87,3
24	-94,7	-86,7
26	-90,6	-89,5
28	-86,2	-88,7
30	-82,1	-86,2
32	-82,7	-83,1
34	-83,4	-80,5
36	-85,1	-81
38	-88,2	-80,7
40	-87,5	-78,4
42	-91,6	-84,3
44	-91,9	-86,2
46	-93	-89

En el escenario interior, la forma de las curvas que representan las potencias recibidas en los sistemas con y sin codificación Manchester Figura 4.6, tienen un comportamiento similar.

En estas curvas se destaca el desvanecimiento profundo ocurrido cerca a los 25 metros, esta disminución significativa en la potencia se debe a que a esta distancia se presenta un cambio en la forma del pasillo (entrada a los baños del edificio). Puede deberse a interferencia destructiva, lo que se manifiesta en una disminución del nivel de señal recibido.

En general, los valores medidos corresponden a los esperados, según las bases teóricas, donde se espera que la potencia recibida disminuya con la distancia, y que el efecto de multitrayectoria se refleje en la forma irregular de la curva, a causa de las transmisiones, reflexiones y difracciones de la señal transmitida.

Las pérdidas de propagación prácticas se obtienen a partir de la ecuación 4.2, reemplazando los valores de potencia recibida para las pruebas realizadas en escenario

interior. Se obtiene la Figura 4.7 para el sistema sin codificación y con codificación Manchester con valores prácticos. Ver Tabla 4.6, columnas 2 y 3.

Tabla 4.6. Pérdidas de propagación en escenario interior con y sin codificación Manchester

Distancia (mts)	Valores Prácticos		Valores Teóricos	
	Pérdidas sin codificación (dBm)	Pérdidas con codificación Manchester (dBm)	Pérdidas sin codificación (dBm)	Pérdidas con codificación Manchester (dBm)
2	79	79,5	77,92	76,42
4	85,7	82,9	83,34	81,84
6	85,6	83,6	86,51	85,01
8	88,3	85,4	88,76	87,26
10	90,2	87	90,50	89,00
12	92,7	90,2	91,93	90,43
14	95	93,3	93,13	91,63
16	99,1	93,7	94,17	92,67
18	92,8	91,6	95,09	93,59
20	95,6	97,1	95,92	94,42
22	104	98,8	96,66	95,16
24	106,2	98,2	97,34	95,84
26	102,1	101	97,97	96,47
28	97,7	100,2	98,55	97,05
30	93,6	97,7	99,09	97,59
32	94,2	94,6	99,59	98,09
34	94,9	92	100,07	98,57
36	96,6	92,5	100,51	99,01
38	99,7	92,2	100,94	99,44
40	99	89,9	101,34	99,84
42	103,1	95,8	101,72	100,22
44	103,4	97,7	102,08	100,58
46	104,5	100,5	102,43	100,93

Figura 4.6. Potencia recibida en escenario interior con y sin codificación Manchester

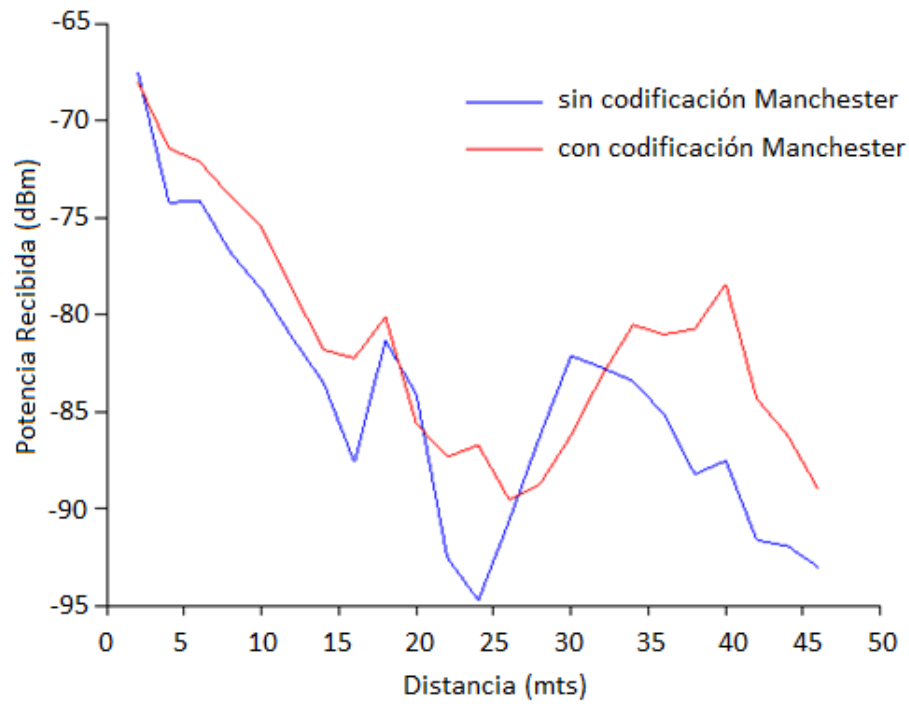
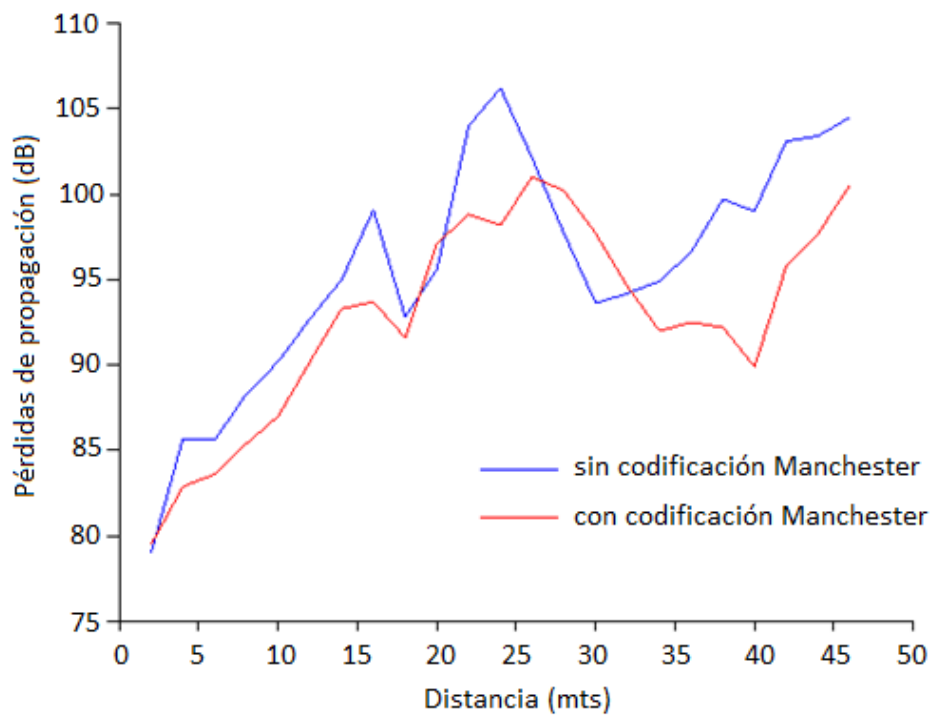


Figura 4.7. Pérdidas de propagación en escenario interior con y sin codificación Manchester



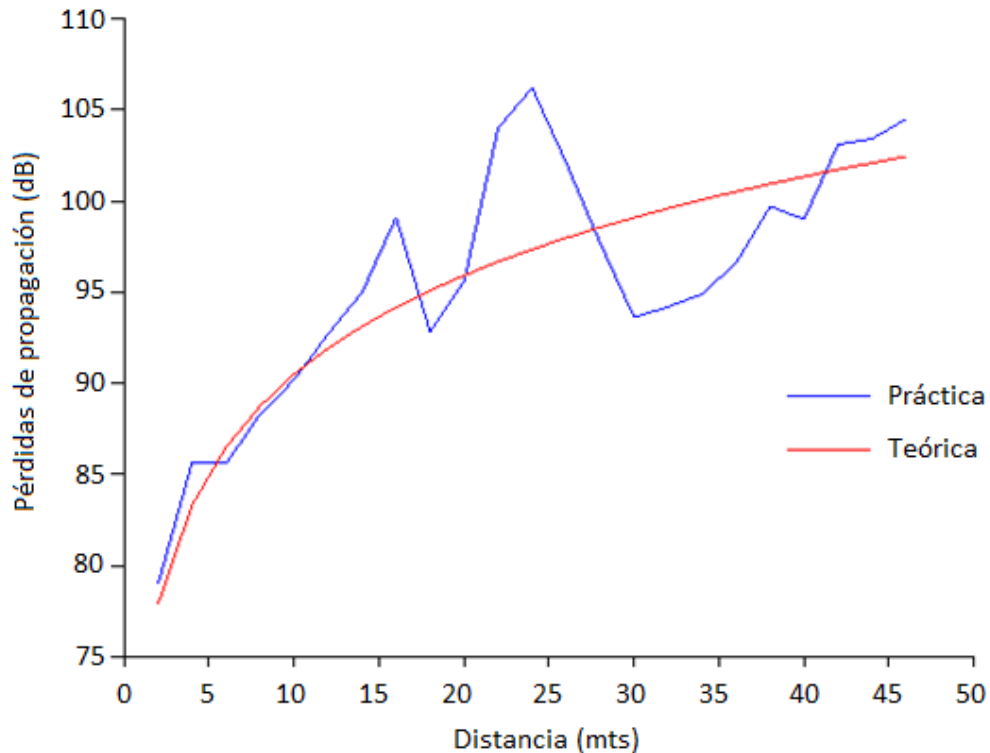
En el caso del escenario interior, el valor de n se determinó de acuerdo a la Tabla 4.4. Así $n = 1.8$.

Según el modelo de pérdidas teórico de la Ecuación 4.4, se encontró empíricamente el valor de L_0 para los dos sistemas, con y sin codificación.

Así, $L_0 = 72.5 \text{ dB}$ para el sistema sin codificación, por lo tanto el modelo de pérdidas teórico que describe el sistema sin codificación queda según la Ecuación 4.7 y se compara con los valores obtenidos experimentalmente en la Figura 4.8. Ver Tabla 4.6, columnas 2 y 4.

$$L_b[\text{dB}] = 72.5 + 18 \log_{10}(d [m]) \quad (4.7)$$

Figura 4.8. Pérdidas de propagación en escenario interior sin codificación Manchester



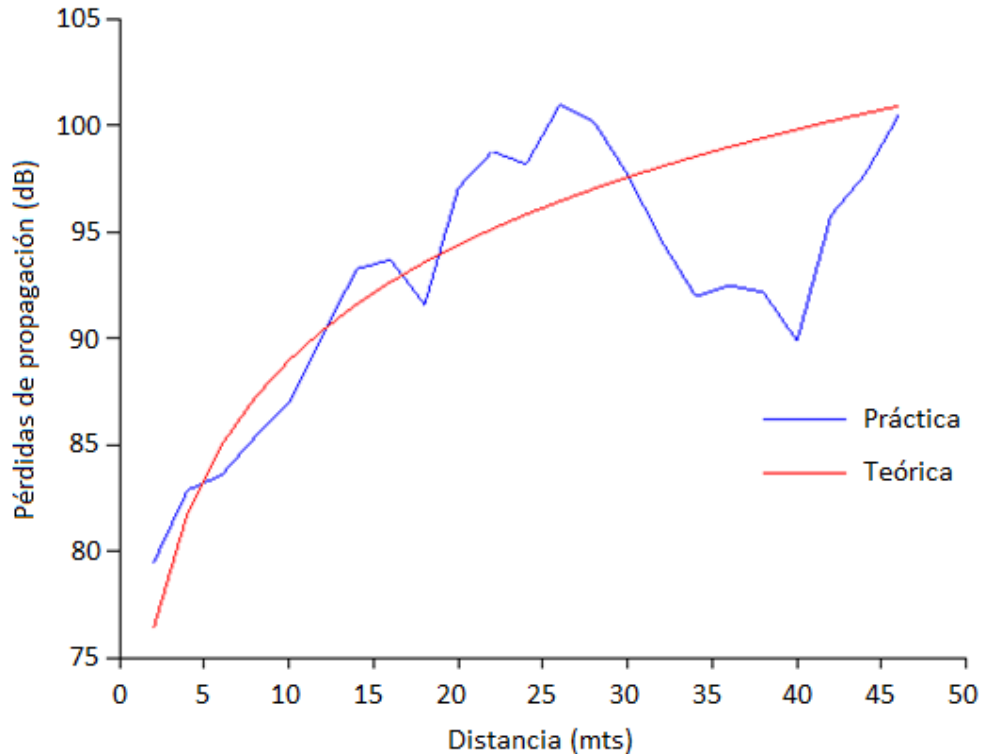
Y para el sistema con codificación Manchester $L_0 = 71$, la ecuación matemática que representa las pérdidas para este caso está dada por la ecuación 4.8 y se grafica con su equivalente práctico en la Figura 4.9. Ver valores en la Tabla 4.6, columnas 3 y 5.

$$L_b[\text{dB}] = 71 + 18 \log_{10}(d [m]) \quad (4.8)$$

Las Figuras 4.8 y 4.9, representan la comparación entre las pérdidas de propagación prácticas y el modelo teóricas del escenario interior. Se observa que el modelo teórico en

esta ocasión es limitado al representar las pérdidas causadas por multitrayectoria, lo que si se ve reflejado en la forma de onda de los valores prácticos.

