

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN PUNTO A PUNTO BASADO EN UWB-DS



Daniel Camilo Bolaños Eraso
Gheraldine Margoth Salazar Lasso

Director: Victor Manuel Quintero Florez

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
GRIAL Grupo de Radio e InALámbricas
Sistemas de Comunicaciones Móviles e Inalámbricos
Popayán, 2019

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN PUNTO A PUNTO BASADO EN UWB-DS



Daniel Camilo Bolaños Eraso
Gheraldine Margoth Salazar Lasso

Documento final de trabajo de grado para optar al título de Ingeniero en Electrónica
y Telecomunicaciones

Director: Victor Manuel Quintero Florez

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
GRIAL Grupo de Radio e InALámbricas
Sistemas de Comunicaciones Móviles e Inalámbricos
Popayán, 2019

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE TABLAS	VI
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE ACRÓNIMOS	XI
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. GENERALIDADES DE ULTRA BANDA ANCHA	3
1.1.1. Ultra Banda Ancha	3
1.1.2. Regulación y Estandarización	4
1.2. CONCEPTOS GENERALES DE UWB-DS	9
1.2.1. Ultra Banda Ancha-Secuencia Directa	9
1.2.2. Estructura de la Trama	10
1.2.3. Estructura del símbolo UWB-DS	14
1.2.4. Codificación de Canal	14
1.2.5. Ensanchamiento y Modulación BPM-BPSK	18
1.2.6. Conformador de Pulsos	20
1.2.7. Máscara Espectral	22
1.2.8. Técnicas de Recepción en UWB-DS	24
2. ADAPTACIÓN Y APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE MODELA- DO Y SIMULACIÓN	27
2.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y PLAN DE ESTUDIOS	30
2.1.1. Adquisición de Información Sobre el Funcionamiento de la Tec- nología	30
2.1.2. Identificación de los Fines de Simulación	31
2.1.3. Formulación de los Objetivos de la Simulación	31
2.2. RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS	32
2.2.1. Transmisor UWB-DS	32
2.2.2. Canal AWGN	32
2.2.3. Receptor UWB-DS	32
2.3. FORMULACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN	34
2.3.1. Transmisor UWB-DS	35
2.3.2. Canal AWGN	43
2.3.3. Receptor UWB-DS	43
3. DEFINICIÓN Y DISEÑO DEL PLAN DE PRUEBAS	49
3.1. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO	49

3.2. ANÁLISIS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO	50
3.3. ANÁLISIS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA	50
3.4. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	51
3.4.1. Escenario 1	51
3.4.2. Escenario 2	51
3.4.3. Escenario 3	52
3.4.4. Escenario 4	53
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	57
4.1. RESULTADO DE SEÑALES DE LOS BLOQUES DEL ESCENARIO PRINCIPAL	57
4.2. DIAGRAMAS DE OJO, CONSTELACIÓN, TRAYECTORIA Y ESPECTRO DE FRECUENCIAS	68
4.2.1. Escenario 1	68
4.2.2. Escenario 2	78
4.2.3. Escenario 3	81
4.2.4. Escenario 4	84
4.3. CURVAS DE DESEMPEÑO	94
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	97
5.1. CONCLUSIONES	97
5.2. TRABAJOS FUTUROS	99
REFERENCIAS	103

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1.	Características principales de UWB.	3
Tabla 1.2.	Características del estándar IEEE 802.15.3.	4
Tabla 1.3.	Tecnologías del estándar IEEE 802.15.3a.	5
Tabla 1.4.	Características del estándar IEEE 802.15.4.	6
Tabla 1.5.	Características del estándar IEEE 802.15.4a.	7
Tabla 1.6.	Esquema de canalización para IEEE 802.15.4a.	8
Tabla 1.7.	Párametros de configuración de la PSDU.	12
Tabla 1.8.	Periodo del pulso RRC requerido por cada canal.	21
Tabla 2.1.	Parámetros para la implementación del sistema.	35
Tabla 3.1.	Configuración de los escenarios de simulación.	51
Tabla 4.1.	Intervalo de símbolo UWB-DS donde se ubica el pulso de 32 ms.	59
Tabla 4.2.	Posición dentro del intervalo donde se ubica el pulso de 32 ms.	60

LISTA DE FIGURAS

Figure 1.1.	Esquemas de bandas de operación.	9
Figure 1.2.	Estructura de la trama.	10
Figure 1.3.	Proceso de transmisión y recepción de la trama.	14
Figure 1.4.	Estructura de símbolo UWB-DS.	14
Figure 1.5.	Esquema general del subsistema de codificación de canal.	15
Figure 1.6.	Palabra de código Reed-Solomon.	16
Figure 1.7.	Codificador convolucional.	16
Figure 1.8.	Codificador convolucional sistemático.	17
Figure 1.9.	Generador de secuencias binarias pseudoaleatorias.	18
Figure 1.10.	BPM-BPSK en un símbolo UWB-DS ensanchado.	19
Figure 1.11.	Codificador, ensanchador y modulador.	19
Figure 1.12.	Diagrama general de bloques de un transmisor con PS.	20
Figure 1.13.	Respuesta al impulso del filtro RRC en el dominio del tiempo.	21
Figure 1.14.	Respuesta al impulso del filtro RRC en el dominio de la frecuencia.	22
Figure 1.15.	Máscara espectral para el canal 3.	23
Figure 1.16.	Esquema de receptor no coherente con ED.	25
Figure 2.1.	Fases de la metodología de simulación de equipos de telecomunicaciones.	29
Figure 2.2.	Diagrama de clases del transmisor UWB-DS.	33
Figure 2.3.	Diagrama de clases del canal AWGN.	33
Figure 2.4.	Diagrama de clases del receptor UWB-DS.	34
Figure 2.5.	Sistema general UWB-DS.	34
Figure 2.6.	Subsistema del Transmisor UWB-DS.	35
Figure 2.7.	Codificador de canal.	36
Figure 2.8.	Codificador convolucional.	37

Figure 2.9. Ensanchador y modulador.	38
Figure 2.10. Generador de secuencias de salto de ráfaga.	39
Figure 2.11. Generador de secuencias de ensanchamiento.	40
Figure 2.12. PS en transmisión.	42
Figure 2.13. Bloque AWGN.	43
Figure 2.14. Subsistema del receptor UWB-DS.	44
Figure 2.15. Decodificador de canal.	46
Figure 2.16. Modelo de simulación del sistema general.	48
Figure 3.1. Interfaz gráfica de BERTool.	49
Figure 3.2. Bloques para visualización del diagrama de ojo, constelación y osciloscopio.	50
Figure 3.3. Bloque para visualización de espectro.	51
Figure 3.4. Modelo general del sistema para el escenario 2.	52
Figure 3.5. Modelo general del sistema del escenario 3.	53
Figure 3.6. Modelo general del sistema del escenario 4.	54
Figure 4.1. Dimensión del vector en las salidas de los bloques de generación de datos y codificación.	57
Figure 4.2. Periodo de bit a la salida del proceso de codificación Reed-Solomon.	58
Figure 4.3. Bits de salida del codificador convolucional.	58
Figure 4.4. Secuencias de salto de ráfaga.	59
Figure 4.5. Proceso de ensanchamiento.	60
Figure 4.6. Acercamiento del proceso de ensanchamiento.	61
Figure 4.7. Señales que realizan el proceso de ensanchamiento.	62
Figure 4.8. Periodo del pulso de 32 ms.	62
Figure 4.9. Símbolos UWB-DS.	63
Figure 4.10. Acercamiento al primer símbolo UWB-DS.	63
Figure 4.11. Acercamiento a la ráfaga del primer símbolo UWB-DS.	64
Figure 4.12. Ráfaga después del filtro RRC en transmisión.	64
Figure 4.13. Símbolo UWB-DS contaminado con AWGN.	65
Figure 4.14. Símbolo UWB-DS después del filtro RRC en recepción.	65
Figure 4.15. Comparación de los bits de posición con los bits recuperados por el detector de energía.	66
Figure 4.16. Señal de información de usuario en transmisión y recepción.	67
Figure 4.17. Acercamiento de la señal de información de usuario en transmisión y recepción.	67
Figure 4.18. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 1 del escenario 1.	69
Figure 4.19. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 2 del escenario 1.	69
Figure 4.20. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 3 del escenario 1.	70

Figure 4.21. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 4 del escenario 1.	70
Figure 4.22. Máscara espectral sobre espectro de frecuencias del escenario 1.	71
Figure 4.23. Diagrama de constelación para BPM-BPSK con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el escenario 1.	72
Figure 4.24. Diagramas de trayectoria con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el escenario 1.	72
Figure 4.25. Espectro de frecuencias con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 1 del escenario 1.	73
Figure 4.26. Espectro de frecuencias con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 2 del escenario 1.	73
Figure 4.27. Espectro de frecuencias con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 3 del escenario 1.	74
Figure 4.28. Espectro de frecuencias con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 4 del escenario 1.	74
Figure 4.29. Diagramas de constelación para BPM-BPSK con transmisión de ráfagas de manera continua en el escenario 1.	75
Figure 4.30. Diagramas de trayectoria con transmisión de ráfagas de manera continua en el escenario 1.	75
Figure 4.31. Diagrama de ojo con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 1 del escenario 1.	76
Figure 4.32. Diagrama de ojo con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 2 del escenario 1.	77
Figure 4.33. Diagrama de ojo con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 3 del escenario 1.	77
Figure 4.34. Diagrama de ojo con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 4 del escenario 1.	78
Figure 4.35. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 2 del escenario 2.	79
Figure 4.36. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 3 del escenario 2.	79
Figure 4.37. Máscara espectral sobre espectro de frecuencias del escenario 2.	80
Figure 4.38. Diagramas de constelación para BPM-BPSK con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el escenario 2.	80
Figure 4.39. Diagramas de trayectoria con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el escenario 2.	81
Figure 4.40. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 1 del escenario 3.	81
Figure 4.41. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 2 del escenario 3.	82

Figure 4.42. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 3 del escenario 3.	82
Figure 4.43. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 4 del escenario 3.	83
Figure 4.44. Diagramas de constelación para BPM-BPSK con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el escenario 3.	83
Figure 4.45. Diagramas de trayectoria con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el escenario 3.	84
Figure 4.46. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 1 del escenario 4.	85
Figure 4.47. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 2 del escenario 4.	85
Figure 4.48. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 3 del escenario 4.	86
Figure 4.49. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 4 del escenario 4.	86
Figure 4.50. Máscara espectral sobre espectro de frecuencias del escenario 4.	87
Figure 4.51. Diagramas de constelación para BPM-QPSK con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el escenario 4.	87
Figure 4.52. Diagramas de trayectoria con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el escenario 4.	88
Figure 4.53. Espectro de frecuencias con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 1 del escenario 4.	89
Figure 4.54. Espectro de frecuencias con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 2 del escenario 4.	89
Figure 4.55. Espectro de frecuencias con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 3 del escenario 4.	90
Figure 4.56. Espectro de frecuencias con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 4 del escenario 4.	90
Figure 4.57. Diagramas de constelación para BPM-QPSK con transmisión de ráfagas de manera continua en el escenario 4.	91
Figure 4.58. Diagramas de trayectoria con transmisión de ráfagas de manera continua en el escenario 4.	91
Figure 4.59. Diagrama de ojo con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 1 del escenario 4.	92
Figure 4.60. Diagrama de ojo con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 2 del escenario 4.	93
Figure 4.61. Diagrama de ojo con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 3 del escenario 4.	93
Figure 4.62. Diagrama de ojo con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 4 del escenario 4.	94
Figure 4.63. Curvas de desempeño para los escenarios 1 y 2.	95

Figure 4.64. Curvas de desempeño para los escenarios 1 y 3.	96
Figure 4.65. Curvas de desempeño para los escenarios 1 y 4.	96

LISTA DE ACRÓNIMOS

AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i> , Ruido Gaussiano Blanco Aditivo.
BPM	<i>Burst Position Modulation</i> , Modulación por Posición de Ráfaga.
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i> , Modulación por Corrimiento de Fase Binario.
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i> , Evaluación de Canal Libre.
CFR	<i>Code of Federal Regulations</i> , Código de Regulaciones Federales.
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i> , Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Prevención de Colisión.
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i> , Espectro Ensanchado por pulsos tipo Chirp.
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> , Espectro Ensanchado por Secuencia Directa.
D-QPSK	<i>Differential Quadrature Phase-Shift Keying</i> , Modulación por Corrimiento de Fase en Cuadratura Diferencial.
ECMA	<i>European Computer Manufacturers Association</i> , Asociación Europea de Fabricantes de Computadores.
ED	<i>Energy Detection</i> , Detección de Energía.
FCC	<i>Federal Communications Commission</i> , Comisión Federal de Comunicaciones.
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División en Frecuencia.
FEC	<i>Forward Error Correction</i> , Corrección de Errores Hacia Adelante.
HiperLAN	<i>High Performance Radio Local Area Network</i> , Red de Área Local de Radio de Alto Desempeño.
HRP	<i>High Rate Pulse</i> , Pulsos de Alta Frecuencia.
HR-WPAN	<i>High Rate Wireless Personal Area Network</i> , Red de Área Personal Inalámbrica de Alta Velocidad de Transmisión de Datos.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
ISI	<i>Inter-Symbol Interference</i> , Interferencia Inter-Simbólica.
LFSR	<i>Linear-Feedback Shift Register</i> , Registro de Corrimiento de Retroalimentación Lineal.
LSR	<i>Linear Shift Register</i> , Registros de Corrimiento Lineal.
LQI	<i>Link Quality Indicator</i> , Indicador de Calidad de Enlace.
LR-WPAN	<i>Low Rate Wireless Personal Area Network</i> , Red de Área Personal Inalámbrica de Baja Velocidad de Transmisión de Datos.
MAC	<i>Media Access Control</i> , Control de Acceso al Medio.
MBOA	<i>Multi-Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing Alliance</i> , Alianza de Multiplexación por División en Frecuencias Ortogonales Multi-Banda.

MPAM	<i>M-ary Pulse Amplitude Modulation</i> , Modulación por Amplitud de Pulsos M-aria.
MUI	<i>Multi-User Interference</i> , Interferencia Multi-Usuario.
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División en Frecuencias Ortogonales.
O-QPSK	<i>Offset Quadrature Phase-Shift Keying</i> , Modulación por Corrimiento de Fase en Cuadratura Compensada.
OSI	<i>Open System Interconnection</i> , Interconexión de Sistemas Abiertos.
PHR	<i>Physical Layer HeadeR</i> , Encabezado del Nivel Físico
PLME	<i>Physical Layer Management Entity</i> , Entidad de Gestión del Nivel Físico.
PLME-SAP	<i>Physical Layer Management Entity Service Access Point</i> , Punto de Acceso al Servicio de Entidad de Gestión del Nivel Físico.
PN	<i>Pseudo Noise</i> , Pseudo Ruido.
PPDU	<i>Physical Layer Protocol Data Unit</i> , Unidad de Datos de Protocolo del Nivel Físico.
PRBS	<i>PseudoRandom Binary Sequence</i> , Secuencia Binaria Pseudoaleatoria.
PRF	<i>Pulse Repetition Frequency</i> , Frecuencia de Repetición de Pulsos.
PS	<i>Pulse Shaper</i> , Conformador de Pulsos.
PSD	<i>Power Spectral Density</i> , Densidad Espectral de Potencia.
PSDU	<i>Physical Layer Service Data Unit</i> , Unidad de Datos de Servicios del Nivel Físico.
PSSS	<i>Spread Spectrum in Parallel Sequence</i> , Espectro Ensanchado por Secuencia Paralela.
QPSK	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i> , Modulación por Corrimiento de Fase en Cuadratura.
RRC	<i>Root Raised Cosine</i> , Raíz de Coseno Alzado.
RUP	<i>Rational Unified Process</i> , Proceso Unificado Racional.
SAP	<i>Service Access Point</i> , Punto de Acceso al Servicio.
SECDED	<i>Single Error Correcting Double Error Detecting</i> , Corrección de Error Único Detección de Error Doble.
SHR	<i>Synchronization HeadeR</i> , Encabezado de Sincronización.
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido.
SSRG	<i>Simple Shift Register Generator</i> , Registros de Corrimiento Simple.
UWB	<i>Ultra Wide Band</i> , Ultra Banda Ancha.
UWB-DS	<i>Ultra Wide Band-Direct Sequence</i> , Ultra Banda Ancha-Secuencia Directa.
UWB-OFDM	<i>Ultra Wide Band-Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , Ultra Banda Ancha-Multiplexación por División en Frecuencias Ortogonales.
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i> , Redes de Área Personal Inalámbrica.
WSN	<i>Wireless Sensor Networks</i> , Redes de Sensores Inalámbricos.



INTRODUCCIÓN

La necesidad de transmitir información inalámbricamente en cortas distancias y de manera eficiente, rápida y confiable, dio origen a las Redes de Área Personal Inalámbrica (WPAN, *Wireless Personal Area Network*). Las WPAN son redes de comunicación de datos inalámbricas con una cobertura menor a 10 metros y de topología simple. El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) las especifica y regula en el estándar IEEE 802.15, el cual se divide en grupos de trabajo para diferenciarlas por su velocidad de transmisión de datos, consumo de energía y calidad de servicio. Los grupos de trabajo TG1, TG3 y TG4 han desarrollado los estándares: IEEE 802.15.1, IEEE 802.15.3 e IEEE 802.15.4, respectivamente. Las WPAN han tenido una gran acogida, lo que ha permitido el desarrollo de diferentes tecnologías y aplicaciones para satisfacer los requerimientos y demandas de los consumidores finales. El escaso espectro electromagnético disponible y su alto uso limita las características de las tecnologías asociadas a las WPAN. Ultra Banda Ancha (UWB, *Ultra Wide Band*) es una tecnología emergente que surge como una solución a la escasez del espectro y a la interferencia, haciendo uso de muy bajas potencias y un gran ancho de banda para comunicaciones a muy corta distancia, para de esta manera reutilizar eficientemente el espectro electromagnético y coexistir con otros sistemas radio sin generar interferencia o ser afectados por esta.

Teniendo en cuenta los importantes beneficios que trae UWB, surgió la necesidad de realizar en este trabajo de grado de investigación un análisis del desempeño a nivel físico de un sistema de comunicación punto a punto basado en esta tecnología, puntualmente en Ultra Banda Ancha-Secuencia Directa (UWB-DS, *Ultra Wide Band-Direct Sequence*) basado en el estándar IEEE 802.15.4a, el cual hace uso de la técnica de transmisión de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*) y la Modulación por Posición de Ráfaga (BPM, *Burst Position Modulation*) - Modulación por Corrimiento de Fase Binario (BPSK, *Binary Phase Shift Keying*).

Este documento está organizado de la siguiente manera: en el Capítulo 1, se presenta el marco teórico compuesto por las generalidades de UWB (definición y estandarización) y conceptos generales del nivel físico de UWB-DS; en el Capítulo 2, se presenta la adaptación y aplicación de una metodología de modelado y simulación, que sirve de base para el diseño e implementación de un modelo de simulación de un enlace de comunicación punto a punto basado en UWB-DS; en el Capítulo 3, se presenta la definición y el diseño del plan de pruebas, que permite la planificación de las actividades de prueba a considerar en la simulación; en el Capítulo 4, se presenta los resultados y su análisis; y por último en el Capítulo 5, las conclusiones y trabajos futuros.



1. MARCO TEÓRICO

1.1. GENERALIDADES DE ULTRA BANDA ANCHA

El término UWB surge en la primera mitad de los años 60s, cuando se investigaba el comportamiento transitorio de una clase de redes de microondas, desde ahí se desarrollaron sistemas de comunicaciones y radar basados en pulsos de corta duración. Luego, a inicios de los años 70s, a partir de las investigaciones del Dr. Gerald F. Ross, se patentó un receptor para este tipo de pulsos [1], el cual fue el primer sistema de comunicaciones basado en UWB. Más adelante, al final de los años 80s el Departamento de Defensa de los Estados Unidos adoptó el término UWB e investigó sus aplicaciones en campos como radar, comunicaciones, sensores y sistemas de posicionamiento [2].

1.1.1. Ultra Banda Ancha

UWB es una tecnología de WPAN de altas velocidades de transmisión de datos (entre 110 Mbps y 480 Mbps) en distancias cortas (hasta los 10 metros) [3], o de bajas velocidades de transmisión de datos (entre 110 Kbps y 27,24 Mbps) cuando la distancia es media o larga (de hasta 100 metros) [4]. Esta tecnología puede coexistir con otras tecnologías radio, por ejemplo, IEEE.802.11, Red de Área Local de Radio de Alto Desempeño (HiperLAN, *High Performance Radio Local Area Network*), entre otras [3], con un buen desempeño sin causar o sin ser afectada por interferencia. Lo anterior se logra porque UWB distribuye su energía sobre un amplio ancho de banda, haciendo que el nivel de la señal sea comparable a los niveles de ruido, así, todos los receptores pueden estar relativamente cerca y trabajar correctamente [5]. Las características principales de la señal UWB se muestra en la Tabla 1.1. [6].

Tabla 1.1. Características principales de UWB.

Característica	
Banda de operación [GHz]	3,1 - 10,6
Ancho de banda [MHz]	≥ 500
PSD ¹ [dBm/MHz]	-41,3

UWB se caracteriza por transmitir pulsos de corta duración (del orden de los picosegundos), que se traduce en el dominio de la frecuencia en un espectro de gran ancho de banda (del orden de los MHz), con bajo consumo de energía (del orden de los mW) [7]; además, es capaz de penetrar obstáculos gracias a las bajas frecuencias (grandes longitudes de onda) incluidas en su gran espectro; y de operar en canales con baja Relación Señal a Ruido (SNR, *Signal-to-Noise Ratio*) y aún así

¹Densidad Espectral de Potencia (PSD, *Power Spectral Density*).



brindar gran capacidad de canal (del orden de los Gbps) como resultado del gran ancho de banda [8].

1.1.2. Regulación y Estandarización

El principal organismo regulador de UWB es la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, *Federal Communications Commission*) en Estados Unidos, el cual reglamenta el uso de UWB en comunicaciones sin licencia por medio del Código de Regulaciones Federales (CFR, *Code of Federal Regulations*) título 47, parte 15 (47 CFR 15), subparte F, extendiéndose entre los numerales 15.501 a 15.523, el cual establece límites en cuanto a la PSD, la banda de operación y el ancho de banda que debe ser igual o superior a 500 MHz o que cumpla la desigualdad de la Ecuación 1.1.

$$2 \times \frac{f_s - f_i}{f_s + f_i} \geq 0,2, \quad (1.1)$$

donde f_i es la frecuencia del extremo inferior de la banda de operación y f_s la del extremo superior [6]. El grupo de trabajo IEEE 802.15 el cual desarrolla estándares para las WPAN, estandariza a UWB, puntualmente en el IEEE 802.15.3 para velocidades de transmisión de datos altas y el IEEE 802.15.4 para velocidades de transmisión de datos bajas.

1.1.2.1. IEEE 802.15.3 En diciembre de 1999, el IEEE autorizó la creación de un grupo de trabajo, el TG3, que se encargó de desarrollar este estándar para la Red de Área Personal Inalámbrica de Alta Velocidad de Transmisión de Datos (HR-WPAN, *High Rate Wireless Personal Area Network*). El primer borrador especificó las características del nivel físico y del subnivel Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*) [3]. Las características de las tecnologías que se estandarizan bajo el estándar IEEE 802.15.3 se muestran en la Tabla 1.2. [3].

Tabla 1.2. Características del estándar IEEE 802.15.3.

Característica	
Banda de operación [GHz]	2,4
Velocidad de transmisión de datos [Mbps]	11; 22; 33; 44; y 55
Modulación	BPSK y QPSK ²
Ancho de banda de canal [MHz]	15
Máxima potencia de transmisión [dBm]	8

Con la aprobación de la reglamentación de la FCC para los dispositivos UWB, la IEEE designa otro grupo de trabajo, el TG3a, que se encargó de desarrollar el estándar IEEE 802.15.3a para los dispositivos UWB aprobados en ese entonces.

²Modulación por Corrimiento de Fase en Cuadratura (QPSK, *Quadrature Phase Shift Keying*).



1.1.2.2. IEEE 802.15.3a IEEE 802.15.3a especifica un nivel físico alternativo para aplicaciones inalámbricas que requieren velocidades de transmisión de datos mayores a 100 Mbps, tales como: juegos, video conferencias, teatro en casa, descarga de contenido, etc [3]. Sus características se describen en la Tabla 1.3. [3, 9].

Tabla 1.3. Tecnologías del estándar IEEE 802.15.3a.

	Niveles físicos del estándar IEEE 802.15.3a	
	UWB-OFDM ³	UWB-DS
Bandas de canales	Múltiples bandas de 528 MHz, tres bandas bajas y cuatro en bandas altas (opcionales)	Doble banda, una banda alta y una baja
Técnica de transmisión	OFDM ⁴	DSSS
Codificación de canal	Convolutional	Convolutional y Reed-Solomon
Banda de operación [GHz]	2,4	2,4
Velocidad de transmisión de datos [Mbps]	110; 200 y 480	110 y 200
Modulación	QPSK	BPSK y QPSK
Ancho de banda de canal	528 MHz	1,38 GHz y 2,736 GHz
Máxima potencia de transmisión [dBm]	8	8
Promovida por	MBOA ⁵ , HP ⁶ , Intel, Sony y Alereon, WiMedia, Samsung y <i>Texas Instruments</i>	<i>Xtreme Spectrum</i> , <i>UWB Forum</i> (Motorola y Freescale)

IEEE 802.15.3a se formó para crear un estándar común para dispositivos UWB, desafortunadamente el grupo se dividió en dos propuestas diferentes descritas en la Tabla 1.3. Algunas compañías promovieron UWB-DS, argumentando que UWB-OFDM requería de una sincronización complicada, mientras que las compañías que lo promovían, argumentaban que este era menos susceptible a la interferencia de otros dispositivos UWB vecinos. Estas dos posiciones hicieron que los esfuerzos para crear un estándar híbrido se disolviera junto con el grupo en el 2006 [10].

Cabe destacar que UWB-DS se adoptó como tecnología radio en el grupo de trabajo TG4a para entornos WPAN de Baja Velocidad de Transmisión de Datos (LR-WPAN, *Low Rate WPAN*), en el estándar IEEE 802.15.4a; mientras que UWB-OFDM se adoptó por la Asociación Europea de Fabricantes de Computadores (ECMA, *Eu-*

³Ultra Banda Ancha-Multiplexación por División en Frecuencias Ortogonales (UWB-OFDM, *Ultra Wide Band-Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

⁴Multiplexación por División en Frecuencias Ortogonales (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

⁵Alianza de OFDM Multi-Banda (MBOA, *Multi-Band OFDM Alliance*).

⁶*Hewlett-Packard (HP)*.



ropean Computer Manufacturers Association) internacional en el estándar técnico ECMA-368 [9].

1.1.2.3. IEEE 802.15.4 Este estándar define las especificaciones del nivel físico y del subnivel MAC para LR-WPAN. En el 2003, apareció la versión original del estándar, la cual especificó: dos niveles físicos que se basan en DSSS; tres bandas de operación diferentes; la adopción de la técnica de Multiplexación por División en Frecuencia (FDM, *Frequency Division Multiplexing*), donde cada una de las bandas es dividida en canales, esto con el objetivo de que varias redes puedan coexistir en un mismo espacio [11, 12]. La versión mejorada del estándar del año 2003, fue publicada en el año 2006, en la cual se especifican cuatro niveles físicos, uno de los cuales se basa en la técnica de Espectro Ensanchado por Secuencia Paralela (PSSS, *Parallel Sequence Spread Spectrum*)⁷, y los demás en la técnica DSSS [13]. En la Tabla 1.4. [11, 12] se describen las características para cada banda de operación, en las versiones del estándar de los años 2003 y 2006.

Tabla 1.4. Características del estándar IEEE 802.15.4.

Características						
	Banda de operación [MHz]	Canales definidos [Canal(es)]	Velocidad de transmisión de datos [Kbps]	Modulación	Técnica de transmisión	Codificación de canal
IEEE 802.15.4 año 2003	868 (Europa)	1	20	BPSK	DSSS y PSSS	Convolutacional y Reed-solomon
	915 (EE.UU)	10	40	BPSK		
	240	16	250	O-QPSK ⁸		
IEEE 802.15.4 año 2006	868 (Europa)	3	100 o 250	BPSK/O-QPSK	DSSS y PSSS	Convolutacional y Reed-Solomon
	915 (EE.UU)	30	250	O-QPSK		
	240	16	250	O-QPSK		

El nivel físico brinda: servicio de datos y servicio de gestión, los cuales se encuentran conectados con el Punto de Acceso al Servicio (SAP, *Service Access Point*) de la Entidad de Gestión del Nivel Físico (PLME, *Physical Layer Management Entity*) conocido también como PLME-SAP. El servicio de datos permite la transmisión y recepción de la Unidad de Datos de Protocolo del Nivel Físico (PPDU, *Physical Layer Protocol Data Unit*) a través de canal radio físico [12].

El nivel físico cuenta con las siguientes características: activación y desactivación del transceptor radio, Indicador de Calidad de Enlace (LQI, *Link Quality Indicator*), selección de canal, Evaluación de Canal Libre (CCA, *Clear Channel Assessment*),

⁷PSSS: técnica de transmisión basada en la superposición de secuencias ensanchadas binarias modificadas cíclicamente, moduladas con Modulación por Amplitud de Pulsos M-aria (MPAM, *M-ary Pulse Amplitude Modulation*).

⁸Modulación por Corrimiento de Fase en Cuadratura Compensada (O-QPSK, *Offset Quadrature Phase-Shift Keying*).



Detección de Energía (ED, *Energy Detection*), y la transmisión y recepción de paquetes a través del medio físico [12].

1.1.2.4. IEEE 802.15.4a El grupo TG4a publicó el primer estándar con especificaciones del nivel físico y del subnivel MAC para Redes de Sensores Inalámbricos (WSN, *Wireless Sensor Networks*), el cual proporciona una mejor capacidad de comunicación y mayor precisión de localización que su antecesor el estándar IEEE 802.15.4, esta última es un requisito clave para los dispositivos del estándar IEEE 802.15.4a, puesto que en muchos casos en las redes de sensores los nodos receptores necesitan conocer con precisión la ubicación exacta del transmisor, dicha precisión es proporcional al ancho de banda que se puede emplear, por lo tanto, UWB-DS es un buen candidato para aplicaciones de este tipo [14].

El TG4a comenzó a trabajar en el 2003 generando escenarios de aplicación, luego, en el 2004 especificó los detalles de los esquemas de modulación, codificación, acceso múltiple y formas de onda, y en diciembre del 2005 envió el estándar para su aprobación en el 2007 [14]. El IEEE 802.15.4a del año 2007 le añade a la versión del 2006 opciones al nivel físico, las cuales dan capacidad de soportar rango extendido, alto desempeño, mayor resistencia contra interferencia, mayor movilidad, bajo consumo de energía, menor precio, y escalabilidad en la velocidad de transmisión de datos. El TG4a aprobó dos niveles físicos, uno para Espectro Ensanchado por pulsos tipo Chirp (CSS, *Chirp Spread Spectrum*) y otro para UWB-DS [4], cuyas características se aprecian en la Tabla 1.5. [4].

Tabla 1.5. Características del estándar IEEE 802.15.4a.

	Características	
	UWB-DS	CSS
Bandas de frecuencias [MHz]	sub-gigahertz (250 - 750) banda baja (3244 - 4742) banda alta (5944 - 10234)	2400 - 2483,5
Canales	16	14
Velocidad de transmisión de datos	850 Kbps (obligatorio) 110 Kbps; 6,81 Mbps y 27,24 Mbps	1 Mbps (obligatorio) 250 Kbps
Técnica de transmisión	DSSS	CSS
Codificación de canal	Convolucional y Reed-Solomon	-
Modulación	BPM-BPSK	D-QPSK ⁹ ; y 8-ary o 64-ary bi-ortogonal
Alcance [m]	10 - 100	
Acceso al medio	CSMA/CA ¹⁰ o ALOHA	



CSS se usa en aplicaciones que no requieren alto desempeño, sino, que prefieren mayores alcances y altas velocidades de transmisiones de datos, como: monitoreo, comunicación de vehículos y sistemas de alarma para prevenir accidentes [4].

En cuanto a UWB-DS, se caracteriza por:

- UWB-DS opera en tres bandas sin licencia: en la banda sub-gigahertz que contiene un solo canal (250 MHz - 750 MHz), en la banda baja que contiene cuatro canales (3244 MHz - 4742 MHz) y en la banda alta que contiene once canales (5944 MHz - 10234 MHz) [11], como se presenta en la Tabla 1.6. [11]. En la Figura 1.1. se muestra el esquema de operación en sub-gigahertz, y en las bandas baja y alta, con sus respectivos canales.

Los canales 0, 3 y 9 son obligatorios, y los canales 4, 7, 11 y 15 son opcionales, diferenciándose de los demás por tener un ancho de banda mayor a 500 MHz, permitiendo a los dispositivos que operan en estos canales transmitir a una potencia mayor y así lograr un mayor alcance [4].

Tabla 1.6. Esquema de canalización para IEEE 802.15.4a.

Canal	Banda de frecuencia	Frecuencia central (MHz)	Ancho de banda (MHz)
0	sub-gigahertz	499,2	499,2
1	banda baja	3494,2	499,2
2	banda baja	3993,6	499,2
3	banda baja	4492,8	499,2
4	banda baja	3993,6	1331,2
5	banda alta	6489,6	499,2
6	banda alta	6988,8	499,2
7	banda alta	6489,6	1081,6
8	banda alta	7488,0	499,2
9	banda alta	7987,2	499,2
10	banda alta	8486,4	499,2
11	banda alta	7987,2	499,2
12	banda alta	8985,6	499,2
13	banda alta	9484,8	499,2
14	banda alta	9984,0	499,2
15	banda alta	9484,8	1355

⁹Modulación por Corrimiento de Fase en Cuadratura Diferencial (D-QPSK, *Differential Quadrature Phase-Shift Keying*).

¹⁰Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Prevención de Colisión (CSMA/CA, *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*).

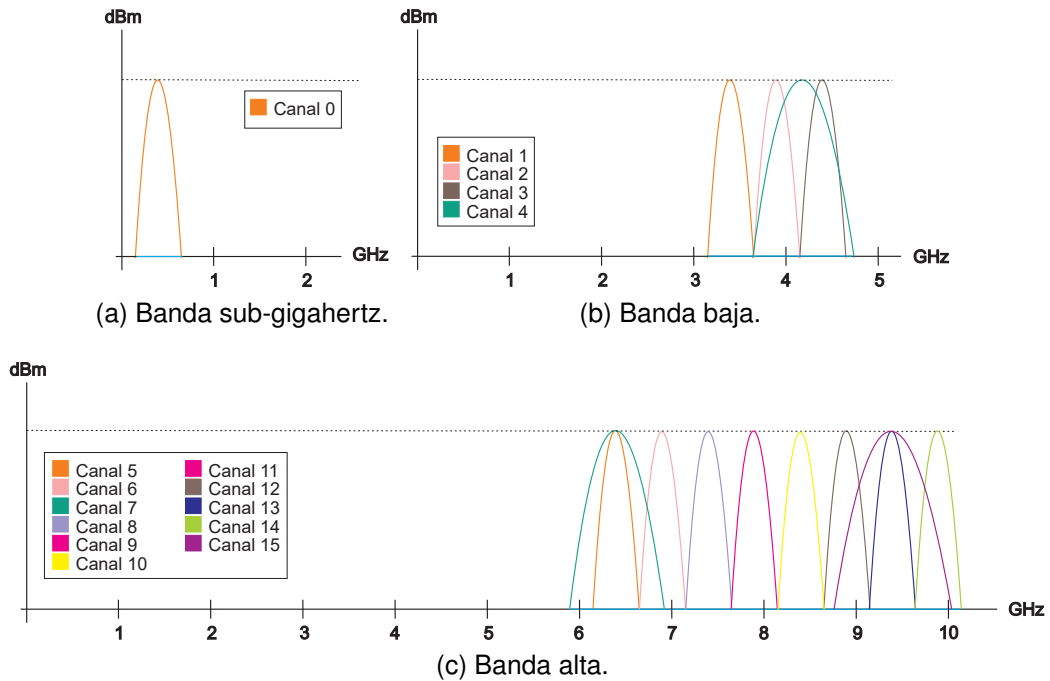


Figura 1.1. Esquemas de bandas de operación.

- UWB-DS define varias velocidades de transmisión de datos que permiten soportar diferentes aplicaciones. Se tiene una mayor cobertura a bajas velocidades de transmisión de datos debido a una mayor sensibilidad de los receptores [4].
- UWB-DS soporta aplicaciones que exigen altas velocidades de transmisión de datos, tales como: la conexión de computadores a proyectores, la conexión de decodificadores a televisores, la transmisión de música desde un reproductor a auriculares o altavoces, entre otras [4].
- UWB-DS proporciona precisión (del orden de los cm) y resolución en aplicaciones de posicionamiento y localización en interiores gracias al gran ancho de banda de sus señales [4].

1.2. CONCEPTOS GENERALES DE UWB-DS

1.2.1. Ultra Banda Ancha-Secuencia Directa

UWB-DS es denominado también como Pulsos de Alta Frecuencia (HRP, *High Rate Pulse*) y es estandarizado por el IEEE 802.15.4a. Los dispositivos UWB-DS trabajan en bandas sin licencia por lo que deben compartir espectro con niveles físicos de otras tecnologías, por esta razón deben cumplir con una serie de características



que permiten que se lleve a cabo esta coexistencia, como: modos opcionales de cortos periodos de símbolo UWB-DS que disminuyen el tiempo de las emisiones y la ocupación de canal, altas velocidades de transmisión de datos opcionales que minimizan el tiempo de uso del canal, múltiples bandas de frecuencias de operación [4], y baja PSD para disminuir la probabilidad de causar interferencias entre dispositivos y a otras tecnologías [15].

UWB-DS usa la técnica DSSS en la cual la señal transmitida ocupa un ancho de banda mayor que la señal de datos original, cuando esta última se multiplica por una secuencia pseudoaleatoria o de Pseudo Ruido (PN, *Pseudo Noise*).

1.2.2. Estructura de la Trama

Para comprender la estructura de la trama es necesario tener claro el concepto de símbolo UWB-DS. Un símbolo UWB-DS es una señal conformada por una ráfaga que a su vez está compuesta de 16 pulsos de corta duración, los cuales son el resultado de los procesos de ensanchamiento y modulación sobre 2 bits. La estructura del símbolo UWB-DS se detalla en la Sección 1.2.3. y su proceso de conformación en la Sección 1.2.5.

La trama se compone de: Encabezado de Sincronización (SHR, *Synchronization Header*) o preámbulo SHR, Encabezado del Nivel Físico (PHR, *Physical Layer Header*) y Unidad de Datos de Servicio del Nivel Físico (PSDU, *Physical Layer Service Data Unit*), que en conjunto conforman la PPDU [15]. Su estructura se muestra en la Figura 1.2. [15].

