

**EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA TECNOLOGÍA ZIGBEE
(IEEE 802.15.4) A NIVEL FÍSICO.**



**MABEL CRISTINA PORTILLA INSUASTY
MAURICIO TASCÓN CALDERÓN**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO DE RADIO E INALÁMBRICAS - GRIAL.
POPAYÁN, MAYO DE 2009**

**EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA TECNOLOGÍA ZIGBEE
(IEEE 802.15.4) A NIVEL FÍSICO.**



**MABEL CRISTINA PORTILLA INSUASTY
MAURICIO TASCÓN CALDERÓN**

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

Director: Ing. VÍCTOR MANUEL QUINTERO FLÓREZ

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO DE RADIO E INALÁMBRICAS - GRIAL.
POPAYÁN, MAYO DE 2009**

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. CONCEPTOS GENERALES.....	2
1.1 GENERALIDADES.....	2
1.2 CARACTERÍSTICAS.....	2
1.3 TIPOS DE DISPOSITIVOS.....	4
1.4 ESTRUCTURA DE LA SUPERTRAMA.	5
1.5 MODELO DE TRANSFERENCIA DE DATOS.....	6
1.5.1 El Dispositivo Transmite hacia el Coordinador.	6
1.5.2 El Coordinador Transmite hacia el Dispositivo.	7
1.5.3 Transmisión Entre dos Dispositivos Punto a Punto.....	8
1.6 ARQUITECTURA.....	8
1.7 TOPOLOGÍAS DE RED.....	9
1.7.1 Estrella.....	9
1.7.2 Malla o Mesh.	10
1.7.3 Árbol.	10
1.8 SUBNIVEL MAC.....	11
1.8.1 Modos de Operación..	11
1.8.1.1 <i>Modo beacon habilitado</i>	11
1.8.1.2 <i>Modo beacon no habilitado</i>	11
1.8.2 Formato de las Tramas MAC..	12
1.8.2.1 <i>Estructura de la trama de datos</i>	12
1.8.2.2 <i>Estructura de la trama Beacon</i>	13
1.8.2.3 <i>Estructura de la trama de Comandos MAC</i>	13
1.8.2.4 <i>Estructura de la trama de Acuse de Recibo ACK</i>	13
1.8.3 Formato de la Trama PPDU..	15
1.9 NIVEL FÍSICO DEL ESTÁNDAR IEEE 802.15.4.....	15
1.9.1 Ensanchamiento y Modulación para 2,4 GHz.....	16
1.9.1.1 <i>Bit a símbolo</i>	12
1.9.1.2 <i>Símbolo a chip</i>	12
1.9.1.3 <i>Modulación O-QPSK</i>	12
1.9.2 Modulación por Desplazamiento de Fase Binario (BPSK)..	22
CAPÍTULO 2. APLICACIÓN Y ADAPTACIÓN METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN.....	23
2.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y PLAN DE ESTUDIOS.....	23
2.1.1 Adquirir Información sobre el Funcionamiento del Sistema.....	23
2.1.1.1 <i>Transmisor</i>	23
2.1.1.2 <i>Canal</i>	24
2.1.1.3 <i>Receptor</i>	25
2.1.2 Identificar los Fines de la Simulación.....	25
2.1.3 Formulación de los Objetivos.	25
2.2 RECOLECCION Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....	25
2.2.1 Modelo del Transmisor.....	26
2.2.1.1 <i>Identificación de clases y objetos</i>	26
2.2.1.2 <i>Identificación de las estructuras</i>	26
2.2.1.3 <i>Identificación de los sujetos</i>	28

2.2.1.4	Identificación de los atributos	28
2.2.1.5	Identificación de servicios o métodos.	29
2.2.2	Modelo del Canal.....	30
2.2.2.1	Identificación de clases y objetos.	30
2.2.2.2	Identificación de las estructuras.....	30
2.2.2.3	Identificación de los sujetos.	30
2.2.2.4	Identificación de los atributos	30
2.2.2.5	Identificación de servicios o métodos	31
2.2.3	Modelo del Receptor	31
2.2.3.1	Identificación de clases y objetos	31
2.2.3.2	Identificación de las estructuras.....	31
2.2.3.3	Identificación de los sujetos	31
2.2.3.4	Identificación de los atributos	32
2.2.3.5	Identificación de servicios o métodos	33
2.3	MODELO DE SIMULACIÓN.....	33
2.3.1	Modelo de Simulación: Transmisor	33
2.3.1.1	Estructura interna y caracterización del generador de información.....	34
2.3.1.2	Estructura interna y caracterización del formato PPDU.	34
2.3.1.3	Estructura interna y caracterización del ensanchador-modulador.....	37
2.3.2	Modelo de Simulación: Canal	39
2.3.3	Modelo de Simulación: Receptor	40
2.4	EVALUACION DEL MODELO.....	43
2.4.1	Evaluación de la Correcta Descripción de Variables.....	43
2.4.2	Evaluación de la Complejidad Resultante de Cada Objeto.....	43
2.4.3	Evaluación de los Objetivos.....	43
2.4.4	Complejidad del Proyecto	43
CAPÍTULO 3. MODELO DE SIMULACIÓN.....		44
3.1	TRANSMISOR.....	44
3.1.1	Bloque Generador de Información (Generador Info).....	45
3.1.1.1	Fuente de Señal (Signal Source)	45
3.1.1.2	Escalar a vector (scalar to vector)	46
3.1.1.3	CRC (Vector CRC)	46
3.1.2	Generador de Trama PPDU (Generador PPDU).....	47
3.1.2.1	Vector Constante (Constant Vector)	47
3.1.2.2	Concatenador de vectores (Vector join vector)	48
3.1.3	Ensamplador	48
3.1.3.1	Vector a escalar (Vector to scalar).....	49
3.1.3.2	Bits a entero (Bits to integer)	49
3.1.3.3	Interpolador lineal (Table lookup)	50
3.1.3.4	Entero a bits (Integer to bits)	51
3.1.4	Modulador OQPSK.....	51
3.1.4.1	Número a QPSK (Number → QPSK)	51
3.1.4.2	Complejo a Real/Imaginario (Complex to Real/Imag).....	52
3.1.4.3	Repetidor (Repeat).....	52
3.1.4.4	Crear Complejo (Make Complex).....	52
3.2	CANAL.....	53
3.2.1	Ruido Blanco Complejo (Complex White noise).....	53

3.2.2	Sumador de Complejos (Complex adder).....	54
3.3	RECEPTOR.....	54
3.3.1	Demodulador OQPSK.....	54
3.3.1.1	<i>Disminuir (Decimate)</i>	55
3.3.1.2	<i>Retardo mayor (Bulk Delay)</i>	56
3.3.1.3	<i>Retardo (Delay)</i>	56
3.3.1.4	<i>Mapeador QPSK (QPSK Slicer)</i>	56
3.3.2	Divisor (SPLIT)	57
3.3.3	Desensanchador	57
3.3.3.1	<i>Comparador (Compare)</i>	59
3.3.3.2	<i>Multiplicador (Gain)</i>	59
3.3.3.3	<i>Sumador (Scalar 4-input adder)</i>	59
3.3.4	Bloque BLER/BER	60
CAPÍTULO 4. RED PUNTO A PUNTO ZIGBEE.....		62
4.1	CONFIGURACIÓN DEL KIT	62
4.2	PLAN DE PRUEBAS	66
4.2.1	Escenario 1: Espacio Libre.	67
4.2.2	Plan de Pruebas Escenario 1.....	68
4.2.3	Escenario 2: Parque de Ingenierías.	68
4.2.4	Plan de Pruebas Escenario 2.....	69
4.2.5	Escenario 3: Pasillo	69
4.2.6	Plan de Pruebas Escenario 3.....	69
4.2.7	Escenario 4: Casa	70
4.2.8	Plan de Pruebas Escenario 4.....	71
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		72
5.1	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	62
5.2	DIAGRAMAS DE CONSTELACIÓN	72
5.3	DIAGRAMAS DE OJO.....	74
5.4	RESPUESTA EN FRECUENCIA	76
5.5	BER	77
5.6	RESULTADOS ESCENARIO 1: ESPACIO LIBRE	78
5.7	RESULTADOS ESCENARIO 2: PARQUE DE INGENIERÍAS	85
5.7.1	Sin Interferencia.	85
5.7.2	Con Interferencia.....	88
5.8	RESULTADOS ESCENARIO 3: PASILLO.....	90
5.8.1	Sin Interferencia.....	90
5.8.2	Con Interferencia.....	93
5.9	RESULTADOS ESCENARIO 4.....	94
5.9.1	Sin Interferencia.....	94
5.9.2	Con Interferencia.....	97
5.10	COMPARACION ENTRE ESCENARIOS.....	98
5.11	COMPARACION DE RESULTADOS ENTRE EL MODELO DE SIMULACIÓN Y LAS PRUEBAS CON EL KIT.....	99

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de Canales en Cada una de las Bandas de Frecuencia.....	3
Figura 2. Estructura de la Supertrama.....	6
Figura 3. Transmisión desde el Dispositivo hacia el Coordinador.....	7
Figura 4. Transmisión desde el Coordinador hacia el Dispositivo.....	7
Figura 5. Arquitectura ZigBee.....	9
Figura 6. Topología en Estrella.....	9
Figura 7. Topología en Malla.....	10
Figura 8. Topología Árbol.....	10
Figura 9. Estructura de la Trama de Datos.....	12
Figura 10. Estructura de la Trama Beacon.....	13
Figura 11. Estructura de la Trama de Comandos MAC.....	14
Figura 12. Estructura de la Trama ACK.....	14
Figura 13. Estructura de la Trama PPDU.....	15
Figura 14. Modulación y Ensanchamiento.....	16
Figura 15. Modulación y Ensanchamiento.....	17
Figura 16. QPSK en el Dominio del Tiempo.....	17
Figura 17. Desplazamiento O-QPSK.....	19
Figura 18. O-QPSK en el dominio del Tiempo.....	19
Figura 19. Diagramas de Constelación para QPSK (a) y para O-QPSK (b).....	19
Figura 20. Diferencia de Fase entre O-QPSK Y QPSK.....	20
Figura 21. BER vs Eb/No para O-QPSK.....	21
Figura 22. Transmisor O-QPSK.....	22
Figura 23. Diagrama de Constelación BPSK.....	22
Figura 24. Estructura del Generador de Información.....	26
Figura 25. Estructura del Generador de Trama PPDU.....	27
Figura 26. Estructura del Ensanchador-Modulador.....	27
Figura 27. Estructura del Trayecto.....	31
Figura 28. Estructura del Desensanchador-Demodulador.....	32
Figura 29. Estructura del Sistema Total.....	33
Figura 30. Estructura del Transmisor.....	33
Figura 31. Estructura Interna del Generador de Información.....	34
Figura 32. Estructura Interna del Formato PPDU.....	34
Figura 33. Estructura del Ensanchador-Modulador.....	37
Figura 34. Estructura Interna del Ensanchador.....	38
Figura 35. Estructura del Modulador.....	39
Figura 36. Estructura del Canal.....	40
Figura 37. Estructura del Receptor.....	40
Figura 38. Estructura Interna del Demodulador.....	41
Figura 39. Estructura Interna del Desensanchador.....	42
Figura 40. Modelo de Simulación del Sistema.....	44
Figura 41. Subsistema Transmisor.....	44
Figura 42. Bloques que Constituyen el Bloque Generador de Información.....	45
Figura 43. Archivo Generador de la señal de datos.....	46
Figura 44. Bloques que Constituyen el Bloque Generador de Trama PPDU.....	47
Figura 45. Bloques que Conforman el Bloque Ensanchador.....	49
Figura 46. Archivo del Interpolador Lineal.....	50

Figura 47. Bloques que Componen el Bloque Modulador OQPSK.....	51
Figura 48. Bloque Canal.....	53
Figura 49. Bloques que Conforman el Subsistema Receptor.....	54
Figura 50. Bloques que Conforman el Bloque Demodulador.....	54
Figura 51. Parámetros del Demodulador.....	55
Figura 52. Bloque Divisor.....	57
Figura 53. Estructura General del Desensanchador.....	58
Figura 54. Bloques del Desensanchador.....	58
Figura 55. Bloque BER/BLER.....	60
Figura 56. Red Punto a Punto de ZigBee.....	62
Figura 57. Identificación de Puerto Serial a través de un Puerto USB.....	63
Figura 58. Configuración de Hyperterminal.....	63
Figura 59. Configuración de Puerto en HyperTerminal.....	64
Figura 60. Configuración ASCII de Hyperterminal.....	64
Figura 61. Vista de Hyperterminal de la Conexión de Dispositivos.....	65
Figura 62. Vista de Hyperterminal.....	66
Figura 63. Escenario 1, Campo Libre.....	68
Figura 64. Escenario 2, Parque de Ingenierías.....	68
Figura 65. Escenario 3, Pasillo.....	70
Figura 66. Escenario 4, Casa.....	70
Figura 67. Tabla de Resultados.....	72
Figura 68. Constelación para OQPSK.....	73
Figura 69. Constelación para $E_b/N_0=0$	73
Figura 70. Constelación para $E_b/N_0=5$	73
Figura 71. Constelación para $E_b/N_0=15$	74
Figura 72. Constelación para $E_b/N_0=30$	74
Figura 73. Diagrama de Ojo de la Señal Transmitida.....	75
Figura 74. Diagrama de Ojo para $E_b/N_0=0$	75
Figura 75. Diagrama de Ojo para $E_b/N_0=5$	75
Figura 76. Diagrama de Ojo para $E_b/N_0=15$	76
Figura 77. Diagrama de Ojo para $E_b/N_0=30$	76
Figura 78. Respuesta en Frecuencia de la Trama PPDU.....	78
Figura 79. Respuesta en Frecuencia de la Trama PPDU.....	78
Figura 80. Respuesta en Frecuencia de la Señal Ensanchada.....	78
Figura 81. BER vs. E_b/N_0	78
Figura 82. Histogramas Escenario 1.....	80
Figura 83. LQI vs. Distancia (D) para Escenario 1.....	81
Figura 84. PER vs. Distancia (D) Escenario 1.....	81
Figura 85. Potencia Recibida Teórica (P_r) vs. Distancia (D) para el Escenario 1.....	82
Figura 86. Potencia Recibida Estimada vs. LQI.....	83
Figura 87. Potencia recibida estimada (P_r) vs. Distancia (D) para el escenario 1.....	83
Figura 88. PER vs. E_b/N_0 Teórico para el Escenario 1.....	84
Figura 89. PER vs. E_b/N_0 Estimado para el Escenario 1.....	84
Figura 90. Histogramas Escenario 2.....	86
Figura 91. LQI vs. Distancia (D) para el Escenario 2 Sin Interferencia.....	86
Figura 92. PER vs. Distancia (D) para el Escenario 2 Sin Interferencia.....	87
Figura 93. Potencia Recibida (P_r) Estimada vs. Distancia (D) para el Escenario 2 Sin Interferencia.....	87
Figura 94. PER vs. E_b/N_0 Estimado para el Escenario 2 Sin Interferencia.....	88

Figura 95. LQI vs. Distancia (D) para el Escenario 2 Con Interferencia.....	89
Figura 96. PER vs. Distancia (D) para el Escenario 2 Con Interferencia.....	90
Figura 97. Histogramas Escenario 3.....	91
Figura 98. LQI vs. Distancia (D) para el Escenario 3.....	91
Figura 99. PER vs. Distancia (D) para el Escenario 3.....	92
Figura 100. Pr estimada vs. Distancia (D) para el Escenario 3 Sin Interferencia.....	92
Figura 101. PER vs. Eb/No Estimado para el Escenario 3 Sin Interferencia.....	92
Figura 102. Distancia vs LQI para el Escenario 3 Con Interferencia.....	94
Figura 103. PER vs. Distancia (D) para el escenario 3 con interferencia.....	94
Figura 104. Histogramas Escenario 4.....	96
Figura 105. LQI vs Lugares para el Escenario 4.....	96
Figura 106. LQI vs Lugares para el Escenario 4 Con Interferencia.....	98
Figura 107. Comparación LQI de Tres Escenarios Sin Interferencia.....	99
Figura 108. Comparación PER de Tres Escenarios Sin Interferencia.....	99

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de comandos MAC.....	14
Tabla 2. Parámetros del Nivel Físico.....	16
Tabla 3. Símbolo a Chip.....	17
Tabla 4. Código Gray.....	19
Tabla 5. Conversión de Chip a Símbolo.....	59
Tabla 6. Canales del Estándar IEEE 802.11b.....	67
Tabla 7. Ubicaciones de las Pruebas en Escenario 4.....	71
Tabla 8. Resultados Escenario 1.....	79
Tabla 9. Resultado Escenario 2 Sin Interferencia.....	85
Tabla 10. Resultados de LQI Escenario 2 Con Interferencia.....	88
Tabla 11. Resultados de los Paquetes Perdidos Escenario 2 Con Interferencia.....	88
Tabla 12. Resultados de PER Escenario 2 Con Interferencia.....	89
Tabla 13. Resultados Escenario 3 Sin Interferencia.....	90
Tabla 14. Resultados de LQI Escenario 3 Con Interferencia.....	93
Tabla 15. Resultados de los Paquetes Perdidos Escenario 3 Con Interferencia.....	93
Tabla 16. Resultados de PER Escenario 3 Con Interferencia.....	93
Tabla 17. Resultados Escenario 4 Sin Interferencia.....	95
Tabla 18. Resultados de LQI Escenario 4 Con Interferencia.....	97
Tabla 19. Resultados de los Paquetes Perdidos Escenario 4 Con Interferencia.....	97
Tabla 20. Resultados de PER Escenario 4 Con Interferencia.....	97
Tabla 21. Parámetros de la simulación y del kit.....	100

ACRÓNIMOS

128-bit AES	Estándar de cifrado avanzado de 128 bits (128-bit Advanced Encryption Standard).
AP	Punto de acceso inalámbrico (Access Point).
APS	Subnivel de soporte de aplicación (Application Support Sublayer).
APSD-SAP	Puntos de acceso de servicio de la entidad de datos del nivel de soporte de aplicación (APS Data Entity - Service Access Point).
APSME-SAP	Puntos de acceso de servicio de la entidad de gestión del nivel de soporte de aplicación (APS Management Entity - Service Access Point).
AWGN	Ruido blanco gaussiano aditivo (Additive White Gaussian Noise).
BER	Tasa de error de bit (Bit Error Rate).
BLER	Tasa de error de bloque (Block Error Rate).
BPSK	Modulación por desplazamiento de fase binario (Binary Phase Shift Keying).
BR	Velocidad de bits (Bit Rate)
CAP	Periodo de acceso de contención (Contention Access Period).
CCA	Exploración de canal libre (Clear Channel Assessment).
CFP	Periodo libre de contención (Contention free period).
CRC	Control de redundancia cíclica (Cyclic Redundancy Check).
CSMA-CA	Método de acceso múltiple con detección de portadora – evitando colisión (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance).
DLL	Capa de enlace de datos (Data link layer).
DSSS	Espectro ensanchado por secuencia directa (Direct Sequence Spread Spectrum).
ED	Detección de energía recibida (Energy Detection).
FCS	Secuencia de verificación de trama (Frame check sequence).
FFD	Dispositivo de función completa (Full Function Device).
FFT	Transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform)
GTS	Asignación de intervalos de tiempo garantizados (Guaranteed Time Slot).
IEEE	Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos (Institute of Electrical and Electronics Engineers).
ISM	Industrial, científica y médica (Industrial Scientific and Medical).
LLC	Control de enlace lógico (Logical link control).
LQI	Índice de calidad del enlace (Link Quality Index).
LR-WPAN	Redes inalámbricas de área personal con bajas velocidades de transmisión de datos (Low-Rate Wireless Personal Area Network).
LSB	Bit menos significativo (Least Significant Bit).
MAC	Subnivel de control de acceso al medio (Medium Access Control).
MFR	Campo final de trama MAC (MAC Footer).
MHR	Encabezado MAC (MAC Header).
MLDE-SAP	Puntos de acceso de servicio de la entidad de datos del subnivel MAC (MAC sublayer data entity - service access point).
MLME-SAP	Puntos de acceso de servicio de la entidad de gestión del subnivel MAC (MAC sublayer management entity - service access point).
MPDUs	Unidades de datos de protocolo MAC (MAC Protocol Data Units).
MSB	Bit más significativo (Most Significant Bit).
MSDU	Unidad de servicios de datos MAC (MAC Service Data Unit).
NF	Figura de ruido (Noise Figure).
NLDE-SAP	Puntos de acceso de servicio de la entidad de datos del nivel de red (NWK Layer Data Entity - Service Access Point).

NLME-SAP	Puntos de acceso de servicio de la entidad de gestión del nivel de red (NWK Layer Management Entity - Service Access Point).
NRZ	Codificación la de no retorno a cero (Non Return to Zero).
NWK	Nivel de red (network layer).
NWKID	Identificador de red (NetWork IDentifier).
O-QPSK	Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (Offset- Quadrature Phase Shift Keying).
OSI	Interconexión de sistemas abiertos (Open Systems Interconnection).
PAN	Red de área personal (Personal Area Network).
PD-SAP	Puntos de acceso de servicio de datos del nivel físico (Physical data - service access point).
PER	Relación de paquetes perdidos con respecto al total de paquetes transmitidos (Packet Error Rate).
PHR	Encabezado de nivel físico (PHY Header).
PHY	Nivel físico (PHY, Physical).
PLME-SAP	Puntos de acceso de servicio de la entidad de gestión del nivel físico (Physical layer management entity-Service Access Point).
PN	Secuencia pseudo-aleatoria (Pseudo-Random Noise).
PPDU_s	Unidades de datos de protocolo del nivel físico (PHY Protocol Data Units).
PSDU	Unidad de servicio de datos PHY (PHY Service Data Unit).
RFD	Dispositivo de función reducida (Reduced Function Device).
RSSI	Indicador de intensidad de la señal recibida (Received Signal Stregth Indication)
SAP	Puntos de acceso de servicio (Service Access Point).
SFD	Delimitador de inicio de trama (Start Frame Delimiter).
SHR	Encabezado de sincronización (Synchronization Header).
SRD	Dispositivos de corto alcance (Short Range Devices).
USB	Puerto universal en serie (Universal Serial Bus).
WPAN	Redes Inalámbricas de Área Personal (Wireless Personal Area Network).
WSN	Redes de Sensor Inalámbricas (Wireless Sensor Networks).
ZDO	Objetos de dispositivos ZigBee (ZigBee Device Objects).

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el uso de dispositivos electrónicos para comunicaciones inalámbricas se ha incrementado notablemente, como consecuencia del desarrollo de una amplia variedad de productos y servicios que buscan ofrecer al usuario una mayor movilidad, portabilidad y calidad. Por tal motivo se generan constantemente nuevos estándares que optimizan la conectividad actual y los servicios brindados, mediante la creación de nuevas aplicaciones, que reflejan su progreso en la flexibilidad y productividad de las redes.

ZigBee fue creada como una tecnología para dispositivos con un bajo consumo de energía y aplicaciones en donde se necesitan bajas velocidades de transmisión de datos, generando de esta manera un menor costo de implementación y mantenimiento. Esta nueva tecnología inalámbrica diseñada para comunicaciones de corto alcance, bajo consumo de energía y bajas velocidades de transmisión de datos, complementa las tecnologías de altas velocidades de transmisión de datos como las usadas en las redes de área local inalámbrica (WLAN, Wireless Local Area Network), y abre el camino a nuevos productos y servicios. Algunos de estos productos y servicios son desarrollados en las áreas de la medicina, la domótica, aplicaciones militares, automatización industrial, telecomunicaciones, entre otras.

En este documento se presenta un enfoque tanto teórico como metodológico que acompaña el desarrollo de la simulación realizada además de la implementación y análisis de una red ZigBee. En el primer capítulo se describen los conceptos generales del nivel físico (PHY, Physical) y el subnivel de control de acceso al medio (MAC, Medium Access Control) del estándar IEEE 802.15.4. El segundo capítulo contiene la aplicación y adaptación de una metodología de simulación de sistemas de telecomunicaciones para obtener el modelo conceptual y de simulación que va a ser objeto de estudio en este proyecto. En el capítulo 3 están consignados los aspectos más importantes de la implementación del modelo de simulación. En el capítulo 4 se encuentra documentada la manera en que se implementó la red ZigBee y sus diferentes escenarios. Por último en el capítulo 5 se encuentran consignados todos los resultados obtenidos en la simulación y en la implementación de la red ZigBee. Además se encuentra el anexo 1 que contiene un método desarrollado para estimar la potencia recibida y el Anexo 2 que presenta el manual de usuario de la simulación.

CAPITULO 1

CONCEPTOS GENERALES

1.1 GENERALIDADES

ZigBee es un conjunto de protocolos que definen la infraestructura de red necesaria para el desarrollo e implementación de redes de sensores inalámbricas (WSN, Wireless Sensor Networks) y que permite la comunicación de forma sencilla entre múltiples dispositivos. Más que una tecnología, Zigbee es un conjunto estandarizado de soluciones para conectividad inalámbrica de corto alcance (SRD, Short Range Devices) desarrollado para aplicaciones y redes que requieran bajo consumo de energía, bajos costos, utilización de bandas de radiofrecuencia de uso libre, fácil instalación y flexibilidad, entre otros [1].

ZigBee se basa en el estándar para redes inalámbricas de área personal (WPAN, Wireless Personal Area Network) IEEE 802.15.4. el cual define el nivel físico (PHY, Physical) y el subnivel de control de acceso al medio (MAC, Medium Access Control) de redes inalámbricas de área personal con bajas velocidades de transmisión de datos (LR-WPAN, Low-Rate Wireless Personal Area Network), además de especificar un nivel de red (NWK, NetWork) que se encuentra encargado de las tareas de enrutamiento y de mantenimiento de los nodos de la red. Un entorno de aplicación que proporciona un subnivel de soporte de aplicación (APS, Application Support Sublayer) que establece una interfaz para el nivel de red, los objetos de dispositivos Zigbee (ZDO, ZigBee Device Object) que define el rol del dispositivo en la red (Coordinador, Enrutador o Dispositivo final) y los objetos de aplicación (Application Object) que contienen las aplicaciones o servicios que son ejecutados en cada nodo.

ZigBee es utilizado en aplicaciones donde se requiera una solución de bajo costo, bajo consumo de energía y bajas velocidades de transferencia de datos. Algunas de las áreas de aplicación son:

- Automatización doméstica e industrial (control de temperatura, luces, interruptores, entre otros).
- Seguridad (detección de intrusos, fuego, etc.).
- Aplicaciones médicas (aplicaciones para monitoreo de pacientes).
- Seguridad y monitoreo vehicular (supervisión de diferentes parámetros como presión del aire en las llantas, kilometraje, etc.)
- Agricultura. Control y vigilancia de la tierra y cultivos supervisando parámetros y sistemas relacionados (la humedad del suelo, presión atmosférica, niveles de pesticidas y sistemas de riesgo, entre otros.)

1.2 CARACTERÍSTICAS

El objetivo de ZigBee es ofrecer un estándar que permita el desarrollo e implementación de aplicaciones en entornos como los mencionados anteriormente, ofreciendo facilidad de instalación e interoperabilidad entre redes y dispositivos. Esto es posible gracias a las siguientes características:

- Doble nivel físico para las bandas industrial, científica y médica (ISM, Industrial Scientific and Medical) 2400 MHz y 868/915 MHz. El nivel físico está constituido por un total de 27 canales con un ancho de banda de 5 MHz por canal. Estos canales están numerados de 0 a 26 y están asignados como aparece en la figura 1.

20 kbps	Ch 0	868 MHz	Europa
	Ch 1		
40 kbps	Ch 2	915 MHz	Norteamérica Australia
	Ch 3		
	Ch 4		
	Ch 5		
	Ch 6		
	Ch 7		
	Ch 8		
	Ch 9		
250 kbps	Ch 10	2400 MHz	Resto del Mundo
	Ch 11		
	Ch 12		
	Ch 13		
	Ch 14		
	Ch 15		
	Ch 16		
	Ch 17		
	Ch 18		
	Ch 19		
	Ch 20		
	Ch 21		
	Ch 22		
	Ch 23		
	Ch 24		
	Ch 25		
	Ch 26		

Figura 1. Distribución de Canales en cada una de las Bandas de Frecuencia [2].

- Velocidades de datos de 20 Kbps, 40 Kbps y 250 Kbps para cada banda de frecuencia.
- Bajo consumo de energía con una vida útil de las baterías que puede ir de unos pocos meses a varios años.
- Baja latencia para aplicaciones con un ciclo de trabajo bajo (<1%).
- Asignación de intervalos de tiempo garantizados (GTS, Guaranteed Time Slot), característica opcional para aplicaciones que requieran baja latencia (aplicaciones en tiempo real).
- Acceso al canal por medio del método de acceso múltiple con detección de portadora – evitando colisión (CSMA-CA, Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance).
- Asignación de direcciones IEEE cortas de 16 bits o extendidas de 64 bits, lo que permite direccionar hasta 65.535 nodos en una sola red.
- Control de potencia.
- Redes flexibles, ya que cada dispositivo puede ser adicionado o removido fácilmente de una red.
- Bajo costo de los dispositivos.

- Distancias de transmisión de hasta 100 metros en áreas abiertas y 30 metros en edificaciones, dependiendo de la aplicación y la línea de vista.
- Múltiples topologías: punto a punto, estrella, malla, árbol y grupos de árbol (cluster tree).
- Utiliza mecanismos de seguridad basados en el estándar de cifrado avanzado de 128 bits (128-bit AES, Advanced Encryption Standard).

1.3 TIPOS DE DISPOSITIVOS

IEEE802.15.4 hace dos definiciones: el dispositivo de función completa (FFD, Full Function Device) y el dispositivo de función reducida (RFD, Reduced Function Device). El FFD se utiliza en cualquier tipo de red, su función principal es coordinar y enrutar, por esta razón se comunica ya sea con un dispositivo RFD o FFD, mientras que un RFD se limita a transmitir y recibir datos sin coordinar o enrutar. Con base en las dos definiciones anteriores la *alianza Zigbee*¹ especifica tres tipos de dispositivos:

- *Coordinador ZigBee (FFD)*: Es llamado también coordinador de la red de área personal (PAN, Personal Area Network). Se comporta como “maestro”. Es el encargado de inicializar la red y mantener en todo momento el control del sistema. Necesita memoria y capacidad de procesamiento y almacenamiento de información acerca de la red. Este dispositivo tiene capacidades para detectar y corregir errores.

El coordinador en modo inicial generalmente crea una copia de los parámetros de configuración de la red. La aplicación en el dispositivo realiza una búsqueda en la lista de canales para seleccionar los indicados y como resultado obtiene una lista detallada de las PANs activas. La aplicación compara la lista de canales con la lista de red y selecciona un canal libre. Una vez elegido el canal se procede a escoger los atributos de seguridad del nivel y trama correspondientes a los parámetros de configuración previa.

En su modo normal el coordinador ZigBee debe atender las peticiones (Request) de cualquier dispositivo que esté activo o en modo de ahorro de energía. Además se debe asegurar de que el número de conexiones a la red no exceda las establecidas en los parámetros de configuración. Por tanto, el coordinador ZigBee tiene que soportar el control del proceso de incorporación y desincorporación a la red de cualquier dispositivo.

- *Enrutador ZigBee (FFD)*: Encamina los mensajes hacia el destino correcto y permite que la red se expanda. Si un mensaje llega a un dispositivo enrutador FFD, comprueba la dirección de destino, y solo lo reenvía si pertenece a alguno de los RFD que están asociados a él. Si es para él, lo pasa al nivel superior. En otro caso se descarta.

En el modo inicial, el enrutador zigbee busca en su propia lista de canales para explorar los canales que se hayan configurado previamente. El resultado de la exploración es la lista de red con los coordinadores PAN activos y la selección de la red a la cual puede unirse para hacer una petición para asociación a la PAN. Si la seguridad en la red se encuentra activa, el dispositivo debe esperar que el centro de validación le proporcione la clave maestra y de esta forma establecer con éste la clave de enlace. Una vez entregada la clave de red el dispositivo ya puede funcionar como enrutador en la red.

¹ Página oficial de la alianza zigbee, www.zigbee.org

En su modo normal el enrutador ZigBee debe responder a cualquier dispositivo descubierto u operaciones del servicio de descubrimiento, para cualquier dispositivo en la red.

- Dispositivo final ZigBee (RFD): Se comporta como "esclavo". Este dispositivo tiene capacidad y funcionalidad limitada, requiere menor memoria que cualquier otro tipo de nodo, solo se comunica con el enrutador y se implementa muy fácilmente en la topología en estrella, con lo cual se consigue un bajo costo y una gran simplicidad. Básicamente, son los sensores/actuadores de la red.

En el modo inicial, la aplicación del dispositivo realiza numerosas peticiones de descubrimiento y así determina cuántos elementos existen en la red. En consecuencia se tiene una lista de red, detallando las PAN activas. Este dispositivo compara la lista de red obtenida con la propia para seleccionar la red a la cual unirse. El RFD debe obtener información relacionada con: el modo de operación de la red, identificación del enrutador o coordinador de la red y la capacidad del enrutador o coordinador. Una vez hecho lo anterior, se debe verificar la asociación con el enrutador o el coordinador ZigBee en la PAN.

Una red ZigBee necesita como mínimo dos elementos, un coordinador (FFD) que creará la red, asignará el identificador de red (NWKID, NetWork IDentifier), y tendrá los mecanismos necesarios para la incorporación y eliminación de nodos en la red y un nodo que puede ser un FFD o un RFD con el cual comunicarse.

Los dispositivos ZigBee tienen una estrategia de funcionamiento que permite bajo consumo de energía con el fin de maximizar la vida útil de sus baterías y del dispositivo. La estrategia consiste en que durante mucho tiempo los dispositivos "esclavos" están en modo "dormido", de manera que solo se "despiertan" por una fracción de segundo para confirmar que están "vivos" en la red de la que hacen parte. Esta transición del modo "dormido" al modo "despierto" dura unos 15ms y la enumeración de "esclavos" dura alrededor de 30ms [3].

1.4 ESTRUCTURA DE LA SUPERTRAMA.

El estándar ofrece la opción de utilizar supertramas de acuerdo a las necesidades de la red. Esta supertrama es independiente de los otros tipos de trama (datos, *beacon*, comandos MAC, ACK) y es definida y enviada por el coordinador de la red en intervalos de tiempo que pueden variar entre 15 ms y 252.000 ms. La supertrama está limitada por dos tramas *beacon* y posee dos periodos uno activo y uno inactivo como se puede observar en la figura 2 [4].

Es durante el periodo inactivo donde los dispositivos entran en el estado de reposo para el ahorro de energía de sus baterías. El periodo activo se encuentra dividido en 16 intervalos de tiempo de igual tamaño e igual duración y es donde la comunicación se lleva a cabo. Este periodo está compuesto de tres partes: la trama *beacon*, el periodo de acceso de contención (CAP, Contention Access Period) y el periodo libre de contención (CFP, Contention Free Period). El CAP debe contener por lo menos 9 intervalos de tiempo del periodo activo o puede tener los 16 intervalos de tiempo, durante las cuales los dispositivos de la red compiten para lograr establecer una comunicación utilizando como mecanismo de acceso al canal CSMA-CA ranurado. El CFP que es un periodo opcional puede tener asignadas un máximo de 7 ranuras de tiempo y es aquí donde se

ubican los GTS generados por el coordinador en aplicaciones que requieran baja latencia y ancho de banda dedicado y solo para comunicaciones entre el coordinador y un dispositivo. La duración de estos GTS puede incluir varios intervalos de tiempo del CFP y deben estar seguidos uno del otro.