Figura 4.9. Pérdidas de propagación en escenario interior con codificación Manchester



4.3.3 Simulación en WIRELESS INSITE®

Wireless Insite® es una herramienta software para el análisis de propagación en sistemas de comunicación inalámbrica, en escenarios específicos y complejos. Cuenta con un paquete de modelos de propagación de trazado de rayo para la simulación y análisis, configurables mediante una interfaz de usuario amigable. Este software proporciona predicciones eficaces y precisas de la propagación, cobertura y de las características del canal de comunicaciones en diversos entornos, tales como los urbanos, escenario interior de edificios, aéreas rurales o emplazamientos mixtos. Esta herramienta tiene múltiples aplicaciones en sectores comerciales, militares, educativos, entre otros. [23]

En este trabajo se simuló los escenarios de prueba, para interior y exterior utilizados para las medidas prácticas. Se trabajó sobre la versión 2.6.3.24.

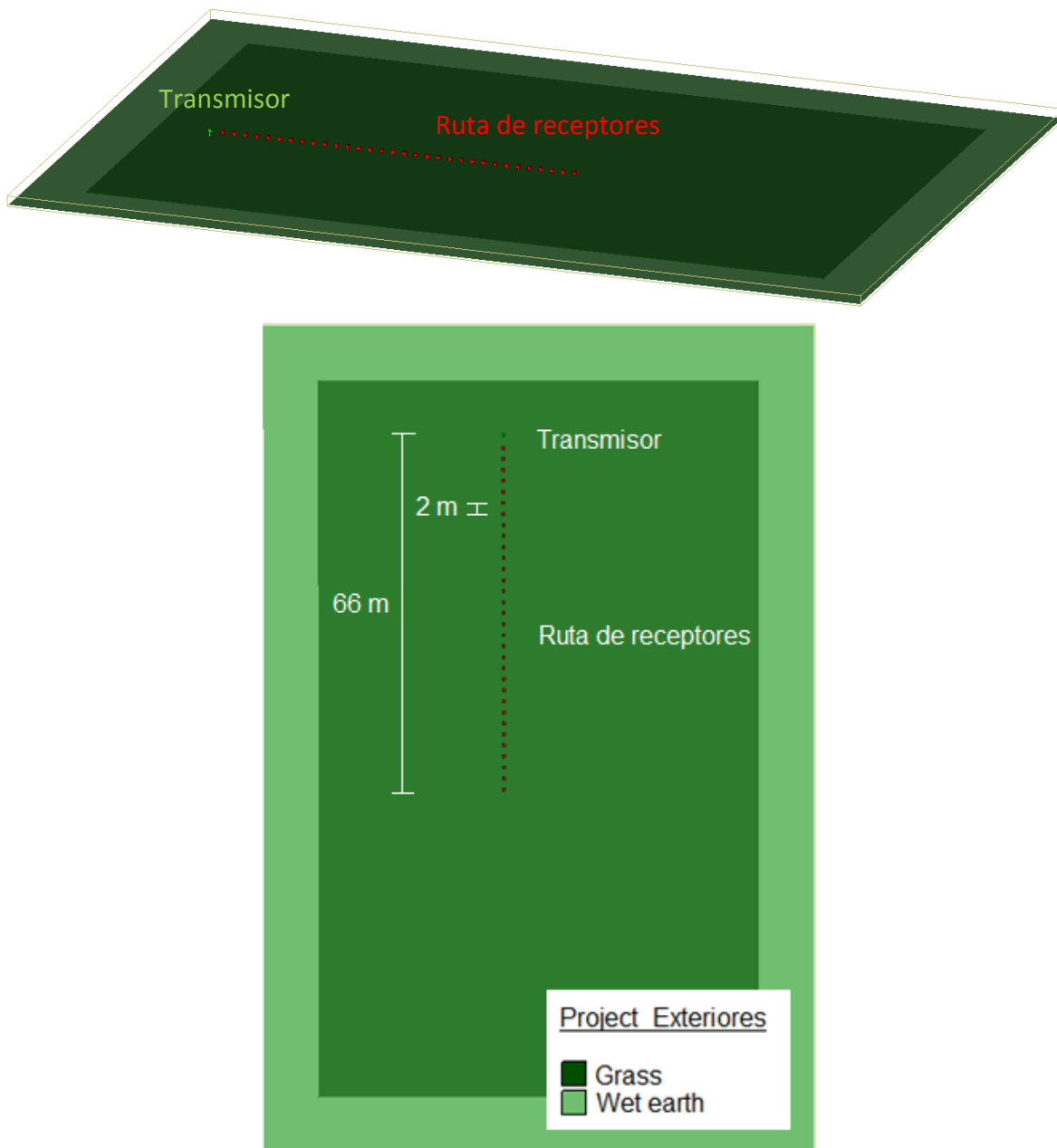
Para realizar la simulación de los escenarios, tanto en exterior como en interior, se hizo uso de los diseños de los escenarios utilizado en el trabajo de grado "Evaluación y Análisis del Desempeño de un Sistema de Comunicación de Datos Vía Radio en la Banda de 900 MHz basado en Espectro Ensanchado por Saltos en Frecuencia utilizando el

Modelo Peer-to-Peer” [23]. Este diseño se adapta a las características de los escenarios descritos para este trabajo de grado.

4.3.3.1 Simulación en Escenario Exterior

Para la simulación en exterior se ubicó un transmisor que se visualiza de color verde y una ruta de receptores de color rojo a lo largo de la cancha. En total se utilizan 32 puntos de recepción, cada uno se encuentra separado una distancia de 2 metros, tal como se realizó las medidas prácticas en el escenario real.

Figura 4.10. Ubicación del transmisor y receptores para el escenario exterior.



Los parámetros configurados para la simulación en exterior se resumen en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Parámetros configurados para exterior

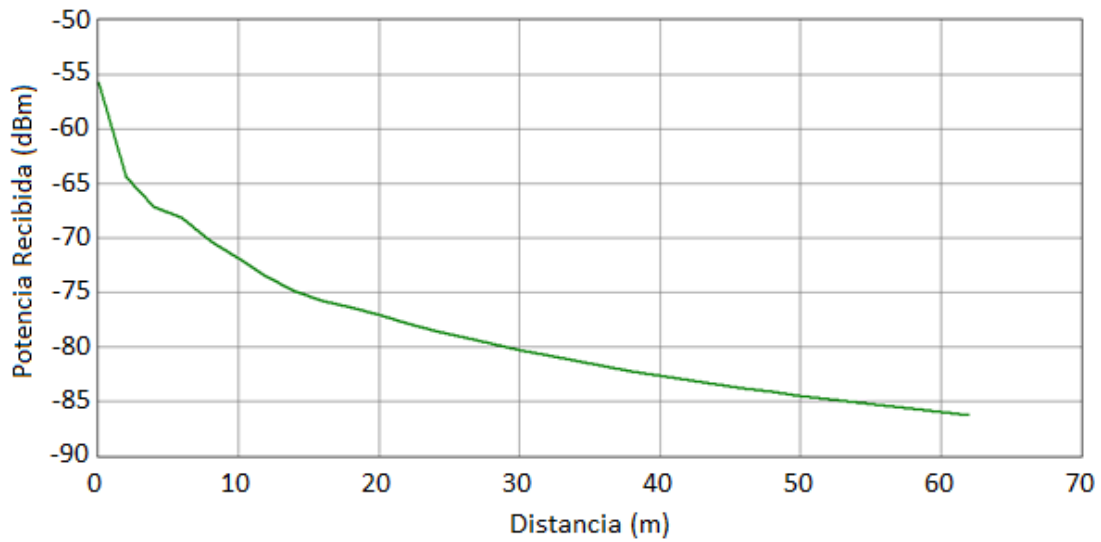
	Parámetro	Configuración
Área de estudio	Modelo de propagación	Full 3D
	Tamaño del área de estudio	100.5 m x 150.5 m
	Interacciones permitidas	Transmisiones, reflexiones, difracciones
	Materiales	Césped, tierra húmeda
Antenas	Patrón de radiación de la antena	Omnidireccional
	Altura de la antena	1 m
	Tipo de antena	Wire Whip
	Ganancia de la antena	1.5 dBi para TX / 0 dBi para RX
	Polarización de la antena	Vertical
Transmisor	Potencia de transmisión	10 dBm
	Frecuencia de portadora	2410 MHz
	Ancho de banda efectivo	2 MHz
Receptor	Sensibilidad del receptor	-100 dBm
	Figura de ruido	6
	Separación entre receptores	2 m

Una vez configurado el escenario se corrió el simulador para obtener los resultados, el software provee una variedad de formas de visualización de las medidas obtenidas en la predicción, entre ellos hay gráficas, imágenes, documentos, entre otros.

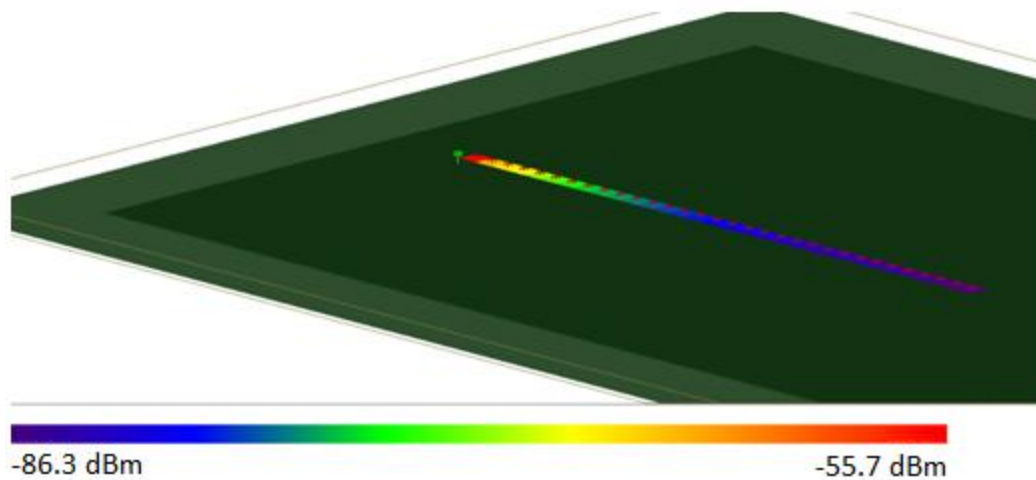
Para las medidas de potencia recibida se obtienen las Figuras 4.11 (a) donde se gráfica contra distancia y (b) donde se visualiza en 3D a lo largo de la ruta de receptores.

Se observa que para el escenario exterior la potencia disminuye a medida que se incrementa la distancia, esto debido a que, a mayor distancia mayores pérdidas y la señal se recibe con menos energía. Estas pérdidas se deben a que la energía de la señal se dispersa. En el simulador se obtienen medidas desde -55,74 dBm a 2 m del transmisor y -86,25 dBm a 66 m del transmisor, estos niveles indican la máxima y mínima potencia recibida respectivamente, ver Figura 4.11.

Figura 4.11. Potencia recibida en exterior con Wireless Insite



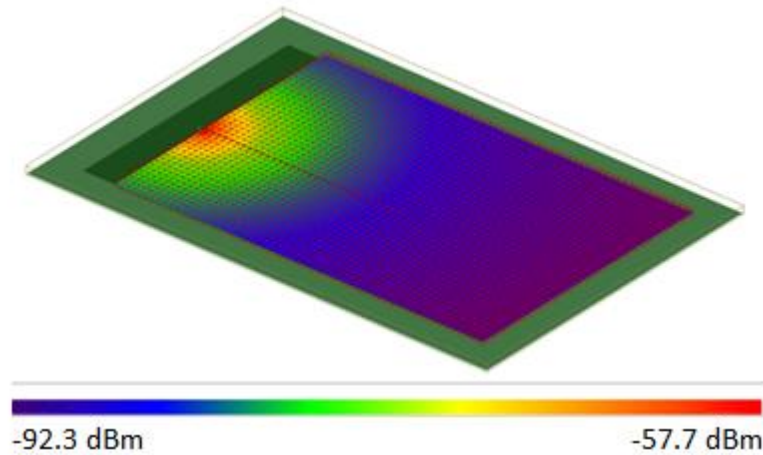
(a)



(b)

Otra forma de percibir la potencia de recibida en función de la distancia, es mediante el uso de grillas de receptores. Esto permite observar la cobertura en múltiples direcciones. El sistema muestra como resultado la Figura 4.12 para una grilla de receptores del tamaño de la cancha para la configuración del escenario exterior.