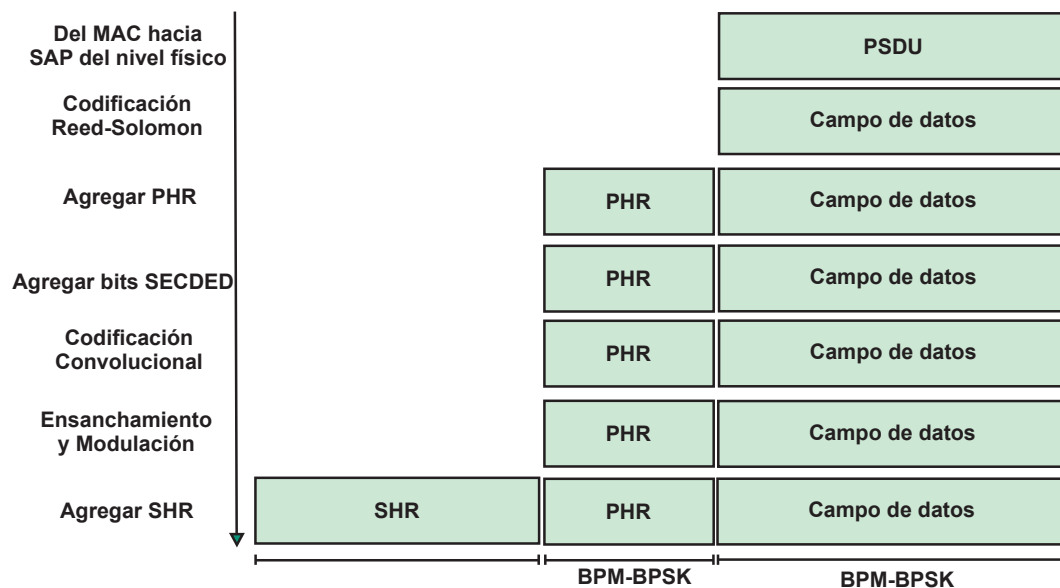


Figura 1.2. Estructura de la trama.



El procedimiento de conformación de la trama es el siguiente [15]:

1. Se aplica codificación Reed-Solomon a la PSDU.
2. Se produce el PHR para anteponerlo a la PSDU.
3. Se agregan bits de Corrección de Error Único Detección de Error Doble (SEC-DED, *Single Error Correcting Double Error Detecting*), para proteger la información del PHR.
4. Se aplica codificación convolucional a la PSDU y el PHR.
5. Se modula y se ensancha la PSDU y el PHR.
6. Se produce el preámbulo SHR para anteponerlo a la PSDU y el PHR, y completar la PPDU.

Los campos de preámbulo SHR y PHR se especifican en el estándar IEEE 802.15.4a. En cuanto a la PSDU, es el campo de datos o carga útil transmitido a una velocidad de datos determinada en el PHR [15]. En la Tabla 1.7. [15] se definen los parámetros que dependen de la velocidad de transmisión de datos, dichos parámetros se explican como se muestra a continuación [15]:

- **Número de canal:** define el número de canal en el que opera la trama.
- **Frecuencia de Repetición de Pulsos (PRF, *Pulse Repetition Frequency*) pico PRF_{Peak} :** es la frecuencia más alta de generación de pulsos en un dispositivo UWB-DS, el cual es igual a 499,2 MHz para todos los canales. A partir de este valor se calcula el periodo del chip T_c con la Ecuación 1.2.

$$T_c = \frac{1}{PRF_{Peak}}. \quad (1.2)$$

- **Ancho de banda:** denota el ancho de banda de la señal UWB-DS.
- **Tasa de codificación Viterbi $T_{Viterbi}$:** es la tasa de codificación, la cual puede ser igual a 1/2 o 1.
- **Tasa de codificación Reed-Solomon T_{RS} :** es la tasa de codificación Reed-Solomon (63, 55), la cual es aproximadamente igual a 0,87.
- **Tasa de Corrección de Errores Hacia Adelante (FEC, *Forward Error Correction*) global T_{FEC} :** es el producto entre la tasa de codificación Viterbi y la tasa de codificación Reed-Solomon, se calcula con la Ecuación 1.3.

$$T_{FEC} = T_{Viterbi} \times T_{RS}. \quad (1.3)$$



Análisis del Desempeño a Nivel Físico de un Sistema de Comunicación Punto a Punto Basado en UWB-DS

Tabla 1.7. Parámetros de configuración de la PSDU.

Número de canal	PRF pico (MHz)	Ancho de banda (MHz)	Modulación y Codificación			Estructura del símbolo UWB-DS						Datos		
			Tasa de codificación Viterbi	Tasa de codificación Reed-Solomon	Tasa FEC global	Posiciones de ráfaga por símbolo UWB-DS	N_{hoop}	N_{cpb}	Chips por símbolo UWB-DS	Período de ráfaga T_{burst} (ns)	Período de símbolo UWB-DS T_{sym} (ns)	Velocidad de transmisión de símbolo UWB-DS (MHz)	Velocidad de transmisión de datos (Mbps)	PRF media (MHz)
{0:3, 5:6, 8:10, 12:14}	499,2	499,2	0,5	0,87	0,44	32	8	128	4096	256,41	8205,13	0,12	0,11	15,60
	499,2	499,2	0,5	0,87	0,44	32	8	16	512	32,05	1025,64	0,98	0,85	15,60
	499,2	499,2	0,5	0,87	0,44	32	8	2	64	4,01	128,21	7,80	6,81	15,60
	499,2	499,2	1	0,87	0,87	32	8	1	32	2,00	64,10	15,60	27,24	15,60
{0:3, 5:6, 8:10, 12:14}	499,2	499,2	0,5	0,87	0,44	128	32	32	4096	64,10	8205,13	0,12	0,11	3,90
	499,2	499,2	0,5	0,87	0,44	128	32	4	512	8,01	1025,64	0,98	0,85	3,90
	499,2	499,2	0,5	0,87	0,44	128	32	2	256	4,01	512,82	1,95	1,70	3,90
	499,2	499,2	1	0,87	0,87	128	32	1	128	2,00	256,41	3,90	6,85	3,90
{0:3, 5:6, 8:10, 12:14}	499,2	499,2	0,5	0,87	0,44	8	2	512	4096	1025,64	8205,13	0,12	0,11	62,40
	499,2	499,2	0,5	0,87	0,44	8	2	64	512	128,21	1025,64	0,98	0,85	62,40
	499,2	499,2	0,5	0,87	0,44	8	2	8	64	16,03	128,21	7,80	6,81	62,40
	499,2	499,2	0,5	0,87	0,44	8	2	2	16	4,01	32,05	31,20	27,24	62,40
{4, 11}	499,2	1331,2	0,5	0,87	0,44	32	8	128	4096	256,41	8205,13	0,12	0,11	15,60
	499,2	1331,2	0,5	0,87	0,44	32	8	16	512	32,05	1025,64	0,98	0,85	15,60
	499,2	1331,2	0,5	0,87	0,44	32	8	2	64	4,01	128,21	7,80	6,81	15,60
	499,2	1331,2	1	0,87	0,87	32	8	1	32	2,00	64,10	15,60	27,24	15,60
{4, 11}	499,2	1331,2	0,5	0,87	0,44	8	2	512	4096	1025,64	8205,13	0,12	0,11	62,40
	499,2	1331,2	0,5	0,87	0,44	8	2	64	512	128,21	1025,64	0,98	0,85	62,40
	499,2	1331,2	0,5	0,87	0,44	8	2	8	64	16,03	128,21	7,80	6,81	62,40
	499,2	1331,2	0,5	0,87	0,44	8	2	2	16	4,01	32,05	31,20	27,24	62,40
7	499,2	1081,6	0,5	0,87	0,44	32	8	128	4096	256,41	8205,13	0,12	0,11	15,60
	499,2	1081,6	0,5	0,87	0,44	32	8	16	512	32,05	1025,64	0,98	0,85	15,60
	499,2	1081,6	0,5	0,87	0,44	32	8	2	64	4,01	128,21	7,80	6,81	15,60
	499,2	1081,6	1	0,87	0,87	32	8	1	32	2,00	64,10	15,60	27,24	15,60
7	499,2	1081,6	0,5	0,87	0,44	8	2	512	4096	1025,64	8205,13	0,12	0,11	62,40
	499,2	1081,6	0,5	0,87	0,44	8	2	64	512	128,21	1025,64	0,98	0,85	62,40
	499,2	1081,6	0,5	0,87	0,44	8	2	8	64	16,03	128,21	7,80	6,81	62,40
	499,2	1081,6	0,5	0,87	0,44	8	2	2	16	4,01	32,05	31,20	27,24	62,40
15	499,2	1354,97	0,5	0,87	0,44	32	8	128	4096	256,41	8205,13	0,12	0,11	15,60
	499,2	1354,97	0,5	0,87	0,44	32	8	16	512	32,05	1025,64	0,98	0,85	15,60
	499,2	1354,97	0,5	0,87	0,44	32	8	2	64	4,01	128,21	7,80	6,81	15,60
	499,2	1354,97	1	0,87	0,87	32	8	1	32	2,00	64,10	15,60	27,24	15,60
15	499,2	1354,97	0,5	0,87	0,44	8	2	512	4096	1025,64	8205,13	0,12	0,11	62,40
	499,2	1354,97	0,5	0,87	0,44	8	2	64	512	128,21	1025,64	0,98	0,85	62,40
	499,2	1354,97	0,5	0,87	0,44	8	2	8	64	16,03	128,21	7,80	6,81	62,40
	499,2	1354,97	0,5	0,87	0,44	8	2	2	16	4,01	32,05	31,20	27,24	62,40



- **Posiciones de ráfaga por símbolo UWB-DS** N_{burst} : es el número total de posibles posiciones de ráfaga en el periodo del símbolo UWB-DS, el cual se calcula con la Ecuación 1.4.

$$N_{burst} = \frac{T_{dsym}}{T_{burst}}. \quad (1.4)$$

- **Salto de Ráfaga** N_{hop} : es el número de posibles posiciones de ráfaga, el cual se determina con la Ecuación 1.5.

$$N_{hop} = \frac{N_{burst}}{4}. \quad (1.5)$$

Una ráfaga puede ubicarse en una posible posición de ráfaga.

- **Chips por ráfaga** N_{cpb} : este parámetro define el número de chips por ráfaga, el cual se determina con la Ecuación 1.6.

$$N_{cpb} = \frac{T_{burst}}{T_c}. \quad (1.6)$$

- **Periodo de ráfaga** T_{burst} : es el periodo de una ráfaga y se calcula a partir de la Ecuación 1.6.

- **Periodo de símbolo UWB-DS** T_{dsym} : es el periodo de un símbolo UWB-DS, el cual se calcula con la Ecuación 1.7.

$$T_{dsym} = N_{burst} \times T_{burst}. \quad (1.7)$$

- **Velocidad de transmisión de símbolo UWB-DS** R_s : es el inverso del periodo del símbolo UWB-DS y se determina con la Ecuación 1.8.

$$R_s = \frac{1}{T_{dsym}}. \quad (1.8)$$

- **Velocidad de transmisión de datos** V_{Tx} : es la velocidad de transmisión de datos del usuario considerando FEC y la cual se calcula con la Ecuación 1.9.

$$V_{Tx} = 2 \times \frac{T_{FEC}}{T_{dsym}}. \quad (1.9)$$

- **PRF media** PRF_{Mean} : es el número total de pulsos transmitidos durante un periodo de símbolo UWB-DS y el cual se calcula con la Ecuación 1.10.

$$PRF_{Mean} = \frac{N_{cpb}}{T_{dsym}}. \quad (1.10)$$

En cada canal es posible variar la velocidad de transmisión de datos V_{Tx} al cambiar el número de chips por ráfaga N_{cpb} , mientras el número total de posibles posiciones de ráfaga por símbolo UWB-DS N_{burst} es constante, por lo tanto, el periodo del símbolo UWB-DS T_{dsym} varía, y a partir de este se obtiene la velocidad de transmisión de símbolos UWB-DS R_s [15]. En la Figura 1.3. [15] se muestra el proceso de recuperación de información de usuario.

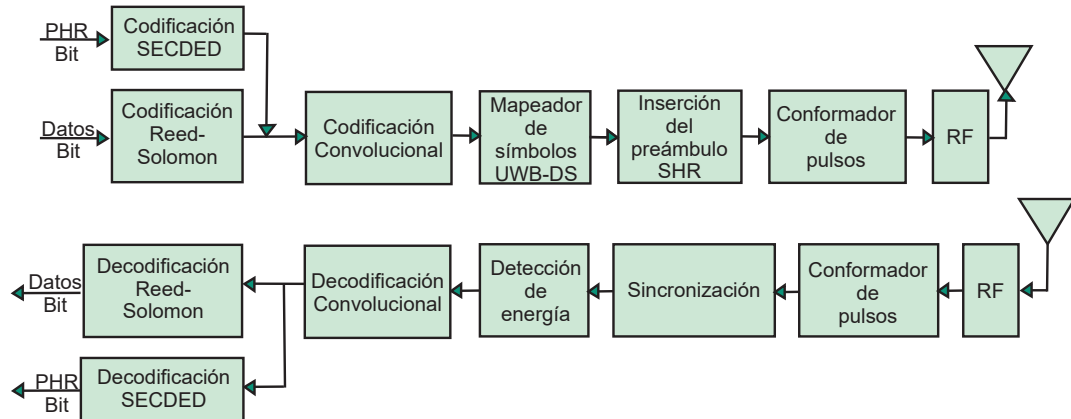


Figura 1.3. Proceso de transmisión y recepción de la trama.

1.2.3. Estructura del símbolo UWB-DS

En la Figura 1.4. [15] se detalla un símbolo UWB-DS que se divide en dos intervalos T_{BPM} determinado por la Ecuación 1.11. La primera mitad de cada intervalo T_{BPM} contiene N_{hop} posibles posiciones de ráfaga, en una de las cuales se ubicará la ráfaga, la cual tiene un periodo T_{burst} . Cada ráfaga está compuesta por un conjunto de N_{cpb} chips consecutivos, cada uno con periodo T_c (ver definición de parámetros en la Sección 1.2.2.). La segunda mitad del intervalo T_{BPM} es un intervalo de guarda para limitar la Interferencia Inter-Simbólica (ISI, *Inter-Symbol Interference*) causada por el multitrayecto [15].

$$T_{BPM} = \frac{T_{dsym}}{2}. \quad (1.11)$$

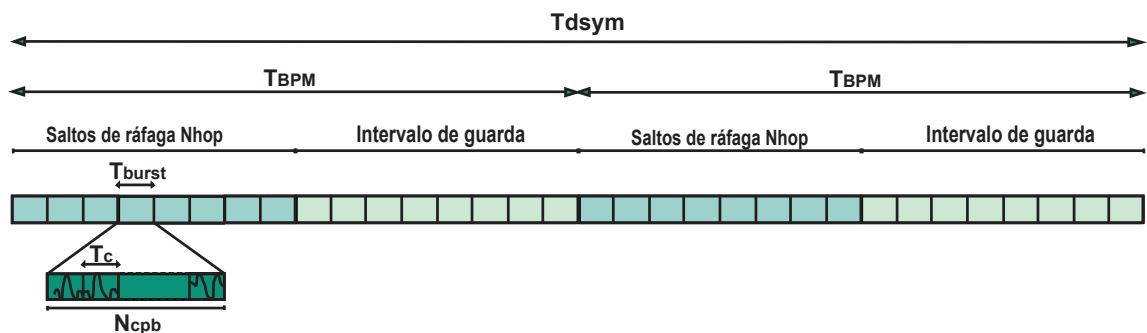


Figura 1.4. Estructura de símbolo UWB-DS.

1.2.4. Codificación de Canal

El estándar IEEE 802.15.4a establece la concatenación de los códigos Reed-Solomon y convolutiva, siendo el código Reed-Solomon el que cumple las funcio-

nes de la técnica FEC, mientras que el código convolucional es usado para obtener los bits que definen la posición y la polaridad de la ráfaga, y así conformar el símbolo UWB-DS. Cabe resaltar que debido a que la codificación Reed-Solomon y la codificación convolucional son ambas sistemáticas¹¹, los receptores pueden no incluir un decodificador FEC, en donde los bits de información son recuperados al realizar la demodulación de la posición de la ráfaga, y los bits de verificación de paridad adicionales generados por la codificación son ignorados [15].

Según el estándar IEEE 802.15.4a, la codificación de canal para una vector de dimensión A bits, i.e., b_0, b_1, \dots, b_{A-1} , se realiza inicialmente con un codificador Reed-Solomon, el cual agrega al vector definido un vector de paridad con dimensión igual a 48 bits, i.e., p_0, p_1, \dots, p_{47} , obteniéndose como resultado una señal de salida codificada Reed-Solomon de dimensión igual a $A+48$, la cual ingresa al codificador convolucional y genera una señal con dimensión igual a $2A+96$, dada la tasa de codificación igual a $1/2$. El proceso de la codificación de canal se muestra en la Figura 1.5. [15].

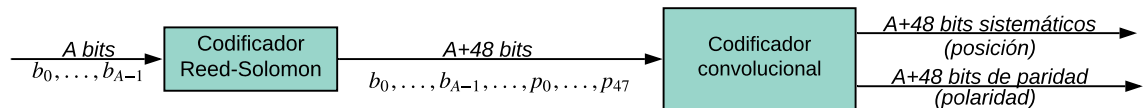


Figura 1.5. Esquema general del subsistema de codificación de canal.

1.2.4.1. Codificación Reed-Solomon El código Reed-Solomon es un código corrector de errores sistemático y basado en bloques, que procesa un bloque de símbolos RS¹² a los que se les agrega redundancia para producir un bloque de símbolos RS codificados. Puesto que la corrección se realiza a nivel de símbolos RS, no de bit, tiene buenas propiedades para corregir secuencias de errores hasta cierto límite, determinado por la cantidad de redundancia con que se diseñe el código [16].

El código Reed-Solomon es un subconjunto de los códigos cíclicos y códigos lineales BCH (*Bose Chaudhuri Hocquenqhem*), se especifica como $RS(n, k)$, significa que el codificador toma k símbolos RS de s bits del mensaje original y añade $n - k$ símbolos RS de paridad para generar una palabra de código de n símbolos RS. Un decodificador puede corregir hasta t símbolos RS que contienen errores en una palabra de código como se muestra en la Ecuación 1.12 [17], y la tasa de codificación r la define la Ecuación 1.13, siendo la relación entre el número total de símbolos RS

¹¹Código sistemático: proceso de codificación en el que los bits de datos de un bloque se transmiten sin alteración y van seguidos de un número específico de bits de paridad [16].

¹²Símbolo RS: agrupación de s bits en serie.

y los símbolos RS del mensaje original [16].

$$t = \frac{(n - k)}{2}. \tag{1.12}$$

$$r = \frac{n}{k}. \tag{1.13}$$

La Figura 1.6. [17] muestra una típica palabra de código Reed-Solomon que se conoce como un código sistemático, puesto que los datos no se alteran y los símbolos RS de paridad se anexan [17].

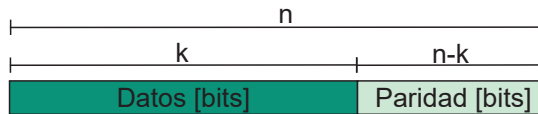


Figura 1.6. Palabra de código Reed-Solomon.

1.2.4.2. Codificación convolucional Un código convolucional se genera pasando una secuencia de información a transmitir por Registros de Corrimiento Lineal (LSR, *Linear Shift Register*). El codificador convolucional consisten en m elementos de memorias (registros) de k bits de información y n generadores de funciones algebraicas o bits codificados, que son sumadores de módulo 2 [18], como se muestra en la Figura 1.7. [18].

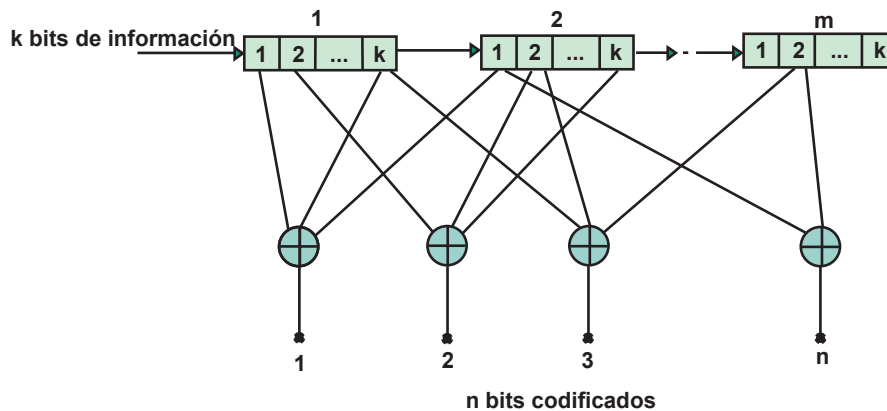


Figura 1.7. Codificacor convolucional.

El proceso de codificación introduce redundancia aprovechando las características de los LSR, solo basta con conocer su entrada y su estado para obtener automáticamente las salidas, con tal finalidad un conjunto de m registros almacena los valores de las m entradas anteriores, obteniendo así un total de 2^m estados posibles [19].



Una de las características principales de los códigos convolucionales es que el proceso de codificación tiene memoria, esto quiere decir que los bits en la salida del codificador no solo dependen de la información actual, si no también de los bits anteriores [20].

Existen una serie de parámetros de interés que definen y caracterizan un código convolucional, y son los siguientes [19]:

- Tasa de codificación (r): relación entre los bits de información de entrada (k) y los de salida (n). Se determina a partir de la Ecuación 1.14.

$$r = \frac{k}{n}. \quad (1.14)$$

- Memoria máxima (m): el número de registros del codificador define la memoria de dicho codificador.
- Longitud de restricción (K): indica el número máximo de bits de los cuales depende la salida, se determina con la Ecuación 1.15.

$$K = m + 1. \quad (1.15)$$

Según el estándar IEEE 802.15.4a, el codificador convolucional es sistemático y debe tener dos salidas, una por la que se obtienen los bits información (sistemáticos) y la otra para los bits de paridad. En la Figura 1.8. se aprecia la implementación de un codificador convolucional sistemático, donde los bits de información g_0 se obtienen de la salida del primer registro de desplazamiento, mientras que los bits de paridad g_1 se obtienen de la salida de la suma módulo dos de la entrada del primer registro de desplazamiento con la salida del segundo registro de desplazamiento.

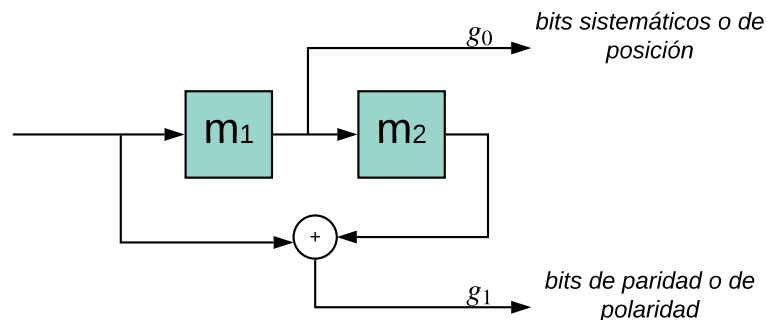


Figura 1.8. Codificador convolucional sistemático.

1.2.5. Ensanchamiento y Modulación BPM-BPSK

El estándar IEEE 802.15.4a especifica el uso de la combinación de BPM y BPSK para modular los símbolos UWB-DS, cada uno de ellos conformado por el ensanchamiento y la modulación de dos bits provenientes del codificador convolucional, un bit sistemático que se usa para determinar la posición de una ráfaga y el otro de paridad para modular la polaridad de la misma [4].

La señal UWB-DS modulada y ensanchada se expresa matemáticamente como se muestra en la Ecuación 1.16 [15].

$$x(t) = [1 - 2g_1] \sum_{n=1}^{N_{cpb}} [1 - 2s_{n+kN_{cpb}}] \times p(t - g_0 T_{BPM} - h^{(k)} T_{burst} - nT_c), \quad (1.16)$$

donde:

g_1 es un bit de paridad o de polaridad modulado con BPSK,

g_0 es un bit sistemático o de posición modulado con BPM,

$s_{n+kN_{cpb}}$ es una secuencia de ensanchamiento,

$h^{(k)}$ es la secuencia de salto de ráfaga, la cual determina la posición de la misma,

$p(t)$ es la forma del pulso transmitido,

T_{bpm} es el periodo de intervalo BPM, y

T_c es el periodo del chip o pulso.

Las secuencias $s_{n+kN_{cpb}}$ y $h^{(k)}$ se generan con ayuda de un Generador de Secuencias Binarias Pseudoaleatorias (PRBS, *PseudoRandom Binary Sequence*), el cual genera una secuencia binaria pseudoaleatoria haciendo uso de Registros de Corrimiento de Retroalimentación Lineal (LFSR, *Linear-Feedback Shift Register*), tal como se muestra en la Figura 1.9. [15], el cual utiliza Registros de Corrimiento Simple (SSRG, *Simple Shift Register Generator*) [21].

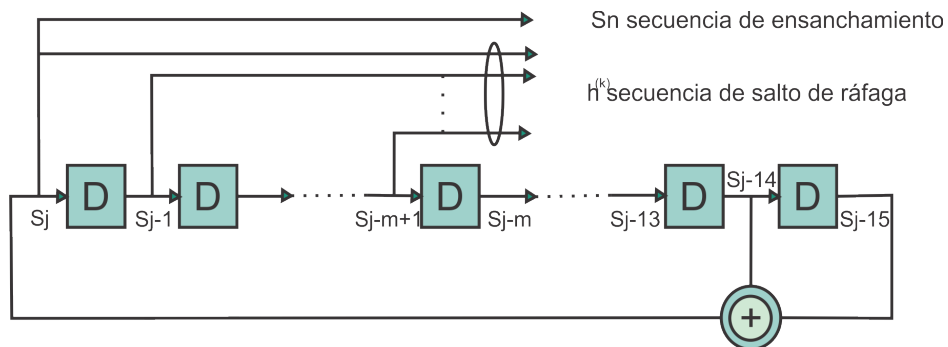


Figura 1.9. Generador de secuencias binarias pseudoaleatorias.

La secuencia $h^{(k)}$ se calcula con la Ecuación 1.17.

$$h^{(k)} = 2^0 s_{kN_{cpb}} + 2^1 s_{1+kN_{cpb}} + \dots + 2^{m-1} s_{m-1+kN_{cpb}}, \quad (1.17)$$

donde $m = \log_2(N_{hop})$. En la Tabla 1.7. se muestra que N_{hop} siempre es potencia de 2, y en consecuencia m es un número entero [15].

La Figura 1.10. [22] muestra un símbolo UWB-DS ensanchado, donde se visualiza la configuración de la estructura del símbolo UWB-DS según la combinación de los bits de posición y polaridad, es decir, cuando el primer bit es 0, la polaridad es positiva, mientras que cuando es 1, es negativa; para el segundo bit, cuando es 0 la ráfaga se posiciona en el primer intervalo del símbolo UWB-DS, mientras que cuando es 1, en el tercero [15].

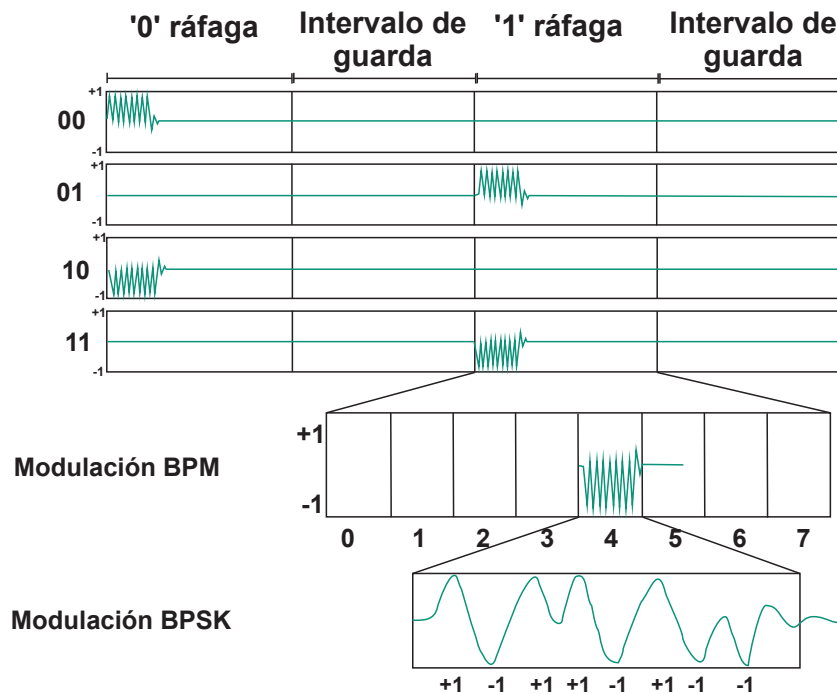


Figura 1.10. BPM-BPSK en un símbolo UWB-DS ensanchado.

La representación del modulador BPM-BPSK y ensanchador especificada por el estándar se muestra en la Figura 1.11. [15].

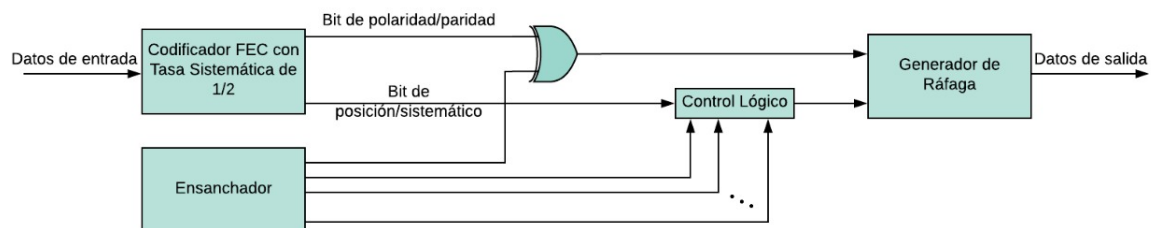


Figura 1.11. Codificador, ensanchador y modulador.

1.2.6. Conformador de Pulsos

Los bloques que generalmente constituyen un transmisor se muestran en la Figura 1.12. [24], donde una fuente de información genera una secuencia de 1s y 0s que posteriormente son modulados, obteniéndose a la salida una señal que entra a filtro Conformador de Pulsos (*PS, Pulse Shaper*), del cual se obtiene como respuesta pulsos con la forma de onda de la respuesta del filtro del PS [24].

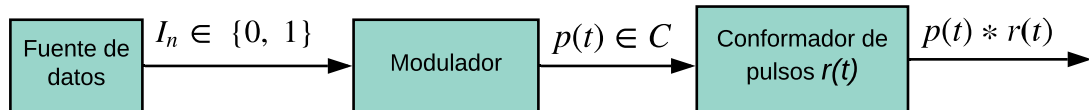


Figura 1.12. Diagrama general de bloques de un transmisor con PS.

Para un sistema de comunicaciones dos de las razones importantes por las que se requiere un PS son:

- Generar señales limitadas en banda: las señales conformadas por pulsos de corta duración y su modulación producen transiciones bruscas en amplitud y fase, lo que implica un gran ancho de banda de la señal, por este motivo es importante el uso de los PS, los cuales limitan el ancho de banda de la señal concentrando su energía en una banda de frecuencias específica, buscando que el ancho de banda de la señal sea menor al ancho de banda del canal [23].
- Reducir la ISI: las características del escenario físico ocasionan que los pulsos transmitidos se ensanchen haciendo que estos interfieran con los siguientes o anteriores pulsos transmitidos, fenómeno conocido como ISI. De este modo para dar solución a lo anterior se usa un PS, así, al aplicarlo a cada pulso, se busca cumplir con el criterio de ISI de Nyquist [23].

El PS más utilizado en la práctica es el Raíz de Coseno Alzado (RRC, *Root Raised Cosine*) el cual limita las señales en banda para satisfacer el criterio de ISI de Nyquist, el cual determina que con el fin de minimizar la ISI, la respuesta al impulso del filtro RRC (ver Figura 1.13.) debe hacer que la contribución en amplitud del símbolo modulado en los valores múltiplos del periodo T del mismo, sea muy pequeña o cercana a 0. El filtro RRC tiene un ancho de banda igual al expresado en la Ecuación 1.18.

$$B = \frac{1}{2T}(1 + \beta), \quad (1.18)$$

donde: B es el ancho de banda de la señal transmitida, T es el periodo del símbolo modulado y β es el ancho de banda en exceso (*roll-off*).

El estándar IEEE 802.15.4a determina que el pulso transmitido $p(t)$ es limitado por la forma de la correlación con un pulso de referencia estándar $r(t)$, el cual es un



pulso RRC con ancho de banda en exceso (*roll-off*) igual a 0,6 [15], que se obtiene a través del filtro RRC [25]. Matemáticamente $r(t)$ en el dominio del tiempo se expresa como en la Ecuación 1.19.

$$r(t) = \frac{4\beta}{\pi\sqrt{T_p}} \frac{\cos \left[(1 + \beta) \frac{\pi t}{T_p} + \frac{\sin \left[(1 - \beta) \frac{\pi t}{T_p} \right]}{4\beta \left(\frac{t}{T_p} \right)} \right]}{1 - \left(\frac{4\beta t}{T_p} \right)^2}, \quad (1.19)$$

donde: $r(t)$ es el pulso RRC, β es el factor *roll-off*, t es la variable temporal y T_p es el periodo del pulso RRC. La Tabla 1.8. [15] muestra el T_p requerido por cada canal [15].

Tabla 1.8. Periodo del pulso RRC requerido por cada canal.

Número de canal	Periodo del pulso RRC T_p (ns)
{0:3; 5:6; 8:10; 12:14}	2
7	0,92
{4;11}	0,75
15	0,74

La representación de la respuesta del filtro RRC en tiempo y frecuencia variando el factor β , se representan en las Figuras 1.13. y 1.14. [26], respectivamente.

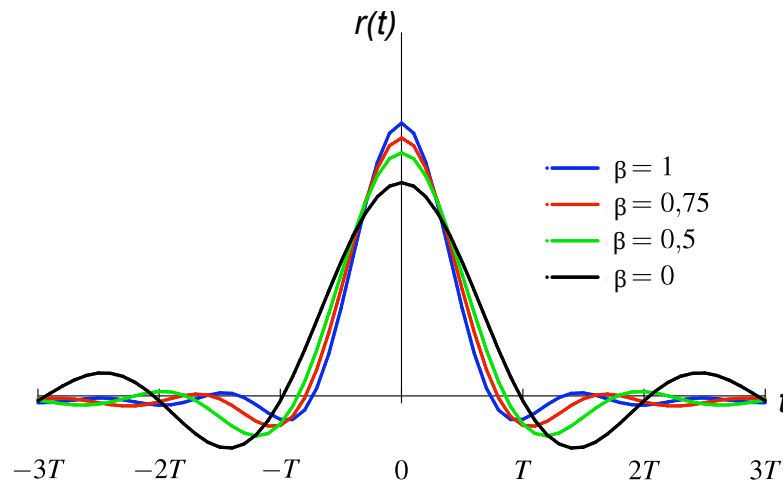


Figura 1.13. Respuesta al impulso del filtro RRC en el dominio del tiempo.

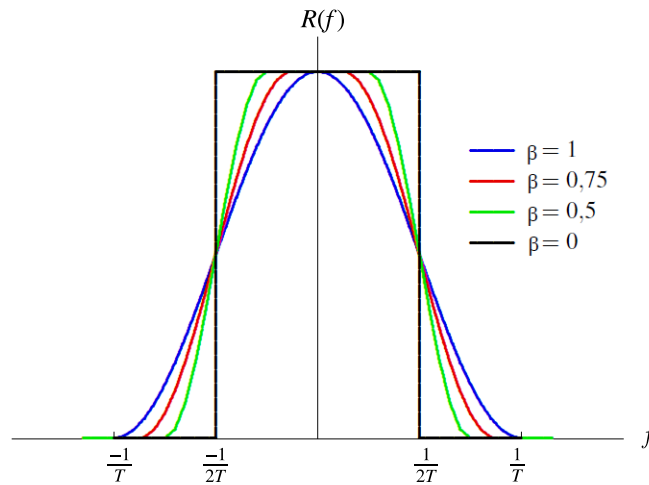


Figura 1.14. Respuesta al impulso del filtro RRC en el dominio de la frecuencia.

1.2.7. Máscara Espectral

El estándar IEEE 802.15.4a define las Ecuaciones 1.20 y 1.21 que muestran los rangos de frecuencias donde las componentes espectrales deben caer en 10 dB y 18 dB, respectivamente, con respecto a las componentes con máxima amplitud [15].

$$\frac{0,65}{T_p} < |f - f_c| < \frac{0,8}{T_p}, \quad (1.20)$$

$$|f - f_c| > \frac{0,8}{T_p}, \quad (1.21)$$

donde: f es el rango de frecuencia donde las componentes espectrales deben caer y f_c es la frecuencia central del canal de operación establecida por el estándar.

A partir de las Ecuaciones 1.20 y 1.21 se construye la máscara espectral para el canal 3, la cual se muestra en la Figura 1.15. En los procedimientos que da como resultado las desigualdades en 1.22 y en 1.23, se realizan los cálculos de los rangos de frecuencias en que las componentes espectrales caen en 10 dB y 18 dB, respectivamente, con respecto a la potencia máxima de las componentes de la señal. Los valores para f_c y T_p son proporcionados por las Tablas 1.6. y 1.8., respectivamente.

- Rangos de frecuencias en que las componentes espectrales caen en 10 dB:

$$b < |a| < c$$

$$\frac{0,625}{2 \text{ ns}} < |f - 4,5 \text{ GHz}| < \frac{0,8}{2 \text{ ns}}$$

$$0,3125 \text{ GHz} < |f - 4,5 \text{ GHz}| < 0,4 \text{ GHz}$$



En el caso $b < |a|$, la solución es $b < a \cup -b > a$. Por lo tanto,

$$0,3125 \text{ GHz} < |f - 4,5 \text{ GHz}|$$

$$0,3125 \text{ GHz} < f - 4,5 \text{ GHz} \cup -0,3125 \text{ GHz} > f - 4,5 \text{ GHz}$$

$$4,81 \text{ GHz} < f \cup 4,18 \text{ GHz} > f$$

En el caso $|a| < c$, la solución es $-c < a < c$. Por lo tanto,

$$|f - 4,5 \text{ GHz}| < 0,4 \text{ GHz}$$

$$-0,4 \text{ GHz} < f - 4,5 \text{ GHz} < 0,4 \text{ GHz}$$

$$4,1 \text{ GHz} < f < 4,9 \text{ GHz}$$

$$4,1 \text{ GHz} < f < 4,18 \text{ GHz} \text{ y } 4,81 \text{ GHz} < f < 4,9 \text{ GHz} \quad (1.22)$$

- Rangos de frecuencias en que las componentes espectrales caen en 18 dB:

En el caso $|a| > b$, la solución es $a < -b \cup a > b$. Por lo tanto,

$$|f - 4,5 \text{ GHz}| > \frac{0,8}{2 \text{ ns}}$$

$$f - 4,5 \text{ GHz} < -0,4 \text{ GHz} \cup f - 4,5 \text{ GHz} > 0,4 \text{ GHz}$$

$$f < 4,1 \text{ GHz} \cup f > 4,9 \text{ GHz} \quad (1.23)$$

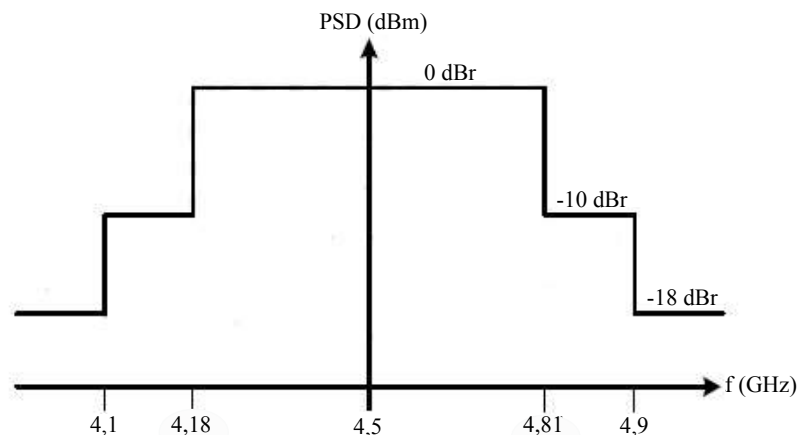


Figura 1.15. Máscara espectral para el canal 3.