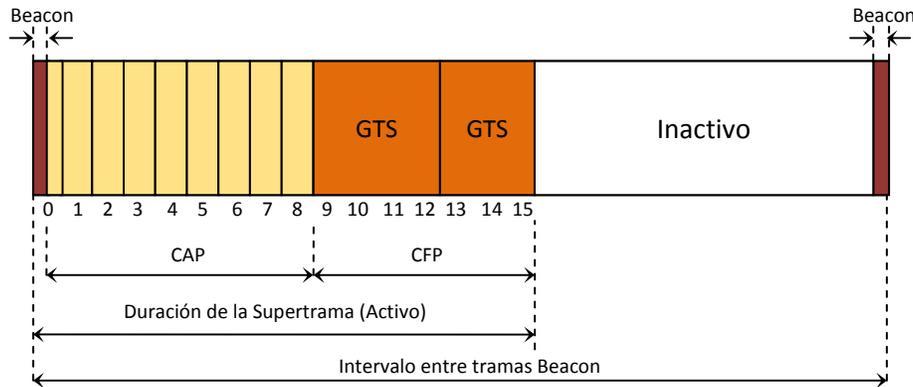


Figura 2. Estructura de la Supertrama [4].

1.5 MODELO DE TRANSFERENCIA DE DATOS

El modelo de transferencia de datos es dependiente de la topología de red utilizada. En general, existen tres modelos de transferencia de datos:

- El dispositivo transmite hacia al coordinador.
- El coordinador transmite hacia el dispositivo.
- Transmisión entre dos dispositivos punto a punto.

En las redes en estrella (modo o modelo centralizado) solo pueden ser utilizados los dos primeros modelos de transferencia ya que el intercambio de datos solamente es hecho entre el coordinador y el dispositivo. En las redes punto a punto se aceptan los tres modelos de transferencia debido a que el intercambio de datos puede hacerse entre dos dispositivos cualesquiera.

El procedimiento para cada modo de transferencia depende si la red admite la transmisión de tramas *beacon*. Las tramas *beacon* son utilizadas en redes que admitan dispositivos de baja latencia y que requieren sincronización. En redes que no necesiten estos requisitos el uso de este tipo de tramas es opcional, aunque es necesaria para el descubrimiento de redes.

A continuación se describe la secuencia para cada uno de los modelos de transferencia.

1.5.1 El Dispositivo Transmite Hacia al Coordinador.

Cuando el dispositivo va a transmitir hacia el coordinador en ambientes *beacon*, los dispositivos siempre esperan por la trama *beacon* de red para que al ser encontrada se sincronice con la supertrama y de esta manera transmitir su trama de datos al coordinador en el momento indicado utilizando CSMA-CA o ALOHA. Ver figura 3 a.

En ambientes no *beacon*, el dispositivo simplemente transmite la trama de datos utilizando CSMA-CA o ALOHA. Ver figura 3 b).

En cualquiera de los dos casos anteriores el coordinador puede enviar un acuse de recibo (ACK, Acknowledgment) opcional para confirmar la correcta recepción de los datos.

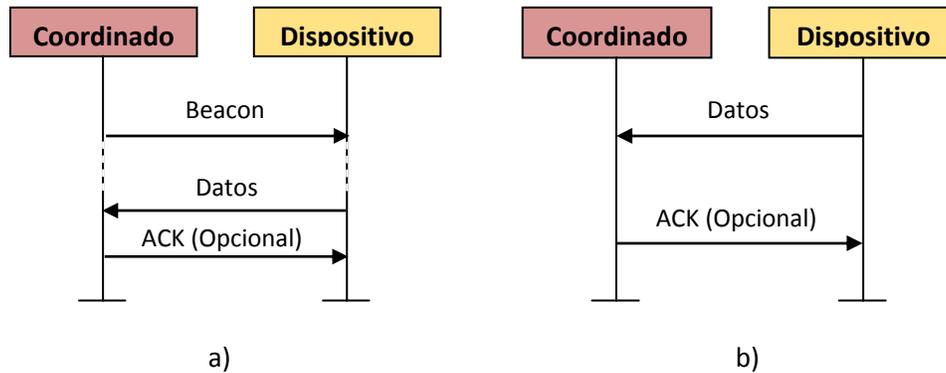


Figura 3. Transmisión desde el Dispositivo hacia el Coordinador [5].

1.5.2 El Coordinador Transmite Hacia el Dispositivo.

Cuando el coordinador va a transmitir datos hacia el dispositivo en ambientes *beacon*, el coordinador indica en la trama *beacon* que existen datos pendientes para ser enviados al dispositivo. Los dispositivos esperan la trama *beacon* para verificar si hay datos pendientes y si los hay el dispositivo transmite un comando MAC (trama de petición de datos) informando que está listo para recibir los datos. El coordinador envía un ACK para confirmar la recepción de la trama de petición de datos, para inmediatamente iniciar la transmisión de datos hacia el dispositivo. Finalmente, el dispositivo puede enviar un ACK para confirmar la correcta recepción de los datos. Ver figura 4 a). En ambientes no *beacon* el coordinador almacena los datos hasta que el dispositivo envíe la trama de petición de datos, el coordinador responde con un ACK para iniciar inmediatamente la transferencia de la trama de datos para que finalmente el dispositivo confirme la recepción exitosa con un ACK. Ver figura 4 b).

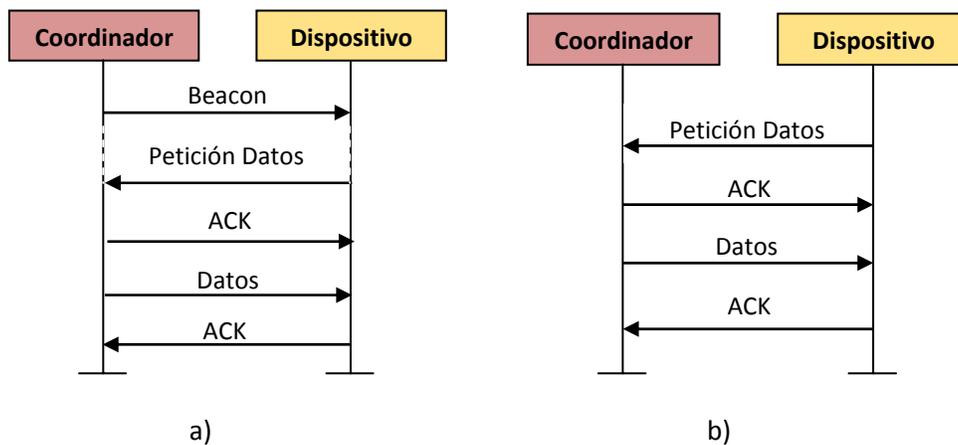


Figura 4. Transmisión desde el Coordinador hacia el Dispositivo [5].

1.5.3 Transmisión Entre Dos Dispositivos Punto a Punto

En una comunicación punto a punto, si se van a comunicar dos dispositivos dentro de una misma área de cobertura deberán definir primero si la acción a realizar es de sincronización o de recepción de datos. Si la recepción es constante los dispositivos sencillamente transmiten la información. Si es necesaria la sincronización se deben tomar ciertas medidas antes de lograr la sincronización.

1.6 ARQUITECTURA

La arquitectura ZigBee al igual que el modelo de interconexión de sistemas abiertos (OSI, Open Systems Interconnection) está definida por niveles con el objetivo de simplificar el estándar. Cada uno de estos niveles tiene una funcionalidad definida dentro de la especificación, además de brindar una serie de servicios para los niveles superiores.

El estándar IEEE 802.15.4 define el nivel físico y el subnivel de control de acceso al medio, la alianza ZigBee define el nivel de red (NWK, Network Layer) y el nivel de aplicación conformada por las aplicaciones de soporte de subniveles (APS, Application Support Sub-Layer), los dispositivos de objetos ZigBee (ZDO, ZigBee Device Objects) y los fabricantes definen los objetos de aplicación a través de las aplicaciones denominadas *framework*. Este modelo se puede observar en la figura 5.

Las interfaces entre los niveles sirven para definir los enlaces lógicos que se pueden separar en dos entidades o servicios: de gestión y de datos. Cada una de estas entidades accede a las interfaces entre niveles por medio de los puntos de acceso al servicio (SAP, Service Access Point) los cuales implementan un conjunto de operaciones para intercambiar información y comandos entre niveles.

El nivel físico proporciona dos servicios: el servicio de datos físico (PHY data service) y el servicio de gestión físico (PHY management service) que se interconectan con los puntos de acceso al servicio de la entidad de gestión del nivel físico (PLME-SAP, Physical Layer Management Entity-Service Access Point). El servicio de datos físico permite la transmisión y recepción de las unidades de datos de protocolo del nivel físico (PPDUs, PHY Protocol Data Units) a través del canal de radio [5].

El subnivel MAC proporciona dos servicios: el servicio de datos MAC (MAC data service) y el servicio de gestión MAC (MAC management service), los cuales se interconectan con los puntos de acceso al servicio de la entidad de gestión del subnivel MAC (MLME-SAP, MAC Sublayer Management Entity - Service Access Point). El servicio de datos MAC autoriza la transmisión y recepción de las unidades de datos de protocolo MAC (MPDUs, MAC Protocol Data Units) a través del servicio de datos físico [5].

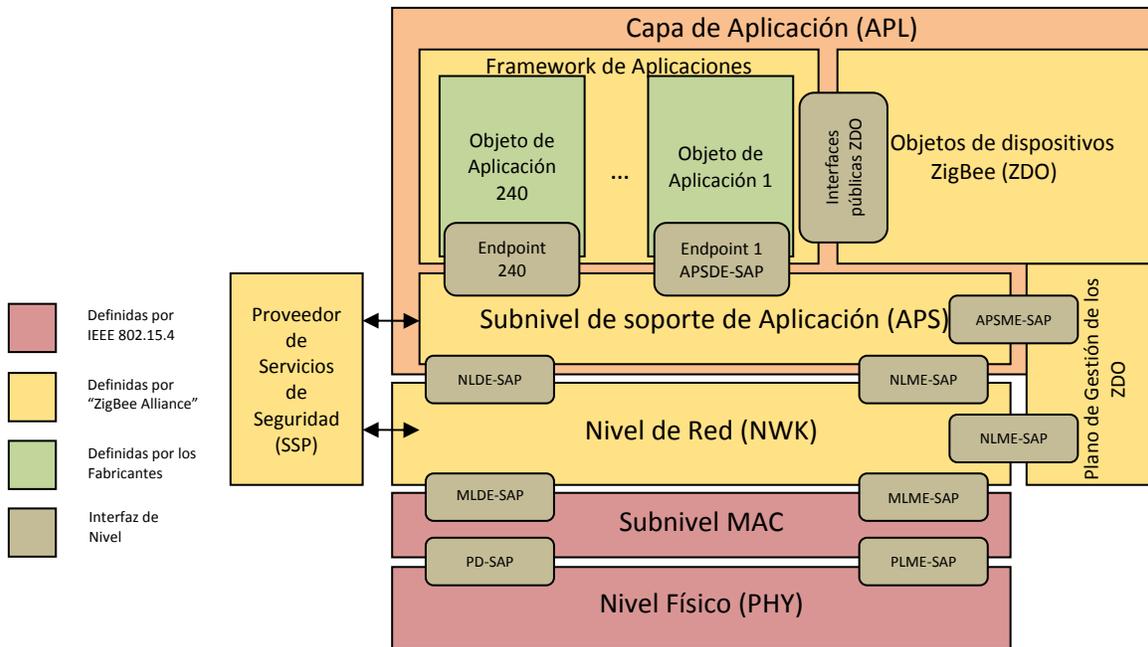


Figura 5. Arquitectura ZigBee [1].

1.7 TOPOLOGIAS DE RED

Una red ZigBee puede tener como máximo 254 nodos y dependiendo de la forma como sean agrupados los dispositivos se pueden crear hasta 255 conjuntos de nodos pudiendo llegar a tener 64770 nodos, abriendo paso para utilizar varias topologías de red: en estrella, en malla o en árbol.

1.7.1 Estrella.

La configuración en estrella debe tener al menos un dispositivo tipo FFD quien asume el papel de coordinador de red y es responsable de inicializar y mantener los dispositivos en la red (Figura 6).

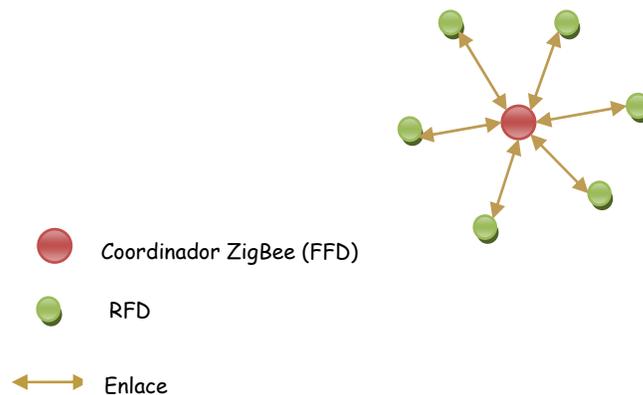
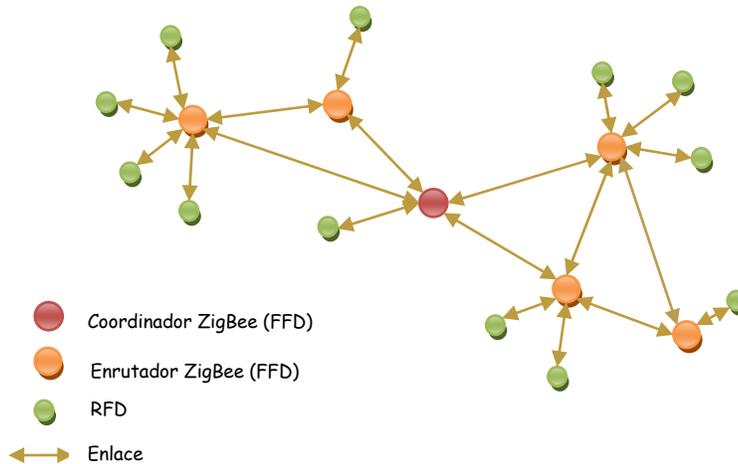


Figura 6. Topología en Estrella

1.7.2 Malla o Mesh.

Para esta topología el coordinador ZigBee es quien inicializa y elige los parámetros de la red. La red puede ser ampliada utilizando un enrutador ZigBee. En esta topología se encuentra implementado un algoritmo de enrutamiento que mediante un protocolo comando-respuesta escoge la mejor ruta. Todos los nodos se comunican directamente con otros nodos que se encuentren dentro del rango de cobertura, en efecto, los datos pasan por cualquier conjunto de nodos entre el transmisor y el receptor. La red final puede tener hasta 254 nodos, sin embargo, utilizando el direccionamiento local se puede configurar una red de más de 65000 nodos (Figura 7).



Figura

Topología en Malla

7.

1.7.3 Árbol

Este tipo de topología es un híbrido de las dos topologías anteriores (Figura 8). La administración de la batería está a cargo de los coordinadores y enrutadores, sin embargo, debe tolerar altas latencias debido al proceso para evitar colisiones.

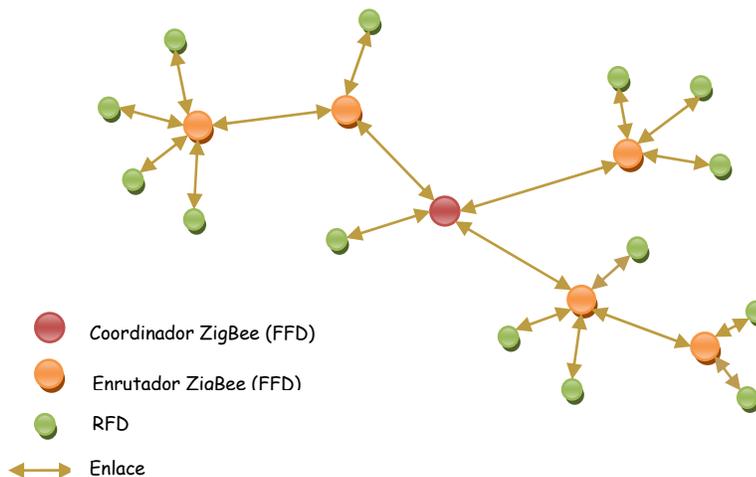


Figura 8. Topología Árbol

1.8 SUBNIVEL MAC

El subnivel MAC en conjunto con el subnivel de control de enlace lógico (LLC, Logical Link Control) conforman el nivel de enlace de datos (DLL, Data Link Layer) del modelo OSI. Esta división fue creada por el instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos (IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers) como parte de sus estándares 802 con el objetivo de conservar la compatibilidad con el modelo OSI.

El subnivel LLC permanece igual para todas las especificaciones, en cambio el subnivel MAC varía de acuerdo al hardware y los servicios que este debe realizar como interfaz entre el nivel físico y los niveles superiores.

Las características y/o funciones del subnivel MAC son [3]:

- Acceso al canal mediante CSMA-CA.
- Gestión de GTS.
- Gestión de *beacons*.
- Validación de tramas.
- Control de secuencia/flujo de información.
- Asociación y desasociación .
- Seguridad.
- Ofrecer un enlace confiable entre dos nodos.
- Control de trama.
- Direccionamiento.
- Detección de errores.
- Definición de tipo de trama.

1.8.1 Modos de Operación

1.8.1.1 Modo beacon habilitado

Es un modo de funcionamiento utilizado en redes que necesitan sincronización o soporte para baja latencia. Este modo permite el ahorro de energía ya que los dispositivos conocen cuando pueden transmitir o recibir sin necesidad de permanecer encendidos todo el tiempo. En este modo debe existir un coordinador en la red el cual se encarga de gestionar la transferencia de información y por medio de una estructura denominada supertrama (*superframe*) se encarga de la sincronización de todos los elementos de la red. Esta supertrama se encuentra entre tramas *beacon* y es definida por el coordinador de la red el cual la envía periódicamente a todos los dispositivos para determinar si alguno de ellos tiene información para transmitir o también para recibir [6].

1.8.1.2 Modo beacon no habilitado

Este modo se utiliza para redes que no requieren sincronización o soporte para baja latencia. Este modo no emplea supertramas y los dispositivos simplemente transmiten sus datos entre ellos mediante CSMA-CA no ranurado, después de una fase inicial de asociación. Para confirmar la recepción correcta de los datos el coordinador envía un ACK. Generalmente los dispositivos se

encuentran en un estado de reposo la mayoría del tiempo con el objetivo de ahorrar energía de sus baterías y de manera regular se encienden automáticamente para enviar un mensaje anunciando que siguen presentes en la red [6].

1.8.2 Formatos de las tramas MAC.

Se definen cuatro tipos de trama: datos, beacon, comandos MAC y reconocimiento (ACK).

1.8.2.1 Estructura de la trama de datos

Esta trama de datos es la utilizada para la transmisión y recepción de datos, ofrece una capacidad de carga de datos de hasta 104 bytes y una estructura robusta que mejora la recepción de datos en condiciones de comunicación adversas. Esta trama es llamada también MPDU y está compuesta por el encabezado MAC (MHR, MAC Header), la carga útil MAC (MAC Payload) y el campo final de trama (MFR, MAC Footer), estructura que se puede observar en la figura 9.

A continuación se hace una breve descripción de cada uno de los campos que componen la MPDU.

Octetos: 2	1	0/2	0/2/8	0/2	0/2/8	0/5/6/10/14	Variable	2
Control de Trama	Número de Secuencia	Identificador de PAN Destino	Dirección de Destino	Identificador de PAN Origen	Dirección Origen	Encabezado auxiliar de seguridad	Carga Útil	FCS
Campos de Direccionamiento								
MHR							Carga Útil MAC	MFR

Figura 9. Estructura de la Trama de Datos. [5]

✓ Encabezado MAC (MHR)

Control de Trama: utiliza 2 bytes para definir el tipo de trama que está siendo transmitida, controlar el ACK y especificar el formato del campo de dirección.

Número de Secuencia: utiliza 1 byte para especificar un número de secuencia único para cada trama con el objetivo de ser utilizado como ACK, de manera que una transmisión es considerada exitosa si la trama ACK contiene el mismo número de secuencia de la trama inmediatamente anterior.

Identificador de PAN destino: puede utilizar 0 ó 2 Bytes para almacenar la dirección de la red PAN hacia dónde va dirigida la trama.

Dirección de destino: puede utilizar 0, 2 u 8 Bytes para almacenar la dirección del dispositivo al que va dirigida la trama.

Identificador de PAN origen: puede utilizar 0 ó 2 Bytes para almacenar la dirección de la red PAN donde se ha originado la trama.

Dirección origen: puede utilizar 0, 2 u 8 Bytes para almacenar la dirección del dispositivo origen que ha generado la trama.

✓ **Carga útil MAC (Payload)**

Es de longitud variable, pero en general toda la MPDU no puede exceder un máximo de 127 Bytes y el tipo de datos depende del tipo de trama (*beacon*, de datos, ACK y de comandos MAC) ya que en este campo se almacena toda la información relacionada al tipo de trama, y donde solo las tramas de datos y *beacon* contienen información que se origina en niveles superiores.

✓ **MAC Footer (MCR)**

Contiene el campo de verificación de secuencia de trama (FCS, Frame Check Sequence) que utiliza 2 bytes para verificar la integridad de la trama MAC por medio de un código de redundancia cíclica (CRC, Cyclic Redundancy Check) de 16 bits. El FCS es calculado sobre el MHR y la carga útil MAC.

1.8.2.2 Estructura de la trama Beacon

Esta trama es utilizada para identificar la red, sincronizar todos los dispositivos que conforman la red y definir la estructura de la supertrama. Los campos MHR y MCR son los mismos mencionados anteriormente en la estructura de la trama de datos, los cambios se presentan en el campo de carga útil MAC tal como se puede observar en la figura 10.

Octetos: 2	1	4/10	0/5/6/10/14	2	Variable	Variable	Variable	2
Control de Trama	Número de Secuencia	Campos de Direccionamiento	Encabezado Auxiliar de Seguridad	Especificación Supertrama	Campos GTS	Dirección Pendiente	Carga Útil Beacon	FCS
MHR				Carga Útil MAC				MFR

Figura 10. Estructura de la Trama Beacon [5].

Especificación Supertrama: utiliza 2 Bytes para definir los parámetros de la supertrama.

Campos GTS: es un campo variable y es donde se especifica todo lo relacionado a los GTS tales como los CAPs y los CFPs asignados por el coordinador.

Dirección pendiente: es variable y es donde se almacena la dirección de los dispositivos que tienen información pendiente en el coordinador para ser transmitida o recibida.

Carga útil Beacon: es variable y contiene la información de los niveles superiores.

1.8.2.3 Estructura de la trama de Comandos MAC.

Es utilizada para la gestión y configuración de los dispositivos, que en redes centralizadas pueden ser configurados a distancia. Su estructura se puede observar en la figura 11.

1	0/5/6/10/14	1	Variable	2		
Octetos: 2						
Control de Trama	Número de Secuencia	Campos de Direccionamiento	Encabezado Auxiliar de Seguridad	Identificador del Comando de Trama	Carga Útil de Comando	FCS
MHR				Carga Útil MAC		MFR

Figura 11. Estructura de la Trama de Comandos MAC [5].

Identificador de comando de trama: utiliza 1 Byte para indicar el tipo de comando que está siendo enviado y puede tomar cualquiera de los valores de la tabla 1.

Carga útil del comando: es variable y contiene el comando que está siendo utilizado.

Identificador del Comando	Nombre del Comando
0x01	Petición de Asociación
0x02	Respuesta a la Asociación
0x03	Notificación de Desasociación
0x04	Petición de Datos
0x05	Notificación de Conflictos en el Identificador del Coordinador (PAN)
0x06	Notificación de Huérfano
0x07	Petición de Beacon
0x08	Realineación (Realignment) del Coordinador
0x09	Petición de GTS
0x10-0xFF	Reservados

Tabla 1. Tipos de Comandos MAC [5].

1.8.2.4 Estructura de la trama de Acuse de Recibo (ACK).

Es la encargada de confirmar que los datos han sido recibidos sin errores. Los campos control de trama y número de secuencia son obtenidos del paquete original. En la figura 12 se puede observar su estructura.

Octetos: 2	1	2
Control de Trama	Número de Secuencia	FCS
MHR		MFR

Figura 12. Estructura de la Trama ACK [5].

Control de trama: utiliza 2 Bytes y contiene el valor que indica que es una trama de acuse de recibo.

Número de secuencia: utiliza 1 Byte para indicar el valor del número de secuencia recibido en la trama donde será enviado el acuse de recibo.

1.8.3 Formato de la trama PPDU

Se puede observar en la figura 13 que la unidad de datos de protocolo MAC (MPDU, MAC Protocol Data Unit), en la trama de unidad de datos de protocolo PHY (PPDU, PHY Protocol Data Unit) es también denominada como unidad de servicio de datos PHY (PSDU, PHY Service Data Unit).

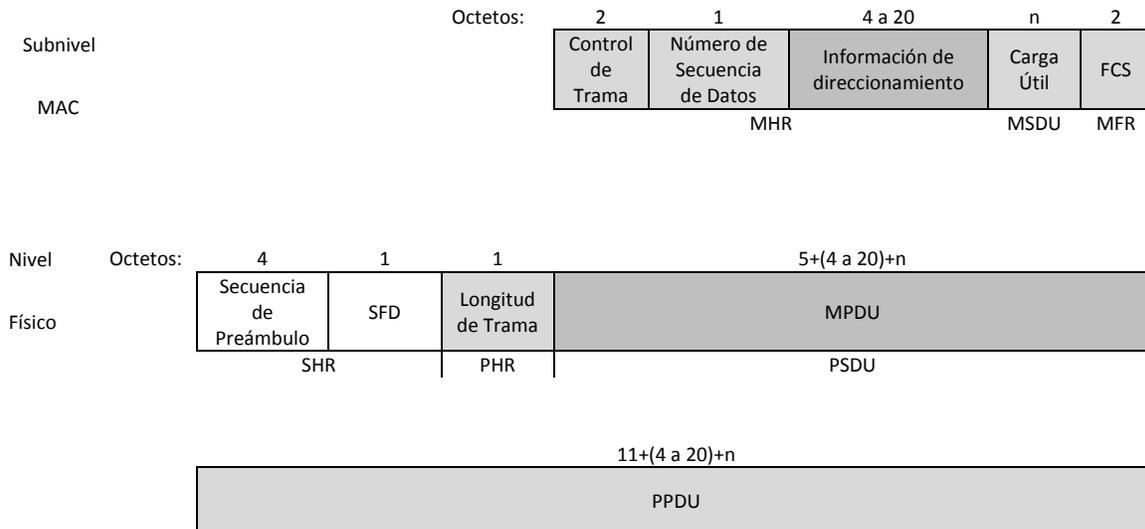


Figura 13. Estructura de la Trama PPDU [5].

La PSDU tiene una longitud máxima de 127 Bytes, 2 de los cuales son dedicados al FCS.

Además de la PSDU, la PPDU incluye un preámbulo de 4 bytes, un byte para el delimitador de inicio de trama (SFD, Start Frame Delimiter); los cuales conforman el encabezado de sincronización (SHR, Synchronization Header) y un byte para la longitud de la trama que conforma el encabezado de nivel físico (PHR, PHY Header). A continuación se puede ver una breve descripción de cada uno de estos campos.

- **Secuencia de preámbulo:** es un campo que posee 4 Bytes, utilizados para la sincronización de los mensajes. Estos 32 bits son ceros binarios según el estándar IEEE 802.15.4.
- **Delimitador de inicio de trama:** Denominado como SFD es un campo de 1 Byte que indica el inicio de la trama de datos y el final del secuencia de preámbulo o SHR. La secuencia 11100101 es la definida por el estándar para la frecuencia de 2,4 GHz.
- **Longitud de trama:** es un campo de 1 Byte que contiene la información sobre la cantidad de Bytes de la trama PSDU. La longitud de la trama PSDU puede variar entre 0 y 127 Bytes.

1.9 NIVEL FÍSICO DEL ESTÁNDAR IEEE 802.15.4

El nivel físico es el encargado de la selección de la frecuencia del canal, la modulación, potencia de la señal, detección de actividad del canal, activación y desactivación de nodos, indicación de la calidad del enlace (LQI, Link Quality Indication), exploración de canal libre (CCA, Clear Channel Assessment) y además se incluyen sistemas de detección de energía recibida (ED, Energy Detection).

El estándar está definido para las bandas de operación ISM, específicamente 868 MHz en Europa, 915 MHz en Estados Unidos y 2,4 GHz en todo el mundo.

Banda (MHz)	Rango de Frecuencias (MHz)	Modulación	Velocidad de Chip (Kchip/s)	Velocidad de Bit (Kb/s)	Velocidad de Símbolo (KS/s) ²
868/915	868-868,6	BPSK	300	20	20
	902-928	BPSK	600	40	40
2450	2400-2483,5	O-QPSK	2000	250	62,5

Tabla 2. Parámetros del Nivel Físico [5]

1.9.1 Ensanchamiento y Modulación para 2,4 GHz.

Espectro ensanchado (SS, Spread Spectrum) es una técnica o método de transmisión por el cual energía electromagnética generada en un ancho de banda particular es deliberadamente ensanchada en el dominio de la frecuencia, resultando en una señal con un mayor ancho de banda. Esta técnica es utilizada por varias razones, entre las cuales se incluye el establecimiento de comunicaciones seguras gracias a la resistencia ante interferencia y captura de la señal (jamming)³. Ver figura 14.

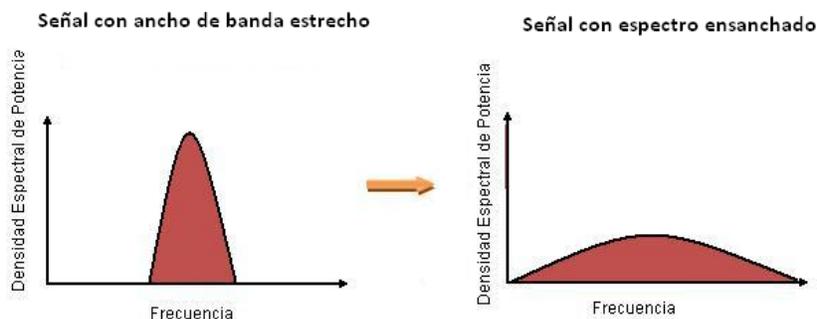


Figura 14. Modulación y Ensanchamiento [5]

Existen técnicas para ensanchar una señal en las que se utilizan procedimientos que incluyen operadores lógicos como es el caso del espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS, Direct Sequence Spread Spectrum). IEEE 802.15.4 hace uso de conversiones de bit a símbolo y de símbolo a chip utilizando la tabla 3, como se explicará más adelante. En la banda de 2,4GHz se utiliza la modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (O-QPSK, Offset- Quadrature Phase Shift Keying). El ensanchamiento y la modulación como se define en el estándar IEEE 802.15.4 se pueden resumir en la figura 15.

² La velocidad de símbolo es utilizada únicamente en la conversión de bit a símbolo en el ensanchamiento.

³ *Jamming*: interferencia causada por señales de radio que afectan las comunicaciones reduciendo la relación señal a ruido.



Figura 15. Modulación y Ensanchamiento [5].

1.9.1.1 Bit a símbolo

Como parte del proceso de ensanchamiento la conversión de bit a símbolo toma como entrada los datos binarios de la trama PDU, estos datos son organizados de tal forma que en cada octeto de bits, los 4 bits menos significativos (LSB, Least Significant Bit) b_0, b_1, b_2, b_3 , son procesados primero dentro de un símbolo y los 4 bits más significativos (MSB, Most Significant Bit) b_4, b_5, b_6, b_7 son mapeados posteriormente, en otro símbolo [5].

1.9.1.2 Símbolo a chip

Una vez se obtiene el símbolo equivalente a b_0, b_1, b_2, b_3 , se procede a formar una secuencia pseudo-aleatoria (PN, Pseudo-Random Noise) de 32 chips ($c_0 \dots c_{31}$), esto se hace teniendo en cuenta la equivalencia mostrada entre símbolos y chips de la Tabla 3.

Símbolo Decimal	Símbolo Binario (b_0, b_1, b_2, b_3) ó (b_4, b_5, b_6, b_7)	Valores de Chip ($c_0 \dots c_{31}$)
0	0000	1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0
1	1000	1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0
2	0100	0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0
3	1100	0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1
4	0010	0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1
5	1010	0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0
6	0110	1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1
7	1110	1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1
8	0001	1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1
9	1001	1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1
10	0101	0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1
11	1101	0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0
12	0011	0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0
13	1011	0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1
14	0111	1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0
15	1111	1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0

Tabla 3. Símbolo a Chip [5].

Teniendo en cuenta que la velocidad de transmisión de datos definida por el estándar para la banda de 2,4 GHz es de 250 Kbps y que durante el proceso de ensanchamiento la trama PDU es

agrupada en símbolos de 4 bits se obtiene una velocidad de 62,5 KS/s (Tabla 2) y en el proceso de conversión de símbolo a chip se obtiene una velocidad de chip 2Mchips/s.

1.9.1.3 Modulación O-QPSK

A lo largo de este trabajo de grado se mencionará principalmente los aspectos relacionados con la banda de 2,4 GHz, debido a que se ha decidido desarrollar el trabajo utilizando esta banda y O-QPSK es la modulación especificada en el estándar. Debido a la semejanza entre O-QPSK y QPSK se mencionará inicialmente a QPSK para comprender mejor O-QPSK. Las dos modulaciones toman la secuencia de datos de entrada, que para el estándar está compuesta por 32 chips y por medio de un multiplexor se divide dicha secuencia en dos:

- ✓ Par o en fase (I, in-phase).
- ✓ Impar o fase de cuadratura (Q, quadrature-phase).

Según el estándar IEEE 802.15.4 O-QPSK tiene una señal de entrada de 32 chips ($c_0 c_1 c_2 c_3 c_4 c_5 \dots c_{30} c_{31}$) que tiene por una parte los bits pares que son parte de la componente en fase (I) $c_0 c_2 c_4 \dots c_{30}$ y por otra parte los bits impares que hacen parte de la componente en cuadratura (Q) $c_1 c_3 c_5 \dots c_{31}$ [5].

Para ver este proceso más claro se toma el siguiente ejemplo de QPSK con una señal de tan solo 8 bits 1 1 0 0 0 1 1 0, que después de ser demultiplexada se obtiene que la parte impar está compuesta por 1 1 0 0 1 1 0 y los bits que componen la parte par son 1 0 0 0 1 1 0, como se visualiza en la Figura 16, figura que corresponde a una modulación pasabanda.

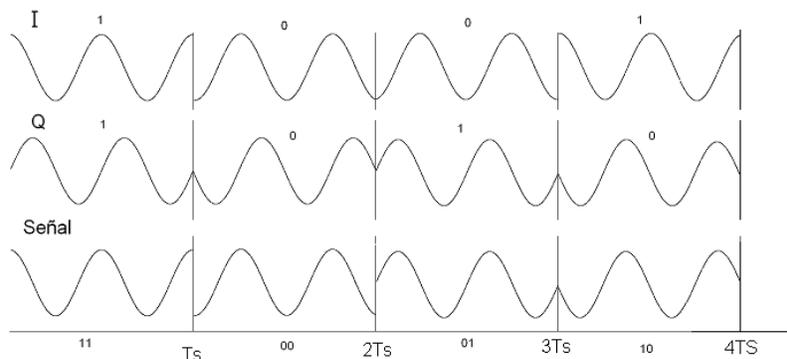


Figura 16. QPSK en el Dominio del Tiempo [7].