Figura 4.12. Potencia recibida utilizando grilla de receptores en Wireless Insite

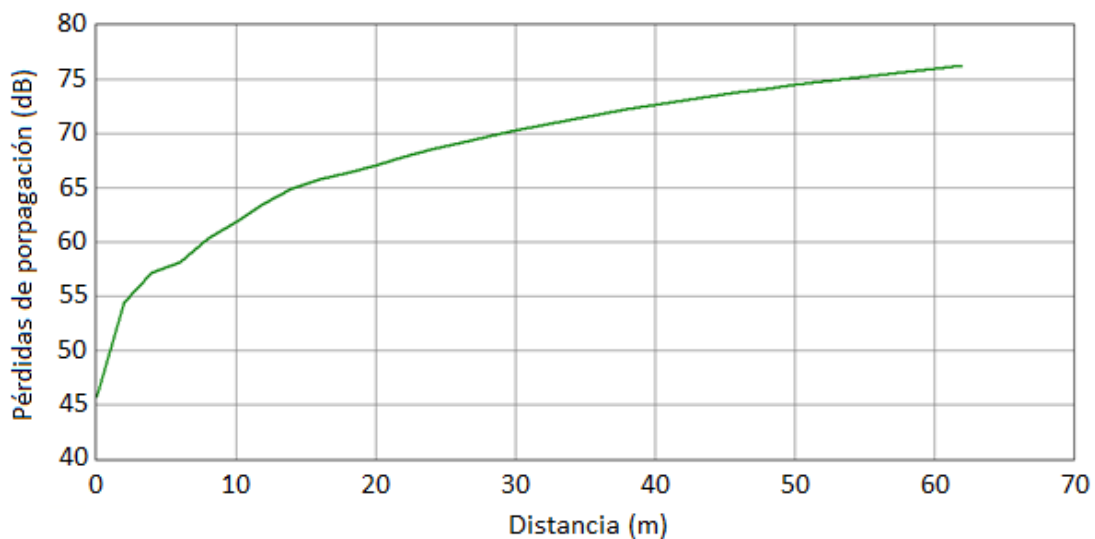


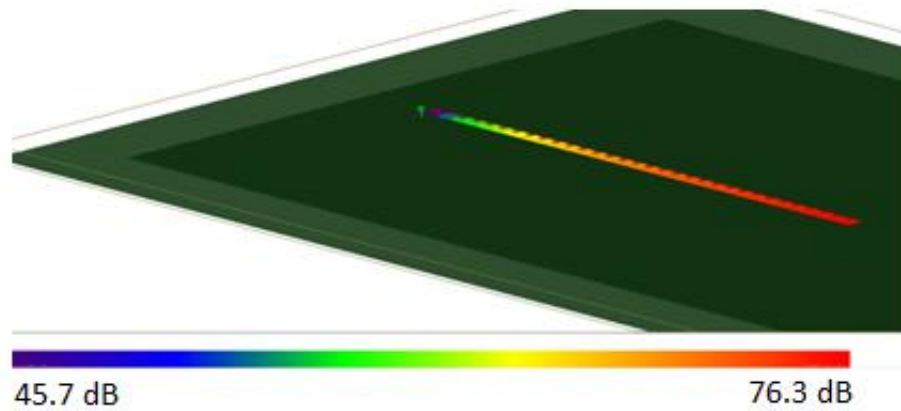
Se observan las gráficas de pérdidas de propagación contra distancia en la Figura 4.13 (a) y de nivel de pérdidas en cada uno de los receptores de la ruta en la Figura 4.13 (b).

Las pérdidas en la simulación toman valores entre 45,7 dB para 2 m de distancia, y 76.3 para 66 m.

En las Figuras 4.11(a) y 4.13(a), se observa que para las primeras distancias se percibe una señal irregular, esto se debe a que en este escenario de exterior se consideran interacciones como reflexiones, que suceden por efecto del suelo únicamente, este fenómeno se aprecia en la Figura 4.14, que corresponde a la gráfica de los caminos de propagación.

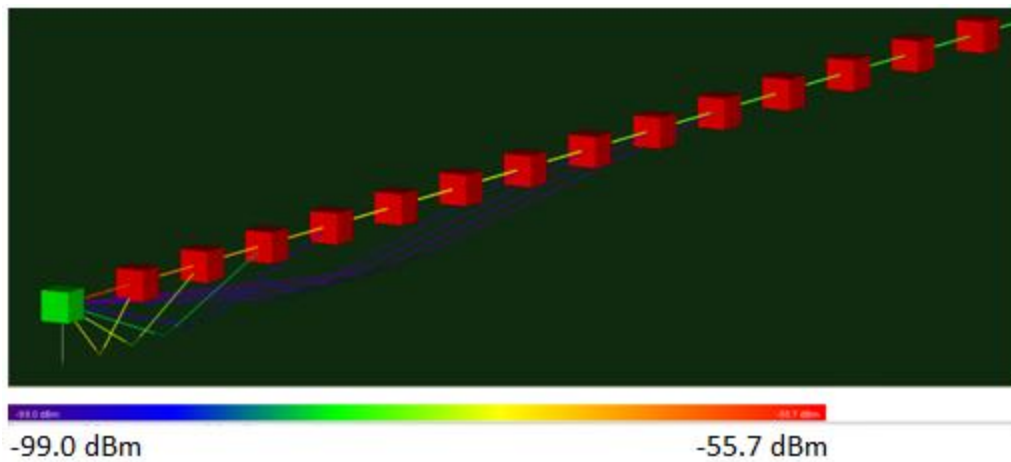
Figura 4.13. Pérdidas de propagación en exterior con Wireless Insite





(b)

Figura 4.14. Caminos de propagación en Wireless Insite



4.3.3.2 Simulación en Escenario Interior

El modelo del corredor de la universidad escogido para realizar la simulación en escenario interior, es un modelo aproximado al real, en cuanto a dimensiones, materiales y distribución, como se aprecia en la figura 4.15.

Los ajustes a los parámetros realizados para simular el comportamiento del sistema de comunicación implementado para el escenario interior, se resume en la Tabla 4.7.

Teniendo en cuenta la importancia del efecto de la multitrayectoria en escenario interior, se debe considerar que este fenómeno se presenta a distancias muy cortas, cercanas al valor de la longitud de onda de la señal, de modo que para poder observar el efecto que tiene en la potencia recibida mas aproximadamente en cada punto, se ubican 2 receptores por cada longitud de onda.

Figura 4.15. Escenario interior para Wireless Insite

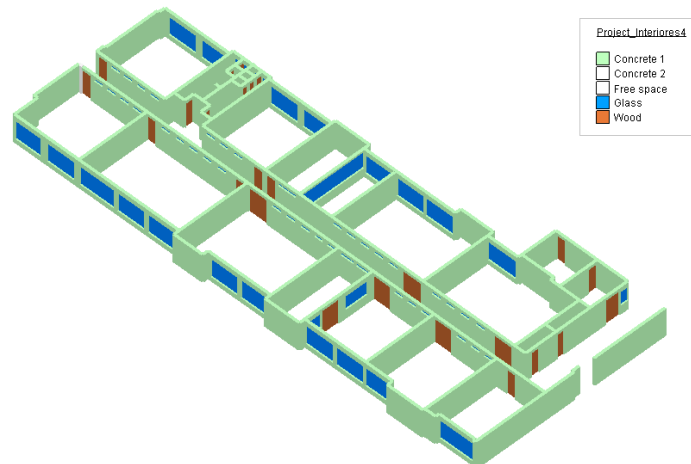


Tabla 4.7. Parámetros configurados para escenario interior

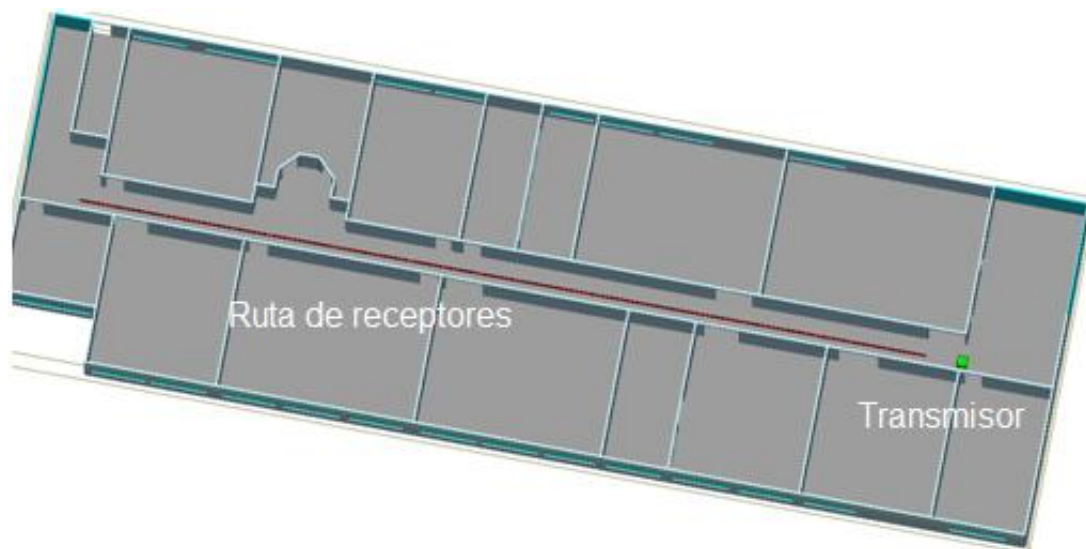
	Parámetro	Configuración
Área de estudio	Modelo de propagación	Full 3D
	Tamaño del área de estudio	18.5 m x 55.5 m
	Interacciones permitidas	Transmisiones, reflexiones, difracciones
	Materiales	Vidrio, madera, concreto, paneles de yeso
	Técnica de trazado de rayos	SBR ¹⁷
Antenas	Patrón de radiación de la antena	Omnidireccional
	Altura de la antena	1 m
	Tipo de antena	Wire Whip
	Ganancia de la antena	1.5 dBi para TX / 0 dBi para RX
	Polarización de la antena	Vertical
Transmisor	Potencia de transmisión	10 dBm
	Frecuencia de portadora	2410 MHz
	Ancho de banda efectivo	2 MHz
Receptor	Sensibilidad del receptor	-100 dBm
	Figura de ruido	6
	Separación entre receptores	6.22 cm

¹⁷ Técnica de disparo y rebote de rayo (SBR, *Shooting and Bouncing Ray*), es un método de lanzamiento de rayos, que consiste en el disparo de rayos desde el transmisor hacia el receptor. Cada rayo es trazado junto con sus rebotes. Cuando el rayo choca se refleja, se transmite, se difracta o se dispersa, dependiendo de la geometría y las propiedades eléctricas del objeto. La solución final es la suma de las contribuciones de todos los rayos recibidos.

Teniendo en cuenta la importancia del efecto de la multitrayectoria en el escenario interior, se debe considerar que este fenómeno se presenta a distancias muy cortas, cercanas al valor de la longitud de onda de la señal, de modo que para poder observar el efecto que tiene en la potencia recibida mas aproximadamente en cada punto, se ubican 2 receptores por cada longitud de onda.

La longitud de onda del sistema es $\lambda=12.44$ cm, por lo tanto, la ruta de receptores establecida inicia a 2 metros del receptor, tiene una separación entre receptores de 6.22 cm, y alcanza una distancia de 47 m. De esta forma, se cuenta con una ruta de 724 puntos de recepción, representados por la línea roja de la Figura 4.16. En esta figura también se observa la ubicación del transmisor representado por el cubo de color verde.