1.2.8. Técnicas de Recepción en UWB-DS

Como se planteó anteriormente, el estándar establece como técnica de modulación BPSK sobre BPM, con el objetivo de que tanto receptores coherentes y no coherentes puedan ser implementados para UWB-DS. Los 2 casos para los que se usan los receptores mencionados anteriormente son los siguientes: el primero, es cuando los bits de posición son de información y los bits de polaridad de paridad, y la recuperación de la información se realiza demodulando los bits de posición a partir de la detección de la ubicación de la ráfaga, es decir, se hace uso de la recepción no coherente; y el segundo, es cuando tanto bits de posición como de polaridad son bits de información, de esta manera, la recuperación de la información se realiza demodulando los bits de polaridad (demodulación BPSK) y posición por detección de la ubicación de la ráfaga (demodulación BPM), es decir, se hace uso de la recepción coherente y no coherente, respectivamente [27].

La diferencia entre estas dos técnicas de recepción radica en que los receptores coherentes deben conocer información de la señal que van a recuperar, como la frecuencia de la portadora o la modulación utilizada en la etapa de transmisión [28], mientras que, los receptores no coherentes usan la ED, en la cual se estima la potencia de la señal recibida dentro del ancho de banda del canal [15].

1.2.8.1. Recepción coherente En la recepción coherente se debe tener un conocimiento a priori de la señal que se desea detectar, así, el receptor puede identificarla mediante la correlación entre la señal recibida y la información que se dispone de esta. En comunicaciones inalámbricas se utiliza el receptor tipo Rake, el cual está conformado por un conjunto de subreceptores que reciben diferentes replicas de la señal generadas por el multitrayecto, cada una de esas replicas es procesada individualmente, pero se combinan al final para recuperar la señal transmitida, este proceso se conoce como diversidad de canal. Así, un receptor tipo Rake brinda un mejor desempeño del sistema, a cambio de un mayor consumo de energía y mayor complejidad del receptor [29].

Aunque este tipo de recepción es robusto frente a altos niveles de ruido, la necesidad de conocer anticipadamente la señal y los efectos producidos por el canal, la hace poco aplicable para muchos escenarios [30].

1.2.8.2. Recepción no coherente Este tipo de receptores se caracterizan por: arquitectura sencilla, bajo costo, consumo de energía razonable y baja complejidad. La mayoría de las estructuras de este tipo de receptores esta basada en los sistemas de ED y en los sistemas de autocorrelación [29].

Los métodos basados en ED detectan la potencia recibida en un rango de frecuencias de interés y la compara con un umbral previo ya establecido, para determinar si se ha detectado o no una señal. Estos tipos de receptores son más utilizados puesto que no requieren información a priori de la señal que se desea detectar [30]. Un esquema común de un receptor no coherente con ED se observa en la Figura 1.16. [31].

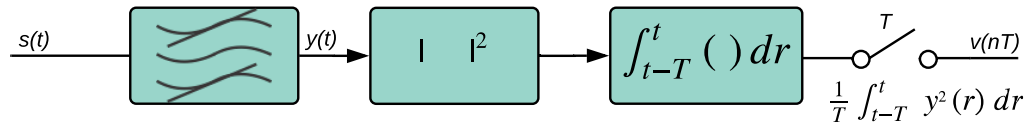


Figura 1.16. Esquema de receptor no coherente con ED.

La Figura 1.16. bosqueja un diagrama de bloques de la ED, que consiste en un filtro pasa banda, un dispositivo de ley cuadrada, un integrador y un dispositivo de muestreo, de esta manera, la salida en el detector de energía son las muestras de energía reunida en la banda de interés durante el periodo de integración o muestreo T [31].



2. ADAPTACIÓN Y APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE MODELADO Y SIMULACIÓN

A continuación, se presentan las metodologías estudiadas para el desarrollo de la simulación del nivel físico de un sistema de comunicación punto a punto basado en UWB-DS, las cuales son:

- Metodología en cascada: es un modelo lineal de diseño de software que utiliza un proceso de diseño secuencial, en donde no se inicia una fase o etapa hasta que no se culmine la anterior, esto implica, que encontrar un error en una de sus etapas, conlleva a una corrección regresiva del sistema, por lo que es esencial conocer todos los requisitos del sistema a desarrollar para evitar estas regresiones y ahorrar tiempo y esfuerzo [32].
- Metodología incremental: es una evolución de la metodología en cascada, en donde al finalizar cada una de las etapas que la componen, se obtiene una versión incompleta del producto final. Esta metodología al igual que la anterior tiene como desventaja que los requerimientos deben definirse al comienzo del proyecto [32].
- Metodología de prototipos: se basa en la creación de una versión inicial de un sistema, llamado prototipo, y la implementación de varios prototipos conlleva a la obtención del prototipo final, el cual debe ser construido en poco tiempo, mediante el uso de programas adecuados y con la menor cantidad de dinero posible, puesto que cuando este sea aprobado, se inicia el verdadero desarrollo del software [32].
- Metodología de simulación de equipos de telecomunicaciones: basada en programación orientada a objetos, define los lineamientos necesarios para el modelado de sistemas de telecomunicaciones mediante una serie de pasos que permiten identificar, estructurar e implementar una simulación de un sistema de comunicación. A pesar de que es un poco extensa, y de que su implementación conlleva un periodo de tiempo largo, sus procedimientos se pueden simplificar para el desarrollo del sistema final [32].
- Metodología iterativa: esta metodología es progresiva y acompaña todo el proceso de simulación. La metodología entra en un modo cíclico si los datos validados no son correctos, es decir, permite retroalimentación de acuerdo a los resultados de cada una de las fases, y realizar cambios en todas las etapas del sistema. Sin embargo, es una metodología que define una serie de pasos extensos y complejos, los cuales incrementan la cantidad de actividades a desarrollar [32].



- Metodología adoptada del Proceso Unificado Racional (RUP, *Rational Unified Process*): esta metodología tiene como ventaja la retroalimentación desde cualquiera de las etapas de desarrollo del proceso con las etapas de planeación, lo que permite que una vez terminado el producto se regrese a la etapa inicial y se verifique si necesita alguna adición o se encuentra terminado. Además, el proceso de análisis y diseño es simple puesto que básicamente se definen los elementos principales a tener en cuenta en el sistema, y los aspectos específicos se dejan para la etapa posterior de implementación, la cual es adaptable a cualquier lenguaje de simulación, permitiendo definir las pruebas que se realizarán a la simulación y los resultados esperados de la misma. Esta metodología no tiene un proceso de documentación completo o extenso [32].
- Metodología basada en Ülgen: puede emplearse para sistemas de telecomunicaciones en los diferentes niveles del modelo de referencia para Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, *Open System Interconnection*): físico, enlace de datos o red. Esta metodología es bastante completa y define una serie organizada de pasos para realizar la simulación de un sistema de telecomunicaciones. Sin embargo, en la etapa de Formulación de Entradas, Suposiciones, y Definición de Procesos, es un poco compleja, dado que no siempre se conoce exactamente cuáles serán las suposiciones a considerar para el sistema bajo análisis, implicando una gran demanda de tiempo y documentación en el proceso. De igual manera, la etapa de validación conlleva una gran dedicación de trabajo, dado que involucra diferentes conceptos, de acuerdo al sistema bajo análisis [32].
- Metodología basada en Ülgen y Wojcik: esta metodología es adaptada de las metodologías de dos autores para simulación de eventos discretos, y está basada específicamente en la definición del sistema a simular, sin embargo, no cuenta con etapas de análisis y diseño, por lo tanto, dichas etapas deben ser desarrolladas por fuera de la metodología y complementadas con una metodología de pruebas en un sistema de telecomunicaciones [32].

Realizando una comparación de las metodologías descritas anteriormente, se concluye que la mayoría son adaptaciones de procesos de ingeniería de software, por lo que no resultan adecuados para la representación de sistemas de telecomunicaciones. Por lo que las metodologías que se consideran para modelar un sistema de telecomunicaciones son: RUP, Ülgen, Ülgen y Wojcik y la metodología de simulación de equipos de telecomunicaciones, siendo esta última la elegida para el desarrollo de la simulación de este trabajo de grado, debido a que mediante la simplificación de sus procedimientos permite:

- Modelar un sistema de telecomunicaciones paso a paso.
- Realizar un desarrollo simple del sistema.

- Identificar los objetivos de simulación, lo que conlleva a la definición de un plan de pruebas.
- La documentación adecuada de los procedimientos.
- La identificación de los bloques necesarios para la obtención del modelo de simulación de un sistema de telecomunicaciones.

En el presente capítulo se realiza la adaptación de la metodología de simulación de equipos de telecomunicaciones. La metodología planteada se adapta en tres fases para el desarrollo de simulaciones, las cuales se muestran en la Figura 2.1.

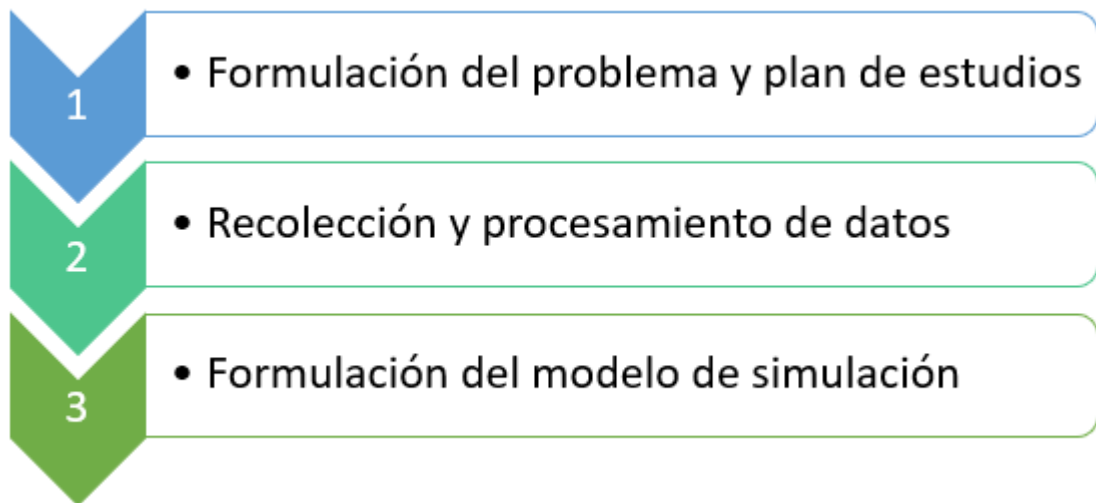


Figura 2.1. Fases de la metodología de simulación de equipos de telecomunicaciones.

Cada una de las fases se desarrolla de la siguiente manera:

- **Formulación del problema y plan de estudios:** fase en la que se define el objetivo de simulación que permite identificar los elementos necesarios para obtener los resultados deseados [32].
- **Recolección y procesamiento de información:** en esta fase se realiza la recolección de la información relacionada al objeto de estudio, así se identifican los bloques y parámetros principales para la elaboración de un modelo de simulación [32].
- **Formulación del modelo de simulación:** fase que contiene la combinación de los objetos y estructuras descritas en la fase anterior [32].



2.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y PLAN DE ESTUDIOS

Para la formulación del problema y plan de estudios, se define el objetivo de la simulación, de tal forma que se identifiquen los elementos necesarios para lograr los resultados deseados.

Se siguen los siguientes pasos para la formulación del problema:

1. Adquirir información del funcionamiento de la tecnología.
2. Identificar los fines de simulación.
3. Formular los objetivos específicos de la simulación.

2.1.1. Adquisición de Información Sobre el Funcionamiento de la Tecnología

Es necesario estudiar y comprender el funcionamiento de la tecnología para aplicar y adaptar la metodología para la simulación a nivel físico de un sistema de comunicación punto a punto basado en UWB-DS, la cual involucra transmisor, canal y receptor, con los correspondientes bloques que los componen.

El sistema de simulación consta de cuatro subsistemas, los cuales son: subsistema transmisor UWB-DS, subsistema de canal con Ruido Gaussiano Blanco Aditivo (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*), subsistema receptor UWB-DS y subsistema de visualización.

2.1.1.1. Transmisor UWB-DS El transmisor produce una señal binaria aleatoria que representa los datos de usuario, la cual es procesada por una serie de bloques con el fin de generar un conjunto de símbolos UWB-DS que conforman una trama para su transmisión a través de un canal contaminado con AWGN.

Es importante resaltar que para la simulación, la trama está compuesta solamente por la PSDU o campo de datos. El SHR y PHR se omiten porque se considera un sincronismo perfecto entre transmisor y receptor, además, el objetivo del trabajo de grado es analizar el desempeño de un sistema de comunicación punto a punto basado en UWB-DS, y no su sincronización.

Los procedimientos que realiza el transmisor UWB-DS para generar la señal que se envía a través del canal son:

- Generación de datos.
- Codificación de canal.
- Ensanchamiento y modulación.



- Conformación de pulsos en transmisión.

2.1.1.2. Canal AWGN El canal recibe una señal UWB-DS modulada en banda base con BPM-BPSK. A la señal de entrada se le adiciona AWGN, para obtener a la salida del canal una señal contaminada y degradada por el ruido.

En este subsistema se realizan cambios del valor de la SNR para analizar en el subsistema de visualización el efecto del ruido sobre la señal UWB-DS.

2.1.1.3. Receptor UWB-DS Este subsistema recibe una señal UWB-DS modulada con BPM-BPSK y degradada por el AWGN, la cual es procesada por una serie de bloques encargados de lograr la recuperación de los datos originales de usuario con la menor cantidad de errores posibles.

Los pasos que realiza el receptor UWB-DS para recuperar la señal recibida son:

- Conformación de pulsos en recepción.
- ED.
- Decodificación.

2.1.2. Identificación de los Fines de Simulación

El propósito del trabajo de grado es evaluar y analizar el desempeño a nivel físico de un sistema de comunicación punto a punto basado en UWB-DS. La simulación involucra, el transmisor UWB-DS, que está compuesto por: generador de datos, codificador, ensanchador y modulador, y PS; canal AWGN; y receptor UWB-DS, compuesto por: PS, detector de energía y decodificador; según lo descrito en el estándar IEEE 802.15.4a.

Se hacen variaciones en la codificación, modulación y se omite el uso del PS, para realizar un análisis comparativo entre los diagramas de ojo, constelación, trayectoria, espectro de frecuencia y curvas de desempeño.

2.1.3. Formulación de los Objetivos de la Simulación

Los siguientes son los objetivos de la simulación:

- Evaluar el desempeño a nivel físico de un sistema de comunicación punto a punto basado en UWB-DS, según el estándar IEEE 802.15.4a.
- Evaluar el desempeño a nivel físico de un sistema de comunicación punto a punto basado en UWB-DS, con y sin PS.



- Evaluar el desempeño a nivel físico de un sistema de comunicación punto a punto basado en UWB-DS, realizando cambios en el esquema de codificación.
- Evaluar el desempeño a nivel físico de un sistema de comunicación punto a punto basado en UWB-DS, realizando cambios en el esquema de modulación.

La evaluación de desempeño en cada configuración se realiza a través de las curvas de desempeño (BER contra SNR).

2.2. RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

La identificación de los bloques y parámetros necesarios para la elaboración del modelo de simulación a nivel físico, se realiza a través de la identificación de objetos, atributos y métodos, para cada subsistema que conforman el sistema de comunicación punto a punto basado en UWB-DS, tal como se muestra a continuación:

2.2.1. Transmisor UWB-DS

Los objetos del transmisor son: generador de datos, codificador de canal, ensanchador y modulador, y PS en transmisión. Estos objetos permiten la conformación del modelo de simulación del transmisor para su evaluación en el entorno Simulink de MATLAB.

El diagrama de clases del transmisor UWB-DS con sus respectivos objetos, atributos y métodos se observan en la Figura 2.2.

2.2.2. Canal AWGN

El único objeto identificado para este subsistema es el canal AWGN, cuyo diagrama de clases con sus respectivos atributos y métodos se observan en la figura 2.3.

2.2.3. Receptor UWB-DS

Los objetos del receptor son: PS en recepción, detector de energía y decodificador. Estos objetos permiten la conformación del modelo de simulación del receptor para su evaluación en el entorno Simulink de MATLAB.

El diagrama de clases del receptor UWB-DS con sus respectivos objetos, atributos y métodos se observan en la Figura 2.4.



Análisis del Desempeño a Nivel Físico de un Sistema de Comunicación Punto a Punto Basado en UWB-DS

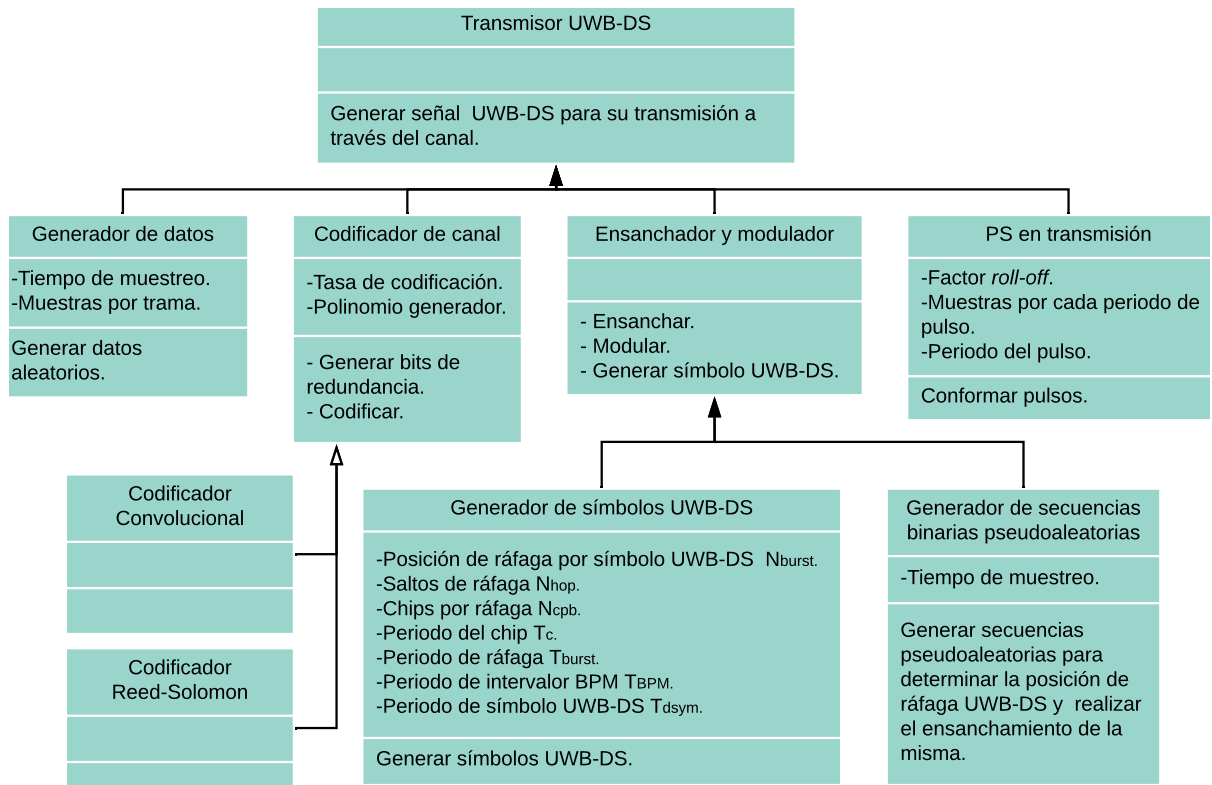


Figura 2.2. Diagrama de clases del transmisor UWB-DS.

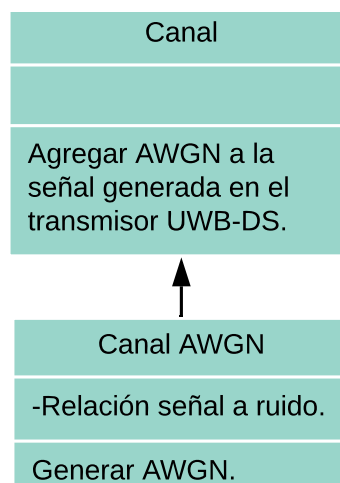


Figura 2.3. Diagrama de clases del canal AWGN.

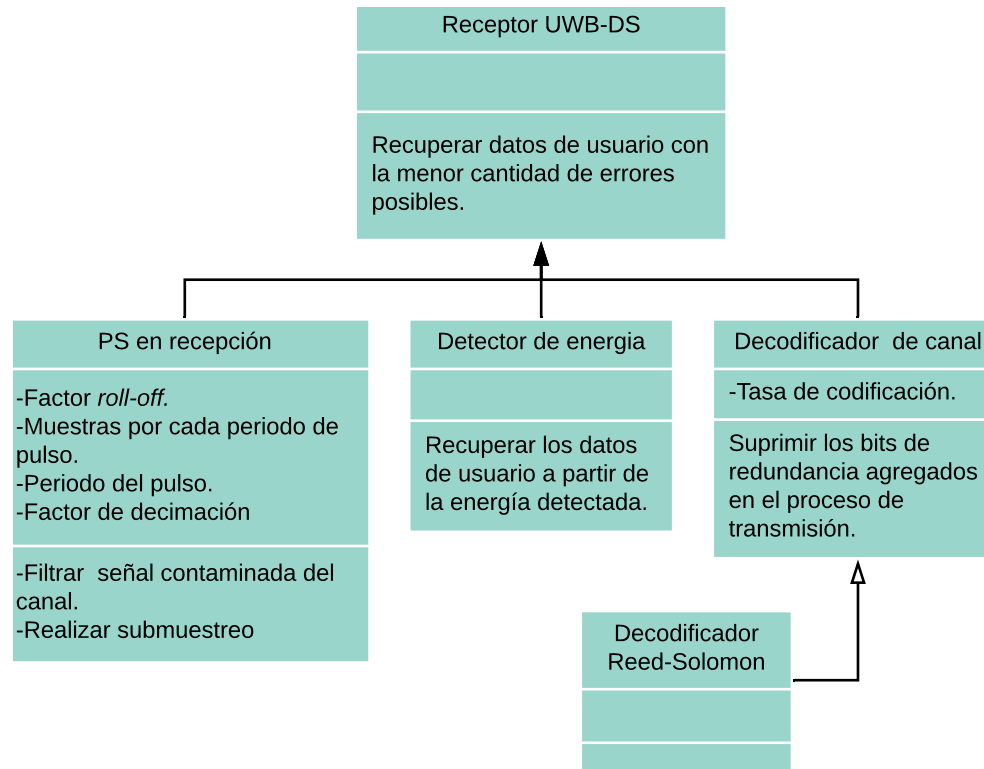


Figura 2.4. Diagrama de clases del receptor UWB-DS.

2.3. FORMULACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

Los parámetros generales de configuración del sistema de comunicación punto a punto basado en UWB-DS se muestran en la Tabla 2.1., y se definen con base a la Tabla 1.7. Cabe resaltar que para mayor eficiencia de la simulación los parámetros son aproximados y redimensionados: los periodos de tiempos de nanosegundos a milisegundos, y las unidades de frecuencias de megahertz a hertz. La Figura 2.5. muestra los subsistemas anteriormente mencionados, los cuales se implementan siguiendo la recomendación del estándar IEEE 802.15.4a, cada uno está compuesto por un conjunto de bloques que permiten la construcción del modelo de simulación, los cuales se detallan a continuación.

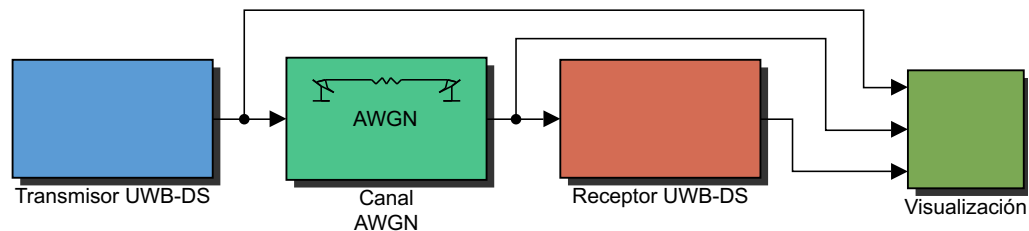


Figura 2.5. Sistema general UWB-DS.

Tabla 2.1. Parámetros para la implementación del sistema.

Parámetros de configuración del sistema	
PRF pico (Hz)	500
Ancho de banda (Hz)	500
Tasa de codificación Viterbi	0,5
Tasa de codificación RS	0,87
Posiciones de ráfaga por símbolo UWB-DS N_{burst}	32
Saltos de ráfaga N_{hop}	8
Chips por ráfaga N_{cpb}	16
Chips por símbolo UWB-DS	512
Periodo del chip (ms)	2
Periodo de ráfaga T_{burst} (ms)	32
Periodo de intervalos BPM T_{BPM} (ms)	512
Periodo de símbolo UWB-DS T_{dsym} (ms)	1024
PRF media (Hz)	15,69

2.3.1. Transmisor UWB-DS

Internamente este subsistema contiene los siguientes elementos: un generador de datos, codificador de canal, ensanchador y modulador, y un PS en transmisión. El subsistema de transmisión UWB-DS resultante se muestra en la Figura 2.6.

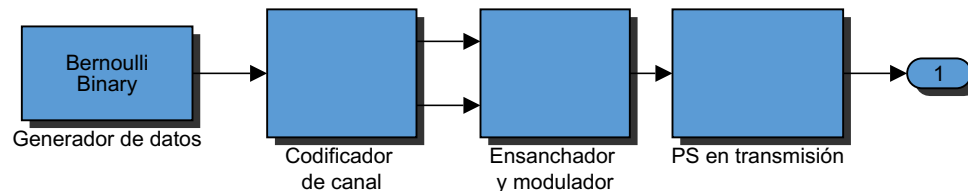


Figura 2.6. Subsistema del Transmisor UWB-DS.

2.3.1.1. Generador de datos La señal de información es generada por el bloque *Bernoulli Binary Generator*, el cual genera 0s con probabilidad p y 1s con probabilidad $1-p$, donde p es un $\mathbb{R} \in \{0, \dots, 1\}$. El bloque que implementa este generador se muestra en la Figura 2.6.

En el bloque se configuran los siguientes parámetros:

- *Probability of a zero p* : es la probabilidad de ocurrencia de un 0 en la salida. Para la simulación se utiliza un valor de 0,5 para que tanto 0 como 1 tengan la misma probabilidad.

- *Source of initial seed*: valor de semilla de inicialización del generador aleatorio. Por defecto se especifica en modo Auto, para que el bloque genere los mismos números aleatorios cada vez que se inicie la simulación.
- *Sample Time*: es el tiempo entre generación de escalares de la secuencia aleatoria de salida. Para la simulación se utiliza 1,1729454545 s.
- *Sample per frame*: es el número de escalares en cada vector de salida. Para la simulación se utiliza 330, porque el codificador Reed-Solomon al estar basado en bloques admite vectores compuestos por múltiplos de 330 bits. Por lo tanto, cada bit tiene un periodo igual a 1,1729454545 s y todo el vector un periodo igual a 387,072 s.
- *Out data type*: es el tipo de salida de datos, el cual se puede especificar como: *boolean*, *unit8*, *unit16*, *unit32*, *single* o *double*. Para la simulación se utiliza por defecto *double*.

2.3.1.2. Codificador de canal En la simulación se usa los elementos: codificador Reed-Solomon, *unbuffer* y codificador convolucional, como se muestra en la Figura 2.7.

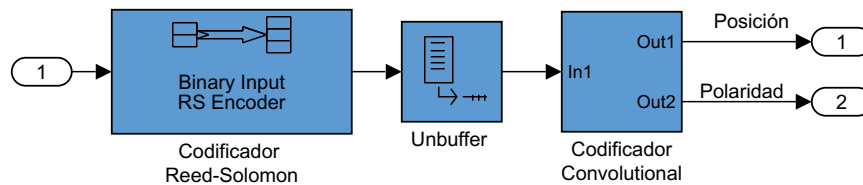


Figura 2.7. Codificador de canal.

a) **Codificador Reed-Solomon**: la codificación Reed-Solomon se realiza haciendo uso del bloque *Binary Input RS Encoder*. Para la simulación se utiliza un codificador tipo $(K + 8, K)$, el cual añade 48 bits de paridad a cada vector de entrada de 330 bits, por lo tanto, se obtiene un vector de 378 bits con el periodo inicial de 387,072 s. La información de usuario es codificada por el código sistemático $RS_6(63, 55)$. El bloque que se usa se muestra en la Figura 2.7.

En el bloque se configuran los siguientes parámetros:

- *Codeword length N*: es la dimensión de la palabra del código en símbolos RS, donde $N \in \mathbb{Z}$. Para la simulación N igual a 63.
- *Message length K*: es la dimensión de la palabra del mensaje en símbolos RS, se especifica como un $\mathbb{Z} \in \{1, \dots, N - 2\}$. Para la simulación K igual a 55.

- *Output data type*: este se puede especificar como *same as input*, *boolean* o *double*. Para la simulación se utiliza *same as input* para que el tipo de dato de la salida sea igual que el de la entrada.
- b) Bloque *Unbuffer***: la señal proveniente del codificador Reed-Solomon que es un vector conformado por bits con periodo igual a 387,072 s, se convierte en bits de periodo igual a 1024 ms cada uno. El bloque que se usa se muestra en la Figura 2.7.
- c) Codificador convolucional**: con el propósito de diferenciar los dos bits de salida por cada bit de entrada que se conocen como bits de posición y polaridad en la generación de la ráfaga, el codificador convolucional se construye con base en el estándar IEEE 802.15.4a. Un codificador de tasa de código r igual a $1/2$, con polinomios generadores $g_0 = [0\ 1\ 0]_2$ y $g_1 = [1\ 0\ 1]_2$, genera a la salida el doble de bits de los que entraron.

De la anterior secuencia de bits, la mitad de bits son sistemáticos, usados para determinar la posición de la ráfaga, y la otra mitad son de paridad, que establecen la polaridad de los pulsos de la ráfaga; el periodo de los bits continúa siendo el mismo en cada una de las dos salidas (1024 ms). Su estructura se muestra en la Figura 2.8., compuesta por dos bloques de retardo *Unit delay* que representan registros de corrimiento y un bloque XOR que realiza suma módulo 2.

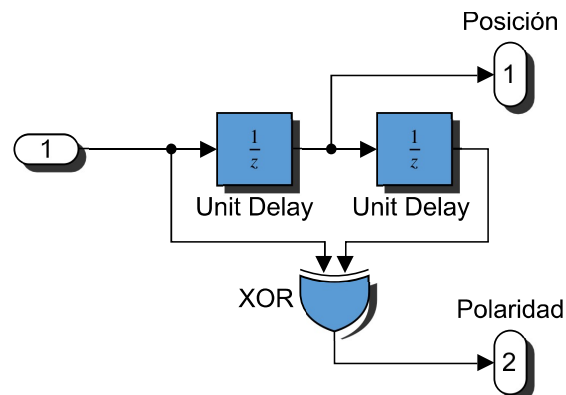


Figura 2.8. Codificador convolucional.

La función del bloque *Unit delay* es la de retrasar la entrada según el periodo especificado. En los bloques se configuran los siguientes parámetros:

- *Initial conditions*: representa la salida para el primer periodo de muestreo, el cual es 0 por defecto.



- *Input processing*: especifica si el bloque realiza el procedimiento sobre vectores o escalares. Para la simulación se especifica *Inherited* para heredar el modo de trabajo acorde al formato de la señal de entrada.
- *Sample time*: es el periodo de tiempo entre los escalares. Para la simulación se configura en -1 para continuar con el mismo valor de tiempo de muestreo de la señal de entrada.

El bloque XOR se encarga de realizar una operación XOR a nivel de bits de las señales de entrada. En sus parámetros solo se permite la configuración del número de puertos de entrada, para este caso es 2.

2.3.1.3. Ensanchador y modulador Este módulo es la parte más importante del sistema porque es donde se conforma el símbolo UWB-DS compuesto por una ráfaga de pulsos ensanchados y modulados. Dicho símbolo UWB-DS es generado por los dos bits de posición y polaridad provenientes de las salidas del codificador convolucional.

Para generar un símbolo UWB-DS se considera una fracción de tiempo de 1024 ms, el cual se divide en 4 intervalos de tiempo numerados 1, 2, 3 y 4, respectivamente, cada uno con periodo igual a 256 ms. Los intervalos 2 y 4 son intervalos de guarda, y los intervalos 1 y 3 están divididos en 8 fracciones (N_{hop}) de 32 ms cada una, donde solo en una de ellas se ubica la ráfaga, la cual está conformada por 16 pulsos con periodo T_c igual a 2 ms cada uno.

Para el proceso anterior se requiere un generador de secuencias pseudoaleatorias, un bloque de función Matlab “BPM_BPSK_mod” y un bloque real-imaginario a complejo. Su estructura se observa en la Figura 2.9.

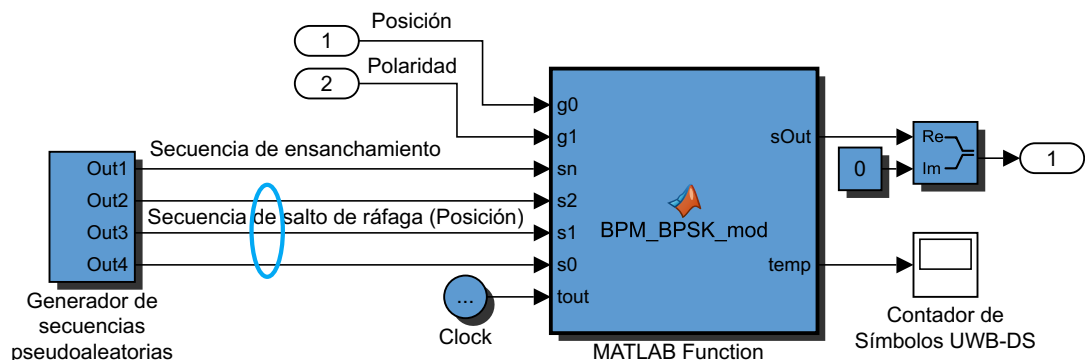


Figura 2.9. Ensanchador y modulador.

a) **Generador de secuencias pseudoaleatorias**: está compuesto por dos generadores de secuencias pseudoaleatorias: uno para generar secuencias de

salto de ráfaga $h^{(k)}$, y el otro para generar secuencias de ensanchamiento $s_{n+kN_{cpb}}$. Los dos son diseñados con una compuerta XOR que realiza suma módulo 2 y bloques *unit delay* que representan registros de corrimiento de un PRBS común. Los generadores trabajan con el polinomio generador $g(z) = 1 + Z^{14} + Z^{15}$, su grado representa el número de registros que se usan para su diseño.

El generador de secuencias de salto de ráfaga consta de 3 salidas que al combinarlas permite obtener una secuencia $h^{(k)}$, que define la posible posición que puede tomar la ráfaga en un símbolo UWB-DS. La estructura del generador de secuencias de salto de ráfaga se muestra en la Figura 2.10.

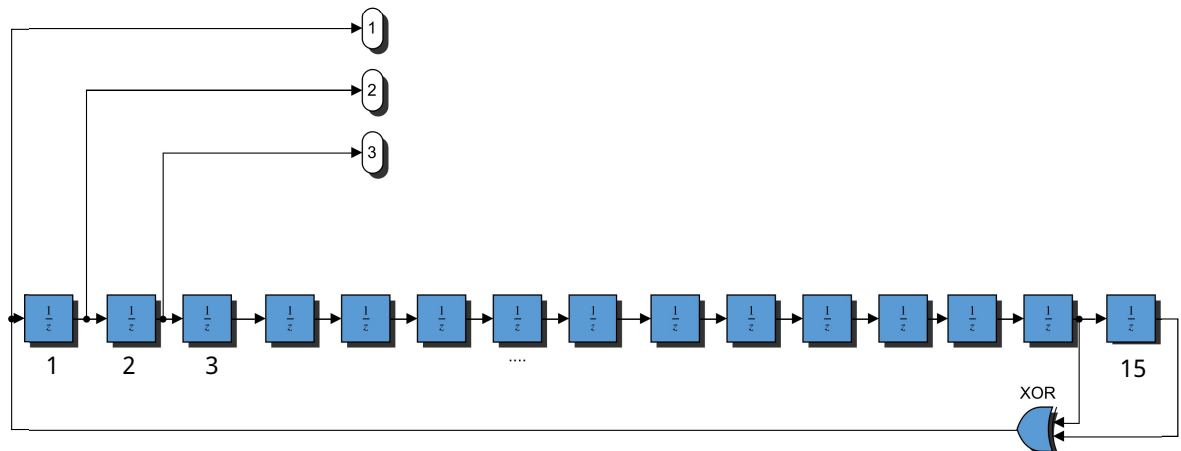


Figura 2.10. Generador de secuencias de salto de ráfaga.

En los 15 bloques *Unit Delay* se configuran los siguientes parámetros:

- *Initial conditions*: el estándar IEEE 802.15.4a determina las condiciones iniciales [1 0 1 1 0 1 1 0 1 0 0 0 1 1 1], respectivamente, para cada registro.
- *Input processing*: *Inherited*.
- *Sample time*: para la simulación se configura en 1024 ms, para generar una secuencia por símbolo UWB-DS.

El generador de secuencias de ensanchamiento $s_{n+kN_{cpb}}$ consta de una sola salida, su estructura se muestra en la Figura 2.11.

En los 15 bloques *Unit Delay* se configuran los siguientes parámetros:

- *Initial conditions*: el estándar IEEE 802.15.4a determina las condiciones iniciales [1 0 1 1 0 1 1 0 1 0 0 0 1 1 1], respectivamente, para cada registro.
- *Input processing*: *Inherited*.

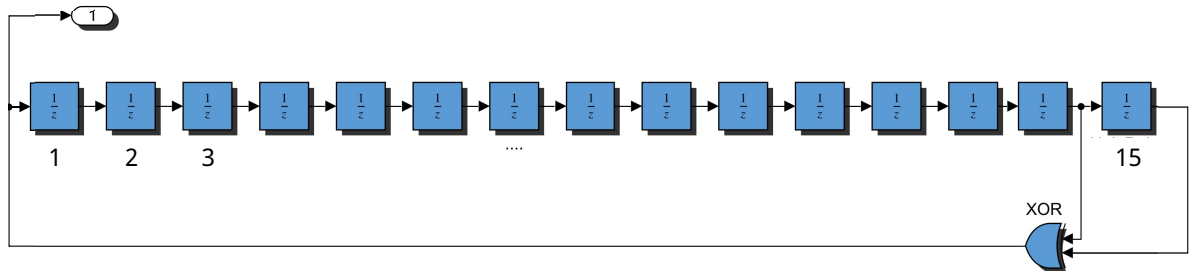


Figura 2.11. Generador de secuencias de ensanchamiento.