La característica que marca la diferencia entre O-QPSK y QPSK radica en que en la parte impar de O-QPSK se agrega un retardo de tiempo de chip (T_c) (ver figura 17) y esto ocasiona que los cambios de fase no sobrepasen los 90° ya que de cada par de chips solo uno de ellos cambia en el doble del tiempo de un periodo de chip, mientras que en QPSK los cambios de fase pueden ser mayores a 90° y menores que 180° . Los cambios de fase de cada modulación han sido destacados en los diagramas de constelación de la figura 19 en donde el sentido de las flechas indica los cambios posibles.

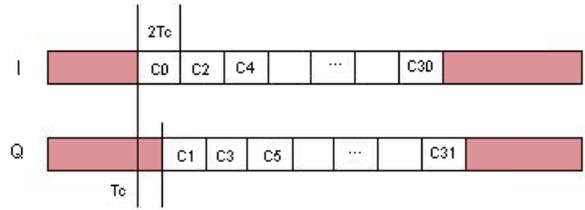


Figura 17. Desplazamiento O-QPSK [5].

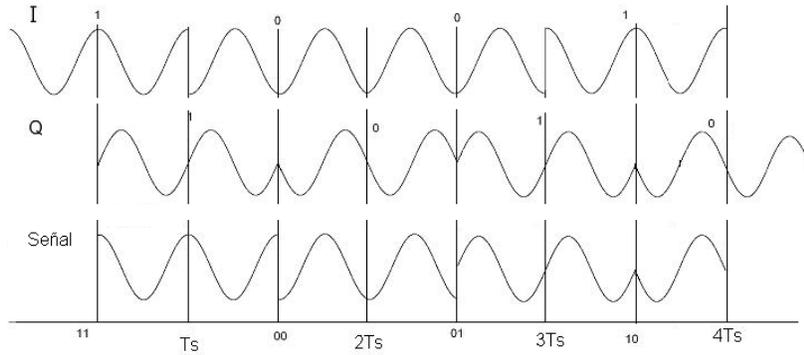


Figura 18. O-QPSK en el Dominio del Tiempo [7].

Retomando el ejemplo anterior, se puede apreciar el resultado de O-QPSK en la figura 18.

La señal I modula en una onda coseno mientras que la señal Q modula una señal seno, ver figura 22. En las modulaciones O-QPSK y QPSK la fase de la portadora cambia dependiendo de la señal mensaje. O-QPSK y QPSK manejan cuatro estados de fase dependiendo de los datos como se muestra en la Tabla 4 y en la figura 19.

FASE (Grados)	DATOS (Bits)
45°	11
135°	01
225°	00
315°	10

Tabla 4. Código Gray

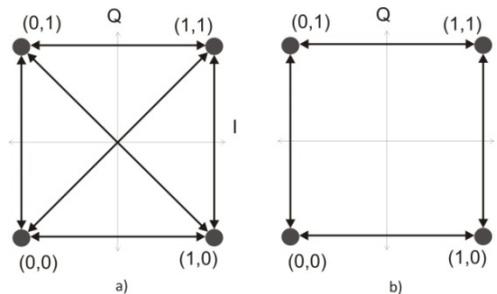


Figura 19. Diagramas de Constelación para QPSK (a) y para O-QPSK (b)

En el transmisor se realiza un control de cambios en los chips y de esta forma se asegura que no hay cambios de fase. Por ejemplo, si la información que se ha transmitido previamente tiene una fase de 45° y los datos que están siendo procesado actualmente tiene una fase 135° entonces la diferencia de fase entre ellos es de 90° que es el máximo cambio de fase en O-QPSK y de esta forma se asegura que no hay errores en la fase y en los datos.

Los diagramas de constelación (ver figura 19) permiten visualizar los posibles cambios de fase de la señal portadora según la señal de datos a la entrada del modulador, los cuales de igual manera se encuentran relacionados con la Tabla 4 [8].

El ancho de banda de O-QPSK es igual a R en Hertz, siendo R para ZigBee la velocidad de transmisión de chips (señal de alta velocidad) y esta equivale a 2 Mchip/s, por lo tanto el ancho de banda es igual a 2 MHz, que es suficiente ya que la distancia entre canales es de 5 MHz; el ancho de banda mínimo de Nyquist es $R/2$, que para este caso sería 1 MHz.

Debido a la manera como cambia la fase en O-QPSK los cambios no son mayores a 90° como en QPSK siendo esta la ventaja de O-QPSK frente a QPSK y aunque ocupan el mismo ancho de banda se consigue reducir los requerimientos de potencia en el transmisor y el receptor, ayudando así a consumir menos energía, característica de ZigBee [9].

En la figura 20 se muestra la forma como cambia la fase de una señal portadora modulada en fase, donde se puede apreciar la diferencia de QPSK y O-QPSK. En la primera gráfica hay cambios de 90° y de 180° que es característico de QPSK mientras que en la segunda gráfica la fase tiene cambios máximos de 90° debido a que solo un chip cambia al tiempo por el retardo agregado.

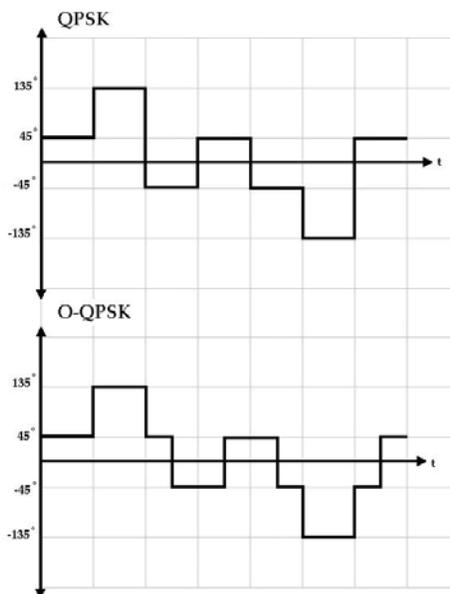


Figura 20. Diferencia de Fase entre O-QPSK Y QPSK [7]

En O-QPSK la probabilidad de error de bit se calcula con la siguiente fórmula:

$$Pb = Q\left(\sqrt{\frac{2Eb}{No}}\right) \quad (1)$$

Donde E_b es la energía por bit y N_o representa la densidad espectral de ruido y Q es llamada "función Q" y se define como:

$$Q(x) = \frac{1}{2} * erfc\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \quad (2)$$

Donde $x = \sqrt{\frac{2Eb}{No}}$ y erfc es la función de error complementario [10].

Por otra parte al hablar del desempeño de radioenlaces digitales se hace referencia a la relación E_b/N_o asociada a una tasa de error de bit (BER, Bit Error Rate) y N_o es la densidad de potencia debido al ruido térmico (potencia de ruido térmico sobre un ancho de banda de 1Hz). Teóricamente la gráfica de BER vs E_b/N_o para O-QPSK se puede observar en la figura 21:

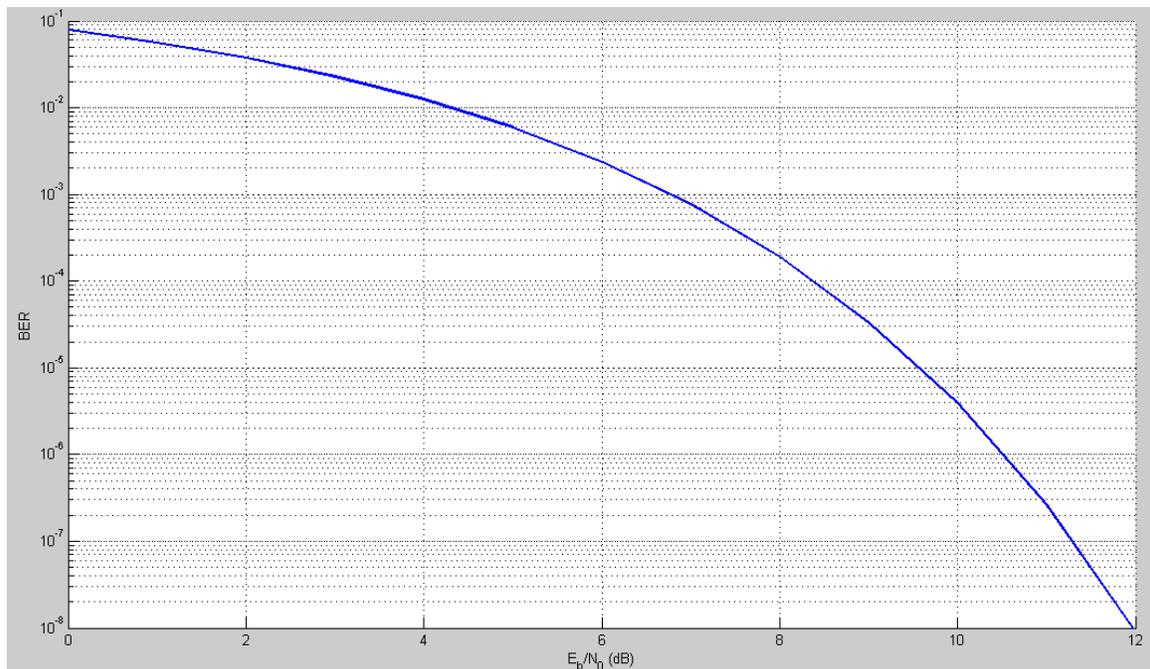


Figura 21. BER vs Eb/No para O-QPSK

En la figura 22 se aprecia un diagrama general del transmisor de la modulación O-QPSK, esta modulación utiliza no retorno a cero (NRZ, Non Return to Zero) como técnica de codificación que toma los bits de entrada y los convierte en una señal bipolar lo que permite generar en la salida las fases correspondientes a la modulación y a los bits de entrada.

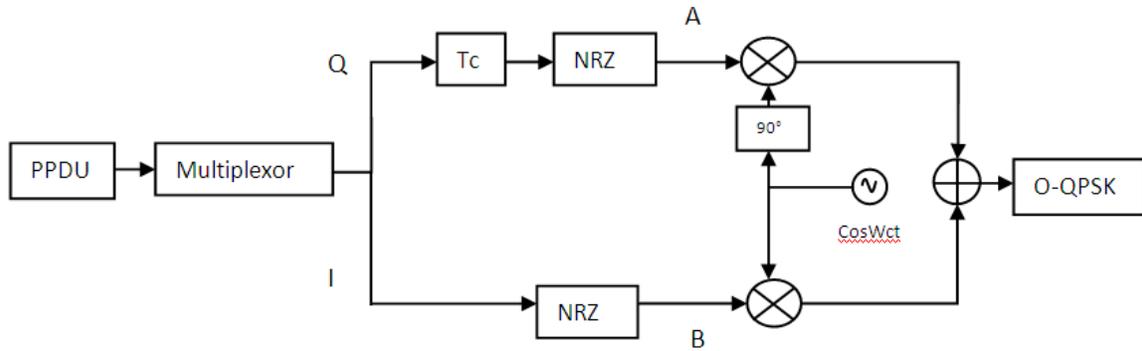


Figura 22. Transmisor O-QPSK [11].

1.9.2 Modulación por desplazamiento de fase binario (BPSK, Binary Phase Shift Keying)

BPSK es la modulación definida por el estándar en las bandas de 868/915 MHz. En esta banda IEEE 802.15.4 utiliza DSSS también como técnica de transmisión.

Para BPSK la fase cambia 180 grados, teniendo así solo dos fases, de aquí su nombre. Utiliza como técnica de codificación digital NRZ. En esta modulación un "1" implica un cambio de 0° , y un "0" significa un cambio de 180° sobre la fase de la portadora. El diagrama de constelación se visualiza en la figura 23 [12].

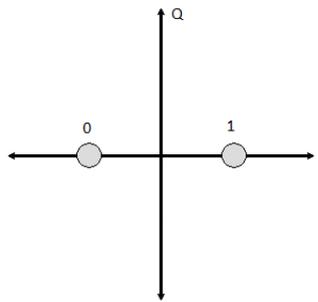


Figura 23. Diagrama de Constelación BPSK

La probabilidad de error de bit para BPSK puede ser calculada de la misma forma que es calculada la de O-QPSK con la fórmula 1 [10].

CAPÍTULO 2

APLICACIÓN Y ADAPTACIÓN METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

En este capítulo se describirá la aplicación y adaptación de la metodología de simulación de sistemas de telecomunicaciones, con el fin de obtener un modelo conceptual y de simulación basado en las especificaciones de las capas PHY y MAC del estándar IEEE 802.15.4 para una comunicación punto a punto [13][14].

La implementación del modelo obtenido como resultado de la metodología se realizará utilizando la herramienta Signal Processing Designer (SPD) de Coware®.

2.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y PLAN DE ESTUDIOS

Para la correcta formulación del problema y el plan de estudios se deben definir en primer lugar los objetivos de tal manera que ofrezcan elementos necesarios para especificar métodos, procedimientos y servicios con el fin de obtener resultados satisfactorios en la simulación.

Para lograr la correcta formulación de los objetivos de la simulación se recomienda seguir los siguientes pasos:

- ✓ Adquirir información sobre el funcionamiento del sistema.
- ✓ Identificar los fines de la simulación.
- ✓ Formulación de los objetivos.

2.1.1 Adquirir información sobre el funcionamiento del sistema.

Para conocer el funcionamiento general de un sistema se pueden utilizar una serie de preguntas que suministren la información suficiente para definir las variables de entrada y de salida además de los parámetros que se quieran analizar con la simulación.

2.1.1.1 Transmisor

- ✓ ¿Qué tipo de señales va a procesar el transmisor?

En esta etapa se generará una secuencia de bits aleatoria que representan la información que se desea transmitir y el encabezado MAC (MHR), estas señales serán procesadas hasta convertirlas en una señal modulada de espectro ensanchado según el estándar IEEE 802.15.4 que viajará a través de un canal inalámbrico.

- ✓ ¿Qué pasos sigue el transmisor para el procesamiento de las señales en cuestión?

Los siguientes pasos describen el proceso para obtener la señal modulada de espectro ensanchado a partir de una señal aleatoria de bits.

- **Generador de Información.**
El generador de información establece parámetros de periodo de bit y la cantidad de bits por trama. Los bits que representan la información se crean a partir de una función que produce números binarios aleatorios.
 - **Generador de Trama PPDU.**
En esta etapa a la señal aleatoria proveniente del generador de información, se le agregan los campos SHR y PHR además de calcular el CRC que va en el campo FCS.
 - **Ensanchador-Modulador.**
Después de obtener la trama PPDU se procede a ensanchar según el estándar IEEE 802.15.4 y modular utilizando la técnica de O-QPSK.
- ✓ ¿Qué factores serán evaluados con la simulación?
- La estructura de las señales después del procesamiento que se realice en cada etapa.
 - Espectro de las señales y ancho de banda.
 - Diagramas de constelación.
 - Diagramas de ojo.
 - Se calculará el CRC antes de la transmisión de la trama.

2.1.1.2 Canal

- ✓ ¿Qué tipo de señales va a procesar el canal?
- El canal recibirá una señal de espectro ensanchado que ya ha sido modulada, que corresponde a la señal de salida del transmisor y entregará una señal de espectro ensanchada afectada por el ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN, Additive White Gaussian Noise) ya que es una característica propia de canales o medios inalámbricos.
- ✓ ¿Qué pasos sigue el canal para el procesamiento de las señales en cuestión?
- Recibe la señal del transmisor y se somete a un proceso donde se le adiciona una componente de AWGN para entregar al receptor una señal afectada por este tipo de ruido.
- ✓ ¿Qué factores serán evaluados con la simulación?
- La estructura de las señales en el dominio del tiempo después del proceso AWGN en el canal y la relación energía de bit a densidad de potencia de ruido (E_b/N_0).
 - Espectros de la señal y ancho de banda.
 - Diagramas de constelación.
 - Diagrama del ojo.

2.1.1.3 Receptor

- ✓ ¿Qué tipo de señales va a procesar el Receptor?

El receptor recibe una señal de espectro ensanchado afectada por AWGN y recuperará la señal de información enviada por el transmisor representada en una secuencia de bits aleatoria.

- ✓ ¿Qué pasos sigue el receptor para el procesamiento de las señales en cuestión?

Después de recibir la señal del canal el receptor se encarga de demodular y desensanchar dicha señal con el objetivo de obtener la trama PPDU que contiene los datos transmitidos.

- ✓ ¿Qué factores serán evaluados con la simulación?

- Se calculará la tasa de error de bit, BER comparando la información transmitida con la recibida. Se verificará la detección de errores con ayuda del CRC.
- Se realizará un análisis de la relación entre BER y E_b/N_0 .
- Espectro y ancho de banda.

2.1.2 Identificar los fines de la simulación.

El propósito de esta simulación es hacer un análisis de desempeño de la tecnología ZigBee a través de la aplicación de diferentes etapas de procesamiento de la señal en una comunicación punto a punto ZigBee, etapas como ensanchamiento, modulación, atenuación, desensanchamiento y demodulación que están integradas dentro de componentes del sistema como el transmisor, el canal y el receptor que en su conjunto conforman el sistema en general.

2.1.3 Formulación de los objetivos.

- ✓ Analizar las técnicas de modulación, codificación y transmisión del estándar IEEE 802.15.4.
- ✓ Evaluar el desempeño de la tecnología ZigBee en la banda de 2,4GHz a una velocidad de transmisión de 250 Kbps, a través de los parámetros BER, (E_b/N_0) y la comparación de los diagramas de constelación y ojo entre las señales transmitidas y las recibidas.

2.2 RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Se llevará a cabo la adecuada identificación de los elementos y propiedades de cada una de las etapas que componen el sistema total, basándose siempre en la especificación dada por el estándar IEEE 802.15.4. La información recolectada debe ser lo más descriptiva posible y para obtener resultados satisfactorios en la simulación se seguirá el siguiente procedimiento:

- ✓ Identificación de clases y objetos.
- ✓ Identificación de estructuras.
- ✓ Identificación de sujetos.

- ✓ Definición de los atributos.
- ✓ Identificación de servicios o métodos.

2.2.1 Modelo del Transmisor

2.2.1.1 Identificación de clases y objetos.

Teniendo en cuenta que en un sistema de telecomunicaciones un objeto es un componente en el que se procesa y/o genera una o varias señales, se pueden identificar como objetos del transmisor: el generador de información, generador de trama PPDU y ensanchador-modulador.

2.2.1.2 Identificación de las estructuras.

La complejidad de un sistema puede ser manejada empleando el término estructura. Para el modelo de simulación del transmisor se utilizará la estructura *Whole-Part* (Todo-Parte), ya que el análisis orientado a objetos basa su trabajo en este tipo de estructuras. Es posible identificar las siguientes estructuras en el transmisor.

✓ **Generador de Información**

El generador de información no tiene algún componente que lo conforme. Su estructura se visualiza en la figura 24.

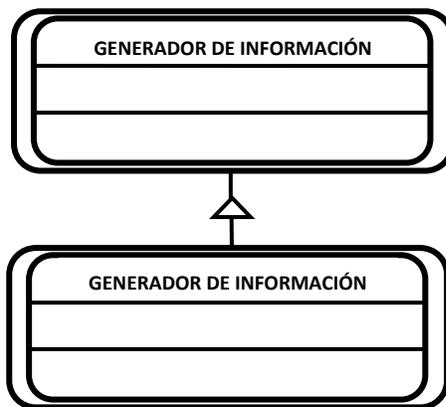


Figura 24. Estructura del Generador de Información

✓ **Generador de Trama PPDU.**

Se divide en 3 componentes: el SHR, el PHR y el FCS. El SHR a su vez se divide en los campos secuencia de preámbulo (preamble sequence) y delimitador de inicio de trama (SFD). El PHR se compone del campo longitud de trama y el FCS está compuesto por el CRC. Ver figura 25.

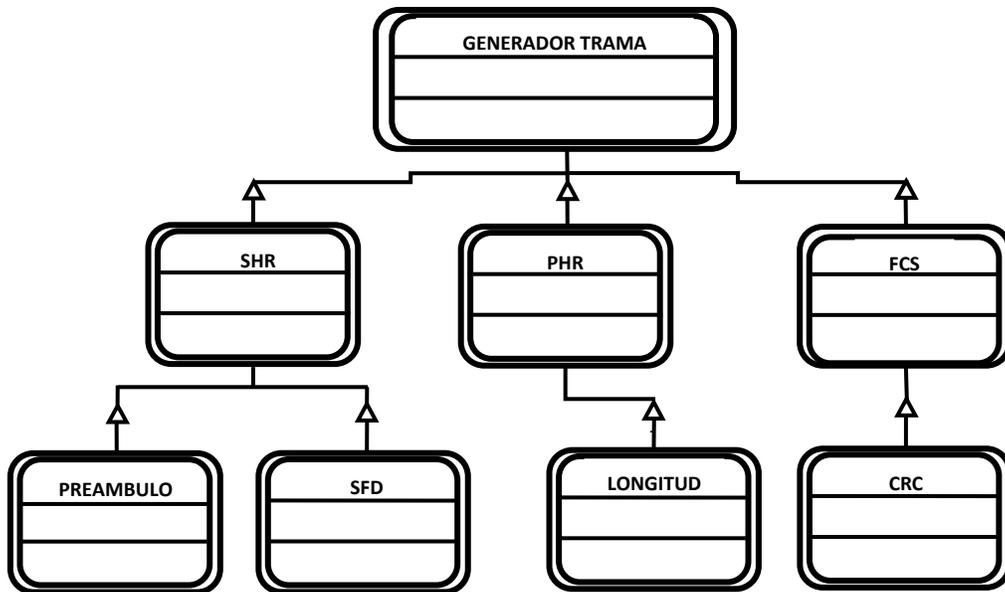


Figura 25. Estructura del Generador de Trama PDU

✓ **Ensanchador-Modulador.**

Se divide en 2 componentes básicos: el ensanchador y el modulador. El ensanchador está conformado a su vez por 2 elementos: el encargado de hacer la conversión de bit a símbolo y el que convierte de símbolo a chip. Por otra parte, el modulador se compone del modulador O-QPSK. Ver figura 26.

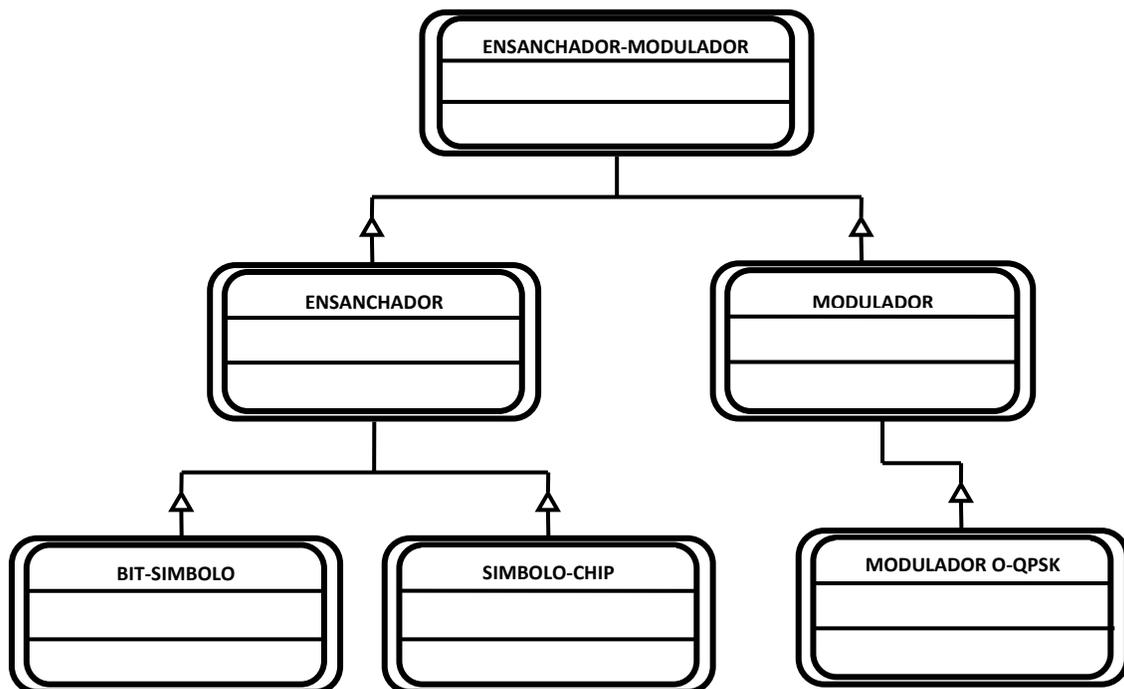


Figura 26. Estructura del Ensanchador-Modulador

2.2.1.3 Identificación de los sujetos.

En el análisis orientado a objetos un sujeto es un concepto que representa el todo de un sistema desde una perspectiva alta. Para seleccionar un sujeto se remueve el nivel más alto de una estructura a un rectángulo de tal manera que represente toda la estructura.

En el transmisor se identificaron tres sujetos: el generador de información, el generador de trama PDU y el ensanchador-modulador.

2.2.1.4 Identificación de los atributos

Considerando cada objeto de forma independiente se obtiene:

✓ Identificación de atributos para el Generador de Información

- Nombre: Tipo de señal de salida.
Descripción: Representa el tipo de señal que se va a obtener a la salida de esta etapa, que en este caso va a ser una señal de tipo binario.
- Nombre: Periodo.
Descripción: Determina el periodo de duración de cada uno de los bits generados que conformarán la señal de salida.
- Nombre: Probabilidad.
Descripción: Indica la probabilidad de generar cada uno de los estados de la señal.
- Nombre: Cantidad de Bits
Descripción: Establece la cantidad de bits por trama que serán producidos por el generador de información para conformar la señal que representa la información a transmitir.

✓ Identificación de atributos para el Generador de Trama PDU

- Nombre: Secuencia de Preámbulo.
Descripción: Está conformado por 4 Bytes (32 bits), utilizados para la sincronización de los mensajes. Estos 32 bits son ceros binarios según el estándar IEEE 802.15.4.
- Nombre: SFD.
Descripción: Campo de 1 Byte (8 bits) que indica el inicio de la trama de datos y el final de la secuencia de preámbulo o SHR. La secuencia 11100101 es la definida por el estándar para la frecuencia de 2.4 GHz.
- Nombre: Longitud de Trama.
Descripción: Es un campo de 1 Byte (8 bits) que contiene la información sobre la cantidad de Bytes de la trama PSDU. La longitud de la trama PSDU puede variar entre 0 y 50 Bytes.

- Nombre: FCS.
Descripción: Son 2 Bytes (16 bits) que están compuestos por el código CRC ITU-T de 16 bits y sirven para detección de errores.

✓ **Identificación de atributos para el Ensanchador-Modulador.**

- Nombre: Tipo de Entrada.
Descripción: Define el tipo de datos que entrará al ensanchador-modulador que en este caso es de tipo binario.
- Nombre: Tamaño del Buffer de salida.
Descripción: Define el tamaño final de la trama.
- Nombre: Tabla de Símbolos.
Descripción: Define el resultado de la conversión a símbolo de la información binaria de usuario.
- Nombre: Tabla de chips.
Descripción: Define la conversión de símbolo a chip según IEEE 802.15.4.
- Nombre: Número Complejo.
Descripción: Define el número complejo que sirve para representar un conjunto de chips de salida en el diagrama de constelación acorde a la modulación.

2.2.1.5 Identificación de Servicios o Métodos.

Los servicios o métodos se pueden definir como el comportamiento específico que puede presentar un objeto, por lo que es necesario definir de manera clara los procedimientos que cada objeto realiza para identificar plenamente los servicios de dicho objeto.

✓ **Identificación de servicios para el generador de información**

- Nombre: Generar bits aleatorios
Descripción: Genera una cantidad de bits (ceros y unos) con una probabilidad definida.

✓ **Identificación de servicios para el generador de trama PPDU**

- Nombre: Adicionar secuencia de preámbulo
Descripción: Adiciona 32 ceros utilizados para la sincronización de los mensajes.
- Nombre: Adicionar SFD
Descripción: Adiciona la secuencia 11100101 que indica el inicio de la trama de datos.
- Nombre: Adicionar longitud de trama

Descripción: Adiciona 8 bits específicos que indican la longitud de la carga útil a transmitir.

- Nombre: Calcular CRC
Descripción: Calcula el código CRC 16-bit ITU-T sobre el MHR y la carga útil MAC.
- Nombre: Adicionar FCS
Descripción: Adiciona 16 bits obtenidos como resultados del cálculo del CRC que se utilizan para la detección de errores.

✓ **Identificación de servicios del Ensanchador-Modulador**

- Nombre: Ensanchar
Descripción: Realiza el ensanchamiento de la señal según las tablas definidas en el estándar IEEE 802.15.4, realizando primero la conversión de bit a símbolo y luego de símbolo a chip.
- Nombre: Modular
Descripción: Modula la señal ensanchada mediante la técnica O-QPSK y entrega un número complejo (I-Q) que puede ser representado a través del diagrama de constelación.

2.2.2 Modelo del canal

2.2.2.1 Identificación de clases y objetos.

El modelo del canal está compuesto por el trayecto sobre el cual se adiciona AWGN a la señal proveniente del transmisor. En esta parte el objeto se ha identificado como el trayecto.

2.2.2.2 Identificación de las estructuras.

Basados en el tipo de estructura *Whole-Part* y según las características del modelo del canal se identifica la siguiente estructura.

✓ **Trayecto.**

El trayecto lo compone el Bloque AWGN. Ver figura 27.

2.2.2.3 Identificación de los sujetos.

En el modelo del canal se identificó un único sujeto, el trayecto.

2.2.2.4 Identificación de los atributos

- Nombre: Eb/No.
Descripción: Determina el nivel de ruido que se le adicionará a la señal a través del canal acorde al nivel de potencia de la señal y la relación Eb/No.

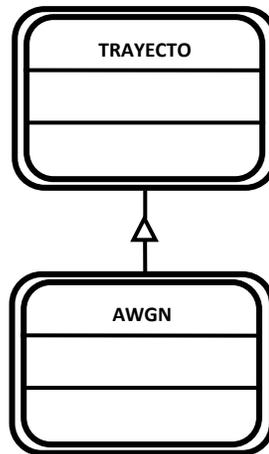


Figura 27. Estructura del Trayecto

2.2.2.5 Identificación de servicios o métodos.

- Nombre: Agregar AWGN.
Descripción: Agrega el nivel de ruido AWGN acorde a los atributos potencia de señal y la relación Eb/No.

2.2.3 Modelo del receptor

2.2.3.1 Identificación de clases y objetos

El modelo del receptor está conformado por el Desensanchador-Demodulador el cual se puede identificar como el objeto.

2.2.3.2 Identificación de las estructuras

Basados en el tipo de estructura *Whole-Part* se identifica la siguiente estructura, de acuerdo a las características del receptor.

✓ Demodulador - Desensanchador.

Se divide en 2 objetos: el desensanchador y el demodulador. El desensanchador está conformado a su vez por 2 elementos: el encargado de hacer la conversión de chip a símbolo y el que convierte de símbolo a bit. Por otra parte, el modulador se compone del demodulador O-QPSK. Ver figura 28.

2.2.3.3 Identificación de los sujetos

Se identificó un único sujeto, el desensanchador y demodulador.

2.2.3.4 Identificación de los atributos

- Nombre: Tipo de entrada.
Descripción: Define el tipo de datos que ingresará al demodulador-desensanchador que en este caso es un número complejo.
- Nombre: Tamaño del buffer de entrada.
Descripción: Define el tamaño de la trama de entrada.
- Nombre: Tabla de chips.
Descripción: Define la conversión de chip a símbolo según IEEE 802.15.4.
- Nombre: Tabla de símbolos.
Descripción: Define el resultado de la conversión de símbolo a bit recuperando la información de usuario.
- Nombre: Tipo de salida.
Descripción: Define el tipo de datos que saldrá al final del sistema, que son bits que representan la información de usuario.

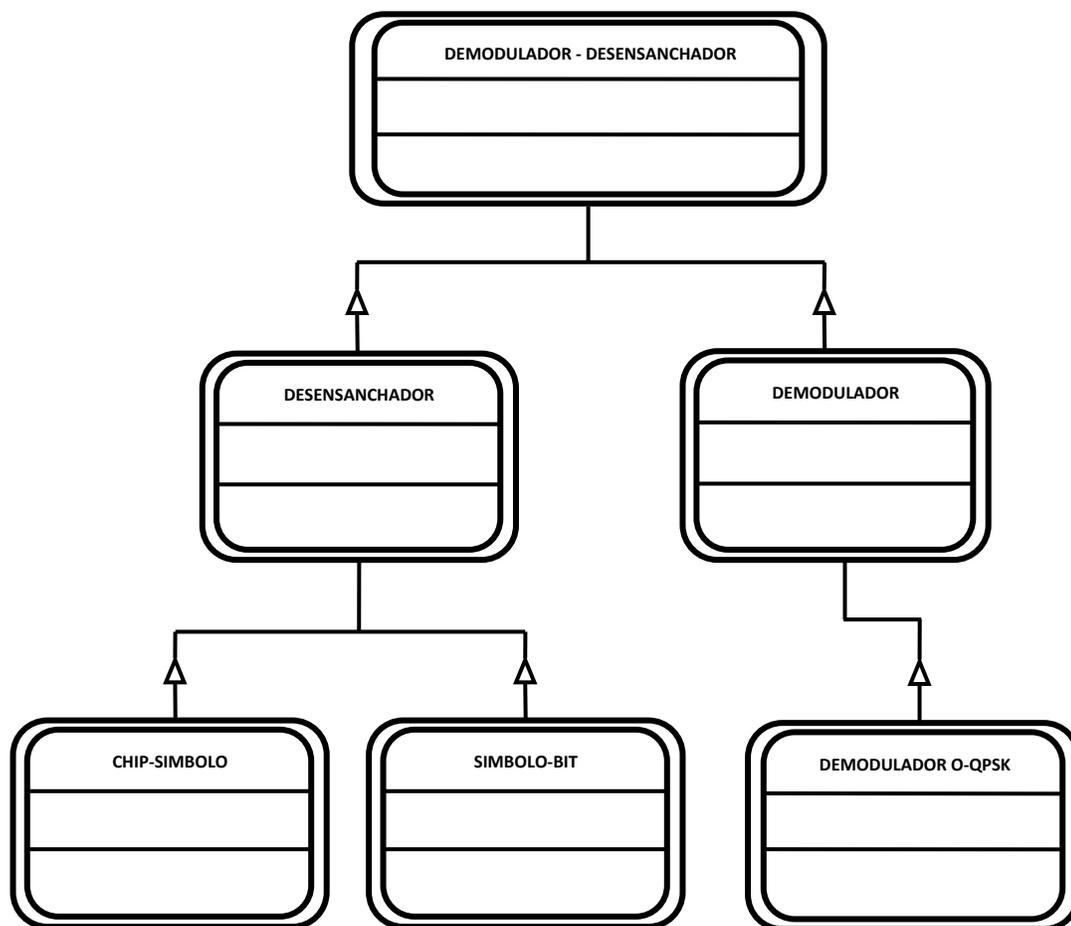


Figura 28. Estructura del Desensanchador-Demodulador

2.2.3.5 Identificación de servicios o métodos

- Nombre: Demodular la señal.
Descripción: Realiza el proceso de demodulación de la señal entregada por el canal.
- Nombre: Desensanchar la señal.
Descripción: Realiza el desensanchamiento de la señal según las tablas definidas en el estándar IEEE 802.15.4

2.3 MODELO DE SIMULACIÓN

Después de la recolección y procesamiento de datos del sistema a simular, se proceda a plantear un modelo de simulación mediante una abstracción que cumpla con el estándar IEEE 802.15.4, considerando los aspectos más relevantes y de mayor interés para cumplir con los objetivos de la simulación. Esta abstracción permite la reducción de la complejidad del sistema y conservar siempre la claridad del planteamiento.