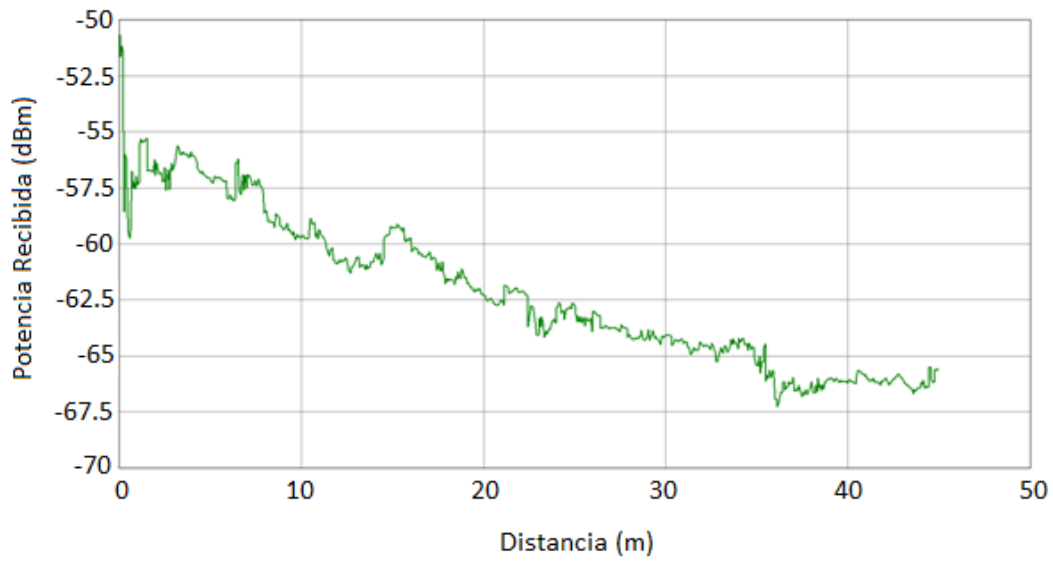
Figura 4.16. Ubicación del transmisor y receptores para el escenario interior.



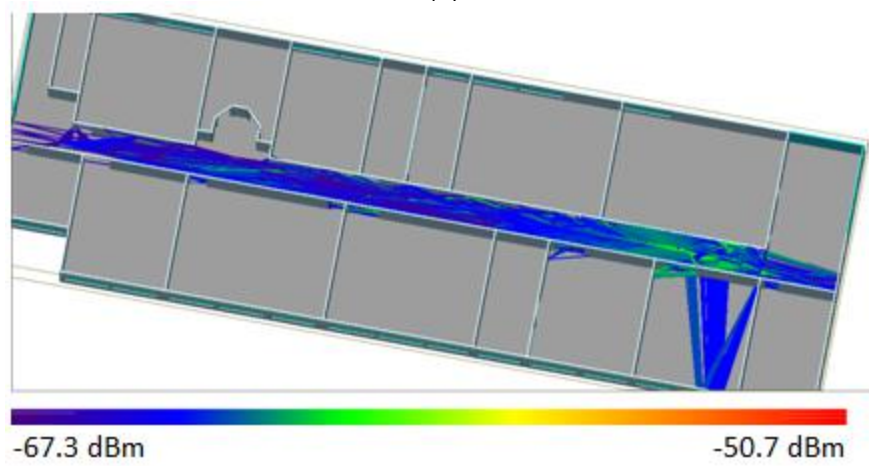
Los resultados obtenidos para medidas de potencia de recepción se representan mediante las Figuras 4.17 (a) donde se gráfica la potencia recibida en cada punto de la ruta en función de la distancia de hasta el transmisor, (b) donde muestra el trazado de rayos para la ruta de receptores situados a lo largo del pasillo y (c) que muestra mediante una grilla de receptores el valor de potencia recibida a lo ancho y largo del pasillo. Estas gráficas permiten evidenciar el efecto guía de onda que contribuye con la propagación de la señal basada en múltiples reflexiones, permitiendo así un mayor alcance Este efecto también es llamado efecto cañón o guía de onda. Los niveles de potencia obtenidos para escenario interior en la simulación varían desde -50.7 dBm hasta -67.3dBm, en un trayecto de 47 metros.

Las pérdidas de propagación a los largo del pasillo están representadas en la Figura 4.18. Se observa que las pérdidas varían entre 44.2 dB y 67.1 dB, la forma de la curva se debe al efecto de la multitrayectoria, pues los rayos difractados o reflejados pueden contribuir constructiva o destructivamente a la señal recibida.

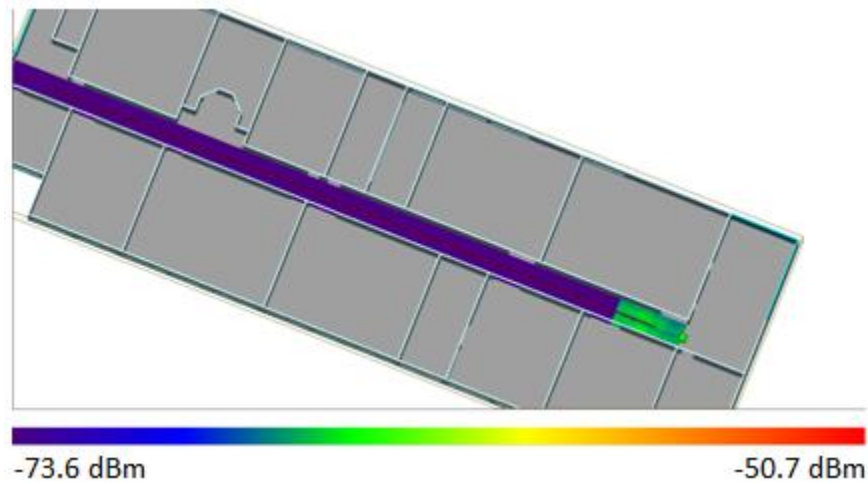
Figura 4.17. Potencia recibida en escenario interior con Wireless Insite



(a)

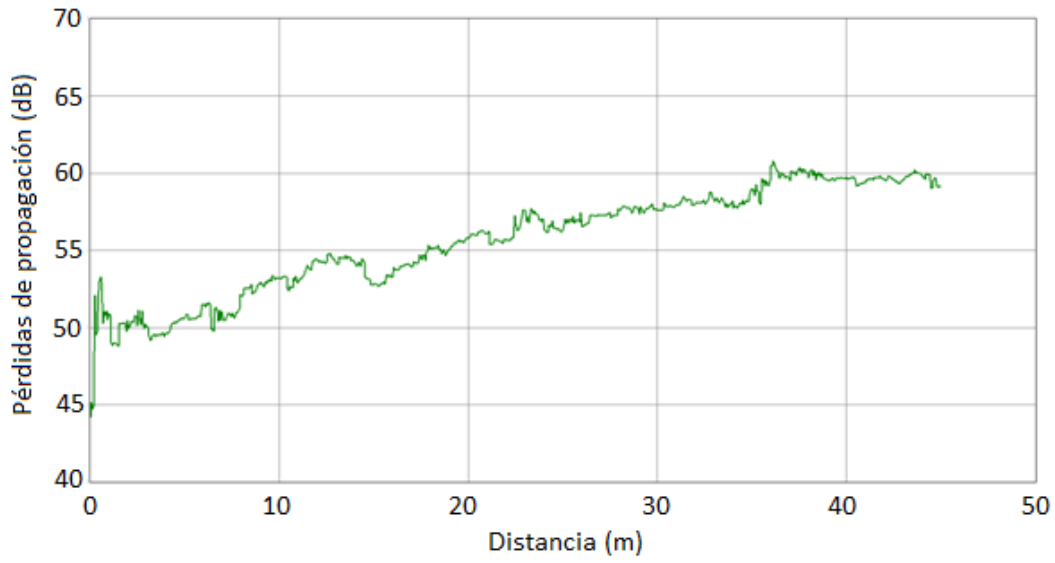


(b)

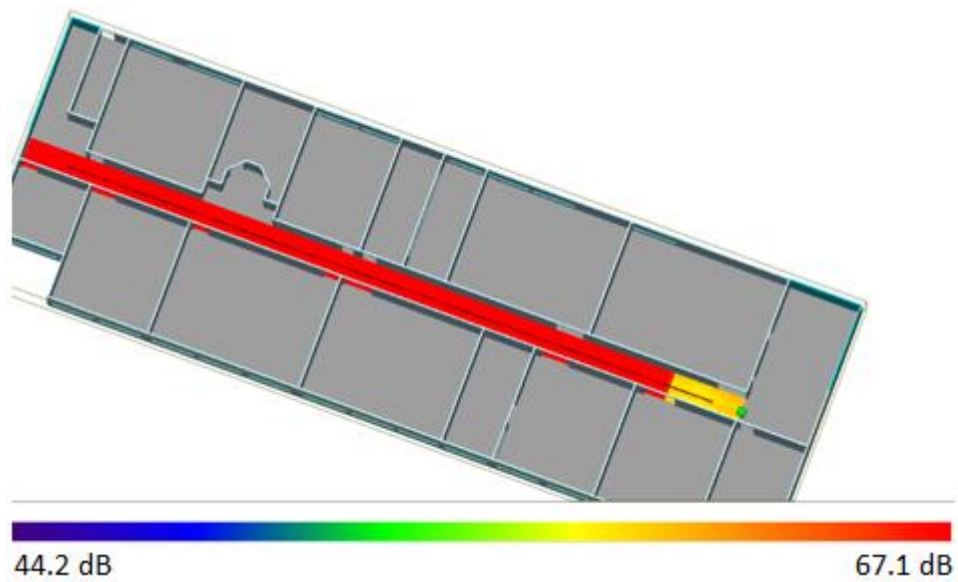


(c)

Figura 4.18. Pérdidas de propagación en escenario interior con Wireless Insite



(a)



(b)

Un factor importante a tener en cuenta en sistemas donde se presenta multitrayectoria es la medida de la dispersión de retardo¹⁸, ya que puede limitar de forma directa la velocidad

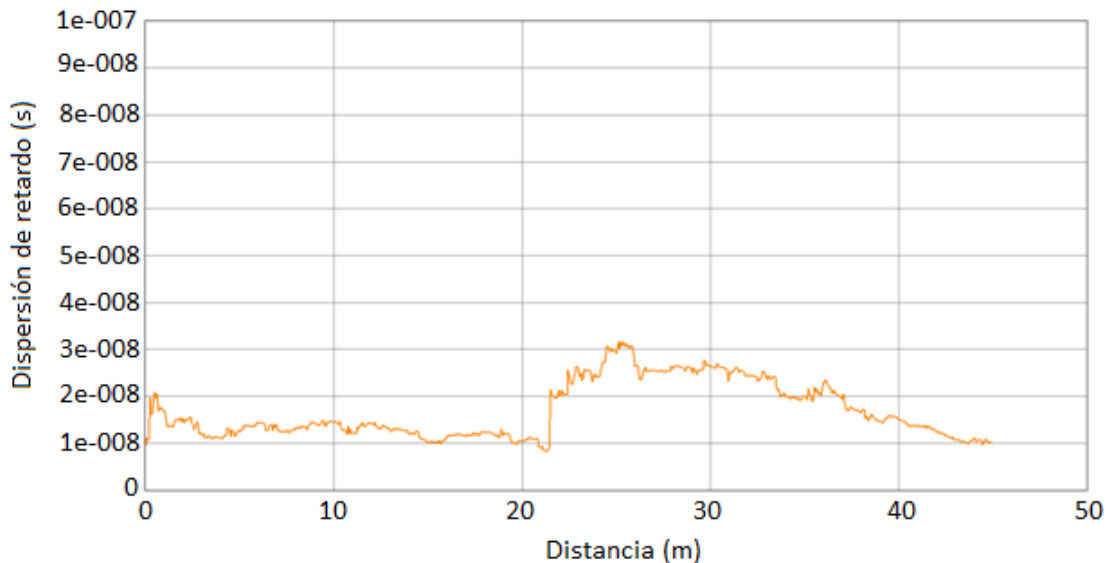
¹⁸ La dispersión de retardo es una medida de cuan dispersa resulta la respuesta del canal al impulso. La dispersión de retardo caracteriza el retardo debido al canal, en términos de tiempo en segundos del perfil de

de transmisión de datos. Pues, cuando el periodo del símbolo es menor que la dispersión de retardo se genera Interferencia Inter Simbólica. Este factor está relacionado con el ancho de banda de coherencia¹⁹, que es aquel rango de frecuencias sobre el cual el canal puede considerarse plano en frecuencia.

Para el máximo valor de dispersión $D = 31.68 \text{ nS}$, se obtiene el mínimo ancho de banda de coherencia del sistema igual a 5.023 MHz . El ancho de banda en que opera los módulos XBee es 2 MHz mucho menor que el ancho de banda de coherencia, por lo tanto se considera que el canal simulado para el escenario interior tiene un desvanecimiento plano en frecuencia.