- *Sample time*: para la simulación se configura en 2 ms, para que la señal ensanchada tenga pulsos de periodo T_c igual a 2 ms, establecido por el estándar IEEE 802.15.4a.

b) **Bloque de función Matlab "BPM_BPSK_mod"**: este bloque se encarga de procesar 7 entradas, i.e., $g_0, g_1, s_n, s_0, s_1, s_2, tout$, para generar una salida $sOut$ de símbolos UWB-DS y una salida $temp$. El bloque que se implementa se muestra en la Figura 2.9.

A continuación, se explica el procesamiento de sus entradas y el resultado en sus salidas.

- El bit de posición proveniente del codificador convolucional ingresa por la entrada g_0 , y dependiendo de su valor ubica la ráfaga en el primer o tercer intervalo del símbolo UWB-DS.
- El bit de polaridad proveniente del codificador convolucional ingresa por la entrada g_1 y es modulado con BPSK.
- La secuencia de ensanchamiento $s_{n+kN_{cpb}}$ ingresa por la entrada s_n .
- Los bits de la secuencia de salto de ráfaga $h^{(k)}$ ingresan por las entradas s_0, s_1, s_2 , que tras una conversión a decimal determinan un número entre 0 y 7, el cual es la posición en donde se ubica la ráfaga.
- La señal de reloj (*clock*) ingresa por la entrada $tout$, la cual corresponde a una señal de referencia de tiempo para el correcto funcionamiento del sistema.
- Los símbolos UWB-DS son obtenidos a través de la salida $sOut$.
- La salida auxiliar $temp$ es un contador de símbolos UWB-DS, cabe resaltar que esta salida no es necesaria, solo se usa para la verificación del correcto funcionamiento del modulador.

El bloque implementa la Ecuación 1.16, cuyo proceso matemático conlleva a la generación de los símbolos UWB-DS, los cuales contienen una ráfaga de



pulsos cada uno. Para conformar un símbolo UWB-DS, primero se realiza la modulación BPSK a partir del factor $1 - (2 \times g_1)$ el cual depende del valor que toma el bit de polaridad g_1 proveniente del codificador convolucional con periodo igual a 1024 ms, así cuando g_1 igual a 1, el factor es -1 y cuando g_1 igual a 0, el factor es 1, así convierte la señal unipolar a bipolar.

El bit resultante del proceso anterior se multiplica con la secuencia $(1 - 2 \times (s_{n+kN_{cpb}}))$, la cual es bipolar y tiene un periodo igual a 2 ms, de esta manera se genera una señal ensanchada con igual periodo de la secuencia $s_{n+kN_{cpb}}$.

Simultáneamente se crea un pulso $p_c(t)$ con un periodo igual a 32 ms. Con el fin de realizar la modulación BPM, el pulso $p_c(t)$ se corre considerando los siguientes parámetros:

- El parámetro $g_0 \times T_{BPM}$: teniendo en cuenta que T_{BPM} igual a 512 ms y que el bit de posición proveniente del codificador convolucional denotado como $g_0 \in \{0, 1\}$, entonces: cuando g_0 igual a 0, el pulso $p_c(t)$ se ubica en la primera mitad del símbolo UWB-DS; y cuando g_0 igual a 1, el pulso $p_c(t)$ se corre 512 ms, que es la segunda mitad del símbolo UWB-DS.
- El parámetro $h^{(k)} \times T_{burst}$: considerando que T_{burst} igual a 32 ms y que $h^{(k)}$ toma valores entre 0 y 7, entonces, el pulso $p_c(t)$ se ubica en una de las 8 posibles posiciones dentro de una de las mitades del símbolo UWB-DS.
- El parámetro $N_{sym} \times T_{dsym}$: a pesar de que no se especifica en la Ecuación 1.16, es necesario en la simulación para la creación de varios símbolos UWB-DS, este proceso se realiza teniendo en cuenta que T_{dsym} igual a 1024 ms, y N_{sym} es un contador de símbolos UWB-DS, así, $p_c(t)$ se ubica en un nuevo símbolo UWB-DS cada 1024 ms.

Por último, el pulso $p_c(t)$ con periodo igual a 32 ms con sus respectivos corrimientos se multiplica con la señal ensanchada con periodo igual a 2 ms, para generar una ráfaga de 16 pulsos $p(t)$ con periodo igual a 2 ms cada uno. De esta manera se crea la señal UWB-DS $x(t)$ compuesta por un conjunto de símbolos UWB-DS, y se cumple con los criterios teóricos de la modulación BPM-BPSK.

- c) Bloque real-imaginario a complejo:** como resultado del anterior proceso se obtiene una señal real en el tiempo, pero en el canal de transmisión se requiere de una señal de tipo complejo, por ende, es necesario realizar una conversión de la señal y para ello se utiliza el bloque *Real-Imag to Complex* que se muestra en la Figura 2.9.

En el bloque se configuran los siguientes parámetros:

- *Input*: se establece el tipo de entrada del bloque, en este caso real.
- *Imag part*: se especifica el valor imaginario que se utiliza para convertir la entrada en una señal de salida de valor complejo. Se establece en 0 por defecto.

2.3.1.4. Conformador de pulsos en transmisión Según el estándar la forma del pulso transmitida está definida por el filtro RRC. En la simulación se usa un bloque retenedor de orden cero y un filtro RRC, como se muestra en la Figura 2.12.

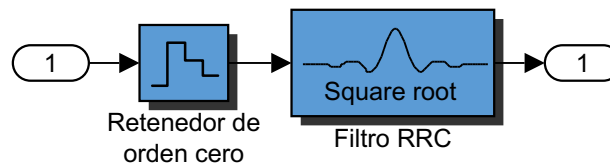


Figura 2.12. PS en transmisión.

- Bloque retenedor de orden cero:** del bloque función Matlab denominado "BPM_BPSK_mod" se obtiene una señal continua, la función de este bloque es de convertir la señal de entrada de continua a discreta según el periodo de retención que se especifique. El bloque retenedor de orden cero retiene la señal cada 2 ms para ser adecuadamente procesada por el bloque siguiente, así, se obtiene a la salida una señal discreta con pulsos de 2 ms. El bloque que se usa se muestra en la Figura 2.12. Dentro de sus parámetros se configura el periodo de retención igual a 2 ms.
- Bloque filtro RRC:** este bloque filtra la señal de entrada utilizando un filtro FIR de coseno alzado normal o un filtro FIR RRC. El bloque que se usa se muestra en la Figura 2.12.

En el bloque se configuran los siguientes parámetros :

- *Filter shape*: especifica la forma de onda del filtro, la cual puede ser *Square root* o *Normal*. Para la simulación se establece en *Square root*.
- *Roll-off factor*: es el factor de ancho de banda en exceso, se especifica como un $\mathbb{R} \in \{0, \dots, 1\}$. Para la simulación este factor es igual 0,6.
- *Filter span in symbols*: son los periodos de pulso que abarca el filtro. Para la simulación este parámetro es igual a 4.
- *Output samples per symbol*: especifica el número de escalares por cada pulso. Este proceso se conoce como sobremuestreo. Para la simulación este parámetro es igual a 8.

- *Linear amplitude filter gain*: valor en el cual se escalan los coeficientes del filtro. Se establece en 1 por defecto.
- *Input processing*: especifica como se procesa la señal de entrada en el bloque, el cual puede ser: *Columns as channels (frame based)* o *Elements as channels (sample based)*. Para la simulación se selecciona *Elements as channels (sample based)* para que el filtro trate cada elemento de forma individual.
- *Rate options*: especifica el método por el cual el filtro debe muestrear y filtrar la señal de entrada, el cual puede ser: *Enforce single-rate processing* o *Allow multirate processing*. Para la simulación se habilita automáticamente en *Allow multirate processing* por el procesamiento de la señal basado en escalares.

2.3.2. Canal AWGN

El canal de transmisión agrega una señal de AWGN compleja a la señal UWB-DS. Para la simulación de este subsistema se utiliza el bloque canal AWGN que se muestra en la Figura 2.13.

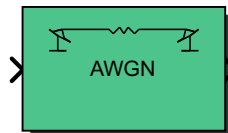


Figura 2.13. Bloque AWGN.

En el bloque se configuran los siguientes parámetros:

- *Initial seed*: semilla inicial del generador de ruido. Para la simulación se configura por defecto en 67.
- *Mode*: define la cantidad de ruido a adicionar a la señal UWB-DS, el cual puede ser: relación de energía de bit a densidad de potencia de ruido $\frac{E_b}{N_o}$, relación energía de símbolo a densidad de potencia de ruido $\frac{E_s}{N_o}$ y SNR. Para la simulación se selecciona el parámetro SNR.
- *SNR (dB)*: determina la relación entre la potencia de la señal y la potencia de ruido. En la simulación este valor es variado para determinar el efecto del ruido sobre la señal UWB-DS.

2.3.3. Receptor UWB-DS

Internamente este subsistema contiene los siguientes elementos: PS en recepción, detector de energía y decodificador de canal. El subsistema de recepción UWB-DS resultante se muestra en la Figura 2.14.

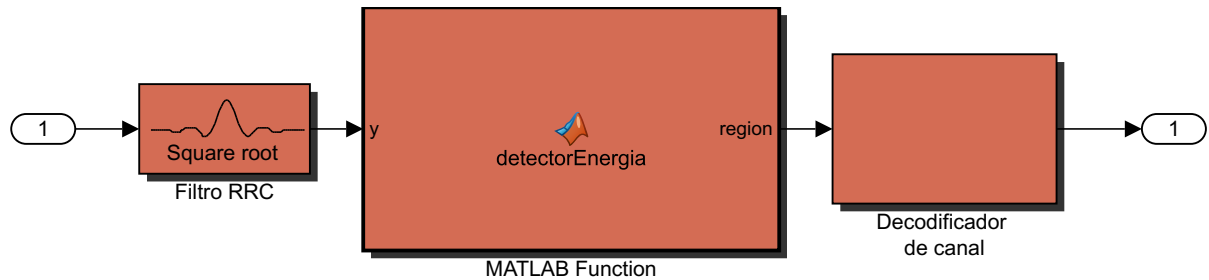


Figura 2.14. Subsistema del receptor UWB-DS.

2.3.3.1. Conformador de pulsos en recepción Con el fin de limitar el efecto AWGN sobre la señal UWB-DS, se implementa un filtro RRC en recepción. El bloque que se usa se muestra en la Figura 2.14. y dentro de sus funcionalidades, además de filtrar la señal de entrada utilizando un filtro FIR de coseno alzado normal o un filtro FIR RRC, también reduce la cantidad de muestras de la señal, proceso conocido como submuestreo.

Los siguientes son los parámetros a configurar:

- *Filter shape*: para la simulación se establece en *Square root*.
- *Roll-off factor*: para la simulación este factor es igual a 0,6.
- *Filter span in symbols*: Para la simulación este parámetro es igual a 4.
- *Input samples per symbol*: es el número de muestras que representan al pulso en la señal de entrada. Se establece en 8 para la simulación, ya que en el filtro de transmisión se especifica 8 muestras por periodo de pulso.
- *Decimation factor d*: retiene 1 de d muestras de la señal de entrada. Para la simulación se especifica este valor en 8, de esta manera en el proceso de recuperación de la señal, de cada 8 muestras se retiene 1 y se descartan 7.
- *Decimation offset*: valor entre $\{0, \dots, d - 1\}$. Para la simulación se especifica en 0.
- *Linear amplitude filter gain*: se establece en 1 por defecto.
- *Input processing*: para la simulación se selecciona *Elements as channels (sample based)*.
- *Rate options*: para la simulación se habilita automáticamente en *Allow multirate processing*.



2.3.3.2. Detector de energía Este bloque se encarga de realizar la ED a la señal UWB-DS proveniente del transmisor UWB-DS y que ha sido afectada por el canal, este proceso se realiza para recuperar la señal codificada. Cabe resaltar que según lo establecido por el estándar IEEE 802.15.4a, se detecta la región del intervalo del símbolo UWB-DS en donde se ubica la ráfaga, es decir solamente se recupera el bit g_0 proveniente del codificador convolucional. Lo anterior se lleva a cabo con el bloque de Función Matlab "detectorEnergia", el cual se muestra en la Figura 2.14.

El funcionamiento interno de este bloque se explica a continuación. Inicialmente se definen entradas y salidas, las cuales son:

- Se cuenta con una entrada y , que es la señal UWB-DS contaminada con AWGN, cuya energía debe ser detectada.
- La salida $region$, es el resultado de la ED en donde se obtiene el bit de posición g_0 .

Una vez definidas entradas y salidas, se definen las siguientes variables en el bloque: $amplitudumbral$ igual a 1; $periodoMuestreo$ igual a 2 ms; tam , cuyo valor es el resultado del cociente entre el periodo del símbolo UWB-DS T_{dsym} igual a 1024 ms y el $periodoMuestreo$; y S , la cual es un contador de las veces que se evalúa la señal y . El detector de energía recibe la señal y , la cual es evaluada cada 2 ms, procedimiento que se repite hasta que $S = tam$, donde en ese momento se inicializa S y se inicia nuevamente el proceso durante todo el tiempo de simulación. El proceso de la ED se realiza comparando la amplitud de la señal y con $amplitudumbral$, en caso de que $y > amplitudumbral$, se obtiene en la salida $region$ los siguientes valores: un 0, cuando ocurre en la primera mitad del símbolo UWB-DS y un 1, cuando ocurre en la segunda mitad.

2.3.3.3. Decodificador de canal En este proceso es importante tener en cuenta que en la simulación no es necesario realizar la decodificación de Viterbi, puesto que en el proceso de ED se recupera solo el bit de posición, que es el bit que representa los datos de usuario, y el bit de polaridad se ignora puesto que no contiene información de usuario.

En la simulación se usan los bloques: retenedor de orden cero, *Delay*, *Buffer*, Decodificador Reed-Solomon y *Unbuffer*, como se muestra en la Figura 2.15.

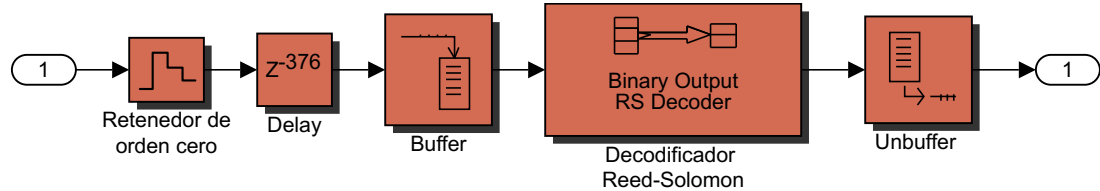


Figura 2.15. Decodificador de canal.

- a) **Bloque retenedor de orden cero:** este bloque cumple con la función de retener con un periodo de muestreo igual a 1024 ms los datos de entrada, este proceso se realiza con el objetivo de que el periodo de los datos que ingresan al decodificador Reed-Solomon sea el mismo que el de los datos que salieron del codificador Reed-Solomon. En los parámetros se configura el *sample time*, que para este caso es igual a 1024 ms.
- b) **Bloque Delay:** este bloque agrega una serie de retardos específicos a la señal de entrada. El objetivo es que los bloques de datos que ingresan al decodificador Reed-Solomon sean los mismos que salieron del codificador Reed-Solomon.

En el bloque se configuran los siguientes parámetros:

- *Delay length:* especifica la cantidad de retardos. Se selecciona *Dialog* para determinar 376 retardos.
- *Initial condition:* especifica un valor como condición inicial. Para este caso es 0 por defecto.
- *Input processing:* especifica si el bloque realiza un procesamiento basado en vectores (*frame based*) o escalares (*sample based*). Para la simulación se especifica en *sample based* puesto que la señal de entrada tiene ese formato.
- *Sample time:* especifica el periodo del retardo. Para este caso es -1 para que herede el periodo de muestreo de la señal de entrada.

- c) **Bloque Buffer:** la codificación Reed-Solomon trabaja sobre bloques de datos, por esta razón, este bloque redistribuye los datos que ingresan en escalares para generar una señal de datos de salida en vectores.

En el bloque se configuran los siguientes parámetros:

- *Output buffer size (per channel):* especifica el número de escalares consecutivos para almacenar en el vector de salida. En este caso es 378 porque debe ser igual a la dimensión de la señal de salida del codificador Reed-Solomon.



- *Buffer overlap*: especifica el número de escalares por el cual se superponen los vectores de salida consecutivos. En este caso es 0 por defecto.
- *Initial condition*: especifica el valor de la salida inicial del bloque. En este caso es 0 por defecto.

d) Bloque decodificador Reed-Solomon: este bloque recupera los datos de usuario que ingresaron al codificador Reed-Solomon, es decir, se recupera un vector de 330 bits con un periodo igual a 387,072 s. Para una decodificación adecuada, los valores de los parámetros en este bloque deben coincidir con los valores de los parámetros configurados en el bloque codificador Reed-Solomon.

e) Bloque *Unbuffer*: la señal proveniente del decodificador Reed-Solomon que es un vector con periodo igual a 387,072 s, se convierte en escalares con periodo igual a 1,1729454545 s cada uno, con el objetivo de recuperar los datos de usuario.

Considerando el sistema completo compuesto por el transmisor, canal y receptor descrito anteriormente, la Figura 2.16. presenta el modelo completo de simulación de un sistema de comunicación punto a punto basado en UWB-DS.



Análisis del Desempeño a Nivel Físico de un Sistema de Comunicación Punto a Punto Basado en UWB-DS

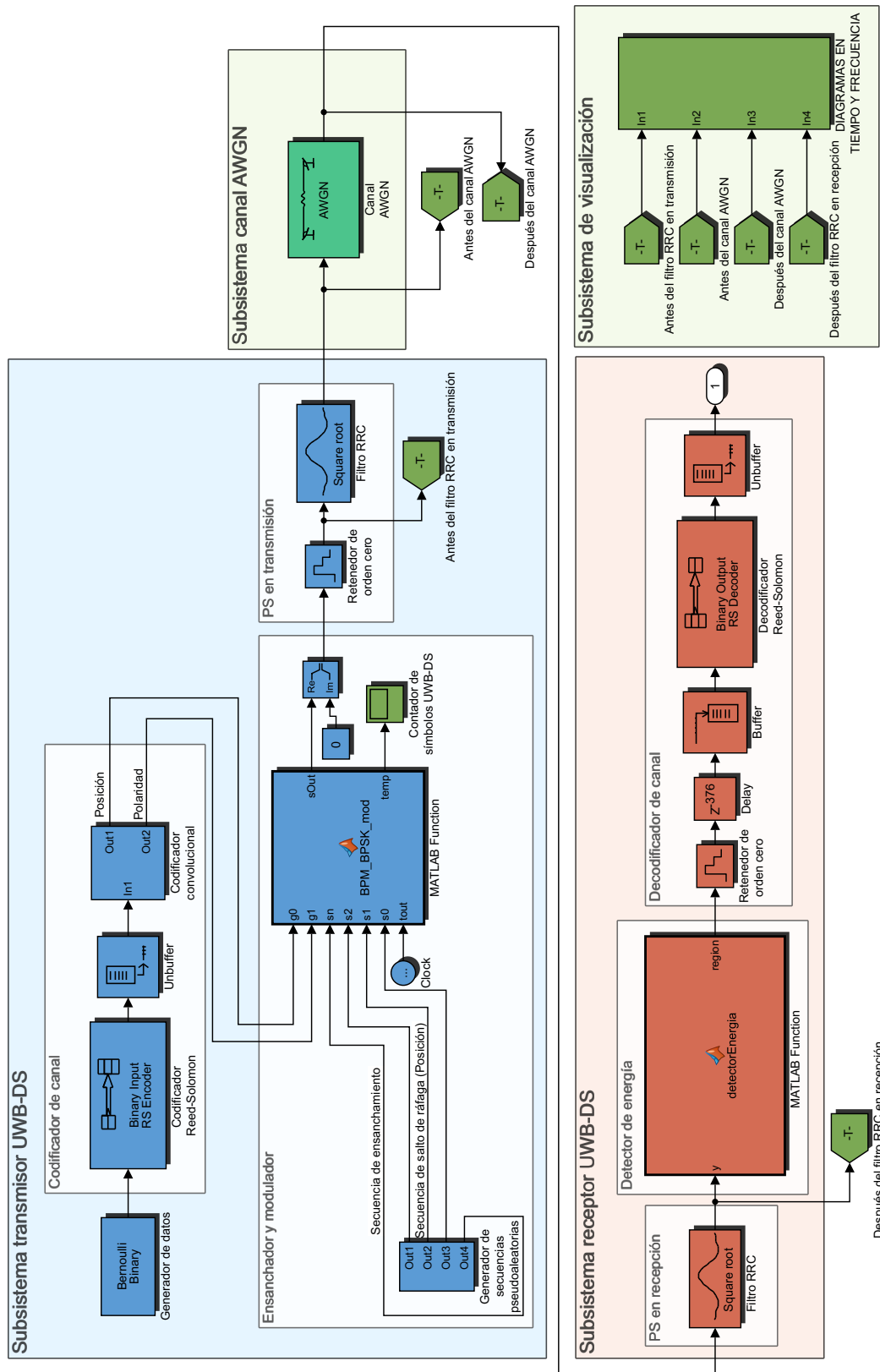


Figura 2.16. Modelo de simulación del sistema general.



3. DEFINICIÓN Y DISEÑO DEL PLAN DE PRUEBAS

Para el análisis del desempeño a nivel físico de un sistema de comunicación punto a punto basado en UWB-DS, se mide la BER en términos de la SNR, además, se hace uso de diagramas en tiempo y en frecuencia que permiten obtener una apreciación del comportamiento del sistema de comunicación.

3.1. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

La BER es una métrica de desempeño de la calidad de un sistema de comunicación, que se obtiene de la relación entre el número de bits erróneos con respecto al número total de bits transmitidos en un determinado periodo de tiempo, tal como se expresa en la Ecuación 3.1.

$$BER = \frac{\text{Número de bits errados}}{\text{Número de bits transmitidos}} \quad (3.1)$$

El análisis del desempeño a nivel físico del sistema de comunicación se realiza mediante el uso de la herramienta BERTool de Matlab, la cual permite hacer una representación de la BER en función de la SNR. Este análisis se realiza sobre los resultados obtenidos de la simulación del sistema de comunicación implementado en Simulink. La interfaz gráfica de BERTool se muestra en la Figura 3.1.

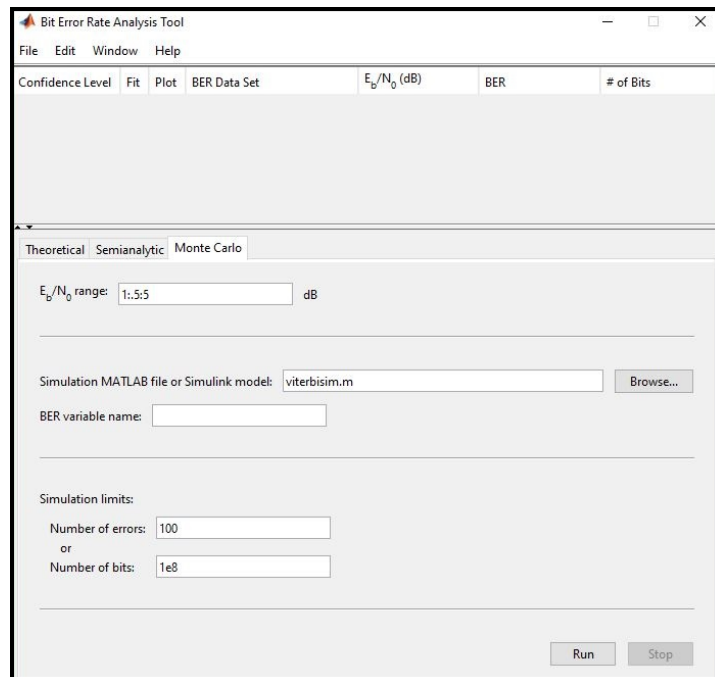


Figura 3.1. Interfaz gráfica de BERTool.

3.2. ANÁLISIS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

Los diagramas en el tiempo son primordiales para la visualización y análisis de una señal, de sus formas de onda y de los elementos de señal propagados. Para la simulación se hace uso de los diagramas de ojo, de constelación y de osciloscopio, que permiten examinar la señal de transmisión en diferentes puntos de observación en un sistema de comunicación. Los diagramas mencionados se describen a continuación:

- a) **Diagrama de ojo:** el diagrama de ojo es una herramienta que permite visualizar el efecto de las limitaciones del canal (ruido y ancho de banda) sobre la señal UWB-DS. Este se construye a partir de la superposición de todas las posibles combinaciones de 1s y 0s en un rango de tiempo determinado, la cual se muestra en un gráfico cuyo eje vertical representa la amplitud de la señal y el eje horizontal el tiempo.
- b) **Diagrama de constelación:** el diagrama de constelación permite representar los estados de los pulsos en el plano complejo en términos de amplitud y fase, en el eje imaginario (vertical) y en el eje real (horizontal), respectivamente. Este diagrama permite observar errores en la fase y amplitud que ocurren en la propagación de la señal transmitida.
- c) **Diagrama de osciloscopio:** permite la visualización del comportamiento de la señal en la simulación en el dominio del tiempo. En el diagrama el eje horizontal representa el tiempo de la simulación y el eje vertical la amplitud de la señal.

Los bloques que permiten estas visualizaciones se muestran en la Figura 3.2. y se encuentran dentro del subsistema de visualización propuesto.

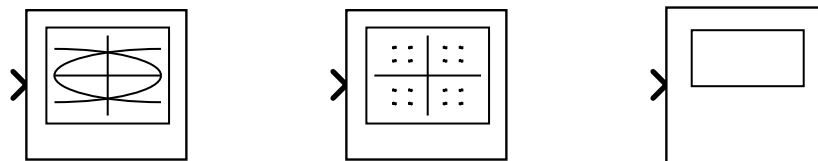


Figura 3.2. Bloques para visualización del diagrama de ojo, constelación y osciloscopio.

3.3. ANÁLISIS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

Para el análisis en el dominio de la frecuencia se hace uso de un analizador de espectro, el cual obtiene el espectro de frecuencias de la señal transmitida en una escala lineal o logarítmica. En el eje vertical se presenta el nivel de potencia en dBm



de las componentes en frecuencia de la señal transmitida y en el eje horizontal la frecuencia de las componentes de dicha señal. El bloque que permite obtener los espectros de frecuencia se muestra en la Figura 3.3.

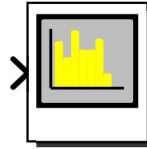


Figura 3.3. Bloque para visualización de espectro.

3.4. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Se establecen cuatro escenarios de simulación para evaluar el desempeño a nivel físico de un sistema de comunicación punto a punto basado en UWB-DS. El primer escenario corresponde a la implementación a nivel de banda base del estándar IEEE 802.15.4a, el cual sirve como punto de referencia y comparación con los tres escenarios restantes, los cuales difieren en: la no consideración del PS, la no consideración del esquema de codificación que es opcional y en la consideración de un esquema de modulación diferente. Las configuraciones para estos escenarios se indican en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Configuración de los escenarios de simulación.

Escenario	Codificación	Modulación	PS	Canal AWGN
1	Reed-Solomon y convolucional	BPM-BPSK	Si	Si
2	Reed-Solomon y convolucional	BPM-BPSK	No	Si
3	Convolucional	BPM-BPSK	Si	Si
4	Reed-Solomon y convolucional	BPM-QPSK	Si	Si

3.4.1. Escenario 1

Este escenario es el basado en el estándar IEEE 802.15.4a, su modelo de simulación se detalla en la Sección 2.3. y se toma como referencia para comparar su desempeño con el desempeño del resto de escenarios.

3.4.2. Escenario 2

Este escenario se diferencia del escenario 1 en la no consideración del PS, es decir, la señal proveniente del ensanchador y modulador no es filtrada por un filtro RRC en transmisión, ni en recepción. En la Figura 3.4. se muestra el modelo general del sistema para el escenario 2. Todos los bloques del transmisor UWB-DS,

canal AWGN y receptor UWB-DS que componen el sistema de este escenario son configurados y cumplen la misma función que los del escenario 1.

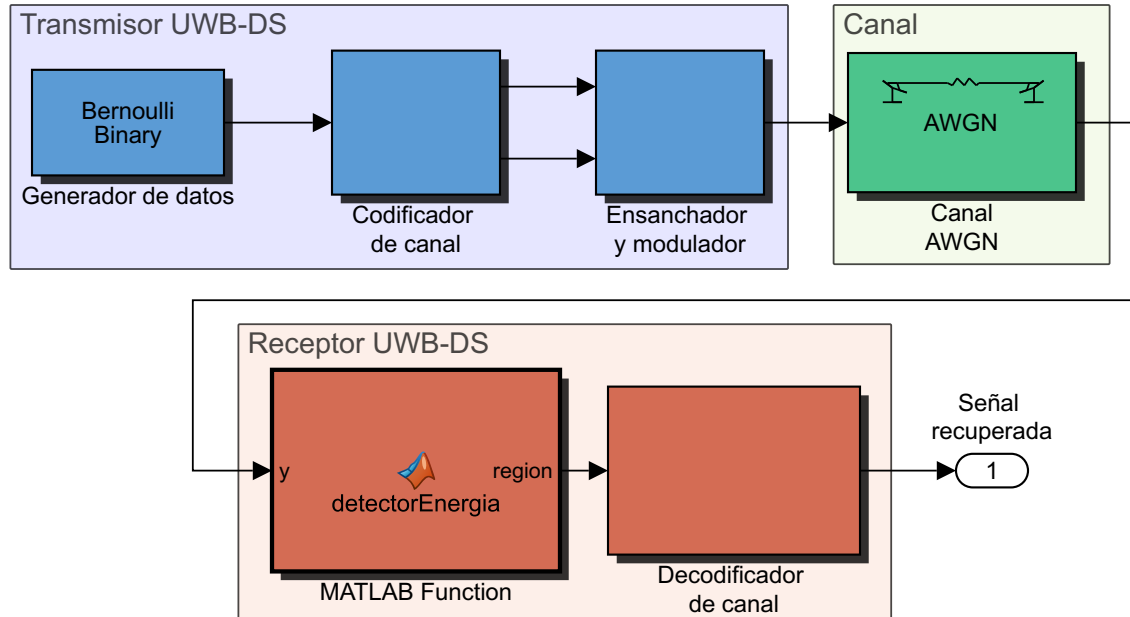


Figura 3.4. Modelo general del sistema para el escenario 2.

3.4.3. Escenario 3

Este escenario se diferencia del escenario 1 en la no consideración del esquema de codificación que es opcional, es decir, que los datos emitidos por el generador de datos ya no son codificados por la concatenación de códigos Reed-Solomon y convolucional como lo establece el estándar IEEE 802.15.4a, si no, solo por el código convolucional. En la Figura 3.5. se muestra el modelo general del sistema para el escenario 3.

Los bloques del transmisor UWB-DS, canal AWGN y receptor UWB-DS, como son: ensanchador y modulador, PS en transmisión, canal AWGN, PS en recepción y función Matlab "detectorEnergia", son configurados y cumplen la misma función que los del escenario 1, mientras que el generador de datos y el esquema de codificación se modifican como se describe a continuación.

En el bloque generador de datos se configuran los mismos parámetros que en el escenario 1, a excepción de los siguientes:

- *Sample time*: se especifica en 1024 ms.

- *Sample per frame*: se establece en 1, para que al codificador convolucional ingresen escalares de 1024 ms cada uno.

Como solo se incluye el codificador convolucional, no es necesario el bloque *unbuffer*, ni el decodificador Reed-Solomon que se usan en el escenario 1. El codificador convolucional es configurado y cumple con la misma función que el del escenario 1.

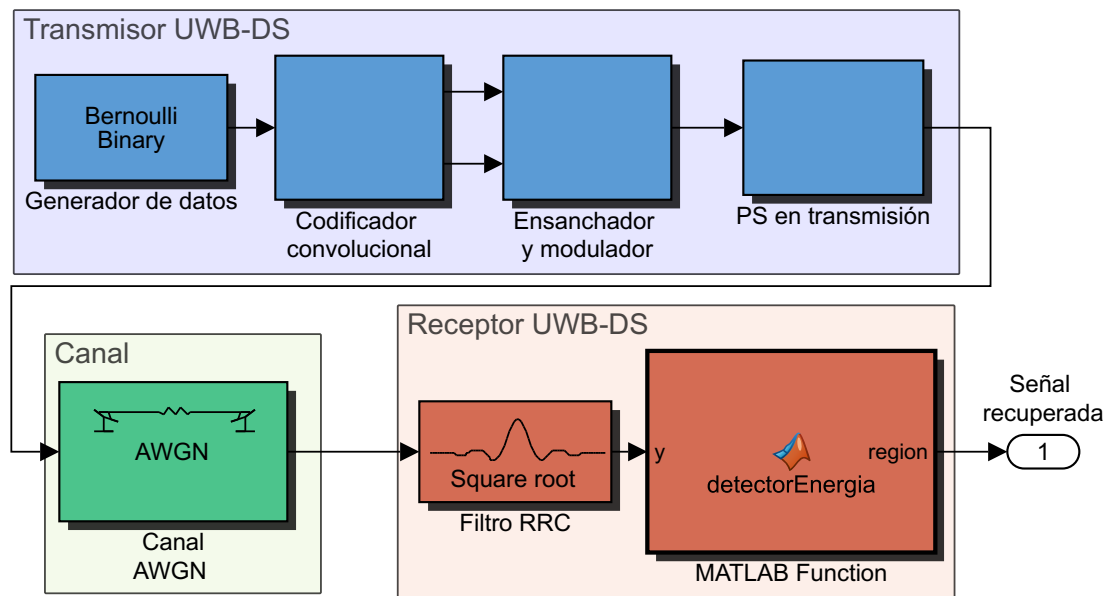


Figura 3.5. Modelo general del sistema del escenario 3.

3.4.4. Escenario 4

A diferencia a lo establecido por el estándar IEEE 802.15.4a, para este escenario se hace uso de la modulación BPM-QPSK, lo que implica modificar la expresión matemática de la Ecuación 1.16, eliminando el factor $1 - 2g_1$. El funcionamiento de dicha ecuación modificada es el siguiente: la señal modulada con BPM y ensanchada se multiplica con una señal de 4 valores unipolares, la cual es generada a partir de los bits g_0 y g_1 (este último ya no cumple con la función de determinar la polaridad de la ráfaga) con el fin de que la señal resultante sea procesada adecuadamente por un modulador QPSK. Cabe resaltar que tanto el proceso de ensanchamiento de la señal como el de la modulación BPM cumplen con el mismo funcionamiento descrito para el escenario 1. En la Figura 3.6. se muestra el modelo general del sistema del escenario 4.

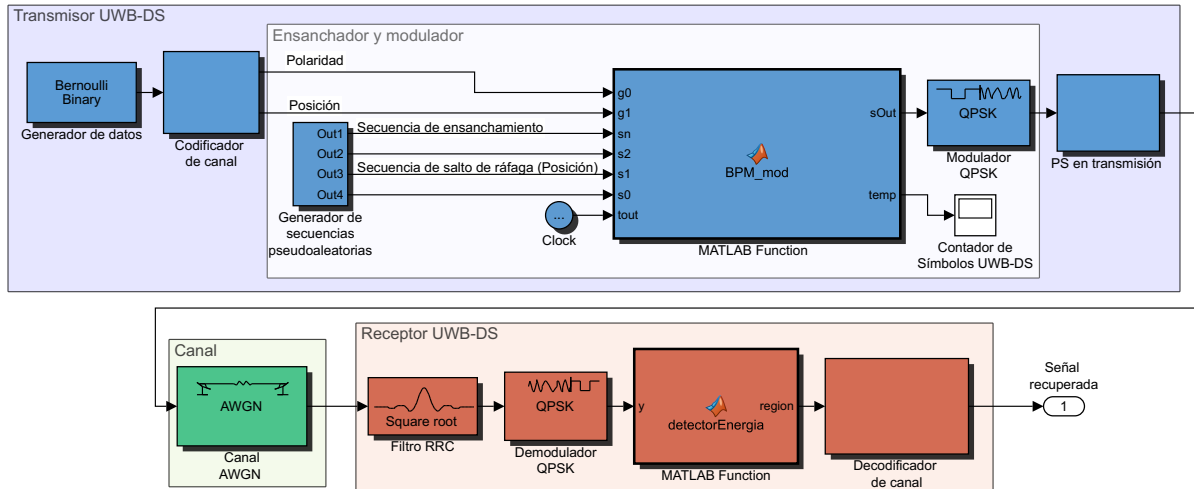


Figura 3.6. Modelo general del sistema del escenario 4.

Los bloques del transmisor UWB-DS, canal AWGN y receptor UWB-DS, como son: generador de datos, codificador de canal, generador de secuencias pseudo-aleatorias, PS en transmisión, canal AWGN, PS en recepción, función Matlab “detectorEnergia” y decodificador de canal, son configurados y cumplen la misma función que los del escenario 1.

El bloque de función Matlab “BPM_mod”, se encarga de generar en su salida s_{Out} una señal ensanchada, modulada con BPM y de 4 valores enteros unipolares, la cual es procesada adecuadamente por el modulador QPSK.

En este escenario se adicionan los bloques: modulador QPSK y demodulador QPSK, los cuales se detallan a continuación:

- a) Modulador QPSK:** la modulación QPSK utiliza el método de corrimiento de fase en cuadratura. El bloque que cumple esta función se muestra en la Figura 3.6.

En este bloque se configuran los siguientes parámetros:

- *Input type*: indica si la señal de entrada se representa con enteros o bits. Para la simulación se especifica en enteros.
- *Constellation ordering*: determina el ordenamiento de constelación, puede ser *gray* o *binary*. Para la simulación se selecciona *gray*.
- *Phase offset (rad)*: especifica en radianes el corrimiento de fase de la constelación inicial. Para la simulación se especifica como $\pi/4$.



- b) Demodulador QPSK:** este bloque demodula una señal modulada en QPSK. En este escenario el bloque recibe la señal filtrada por el filtro RRC en recepción, y la demodula para enviar su resultado al detector de energía. Este bloque se muestra en la Figura 3.6. En este bloque se configuran los mismos parámetros que en el modulador QPSK.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presenta los resultados y el análisis del desempeño a nivel físico de un sistema de comunicación punto a punto basado en UWB-DS, los cuales fueron obtenidos a través de las simulaciones en los 4 escenarios mencionados en el Capítulo 3.

Inicialmente, se visualizan por medio de un osciloscopio los resultados de las señales de entrada y salida de los bloques que componen el transmisor UWB-DS, canal AWGN y receptor UWB-DS en el escenario 1 (basado en el estándar IEEE 802.15.4a). Posteriormente, se presentan los resultados de los diagramas de ojo, constelación, trayectoria, espectro de frecuencias y curvas de BER en función de la SNR, de los 4 escenarios, con el fin de compararlos y analizar su desempeño.

4.1. RESULTADO DE SEÑALES DE LOS BLOQUES DEL ESCENARIO PRINCIPAL

Las señales de información de usuario son señales binarias generadas en el bloque *Bernoulli Binary Generator*, el cual genera vectores de 330 bits que van al codificador Reed-Solomon, y este genera en su salida vectores de 378 bits, los cuales a su vez ingresan al codificador convolucional, el cual adiciona un bit de redundancia por cada bit de entrada. Lo anterior se comprueba mediante la verificación de la dimensión del vector resultante a la salida de cada uno de los bloques de generación de datos y codificación, como se presenta en la Figura 4.1.