Como resultado de lo anterior, se dividió el sistema total en tres subsistemas que facilitan la recolección de datos y el estudio de su comportamiento. Estos subsistemas son:

- ✓ Subsistema Transmisor.
- ✓ Subsistema Canal.
- ✓ Subsistema Receptor.

La estructura del sistema total de acuerdo a la descripción realizada anteriormente se visualiza en la figura 29.

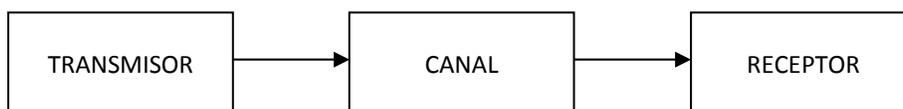


Figura 29. Estructura del Sistema Total

2.3.1 Modelo de Simulación: Transmisor

El modelo de simulación del transmisor en su nivel de abstracción más alto se puede ver en la figura 30.

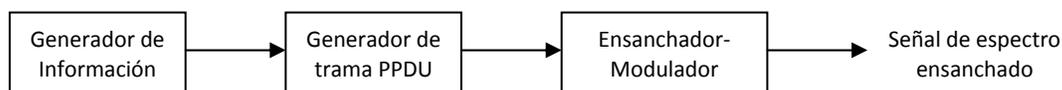


Figura 30. Estructura del Transmisor

De acuerdo al análisis realizado en la sección anterior para cada uno de los componentes del sistema, se definieron 3 sujetos para el transmisor con su estructura interna, los cuales se van a describir a continuación en mayor detalle.

2.3.1.1 Estructura interna y caracterización del generador de información.

La estructura interna del generador de información se visualiza en la figura 31.



Figura 31. Estructura Interna del Generador de Información.

La caracterización del Generador de Información se describe a continuación:

Señales de entrada:

Ninguna.

Variables de entrada:

Tipo Señal de salida: Señal Binaria.

Periodo: 4 μ s, según la velocidad de transmisión de datos que son 250Kbps

Probabilidad: ½.

Cantidad de bits: entre 0 y 400 bits (0 y 50 Bytes).

Señales de salida:

Datos binarios.

Señales propias de procesos internos:

Ninguna.

2.3.1.2 Estructura interna y caracterización del formato PPDU.

La estructura interna del formato PPDU se visualiza en la figura 32.

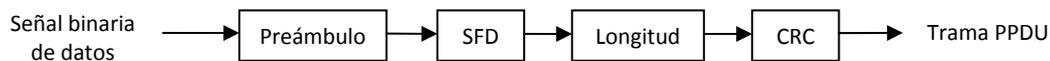


Figura 32. Estructura Interna del Formato PPDU

La caracterización del Formato PPDU se describe a continuación:

Señales de entrada:

Señal binaria de datos proveniente del generador de información.

Variables de entrada:

Velocidad de transmisión de datos: 250Kbps.

Bits por trama: 416.

Señales de salida:

Datos binarios que representan la trama PPDU.

Señales propias de procesos internos:

El formato PPDU, posee internamente 4 componentes que contienen sus respectivas señales y variables, las cuales se describen a continuación para cada uno de estos componentes.

✓ Preámbulo.**Señales de entrada:**

Señal binaria de datos proveniente del generador de información.

Variables de entrada:

Velocidad de transmisión de datos: 250Kbps

Bits por trama (32 bits).

Señales de salida:

Datos binarios que representan el preámbulo y la información de usuario.

Descripción matemática:

Este componente se encarga de adicionar 32 bits de valor 0 en un campo inicial, a los datos aleatorios provenientes del generador de información y que representan la información de usuario.

✓ SFD**Señales de entrada:**

Señal proveniente del preámbulo.

Variables de entrada:

Velocidad de transmisión de datos: 250Kbps.

Patrón SFD 11100101

Bits por trama (8 bits).

Señales de salida:

Datos binarios que representan el preámbulo, el patrón SFD y la información de usuario.

Descripción matemática:

Este componente se encarga de adicionar 8 bits al final de del campo preámbulo y antes del campo longitud.

✓ Longitud**Señales de entrada:**

Señal proveniente del SFD

Variables de entrada:

Velocidad de transmisión de datos: 250Kbps

Valor de bits. (Indican la longitud de la información de usuario)

Bits por trama (8 bits).

Señales de salida:

Datos binarios que representan el preámbulo, el patrón SFD, la longitud y la información de usuario.

Descripción matemática:

Este componente se encarga de adicionar 8 bits a los datos aleatorios provenientes del generador de información y que representan la información de usuario. Su valor puede variar entre 0 y 50 Bytes.

✓ FCS**Señales de entrada:**

Señal de datos binarios proveniente del campo longitud.

Variables de entrada:

Velocidad de transmisión de datos: 250Kbps.

Valor de CRC.

Bits por trama (16).

Señales de salida:

Datos binarios que representan el preámbulo, el patrón SFD, la longitud, el FCS y la información de usuario.

Descripción matemática:

Este componente se encarga de adicionar 16 bits correspondientes al CRC y que permiten detectar errores en cada trama transmitida. El CRC es calculado al dividir un mensaje de datos polinómico $G(x)$, por una función denominada polinomio generador $P(x)$, donde el cociente se descarta y el residuo se acomoda en 16 bits y se agrega al mensaje (trama) en el campo FCS. En el receptor, el flujo de datos y el FCS se dividen por el mismo polinomio generador $P(x)$ y si no hay errores en la transmisión el residuo es cero.

2.3.1.3 Estructura interna y caracterización del ensanchador-modulador.

La estructura interna del ensanchador-modulador se visualiza en la figura 33.



Figura 33. Estructura del Ensanchador-Modulador

La caracterización del Ensanchador-Modulador se describe a continuación:

Señales de entrada:

Trama PPDU.

Variables de entrada:

Velocidad de transmisión de datos.

Bits por trama.

Tamaño del Buffer.

Señales de salida:

Señal ensanchada y modulada en O-QPSK.

Señales propias de procesos internos:

El Ensanchador-Modulador, posee internamente 2 componentes que contienen sus respectivas señales y variables, las cuales se describen a continuación para cada uno de estos componentes.

✓ Estructura interna y caracterización del ensanchador.

La estructura interna del ensanchador se visualiza en la figura 34.

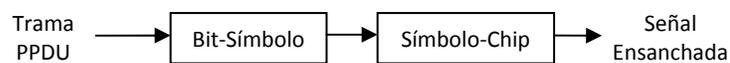


Figura 34. Estructura Interna del Ensanchador.

La caracterización del ensanchador se describe a continuación:

Señales de entrada:

Señal de datos binarios correspondiente a la trama PDU.

Variables de entrada:

Velocidad de transmisión de datos: 250Kbps.

Bits por trama.

Tamaño del Buffer.

Señales de salida:

Datos binarios que representan la señal ensanchada.

Descripción matemática:

En este bloque se realiza el ensanchamiento de la señal, iniciando con la conversión de bit a símbolo y después la conversión de símbolo a chip. La conversión de bit a símbolo se hace tomando los bits de la trama PDU y con ella se forman grupos de 4 bits, cada uno de estos grupos es denominado símbolo. La conversión de símbolo a chip se hace de acuerdo a la tabla 3 del capítulo 1, tomada del estándar IEEE 802.15.4.

✓ Estructura interna y caracterización del modulador.

La estructura general del modulador se visualiza en la figura 35.

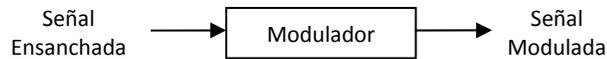


Figura 35. Estructura del Modulador.

La caracterización del modulador se describe a continuación:

Señales de entrada:

Señal ensanchada.

Variables de entrada:

Datos tipo chips.

Tipo de entrada.

Señales de salida:

Número complejo.

Descripción matemática:

En este bloque se realiza la modulación de la señal ensanchada. La modulación O-QPSK toma datos de entrada y divide a través de un multiplexor el flujo de cada bit que forman los chips en dos canales llamados secuencia par o en fase (I) y secuencia Impar o fase de cuadratura (Q). En el canal Q se agrega un retardo de medio periodo de chip, ver figura 17, en el capítulo anterior. Luego los datos de I y Q son codificados con la técnica de no retorno a cero (NRZ), para ser modulados utilizando una portadora y con un sumador las señales conforman una sola señal compleja que indica la magnitud y la fase de dicha señal. Ver Figura 22.

La modulación O-QPSK maneja cuatro estados de fase como se muestra en la Tabla 3, además el cambio entre cada fase nunca es mayor que 90° debido al retardo T_c . Normalmente se usan como valores de salto de fase 45° , 135° , 225° , y 315° , la amplitud es constante, los resultados obtenidos aquí serán similares a tener un plano complejo y representar 4 fases. Ver figura 19.

2.3.2 Modelo de Simulación: Canal

El modelo de simulación del Canal en su nivel de abstracción más alto se visualiza en la figura 36.



Figura 36. Estructura del Canal

La caracterización del Canal se describe a continuación:

Señales de entrada:

Señal de espectro ensanchado.

Variables de entrada:

Velocidad de transmisión de datos: 250Kbps

Relación E_b/N_o .

Bits que representan un símbolo.

Señales de salida:

Señal de espectro ensanchado afectada por AWGN.

Descripción matemática:

Este subsistema se encarga de simular un canal radio mediante la adición de una cantidad de AWGN que está determinada por la relación E_b/N_o y la potencia de la señal.

2.3.3 Modelo de Simulación: Receptor

El modelo de simulación del Receptor en su nivel de abstracción más alto se visualiza en la figura 37.

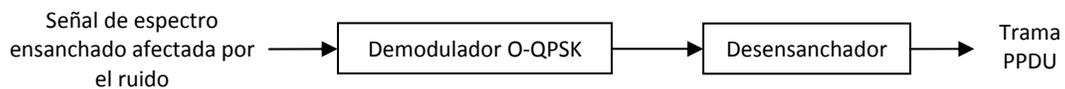


Figura 37. Estructura del Receptor

La caracterización del receptor se describe a continuación:

Señales de entrada:

Señal de espectro ensanchado afectada por el ruido.

Variables de entrada:

Velocidad de transmisión de datos: 250Kbps.

Bits por trama.

Tamaño del Buffer.

Número Complejo.

Tipo de entrada.

Señales de salida:

Trama PPDU.

Señales propias de procesos internos:

El receptor posee internamente 2 componentes que contienen sus respectivas señales y variables, las cuales se describen a continuación para cada uno de estos componentes.

✓ **Estructura interna y caracterización del demodulador.**

La estructura interna del demodulador se visualiza en la figura 38.

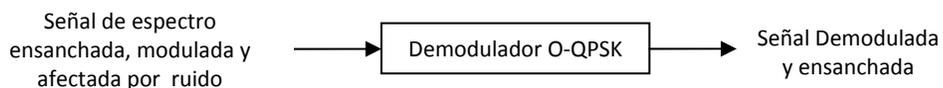


Figura 38. Estructura Interna del Demodulador.

La caracterización del Demodulador se describe a continuación:

Señales de entrada:

Señal de espectro ensanchado afectada por el ruido.

Variables de entrada:

Número complejo

Tipo de Entrada

Señales de salida:

Datos tipo chip que representan la señal demodulada y ensanchada.

Descripción matemática:

En este bloque se realiza la demodulación de la señal ensanchada. Para que los datos puedan ser correctamente recuperados, se debe hacer el proceso exactamente inverso al de la modulación, esto es, la señal que se toma como entrada al demodulador, es un número complejo, este número es dividido en su parte real e imaginaria para ser demodulado por separado con O-QPSK y luego decodificado con la misma técnica ya utilizada en la codificación (NRZ) para luego obtener I y Q, y teniendo en cuenta el retardo se concatenan nuevamente para formar una sola señal y de esta forma obtener la trama PPDU.

✓ Estructura interna y caracterización del desensanchador.

La estructura interna del desensanchador se puede ver en la figura 39.

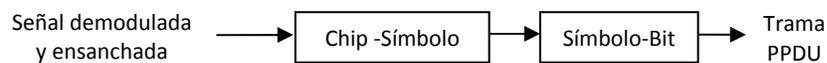


Figura 39. Estructura Interna del Desensanchador.

La caracterización del Desensanchador se describe a continuación:

Señales de entrada:

Señal demodulada y ensanchada.

Variables de entrada:

Velocidad de transmisión de datos: 250Kbps.

Bits por trama: 416.

Tamaño del buffer.

Señales de salida:

Trama PPDU.

Descripción matemática:

En este bloque se realiza el desensanchamiento de la señal, iniciando con la conversión de chip a símbolo y después la conversión de símbolo a bit. Este proceso es realizado de forma inversa al realizado en el ensanchamiento, con base en el estándar IEEE 802.15.4.

2.4 EVALUACIÓN DEL MODELO

2.4.1 Evaluación de la correcta descripción de variables.

Haciendo el análisis respectivo de cada uno de los objetos con base en el estándar IEEE 802.15.4 y examinando las formas de almacenamiento y direccionamiento de las variables, se puede decir que las variables utilizadas satisfacen las necesidades de cada subsistema para la adecuada representación de la información que es procesada a lo largo de todo el sistema.

2.4.2 Evaluación de la complejidad resultante de cada objeto

Teniendo en cuenta cada uno de los componentes o subsistemas en los que se ha dividido el sistema total, considerando el número de atributos y servicios que posee, las variables y la interacción entre ellas, es posible expresar que el sistema total tiene una alta complejidad. Por este motivo, se ha realizado la división del sistema en componentes o subsistemas con el objetivo de reducir esta complejidad, permitiendo así visualizar claramente los comportamientos y procesos de interés definidos en los objetos y fines de la simulación.

2.4.3 Evaluación de los objetivos.

El modelo permite visualizar y analizar cada uno de los procesos de modulación y codificación de acuerdo a los objetos y variables definidos para realizar estos procesos.

Se puede concluir que el modelo de simulación, cumple con los objetivos y fines de la simulación ya que representa correctamente el funcionamiento de la tecnología ZigBee en sus niveles PHY y MAC.

2.4.4 Complejidad del proyecto

Debido a la alta complejidad del proyecto y las limitaciones de los equipos de cómputo donde se realizará la simulación, se han tomado una serie de medidas que se nombrarán a continuación.

- ✓ Los datos que representan la información de usuario (MSDU) y parte de la trama MAC (MHR), son generados de forma aleatoria.
- ✓ El FCS se calcula y se adiciona a la trama en el proceso de generación de la trama PPDU.
- ✓ Se trabajó únicamente en la banda de 2.4 GHz, con una velocidad de transmisión de 250 Kbps.
- ✓ Se omite el desvanecimiento por multitrayectoria debido a las cortas distancias que alcanza esta tecnología y a las relativas bajas velocidad de transmisión de datos que maneja.

Teniendo en cuenta las medidas mencionadas anteriormente se considera procedente continuar con el desarrollo del proyecto.

CAPÍTULO 3

MODELO DE SIMULACIÓN

En este capítulo se muestran los aspectos más importantes de la implementación del modelo de simulación de una comunicación punto a punto basado en las especificaciones de la capa PHY y MAC del estándar IEEE 802.15.4 en la herramienta Signal Processing Designer (SPD) de Coware®. Esta implementación fue desarrollada como resultado de la aplicación y adaptación de la metodología descrita en el capítulo 2 de este documento.

En este modelo de simulación, como en los modelos de simulación a nivel de enlace, por los requerimientos computacionales exigidos al graficar los efectos de una modulación directa sobre una portadora de radiofrecuencia, se realiza el procesamiento de señales a nivel de banda base y en lo relacionado con el proceso de modulación este no implica un traslado en el dominio de las componentes de señal en banda base, sino la generación de un número complejo, el cual indica como debe ser afectada en amplitud y fase la portadora de radiofrecuencia. Este método de representación que facilita el análisis y la simulación se denomina envolvente compleja, el cual permite representar las señales pasa banda como señales banda base equivalentes [28].

El sistema general se dividió en tres subsistemas: transmisor, canal y receptor los cuales se describen a continuación con cada uno de sus componentes y parámetros. Ver figura 40.

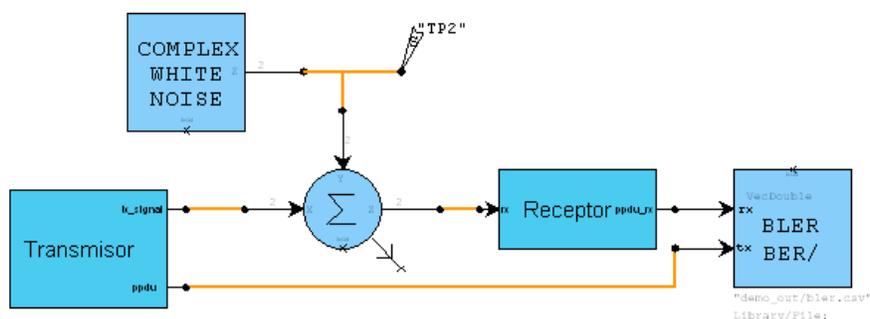


Figura 40. Modelo de Simulación del Sistema.

3.1 TRANSMISOR

El subsistema transmisor está compuesto por los bloques generador de información, formato PDU, concatenador, ensanchador y modulador. Ver figura 41.

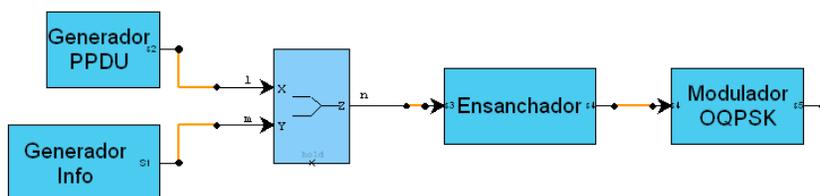


Figura 41. Subsistema Transmisor.

3.1.1 Bloque Generador de información (Generador Info).

Para simular la señal de información de usuario que será transmitida a través del sistema se utilizó el bloque "Signal Source". Además en esta etapa se calcula el CRC y se concatena al final de la señal de información. Ver figura 42.

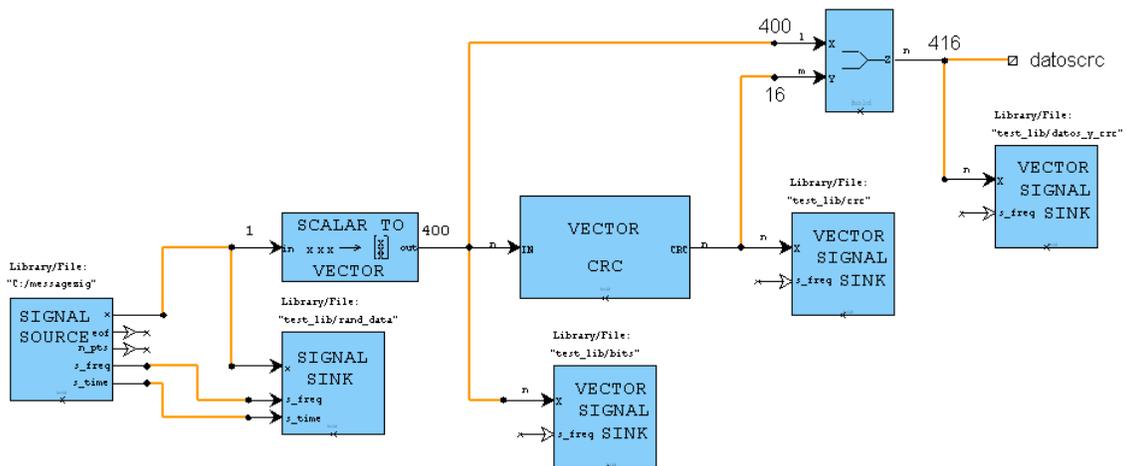


Figura 42. Bloques que Constituyen el Bloque Generador de Información.

3.1.1.1 Fuente de Señal (Signal Source)

Descripción: Este bloque entrega a la salida una señal de tipo escalar almacenada en un archivo el cual está especificado en los parámetros. Este archivo además de los datos define la frecuencia de muestreo, el número de puntos y el tiempo inicial de la señal.

Parámetros:

- Librería/Archivo (*Library/File*): Especifica la ruta donde está almacenado el archivo el cual va a generar la señal de datos de tipo escalar. El archivo utilizado para este modelo fue "C:/messagezig.ascsig" y en la figura 43 se puede observar la parte inicial del archivo.
- Tipo de archivo (*File format*): Especifica si el archivo de la señal es tipo binario o ASCII. Para este caso se fijó como ASCII. Los demás parámetros se dejaron con los valores por defecto.

- Polinomio Generador (*Generator polynomial*): Especifica el polinomio generador que puede estar representado por un valor octal (empezando con 0) o por un valor hexadecimal (empezando con 0x). En este caso 0x1021.
- Primer bit de entrada (*First bit input*): Determina si el primer elemento del vector de entrada es el bit más significativo (MSB) o el bit menos significativo (LSB). En este caso “MSB”.
- Primer bit de Salida (*First bit output*): Determina si el primer elemento del vector de salida es el bit más significativo (MSB) o el bit menos significativo (LSB). En este caso “MSB”.

3.1.2 Generador de Trama PPDU (Generador PPDU)

La implementación del generador de trama PPDU se realizó mediante el uso de los bloques “constant vector” y “vector join”. Primero se colocaron los vectores que conforman los encabezados SHR y PHR los cuales incluyen el preámbulo, el SFD y la longitud, con sus respectivos valores tal como se describió en el capítulo 2. Segundo, se ordenaron cada uno de estos vectores de acuerdo a la posición especificada por el estándar para conformar la trama, es decir en la primera posición (de izquierda a derecha) el preámbulo, en la segunda el SFD y en la tercera la longitud (ver figura 44). Por último, se creó el puerto de salida S2 para conectarlo en el subsistema de transmisión a un concatenador de vectores junto con el generador de información para así formar la trama PPDU.

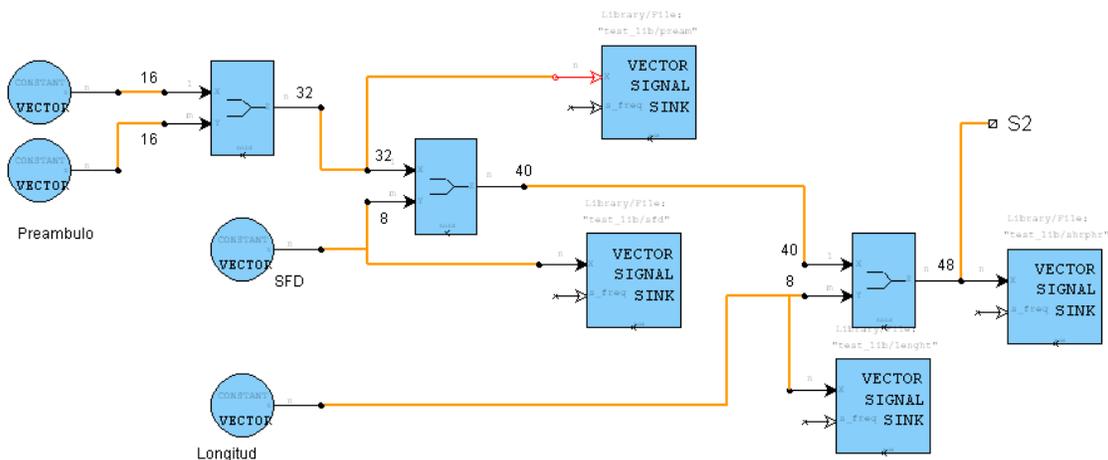


Figura 44. Bloques que Constituyen el Bloque Generador de Trama PPDU

3.1.2.1 Vector Constante (Constant Vector)

Descripción: Este bloque genera un vector constante de múltiples valores. El valor de los componentes del vector puede ser leído de un archivo o establecido como parámetro.

Parámetros:

- Tamaño del vector (*Size of vector*): Define el número de componentes del vector de salida (máximo 16). Para el preámbulo se utilizaron 2 vectores de 16 bits cada uno; para el SFD un vector de 8 bits al igual que para la longitud.
- Leer de archivo (*Read from file*): Especifica si los valores de los componentes del vector son leídos de un archivo o son fijados en los parámetros. En este caso “no”.
- V0...v15: Valor de los componentes del vector si son fijados como parámetros y no leídos desde un archivo. Para el preámbulo todos los 32 valores son cero, para el SFD ‘11100101’ y para la longitud ‘00110010’.

3.1.2.2 Concatenador de vectores (*Vector join vector*)

Descripción: Este concatena dos vectores conectados a las entradas “X” y “Y”, formando a la salida el vector “Z”. Los primeros componentes de “Z” están conformados por el vector “X” y los componentes restantes por el vector “Y”.

Parámetros:

- Longitud del vector “X” (*X vector length*): Especifica el tamaño (número de componentes) del vector de entrada “X”. Para el preámbulo el valor de este parámetro es 16; para unir el preámbulo y el SFD el valor es 32, para unir el preámbulo, el SFD y la longitud el valor es 40.
- Longitud del vector “Y” (*Y vector length*): Especifica el tamaño del vector de entrada “Y”. Para el preámbulo el valor de este parámetro es 16; para unir el preámbulo y el SFD el valor es 8, para unir el preámbulo, el SFD y la longitud el valor es 8.
- Longitud del vector “Z” (*Z vector length*): Especifica el tamaño del vector de salida “Z”. Para el preámbulo el valor de este parámetro es 32; para unir el preámbulo y el SFD el valor es 40, para unir el preámbulo, el SFD y la longitud el valor es 48.

3.1.3 Ensanchador

Para implementar el ensanchador fue necesario convertir el vector de entrada que corresponde a la trama PPDU a valores escalares, para después realizar la conversión de bit a símbolo y de símbolo a chip. La conversión de bit a símbolo se realizó tomando 4 bits de la trama y convirtiéndolos a un valor entero decimal, luego este valor entero paso al bloque Interpolador lineal (Table Lookup), el cual cambia el valor de entrada por un valor entero decimal más grande, que posteriormente será convertido a binario con una representación de 32 bits los cuales corresponden a los valores de chips mencionados en la tabla 3 del capítulo 1, obteniendo así de esta manera la señal ensanchada. Ver figura 45.

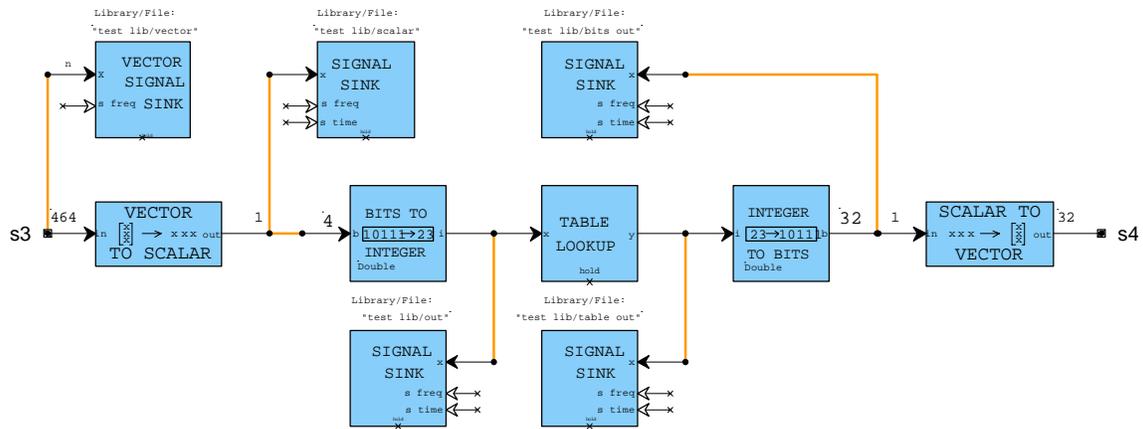


Figura 45. Bloques que Conforman el Bloque Ensanchador.

3.1.3.1 Vector a escalar (Vector to scalar)

Descripción: Este bloque convierte un vector de N componentes a una secuencia de datos de N valores. El valor de N es un parámetro que aparece a la entrada del bloque.

Parámetros:

- Valor N (*in_IOVEC_LEN*): Especifica el tamaño o número de componentes del vector de entrada y el número de datos en la salida de acuerdo a cada uno de los vectores recibidos. En este caso el valor es 464
- Primer elemento de salida (*First element out*): Determina el orden en el cual los componentes del vector deben ser puestos en la salida. Si se ha establecido “*first*”, el componente menos significativo del vector de entrada es el primero en la salida. Si se ha establecido “*Last*”, el componente más significativo del vector de entrada es el primero en la salida. En este caso “*first*”.

3.1.3.2 Bits a entero (Bits to integer)

Descripción: Este bloque convierte un flujo de bits en un flujo de enteros. Los parámetros del bloque permiten establecer el número de bits por entero y el orden en que los bits son recibidos (primero el MSB o el LSB).

Parámetros:

- Parámetro de entrada (*mrx_in_rate*): Especifica el número de bits que serán agrupados para formar cada valor entero. En este caso el valor es 4.
- Primer bit enviado (*First bit sent*): Especifica el orden en que los bits son enviados. “MSB” implica que el bit más significativo será enviado de primero, o “LSB” que implica que el bit menos significativo será enviado al final. En este caso “MSB”.

3.1.3.3 Interpolador lineal (Table lookup)

Descripción: Este bloque implementa el mapeo o relación que se establece de un valor de entrada con un valor de salida presente en un archivo de datos. El archivo de datos contiene una lista ascendente con los valores de entrada y los correspondientes valores de salida en formato ASCII. Este mapeo es ejecutado tomando las filas de la tabla, espaciadas de manera desigual y utilizando interpolación lineal o interpolación segmentaria (*spline*⁴) para producir una tabla de alta resolución igualmente espaciada en el eje X. El archivo que representa la tabla utilizada se puede observar en la figura 46.

Parámetros:

- Tamaño de la tabla (*Table size*): Especifica el número de puntos de alta resolución, igualmente espaciados, obtenidos como resultado de la interpolación lineal o spline realizada de acuerdo a la tabla. En este caso se estableció como 16.
- Ruta del Archivo (*File path*): Especifica la ruta y el nombre del archivo que contiene la descripción de la tabla para realizar el correspondiente mapeo de entrada/salida. El archivo debe contener solo 2 columnas, en la primera columna los valores de entrada y en la segunda, los correspondientes valores de salida para cada valor de entrada. En este caso se fijó como "C:/tabla_chips".
- Tipo de Interpolación (*Type of interpolation*): Especifica el tipo de interpolación usada entre los datos de las columnas. Estos valores deben ser: inferior a 0 para interpolación lineal o mayor o igual a 0 para interpolación *spline*. Como en este modelo se quería trabajar con interpolación lineal se fijó este valor como -1. Aunque en este caso más que interpolación el bloque cumple es una función de mapeo entre los datos existentes en la tabla.

```
data
$
signal type = double
vector type = interlaced
vector length = 32
number of vectors = 2
number of signal points = 32
sampling frequency = 1
starting time = 0
$
0 3653456430
1 2358642555
2 1378802115
3 125537430
4 786023250
5 2072811015
6 3276943065
7 2517072780
8 3986437410
9 3100205175
10 891481500
11 1618458825
12 585997365
13 2008598880
14 2620728045
15 3378542520
```

Figura 46. Archivo del Interpolador Lineal.

⁴ *Interpolación spline*: es un tipo de interpolación que utiliza como función una curva definida a trozos mediante polinomios o segmentos de polinomios de bajo orden y unidos adecuadamente para formar la interpolación.

3.1.3.4 Entero a bits (Integer to bits)

Descripción: Este bloque convierte la señal de entrada en un flujo de bits. Primero convierte la entrada a un entero de tipo doble (*double*) por un simple truncamiento y luego convierte este valor entero a binario, entregando a la salida un flujo de bits. Los parámetros del bloque permiten establecer el número de bits por entero y el orden en el que los bits aparecerán.

Parámetros:

- Parámetro de salida (*Parameter at output of block symbol*): Especifica el número de bits usados para representar el valor de entrada. En este caso el valor utilizado fue 32 debido a que se necesitaba convertir el número entero en 32 valores binarios que representarán los chips.
- Primer bit de salida (*First bit output*): Especifica el orden en que los bits son puestos en la salida. "MSB" para que el bit más significativo sea el primero en la salida del bloque, o "LSB" para que el bit menos significativo sea el último en la salida del bloque. En este caso se fijó como MSB.

3.1.4 Modulador OQPSK

Para implementar el bloque modulador se utilizaron una serie de bloques los cuales permitieron convertir la señal binaria ensanchada (o de alta velocidad) en un valor complejo que implica el cambio de amplitud y fase que debe efectuarse sobre la señal portadora en la etapa de radiofrecuencia. Para realizar este proceso, primero se debe convertir la señal binaria en un número entero decimal que posteriormente, será mapeado en un número complejo QPSK, el cual pasará a un bloque para que separe sus componentes real e imaginaria, para de esta manera agregar un retardo de medio periodo de chip a la componente imaginaria y por último ser transmitirlos a través del canal.

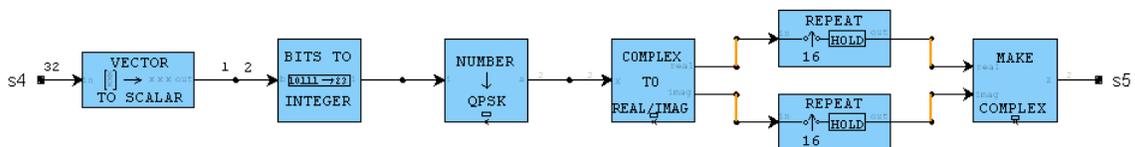


Figura 47. Bloques que Componen el Bloque Modulador OQPSK.

En el bloque vector a escalar se fija el valor de N como 32 y en el de bits a entero el parámetro a la entrada del bloque se fija en 2.

3.1.4.1 Número a QPSK (Number → QPSK)

Descripción: Mapea los datos de entrada a un valor de tipo M-ario PSK complejo que representa un punto de la constelación de la modulación.

Parámetros:

- Potencia de salida (*Output power*): Especifica el valor de la potencia de salida. En este caso este valor es 2.
- Rotación (*Rotation*): Especifica en grados el ángulo de rotación de la constelación. Para este caso este valor es 0.
- Orden (*Order*): Especifica el orden de los estados M-ary de la modulación. En este caso este valor es 2.

3.1.4.2 Complejo a Real/Imaginario (Complex to Real/Imag)

Descripción: Este bloque separa las componentes real e imaginaria de una señal compleja a la entrada del bloque.

Parámetros: Ninguno. Valores por defecto del bloque.