En la Figura 4.19 se muestran los valores de la dispersión de retardo en función de la distancia. Se observa que el valor de retardo es similar para los primeros 21 m aproximadamente, punto en el que se genera un incremento en este valor, esto debido a que los rayos reflejados se incrementan y tardan más tiempo en llegar al receptor que los rayos directos

Figura 4.19. Dispersión de retardo para escenario interior en Wireless Insite



4.3.4 Comparación de Medidas de Potencia y Pérdidas

retardo de Potencia. Tiene en cuenta tanto la potencia relativa de los pulsos como también sus retardos, haciéndolo uno de los mejor indicadores de desempeño del sistema.

¹⁹ $B_c = 1/2\pi D$; donde B_c : Ancho de banda de coherencia en GHz y D : Dispersión de retardo en nS

Con las medidas tomadas prácticamente, y los valores para los mismos parámetros obtenidos en la simulación en *Wireless Insite*®, se puede realizar una comparación para establecer el desempeño a nivel físico del sistema en emplazamientos en interior y exterior.

Inicialmente se comparan los valores de potencia recibida en interior y exterior para los sistemas con y sin codificación Manchester. Se toman los valores de las Tablas 4.2 para exterior y de la Tabla 4.5 para interior y se obtuvo como resultados la Figura 4.20.

Es notable la diferencia entre los escenarios en el comportamiento de las curvas de potencia pues se refleja el efecto de la multitrayectoria producida típicamente para espacios interiores. La influencia de la codificación Manchester no aporta diferencias significativas entre un escenario y otro con relación al comportamiento de la curva.

Para las gráficas comparativas de pérdidas de propagación, se tomaron los valores de las Tablas 4.3 y 4.6, que corresponde a exterior e interior respectivamente, y se obtuvo la Figura 4.18, para el sistema con y sin codificación Manchester.

Con base en las Figuras 4.20 y 4.21 se puede observar que tanto para el sistema sin codificación como para el sistema con codificación, se obtiene mejor desempeño en escenario interior, es decir, los niveles de potencia recibidos para una distancia dada son mejores para el escenario en interior que para exterior. Esto se debe a que en escenario interior la energía se encuentra confinada a lo largo del pasillo, por efecto de la multitrayectoria, pues aunque los ecos de la señal que llegan al receptor pueden generar interferencia destructiva que atenué la señal, también puede resultar en interferencia constructiva.

También, para el escenario interior, el prototipo implementado cubre mayores distancias, gracias al nivel de energía, y a que las pérdidas de propagación son menores, según valores medidos.

En el escenario en exterior la energía se dispersa en mayor cantidad, pues la antena radia uniformemente en todas las direcciones. Además, en exterior no se consideran efectos de reflexión o difracción de la señal, pues no son muy significativos.

El sistema implementado con codificación Manchester siempre reporta una mejor cobertura tanto para escenario interior y exterior, se puede verificar en las Figuras de potencia 4.20 y de pérdidas 4.21.

Figura 4.20. Potencia recibida en escenario Interior y Exterior

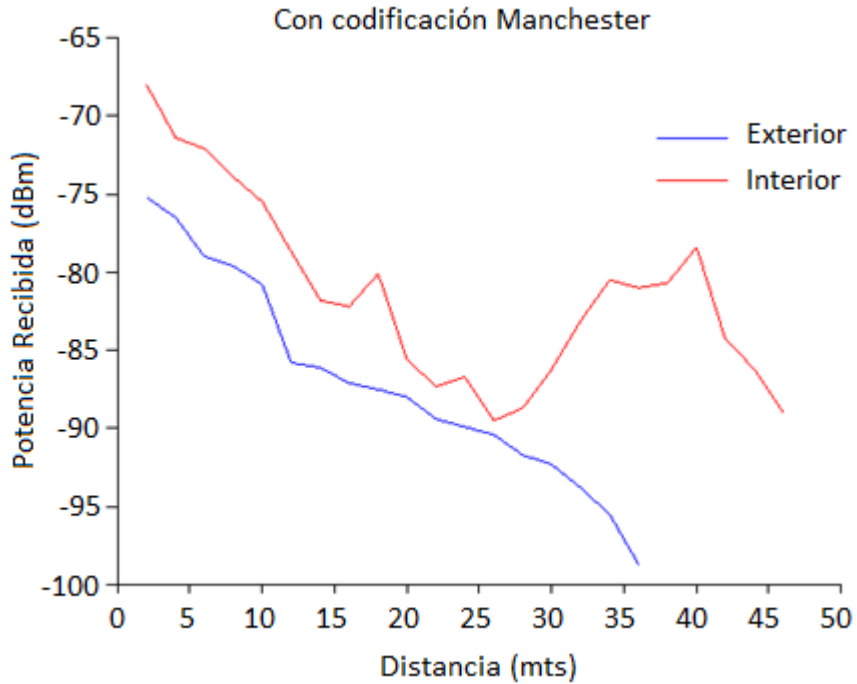
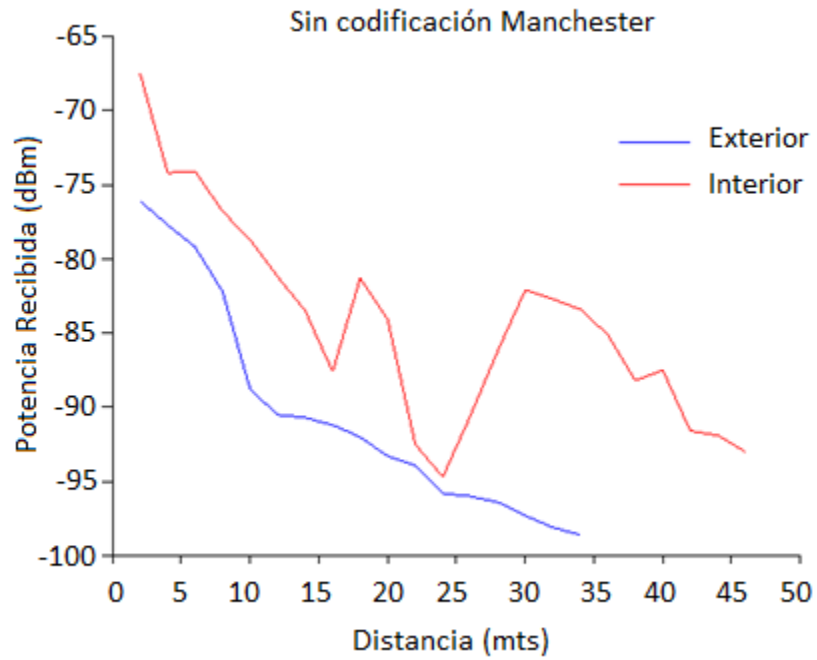
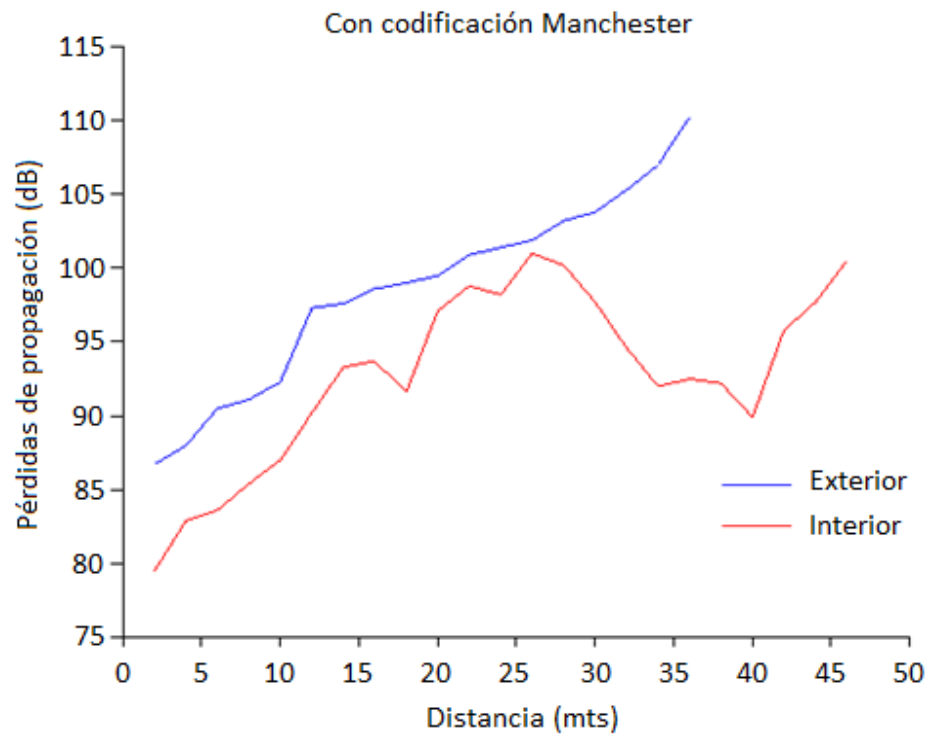
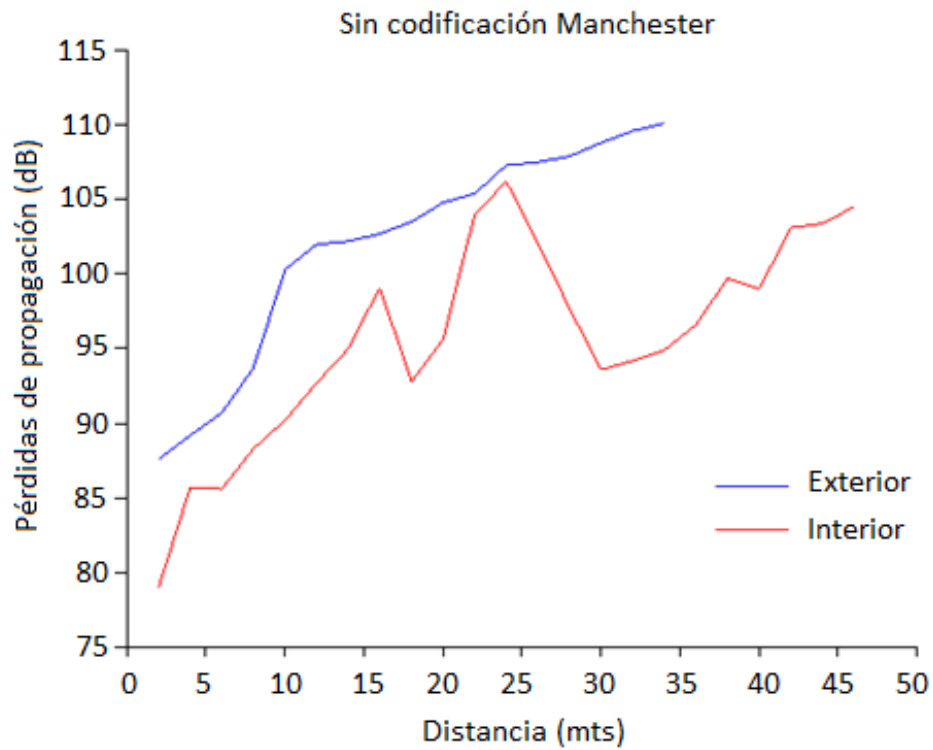


Figura 4.21. Pérdidas de propagación en Interior y Exterior



Con la información aportada por la herramienta de predicción *Wireless Insite*®, fue posible comparar los valores medidos para los sistemas con y sin codificación, con los simulados.

La información para las gráficas simuladas, se obtienen de la misma herramienta, a través de un archivo *.txt* en el que se consigna toda la información del escenario simulado y que se genera al mismo tiempo que se ejecuta la simulación.

En las Figuras 4.22 y 4.23 correspondientes a las medidas de potencia y pérdidas en exterior, se observa que aunque el comportamiento de las curvas de los valores medidos y simulados es similar, se presenta diferencia en los niveles de las mismas, siendo la potencia en la simulación mayor. Esto refleja que aunque se configuró el escenario de simulación con los valores utilizados en el prototipo real, hay factores que la herramienta no considera o no emula con exactitud, y que hacen la diferencia en el momento de obtener los resultados en la predicción, tales como los materiales del escenario, fallas en las superficies, patrones no uniformes de las antenas, entre otros.