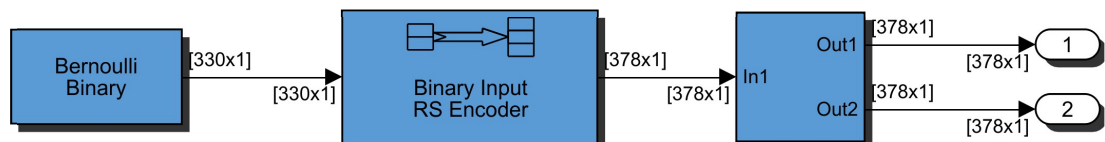


Figura 4.1. Dimensión del vector en las salidas de los bloques de generación de datos y codificación.

A modo de demostración para la presentación de los resultados y su posterior análisis, se envían desde el generador de datos vectores de 330 bits, cada bit con periodo igual a 1,1729454545 s, luego, a la salida del codificador Reed-Solomon se obtienen vectores de 378 bits, cada bit con periodo igual a 1024 ms, como se muestra en la Figura 4.2., donde para la fácil visualización y a manera de ejemplo se considera únicamente los primeros 5 bits.

La señal codificada por el codificador Reed-Solomon se envía al codificador convolucional, de ahí se obtiene los bits de posición y polaridad con periodo igual a

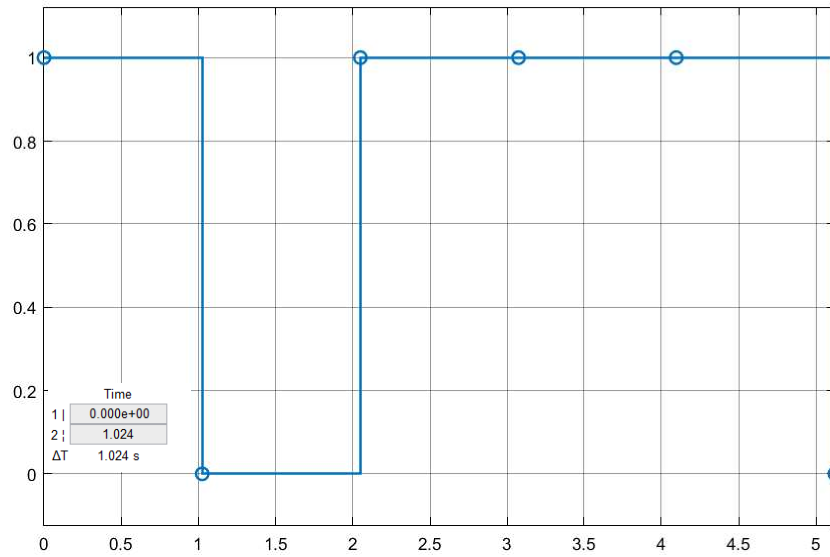
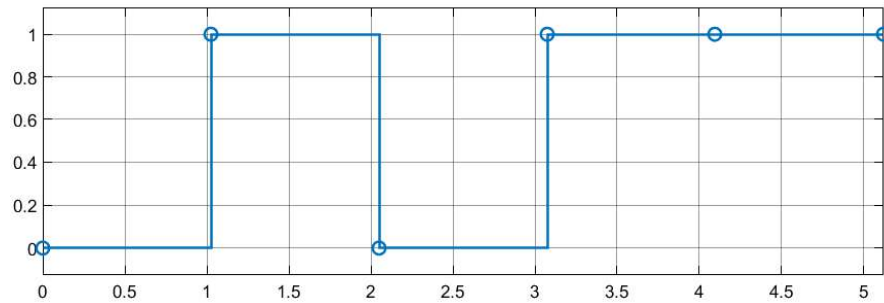
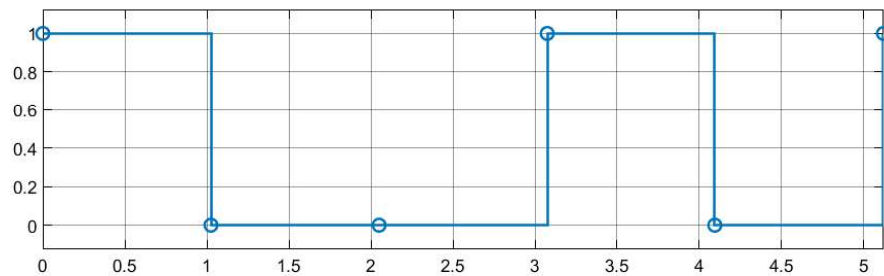


Figura 4.2. Periodo de bit a la salida del proceso de codificación Reed-Solomon.

1024 ms cada uno, como se muestra en la Figura 4.3., los cuales son modulados en posición y en polaridad para conformar los símbolos UWB-DS. Nótese que en la Figura 4.3.a se muestran los mismos bits que en la Figura 4.2., los cuales son los que representan la información de usuario, pero con un retardo adicional.



(a) Bits de posición (g_0).



(b) Bits de polaridad (g_1).

Figura 4.3. Bits de salida del codificador convolucional.



Simultáneamente en el modulador se crea un pulso $p_c(t)$ con periodo igual a 32 ms, el cual en procesos posteriores será ensanchado para que se convierta en una ráfaga de 16 pulsos con periodo igual a 2 ms cada uno, como lo establece el estándar IEEE 802.15.4a.

Los bits de posición (Figura 4.3.a) definen el intervalo del símbolo UWB-DS en el que se ubica el pulso $p_c(t)$, los resultados se registran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Intervalo de símbolo UWB-DS donde se ubica el pulso de 32 ms.

Símbolo UWB-DS número:	bit g_0	Intervalo de símbolo UWB-DS
1	0	primero
2	1	tercero
3	0	primero
4	1	tercero
5	1	tercero

El generador de secuencias de salto de ráfaga emite 3 señales que se observan en la Figura 4.4., las cuales definen la posición donde se ubica el pulso $p_c(t)$ dentro del intervalo del símbolo UWB-DS, los resultados se registran en la Tabla 4.2.

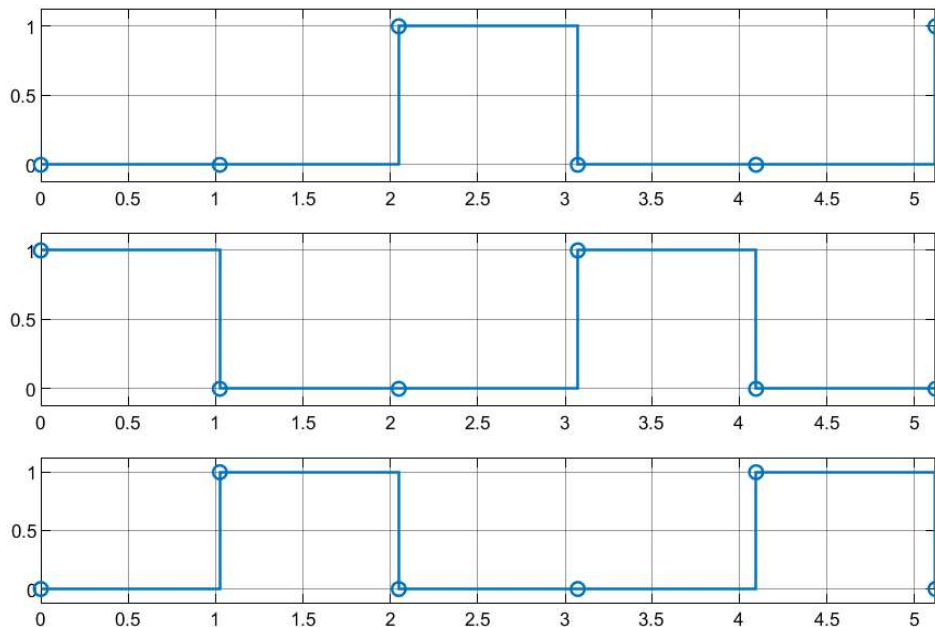


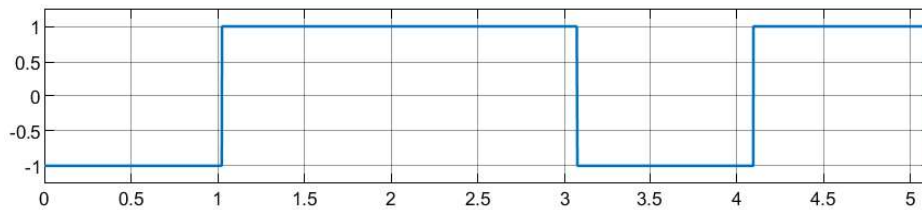
Figura 4.4. Secuencias de salto de ráfaga.



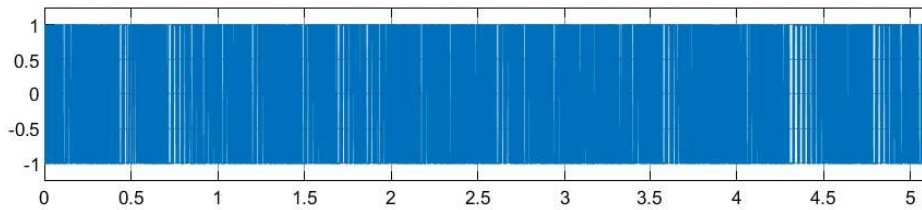
Tabla 4.2. Posición dentro del intervalo donde se ubica el pulso de 32 ms.

Símbolo UWB-DS número	Secuencia $h^{(k)}$	Posición del pulso
1	0 1 0	2
2	0 0 1	1
3	1 0 0	4
4	0 1 0	2
5	0 0 1	1

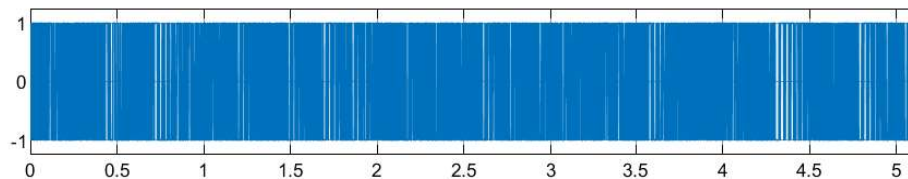
Siguiendo el procedimiento de la Sección 2.3.1.3., los bits de polaridad (Figura 4.3.b) provenientes del codificador convolucional ingresan al modulador, donde se convierten en bipolares y se invierten, debido al factor $(1 - 2 \times g_1)$, tal como se muestra en la Figura 4.5.a. El generador de secuencias de ensanchamiento emite la secuencia $s_{n+kN_{cpb}}$, la cual ingresa al modulador y se convierte en una señal bipolar, debido al factor $(1 - 2 \times s_{n+kN_{cpb}})$, como se observa en la Figura 4.5.b. Los factores $(1 - 2 \times g_1)$ y $(1 - 2 \times s_{n+kN_{cpb}})$ se multiplican para obtener como resultado la señal de la Figura 4.5.c.



(a) Factor $(1 - 2 \times g_1)$ (modulación BPSK).



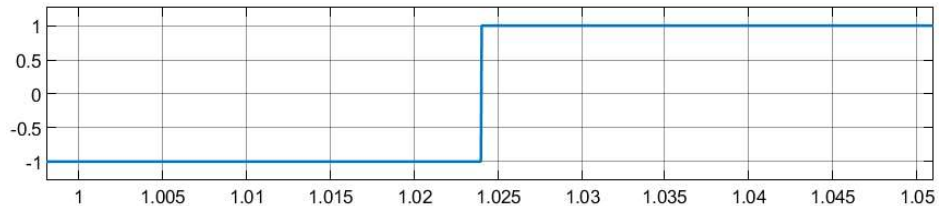
(b) Factor $(1 - 2 \times s_{n+kN_{cpb}})$.



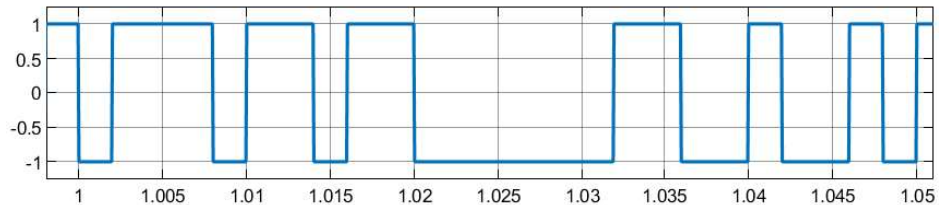
(c) Señal ensanchada (producto entre los factores $(1 - 2 \times g_1)$ y $(1 - 2 \times s_{n+kN_{cpb}})$).

Figura 4.5. Proceso de ensanchamiento.

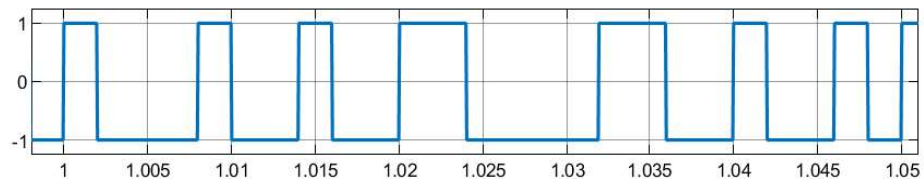
La Figura 4.6. muestra un acercamiento de la Figura 4.5. Se aprecia que: cuando el factor $(1 - 2 \times s_{n+kN_{cpb}})$ se multiplica con el factor $(1 - 2 \times g_1)$ igual a -1, su resultado es el factor $(1 - 2 \times s_{n+kN_{cpb}})$ invertido; mientras que cuando $(1 - 2 \times g_1)$ es igual a 1, el resultado es el mismo factor $(1 - 2 \times s_{n+kN_{cpb}})$.



(a) Acercamiento de factor $(1 - 2 \times g_1)$ (modulación BPSK).



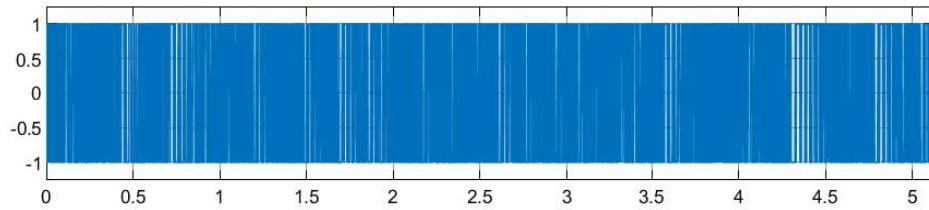
(b) Acercamiento del factor $(1 - 2 \times s_{n+kN_{cpb}})$.



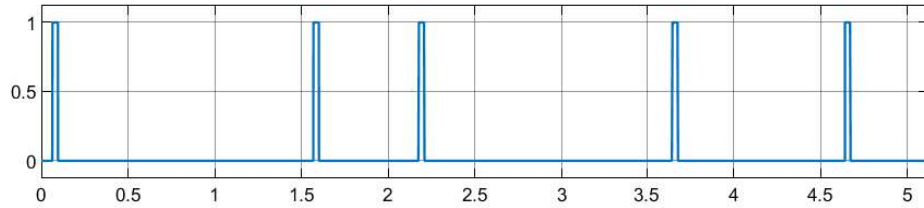
(c) Acercamiento de señal ensanchada (producto entre los factores $(1 - 2 \times g_1)$ y $(1 - 2 \times s_{n+kN_{cpb}})$).

Figura 4.6. Acercamiento del proceso de ensanchamiento.

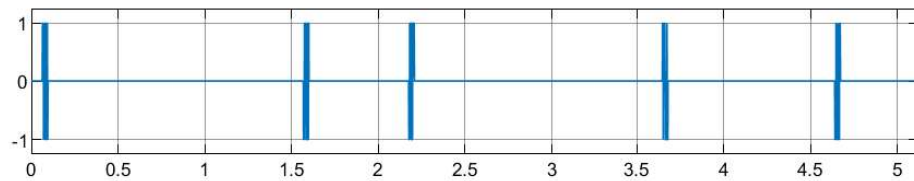
La Figura 4.7.a muestra la misma señal ensanchada de la Figura 4.5.c. La Figura 4.7.b muestra los pulsos $p_c(t)$ que están ubicados en una posición dentro del símbolo UWB-DS como se especifica en las Tablas 4.1. y 4.2. El resultado de la multiplicación entre las señales de las Figuras 4.7.a y 4.7.b es la señal ensanchada que se muestra en la Figura 4.7.c, en donde cada pulso $p_c(t)$ con periodo igual a 32 ms es convertido en 16 pulsos de corta duración de periodo igual a 2 ms modulados con BPM-BPSK, y que son conocidos dentro de este contexto como ráfaga.



(a) Señal ensanchada (producto entre los factores $(1 - 2 \times g_1)$ y $(1 - 2 \times s_{n+kN_{cpb}})$).



(b) Pulsos $p_c(t)$ ubicados dentro de los símbolos UWB-DS (modulación BPM).



(c) Ráfagas en los símbolos UWB-DS.

Figura 4.7. Señales que realizan el proceso de ensanchamiento.

La Figura 4.8. muestra el acercamiento de la Figura 4.7.b, donde se aprecia el periodo igual a 32 ms del pulso $p_c(t)$.

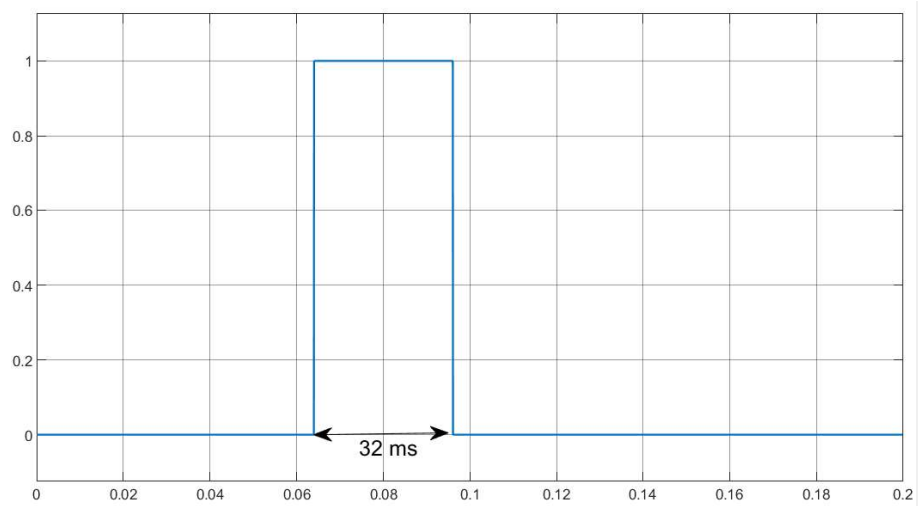


Figura 4.8. Periodo del pulso de 32 ms.

Para facilitar la visualización y comprensión del procesamiento de la señal, se



muestran las siguientes figuras: la Figura 4.9. muestra los 5 primeros símbolos UWB-DS separados por su periodo de tiempo; la Figura 4.10. muestra el acercamiento al primer símbolo UWB-DS, en donde según la Tabla 4.1. se concluye que la ráfaga se encuentra en la primera mitad del símbolo UWB-DS, es decir, en los primeros 512 ms, y según la Tabla 4.2., la ráfaga está en la posición 2, puesto que al hacer un acercamiento de esta (Figura 4.11.) se aprecia que los 16 pulsos con periodo igual a 2 ms cada uno, están ubicados aproximadamente desde 0,064 ms hasta 0,096 ms; de esta manera se cumple con los criterios teóricos de la modulación BPM-BPSK.

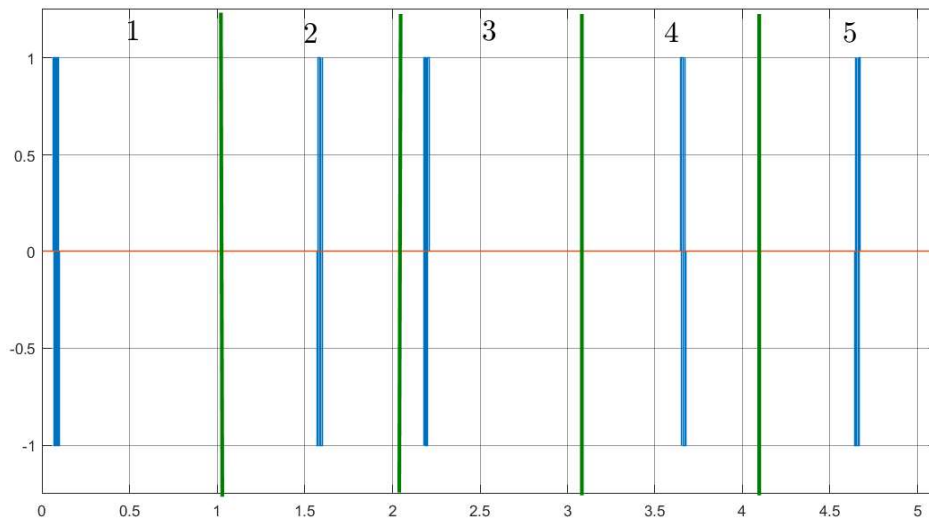


Figura 4.9. Símbolos UWB-DS.

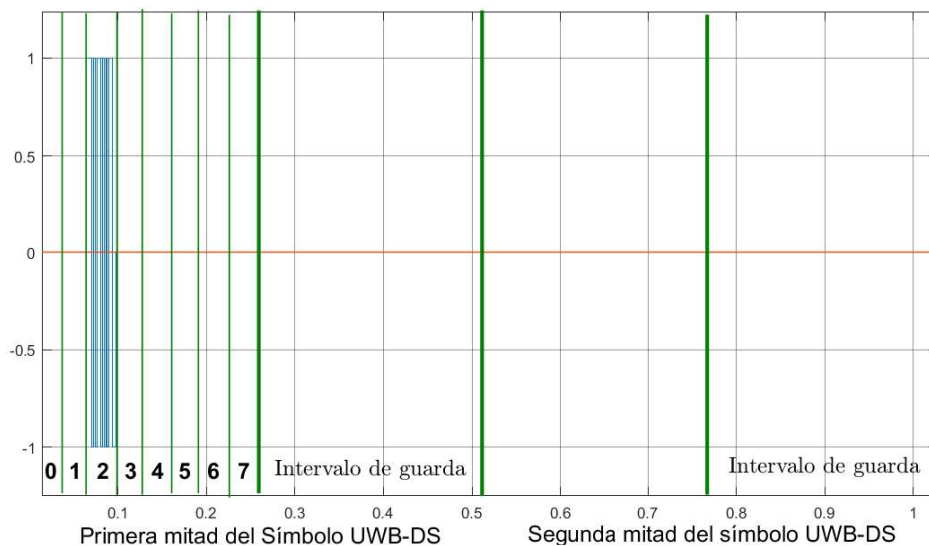


Figura 4.10. Acercamiento al primer símbolo UWB-DS.

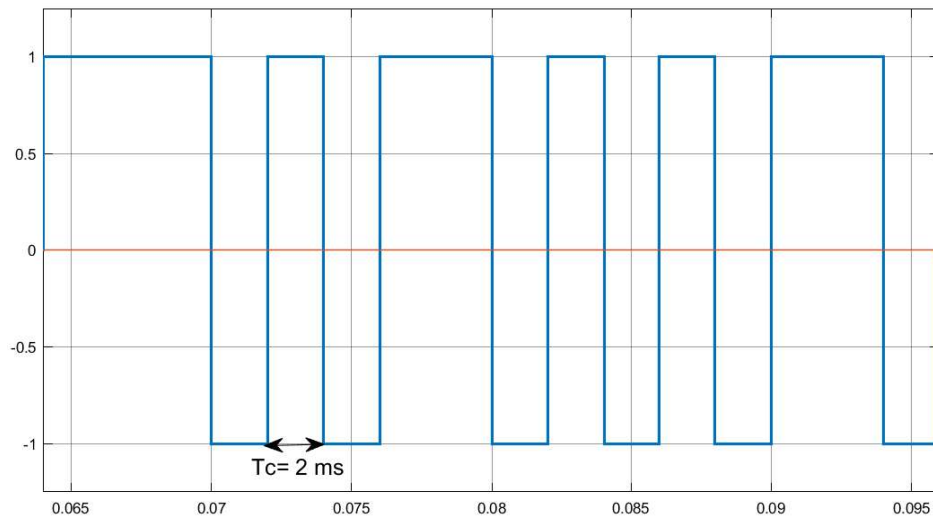


Figura 4.11. Acercamiento a la ráfaga del primer símbolo UWB-DS.

Acorde a los procedimientos descritos en el Capítulo 2, los símbolos UWB-DS son enviados utilizando un filtro RRC en transmisión, el cual por su comportamiento reduce la amplitud inicial de la ráfaga y aumenta su periodo. En la Figura 4.12. se observa el resultado del filtraje en transmisión de una ráfaga.

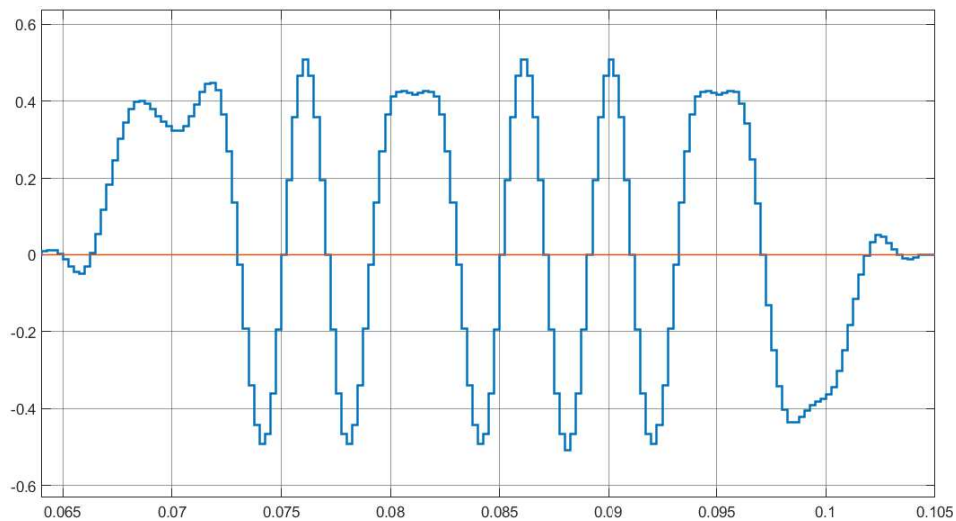


Figura 4.12. Ráfaga después del filtro RRC en transmisión.

La señal de la Figura 4.12. se envía por el canal AWGN, el cual la contamina con ruido. Cabe resaltar que para el ejemplo en cuestión, el canal AWGN es configurado a una SNR igual a 15 dB. En la Figura 4.13. se observa los efectos adversos que produce el canal en la señal y resalta donde se encuentra la ráfaga, la señal azul es la componente real y la roja la imaginaria.

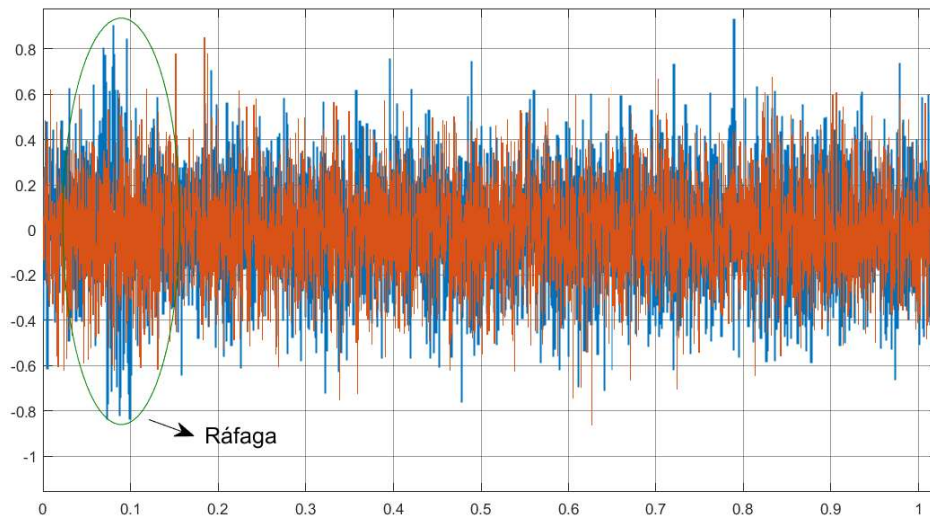


Figura 4.13. Símbolo UWB-DS contaminado con AWGN.

Luego, en el proceso de recepción, para reducir el ruido agregado por el canal AWGN, la señal se filtra a través de un filtro RRC en recepción, el cual limpia la señal contaminada e intenta recuperar la ráfaga inicial lo mejor posible, además, reduce la cantidad de muestras de la señal filtrada en transmisión (submuestreo) para recuperar la forma de los pulsos. En La Figura 4.14. se observan los resultados obtenidos del filtraje en recepción.

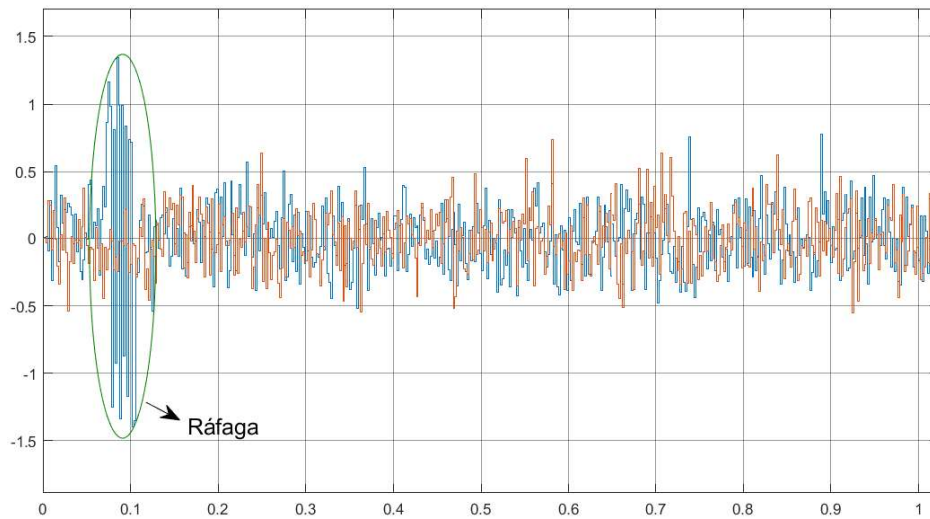
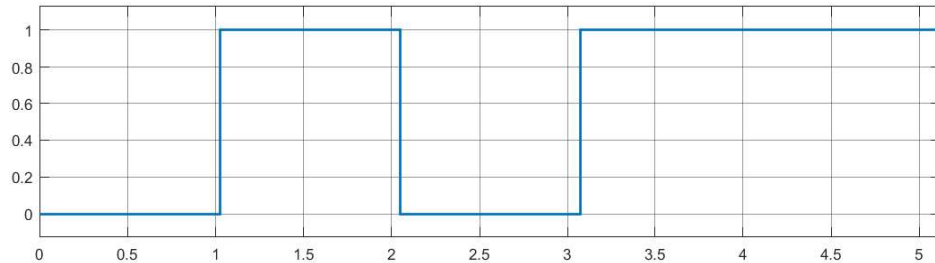


Figura 4.14. Símbolo UWB-DS después del filtro RRC en recepción.

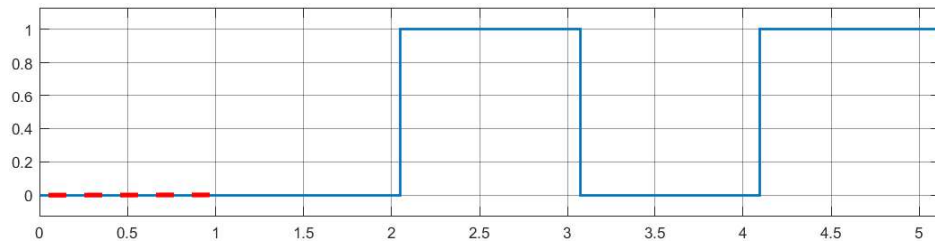
La señal de la Figura 4.14. ingresa al detector de energía, el cual recupera los bits posición g_0 que representan el campo de datos de usuario. La Figura 4.15.b muestra el resultado del detector de energía, los cuales se comparan con los bits



de posición g_0 de la Figura 4.15.a. Por motivos de diseño del detector de energía, el sistema de comunicación agrega un retardo de 1024 ms indicado por la línea punteada roja.



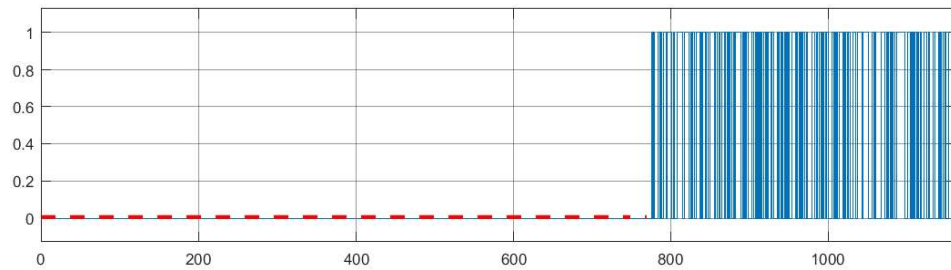
(a) Bits de posición g_0 generados en el proceso de transmisión que representan el campo de datos de usuario.



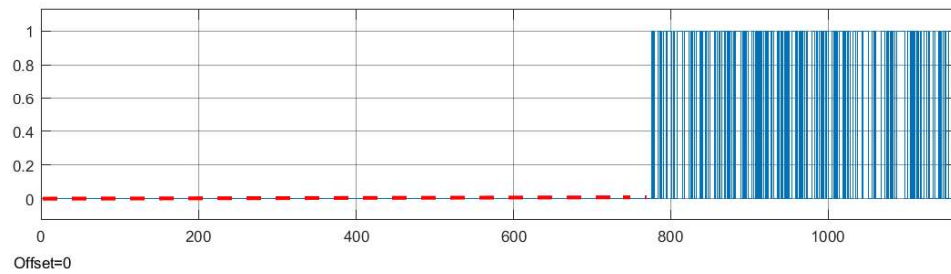
(b) Bits recuperados por el detector de energía en recepción.

Figura 4.15. Comparación de los bits de posición con los bits recuperados por el detector de energía.

Finalmente, después de la decodificación Reed-Solomon se obtiene la señal de datos original. La Figura 4.16.a indica la información de usuario original proveniente del generador de datos Bernoulli, y la Figura 4.16.b la información de usuario recuperada. El retardo que se observa se genera por los procesos tanto en transmisión como en recepción. La Figura 4.17. es un acercamiento al azar de la Figura 4.16., comparando los resultados se concluye que el sistema recupera los datos de usuario exitosamente.

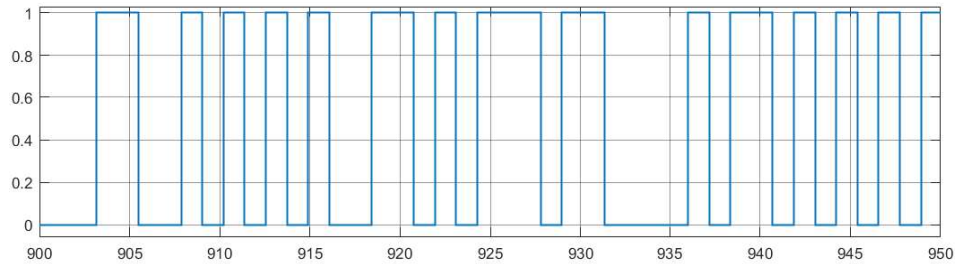


(a) Señal de información de usuario original.

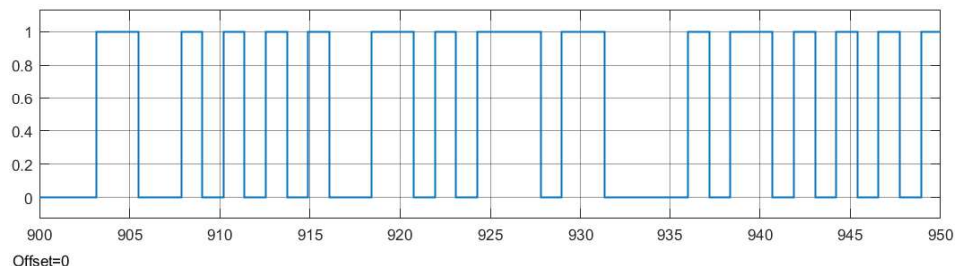


(b) Señal de información de usuario recuperada.

Figura 4.16. Señal de información de usuario en transmisión y recepción.



(a) Acercamiento de la señal de información de usuario original.



(b) Acercamiento de la señal de información de usuario recuperada.

Figura 4.17. Acercamiento de la señal de información de usuario en transmisión y recepción.



4.2. DIAGRAMAS DE OJO, CONSTELACIÓN, TRAYECTORIA Y ESPECTRO DE FRECUENCIAS

Para el análisis de señales en un sistema de comunicación, se obtienen del sub-sistema de visualización los diagramas de constelación, ojo, trayectoria y espectro de frecuencias para cada escenario planteado. Los resultados se muestran a continuación teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Canal AWGN con SNR igual a 15 dB.
- Para la visualización de los diagramas en tiempo y en frecuencia de la señal en los escenarios 1 y 4, se realiza dos tipos de transmisiones: en la primera se transmite una sola ráfaga por símbolo UWB-DS, como lo especifica el estándar, para analizar el espectro de frecuencias y los diagramas de constelación y trayectoria, cabe resaltar que no es posible un análisis del diagrama de ojo; y un segundo tipo de transmisión, en el cual se transmite las ráfagas de manera continua, para analizar además del espectro de frecuencias y los diagramas de constelación y trayectoria, el diagrama de ojo. En cuanto el escenario 2 y 3, se hace la visualización de diagramas para el primer tipo de transmisión (una sola ráfaga por símbolo UWB-DS), debido que al transmitir de manera continua se obtienen los mismos resultados que en el escenario 1. Los siguientes son los puntos de observación en los cuales se obtienen los diagramas de constelación, ojo, trayectoria y espectro de frecuencias en el sistema de comunicación UWB-DS:
 1. Antes del filtro RRC en transmisión.
 2. Antes del canal AWGN.
 3. Después del canal AWGN.
 4. Después del filtro RRC en recepción.

4.2.1. Escenario 1

4.2.1.1. Transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS

- a) **Espectro de frecuencias:** las Figuras 4.18., 4.19., 4.20. y 4.21. muestran los diagramas de espectro de frecuencias en los puntos de observación 1, 2, 3 y 4, respectivamente. Nótese que las figuras presentan los valores máximos de las componentes espectrales debido a que se transmite una ráfaga por símbolo UWB-DS (señal no continua). En la Figura 4.18. se aprecia que la señal tiene un ancho de banda de 500 Hz y que las componentes más significativas del lóbulo principal alcanzan una potencia de 10 dBm. En La Figura 4.19. se aprecia que el ancho de banda de la señal disminuye, esto debido a que el filtro RRC en transmisión atenúa componentes en frecuencia y además la



energía se redistribuye como consecuencia del sobremuestreo. En la Figura 4.20. se aprecia que el ruido producido por el canal AWGN cubre la señal. En la Figura 4.21. se aprecia que se recupera el ancho de banda de la señal, además, por el proceso de submuestreo, las componentes de la señal recuperan su energía, esto por los efectos del filtro RRC en recepción.