3.1.4.3 Repetidor (Repeat)

Descripción: Este bloque incrementa la frecuencia de muestreo de una señal por un factor entero N, repitiendo cada muestra de entrada N veces a la salida.

Parámetros:

- Factor N (*N*): Especifica el número de veces en que la salida opera más rápido que la entrada. Cada muestra de entrada es repetida N veces en la salida. En este caso se definió un valor de 16 en ambos bloques.
- Primer tiempo de muestreo (*First sampling time*): Especifica el número en el cual se toma la primera muestra, es decir, la cantidad de muestras de retardo de la entrada con respecto a la salida. Si su valor es cero, los primeros valores N de salida son iguales al primer valor de entrada. Si su valor es 1, la primera muestra de salida es 0, seguido de las N muestras iguales al primer valor de entrada. Y si vale N-1, las primeras N-1 muestras son cero, seguido de las N muestras iguales al primer valor de entrada. En este parámetro es donde se introduce el retardo, asignando al bloque superior el valor 0 y en el bloque inferior el valor 8.

3.1.4.4 Crear Complejo (Make Complex)

Descripción: Este bloque combina dos señales independientes de entrada (señal real y señal imaginaria) para crear una señal compleja en la salida (Z).

Parámetros: Ninguno. Valores por defecto del bloque.

3.2 CANAL

El canal está compuesto por el bloque generador de ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN) y un bloque sumador de señales complejas, el cual adiciona la señal de ruido a la señal de información transmitida. Ver figura 48.

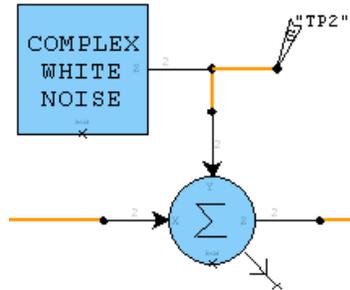


Figura 48. Bloque Canal.

3.2.1 Ruido Blanco Complejo (Complex White noise)

Descripción: Este bloque genera ruido blanco gaussiano complejo, a partir del valor medio y la varianza de ruido, que especifican las características de amplitud del ruido en la salida Z.

Parámetros:

- Valor Medio (*Mean*): Especifica el valor medio de la distribución gaussiana. En este caso este valor es igual a 0.
- Varianza (*Variance*): Especifica el valor de la varianza de la distribución gaussiana. En este caso se fija con una sentencia que permita tener la distribución gaussiana en función de E_b/N_0 . La sentencia es:

$$(((2 * (\text{pow}(2 * 10.0, ((-(0.1 * (EbNo + 3)))) * 1.0))) * 464.0) / 100)$$

Esta sentencia representa la fórmula de varianza de ruido que está en función del E_s/N_0 y que se describe a continuación.

$$\text{Varianza de ruido} = \frac{\text{Potencia de la señal} * \text{Periodo de símbolo}}{\text{Tiempo de muestreo} * 10^{\frac{E_s/N_0}{10}}} \quad (3)$$

Donde:

$$\frac{E_s}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} + 10 * \log_{10}(k) \text{ [dB]}$$

Donde: k: Número de bits de información por símbolo de entrada.

Como en QPSK se tienen 2 bits por símbolo entonces se puede definir:

$$\left(\frac{E_s}{N_0}\right) \text{ dB} = \left(\frac{E_b}{N_0}\right) \text{ dB} + 3 \text{ dB}$$

Ahora para este modelo de simulación la fórmula de la varianza de ruido queda de la siguiente manera:

$$\text{Varianza de ruido} = \frac{2 * 464}{100 * 10^{\frac{(Eb/N0)+3}{10}}}$$

3.2.2 Sumador de Complejos (Complex adder)

Descripción: Este bloque suma dos señales complejas de entrada (“X” y “Y”) y el resultado de esta operación se obtiene en la salida Z.

Parámetros: Ninguno.

3.3 RECEPTOR

El receptor está compuesto por un conjunto de bloques que permiten recuperar la trama PPDU, después de realizar procesamientos inversos al transmisor, es decir, demodulación y desensanchamiento de la señal transmitida. El subsistema receptor está conformado por los siguientes bloques.

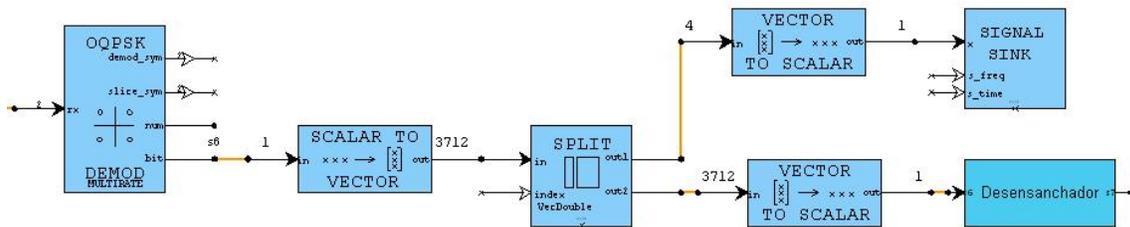


Figura 49. Bloques que Conforman el Subsistema Receptor.

3.3.1 Demodulador OQPSK

Para la simulación del bloque demodulador se contó con un bloque llamado “OQPSK Demod” el cual fue suministrado por el personal de soporte técnico de la herramienta. El bloque se encarga de recibir la señal modulada y afectada por el ruido proveniente del canal y procesarla hasta obtener la señal ensanchada en chips. La estructura interna de este bloque se observa en la figura 50.

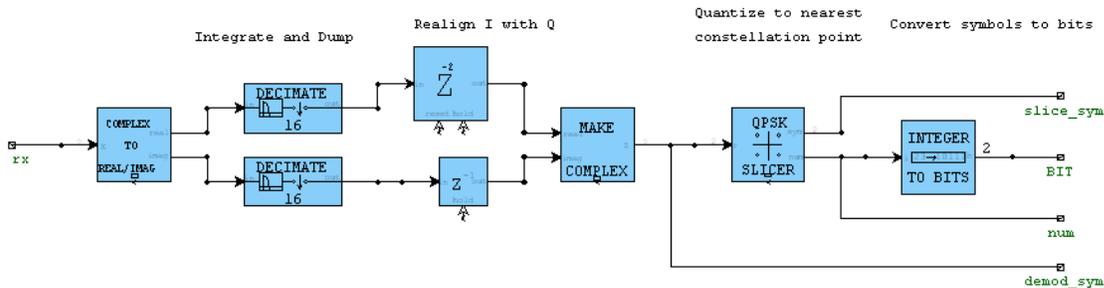


Figura 50. Bloques que Conforman el Bloque Demodulador.

3.3.1.1 Disminuir (Decimate)

Descripción: Este bloque disminuye la frecuencia de muestreo en un factor de N. la señal es filtrada y luego se descartan las muestras de datos entre cada enésima muestra de datos de la señal de entrada. Por ejemplo, si N vale 3, cada tercera muestra de datos se deja pasar, y se descartan las muestras que se encuentran entre las que se dejan pasar. Este bloque es implementado como un filtro polifásico el cuál mejora considerablemente el desempeño de la simulación. Para prevenir el *aliasing*, la señal de entrada es filtrada antes de descartar cualquier muestra de datos. En este bloque se compensa el retardo de la modulación OQPSK.

Parámetros:

- Factor N (*N*): Especifica el número de veces en que la entrada opera más rápido que la salida. Después del filtrado, cada enésima muestra de datos se deja pasar y las demás muestras entre estas que se dejaron pasar se descartan. En este caso en ambos bloques el valor establecido es 16.
- Obtener respuesta al impulso de un filtro de un archivo (*Get impulse response from file*): si se fija en "Yes", la respuesta al impulso del filtro se lee de un archivo que almacena la señal. Si se fija en 'no', se utiliza una respuesta al impulso tipo 'windowed-sinc linear-phase'. En este caso se fija este parámetro en "yes" para ambos bloques.
- Multiplicador de longitud de filtro (*Filter length multiplier*): Especifica el número de etapas utilizadas en el filtro pasabajo interno. El número de etapas es igual al valor de este parámetro multiplicado por el factor de disminución N. En este caso este valor es 25 para ambos bloques.
- Nombre del archivo (*Signal file name*): Especifica el nombre del archivo del cual se obtiene la respuesta al impulso del filtro pasabajo. En este caso para ambos bloques el nombre de archivo utilizado fue comm_examples/decimate_sum16.
- Primer tiempo de muestreo (*First sampling time*): Especifica el instante en el cual se debe tomar la primera muestra. Si vale 0, se toma la primera muestra, si vale 1 se toma la segunda muestra. En este caso para ambos bloques se usaron sentencias diferentes debido a que hay que tener en cuenta que una señal está retardada con respecto a la otra. Para el bloque superior la sentencia utilizada fue:

```
((((int(samp_per_symbol))- 1)+(int(input_delay))%(int(samp_per_symbol))))
```

Para el bloque inferior la sentencia utilizada fue:

```
(((((int(samp_per_symbol))-  
1)+(int(samp_per_symbol)/2))+(int(input_delay))%(int(samp_per_symbol))))
```

Donde:

Multirate SQPSK Demodulator Block Parameters	
RECEIVED SIGNAL PARAMETERS	
Delay until first input (samples):	0
Number of samples per symbol:	16
SLICER PARAMETERS	
Constellation rotation (degrees):	0
Output power for slice_sym output (W):	2

Figura 51. Parámetros del Demodulador.

Al momento de evaluar las sentencias anteriores se obtuvieron los valores de 15 para el bloque superior y de 7 para el bloque inferior.

3.3.1.2 Retardo mayor (*Bulk Delay*)

Descripción: Este bloque retarda la señal de entrada con respecto a la señal de salida por un número específico de muestras. El valor del retardo es especificado como parámetro.

Parámetros:

- Retardo (*Delay*): Especifica la cantidad de retardo de la entrada con respecto a la salida, expresado como el número de muestras que la señal es retardada. En este caso para el retardo se utilizó la siguiente sentencia:

```

((((int(samp_per_symbol))-
1)+(int(input_delay)))%(int(samp_per_symbol))<((int(samp_per_symbol))/2))?(
-1):(-2))

```

3.3.1.3 Retardo (*Delay*)

Descripción: Este bloque retarda la señal de entrada un periodo de muestra respecto a la señal de salida.

Parámetros:

- Valor inicial (*Initial value*): especifica el valor de salida en la primera iteración. En este caso este valor es 0.

3.3.1.4 Mapeador QPSK (*QPSK Slicer*)

Descripción: Este bloque mapea una señal de entrada tipo M-ario PSK a un punto de constelación como señal de salida, el cual es representado por un valor entero.

Parámetros:

- Potencia de salida (*Output power*): Especifica el valor de la potencia de salida. En este caso este valor es igual al parámetro “output power for slice_sym output” que aparece en la figura 51.

- Rotación (*Rotate*): Especifica en grados el ángulo de rotación de la constelación. En este caso el valor que toma este parámetro es el de “Constellation rotation” como aparece en la figura 51.
- Orden (*Order*): Especifica el orden de los estados M-arios de la modulación. En este caso este valor es 4.

3.3.2 Divisor (SPLIT)

Este bloque se implemento en el receptor como recurso para eliminar los 4 bits erróneos debidos al retardo total obtenido a la salida del demodulador como resultado de los tiempos de procesamiento que cada uno de los bloques que constituyen los subsistemas de transmisión y de canal, y que permiten una correcta demodulación y desensanchamiento de la señal recibida, para su posterior comparación con la señal original transmitida. Su estructura se visualiza en la figura 51.

Descripción: Este bloque divide el objeto de entrada en 2 partes. La división se realiza de acuerdo a un índice relativo al tamaño del objeto de entrada. El borde puede ser el superior, el inferior, el izquierdo o el derecho y el índice puede ser especificado por una señal de entrada o por un parámetro del bloque si la entrada índice no está conectada. En la salida 1 (out 1) siempre se recibirá la parte superior o la parte izquierda del objeto dividido dependiendo de la medida del borde, y la salida 2 (out2) siempre recibirá la parte inferior o la parte derecha del objeto dividido.

Parámetros:

- Índice de división medido desde (*Split index measured from*): Especifica el límite desde donde será medido el índice de división. El valor escogido para este caso fue el superior “top”.
- Índice si la entrada no está conectada (*Index if input not connected*): Especifica el valor del índice de división si la entrada índice no está conectada. En este caso este valor es 4 ya que observando las señales transmitidas y recibidas se pudo obtener que en todas las transmisiones realizadas que siempre los primeros 4 bits recibidos eran bits erróneos.

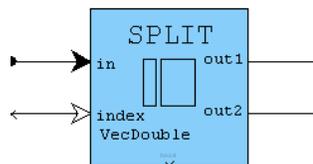


Figura 52. Bloque Divisor

3.3.3 Desensanchador

Para el desensanchador es necesario convertir cada uno de los conjuntos de 32 chips binarios de entrada en un valor entero decimal para luego ser comparado con otro valor entero decimal y cuando sean iguales el bloque que hace la comparación arroja un 1 el cual luego es multiplicado por el valor entero decimal que corresponde a la salida de esta manera se hace la conversión de chip a símbolo (ver tabla 5). Posteriormente cada uno de estos valores (símbolos) es sumado para formar un flujo de enteros de salida y por último son convertidos a bits para obtener la trama

PPDU original generada en el transmisor. En la figura 52 se puede observar la estructura completa del desensanchador y en la figura 53 los bloques utilizados para la creación de este subsistema.

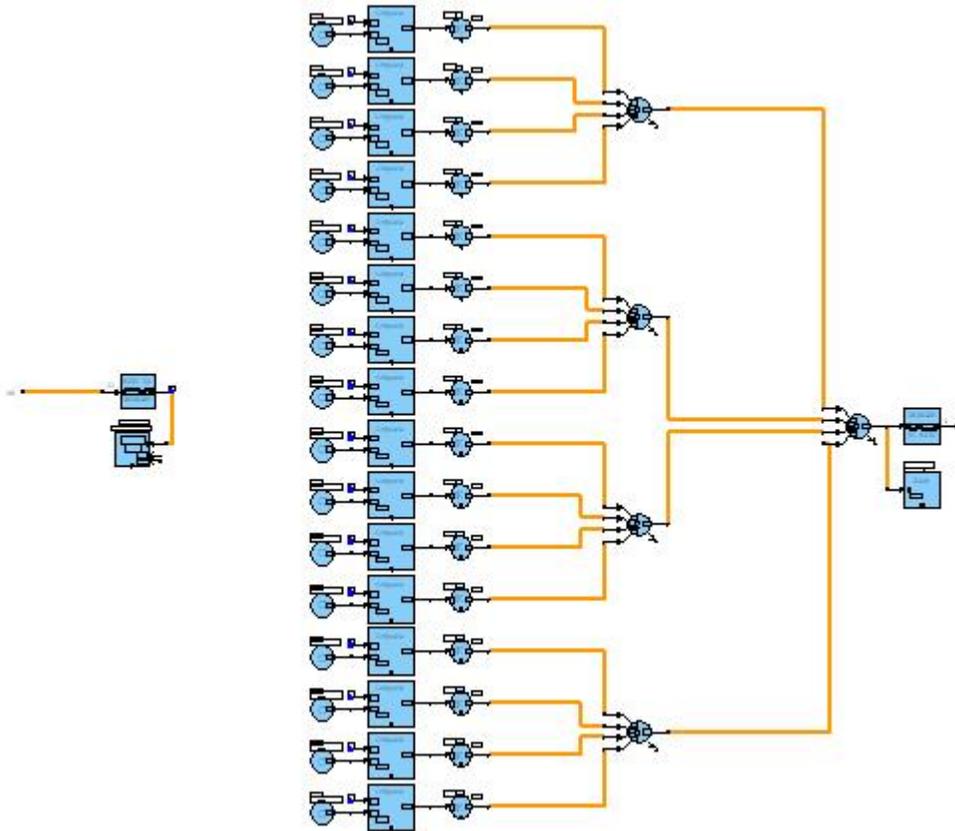


Figura 53. Estructura General del Desensanchador.

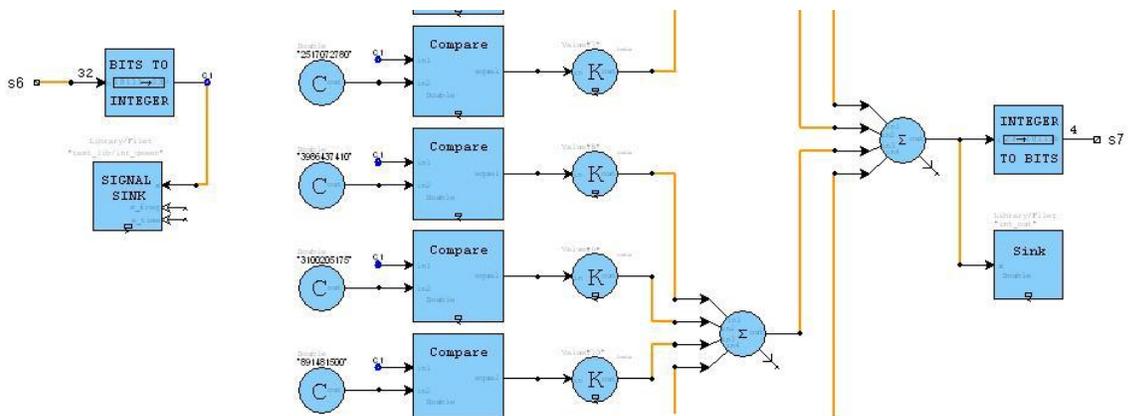


Figura 54. Bloques del Desensanchador.

Valor de chips (Decimal)	Valor de Símbolo (Decimal)
3653456430	0
2358642555	1
1378802115	2
125537430	3
786023250	4
2072811015	5
3276943065	6
2517072780	7
3986437410	8
3100205175	9
891481500	10
1618458825	11
585997365	12
2008598880	13
2620728045	14
3378542520	15

Tabla 5. Conversión de chip a símbolo.

3.3.3.1 Comparador (Compare)

Descripción: Este bloque compara los elementos correspondientes de dos objetos de entrada. Si todos los elementos son iguales el valor obtenido a la salida es 1. En otro caso el valor de salida es 0.

Parámetros:

- Delta: Especifica la precisión con la cual serán comparados los elementos. Los elementos son considerados iguales si $(in1-in2) < \text{delta}$. Para todos los bloques se utiliza el valor por defecto que es 0.00001.

3.3.3.2 Multiplicador (Gain)

Descripción: Este bloque multiplica cada elemento de entrada por un valor constante que es especificado como parámetro.

Parámetros:

- Valor (*coef_val*): Especifica el valor constante por el cual será multiplicada la entrada para obtener un valor de salida. Cada uno de los valores de chip en decimal de la tabla 5.

3.3.3.3 Sumador (Scalar 4-input adder)

Descripción: Este bloque suma 4 señales de entrada de tipo escalar entregando a la salida el resultado de dicha suma.

Parámetros: Ninguno.

3.3.4 Bloque BLER/BER

En esta etapa del modelo de simulación se utilizó un bloque que permitiera medir la tasa de error de bit (BER) y la tasa de error de bloque (BLER, Block Error Rate) entre la señal transmitida y la señal recibida. Ver figura 55.

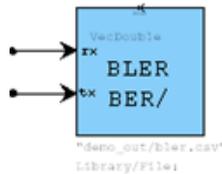


Figura 55. Bloque BER/BLER.

Descripción: Este bloque además de calcular el BER y el BLER puede reportar también un intervalo de confianza y opcionalmente parar la simulación una vez que la evaluación alcance cierta calidad. El BER es calculado como el número total de elementos diferentes en el tiempo, dividido por el número total de elementos observados todo el tiempo. El BLER es calculado como el número de bloques con alguna diferencia durante todo el tiempo dividido sobre el número de bloques observados todo el tiempo.

Parámetros:

- Tipo de señal (Typename): Especifica si el tipo de señales a comparar son vectores o valores escalares. En este caso se fija en VecDouble, es decir que las señales son de tipo vector para calcular el BLER.
- Ruta (Path): Especifica la ruta del archivo donde serán almacenados los resultados del BER/BLER. En este caso "demo_out/bler.csv"
- Número de entradas a ignorar (*Number of inputs to ignore*): Especifica el número de entradas a ignorar antes de que empiece el conteo. En este caso se deja en 1 que es el valor por defecto del bloque.
- Texto para agregar a los títulos de los resultados (*Text to add to results titles*): Especifica el texto que se quiere agregar a las etiquetas de los resultados. En este caso se deja el valor por defecto del bloque es decir "Rcv".
- Almacenar resultados de BER (*Store BER results*): Especifica si se quieren almacenar los resultados del BER. En este caso se fija en "Yes".
- Almacenar resultados de BLER (*Store BLER results*): Especifica si se quieren almacenar los resultados del BLER. En este caso se fija en "Yes".
- Ignorar el desajuste de tamaño (*Ignore BER/BLER on size mismatch*): Si se fija en "Yes", los bloques de datos donde hay una tasa de decisión de error será ignorado en los cálculos del BER y el BLER. En este caso se deja el valor por defecto que es "Yes".

- Prueba de confianza (*Confidence test*): Especifica la prueba de confianza a desarrollar. Se puede escoger entre estos cuatro tipos de pruebas: límite de BER (*BER bound*), límite de BLER (*BLER bound*), intervalo de BER (*BER interval*) o intervalo de BLER (*BLER interval*). Las pruebas de intervalo definen el intervalo de confianza de la tasa de error asociada y las pruebas de límites encuentran el límite de confianza unilateral de la tasa de error asociada. En este caso se fija en “*BER_interval*”.
- Porcentaje de confianza (*Confidence percentage*): Especifica el porcentaje del nivel de confianza. En este caso se fijó en 99.
- Informar los resultados de confianza (*Report confidence results*): Especifica si se desea conocer el límite o el intervalo de confianza medido. En este caso se dejó el valor por defecto, es decir en “no”.
- Modo de auto parar (*Auto stop mode*): Especifica el tipo de prueba para parar la simulación, estas pruebas pueden ser: prueba de confianza (*confidence test*), errores de bloques (*block errors*), errores de bit (*bit errors*). En este caso se seleccionó deshabilitado.
- Máximo error contado (*Error count max*): Especifica el número de errores observados antes de parar la simulación si en el modo de auto parar se ha fijado errores de bloque o errores de bit. En este caso se dejó el valor por defecto que es 20 porque no se está utilizando el modo de auto parar.
- Objetivo para la prueba de límite (*Target for bound test*): Si el modo el modo de auto parar está fijado como test de confianza y este a su vez está fijado como límite de BER o límite de BLER, entonces la simulación se parará una vez que el intervalo de confianza se encuentre en el rango del valor estimado.

CAPITULO 4.

RED PUNTO A PUNTO ZIGBEE

En este capítulo se hará una descripción de las pruebas realizadas con el kit de desarrollo que fue adquirido para implementar una red punto a punto ZigBee con el fin de evaluar el desempeño de esta tecnología. Dicho kit fue desarrollado por Jennic⁵ bajo el nombre de JN5139, el cual cumple las especificaciones IEEE 802.15.4 para la banda de 2.4 GHz. El JN5139 se compone de tres tarjetas, dos de las cuales se pueden configurar ya sea como coordinador o como enrutador, y la tarjeta restante viene configurada previamente para ser un dispositivo final.

En las pruebas descritas en este capítulo se implementó una red punto a punto entre el coordinador y el enrutador, estando el coordinador conectado a un computador, como se visualiza en la figura 56.

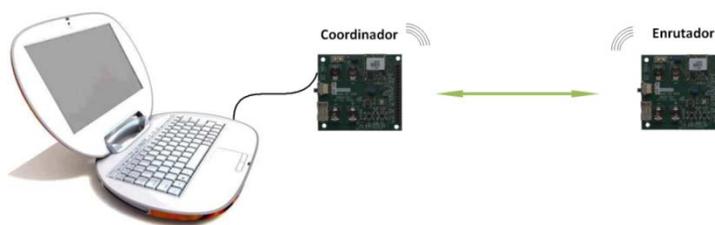


Figura 56. Red Punto a Punto de ZigBee.

4.1 CONFIGURACIÓN DEL KIT

Las tarjetas pueden ser conectadas a un computador a través de un puerto universal en serie (USB, Universal Serial Bus), lo cual permite controlar las pruebas desde el computador. Antes de conectar cualquiera de las tarjetas al computador se debe tener en cuenta que en cada tarjeta existe un puerto llamado J2 que determina el modo de alimentación, el cual puede ser por batería o a través del puerto USB del computador. Cuando la alimentación es por batería es necesario asegurar que los pines 1 y 2 del puerto J2 están conectados entre sí, pero si por el contrario la tarjeta se conecta al computador y la alimentación se toma del puerto USB, los pines 2 y 3 deben estar conectados.

El cable que viene con el kit tiene un código de colores, el cable negro debe ser conectado al pin 1 del puerto UART 0 de la tarjeta. Antes de que la tarjeta sea encendida es preciso identificar cual puerto serial fue asignado por el computador a la comunicación, lo cual puede ser determinado realizando los siguientes pasos en el entorno Windows:

Clic en el menú "Inicio" → "Panel de control" → "Sistema"

Al visualizar la ventana de "Propiedades del Sistema":

⁵ Página oficial de Jennic www.jennic.com

Clic en “Hardware” → “Administrador de Dispositivos”

En la ventana “Administrador de Dispositivos” se despliegan algunos íconos de los cuales se selecciona “Puertos (COM & LPT)” y aquí se identifica el puerto que tiene la etiqueta “USB Serial Port”. En la figura 57 aparece como ejemplo el COM5.

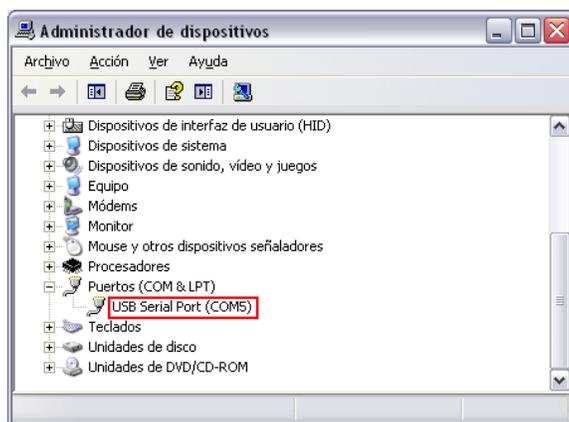


Figura 57. Identificación de Puerto Serial a Través de un Puerto USB.

Después de que el puerto COM ha sido identificado, se configura el computador para que pueda controlar la tarjeta coordinador que se encuentra directamente conectada al computador. La comunicación entre el computador y el coordinador se hace gracias a una serie de comandos que son introducidos en la aplicación HyperTerminal de Windows, pero antes es necesario seguir las siguientes instrucciones:

Clic en el menú “Inicio” → “Todos los Programas” →

“Accesorios” → “Comunicaciones” → “HyperTerminal”

Una vez abierta la aplicación HyperTerminal, se visualiza una ventana llamada “Descripción de la Conexión” en donde se debe asignar un nombre para la conexión. Al hacer clic en el botón “Aceptar” se despliega otra ventana llamada “Conectar a” y en la lista desplegable llamada “Conectar usando:” se selecciona el puerto COM con el que se va a trabajar, que para el ejemplo es el puerto COM5 (Ver figura 58).



Figura 58. Configuración de Hyperterminal.

Al hacer clic en “Aceptar” aparecerá una nueva ventana con el nombre de “Propiedades de COM” cuyas propiedades deben configurarse como se muestra en la figura 59 y luego un clic en “Aceptar”.

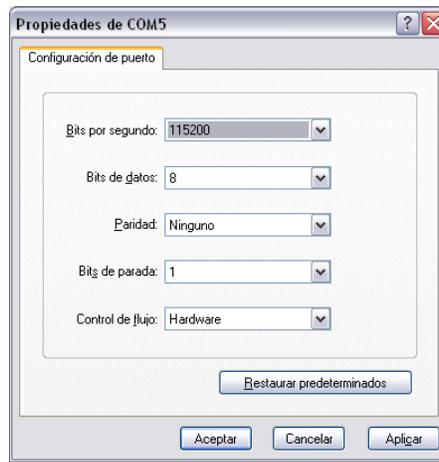


Figura 59. Configuración de Puerto en HyperTerminal.

Nuevamente en la ventana principal de HyperTerminal se deben realizar los siguientes pasos:

Clic en “Archivo” → “Propiedades” → “Configuración” →

“Configuración ASCII” → seleccionar “Enviar fin de línea con los avances de línea” → “Aceptar”

La ventana “Configuración ASCII” se visualiza en la figura 60.

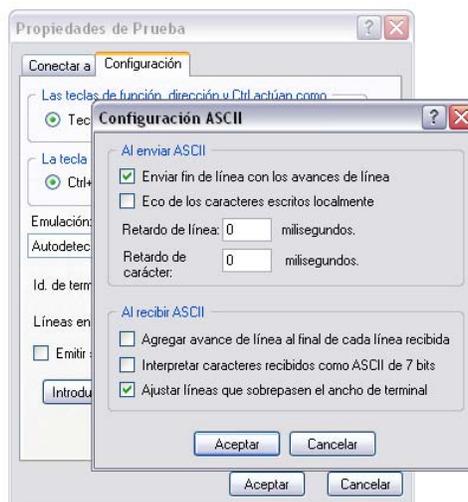


Figura 60. Configuración ASCII de Hyperterminal.

HyperTerminal está listo para iniciar la comunicación con la tarjeta coordinadora. Para encender la tarjeta se debe primero mantener presionado el conmutador 2 (switch 2 o SW2) mientras se desliza el conmutador 6 (SW6), luego en menos de 10 segundos se debe presionar el conmutador

1 (SW1) dos veces y luego el conmutador 2 (SW2) una sola vez, con lo cual en la ventana de HyperTerminal aparecerá un mensaje anunciando la conexión con el dispositivo.

El siguiente paso es inicializar la tarjeta enrutador, la cual debe estar alimentada por batería, deslizando el SW6 y luego en menos de 10 segundos se debe presionar el SW1 dos veces y el SW2 una sola vez. En el HyperTerminal aparece un mensaje anunciando la conexión del enrutador al coordinador. En la figura 61 se aprecia los mensajes mostrados en Hyperterminal cuando se conectan los dispositivos.

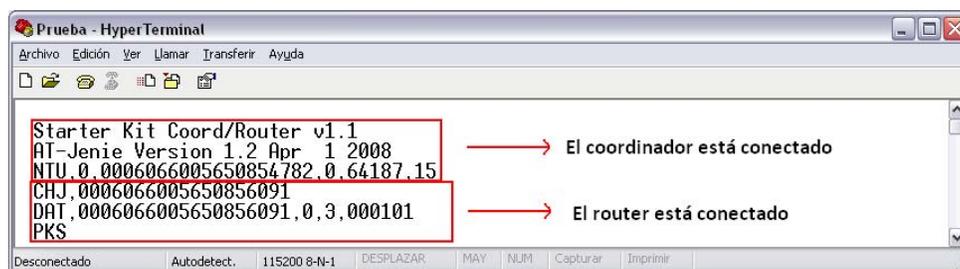


Figura 61. Vista de Hyperterminal de la Conexión de Dispositivos.

El envío de información desde el coordinador hacia el enrutador se hace a través de comandos atención (AT, ATtention) enviados desde el computador hacia el coordinador. El comando de petición de envío de información es:

TCF,<num>,<periodo>,<lon>,<datos>

Donde <num> es el número de paquetes que van a ser enviados hacia el enrutador, <periodo> es el tiempo entre paquetes en milisegundos (mínimo 100ms, máximo 655350 ms), <lon> es la longitud del paquete en bytes (máximo 50 bytes) y <datos> son los datos que serán insertados dentro de la trama de cada paquete.

Como respuesta se obtiene en la pantalla de HyperTerminal el siguiente comando:

TPR,<ID>,<perdidos>,<PER>,<LQI>

En donde, <ID> identifica el último paquete que ha sido enviado, <perdidos> es el número de paquetes perdidos desde que empezó la prueba, <PER> es la relación de paquetes perdidos con respecto al total de paquetes transmitidos (PER, Packet Error Rate) y por último un índice de calidad del enlace (LQI, Link Quality Index) que varía entre 0-255. En la figura 62 se aprecia un ejemplo del comando de petición de envío de un solo paquete y el comando de respuesta que se obtiene.

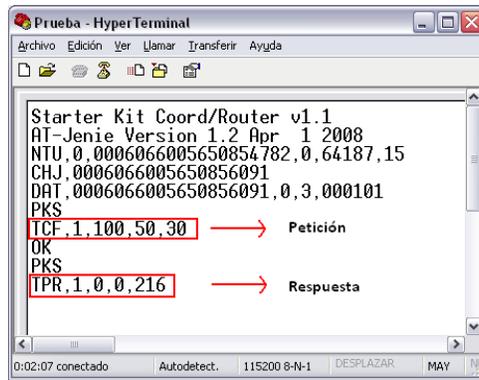


Figura 62. Vista de Hyperterminal.

4.2 PLAN DE PRUEBAS

Se realizaron pruebas en diferentes escenarios con la red punto a punto ZigBee haciendo uso del kit JN5139. Las pruebas fueron realizadas en el canal 15 (2425 MHz).

En cada escenario se transmitieron paquetes a diferentes distancias para analizar el desempeño de la red, la tarjeta coordinador fue situada en la distancia cero o referencia y la tarjeta enrutador tuvo una ubicación variable entre 0 y X, siendo X la máxima distancia en metros para cada prueba. La tarjeta coordinador transmitió ráfagas de 200 paquetes cada 100 milisegundos hacia la tarjeta enrutador para diferentes valores de distancia en cada uno de los escenarios y se registraron los datos recibidos en el computador al que estaba conectado al coordinador.

En cada una de las pruebas se midieron los siguientes parámetros:

- PER.
- Cantidad total de paquetes perdidos por cada ráfaga de 200 paquetes que se relaciona directamente con PER.
- LQI, esta medida según el estándar es una caracterización de la intensidad y/o la calidad de un paquete recibido. Esta medida puede ser implementada usando un procedimiento de detección de energía recibida (ED, Energy Detection) , una estimación de la señal a ruido o una combinación de estos métodos. Jennic hace uso del método que utiliza ED. El uso de los resultados de LQI en una red o su uso en los distintos niveles del modelo de referencia OSI (Open System Interconnection) no es especificado en el estándar. El valor de LQI es obtenido por cada paquete recibido y el resultado es reportado al nivel MAC como un entero en el rango de 0x00 a 0xff. El mínimo valor (0) es asociado con la más baja calidad y el máximo valor LQI (255) con mas alta calidad de la señal detectada por el receptor, los valores LQI intermedios deberán ser distribuidos uniformemente entre estos límites.
Para Jennic el valor LQI permite decidir si se tiene un enlace confiable o no. Si el valor de LQI es menor a 30 el enlace es considerado no confiable . Según Jennic LQI es equivalente al indicador de intensidad de la señal recibida (RSSI, Received Signal Stregth Indication) y se calcula de la siguiente forma:

$$ED = (47 - MED) \cdot 6$$

$$\text{if } (ED < 0)$$

$$ED = 0;$$

$$\text{else if } (ED < 255)$$

$$ED = 255;$$

Donde MED es el número de etapas de amplificación requeridas para recibir apropiadamente un paquete. Hay 47 etapas de amplificación y cada una adiciona aproximadamente 2dB a la sensibilidad del receptor.