Figura 4.22. Potencia recibida en escenario exterior

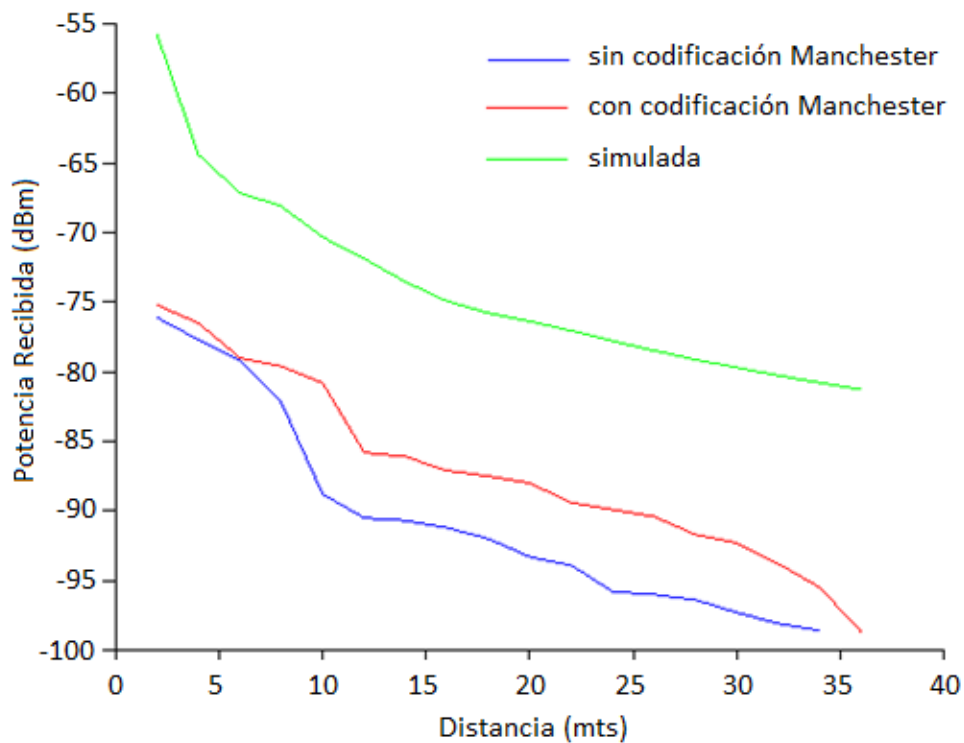
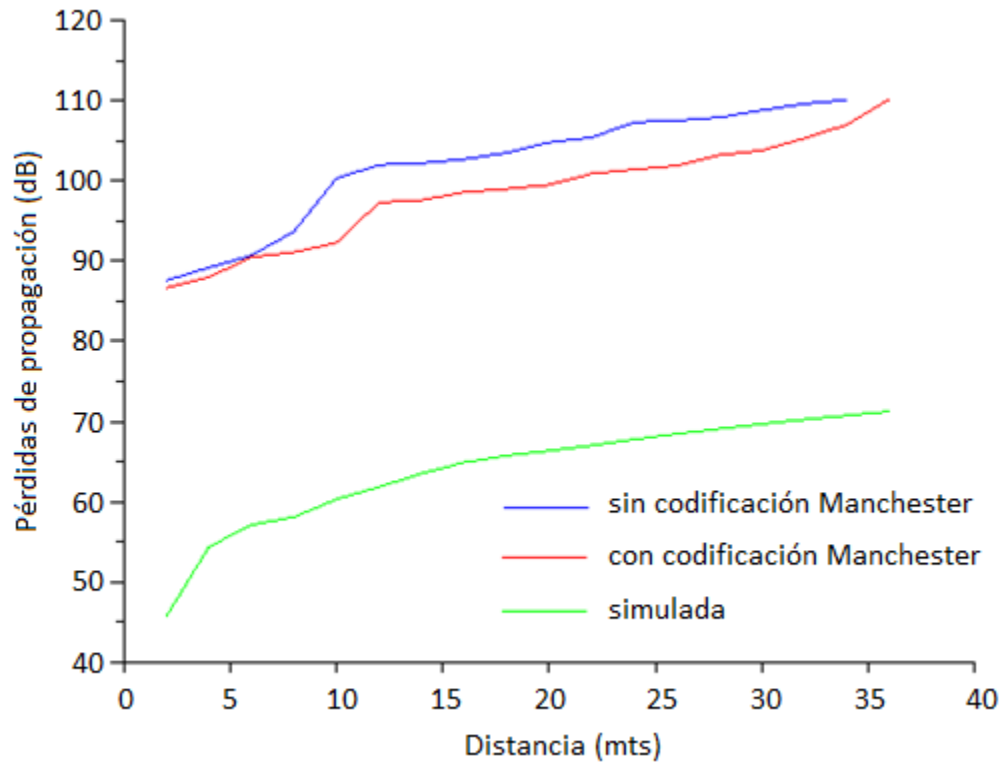


Figura 4.23. Pérdidas de propagación en escenario exterior



Para realizar las gráficas comparativas con los valores simulados en *Wireless Insite*® en escenario interior, se debió hallar una gráfica equivalente tomando los valores cada metro. No es práctico obtener las gráficas con los valores arrojados por el software pues están compuestas por 724 distancias diferentes, e información de potencia. Las gráficas en escenario interior de potencia y pérdidas equivalen a las Figuras 4.24 y 4.25.

Similar a los datos obtenidos prácticamente, la simulación en interior muestra un mejor desempeño comparado con exterior, pues la potencia tiene niveles mucho más altos lo que se refleja en la disminución de las pérdidas de propagación.

Los resultados obtenidos en la simulación reflejan una mejora significativa en el desempeño comparados con los valores medidos, pues el modelo de propagación utilizado 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.

Figura 4.24. Potencia recibida en escenario interior

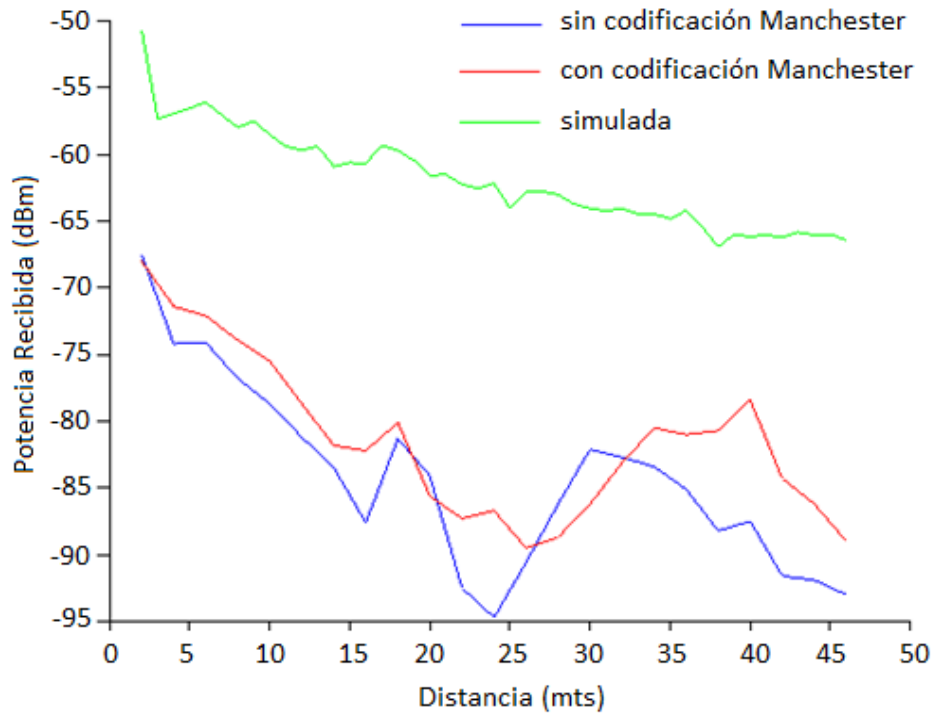
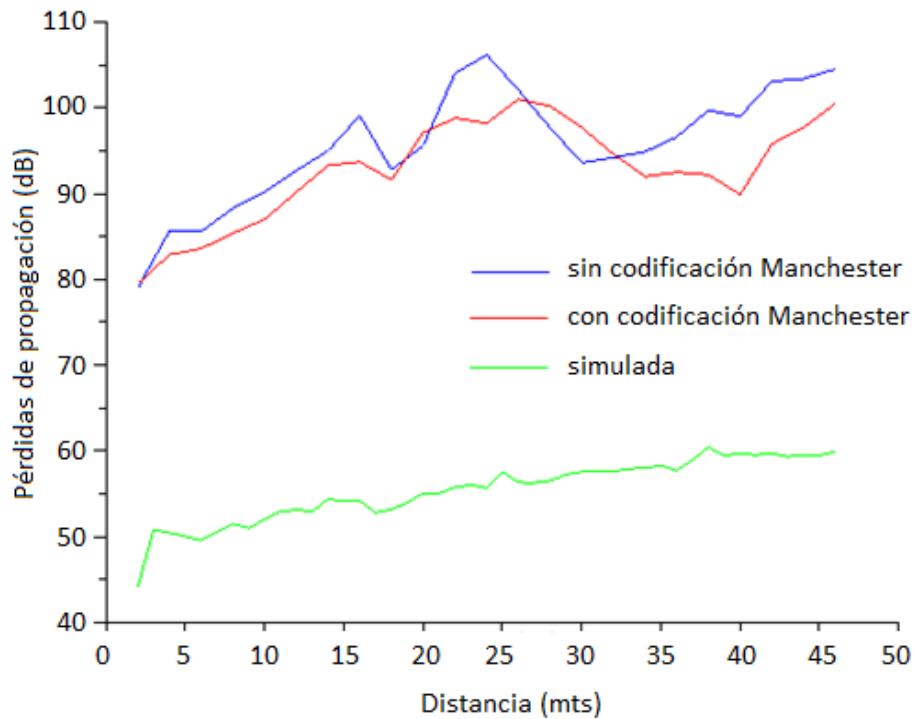


Figura 4.25. Pérdidas de propagación en escenario interior



4.4 EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN

Para el análisis de desempeño de un sistema de comunicación digital se utiliza el parámetro Tasa de Error de Bit (*BER*, *Bit Error Rate*). Este parámetro representa el número de bits erróneos con respecto al total de bits que fueron transmitidos. La *BER* se define mediante la Ecuación 4.9.

$$BER = \frac{\text{Bit Recibidos con Errores}}{\text{Total de Bits Transmitidos}} \quad (4.9)$$

La medida de la *BER* se realiza en el terminal receptor, comparando los paquetes transmitidos con los paquetes errados, esta medida es conocida como Tasa de Error de Paquete (*PER*, *Packet Error Rate*), la cual se expresa en la Ecuación 4.10.

$$PER = \frac{\text{Número de Paquetes Errados}}{\text{Número de Paquetes Transmitidos}} \quad (4.10)$$

donde, un paquete es considerado erróneo si al menos uno de los bytes del paquete se detecta incorrecto o el paquete no se recibe. La tasa error de bit se puede expresar en función de la tasa de error de paquete como se describe en la Ecuación 4.11.

$$BER = 1 - 10^{\frac{\log_{10}(1-PER)}{n}} \quad (4.11)$$

El número de paquetes erróneos se incrementa al aumentar la distancia entre el transmisor y receptor ya que a mayor distancia la potencia de la señal que se obtiene en el receptor se disminuye y por lo tanto se disminuye la relación de energía de bit a densidad de potencia de ruido (E_b/N_0). La energía de bit (E_b) se obtiene a partir de la potencia de la señal obtenida en recepción y la velocidad de transmisión de los datos, como se define en la Ecuación 4.12.

$$E_b[\text{dBm}/\text{bps}] = P_r[\text{dBm}] - 10\log R[\text{bps}] \quad (4.12)$$

donde:

P_r = Potencia medida en el receptor.

R = Velocidad de transmisión de datos RF.

Para el cálculo de la densidad de potencia de ruido (N_0), primero se determina la densidad de potencia de ruido a la entrada del receptor N_0' .

$$N_0' = K * T, \quad (4.13)$$

donde:

$K = 1.380650 \cdot 10^{-23}$ J/k; Constante de Boltzmann

$T_0 = 290^\circ\text{K}$; Temperatura efectiva

Remplazando en la Ecuación 4.13.

$$N'_0 = 1.380650 * 10^{-23} J/k * 290^\circ K$$

$$N'_0 = 4 * 10^{-21} W/Hz$$

$$N'_0 = -174 [dBm/Hz]$$

La densidad de potencia de ruido a la salida del receptor está dada por la Ecuación 4.14.

$$N_0 = N'_0 [dBm/Hz] + NF [dB] , \quad (4.14)$$

donde NF es la figura de ruido del receptor, el valor típico para el tipo de dispositivos utilizados en las pruebas es de 6 dB.

Combinando las ecuaciones 4.12 y 4.14 se obtiene la relación E_b/N_0 , que se expresa en la ecuación 4.15.

$$\frac{E_b}{N_0} = P_r [dBm] - 10 \log R [bps] - N_0 [dBm/Hz] \quad (4.15)$$

Los parámetros configurados para la ejecución de las pruebas de desempeño en los escenarios se muestran en la Tabla 4.8.