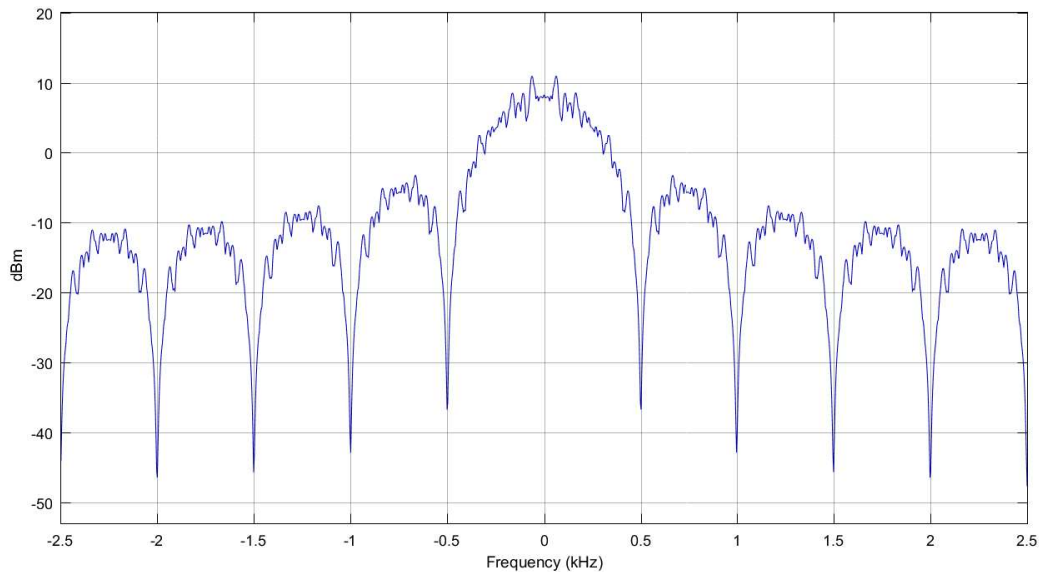


Figura 4.18. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 1 del escenario 1.

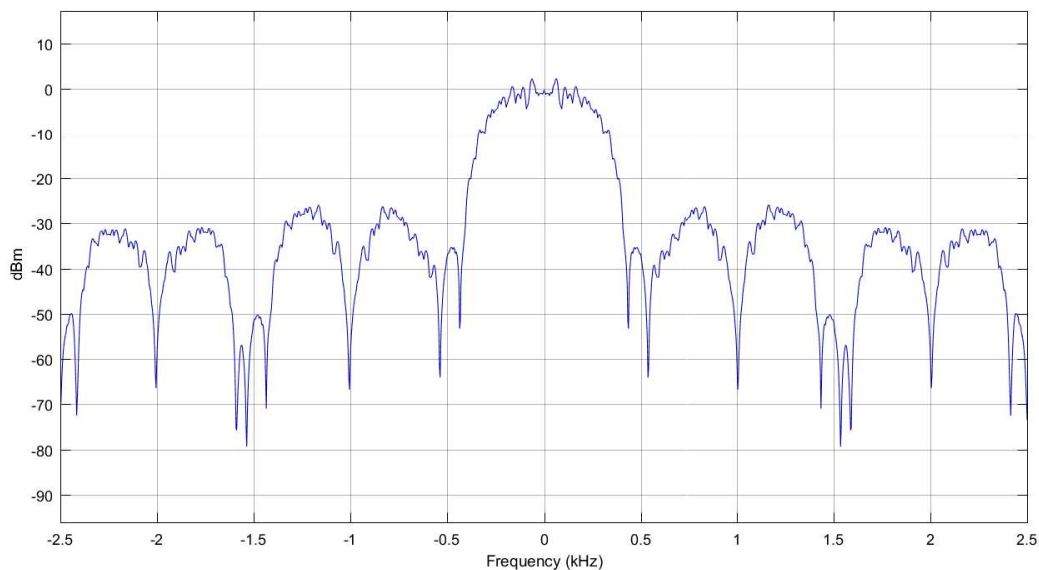


Figura 4.19. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 2 del escenario 1.

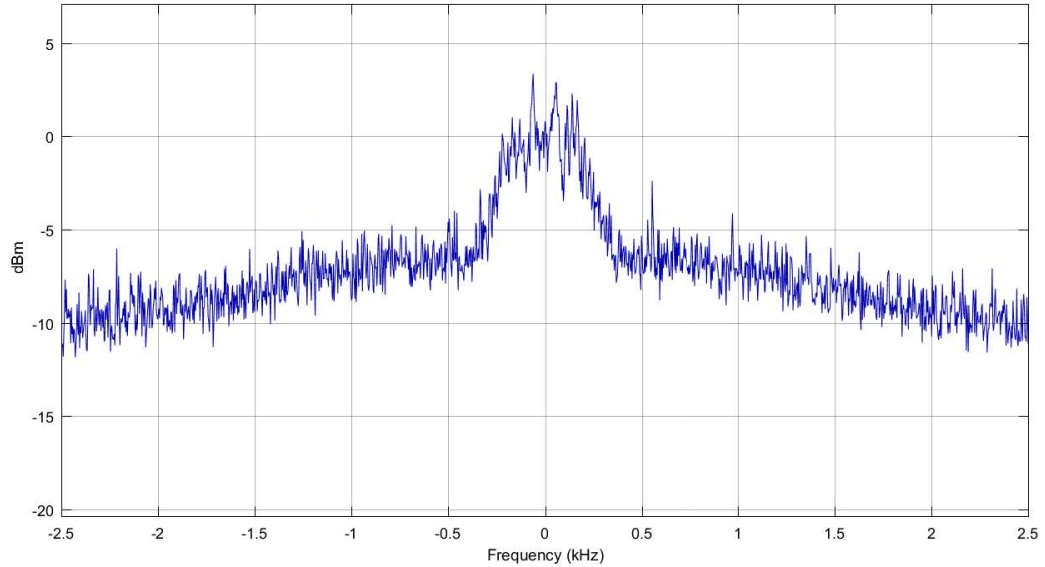


Figura 4.20. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 3 del escenario 1.

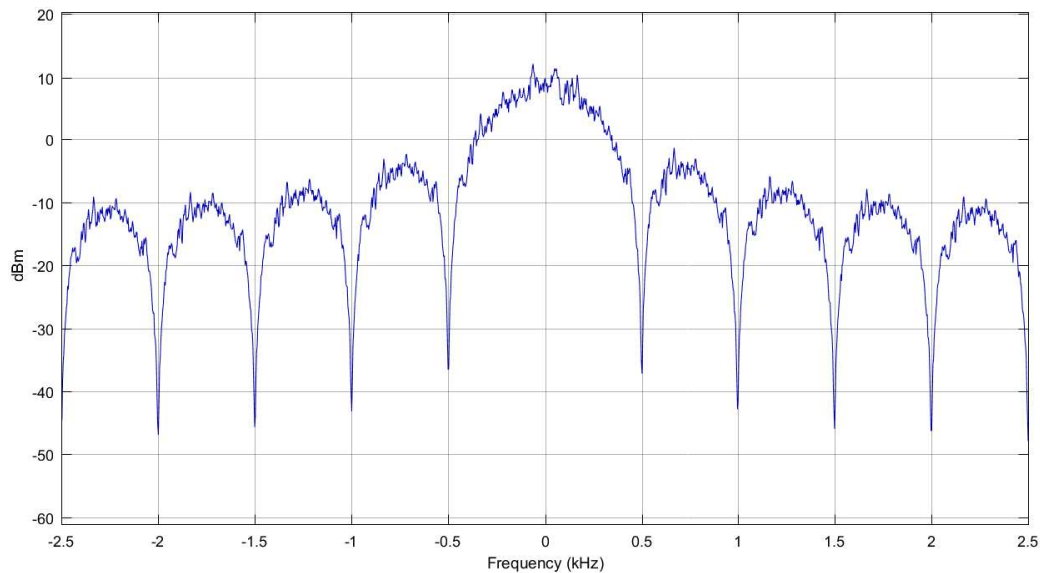


Figura 4.21. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 4 del escenario 1.

La Figura 4.22. muestra la máscara espectral de la Figura 1.15. sobre el espectro de frecuencias obtenido en el punto 2, ajustada a una frecuencia f_c igual a 4,5 kHz y redimensionada para los valores de la Tabla 2.1., donde se puede corroborar que el espectro de frecuencias de la señal se encuentra dentro de la máscara espectral, esto gracias al filtro RRC.

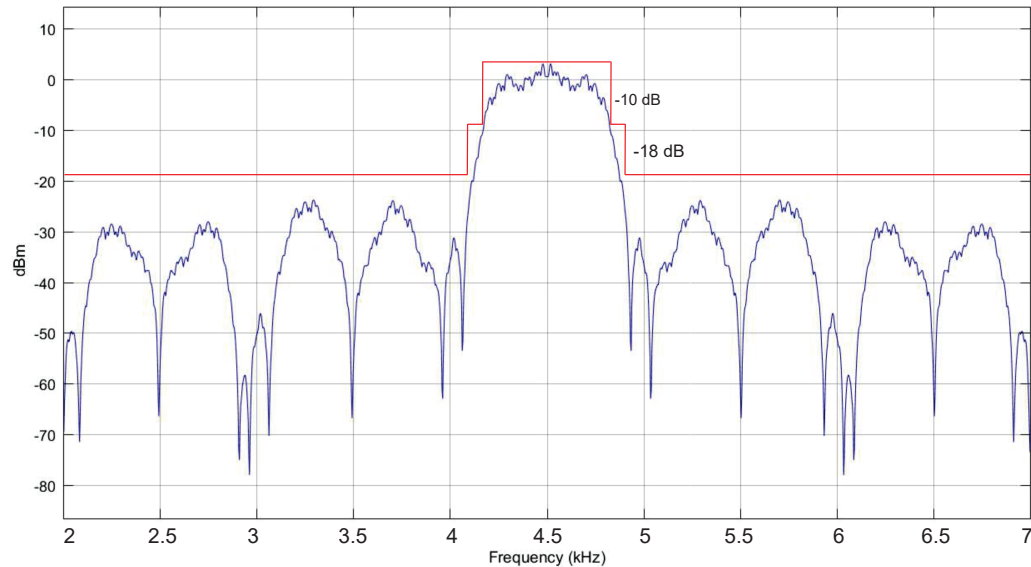
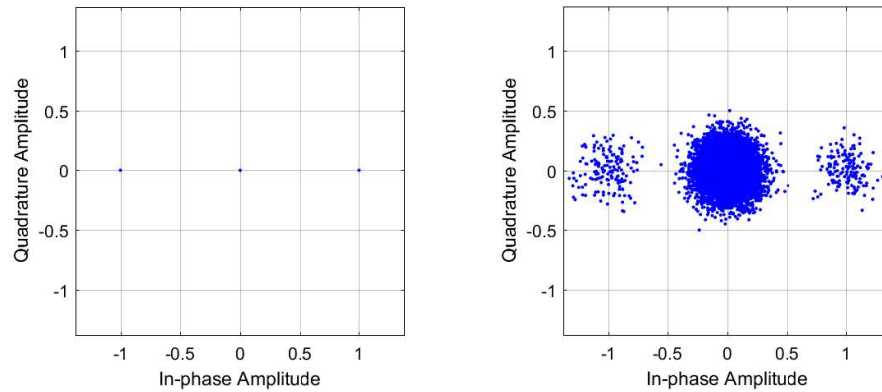


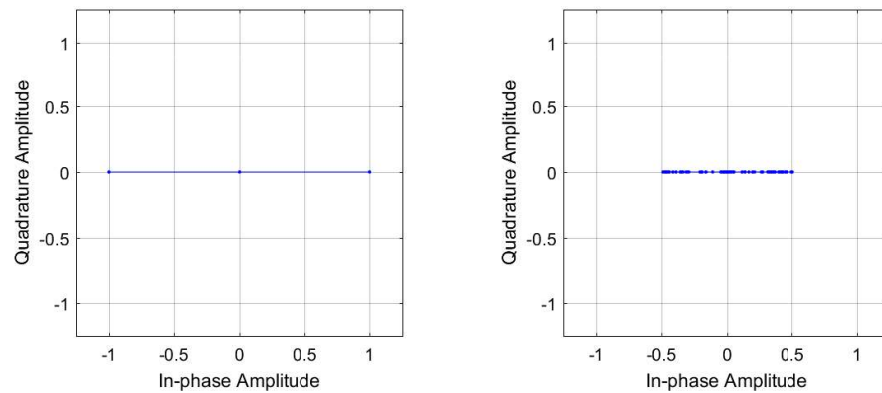
Figura 4.22. Máscara espectral sobre espectro de frecuencias del escenario 1.

b) Diagrama de constelación y trayectoria: la Figura 4.23. muestra los diagramas de constelación para BPM-BPSK obtenidos en los puntos de observación 1 y 4 en el escenario 1. La Figura 4.23.a muestra el diagrama de constelación obtenido en el punto 1, nótese que hay 3 estados a pesar de que la modulación es BPSK, lo cual es debido a que la señal corresponde a una ráfaga por símbolo UWB-DS y gran parte del tiempo permanece en cero, por lo tanto, el diagrama de constelación presenta los estados 1 y -1 por la modulación BPSK y el estado 0 por el periodo de tiempo donde el símbolo UWB-DS permanece inactivo. La Figura 4.23.b muestra el diagrama de constelación obtenido en el punto 4, nótese que el filtro RRC en recepción a disminuido en gran proporción el AWGN y recupera nuevamente la amplitud en fase de los estados iniciales. La Figura 4.24. muestra los diagramas de trayectoria obtenidos en los diferentes puntos de observación en el escenario 1.

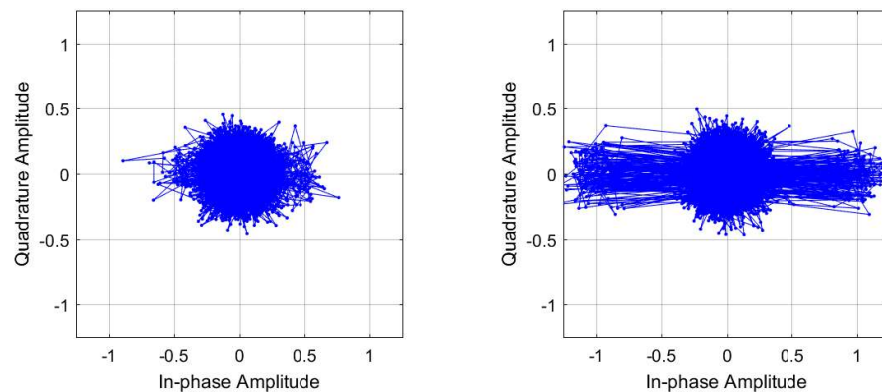


(a) Diagrama de constelación en punto 1. (b) Diagrama de constelación en punto 4.

Figura 4.23. Diagrama de constelación para BPM-BPSK con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el escenario 1.



(a) Diagrama de trayectoria en punto 1. (b) Diagrama de trayectoria en punto 2.



(c) Diagrama de trayectoria en punto 3. (d) Diagrama de trayectoria en punto 4.

Figura 4.24. Diagramas de trayectoria con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el escenario 1.

4.2.1.2. Transmisión de ráfagas de manera continua

a) **Espectro de frecuencias:** las Figuras 4.25., 4.26., 4.27. y 4.28. muestran los espectros de frecuencias en las etapas 1, 2, 3 y 4, respectivamente. A diferencia de los casos de transmisión de una ráfaga por símbolo, los diagramas no sostienen los valores máximos de las componentes espectrales debido a que se transmite ráfagas de manera continua. Su interpretación es la misma que para la Sección 4.2.1.1.a, debido a que cuenta con las mismas características.

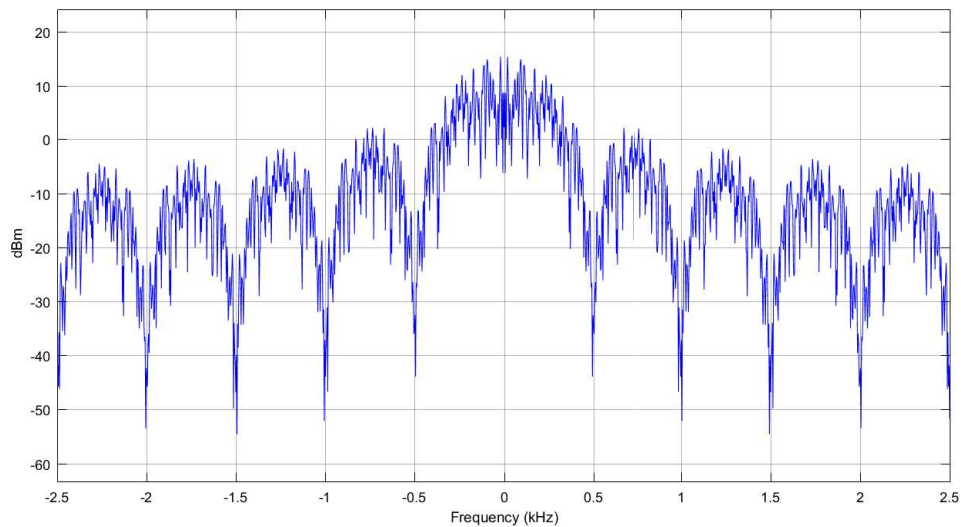


Figura 4.25. Espectro de frecuencias con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 1 del escenario 1.

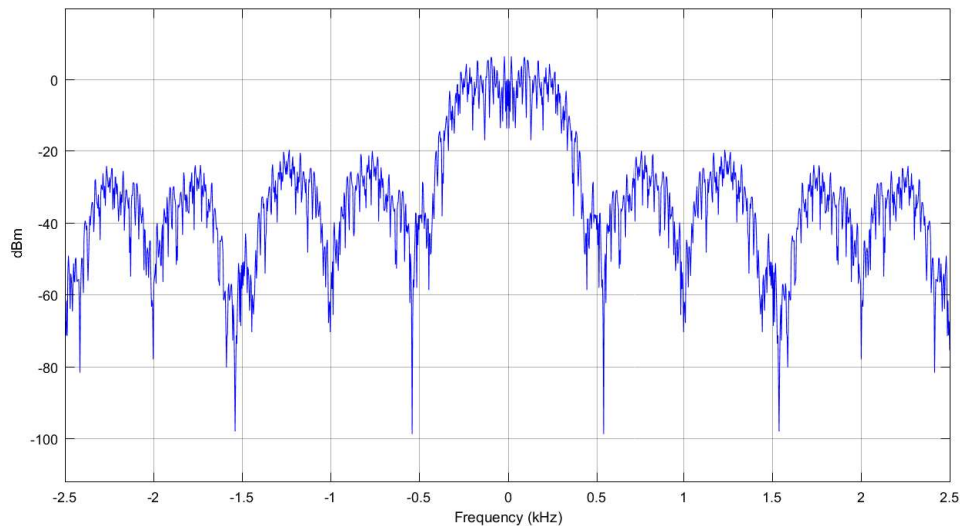


Figura 4.26. Espectro de frecuencias con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 2 del escenario 1.

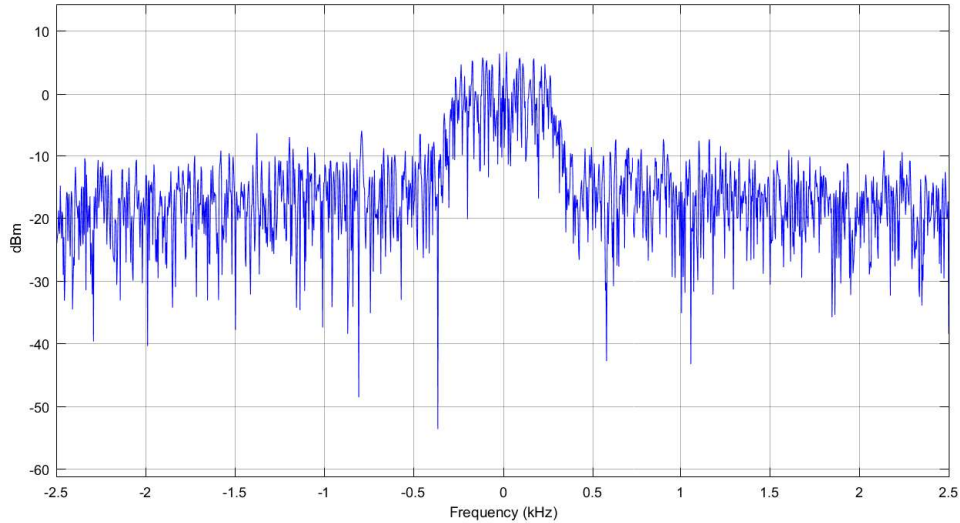


Figura 4.27. Espectro de frecuencias con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 3 del escenario 1.

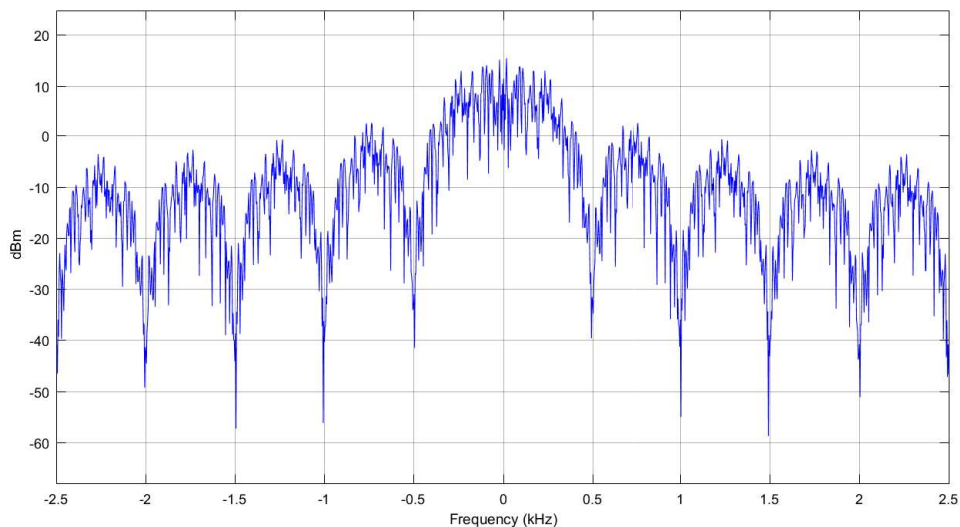
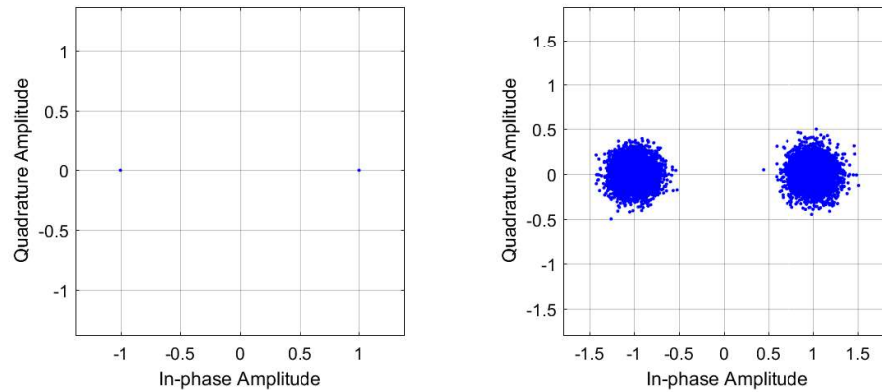


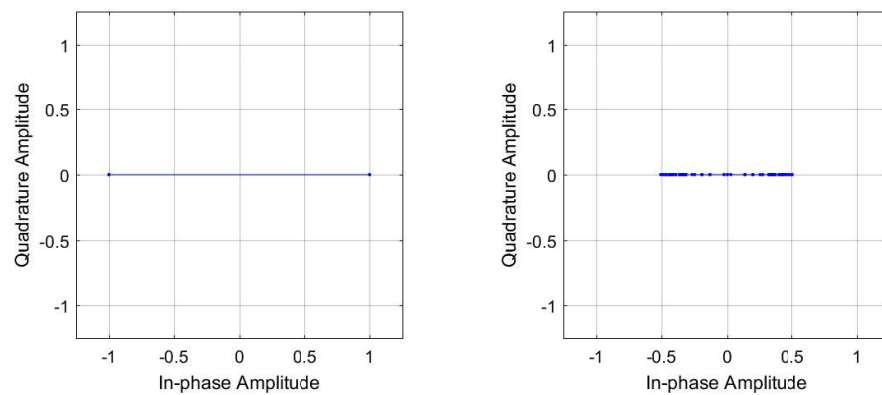
Figura 4.28. Espectro de frecuencias con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 4 del escenario 1.

b) Diagramas de constelación y trayectoria: la Figura 4.29. muestra los diagramas de constelación obtenidos en los puntos de observación 1 y 4 en el escenario 1. Su interpretación es la misma que para los diagramas de constelación de la Sección 4.2.1.1.b, puesto que cuenta con las mismas características, a diferencia de que para este caso hay dos estados que representan la modulación BPSK, esto es debido a que se transmiten ráfagas continuas, es decir, sólo se emiten 1 y -1, y no hay intervalos de tiempo inactivos. La Figura 4.30. muestra los diagramas de trayectoria obtenidos en los puntos de observación.

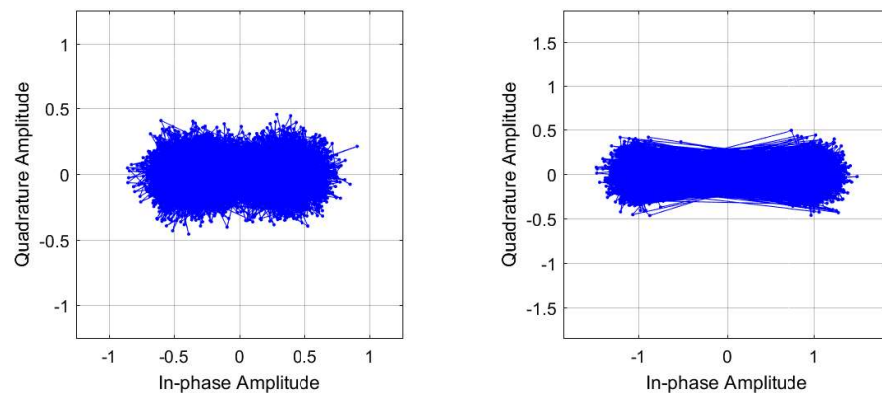


(a) Diagrama de constelación en punto 1. (b) Diagrama de constelación en punto 4.

Figura 4.29. Diagramas de constelación para BPM-BPSK con transmisión de ráfagas de manera continua en el escenario 1.



(a) Diagrama de trayectoria en punto 1. (b) Diagrama de trayectoria en punto 2.



(c) Diagrama de trayectoria en punto 3. (d) Diagrama de trayectoria en punto 4.

Figura 4.30. Diagramas de trayectoria con transmisión de ráfagas de manera continua en el escenario 1.

c) **Diagrama de ojo:** las Figuras 4.31., 4.32., 4.33. y 4.34., muestran los diagramas de ojo visualizados en los puntos de observación 1, 2, 3 y 4, respectivamente. En la Figura 4.31. nótese que el diagrama toma valores de amplitud en el eje real de -1 y 1, puesto que son los valores que toman los pulsos después de la modulación BMP-BPSK, además, la apertura del ojo tiene un periodo igual a 2 ms, indicando el periodo de cada pulso (T_c). En la Figura 4.32. se aprecia el efecto que produce el filtro RRC en transmisión, en donde el ojo toma una forma ovalada y la amplitud disminuye, características típicas en diagramas de ojo en sistemas de comunicación con filtros de este tipo. En la Figura 4.33. nótese que la señal que se transmite ha sido contaminada con AWGN, tanto en las componentes reales como en las imaginarias. En la Figura 4.34. se aprecia la señal transmitida que ha atravesado el filtro RRC en recepción, la cual recupera la forma de onda inicial con una disminución considerable de AWGN y la amplitud vuelve a tomar valores aproximados de 1 y -1.

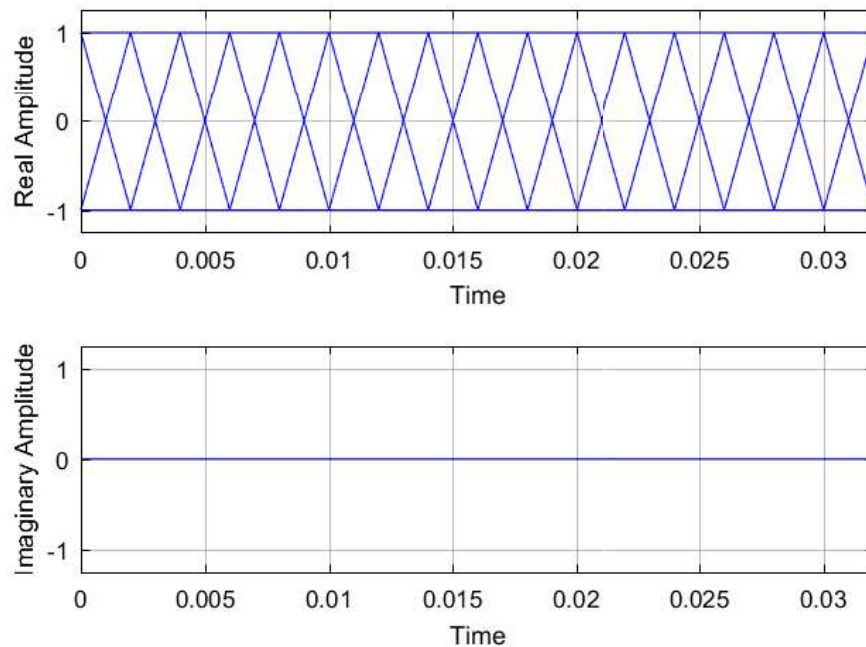


Figura 4.31. Diagrama de ojo con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 1 del escenario 1.

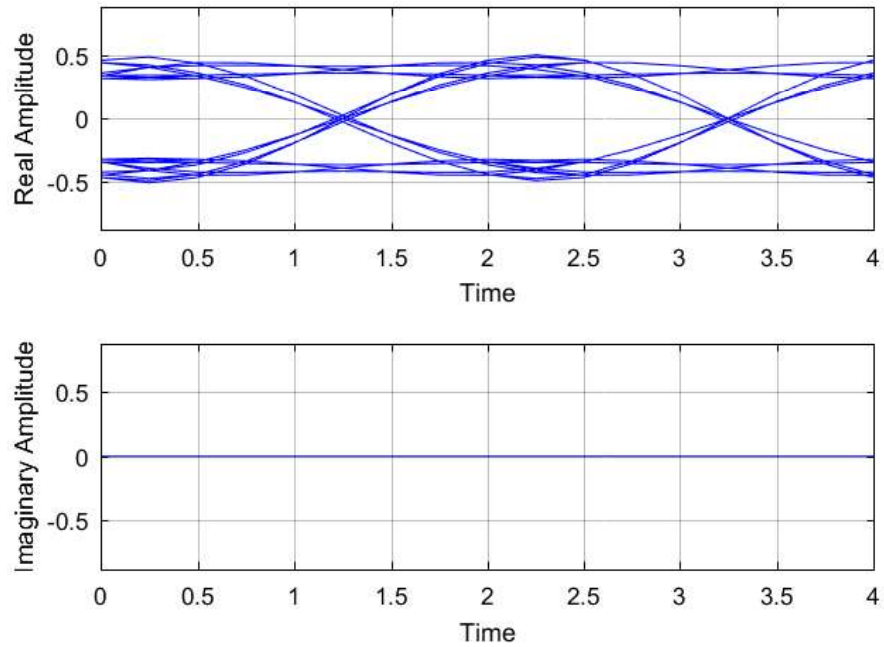


Figura 4.32. Diagrama de ojo con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 2 del escenario 1.

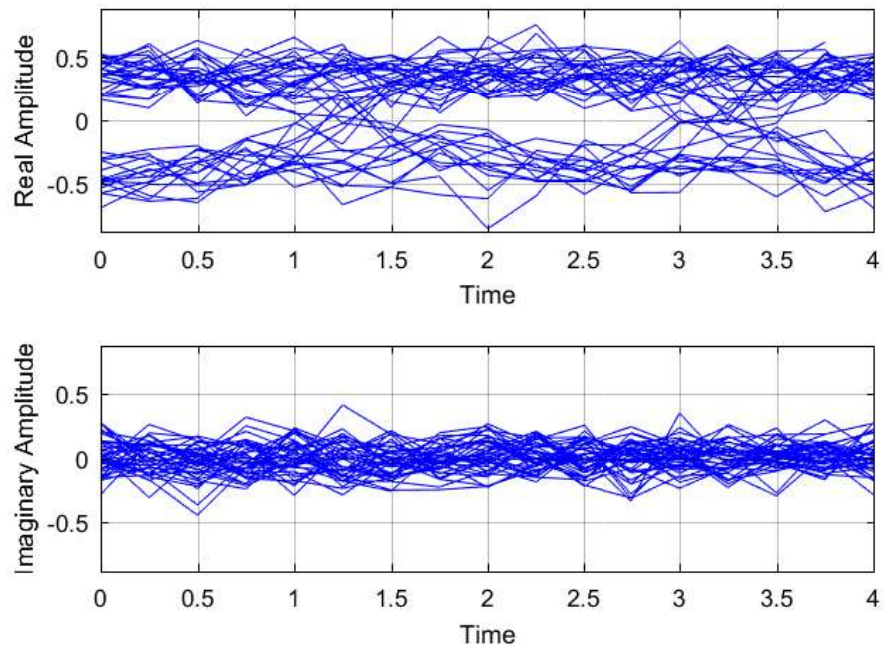


Figura 4.33. Diagrama de ojo con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 3 del escenario 1.

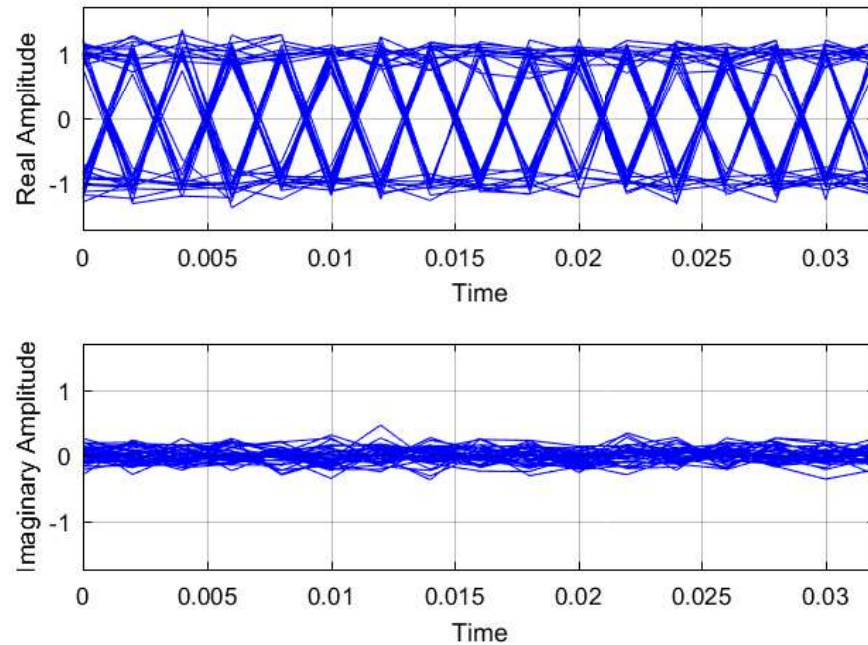


Figura 4.34. Diagrama de ojo con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 4 del escenario 1.

4.2.2. Escenario 2

4.2.2.1. Transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS

- a) **Espectro de frecuencias:** las Figuras 4.35. y 4.36. muestran los diagramas de espectro de frecuencias en los puntos de observación 2 y 3, respectivamente. Nótese que las figuras presentan los valores máximos de las componentes espectrales debido a que se transmite una ráfaga por símbolo UWB-DS (señal no continua). En la Figura 4.35. se aprecia que la señal tiene un ancho de banda de 500 Hz y que las componentes más significativas del lóbulo principal alcanzan una potencia de 10 dBm. En La Figura 4.36. se observa una señal con las mismas características de la señal que se transmite afectada por el canal AWGN.

La Figura 4.37. muestra la máscara espectral teórica de la Figura 1.15. sobre el espectro de frecuencias obtenido en el punto 2, ajustada a una frecuencia f_c igual a 4,5 kHz y redimensionada para los valores de la Tabla 2.1., en la cual se observa que la señal UWB-DS no está dentro de la máscara espectral, puesto que las caídas a -10 dB y -18 dB no ocurren en los rangos de frecuencias establecidos.

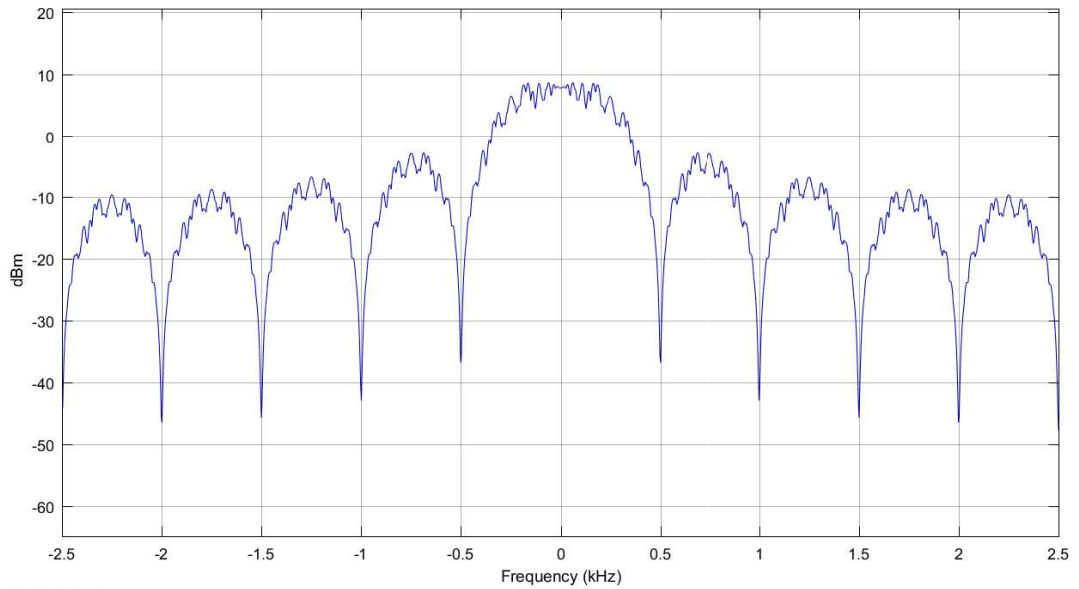


Figura 4.35. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 2 del escenario 2.