Teniendo en cuenta lo anterior en el trabajo de grado se tomó la medida de LQI como una medida de la calidad del enlace y de la misma manera como una idea del nivel de potencia recibido.

En tres de los cuatro escenarios escogidos se incluyó la interferencia de una red configurada para funcionar con IEEE 802.11b, ya que trabaja en la banda de 2,4 GHz y utiliza espectro ensanchado como ZigBee. Se configuró un punto de acceso inalámbrico (AP, Acces Point) en diferentes canales dependiendo del canal de operación del kit. Los canales IEEE 802.11b aparecen en la tabla 6.

Canal	Frecuencia (GHz)	Rango de frecuencia (GHz)
1	2,412	2,401-2,423
2	2,417	2,406-2,428
3	2,422	2,411-2,433
4	2,427	2,416-2,438
5	2,432	2,421-2,443
6	2,437	2,426-2,448
7	2,442	2,431-2,453
8	2,447	2,436-2,458
9	2,452	2,441-2,463
10	2,457	2,446-2,468
11	2,462	2,451-2,473
12	2,467	2,456-2,478
13	2,472	2,461-2,483
14	2,484	2,473-2495

Tabla 6. Canales del Estándar IEEE 802.11b.

Para las pruebas con interferencia se ubicaron dos equipos portátiles transmitiendo información entre ellos a través del AP configurado en IEEE 802.11b muy cerca de la red ZigBee, generando de esta forma un tráfico de paquetes que creó interferencia a la red ZigBee.

4.2.1 Escenario 1: Espacio libre.

En este escenario se buscó un lugar con condiciones ideales para que las pruebas se realizaran sin ningún tipo de obstrucción e interferencia. Para la escogencia de este sitio se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- Total ausencia de redes IEEE802.11b ya que estas redes trabajan en la misma banda de frecuencia que ZigBee (2.4 GHz) para evitar interferencia.
- Línea de vista entre tarjetas a una distancia de al menos 100 metros, esta es la máxima distancia de cobertura de ZigBee.

Considerando los anteriores criterios, se escogió como escenario un terreno ubicado a las afueras de la ciudad de Popayán ya que en la ciudad es muy común la existencia de redes IEEE802.11b.

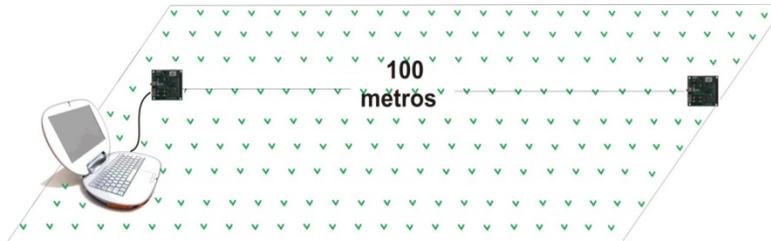


Figura 63. Escenario 1, Campo Libre.

4.2.2 Plan de pruebas escenario 1.

La tarjeta coordinador fue situada en el metro cero y el enrutador en una ubicación variable entre 0 y 100. El coordinador envió ráfagas de 200 paquetes hacia el enrutador a cada distancia en la que se encontró separado del coordinador. Las tarjetas se colocaron a una altura de 50 centímetros desde el suelo.

4.2.3 Escenario 2: Parque de Ingenierías.

Se seleccionó este lugar para contar con un escenario universitario común en un área abierta. Se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- Línea de vista entre tarjetas a una distancia de hasta 70 metros.

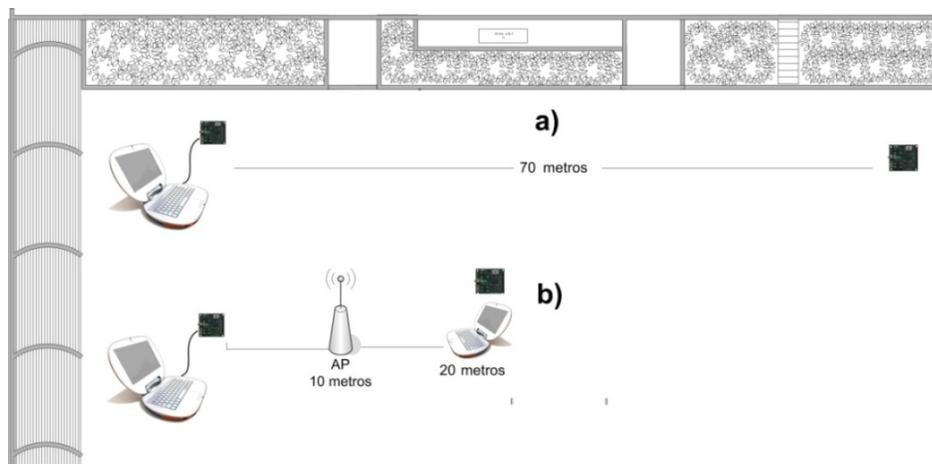


Figura 64. Escenario 2, Parque de Ingenierías.

4.2.4 Plan de pruebas escenario 2

En este escenario se transmitieron 200 paquetes desde el coordinador hacia el enrutador a una distancia variable de hasta 70 metros. Las tarjetas fueron ubicadas a una altura de 50 centímetros del suelo. Para este escenario se tuvo en cuenta la interferencia de una red IEEE802.11b, por esta razón las pruebas se dividieron en dos:

- Escenario 2 sin interferencia. En esta prueba las medidas fueron tomadas cada metro hasta que la distancia entre los dispositivos alcanzó los 20 metros, después de esta distancia las medidas se realizaron cada 5 metros hasta alcanzar los 70 metros.(ver figura 64 a).
- Escenario 2 con interferencia. En esta prueba se creó una red IEEE 802.11b entre dos computadores con la finalidad de generar interferencia a la red ZigBee, uno de ellos conectado al coordinador y el otro a una distancia de 20 metros, los dos computadores transmitiendo información durante toda la prueba a través de un AP que fue ubicado a 10 metros del coordinador, esto mientras el enrutador fue desplazado desde 0 hasta 20 metros. La prueba se repitió para los canales 4, 5, 6 y 11 con el fin de analizar si existían diferencias. Para cada canal las medidas fueron realizadas cada 5 metros hasta alcanzar los 20 metros. ver figura 64 b).

4.2.5 Escenario 3: Pasillo

El motivo para elegir este sitio fue estudiar el comportamiento de la red en un lugar cerrado (interior). Se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- Línea de vista entre tarjetas a una distancia de 50 metros.
- Lugar cerrado, con el fin de observar el comportamiento de ZigBee en interiores garantizando línea de vista entre las tarjetas.

Teniendo en cuenta los anteriores criterios se escogió como escenario el pasillo más largo del segundo piso de la Facultad de Electrónica y Telecomunicaciones.

4.2.6 Plan de pruebas escenario 3

Para este escenario se transmitieron 200 paquetes desde el coordinador al enrutador y estos mantuvieron una distancia entre 0 y 55 metros. Para cada distancia en la que se movió el enrutador se registraron los datos recibidos en el computador que estaba conectado al coordinador. Las tarjetas estaban a una altura de 50 centímetros sobre el nivel del suelo. En este escenario se realizaron dos tipos de pruebas:

- Escenario 3 sin interferencia. (Ver figura 65 a).
- Escenario 3 con interferencia. Se creó una red entre dos computadores, uno de ellos conectado al coordinador y el otro a una distancia de 20 metros, los dos computadores transmitiendo información durante toda la prueba a través de un AP que fue ubicado a 10

metros del coordinador, esto mientras el enrutador es desplazado desde 0 hasta 20 metros. Esta prueba se repitió para los canales 3, 4, 5 y 11 con el fin de analizar las diferencias en el desempeño. (Ver figura 65 b).

Para las dos clases de prueba se registraron los datos obtenidos por cada metro en el que se movió el enrutador en los primeros 20 metros, después los datos se registraron cada 5 metros.

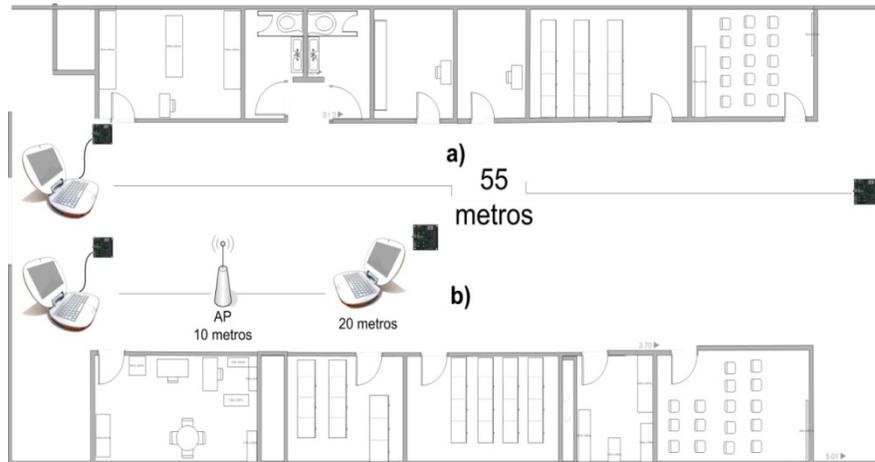


Figura 65. Escenario 3, Pasillo.

4.2.7 Escenario 4: Casa

El último escenario fue un lugar en condiciones muy típicas como lo es una casa, siguiendo este principio se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- Obstáculos comunes como paredes y puertas.
- Lugar cerrado.

El plano de la casa que se escogió se aprecia en la figura 66.

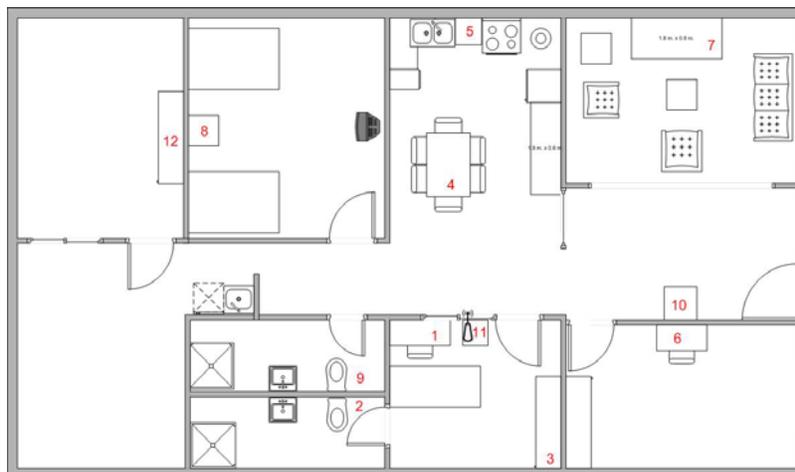


Figura 66. Escenario 4, Casa.

4.2.8 Plan de pruebas escenario 4

Para realizar estas pruebas se ubicaron 10 puntos en la casa, como se aprecia en la figura 66, en los cuales se realizaron las diferentes medidas. Las distancias de comunicación aparecen en la tabla 7.

Lugar	Punto de ubicación de la tarjeta Coordinador	Punto de ubicación de la tarjeta Enrutador	Condiciones	Distancia entre tarjetas [Metros]
1	1	2	Puerta del punto 2 abierta	2,3
2	1	2	Puerta del punto 2 cerrada	2,3
3	1	3	Total línea de vista	3
4	1	4	Puerta del punto 1 abierta	3
5	1	4	Puerta del punto 1 cerrada	3
6	1	5	Puerta del punto 1 abierta	5,9
7	1	5	Puerta del punto 1 cerrada	5,9
8	1	6	Puerta punto 1, punto 6 cerradas	3,92
9	1	6	Puertas punto 1, punto 6 abiertas	3,92
10	1	7	Puerta del punto 1 abierta	7,50
11	1	7	Puerta del punto 1 cerrada	7,50
12	1	8	Puerta del punto 1 abierta	6,90
13	1	9	Puerta punto 1, punto 9 abiertas	6,90
14	1	9	Puertas punto 1,punto 9 cerradas	2,60
15	6	10	Puerta del punto 6 abierta	0,76
16	6	10	Puerta del punto 6 cerrada	0,76
17	6	7	Puerta del punto 6 abierta	5,76
18	6	7	Puerta del punto 6 cerrada	5,76
19	4	7	No hay puertas	6,53
20	4	12	Puerta del punto 12 abierta	5

Tabla 7. Ubicaciones de las Pruebas en Escenario 4.

En este escenario se transmitieron 200 paquetes desde el coordinador hacia el enrutador según los lugares definidos en la tabla 15. Las pruebas y medidas se realizaron consecutivamente en el mismo orden en que aparecen en la tabla 15. Las tarjetas se encontraban a una altura de 50 centímetros sobre el nivel del suelo. Para este escenario se tuvo en cuenta la interferencia de una red IEEE802.11b, por esta razón las pruebas se dividieron en dos:

- Escenario 4 sin interferencia, ver figura 66.
- Escenario 4 con interferencia, para esta prueba se ubicó el primer computador portátil que está conectado al coordinador en el punto 1 y el segundo computador fue ubicado en el punto 4. El AP fue localizado en el punto 11 (ver figura 66) a 0,5 metros del coordinador. Durante la prueba los dos computadores mantuvieron una transmisión continua de paquetes a través del AP. La prueba se repitió para los canales 3, 4, 5, 7 y 11 con el fin de analizar las diferentes medidas obtenidas.

CAPITULO 5.

ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos a partir de la simulación. Estos resultados son los que permiten evaluar el desempeño de la tecnología por medio del análisis de las gráficas de BER contra E_b/N_0 , diagramas de constelación, diagramas de ojo y del espectro de frecuencias. Todos los valores resultados de la simulación aparecen en una tabla como se observa en la figura 67. Los valores de potencia transmitida (*Signal power tx*), potencia recibida (*Signal power rx*) y potencia de ruido (*Noise power*) fueron medidos por medio de bloques denominados “*Power Probes*”.

Run #	Host	Status	//EbNc	Signal Power Tx	Noise Power	Signal Power Rx	Rcv Blocks	Rcv BER	Rcv BLER
1	local	succeeded	-5	0.99999933	16.901913	17.897861	199	0.017198059	1
2	local	succeeded	-4	0.99999933	12.52659	13.523102	199	0.017024779	1
3	local	succeeded	-3	0.99999933	9.2838876	10.280884	199	0.016569919	1
4	local	succeeded	-2	0.99999933	6.8806089	7.8780232	199	0.014945417	1
5	local	succeeded	-1	0.99999933	5.0994563	6.0972302	199	0.012454514	0.99497487
6	local	succeeded	0	0.99999933	3.7793827	4.7774662	199	0.0084040894	0.93969849
7	local	succeeded	0.5	0.99999933	3.2536391	4.2518608	199	0.0061839369	0.81407035
8	local	succeeded	1	0.99999933	2.8010307	3.7993807	199	0.004483625	0.69346734
9	local	succeeded	1.5	0.99999933	2.411384	3.409853	199	0.0029349333	0.50251256
10	local	succeeded	2	0.99999933	2.0759404	3.0745198	199	0.0018411021	0.33668342
11	local	succeeded	2.5	0.99999933	1.7871598	2.7858416	199	0.0011154912	0.21105528
12	local	succeeded	3	0.99999933	1.5385509	2.5373279	199	0.00053067059	0.10050251
13	local	succeeded	3.5	0.99999933	1.3245257	2.3233908	199	0.00024909028	0.055276382
14	local	succeeded	4	0.99999933	1.1402731	2.1392201	199	0.00010830012	0.025125628
15	local	succeeded	4.5	0.99999933	0.98165159	1.9806745	199	3.2490036e-005	0.0050251256
16	local	succeeded	5	0.99999933	0.84509567	1.8441891	199	0	0
17	local	succeeded	5.5	0.99999933	0.72753581	1.7266946	199	0	0
18	local	succeeded	6	0.99999933	0.62632951	1.6255489	199	0	0
19	local	succeeded	6.5	0.99999933	0.53920185	1.5384775	199	0	0

Figura 67. Tabla de Resultados.

5.2 DIAGRAMAS DE CONSTELACIÓN

Los diagramas de constelación permiten observar las componentes de la señal en fase y en cuadratura en el plano complejo, correspondientes a los cambios de fase de la señal producidos por la modulación OQPSK. Para obtener este tipo de diagramas se utilizó un bloque llamado analizador de señales complejas (*Complex signal sink*), el cual fue ubicado a la salida del subsistema transmisor y a la entrada del subsistema receptor. Una vez obtenida la imagen de la señal se procedió a seleccionar la opción de diagrama de constelación (*Scatter diagram*) en el panel de herramientas, para de esta manera visualizar este tipo de diagramas. A la salida del subsistema transmisor se observa un diagrama de constelación ideal ya que la señal no ha sido afectada por el ruido y también se puede observar que no existen cambios de fase superiores a 90°. (Ver figura 68).

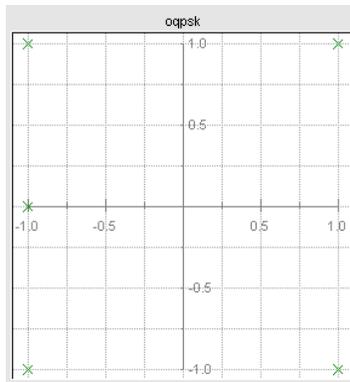


Figura 68. Constelación para OQPSK.

A la entrada del receptor el diagrama de constelación varía de acuerdo a la relación E_b/N_0 parámetro que define la condición del canal. En las siguientes figuras se observan los diagramas de constelación para diferentes valores de E_b/N_0 .

Las figuras 69 y 70 muestran los diagramas de constelación de símbolos OQPSK para valores bajos de E_b/N_0 donde se observa que la mayoría de los puntos cruzan el umbral de decisión (ejes I y Q) generando de esta manera bits erróneos.

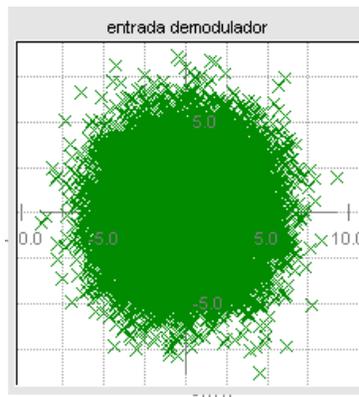


Figura 69. Constelación para $E_b/N_0=0$.

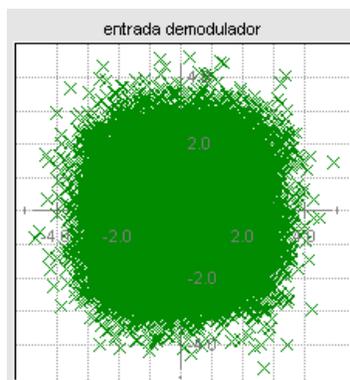


Figura 70. Constelación para $E_b/N_0=5$.

En la figura 71 se muestra el diagrama de constelación de símbolos OQPSK donde se observa claramente los puntos que hacen parte del diagrama de constelaciones y que algunos de estos están cerca de los umbrales de decisión, lo cual se interpreta como posibles errores en la modulación y por lo tanto en los bits recibidos.

En la figura 72 se observa que para una relación de E_b/N_0 alta (buenas condiciones de canal), la respuesta del sistema es casi perfecta y los símbolos OQPSK toman uno de los 4 valores posibles sin mayores desplazamientos.

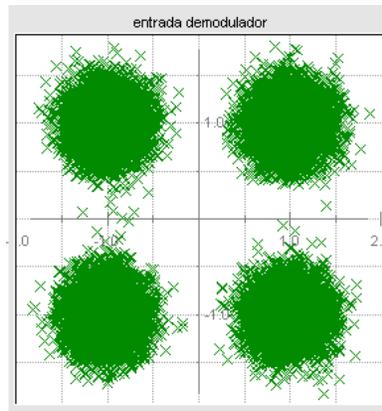


Figura 71. Constelación para $E_b/N_0=15$.

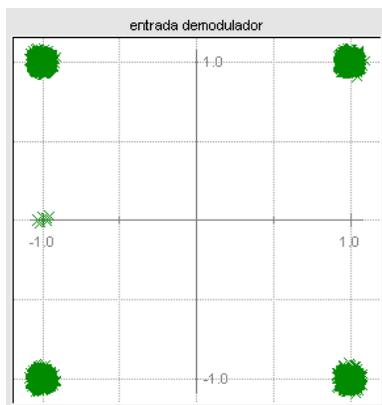


Figura 72. Constelación para $E_b/N_0=30$.

5.3 DIAGRAMAS DE OJO

Los diagramas de ojo permiten evaluar la calidad y el desempeño del canal ya que facilitan el análisis de interferencia, sincronización y distorsión de la señal, entre otros. Para obtener estos diagramas se colocaron bloques analizadores de señales complejas a la salida del transmisor y a la entrada del receptor. Una vez obtenida la imagen de la señal se procedió a seleccionar la opción de diagrama de ojo (*Eye diagram*) en el panel de herramientas, para de esta manera obtener este tipo de diagramas. A la salida del subsistema transmisor se observa un diagrama de ojo ideal ya que la señal no ha sido afectada por el ruido (figura 73).

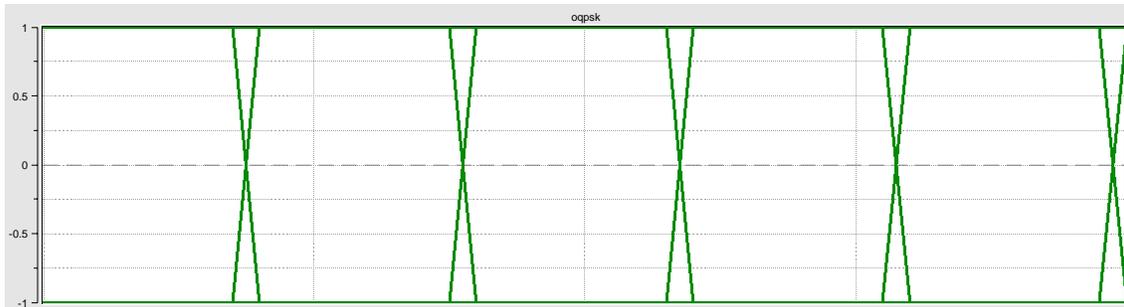


Figura 73. Diagrama de Ojo de la Señal Transmitida.

En las figuras 74 y 75 se observan los diagramas de ojo para valores bajos de E_b/N_0 donde se presenta una gran cantidad de ruido. Claramente se visualiza que para un valor de $E_b/N_0 = 0$, las amplitudes máximas de la señal son 5 veces mayor que la señal transmitida y por lo tanto se presentan gran cantidad de errores en el sistema. Para un valor de $E_b/N_0 = 5$, las amplitudes máximas de la señal han disminuido a 3 veces la amplitud máxima de la señal transmitida.

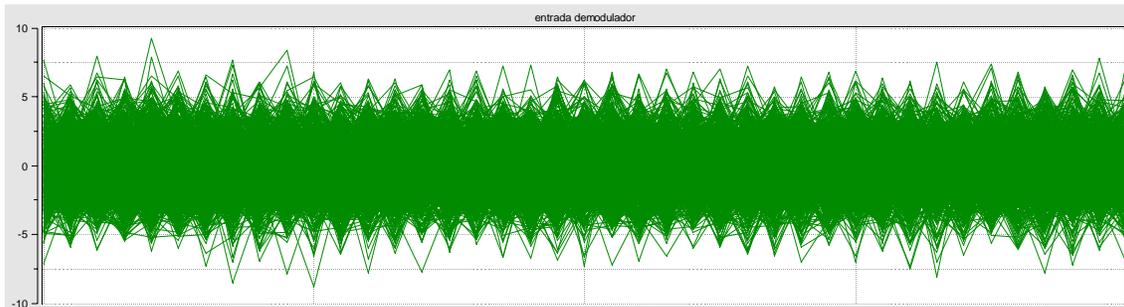


Figura 74. Diagrama de Ojo para $E_b/N_0=0$.

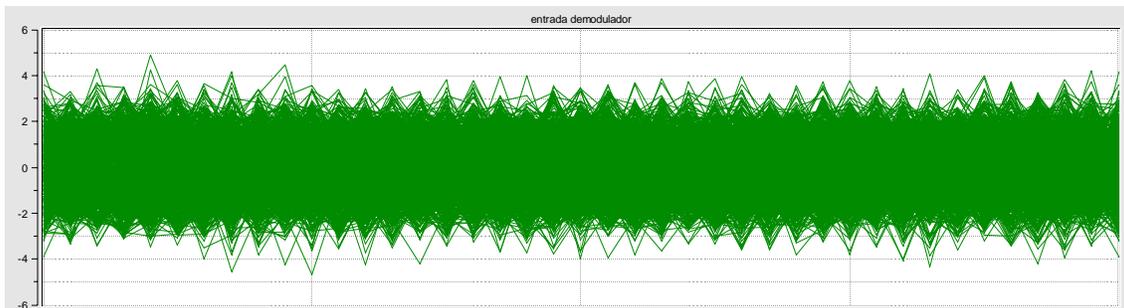


Figura 75. Diagrama de Ojo para $E_b/N_0=5$.

En la figura 76 donde se tiene un valor de $E_b/N_0 = 15$ se observa el efecto aditivo del ruido, ya que el diagrama de ojo va alcanzando una mejor definición debido a la reducción del nivel de ruido, lo que hace que la amplitud de la señal se aproxime a la de la señal transmitida.

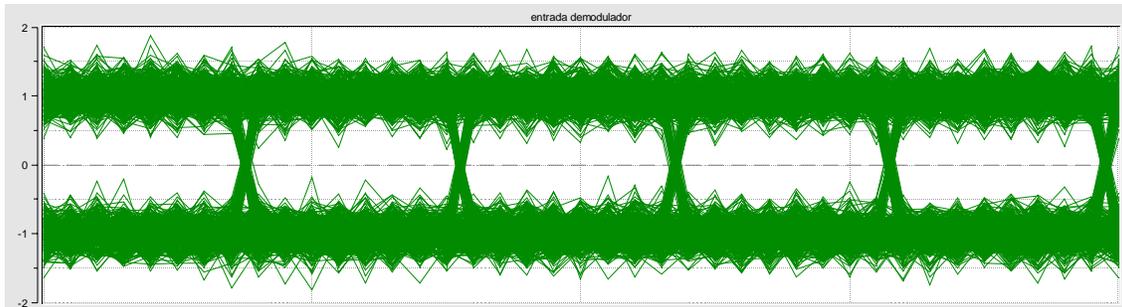


Figura 76. Diagrama de Ojo para $E_b/N_0=15$.

En la figura 77 se observa el diagrama de ojo para $E_b/N_0=30$ donde claramente se obtiene una transmisión casi perfecta ya que no se presenta interferencia y los valores de amplitud de la señal son muy cercanos a los de la señal transmitida, por estas razones para este valor de E_b/N_0 la cantidad de errores que se presentan son cero.

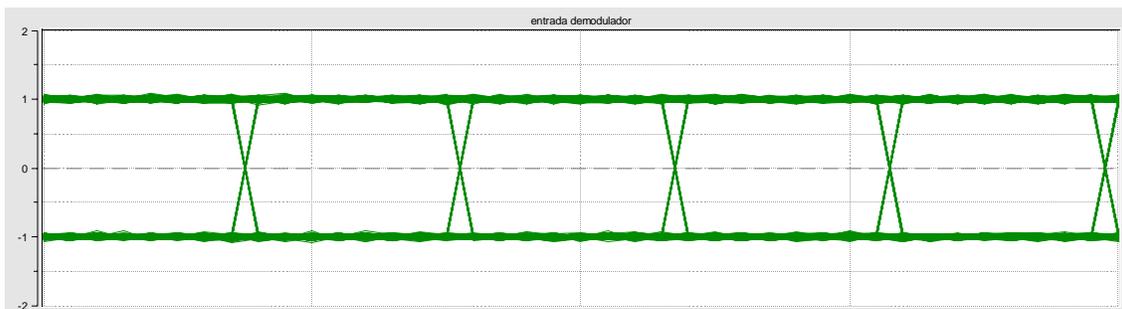


Figura 77. Diagrama de Ojo para $E_b/N_0=30$.

5.4 RESPUESTA EN FRECUENCIA

Este tipo de gráficas permite analizar el efecto de la técnica de ensanchamiento utilizada y los anchos de banda tanto de la señal de información (trama PPDU) como de la señal después de la etapa de ensanchamiento. Estas gráficas se obtuvieron al aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT, Fast Fourier Transform) sobre las señales que se quieren evaluar. Para lograr las gráficas en este modelo de simulación fue necesario hacer uso de los bloques repetidores (*repeat*) para incrementar la frecuencia de muestreo y de esta manera ampliar el rango de frecuencia de observación del análisis espectral y de analizadores de señal (*Signal Sink*) en los puntos deseados. Al obtener tanto la señal transmitida como la ensanchada, se procedió a seleccionar diagrama de respuesta en frecuencia (*Frequency response plot*) en la barra de herramientas.

En la simulación acorde al estándar el factor de ensanchamiento (SF, Spreading Factor) o ganancia de procesamiento (PG, Processing Gain) corresponde a un valor de 8 ya que en el momento de ensanchar la trama PPDU (464 bits) se está convirtiendo cada bit en 8 chips (3712 chips en por trama). La trama PPDU se envía a 464 bits/s (464 Hz) y la señal ensanchada a 3712 chips/s (3712 Hz). Para facilitar este análisis se realizó la simulación a 1 bps y la frecuencia de muestreo a 1 muestra por segundo, lo que permite manejar los valores en Hz.

En la figura 78 claramente se observa que el primer nulo de la trama PPDU se encuentra en 464 Hz ya que se está enviando 1 trama/s (464 bits/s).

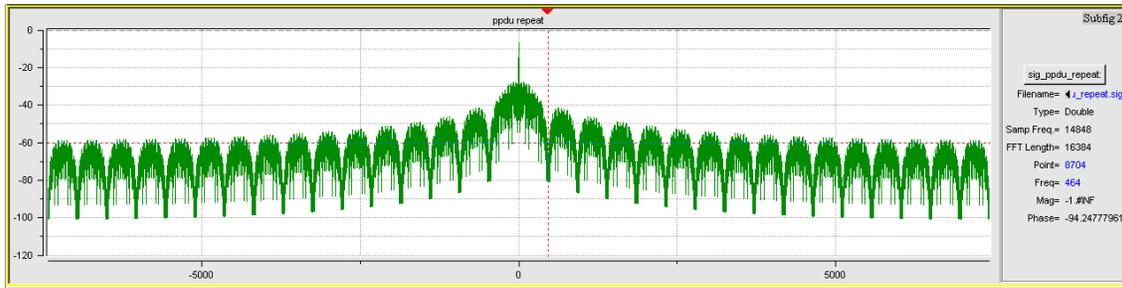


Figura 78. Respuesta en Frecuencia de la Trama PPDU.

En las figuras 79 y 80 se verifica el factor de ensanchamiento comparando el número de nulos de frecuencia de la señal de información con el primer nulo de la señal ensanchada, dado que deben existir 8 nulos de la señal de información por un nulo de la señal ensanchada. Esta condición se cumple en el valor de frecuencia de 3712 Hz para este caso.

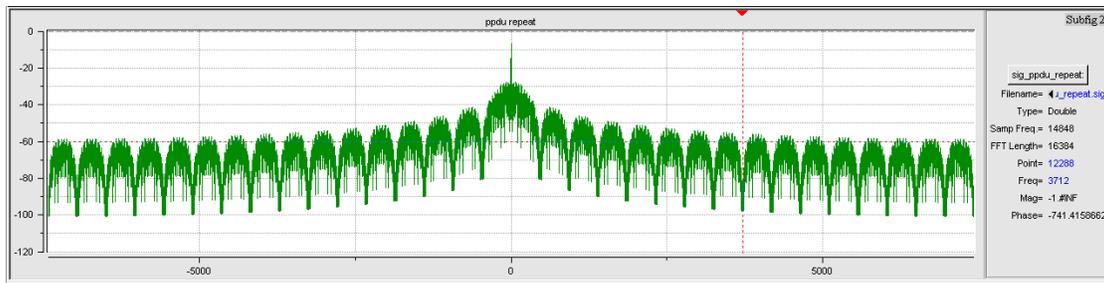


Figura 79. Respuesta en Frecuencia de la Trama PPDU.

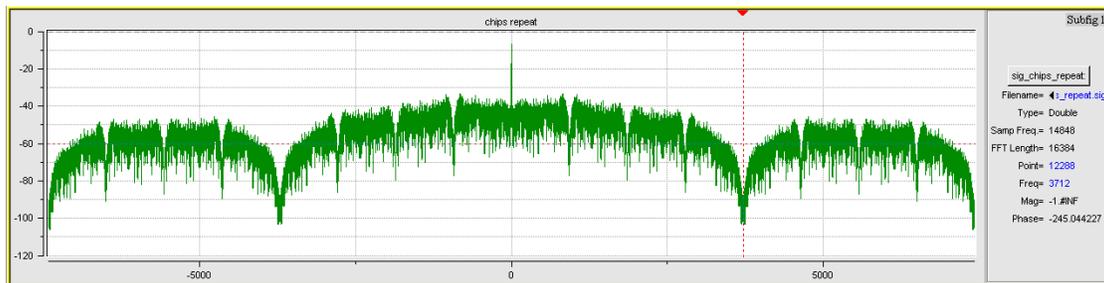


Figura 80. Respuesta en Frecuencia de la Señal Ensanchada.

5.5 BER

Para generar la curva que relaciona la BER y la relación E_b/N_0 teniendo en cuenta diferentes condiciones de canal se utilizó el bloque "Complex White Noise" el cual genera ruido blanco gaussiano complejo de acuerdo a la varianza de ruido. En este modelo se utilizó la fórmula de varianza de ruido en función de la relación E_b/N_0 descrita en el capítulo 3 sección 3.2. Los valores de E_b/N_0 varían desde -5 dB hasta 5 dB. Para obtener la medida de BER se utilizó el bloque

BLER/BER el cual determina la tasa de error de bit (BER) y la tasa de error de bloque (BLER) comparando la señal transmitida con la señal recibida. La curva obtenida se observa en la figura 81.

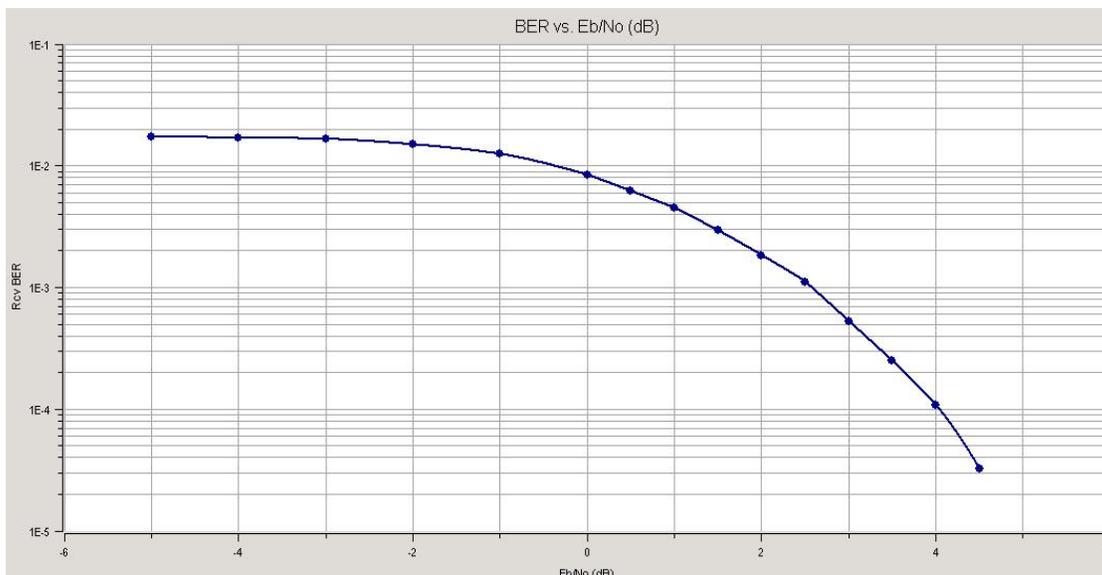


Figura 81. BER vs. E_b/N_o .