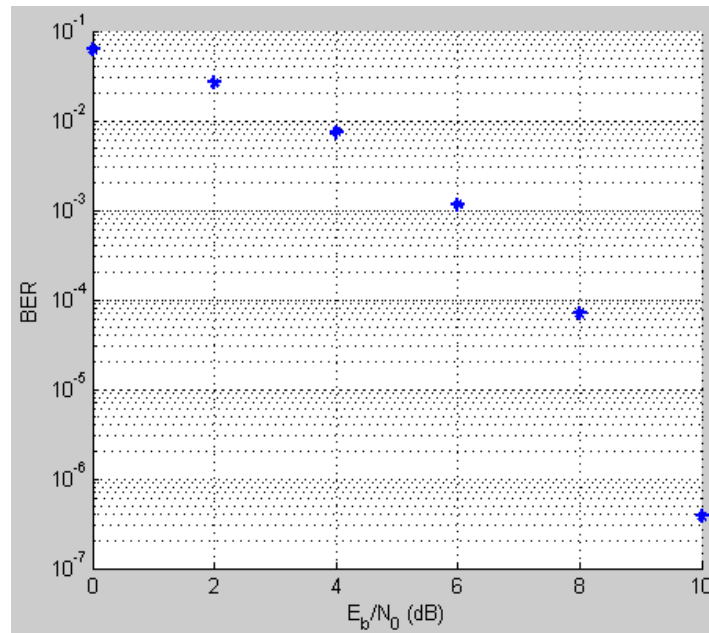
Tabla 4.8. Parámetros del Sistema de Comunicación para las Medidas de Errores

Parámetros	Valor
Frecuencia de Operación	2.405 GHz
Potencia de Transmisión	13.65 dBm
Sensibilidad de Recepción	-100 dBm
Velocidad de Transmisión de Datos	250 Kbps
Paquetes Transmitidos	5000

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

La Figura 4.26 representa el desempeño de un sistema de comunicación que utiliza el estándar IEEE 802.15.4 simulado en MATLAB®. (Los detalles de la simulación del sistema se encuentran en el Anexo C). La simulación fue realizada con el fin de comparar los resultados de BER con los obtenidos en las medidas de campo real en los diferentes escenarios de prueba.

Figura 4.26. Desempeño Teórico del Sistema de Comunicación



4.4.2 Evaluación y Análisis de Desempeño en el Escenario Exterior

En las tablas 4.9 y 4.10 se observan los resultados obtenidos del sistema de comunicación de datos en el escenario exterior con Codificación Manchester y sin Codificación Manchester, al transmitir 5000 paquetes para las diferentes distancias de la columna 1. La segunda columna contiene los datos de potencia recibida, que se utiliza para calcular la relación E_b/N_0 según la ecuación 4.15, donde la densidad espectral de potencia de ruido para todos los casos es -168 dBm/Hz y la velocidad de transmisión de datos R_b es igual a 250 Kbps como lo indica el estándar IEEE 802.15.4. La BER se determina como lo indica la ecuación 4.11, con n igual al número de bits por paquete el cual es de 56 bits y el parámetro PER es obtenido en la pruebas realizadas.

Tabla 4.9. Medida de BER en Escenario Exterior sin Codificación Manchester

Distancia (m)	Potencia Recibida (dBm)	E_b/N_0 (dB)	PER	BER
2	-76.1	37.9206	0	0
4	-77.7	36.3206	0	0
6	-79.2	34.8206	0	0
8	-82.2	31.8206	0	0
10	-88.8	25.2206	0.0004	0.00000714426
12	-90.5	23.5206	0.02	0.000360698
14	-90.7	23.3206	0.06	0.001104308
16	-91.2	22.8206	0.14	0.002689642
18	-92	22.0206	0.26	0.005362447
20	-93.3	20.7206	0.64	0.018078362

Tabla 4.10. Medida de BER en Escenario Exterior con Codificación Manchester

Distancia (m)	Potencia Recibida (dBm)	E_b/N_0 (dB)	PER	BER
2	-75.2	38.8206	0	0
4	-76.5	37.5206	0	0
6	-79	35.0206	0	0
8	-79.6	34.4206	0	0
10	-80.8	33.2206	0	0
12	-85.8	28.2206	0	0
14	-86.1	27.9206	0	0
16	-87.1	26.9206	0	0
18	-87.5	26.5206	0	0
20	-88	26.0206	0	0
22	-89.4	24.6206	0.0242	0.000437362
24	-89.9	24.1206	0.028	0.000507005
26	-90.4	23.6206	0.1034	0.001947128
28	-91.7	22.3206	0.3084	0.006563145
30	-92.3	21.7206	0.3298	0.007120583
32	-93.8	20.2206	0.4054	0.009240371
34	-95.5	18.5206	0.8872	0.038217328
36	-98.7	15.3206	0.9482	0.051490679

Al comparar los resultados, se apreció un incremento en la cobertura del sistema de comunicación con codificación Manchester. Además, con codificación solo se reciben paquetes errados hasta una distancia de 22 m, lo que es de esperarse debido a que el nivel de potencia en recepción a esta distancia, sin codificación se logra a los 10 m. De acuerdo a los valores de las Tablas 4.9 y 4.10, en la Figura 4.27 y 4.28 se grafican los datos de PER y BER del sistema en el escenario exterior sin Codificador Manchester y con Codificación Manchester en función de la relación E_b/N_0 .

Figura 4.27. PER vs E_b/N_0 en Escenario Exterior

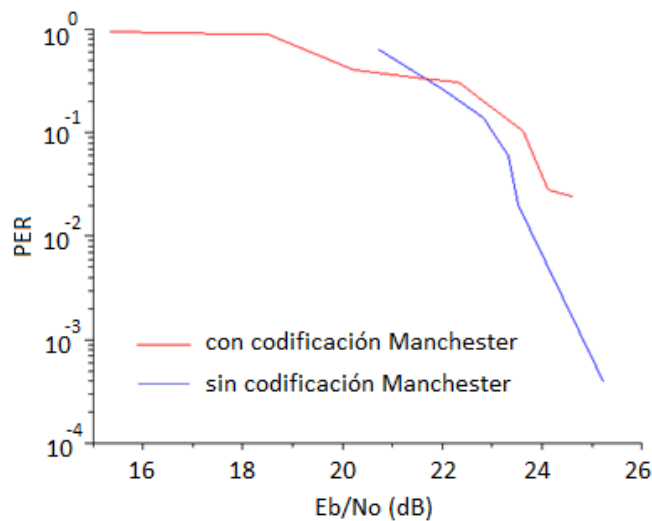
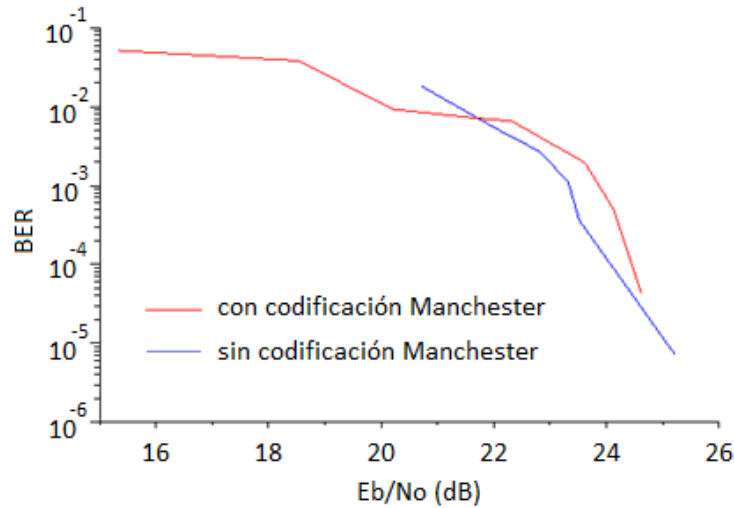


Figura 4.28. BER vs E_b/N_0 en Escenario Exterior



En la Figura 4.27 y la Figura 4.28 permiten una comparación de resultados obtenidos del sistema de comunicación, en términos de la PER y de la BER en escenario exterior respectivamente, con codificación y sin codificación Manchester. El desempeño del sistema de comunicación en los dos casos es similar para un mismo rango de valores de E_b/N_0 .

Para el sistema con codificación Manchester se obtuvieron paquetes con niveles de potencia de recepción hasta los -98 dBm mientras que para el sistema sin codificación Manchester se recibieron hasta los -93 dBm, por tanto en la grafica se observa que para el sistema con codificación hay un rango mayor de medida q para el sistema sin codificación.

4.4.3 Evaluación y Análisis de Desempeño en el Escenario Interior

El cálculo de BER en el escenario interior no fue posible realizarlo debido a que, en la distancia máxima del corredor no se obtuvo pérdida de paquetes. Esto se debe al alcance de los dispositivos y al efecto de guía de onda que se presenta en este tipo de escenario. En la tabla 4.11 se observan los resultados obtenidos del sistema de comunicación de datos con Codificación Manchester y sin Codificación Manchester.

Tabla 4.11. Medida de E_b/N_0 en Escenario Interior sin Codificación Manchester

Distancia (m)	Potencia Recibida (dBm)	E_b/N_0 (dB)
2	-67.53	46.4906
4	-74.21	39.8106
6	-74.11	39.9106
8	-76.88	37.1406
10	-78.69	35.3306
12	-81.24	32.7806
14	-83.5	30.5206
16	-87.58	26.4406

Tabla 4.11. (Continuación)

Distancia (m)	Potencia Recibida (dBm)	E_b/N_0 (dB)
18	-81.32	32.7006
20	-84.1	29.9206
22	-92.55	21.4706
24	-94.72	19.3006
26	-90.62	23.4006
28	-86.22	27.8006
30	-82.08	31.9406
32	-82.73	31.2906
34	-83.39	30.6306
36	-85.14	28.8806
38	-88.18	25.8406
40	-87.54	26.4806
42	-91.62	22.4006
44	-91.89	22.1306
46	-93.01	21.0106

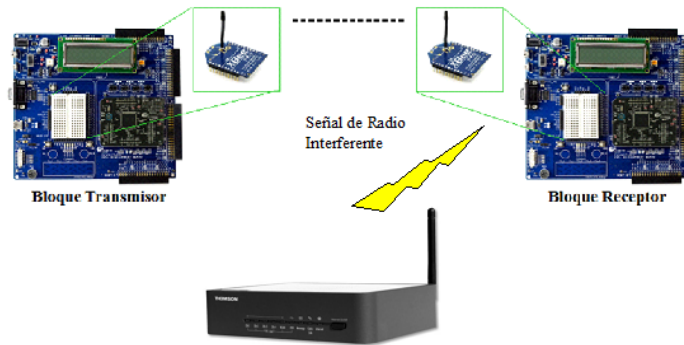
Tabla 4.12. Medida de E_b/N_0 en Escenario Interior con Codificación Manchester

Distancia (m)	Potencia Recibida (dBm)	E_b/N_0 (dB)
2	-68.05	45.9706
4	-71.45	42.5706
6	-72.15	41.8706
8	-73.9	40.1206
10	-75.55	38.4706
12	-78.7	35.3206
14	-81.66	32.3606
16	-82.22	31.8006
18	-80.1	33.9206
20	-85.62	28.4006
22	-87.29	26.7306
24	-86.75	27.2706
26	-89.5	24.5206
28	-88.69	25.3306
30	-86.24	27.7806
32	-83.12	30.9006
34	-80.55	33.4706
36	-81.02	33.0006
38	-80.75	33.2706
40	-78.4	35.6206
42	-84.32	29.7006
44	-86.24	27.7806
46	-89.02	25.0006

4.4.4 Evaluación y Análisis de Desempeño ante Interferencia

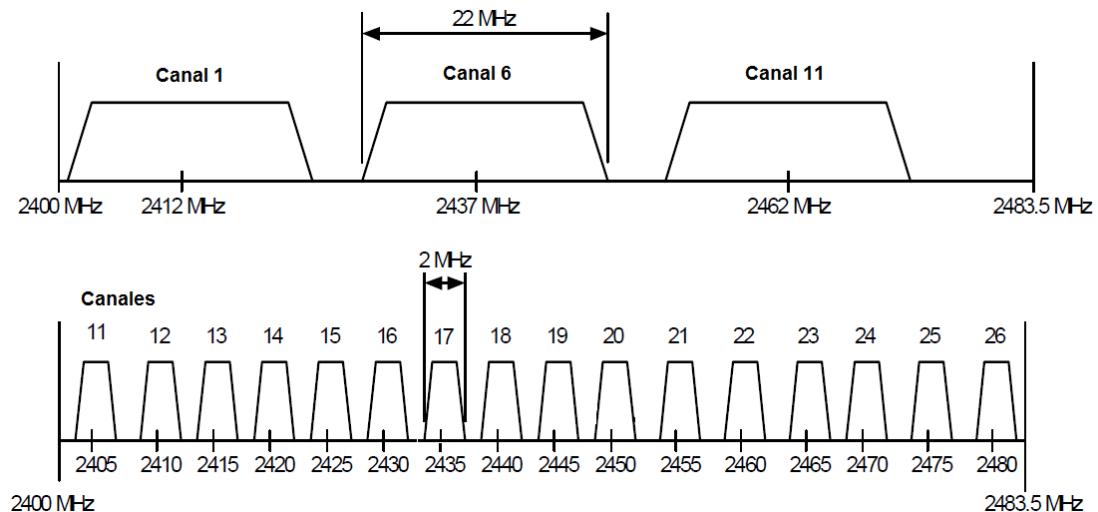
Para evaluar el desempeño del sistema de comunicación bajo condiciones de interferencia, se adecuó el sistema como se indica en la Figura 4.29. El receptor se ubica a una distancia del transmisor de 10 m, y a una distancia de 2 m del generador de interferencia, y a continuación mediante la variación del nivel de potencia de la señal interferente observar cómo se afecta la recepción de la señal.