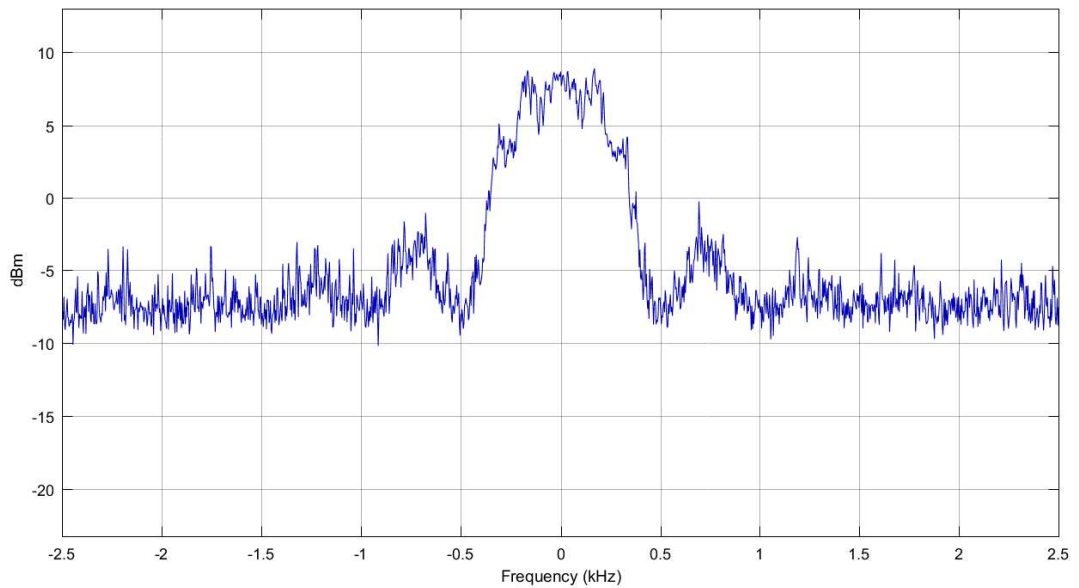


Figura 4.36. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 3 del escenario 2.

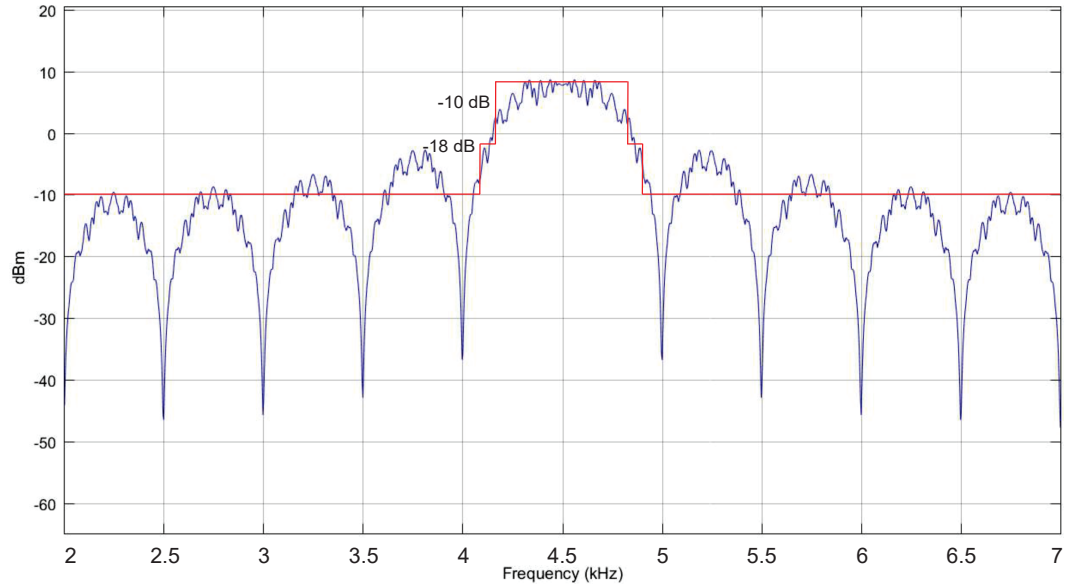
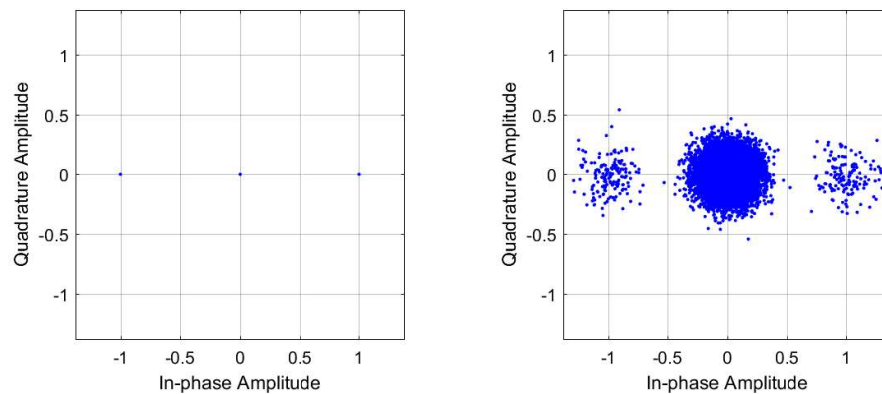


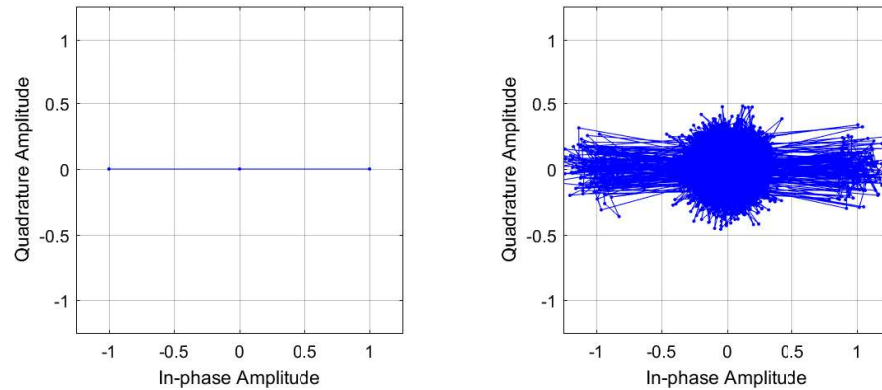
Figura 4.37. Máscara espectral sobre espectro de frecuencias del escenario 2.

b) Diagramas de constelación y trayectoria: la Figura 4.38. muestra los diagramas de constelación para BPM-BPSK obtenidos en los puntos de observación 2 y 3. Su interpretación es la misma que para los diagramas de constelación expuestos en la Sección 4.2.1.1.b, puesto que cuenta con las mismas características. La Figura 4.38. muestra los diagramas de trayectoria para obtenidos en los puntos de observación 2 y 3.



(a) Diagrama de constelación en punto 2. (b) Diagrama de constelación en punto 3.

Figura 4.38. Diagramas de constelación para BPM-BPSK con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el escenario 2.



(a) Diagrama de trayectoria en punto 2. (b) Diagrama de trayectoria en punto 3.

Figura 4.39. Diagramas de trayectoria con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el escenario 2.

4.2.3. Escenario 3

4.2.3.1. Transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS

a) **Espectro de frecuencias:** las Figuras 4.40., 4.41., 4.42. y 4.43. muestran los espectros de frecuencias en los puntos 1, 2, 3 y 4, respectivamente. Su interpretación es la misma que para los espectros de frecuencias expuestos en la Sección 4.2.1.1.a, puesto que cuenta con las mismas características.

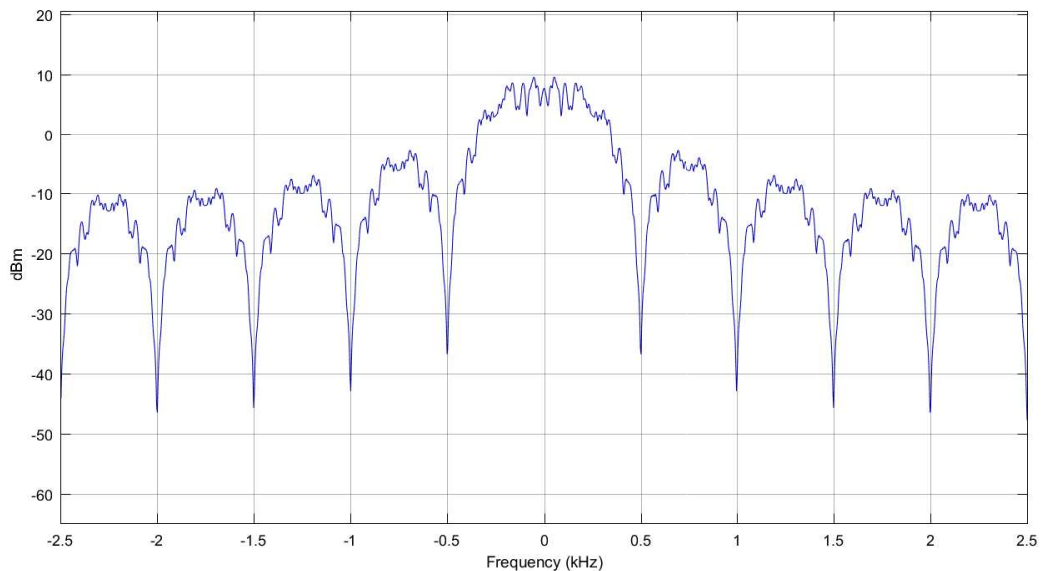


Figura 4.40. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 1 del escenario 3.

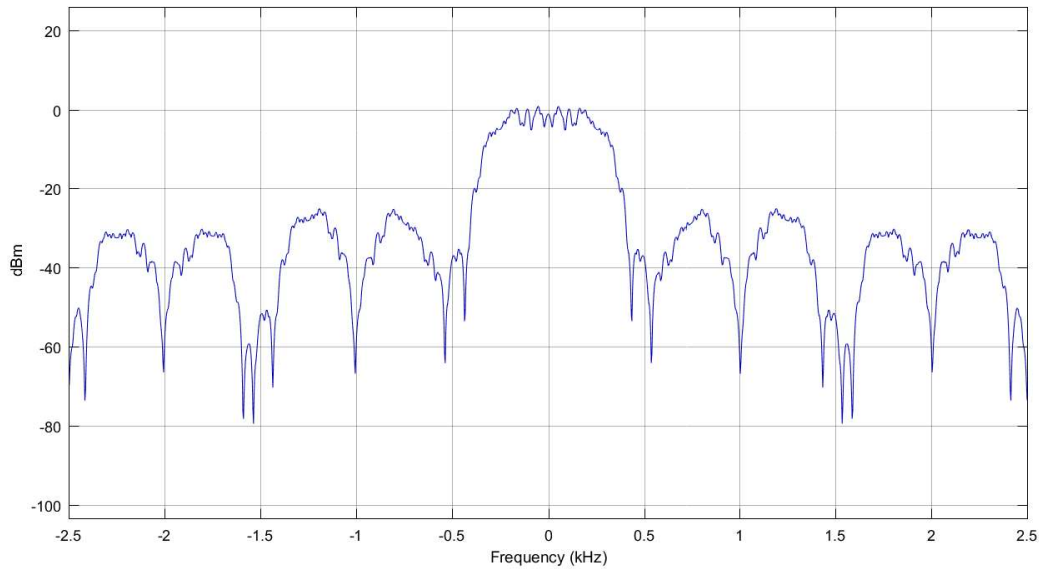


Figura 4.41. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 2 del escenario 3.

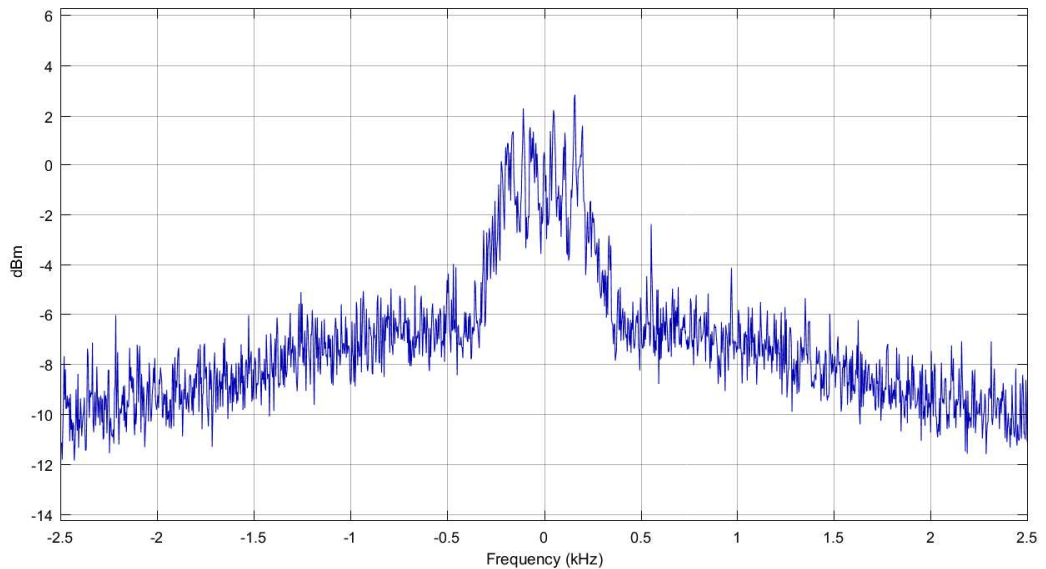


Figura 4.42. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 3 del escenario 3.

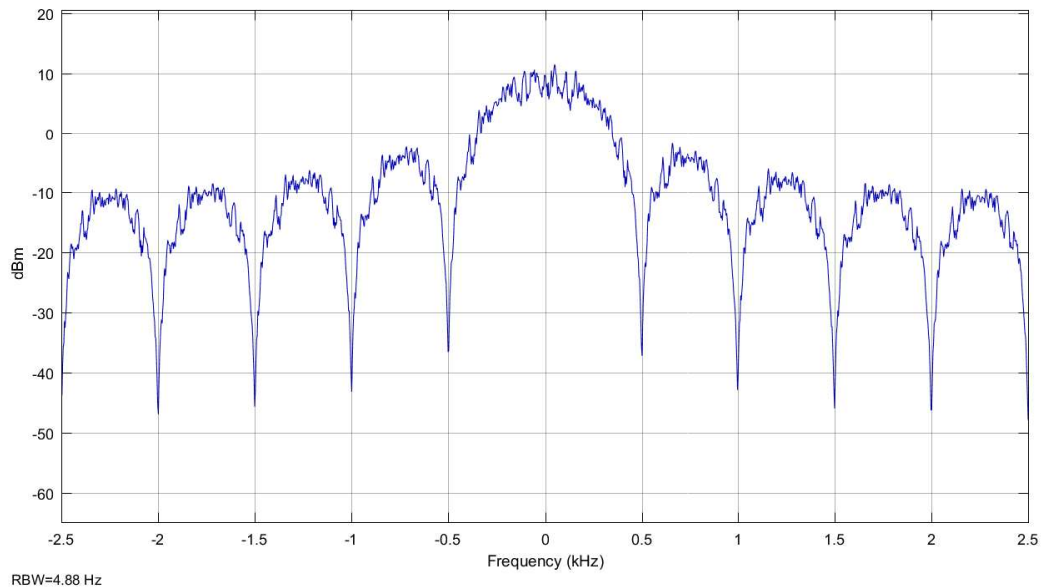
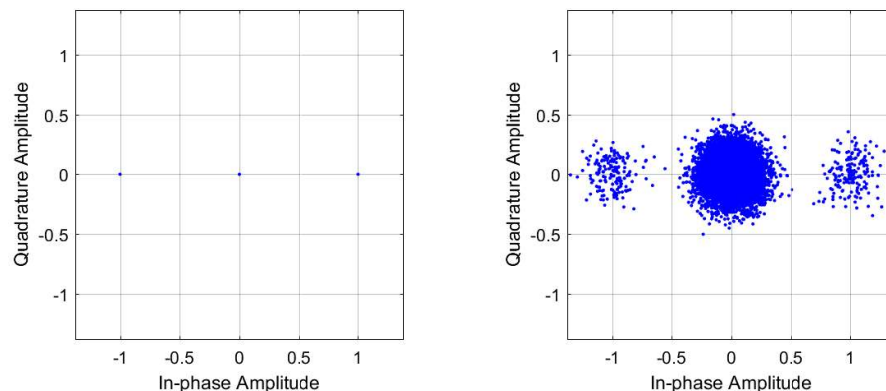


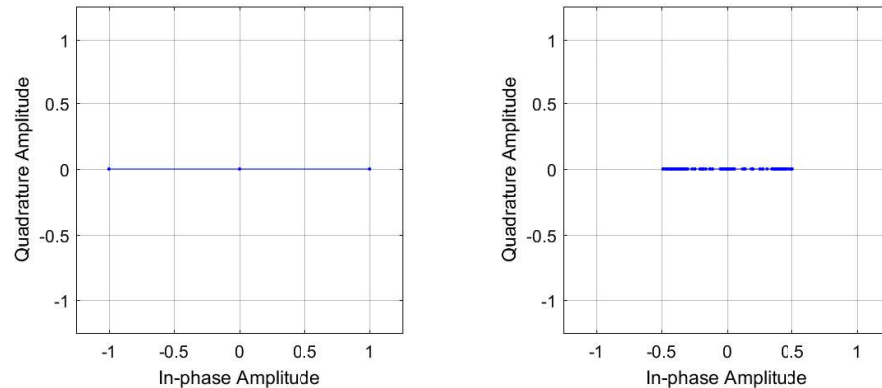
Figura 4.43. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 4 del escenario 3.

b) Diagramas de constelación y trayectoria: la Figura 4.44. muestra los diagramas de constelación de BPM-BPSK obtenidos en los puntos de observación 1 y 4 en el escenario 3. Su interpretación es la misma que para los diagramas de constelación del escenario 1 expuestos en la Sección 4.2.1.1.b, debido a que cuenta con las mismas características. La Figura 4.45. muestra los diagramas de trayectoria obtenidos en los diferentes puntos de observación en el escenario 3.

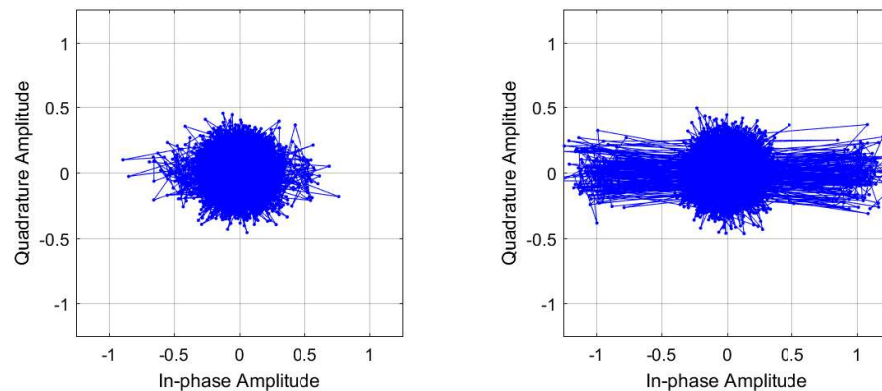


(a) Diagrama de constelación en punto 1. (b) Diagrama de constelación en punto 4.

Figura 4.44. Diagramas de constelación para BPM-BPSK con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el escenario 3.



(a) Diagrama de trayectoria en punto 1. (b) Diagrama de trayectoria en punto 2.



(c) Diagrama de trayectoria en punto 3. (d) Diagrama de trayectoria en punto 4.

Figura 4.45. Diagramas de trayectoria con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el escenario 3.

4.2.4. Escenario 4

4.2.4.1. Transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS

a) **Espectro de frecuencias:** las Figuras 4.46., 4.47., 4.48. y 4.49. muestran los diagramas de espectro de frecuencias en los puntos de observación 1, 2, 3 y 4, respectivamente. Nótese que las figuras presentan los valores máximos de las componentes espectrales debido a que se transmite una ráfaga por símbolo UWB-DS (señal no continua). En la Figura 4.46. se observa que los nulos están presentes cada 500 Hz, quiere decir que la señal tienen un ancho de banda de ese valor, además, las componentes más significativas del lóbulo principal alcanzan una potencia de 10 dBm. En La Figura 4.47. por los efectos del filtro RRC en transmisión, se aprecia que el ancho de banda de la señal disminuye como resultado de la atenuación de componentes en frecuencia y la energía se redistribuye como consecuencia del sobremuestreo. En la Figura 4.48. se aprecia que el ruido producido por el canal AWGN cubre la señal. En la Figura



4.49. se observa que se recupera el ancho de banda de la señal, además, por el proceso de submuestreo, las componentes de la señal recuperan su energía, esto por los efectos del filtro RRC en recepción.

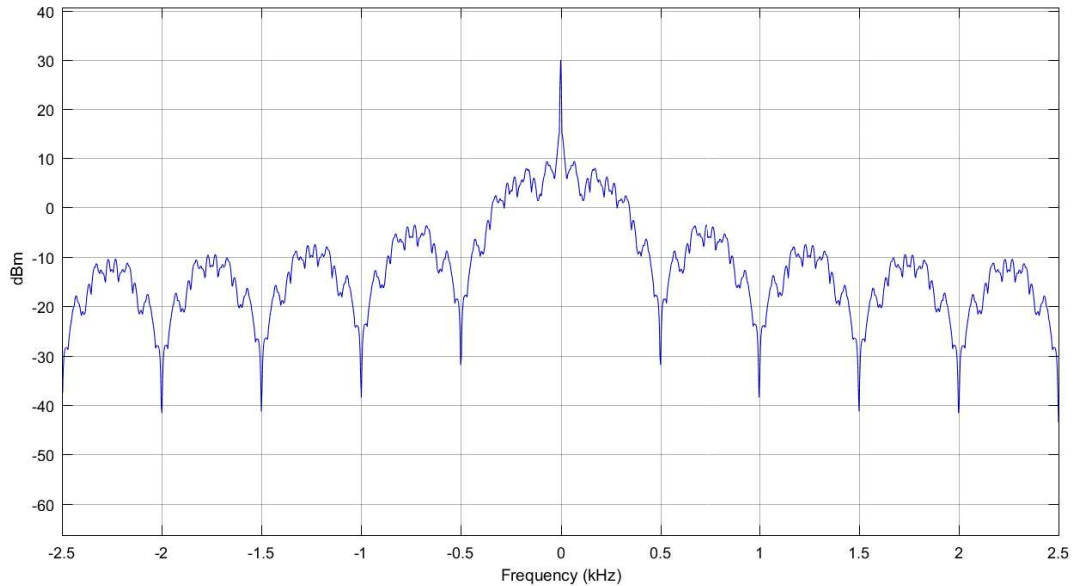


Figura 4.46. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 1 del escenario 4.

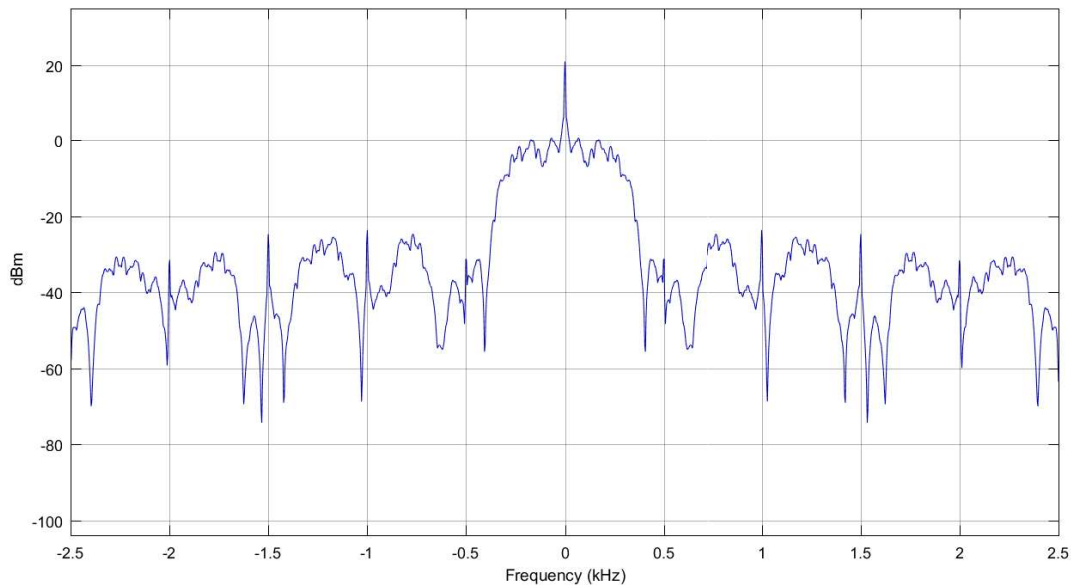


Figura 4.47. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 2 del escenario 4.

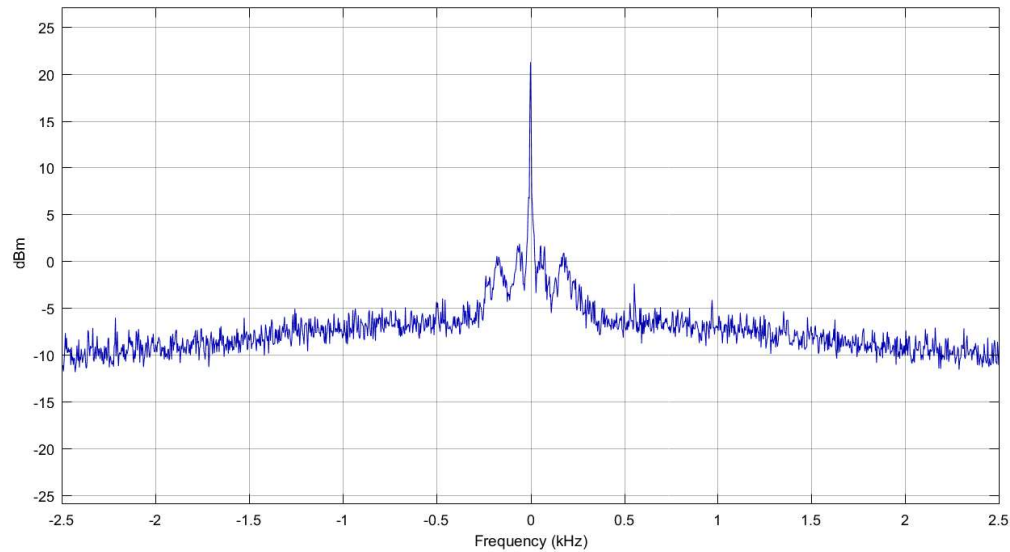


Figura 4.48. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 3 del escenario 4.

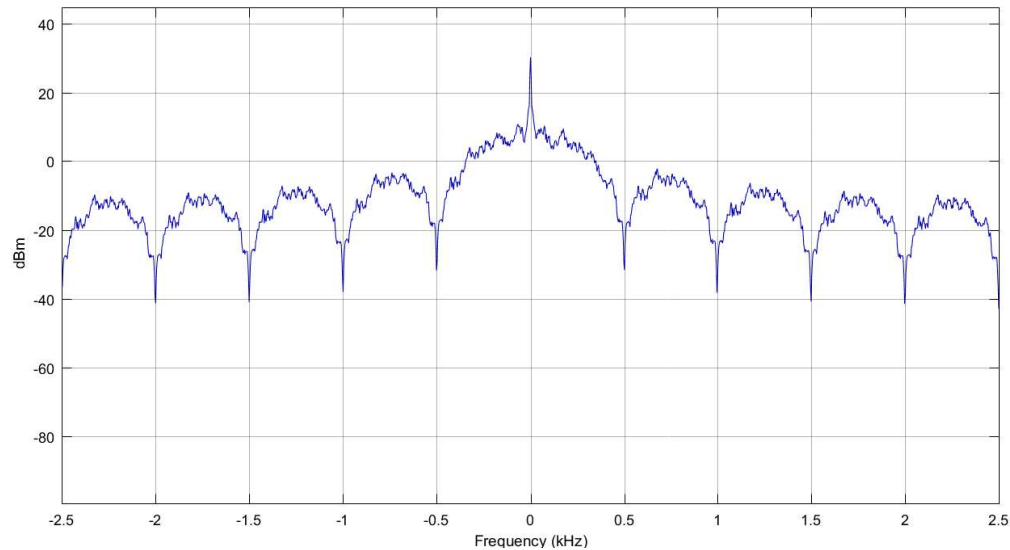


Figura 4.49. Espectro de frecuencias con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el punto 4 del escenario 4.

La Figura 4.50. muestra la máscara espectral teórica de la Figura 1.15. sobre el espectro de frecuencias obtenido en el punto 2, ajustada a una frecuencia f_c igual a 4,5 kHz, y redimensionada para los valores de la Tabla 2.1., en la cual se observa que el espectro de la señal UWB-DS no está dentro de la máscara, puesto que las caídas a -10 dB y -18 dB no ocurren en los rangos de frecuencias establecidos.

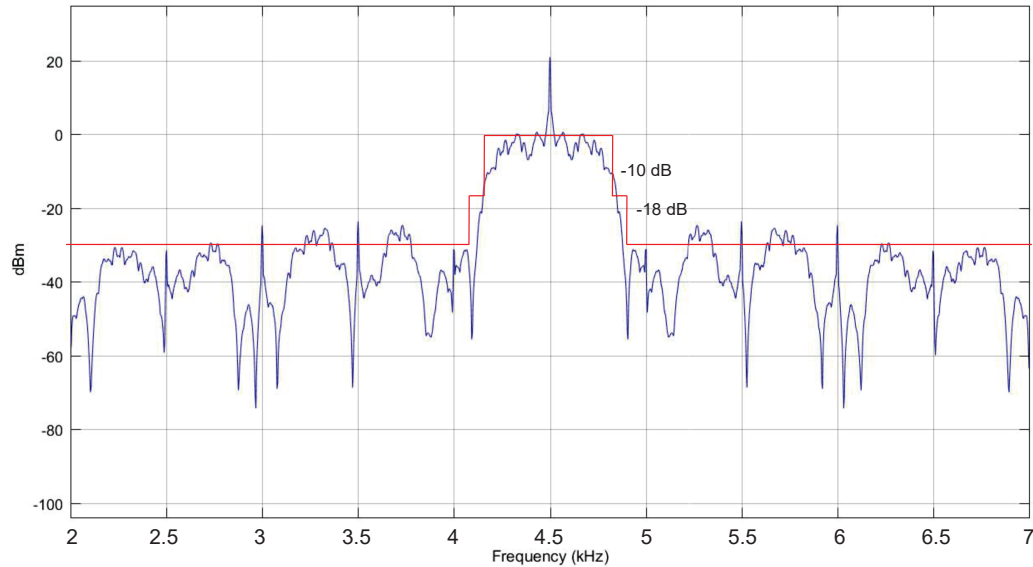
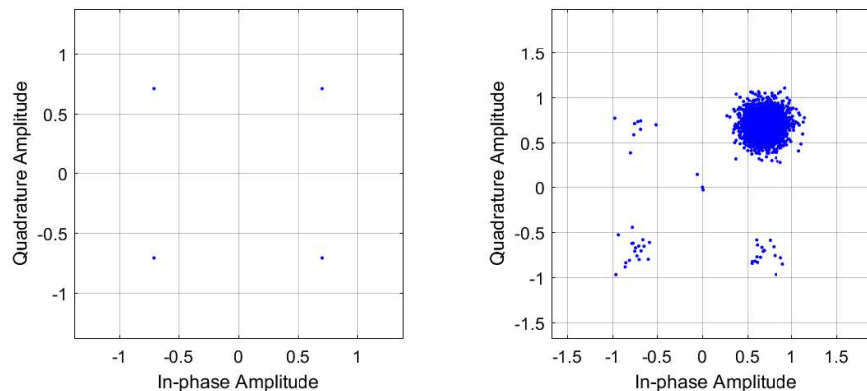


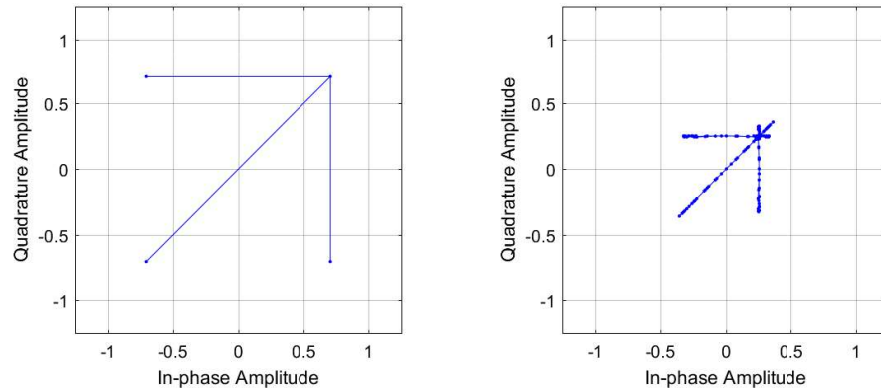
Figura 4.50. Máscara espectral sobre espectro de frecuencias del escenario 4.

b) **Diagramas de constelación y trayectoria:** la Figura 4.51. muestra los diagramas de constelación para BPM-QPSK obtenidos en los puntos de observación 1 y 4 en el escenario 4. La Figura 4.51.a muestra el diagrama de constelación obtenido en el punto 1, nótese que hay 4 estados: $\pm \frac{\sqrt{2}}{2} \pm \frac{\sqrt{2}}{2}j$ propios de la modulación QPSK. La Figura 4.51.b muestra el diagrama de constelación obtenido en el punto 4, en la cual se puede apreciar los símbolos de modulación con su correspondiente amplitud en fase y cuadratura, y la disminución considerable del AWGN. La Figura 4.52. muestra los diagramas de trayectoria obtenidos en los diferentes puntos de observación en el escenario 4.

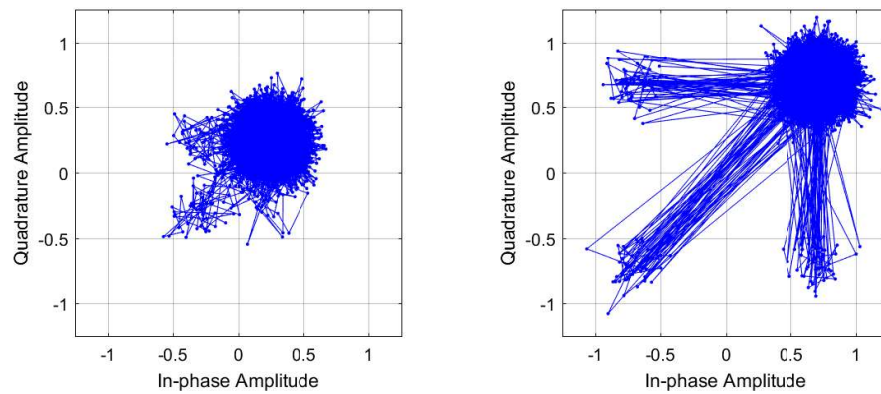


(a) Diagrama de constelación en punto 1. (b) Diagrama de constelación en punto 4.

Figura 4.51. Diagramas de constelación para BPM-QPSK con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el escenario 4.



(a) Diagrama de trayectoria en punto 1. (b) Diagrama de trayectoria en punto 2.



(c) Diagrama de trayectoria en punto 3. (d) Diagrama de trayectoria en punto 4.

Figura 4.52. Diagramas de trayectoria con transmisión de una ráfaga por símbolo UWB-DS en el escenario 4.

4.2.4.2. Transmisión de ráfagas de manera continua

- a) **Espectro de frecuencias:** las Figuras 4.53., 4.54., 4.55. y 4.56. muestran los espectros de frecuencias en los puntos 1, 2, 3 y 4, respectivamente. Su interpretación es la misma que para los espectros de frecuencias expuestos en la Sección 4.2.4.1.a, puesto que cuenta con las mismas características.

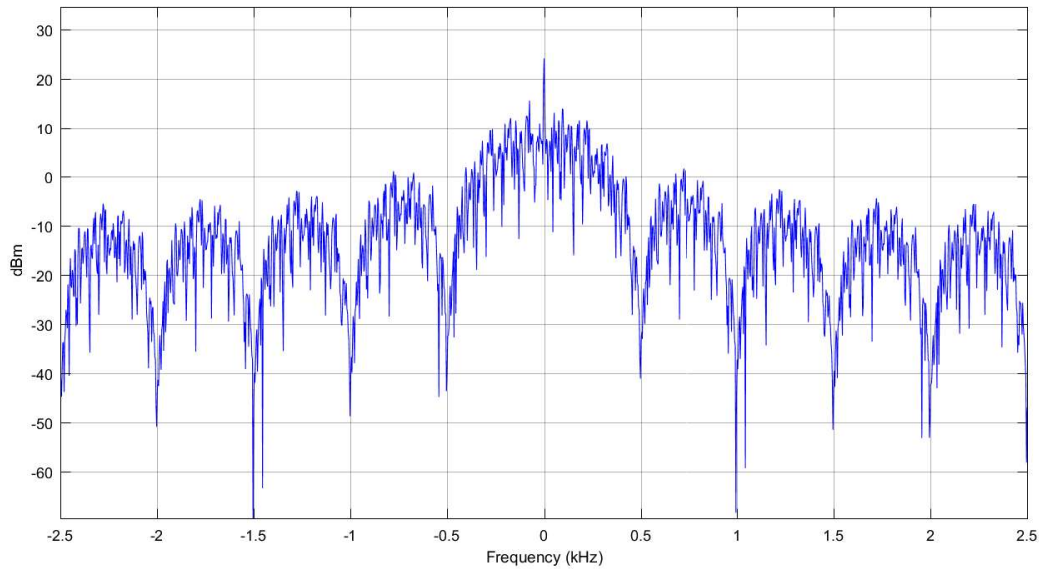


Figura 4.53. Espectro de frecuencias con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 1 del escenario 4.

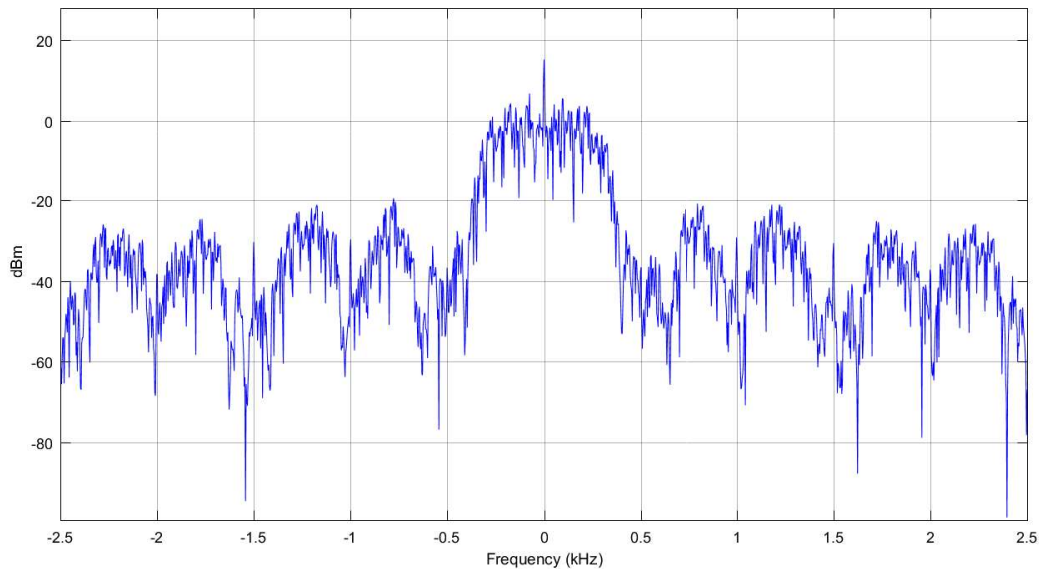


Figura 4.54. Espectro de frecuencias con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 2 del escenario 4.