Según la figura 67 que muestra una imagen de los resultados obtenidos se observa que para valores de E_b/N_o mayores a 5 el BER toma un valor de cero. Por esta razón solo los valores que no son cero son los que se muestran en la grafica de BER.

5.6 RESULTADOS ESCENARIO 1: ESPACIO LIBRE

En la tabla 8 se encuentran los datos obtenidos en las pruebas realizadas para el escenario 1 (definido en el capítulo 4). Debido a que cada medida arroja distintos valores se decidió realizar para cada distancia 200 medidas y tomar finalmente la medida que más veces sucede. En la primera columna "Metros" se encuentran las distancias en metros entre el coordinador y el enrutador, distancia a la cual se realizó la respectiva captura de resultados. En la segunda columna "LQI", se encuentra el valor LQI que más se repite de los 200 paquetes enviados en cada distancia. La tercera columna "Total paquetes perdidos" muestra la cantidad de paquetes que no llegaron hasta el enrutador en cada sitio de prueba. Finalmente la casilla "PER" es el valor PER que más veces se repite de los 200 paquetes enviados en cada distancia, PER es el número de paquetes perdidos mostrados como porcentaje de el número de paquetes enviados desde el coordinador. El dispositivo no entrega una medida de BER, únicamente entrega valores de PER con los que no fue posible calcular BER. En este escenario se tomaron datos hasta el punto máximo de alcance de la red ZigBee que en estas condiciones fue de 110 metros.

Metros	LQI	Total paquetes perdidos	PER [%]
0	255	0	0
1	144	0	0
2	138	0	0
3	102	0	0
4	96	0	0
5	96	0	0
6	78	0	0
7	78	0	0
8	78	0	0
9	78	0	0
10	54	1	0,5
11	72	0	0
12	42	1	0,5
13	72	0	0
14	78	0	0
15	66	0	0
16	72	5	2,5
17	72	0	0
18	72	0	0
19	60	5	2,5
20	78	0	0
25	54	2	1
30	66	0	0
35	78	0	0
40	60	1	0,5
45	36	12	6
50	30	11	5,5
55	54	5	2,5
60	48	11	5,5
65	24	18	9
70	24	16	8
75	24	17	8,5
80	24	12	6
85	30	16	8
90	24	12	6
95	24	14	7
100	18	15	7,5
105	24	27	13,5
110	0	157	78,5

Tabla 8. Resultados Escenario 1.

En la figura 82 se aprecian los histogramas del escenario 1, se realizó un histograma por cada distancia de medida y para este documento se escogieron 6 distancias para ser representadas por histogramas: 1m, 20m, 40m, 60m, 80m y 110m. Los histogramas son una representación gráfica de una variable en forma de barras del número de veces que sucede un mismo valor, en este caso

la variable es el LQI por cada metro de la prueba, en el eje horizontal están los valores de LQI llamados clases y el eje vertical representa la frecuencia o veces que ocurre cada valor de LQI.

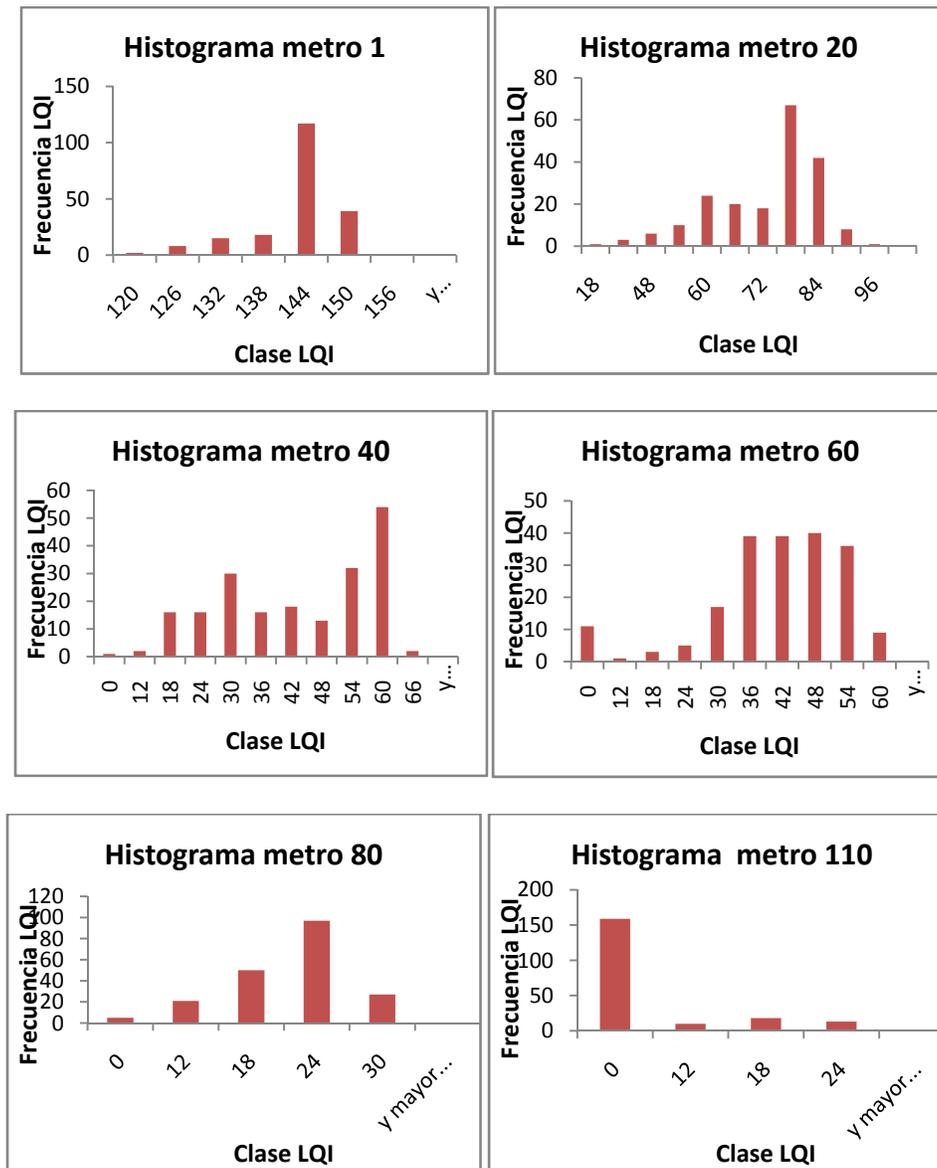


Figura 82. Histogramas Escenario 1.

En la figura 82 se observa que en cada distancia existe una medida que es la más repetida y por esto de cierta manera si se traza una línea imaginaria que una los valores máximos de cada barra se puede observar que esta línea se aproxima a una campana de Gauss.

De los datos de la tabla 8 se obtiene la gráfica LQI versus distancia de la figura 83.

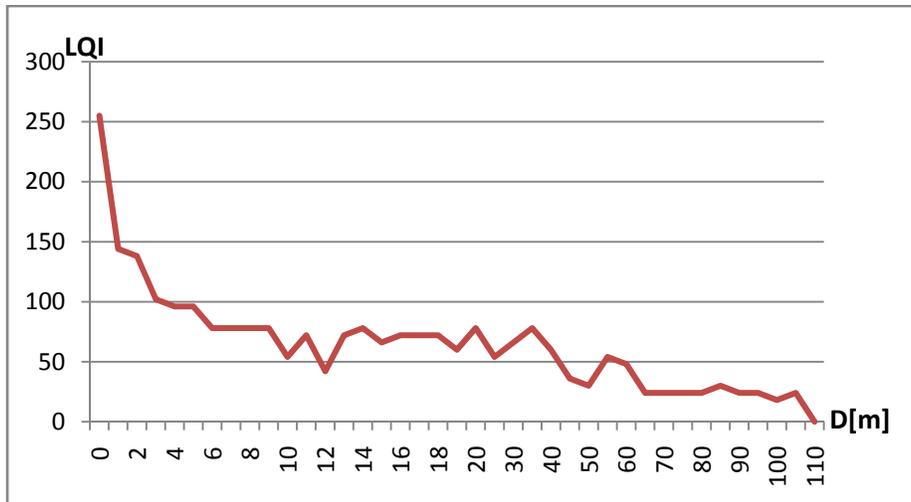


Figura 83. LQI vs. Distancia (D) para Escenario 1.

En la figura 83 se aprecia que el valor de LQI se reduce a medida que la distancia es mayor, esto implica que la calidad del enlace disminuye a medida que aumenta la distancia. Teniendo en cuenta que según el fabricante del kit un LQI menor a 30 representa un enlace con baja calidad, entonces en este escenario después de 65 metros el enlace tiene una baja calidad.

En la figura 84 se aprecia la gráfica de distancia versus PER que se realizó a partir de la tabla 8. En esta gráfica se ve claramente que a medida que la distancia aumenta el porcentaje de pérdida de paquetes es mayor.

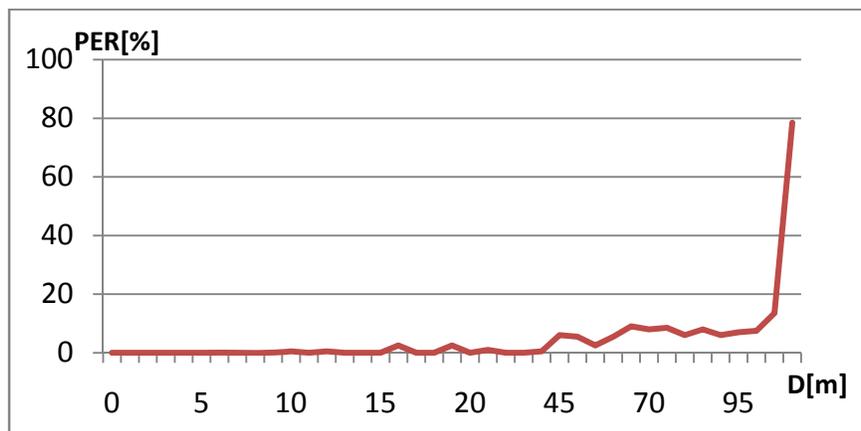


Figura 84. PER vs. Distancia (D) Escenario 1.

En este escenario se realizó un análisis de potencia recibida teórica ya que las pruebas se realizaron en las condiciones más ideales posibles (sin obstáculos, línea de vista, sin interferencia) y las pérdidas fueron calculadas con la fórmula de espacio libre de Friss. Para los otros escenarios no se analizó la potencia recibida debido a la complejidad de calcular las pérdidas o la atenuación generada por los obstáculos cercanos.

Con los datos proporcionados por el fabricante se calculó una potencia recibida (Pr) teórica utilizando la fórmula de Friss de espacio libre (ecuación 4). La Pr teórica se calculó de esta forma ya que el kit no permitió obtener el valor de potencia recibida de forma directa, además en este escenario las únicas pérdidas a tener en cuenta son las de espacio libre.

$$Pr_{[dBm]} = Ptx + Gtx + Grx - L \quad (4)$$

Donde: Pr: potencia recibida.

Ptx: potencia transmitida que según el fabricante es de 19dBm.

Gtx: ganancia de la antena del transmisor según el fabricante es de 1,95 dB.

Grx: ganancia de la antena del receptor según el fabricante es de 1,95 dB.

L: pérdida de espacio libre,

$$L_{dB} = 32,45 + 20 \log(F_{[MHz]}) + 20 \log(D_{[km]}) \quad (5)$$

Donde F es la frecuencia de trabajo que para este caso es de 2425 MHz. Según lo anterior en la figura 85 se graficó la Potencia recibida teórica (Pr) contra Distancia (D).

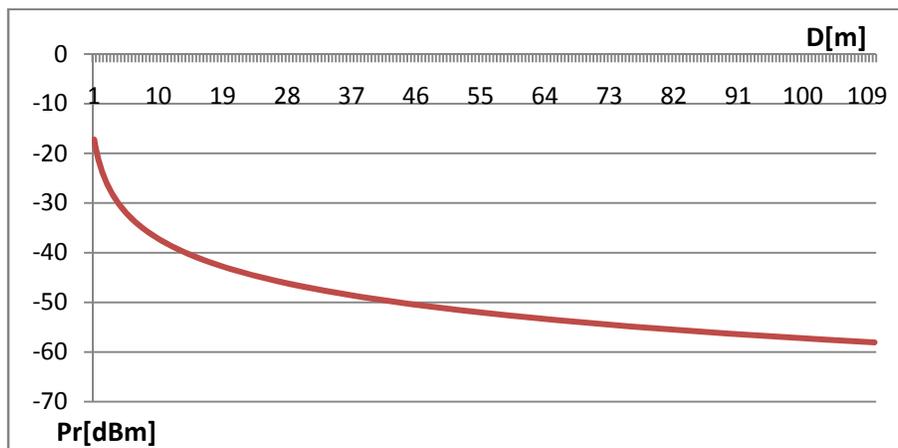


Figura 85. Potencia Recibida Teórica (Pr) vs. Distancia (D) para el Escenario 1

En la figura 85 se observa que la potencia recibida disminuye a medida que la distancia aumenta, al igual y en la misma forma que el valor de LQI también disminuye con la distancia como se aprecia en la figura 83. Por lo tanto se decidió estimar la potencia recibida dado que no existe una fórmula que relacione directamente LQI y Pr. Esta estimación y relación fue obtenida a partir del conocimiento de la máxima potencia permitida a la entrada del dispositivo, la mínima potencia (sensibilidad) a la entrada del mismo que permite la recepción de manera aceptable sin un número considerable de errores, y los valores máximo y mínimo de LQI. De la relación se obtiene la gráfica de potencia recibida estimada contra LQI que se muestra en la figura 86. El procedimiento que se utilizó para realizar esta estimación se describe en el Anexo A.

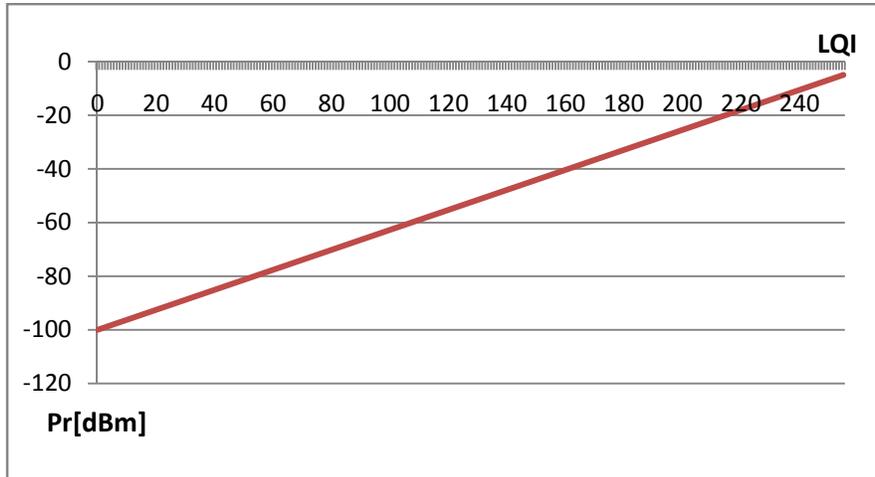


Figura 86. Potencia Recibida Estimada vs. LQI.

Una vez calculada la potencia recibida estimada se realizó la gráfica de Pr estimada versus Distancia (D) que se muestra en la figura 87. Se puede apreciar que la potencia recibida estimada está aproximadamente 40dB por debajo de la potencia recibida teórica.

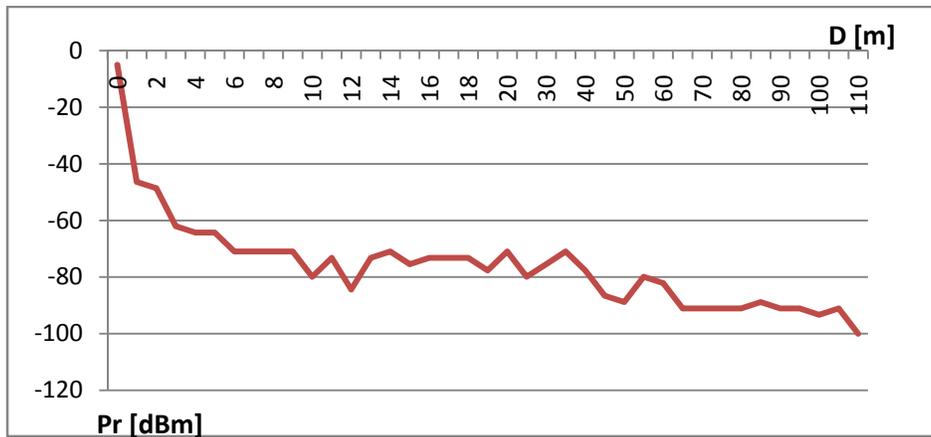


Figura 87. Potencia Recibida Estimada (Pr) vs. Distancia (D) para el Escenario 1.

Con la potencia recibida es posible calcular E_b/N_o :

$$E_b_{[dBW]} = Pr_{[dBW]} - 10\log(BR_{[bps]}) \quad \gamma \quad (6)$$

$$N_o_{[dBW]} = -204 + NF \quad (7)$$

Donde:

La velocidad de bits (BR, Bit Rate) es de 250000 bps y la figura de ruido (NF, Noise Figure) es 10 dB. De lo anterior se graficó E_b/N_o versus PER donde E_b fue calculado con la potencia recibida teórica (ver figura 88) la tabla con los datos de E_b/N_o para esta gráfica se encuentra en el Anexo A (tabla 4). Se graficó también E_b/N_o versus PER donde E_b se calculó con la potencia recibida

estimada (ver figura 89). La tabla con los datos de E_b/N_0 para esta gráfica se encuentra en el Anexo A (tabla 2)

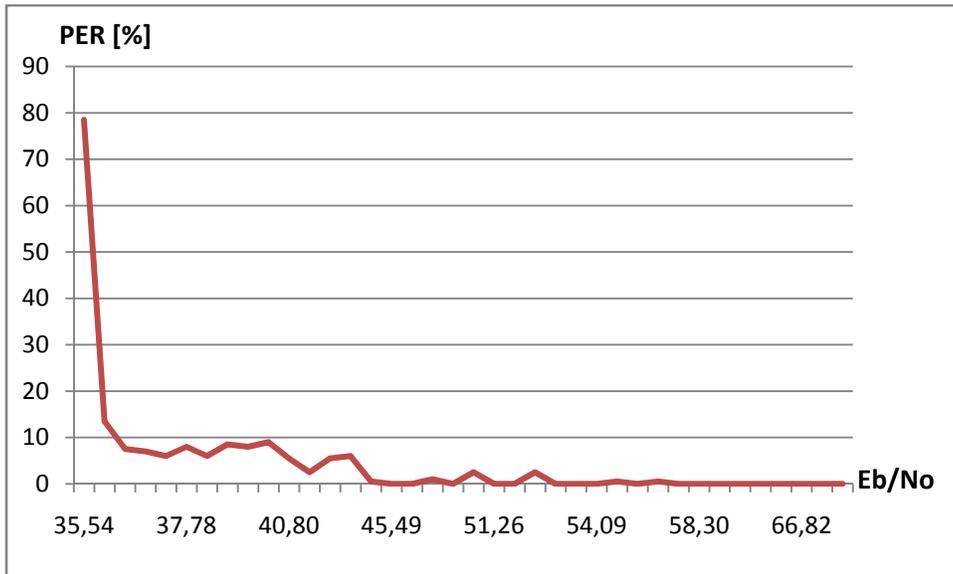


Figura 88. PER vs. E_b/N_0 Teórico para el Escenario 1.

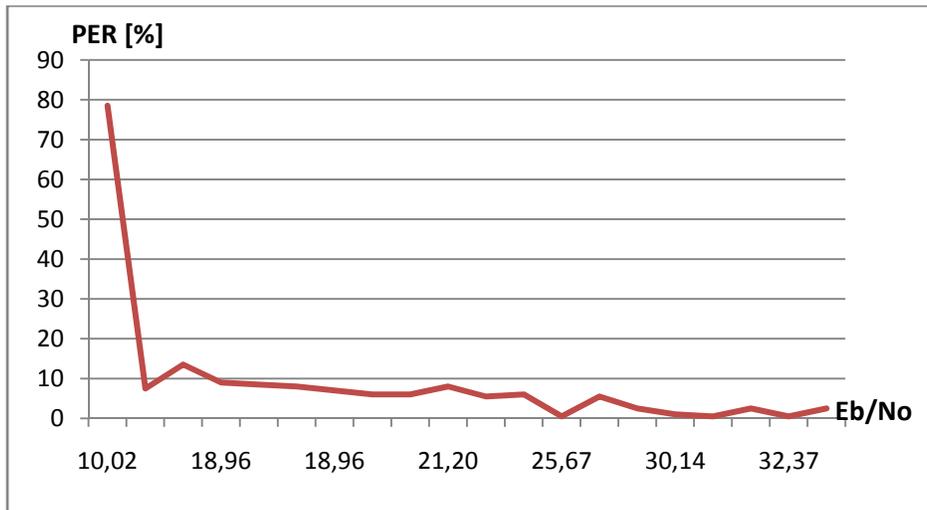


Figura 89. PER vs. E_b/N_0 Estimado para el Escenario 1.

Como se observa en las figuras 88 y 89 para valores bajos de E_b/N_0 las pérdidas de paquetes son mucho mayores y para valores altos de E_b/N_0 las pérdidas tienden a cero. El comportamiento de las dos gráficas es similar, la diferencia radica en los valores de E_b/N_0 ya que para la figura 88 la forma como se calculó este dato es ideal y por lo tanto es más alto que el de la figura 89. De lo anterior se puede decir que el E_b/N_0 estimado es menor y muestra un escenario más real que el valor teórico.

5.7 RESULTADOS ESCENARIO 2: PARQUE DE INGENIERÍAS

5.7.1 Sin interferencia

En la tabla 9 se encuentran las medidas obtenidas en el escenario 2 sin interferencia.

Metros	LQI	Total Paquetes perdidos	PER [%]
0	255	0	0
1	132	0	0
2	120	0	0
3	120	0	0
4	96	0	0
5	78	0	0
6	78	0	0
7	90	0	0
8	78	0	0
9	84	0	0
10	78	1	0,5
11	72	1	0,5
12	72	0	0
13	36	4	2
14	36	8	4
15	54	0	0
16	54	0	0
17	60	0	0
18	72	0	0
19	42	14	7
20	36	6	3
25	72	0	0
30	30	1	0,5
35	42	0	0
40	42	0	0
45	36	2	1
50	42	5	2,5
55	30	9	4,5
60	18	20	10

Tabla 9. Resultado Escenario 2 Sin Interferencia.

En la figura 89 se aprecia los histogramas del escenario 2, para el documento se escogieron 4 distancias para ser representadas por histogramas en este escenario.

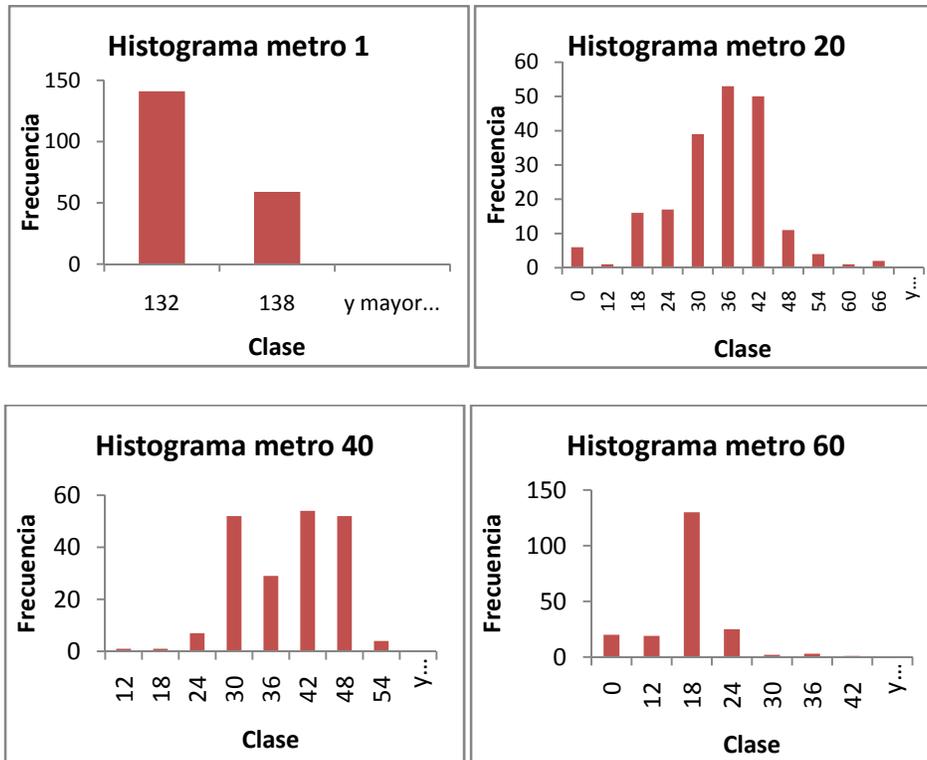


Figura 90. Histogramas Escenario 2.

En la figura 90 se observa que en cada distancia existe una medida que es la más repetida y por esto de cierta manera si se traza una línea imaginaria que una los valores máximos de cada barra se puede observar que esta línea se aproxima a una campana de Gauss.

En la figura 91 se aprecia que a medida que la distancia es mayor el valor de LQI disminuye, esto implica que la potencia recibida y la calidad del enlace disminuyen a medida que aumenta la distancia. En este escenario después de 55 metros el enlace tiene una baja calidad.

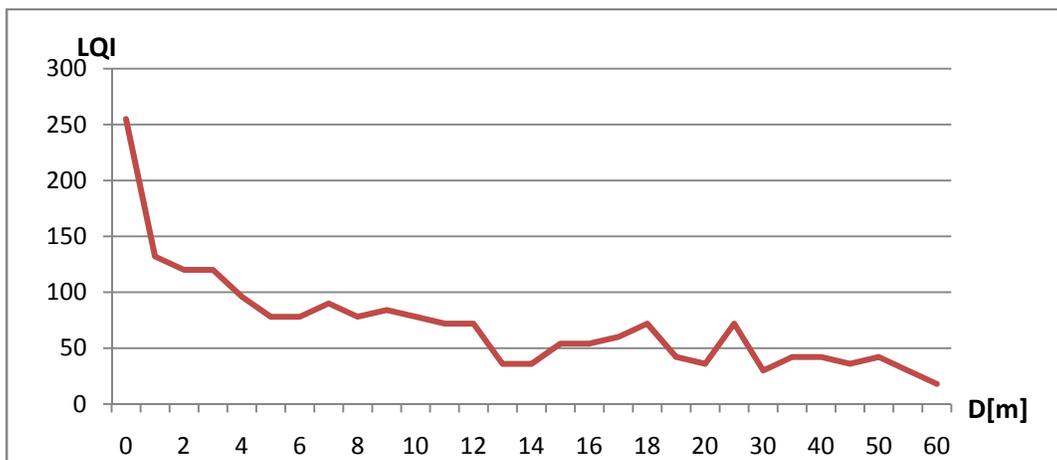


Figura 91. LQI vs. Distancia (D) para el Escenario 2 Sin Interferencia.

En la figura 92 se aprecia la gráfica de PER versus distancia realizada con base en la tabla 9. En esta gráfica se ve claramente que a medida que la distancia aumenta el porcentaje de pérdida de paquetes es mayor.

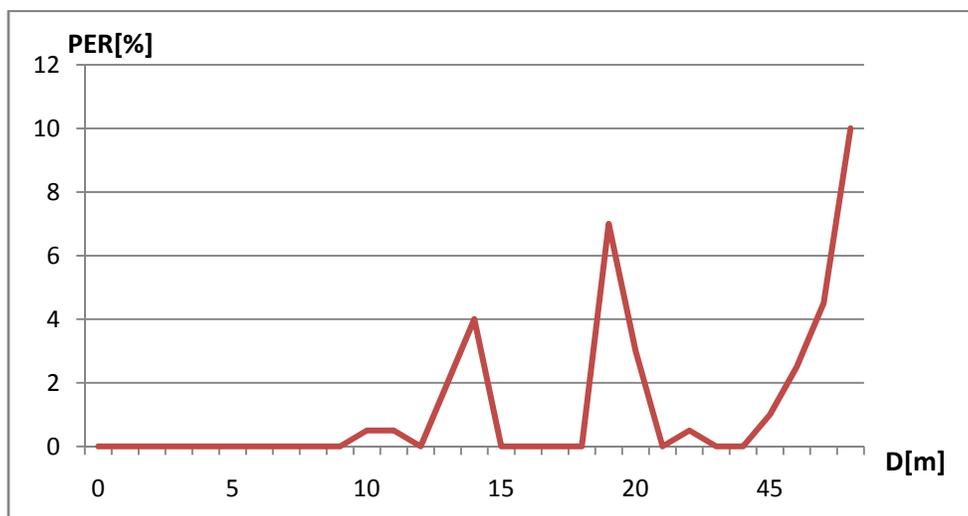


Figura 92. PER vs. Distancia (D) para el Escenario 2 Sin Interferencia.

La potencia recibida estimada según LQI obtenida anteriormente (ver Anexo A tabla 1) se utilizó en este escenario para realizar una gráfica de potencia recibida estimada contra distancia utilizando los valores de LQI de la tabla 9, el resultado se puede observar en la figura 93.

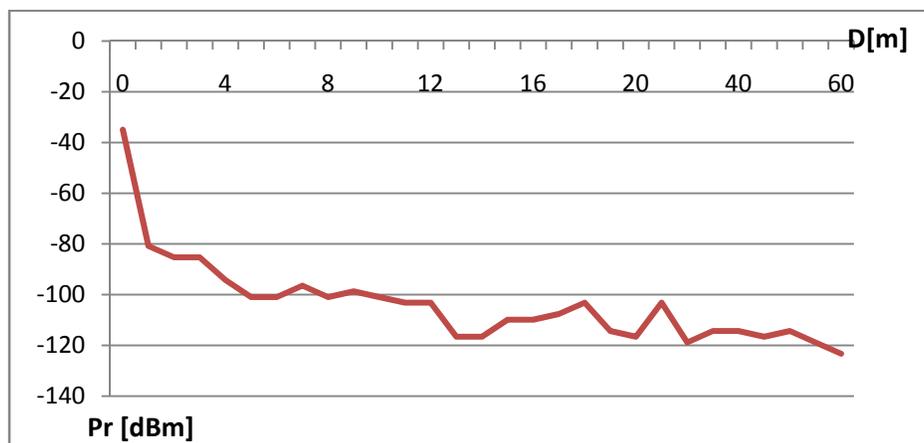


Figura 93. Potencia Recibida (Pr) Estimada vs. Distancia (D) para el Escenario 2 Sin Interferencia.

En la figura 94 se aprecia la gráfica de PER versus E_b/N_0 que se calculó con base en las ecuaciones 6 y 7. En esta figura se aprecia un comportamiento similar con la gráfica 87 ya que para valores bajos de E_b/N_0 las pérdidas de paquetes son bastante altas y para valores altos de E_b/N_0 las pérdidas tienden a cero. La tabla con los datos de E_b/N_0 para esta gráfica se encuentra en el Anexo A (tabla 2)

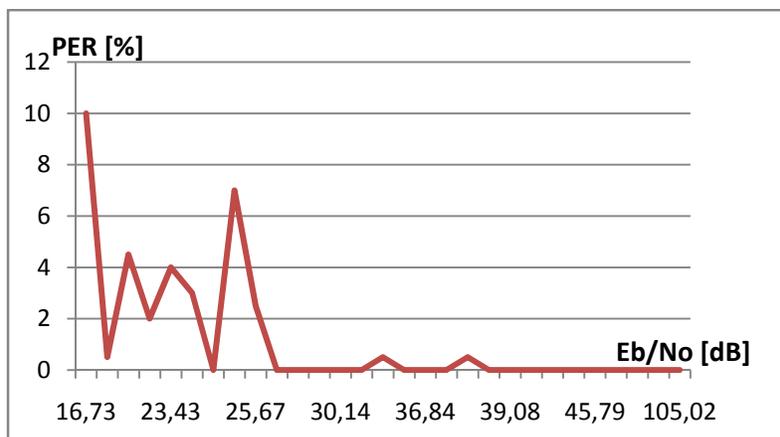


Figura 94. PER vs. E_b/N_0 Estimado para el Escenario 2 Sin Interferencia.

5.7.2 Con interferencia

Para esta prueba se configuró el AP en los canales 3, 4, 5 y 11 (tabla 6) y para cada uno de ellos se tomaron medidas a diferentes distancias. A continuación se muestran las tablas 10, 11 y 12 en donde se muestran los datos obtenidos en las pruebas, debido a que son una gran cantidad de resultados se ha decidido para un uso más práctico, manejar los valores que más veces se repiten de los datos obtenidos. En la tabla 10 se encuentra el valor LQI que más veces ocurre de los 200 paquetes enviados en cada distancia y en cada canal en que fue configurado el AP. En la tabla 11 muestra la cantidad de paquetes que se perdieron por completo en cada sitio de prueba. Finalmente la tabla 12 muestra el valor PER con más repeticiones de los 200 paquetes enviados en cada distancia y en cada canal

	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 11
LQI metro 0	255	255	255	255
LQI metro 1	0	0	78	132
LQI metro 5	0	0	108	96
LQI metro 10	0	0	0	96
LQI metro 15	0	0	0	66
LQI metro 20	0	0	0	78

Tabla 10. Resultados de LQI Escenario 2 Con Interferencia.

	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 11
Metro 0	56	19	0	0
Metro 1	80	50	8	0
Metro 5	200	200	20	0
Metro 10	200	200	73	0
Metro 15	200	200	200	0
Metro 20	200	200	200	0

Tabla 11. Resultados de los Paquetes Perdidos Escenario 2 Con Interferencia.

	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 11
PER metro 0 [%]	28	9,5	0	0
PER metro 1[%]	40	25	4	0
PER metro 5[%]	100	100	10	0
PER metro 10[%]	100	100	36,5	0
PER metro 15[%]	100	100	100	0
PER metro 20[%]	100	100	100	0

Tabla 12. Resultados de PER Escenario 2 Con Interferencia.

En la figura 95 se graficó el valor de LQI hasta una distancia de 20 metros para cada uno de los canales en que se configuró el AP. Se aprecia que para los canales 3 (2,422 GHz) y 4 (2,427 GHz) los valores de LQI son muy bajos ya que estos dos canales operan en frecuencias muy cercanas a la frecuencia del kit (2,425GHz). El valor de LQI para el canal 5 (2,432 GHz) presenta un buen comportamiento hasta aproximadamente 10m, luego el enlace presenta una calidad reducida. Pero para el canal 11 (2,462 GHz) el comportamiento del enlace siempre es bueno, esto debido a que el canal más lejano en que el AP fue configurado y es distante de la frecuencia de trabajo del dispositivo ZigBee, implicando en todas las distancias una mejor calidad de la señal .