Figura 4.29. Sistema con Interferencia



El dispositivo generador de interferencia es un enrutador inalámbrico de marca *Thomson*. Este dispositivo se configura en el canal 6 del estándar IEEE 802.11b correspondiente a una frecuencia de 2437 MHz, ya que este canal es el más usado en sistema *Wi-Fi* en escenario de interior. En el estándar IEEE 802.15.4 existen cuatro canales que se ubican en las bandas de guarda del estándar IEEE 802.11b los cuales son ideales para minimizar la interferencia entre los sistemas. Para este trabajo de grado se decide utilizar el canal 17 del estándar IEEE 802.15.4 que corresponde a una frecuencia de 2435 MHz como se observa en la Figura 4.30, para poder analizar el desempeño del sistema ante interferencia.

Figura 4.30. Canales estándar IEEE 802.11b y IEEE 802.15.4



En las Tablas 4.13 y 4.14 se registran los resultados de la transmisión de datos del sistema de comunicación con codificación Manchester y sin codificación Manchester ante interferencia. Contienen los valores de la relación C/I obtenidos a partir de los valores de potencia de transmisión de la señal deseada y la potencia de la señal interferente como se define en la Ecuación 4.16 [25]:

$$C/I [dB] = P_{TXD} [dBm] - P_{TXI} [dBm] \quad (4.16)$$

dónde:

C/I : Relación portadora – interferencia.

P_{TXD} : Potencia de la señal deseada.

P_{TXI} : Potencia de la señal interferente.

Además, se registran los valores calculados de PER y BER de acuerdo a las medidas de paquetes errados que se obtuvieron en el receptor. Se consideraron cuatro valores de potencia diferentes para el trasmisor interferente y una potencia de transmisión de la señal deseada de 11.5 dBm.

Tabla 4.13. Resultados desempeño sistema de comunicación sin Codificación Manchester bajo condiciones de interferencia.

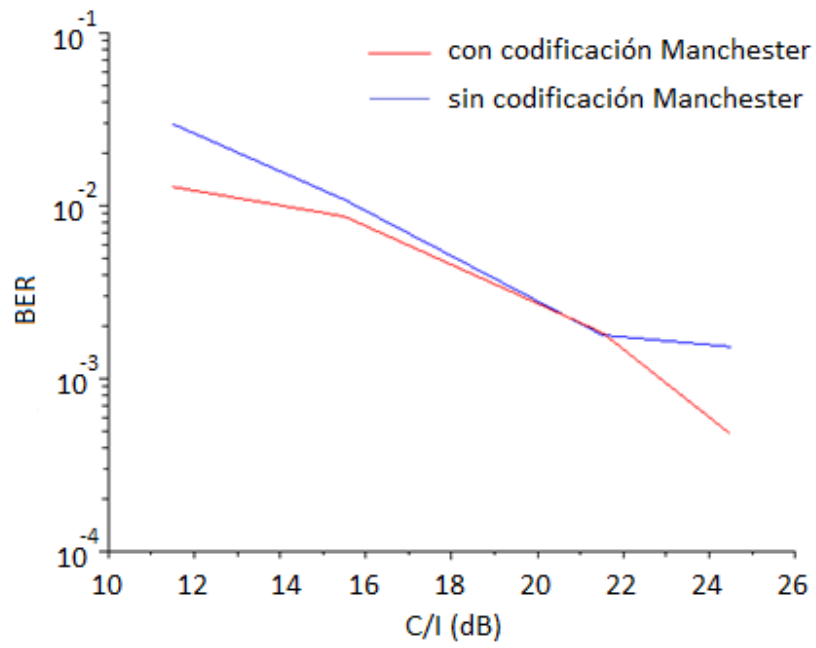
Potencia de Interferencia (dBm)	C/I (dB)	PER	BER
0	11.5	0.0816	1.51E-3
-4	15.5	0.0573	1.05E-3
-10	21.5	0.0255	4.61E-4
-13	24.5	0.0226	4.08E-4

Tabla 4.14. Resultados desempeño sistema de comunicación con Codificación Manchester bajo condiciones de interferencia.

Potencia de Interferencia (dBm)	C/I (dB)	PER	BER
0	11.5	0.0516	9.45E-4
-4	15.5	0.0364	6.61E-4
-10	21.5	0.0088	1.57E-4
-13	24.5	0.0064	1.14E-4

En la Figura 4.31, se observa el desempeño del sistema de comunicación con y sin codificación Manchester ante la incidencia de una señal interferente, representado a través de la relación BER con respecto a la relación de la potencia de la portadora a la potencia de la señal interferente. Como se aprecia el comportamiento de los dos sistemas es similar.

Figura 4.31. Relación Portadora Interferencia vs. BER



5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el presente trabajo de grado se alcanzaron los objetivos propuestos permitiendo de esta forma obtener un conocimiento más amplio acerca de todo lo relacionado con el kit de desarrollo CY8CKIT-001PSoC tanto en características físicas como operativas, su interacción con dispositivos RF, estándares de comunicación en la banda de 2.4 GHz y el procesamiento digital de la señal de información. Se evaluó el desempeño del prototipo en diferentes escenarios y condiciones de propagación.

Tras un proceso investigativo, se definieron las características y especificaciones de los transceptores XBee utilizados en el sistema, se implementó un bloque de comunicación serial entre el XBee y el kit desarrollo, se analizaron diferentes parámetros de transmisión de datos RF que cambiaban las características del sistema de comunicación y se evaluó el desempeño del mismo a partir de los resultados obtenidos para diferentes condiciones de propagación.

De esta manera, 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.

5.1 CONCLUSIONES

- Haciendo uso del kit de desarrollo CY8CKIT-001 PSoC es posible implementar un sistema de comunicación en la banda libre de 2.4 GHz. Esto se logra gracias al módulo de transmisión serial UART que interactúa con los dispositivos RF.
- Por el efecto de guía de onda que se genera en el escenario interior la cobertura del sistema de comunicación fue mayor a los resultados obtenidos en el escenario exterior, con la misma configuración de potencia de transmisión y antenas. Además, en el escenario interior no fue posible obtener errores en la comunicación aun cuando se cambiaron algunas características del sistema como ganancia de antenas, potencia de transmisión y canales de operación.
- El sistema con codificación Manchester presenta mejor desempeño debido a que aporta robustez a la señal de información generando un aumento en la cobertura, lo que permite tener medidas de potencia de la señal en recepción mayor a los medidos en el sistema sin codificación Manchester.
- El sistema tiene un desempeño óptimo en escenario exterior hasta una potencia de recepción mínima de -89 dBm tanto para el sistema con y sin codificación Manchester, a partir de este valor se empezaron a detectar paquetes errados en la comunicación. La diferencia radica en que para el sistema con codificación Manchester los errores se tiene a una distancia de 22 mts y para el sistema sin codificación Manchester a una distancia de 10 mts.

- Para obtener un análisis de desempeño válido del prototipo de comunicación la fuente de alimentación de voltaje del sistema debe ser lo más estable posible.
- Para efectos de estudio del desempeño del sistema de comunicación ante un escenario de interferencia, los transceptores XBee fueron configurados para transmitir en un canal cuya frecuencia está próxima a la frecuencia del generador de interferencia. Para mejorar el desempeño, los transceptores pueden ser configurados en un canal cuya frecuencia se encuentre en una banda de guarda de los canales del estándar interferente. Para redes en topologías donde los transceptores configuran automáticamente el canal de operación, se recomienda hacer una selección manual teniendo en cuenta posibles fuentes interferentes.

5.2 TRABAJOS FUTUROS

Los resultados obtenidos del presente trabajo de grado y las diferentes prestaciones del kit de desarrollo CY8CKIT-001PSoC, 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 vía radio que utilice alguna técnica de procesamiento digital de señal.
- Diseño e implementación de dispositivos de telemetría y telecontrol basados en el kit de desarrollo CY8CKIT-001 PSoC.
- Analizar y Evaluar el desempeño de un sistema de comunicación vía radio soportado en el kit de desarrollo CY8CKIT-001 PSoC y usando el módulo Artaflex AWP24S WirelessUSB.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Ashby, *Designer's Guide to the Cypress PSoC*, Primera Edición. Elsevier, 2005.
- [2] S. Haykin, "Sistemas de Comunicación", Versión traducida al español, UNAM, México, 2002.
- [3] J. LoCicero & B. Patel, "Line Coding", Illinois Institute of Technology, Boca Raton, 1999.
- [4] A. Tanenbaum, *Redes de Computadores*, Tercera Edición. Pearson, México, 1997.
- [5] Wikipedia, "Codificación Manchester", Wikipedia Inc., 2011. Disponible en: http://en.wikipedia.org/wiki/Manchester_code. [Consultado: Junio 2011]
- [6] W. Stallings, "Data and Computer Communications", Prentice Hall, 8th Edition. 2006
- [7] M. Hawa, "Introduction to Digital Baseband Communication System". Disponible en: <http://fetweb.ju.edu.jo/staff/EE/mhawa/421/LineCoding.pdf>
- [8] L. Couch, "Digital and Analog Communication System". United States of America: Prentice-Hall International, Inc., 1994.
- [9] Cypress Semiconductor, "CY8CKIT-001", Cypress Semiconductor Corporation. Disponible en <http://www.cypress.com/?rID=37464>. [Consultado: Septiembre 2011].
- [10] Cypress Semiconductor, "CY8CKIT-001 Quick Start Guide", Cypress Semiconductor Corporation, United States of America, 2009.
- [11] Cypress Semiconductor, "CY8C38xxx", Cypress Semiconductor Corporation, United States or America, 2011. Disponible en: <http://www.cypress.com/?docID=33168>. [Consultado: Septiembre 2011].
- [12] Cypress Semiconductor, "CY8C28xxx_001-48111", Cypress Semiconductor Corporation, United States or America, 2011. Disponible en: <http://www.cypress.com/?docID=35867>. [Consultado: Septiembre 2011].
- [13] Cypress Semiconductor, "PSoC5 CY8C55 Family Data Sheet_001-66235", Cypress Semiconductor Corporation, United States or America, 2011. Disponible en: <http://www.cypress.com/?docID=34815>. [Consultado: Septiembre 2011].
- [14] Cypress Semiconductor, "Minipro3 User Guide", Cypress Semiconductor Corporation, United States or America, 2011.
- [15] Cypress Semiconductor, "PSoC Designer IDE Guide", Cypress Semiconductor Corporation, United States of America, 2009.

- [16] Cypress Semiconductor, "PsoC Creator 2.0 - Quick Start Guide", Cypress Semiconductor Corporation, United States of America, 20011.
- [17] Digi International, XBee ZB ZigBee Modules, Digi International Inc., United States of America. Disponible en: http://www.digi.com/images/products/prd-xbee-modules-fam_lg.jpg.
- [18] T. Rappaport, *WIRELESS COMMUNICATION*, Prentic Hall, 1996.
- [19] S. Haykin, *Digital communications*, John Wiley & Sons, 4th Edition. 2001.
- [20] J. Steber, "PSK Demodulation (Part 1)", United States of America, 2001. Disponible en: http://ftp.ing-steen.se/text/tekttext/digital-modulation/PSK_demod_part1.pdf. [Consultado: Octubre 2011].
- [21] Digi International, "Product Manual v1.xEx – 802.15.4 Protocol", Digi International Inc. Minnetonka, 2009.
- [22] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. United States of America: Cambridge University Press, 2005.
- [23] 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.
- [24] IEEE Std. 802.15.4-2006 Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) IEEE Computer Society. Revision of IEEE Std. 802.15.4-2003. ISBN 0-7381-4996-9. Septiembre 2006
- [25] J. Rábanos, "COMUNICACIONES MÓVILES". Centro de Estudios Ramón Aceres, 2004.