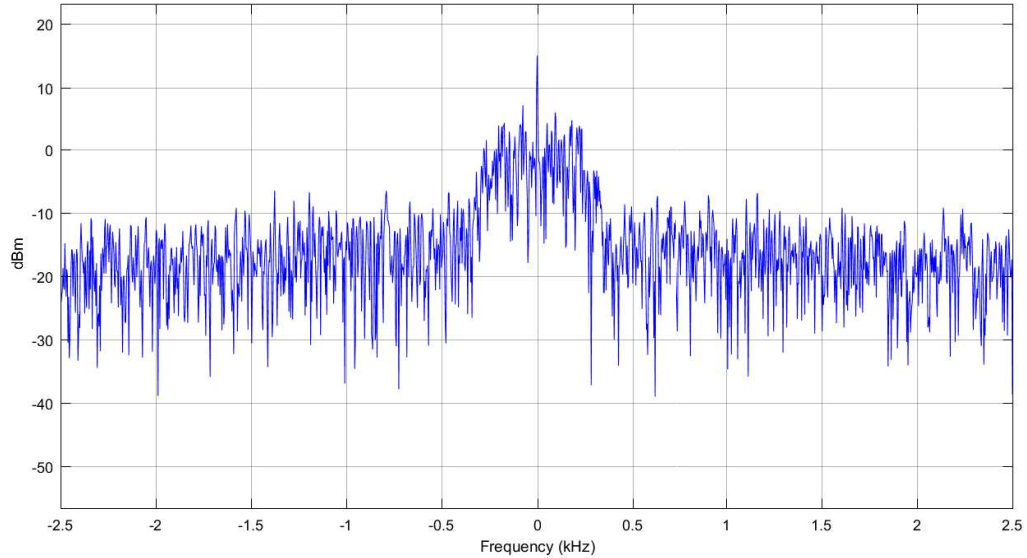


Figura 4.55. Espectro de frecuencias con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 3 del escenario 4.

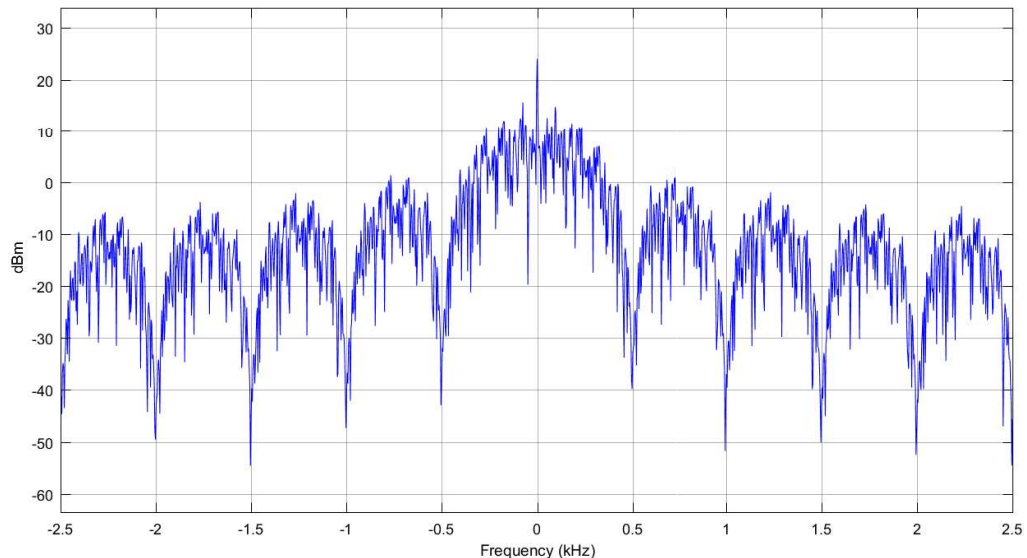
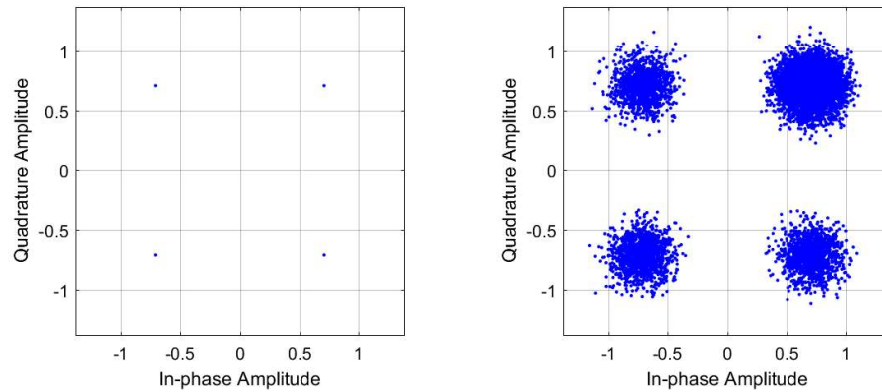


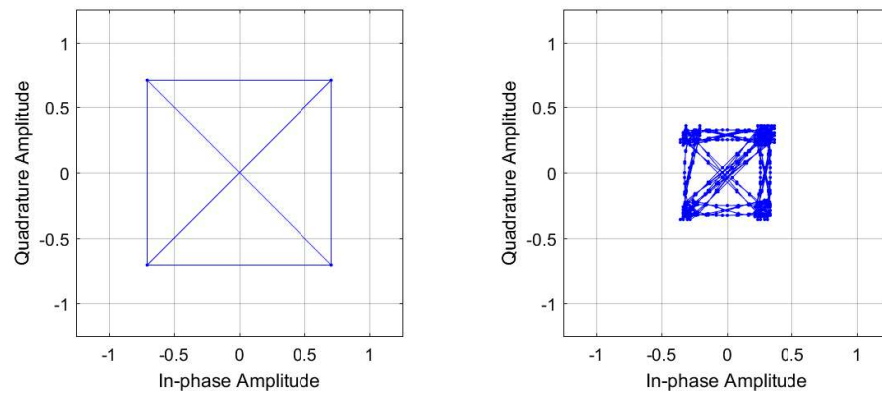
Figura 4.56. Espectro de frecuencias con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 4 del escenario 4.

b) Diagramas de constelación y trayectoria: la Figura 4.57. muestra los diagramas de constelación para BPM-QPSK obtenidos en los puntos de observación 1 y 4 en el escenario 4. Su interpretación es la misma que para los diagramas de constelación de la Sección 4.2.4.1.b, puesto que cuenta con las mismas características. La Figura 4.58. muestra los diagramas de trayectoria obtenidos en los 4 puntos de observación en el escenario 4.

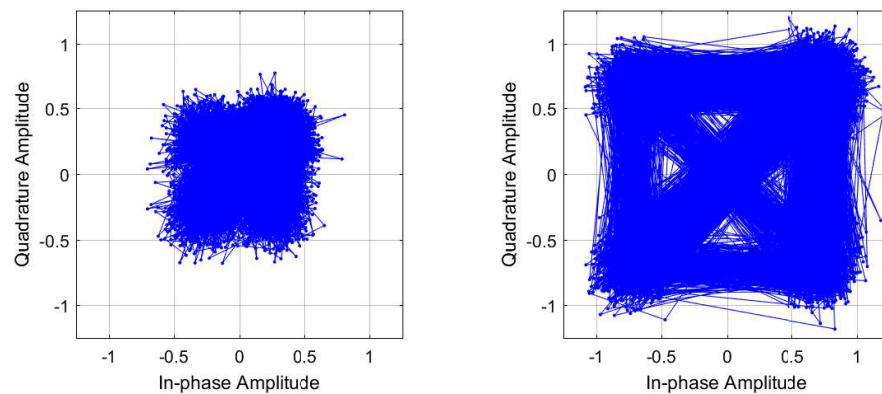


(a) Diagrama de constelación en punto 1. (b) Diagrama de constelación en punto 4.

Figura 4.57. Diagramas de constelación para BPM-QPSK con transmisión de ráfagas de manera continua en el escenario 4.



(a) Diagrama de trayectoria en punto 1. (b) Diagrama de trayectoria en punto 2.



(c) Diagrama de trayectoria en punto 3. (d) Diagrama de trayectoria en punto 4.

Figura 4.58. Diagramas de trayectoria con transmisión de ráfagas de manera continua en el escenario 4.

c) **Diagrama de ojo:** las Figuras 4.59., 4.60., 4.61. y 4.62., muestran los diagramas de ojo visualizados en los puntos de observación 1, 2, 3 y 4, respectivamente. La Figura 4.59. presenta un diagrama que toma valores de amplitud de $\frac{\sqrt{2}}{2}$ y $-\frac{\sqrt{2}}{2}$, tanto en el eje real como en el imaginario, puesto que son los valores que toma la señal después de la modulación BMP-QPSK. La Figura 4.60. muestra el efecto que produce el filtro RRC en transmisión, en donde el ojo toma una forma ovalada y la amplitud disminuye, características típicas en diagramas de ojo en sistema de comunicación con filtros de este tipo. La Figura 4.61. muestra que la señal que se transmite ha sido contaminada con AWGN, tanto en las componentes reales como en las imaginarias. La Figura 4.62. presenta la señal transmitida que ha atravesado el filtro RRC en recepción, el cual disminuye considerablemente el AWGN, además, recupera la forma de onda inicial y la amplitud vuelve a tomar valores de $\frac{\sqrt{2}}{2}$ y $-\frac{\sqrt{2}}{2}$.

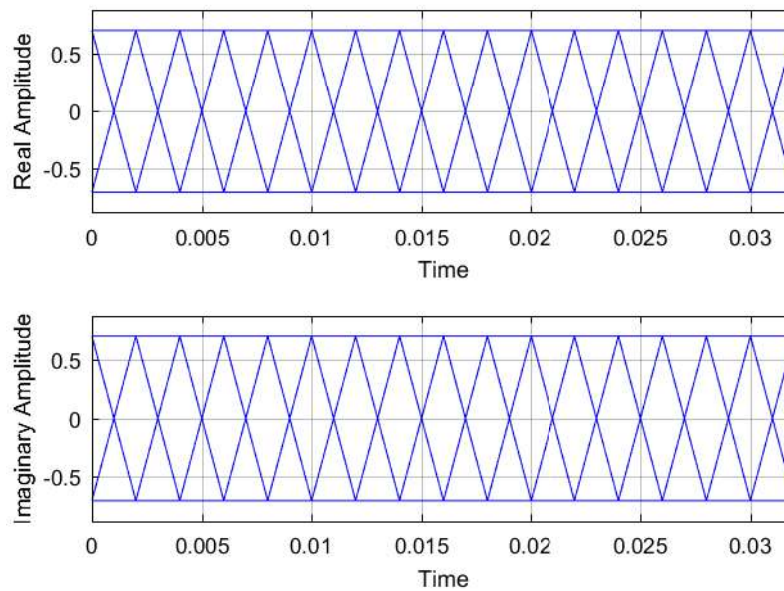


Figura 4.59. Diagrama de ojo con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 1 del escenario 4.



**Análisis del Desempeño a Nivel Físico de un Sistema de Comunicación
Punto a Punto Basado en UWB-DS**

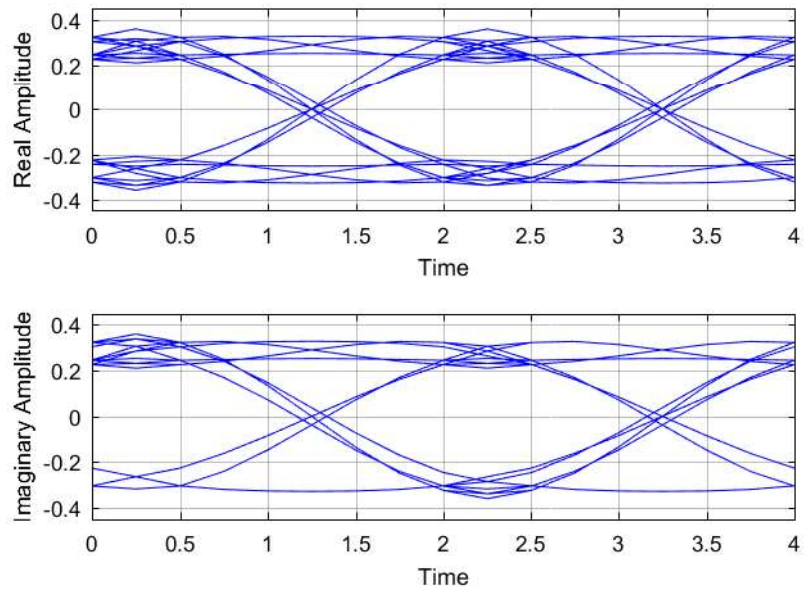


Figura 4.60. Diagrama de ojo con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 2 del escenario 4.

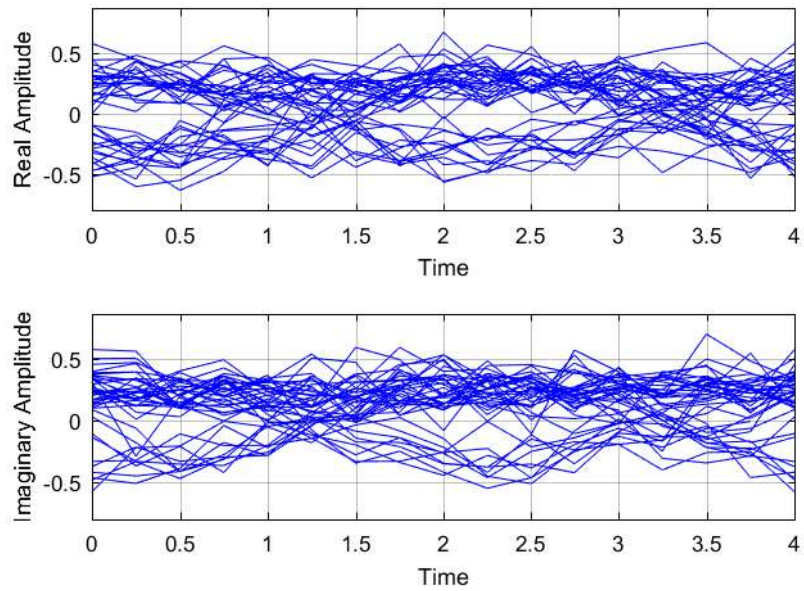


Figura 4.61. Diagrama de ojo con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 3 del escenario 4.

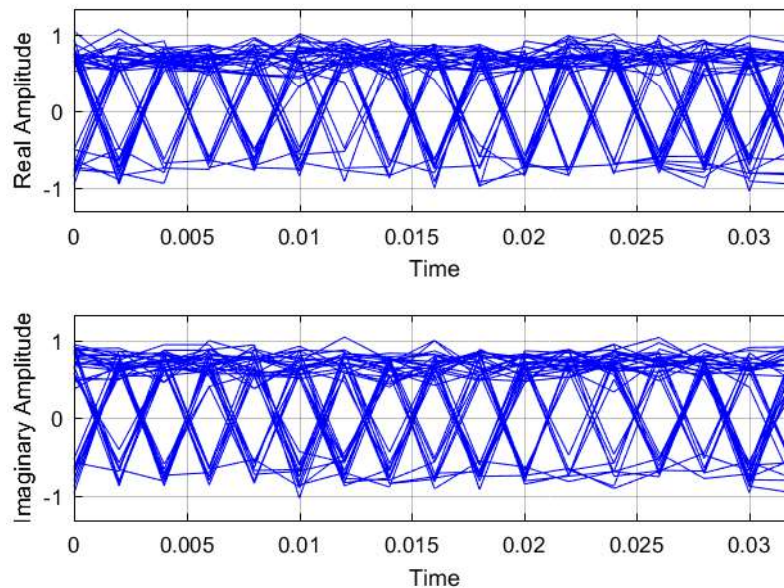


Figura 4.62. Diagrama de ojo con transmisión de ráfagas de manera continua en el punto 4 del escenario 4.

4.3. CURVAS DE DESEMPEÑO

Para obtener las curvas de desempeño de los sistemas de comunicación propuestos, se varía el valor de SNR del canal AWGN.

Haciendo una comparación de la curva de desempeño del escenario 1, el cual sigue las especificaciones del estándar IEEE 802.15.4a, con cada una de las curvas de desempeño de los escenarios 2, 3 y 4, se puede apreciar:

- La Figura 4.63. muestra las curvas de desempeño de los escenarios 1 y 2 para el sistema de comunicación con filtros RRC (curva azul) y el sistema de comunicación sin filtros RRC (curva verde), respectivamente. Se aprecia que el mejor desempeño corresponde al sistema de comunicación que implementa filtros RRC, puesto que este elemento se encarga de filtrar el ruido en la mayor cantidad posible.
- La Figura 4.64. muestra las curvas de desempeño de los escenarios 1 y 3 para el sistema de comunicación con concatenación de códigos Reed-Solomon y convolucional (curva azul) y el sistema de comunicación con código convolucional (curva roja), respectivamente. El sistema de comunicación que presenta mejor desempeño es aquel que implementa la concatenación de códigos Reed-Solomon y convolucional, debido a que implementa una técnica FEC que permite corregir errores en mayor cantidad.



- La Figura 4.65. muestra las curvas de desempeño de los escenarios 1 y 4 para el sistema de comunicación con modulación BPM-BPSK (curva azul) y el sistema de comunicación con BPM-QPSK (curva celeste), respectivamente. El sistema de comunicación que presenta mejor desempeño es aquel que implementa modulación BPM-BPSK, puesto que BPSK es más robusto frente al ruido, esto porque el demodulador BPSK solo requiere de 2 puntos de decisión para recuperar la información binaria original, mientras que QPSK requiere de 4 puntos de decisión, aumentando la probabilidad de error.

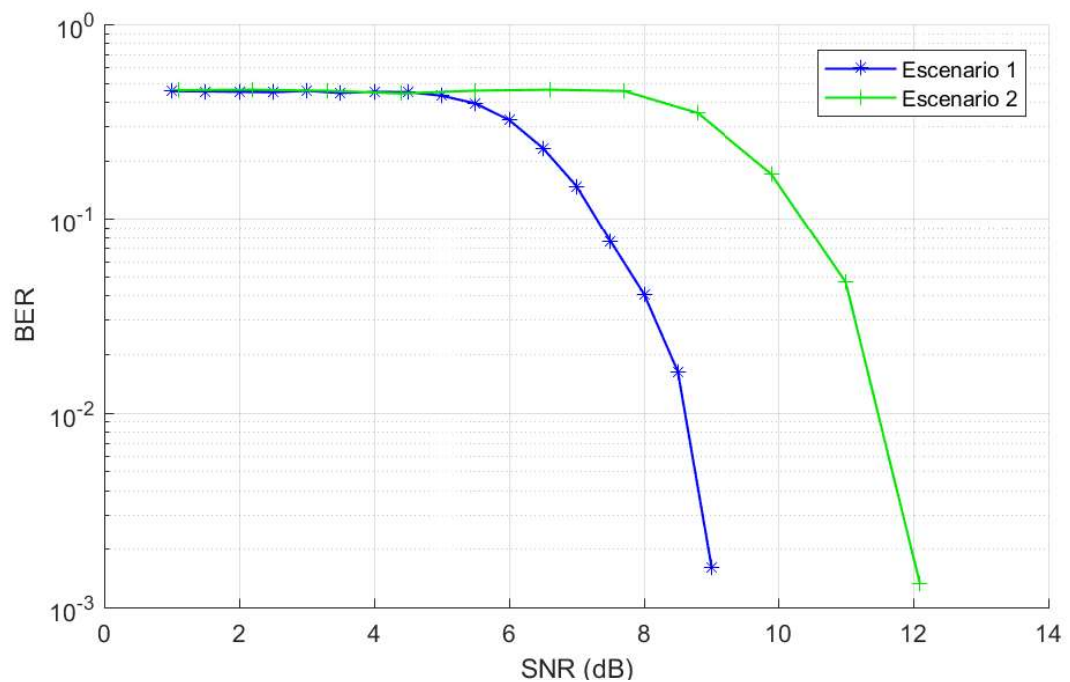


Figura 4.63. Curvas de desempeño para los escenarios 1 y 2.



**Análisis del Desempeño a Nivel Físico de un Sistema de Comunicación
Punto a Punto Basado en UWB-DS**

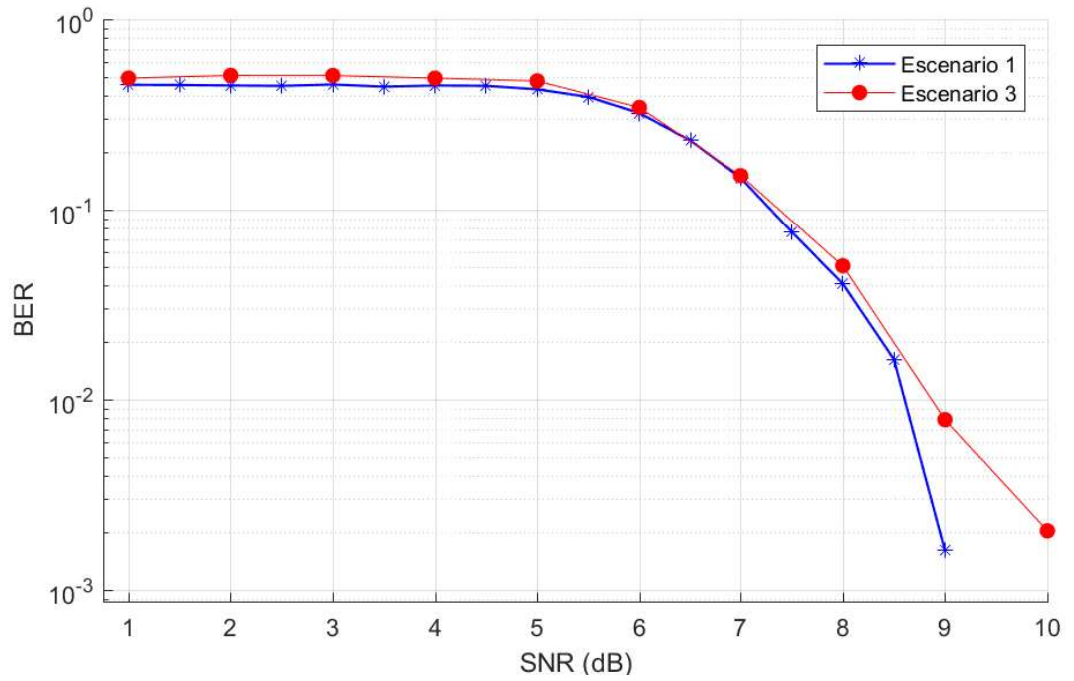


Figura 4.64. Curvas de desempeño para los escenarios 1 y 3.

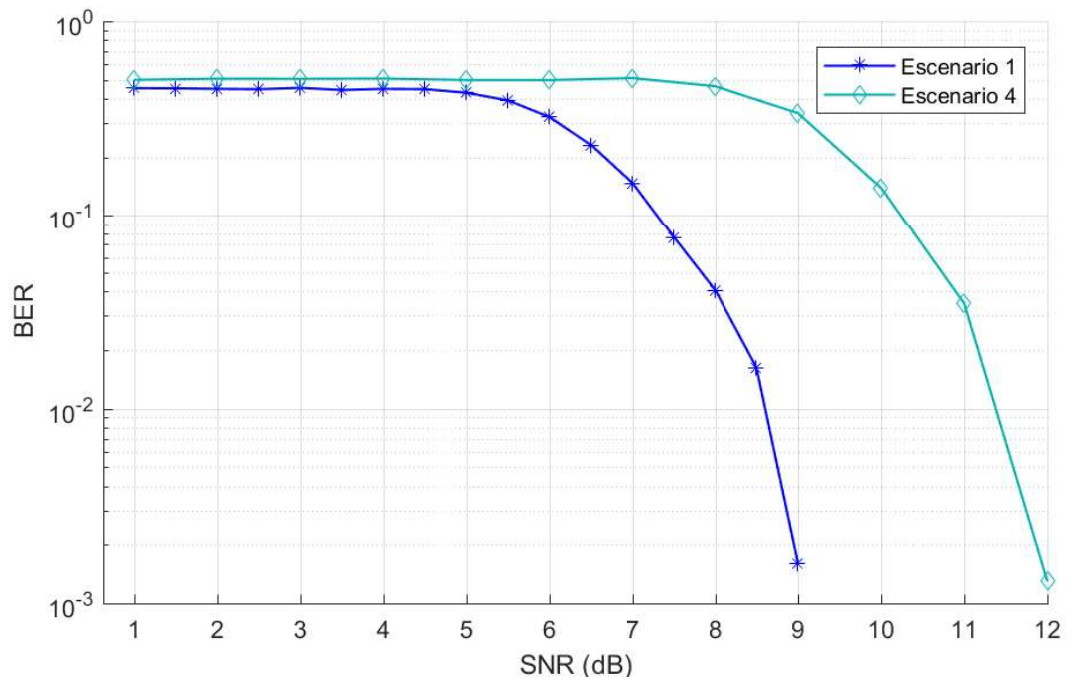


Figura 4.65. Curvas de desempeño para los escenarios 1 y 4.



5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. CONCLUSIONES

1. El trabajo de grado realizado brinda a estudiantes y docentes los conceptos básicos de UWB y del nivel físico del estándar IEEE 802.15.4a, facilitando la comprensión de los procesos de codificación, modulación, ensanchamiento, formación de ráfaga, entre otros.
2. La adaptación y aplicación de la metodología para la simulación de equipos de telecomunicaciones, permitió definir los objetivos de la simulación, la definición de un modelo de conceptual del sistema de comunicación, la identificación de subsistemas, la definición de objetos y métodos estructurados en diagramas de clases para cada subsistema planteado, y finalmente la obtención en Simulink del modelo de simulación del sistema de comunicación punto a punto basado en UWB-DS.
3. El trabajo de grado realizado permitió evaluar y analizar el desempeño de un sistema de comunicación punto a punto basado en UWB-DS a partir del estándar IEEE 802.15.4a, además, se realizó un análisis comparativo entre diferentes escenarios de simulación, el cual demuestra que un sistema de comunicación punto a punto basado en UWB-DS implementado con todas las especificaciones determinadas por el estándar IEEE 802.15.4a, tiene un mejor desempeño comparado con otros sistemas de comunicación que no cuentan con todas las especificaciones establecidas por dicho estándar.
4. Los diagramas en el tiempo y en frecuencia, como: diagrama de ojo, diagrama de constelación, espectro de frecuencias y diagramas en el osciloscopio, son útiles para evaluar y analizar el desempeño de los sistemas de comunicación digital, puesto que permiten examinar la señal de transmisión en diferentes puntos del transmisor, canal y receptor, y corroborar el correcto funcionamiento de los diferentes procesos que estos incluyen. En el trabajo de grado realizado, por medio de dichos diagramas se logró la visualización y verificación de las señales de entrada y salida, y los resultados determinaron que el modelo del sistema de comunicación implementado cumple con los requisitos a nivel físico propuesto por el estándar IEEE 802.15.4a.
5. Teóricamente se conoce el proceso de codificación convolucional como no sistemático, puesto que los bits de información se alternan con los bits de paridad. Para el trabajo de grado realizado fue necesario el diseño de un codificador convolucional sistemático, con el objetivo de identificar los bits de posición (bits de información) y de polaridad (bits de paridad) que conforman el símbolo UWB-DS. La implementación de la codificación convolucional sistemática permite omitir el uso del decodificador de Viterbi, puesto que en la detección de



energía es posible recuperar los bits de información que representan los datos de usuario. La omisión del decodificador de Viterbi junto con la detección no coherente simplifica el diseño e implementación del receptor.

6. En el trabajo de grado realizado se diseñó a pequeña escala un receptor no-coherente basado en ED, el cual permitió la recuperación de los datos de usuario por medio de la identificación de la posición de la ráfaga dentro de un símbolo UWB-DS, sin necesidad de detectar la fase, ni la información de dichos pulsos, y así de esta manera se simplifica el diseño del receptor. Por este motivo, este tipo de receptores son atractivos en muchas aplicaciones de las comunicaciones por su simplicidad y bajo costo.
7. En los sistemas de comunicaciones inalámbricos dos de las razones por las cuales se requiere el uso de los conformadores de pulsos son: generar señales limitadas en banda y reducir la ISI. En el trabajo de grado realizado se usa un par de filtros RRC, los cuales permitieron recuperar en gran proporción la señal transmitida en la etapa de decisión y además, ajustar el espectro de frecuencias de la señal a la máscara espectral teórica que especifica el estándar IEEE 802.15.4a, no se aprovecharon los beneficios en cuanto a la reducción de la ISI, puesto que no se consideraron los efectos causados por el multitrayecto.
8. A pesar de que el sistema de comunicación implementado en este trabajo de grado usa una concatenación de códigos Reed-Solomon y convolucional como técnica FEC, quien cumple la función principal para la detección y corrección de errores es la codificación Reed-Solomon, de este modo su implementación hace que el desempeño del sistema de comunicación UWB-DS mejore con respecto a un sistema de comunicación UWB-DS que no la implementa, esto se evidencia en los resultados comparativos de las curvas de desempeño de los escenarios 1 y 3.
9. La modulación QPSK es más eficiente con respecto al uso del espectro que BPSK. En el trabajo de grado realizado se pudo apreciar que el ancho de banda requerido por el sistema de comunicación con las dos modulaciones es igual, por lo tanto, la eficiencia de QPSK se ve reflejada en el aumento de la velocidad de transmisión de datos, esto a costa de mayores limitaciones en la recepción de la señal, ya que es más susceptible al ruido. Por lo anterior, se concluye que el sistema de comunicación implementado presenta mejor desempeño con BPSK que con QPSK para un valor específico de una SNR.
10. Según el estándar IEEE 802.15.4a los canales obligatorios cuentan con un ancho de banda de 500 MHz. En el trabajo de grado realizado se simula el sistema de comunicación en banda base, donde las componentes de la señal tienen un ancho de banda de 500 Hz (500 MHz redimensionandola a los valores como lo establece el estándar), pero al transmitir la señal a una frecuencia portadora, su ancho de banda se duplicará. Lo anterior es debido a



que los pulsos son de corta duración y su energía se dispersa sobre un gran ancho de banda, brindando una PSD muy baja, por lo tanto, no va a interferir otros sistemas, además, de que UWB-DS es para comunicaciones de corta distancia.

11. UWB-DS es una tecnología diseñada especialmente para WSN, ya que esta puede ofrecer buena capacidad de localización, alta robustez frente a interferencia, receptores de baja complejidad y bajo consumo de energía, características que hacen a esta tecnología una buena candidata en la industria de las WPANs.
12. UWB-DS es una tecnología que puede dar respuesta a las demandas de altas velocidades de transmisión de datos en cortas distancias, como por ejemplo, los sistemas de comunicaciones inalámbricas multimedia en hogares.

5.2. TRABAJOS FUTUROS

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado serán la base de trabajos futuros, que busquen mejorar el sistema de comunicación planteado y la implementación de dispositivos UWB-DS basados en el estándar IEEE 802.15.4a. Para ellos se proponen lo siguientes trabajos futuros:

1. Desarrollar a partir de esta simulación, un sistema de comunicación más complejo que incluya aspectos no tratados como la etapa de radiofrecuencia y el subnivel MAC, con el uso de las herramientas necesarias para ello y el estudio minucioso del subnivel MAC especificado en el estándar IEEE 802.15.4a.
2. Analizar el desempeño a nivel físico de un sistema de comunicación basado en el estándar IEEE 802.15.4a con la implementación de la trama completa, la cual incluye el PHR, SHR y PSDU.
3. Extender la simulación del sistema de comunicación punto a punto basado en UWB-DS con la especificaciones del estándar en cuestión a otras herramientas de simulación tales como OMNeT++, la cual está basada en una biblioteca de simulación C++, que provee módulos completos para modelar redes o sistemas de comunicación, está disponible para sistemas operativos Linux, Windows y MAC OS, y se distribuye con una licencia pública académica [33].
4. Analizar el desempeño de un sistema de comunicación basado en el estándar IEEE 802.15.4a en diferentes condiciones de canal, incluyendo efectos adversos como la Interferencia Multi-Usuario (MUI, *Multi-User Interference*) y la ISI.
5. Implementar un sistema de comunicación basado en el estándar de estudio para evaluar y analizar el desempeño del sistema de comunicación, haciendo uso de hardware especializado disponible en el mercado, como: DW1000 Radio IC,



Análisis del Desempeño a Nivel Físico de un Sistema de Comunicación Punto a Punto Basado en UWB-DS

el módulo DWM1000, o el kit de evaluación de CI TWR RTLS TREK1000, los tres son dispositivos de Decawave, los cuales son transceptores de radiofrecuencia de conformidad con el estándar mencionado, usado para aplicaciones en ámbitos como: sistemas de localización en tiempo real y posicionamiento en interiores, WSN e Internet de las cosas [34].



REFERENCIAS

- [1] G. F. Ross. "Transmission and Reception System for Generating and Receiving Baseband Duration Pulse Signals for Short Base-Band Pulse Communication System". *United States Patent*, Marzo 1971.
- [2] J. Suárez Paéz y G. Llano Ramírez. "Revisión del Estado del Arte de IR-UltraWideband y Simulación de la Respuesta Impulsiva del Canal IEEE 802.15.4a". *Universidad EAFIT, Ingeniería y Ciencia*, Abril 2010.
- [3] D. X. Gonzáles Caamaño. "Estudio Comparativo del estándar UltraWide Band (UWB) Frente a Bluetooth y Zigbee". *Trabajo de grado, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Escuela de ingeniería Civil Electrónica, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile*, 2011.
- [4] E. Karapistoli, F. N. Pavlidou, I. Gragopoulos y I. Tsetsinas. "An Overview of the IEEE 802.15.4a Standard". *Aristotle University of Thessaloniki, CERTH, IEEE Communications Magazine*, Junio 2010.
- [5] J. Diaz. "Tecnología Ultra-WideBand (UWB) La Revolución a Corto Alcance". *Center for Communications and Signal Processing Research, Institute of Technology, New Jersey*, (19), 2003.
- [6] Federal Communications Commission. "Title 47: Telecommunication, Part 15 - Radio Frequency Devices, Subpart F-Ultra-Wideband Operation". *Electronic Code of Federal Regulations, [En línea]. Disponible en: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/ECFR?page=browse> [Accedido: 10 Septiembre de 2019]*, Mayo 2002.
- [7] R.J. Millán. "UWB (Ultra Wide-Band)". *BIT, COIT/AEIT*, (147), 2004.
- [8] M. Casas Gonzáles, Dr. C. Crespo Cadenas y Dr. R. Mehmood. "Localización Precisa de Objetos Indoor Mediante Señales UWB y Técnicas TOA". *Proyecto Fin de Carrera, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla*.
- [9] Dr. J. Pérez Soler. "Coexistencia e Integración de Comunicaciones Inalámbricas en Sistemas de Transmisión Ópticos". *Tesis Doctoral, Departamento de Comunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España*, Julio 2009.
- [10] G. Hackmann. "802.15 Personal Area Networks". *[En línea]. Disponible en: <https://www.cse.wustl.edu/jain/cse574-06/wpans.htm> [Accedido: 8 Octubre de 2019]*, 2006.
- [11] L. de Nardis y M. G. Di Benedetto. "Overview of the IEEE 802.15.4/4a Standards for Low Data Rate Wireless Personal Data Networks". *University of Rome*



La Sapienza, Roma, Italia, 4th Workshop on Positioning, Navigation And Communication, Hannover, Germany, 2007.

- [12] “802.15.4-2006 - IEEE Standard for Information Technology - 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*, Septiembre 2006.
- [13] F. M. Archundia Papacetzzi. “Wireless Personal Area Network (WPAN) Home Networking”. *Tesis profesional, Licenciatura en Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, Departamento de Ingeniería Electrónica. Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla, Cholula, Puebla, Diciembre 2003.*
- [14] A.F. Molisch, P. Orlik, Z. Sahinoglu y J. Zhang. “UWB-based Sensor Networks and the IEEE 802.15.4a Standard - a Tutorial”. *2006 First International Conference on Communications and Networking in China, Beijing, China, Octubre 2006.*
- [15] “IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks”. *IEEE Computer Society, Diciembre 2015.*
- [16] C. Perez Vega. “Transmisión de Televisión”. *Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria, 2003.*
- [17] C. Sandoval. “Codificador y Decodificador Digital Reed-Solomon Programados Para Hardware Reconfigurable”. *Universidad de Carabobo, Marzo 2007.*
- [18] I. Hernández Rioja. “Modulaciones Codificadas Trellis. Asignatura de Procesado Digital de la Señal en Comunicaciones”. *Universidad del País Vasco, [En línea]. Disponible en: <http://aholab.ehu.es/users/inma/psc/tema5.pdf> [Accedido: 3 Octubre de 2019].*
- [19] B. Álvarez Feito. “Desarrollo de un Esquema de Codificación basado en los Turbo Códigos definidos en el Estándar 3GPP (S-UMTS)”. *Universidad Politécnica de Cataluña.*
- [20] M. Cabrera, F. Rey y F. Tarrés. “Teoría de la Codificación y Modulaciones Avanzadas”. *Recursos de aprendizaje Universidad Abierta de Cataluña, Septiembre 2012.*
- [21] MathWorks. “PN Sequence Generator”. *Documentation MathWorks, [En línea]. Disponible en: <https://nl.mathworks.com/help/comm/ref/pnsequencegenerator.html> [Accedido: 15 Septiembre de 2019].*
- [22] “Wireless Sensor Networks and the DW1000”. *DecaWave, 2014.*



- [23] A. S Kang y V. Sharma. "Pulse Shape Filtering in Wireless Communication-A Critical Analysis". *IJACSA International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Marzo 2011.
- [24] S. Chen y A. M. Wyglinski. "Cognitive Radio Communications and Networks". *Worcester Polytechnic Institute, Oxford, Estados Unidos*, 2010.
- [25] E. Cubukcu. "Root Raised Cosine (RRC) Filters and Pulse Shaping in Communication Systems". *Servidor de Informes Técnicos de la NASA*, Mayo 2012.
- [26] M. Lázaro. "Comunicaciones Digitales". *Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España*, 2018.
- [27] J. M Valbuena. "Diseño de un Sistema de Comunicación y Posicionamiento para Interiores de Trenes Mediante Tecnología UWB". *Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España*, Julio 2019.
- [28] C. Rodrigues y F. Cid. "Sistemas Ópticos Coherentes". *Universidad Técnica Federico Santa Maria, Valparaiso, Chile*, Marzo 2012.
- [29] C. Calero. "Aplicación de un Sistema de Comunicaciones UWB en Tiempo Real". *Universidad Telecom SudParis*, Marzo 2011.
- [30] M. de la Cruz. "Detección e Identificación de Señales para Radio Cognition". *Universidad Carlos III de Madrid*, Septiembre 2013.
- [31] P. Medina, J. Gallardo y F. Ramirez-Mireles. "Impact of Delay Spread on IEEE 802.15.4a Networks with Energy Detection Receivers". *Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Tijuana, México*, Diciembre 2010.
- [32] C. M. Hernández Bonilla, V. F. Miramá Pérez y V. Solarte Muñoz. "Adaptación de Metodologías de Modelado y Simulación para Sistemas de Telecomunicaciones Fase 1 Informe Final Anexo". *Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Electrónica Y Telecomunicaciones, Departamento de Telecomunicaciones*, 2017.
- [33] M. Alberts. "Analysis of the IEEE 802.15.4a Ultra Wideband Physical Layer through Wireless Sensor Network Simulations in OMNET++". *Universidad de Pretoria*, Febrero 2011.
- [34] *Decawave*. [En línea]. Disponible en: <https://www.decawave.com/> [Accedido: 8 Octubre de 2019].