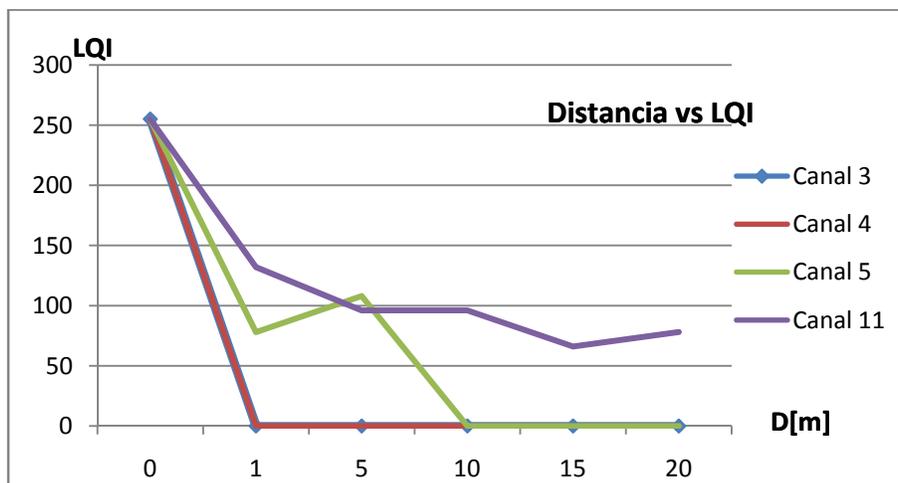


Figura 95. LQI vs. Distancia (D) para el Escenario 2 Con Interferencia.

En la figura 96 se aprecia la gráfica de PER contra distancia. Para los canales 3 y 4 se ve que hay un PER alto. En el canal 5 hay un PER muy alto a partir de 15 metros y se ve claramente que a medida que la distancia aumenta el porcentaje de las pérdidas de paquetes son mayores. Para el canal 11 el porcentaje PER es siempre de 0% ya que no hubo pérdidas de paquetes durante la transmisión, lo que confirma la conclusión anterior. Cuando la frecuencia interferente se encuentra más distante de la frecuencia de operación del dispositivo, a las distancias probadas no existen pérdidas de paquetes, lo que no sucede cuando la frecuencia interferente está muy cerca a la de operación del dispositivo ZigBee.

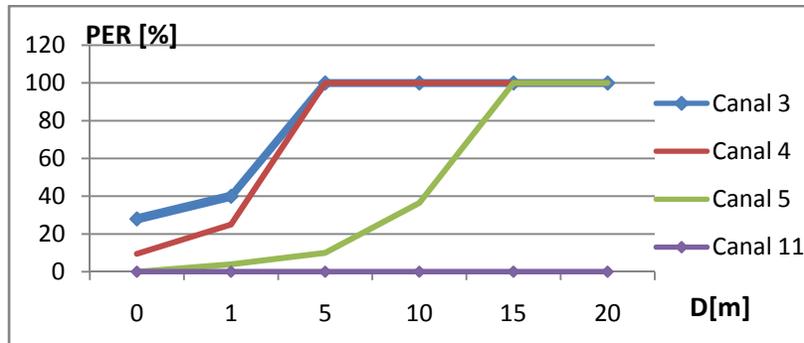


Figura 96. PER vs. Distancia (D) para el Escenario 2 Con Interferencia.

5.8 RESULTADOS ESCENARIO 3: PASILLO

5.8.1 Sin interferencia.

En la tabla 13 se encuentran los datos del escenario 3 sin interferencia.

Metros	LQI	Total Paquetes perdidos	PER
0	255	0	0
1	150	0	0
2	144	0	0
3	132	0	0
4	108	0	0
5	114	0	0
6	132	0	0
7	120	0	0
8	114	0	0
9	108	0	0
10	108	0	0
11	102	0	0
12	96	0	0
13	90	0	0
14	96	0	0
15	48	0	0
16	90	0	0
17	90	0	0
18	90	0	0
19	66	0	0
20	60	0	0
25	84	0	0
30	90	0	0
35	60	0	0
40	78	0	0
45	72	0	0
50	54	0	0
55	54	0	0

Tabla 13. Resultados Escenario 3 Sin Interferencia.

En la figura 97 se aprecia los histogramas del escenario 3, para el documento se escogieron 4 distancias para ser representadas por histogramas en este escenario.

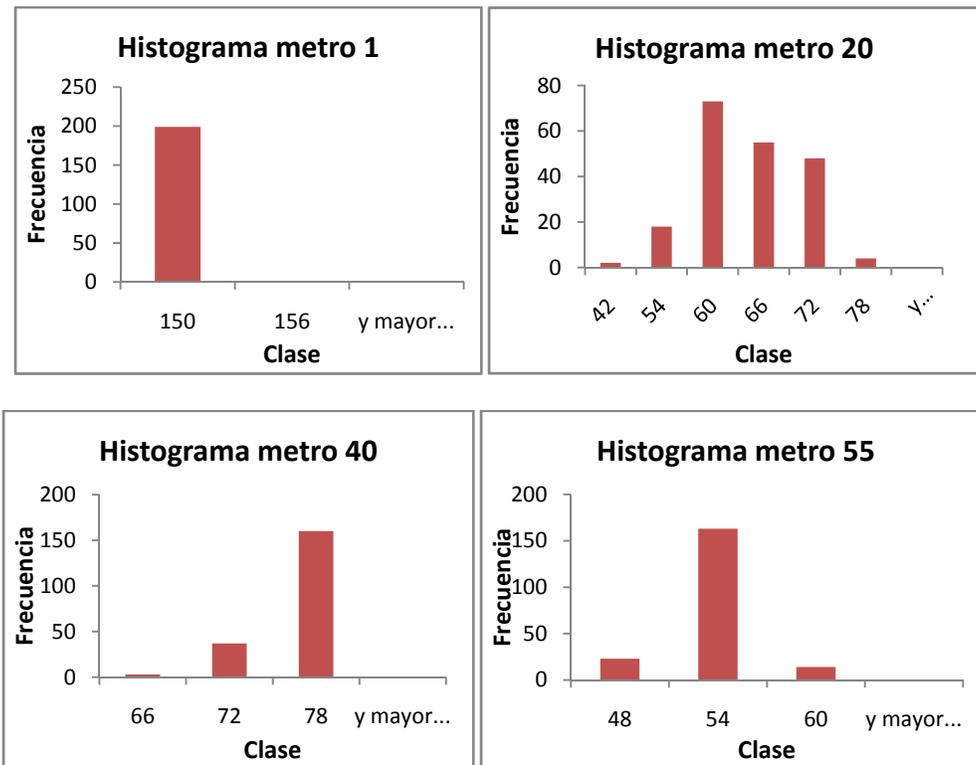


Figura 97. Histogramas Escenario 3.

En la figura 97 se observa que en cada distancia existe una medida que es la más repetida y por esto de cierta manera si se traza una línea imaginaria que una los valores máximos de cada barra se puede observar que esta línea se aproxima a una campana de Gauss.

En la figura 98 se aprecia que a medida que la distancia es mayor el valor de LQI se reduce por lo tanto la potencia disminuye también, esto implica que la calidad del enlace decrece a medida que aumenta la distancia. En este escenario el enlace se mantuvo siempre con un LQI mayor que 30 para los diferentes valores de observación, por lo tanto el enlace siempre tuvo una buena calidad.

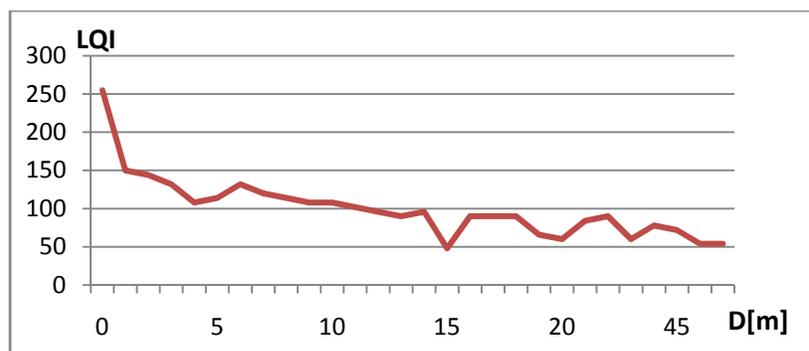


Figura 98. LQI vs. Distancia (D) para el Escenario 3.

En este escenario el enlace fue muy bueno pues no hubo pérdidas de paquetes, esto se ve gráficamente en la figura 99.

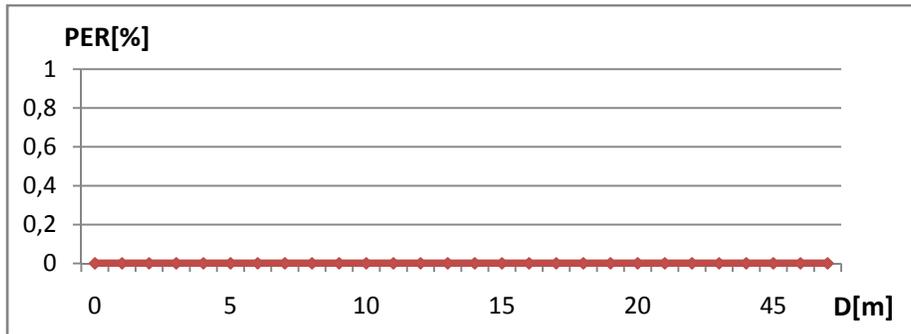


Figura 99. PER vs. Distancia (D) para el Escenario 3.

La potencia recibida estimada según LQI obtenida anteriormente (ver Anexo A tabla 1) se utilizó en este escenario para obtener una gráfica de potencia recibida estimada contra distancia utilizando los valores de LQI de la tabla 13, el resultado se observa en la figura 100.

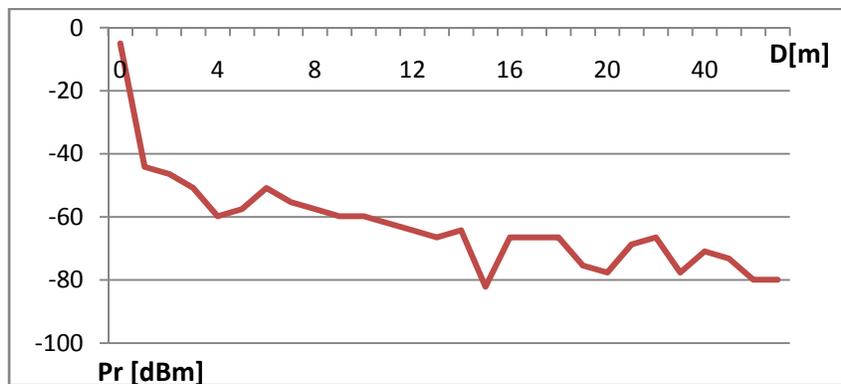


Figura 100. Pr estimada vs. Distancia (D) para el Escenario 3 Sin Interferencia.

En la figura 101 se aprecia la gráfica de PER contra E_b/N_0 que se calculó con base en las ecuaciones 6 y 7, debido a que no hubo pérdidas en este escenario en la figura no se presenta un comportamiento similar a las gráficas de PER versus E_b/N_0 de los anteriores escenarios. La tabla con los datos de E_b/N_0 para esta gráfica se encuentra en el Anexo A (tabla 3)

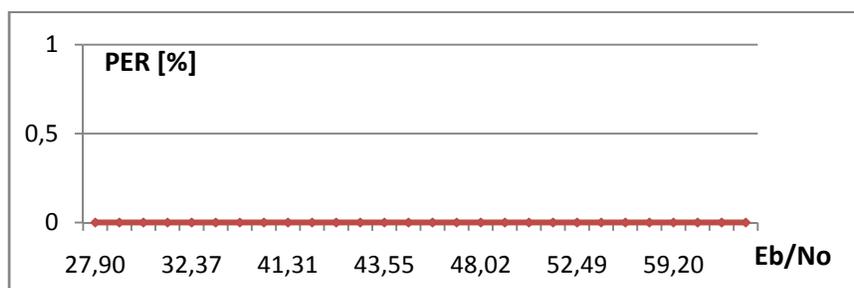


Figura 101. PER vs. E_b/N_0 Estimado para el Escenario 3 Sin Interferencia.

5.8.2 Con interferencia

Para esta prueba el AP se configuró en los canales 4, 5, 6 y 11 (tabla 6) y para cada uno de ellos se tomaron medidas a diferentes distancias. A continuación se muestran las tablas 14, 15 y 16 en donde se muestran los valores más repetidos de los datos obtenidos en las pruebas. En la tabla 14 se encuentra el valor que más se repite de LQI de los 200 paquetes enviados a cada distancia en cada canal en que fue configurado el AP. En la tabla 15 está consignada la cantidad de paquetes que se perdieron por completo en cada sitio de prueba. Finalmente la tabla 16 muestra el valor PER con más repeticiones de los 200 paquetes enviados a cada distancia y en cada canal configurado del AP

	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 11
LQI metro 0	255	252	255	255
LQI metro 1	150	156	150	156
LQI metro 5	0	0	132	102
LQI metro 10	0	0	126	108
LQI metro 15	0	0	114	72
LQI metro 20	0	0	72	84

Tabla 14. Resultados de LQI Escenario 3 Con Interferencia

	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 11
Metro 0	56	19	0	0
Metro 1	80	50	8	0
Metro 5	200	200	20	0
Metro 10	200	200	73	0
Metro 15	200	200	200	0
Metro 20	200	200	200	0

Tabla 15. Resultados de los Paquetes Perdidos Escenario 3 Con Interferencia

	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 11
PER metro 0 [%]	28	9,5	0	0
PER metro 1[%]	40	25	4	0
PER metro 5[%]	100	100	10	0
PER metro 10[%]	100	100	36,5	0
PER metro 15[%]	100	100	100	0
PER metro 20[%]	100	100	100	0

Tabla 16. Resultados de PER Escenario 3 Con Interferencia

En la figura 102 se graficó el valor de LQI a una distancia máxima de 20 metros para cada uno de los canales en los que se configuró el AP. Se puede apreciar que para el canal 4 (2,427 GHz) y para el canal 5 (2,432GHz) los valores de LQI son muy bajos ya que estos dos canales trabajan en frecuencias muy cercanas a la frecuencia del kit (2,425GHz). El valor de LQI para los canales 6 (2,437 GHz) y 11 (2,462 GHz) está siempre sobre 30 y el enlace siempre es bueno, ya que la frecuencia interferente se encuentra más distante de la frecuencia de operación del dispositivo ZigBee.

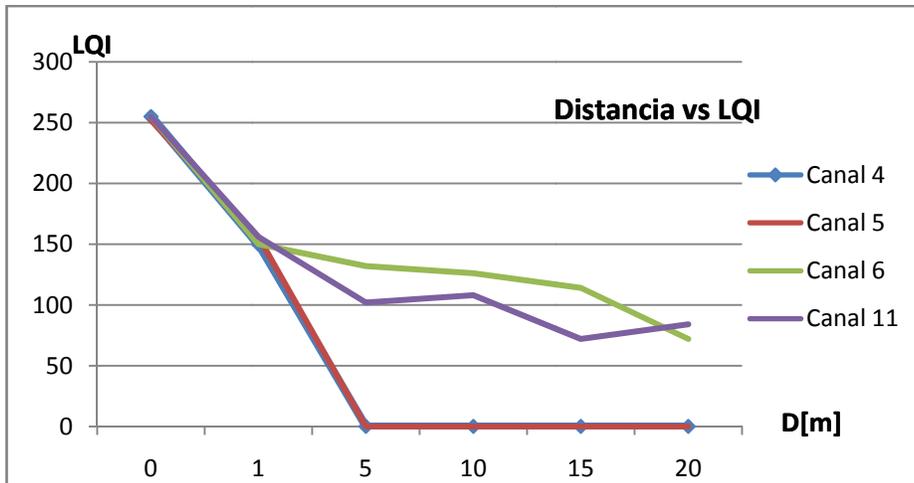


Figura 102. Distancia vs LQI para el Escenario 3 Con Interferencia.

En la figura 103 se observa la gráfica de PER contra distancia. Para los canales 3 y 4 se ve que hay un PER alto esto es debido a la cercanía de los canales del AP con el canal de trabajo del kit. En el canal 5 hay un PER muy alto a partir de 15 metros y se ve claramente que a medida que la distancia aumenta el porcentaje de las pérdidas de paquetes es mayor. Para el canal 11 el porcentaje PER es igual a 0% ya que no hubo pérdidas de paquetes durante la transmisión.

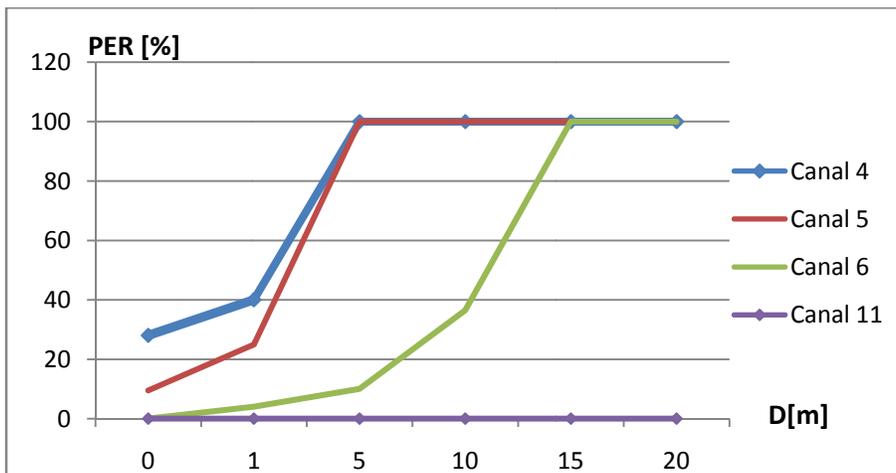


Figura 103. PER vs. Distancia (D) para el Escenario 3 Con Interferencia.

5.9 RESULTADOS ESCENARIO 4

5.9.1 Sin interferencia.

Las medidas realizadas en el escenario 4 sin interferencia se encuentran consignadas en la tabla 17.

Lugar	LQI	Total Paquetes perdidos	PER
1	102	0	0
2	84	0	0
3	120	0	0
4	90	0	0
5	90	0	0
6	72	0	0
7	72	0	0
8	48	0	0
9	54	0	0
10	42	3	1,5
11	42	8	4
12	36	0	0
13	72	0	0
14	72	0	0
15	90	0	0
16	90	5	2,5
17	24	0	0
18	48	0	0
19	48	0	0
20	42	0	0

Tabla 17. Resultados Escenario 4 Sin Interferencia.

En la figura 104 se aprecia los histogramas del escenario 4, para el documento se seleccionaron 4 lugares (tabla 15) para ser representadas por histogramas en este escenario.

En la figura 104 en el lugar 3 donde existe línea de vista y solo hay tres metros entre ellos se aprecia que el valor de LQI es alto. En el lugar 5 hay un obstáculo entre el coordinador y el enrutador (figura 66, capítulo 4) y tiene un LQI alto, esto se debe a que el obstáculo tiene solo un vidrio, una puerta de madera y una pequeña pared. En el lugar 9 se aprecia que el valor de LQI disminuye ya que hay un obstáculo de una pared entre el coordinador y el enrutador, pero se mantiene un enlace con un LQI mayor a 30 lo que significa que el enlace tiene una buena calidad. El lugar 12 tiene valores muy bajos de LQI y esto es debido a que hay dos obstáculos entre el coordinador y el enrutador, ver figura 66 en el capítulo 4.

En la figura 104 se observa que en cada distancia existe una medida que es la más repetida y por esto de cierta manera si se traza una línea imaginaria que una los valores máximos de cada barra se puede observar que esta línea se aproxima a una campana de Gauss.

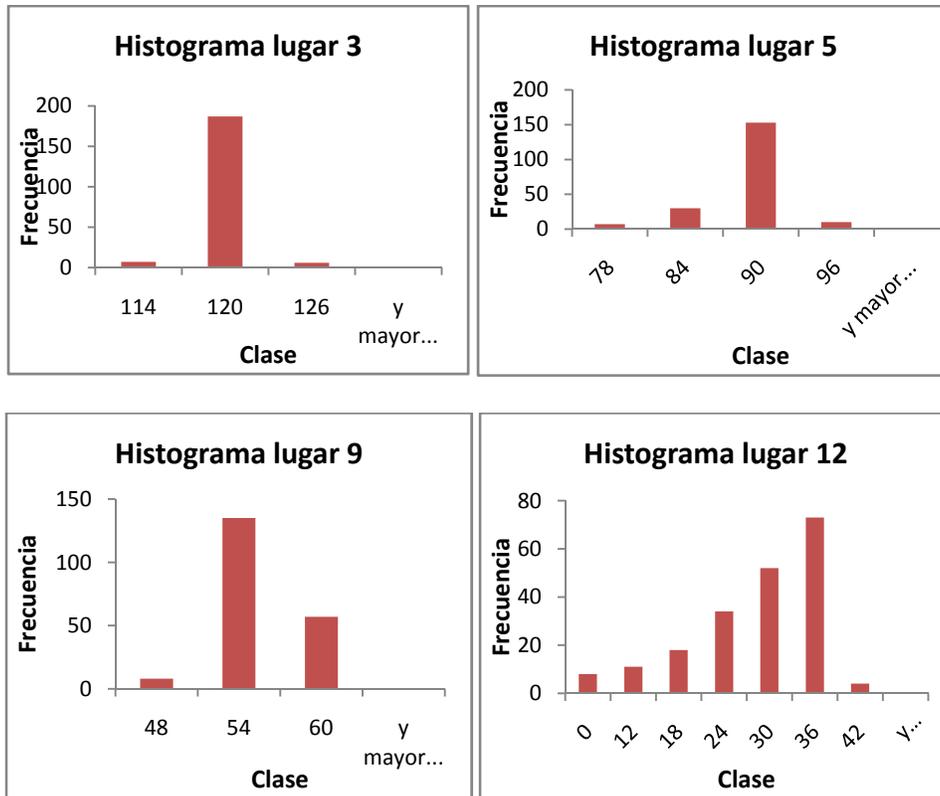


Figura 104. Histogramas Escenario 4.

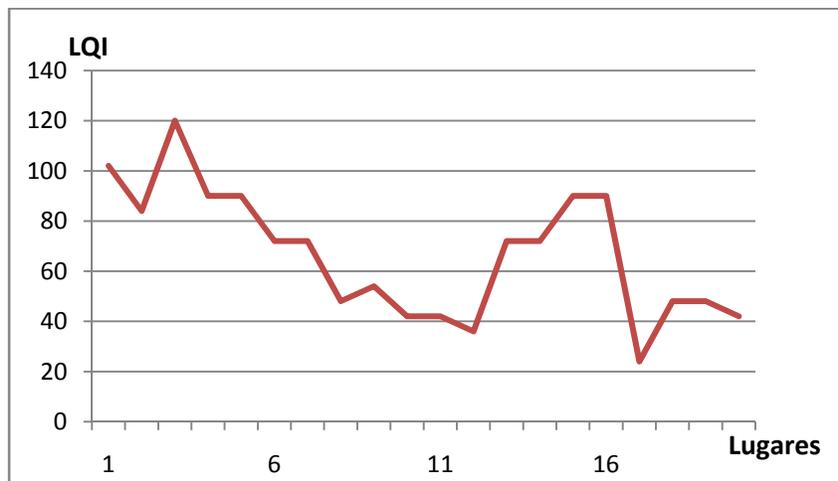


Figura 105. LQI vs Lugares para el Escenario 4.

La figura 105 es diferente a las gráficas de LQI de los otros escenarios ya que aquí no hay una secuencia de distancia, se hizo esta gráfica para visualizar el comportamiento diferente en cada uno de los lugares de este escenario.

5.9.2 Con interferencia

En las tablas 18, 19 y 20, se encuentran consignados los datos del escenario 4 con interferencia, donde el AP fue configurado para operar en los canales 3, 4, 5, 7 y 11.

En la prueba con interferencia, con los canales 3 y 4 hubo una total perdida de paquetes, es por eso que no se agregó en las tablas.

	Canal 5	Canal 7	Canal 11
LQI Lugar 1	78	108	84
LQI Lugar 3	138	102	108
LQI Lugar 4	0	96	84
LQI Lugar 8	0	0	42
LQI Lugar 10	0	54	48
LQI Lugar 12	0	66	60

Tabla 18. Resultados de LQI Escenario 4 Con Interferencia.

	Canal 5	Canal 7	Canal 11
Lugar 1	88	0	0
Lugar 3	64	0	0
Lugar 4	200	0	0
Lugar 8	200	190	23
Lugar 10	200	22	11
Lugar 12	200	0	14

Tabla 19. Resultados de los Paquetes Perdidos Escenario 4 Con Interferencia.

	Canal 5	Canal 7	Canal 11
PER Lugar 1 [%]	44	0	0
PER Lugar 3 [%]	32	0	0
PER Lugar 4 [%]	100	0	0
PER Lugar 8 [%]	100	95	11,5
PER Lugar 10 [%]	100	11	5,5
PER Lugar 12[%]	100	0	7

Tabla 20. Resultados de PER Escenario 4 Con Interferencia.

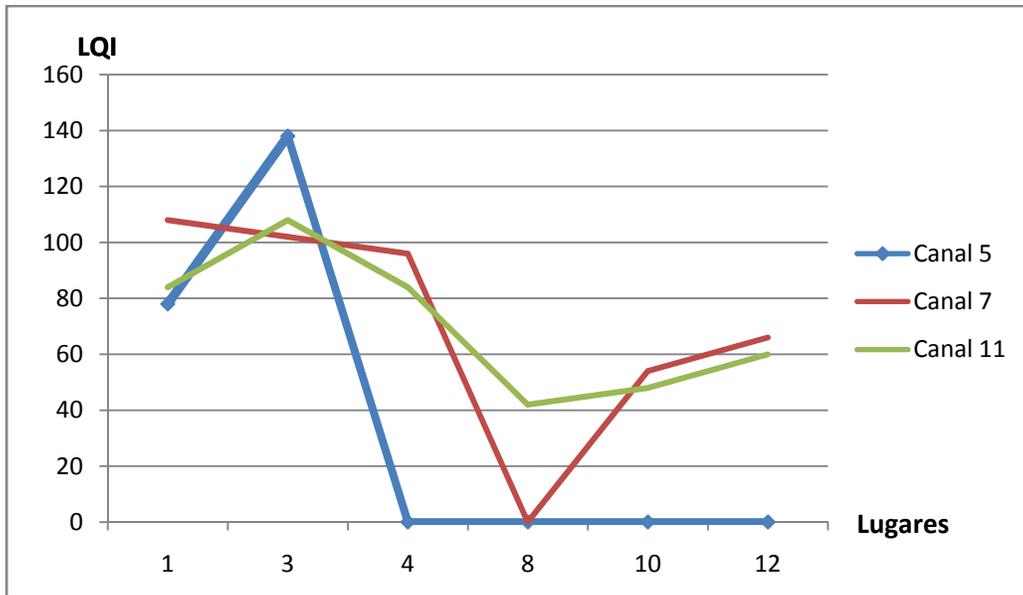


Figura 106. LQI vs Lugares para el Escenario 4 Con Interferencia.

En el escenario 4 se realizó una prueba adicional con la finalidad de observar los efectos de un horno microondas sobre la red ZigBee. La tarjeta enrutador se ubicó justo sobre el horno, y la tarjeta coordinador se situó a un metro. Esta prueba se dividió en dos, primero se realizaron medidas cuando el horno no operaba y luego se tomaron medidas cuando el horno se encontraba en funcionamiento. Para la primera prueba el valor LQI más repetido fue de 84 sin ninguna pérdida de paquetes y para la segunda prueba el LQI promedio fue de 66 sin ningún paquete perdido.

5.10 COMPARACION ENTRE ESCENARIOS

Se realizó una comparación gráfica entre los valores LQI y PER de los diferentes escenarios como se puede apreciar en las figuras 105 y 106. El escenario 4 no se tomó en cuenta ya que no hay secuencia en la distancia como en los otros tres escenarios.

Los valores LQI presentan un comportamiento similar en los tres escenarios, el valor de LQI disminuye a medida que la distancia aumenta y esto implica que según la distancia la potencia recibida también disminuye. En la figura 107 de distancia contra LQI se puede apreciar que en el escenario 3 (Pasillo) los valores de LQI son un poco más altos que en los otros dos escenarios, esto se ha atribuido a un efecto de guía de onda.

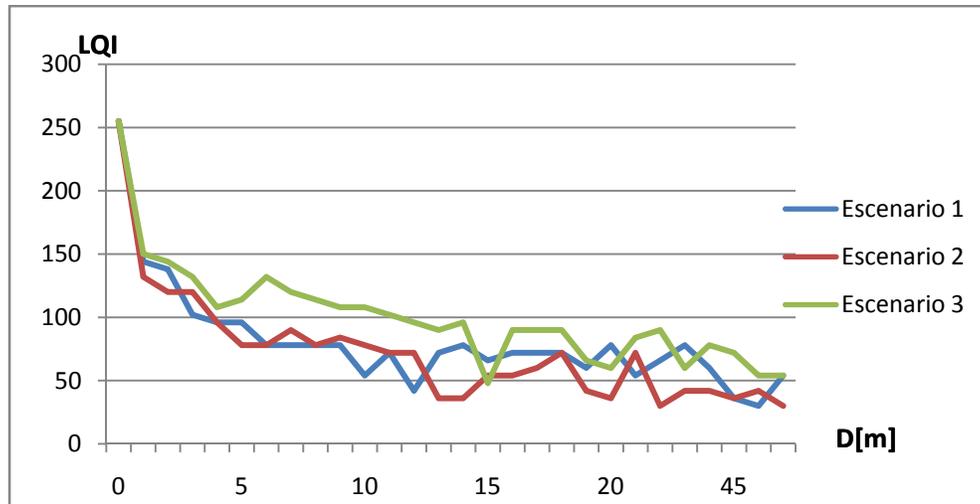


Figura 107. Comparación LQI de Tres Escenarios Sin Interferencia.

En la figura 108 se observa que el parámetro PER presenta un comportamiento similar en los dos primeros escenarios, para el tercer escenario el PER es siempre de cero, esto implica que no hubo pérdidas de paquetes.

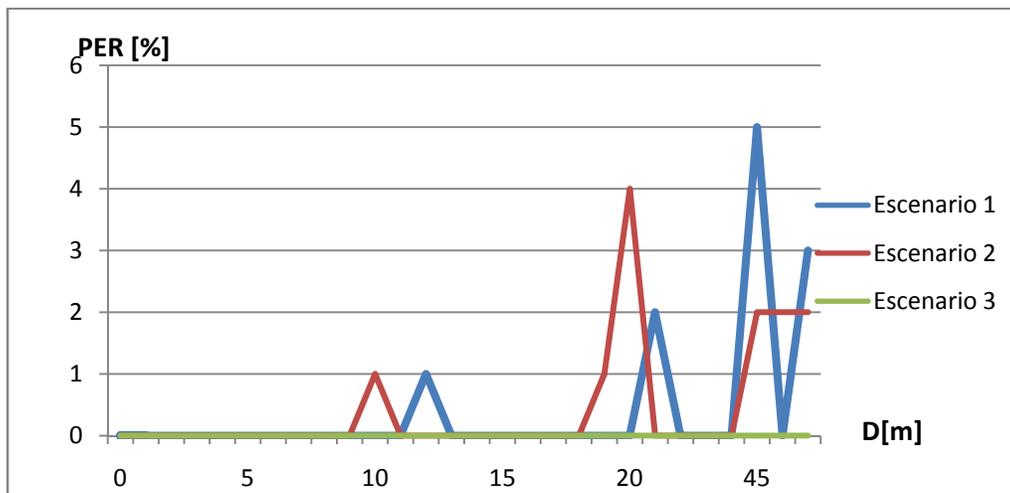


Figura 108. Comparación PER de Tres Escenarios Sin Interferencia.

5.11 COMPARACION DE RESULTADOS ENTRE EL MODELO DE SIMULACIÓN Y LAS PRUEBAS CON EL KIT.

Uno de los objetivos de este trabajo era realizar una comparación entre los resultados obtenidos en el modelo de simulación y los obtenidos en las pruebas realizadas con el kit, pero esto no fue posible debido a que los resultados entregados tanto por el simulador como por el kit no se podían relacionar de manera directa. Por ejemplo, el parámetro PER en el dispositivo entrega la relación del total de tramas pérdidas (tramas no identificadas o detectadas por el receptor) con respecto al total de tramas transmitidas sin importar si las tramas recibidas contenían errores,

mientras que el BLER, es una medida entregada por el simulador y es una relación entre el número de tramas con uno o más errores con respecto al total de tramas transmitidas, asegurando que todas las tramas transmitidas eran recibidas. En la simulación se obtuvo como resultado diferentes valores de BER acorde a las condiciones del canal (E_b/N_0), pero con el kit no fue posible obtener este dato. Existen relaciones entre BER y PER utilizando la fórmula descrita en la ecuación 8 [27], pero esta relación no era aplicable al kit, ya que la definición de PER en la que se basa la ecuación es muy diferente del concepto en que se basa la PER del kit.

$$PER = 1 - (1 - BER)^N \quad (8)$$

Donde N es la longitud en bytes del paquete (datos y encabezado) y el PER es la tasa de paquetes recibidos con algún error.

En la tabla 21 se puede observar una lista de los resultados obtenidos tanto en la simulación como en las pruebas realizadas con el kit.

PARÁMETROS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	PARÁMETROS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS CON EL KIT
BER	LQI
BLER	PER
E_b/N_0	E_b/N_0 estimado

Tabla 21. Parámetros de la Simulación y del Kit

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. La aplicación y adaptación de una metodología de simulación es importante porque permitió definir de forma clara los objetivos, las etapas y los alcances de la simulación, requisitos indispensables para el desarrollo de un modelo de simulación adecuado para su respectivo estudio y análisis de resultados.
2. La metodología de simulación de sistemas de telecomunicaciones adaptada y aplicada en este proyecto fue la adecuada ya que permitió reducir la complejidad del sistema a través de subsistemas y bloques funcionales que fácilmente se adaptan a entornos de simulación como Coware® SPD®.
3. Coware® SPD es una herramienta potente para el modelado, simulación y análisis de sistemas de telecomunicaciones, porque proporciona una gran variedad de librerías y bloques que permiten el desarrollo e implementación de simulaciones con requerimientos específicos como los sistemas de redes de sensores inalámbricos.
4. El modelo de simulación implementado permitió observar y analizar el procesamiento de una señal IEEE 802.15.4 a nivel banda base desde que es generada en el transmisor hasta que es recuperada y comparada en el receptor.
5. Se observó correctamente gracias a los diagramas de ojo, los diagramas de constelación y la curva de BER obtenidos en la simulación, que a medida que la relación E_b/N_0 aumenta, las condiciones del canal mejoran, la cantidad de bits erróneos obtenidos en el receptor disminuyen considerablemente lo que se traduce en una correcta recepción de los datos transmitidos.
6. Las gráficas de respuesta en frecuencia del sistema simulado permitieron analizar el efecto de la técnica de ensanchamiento utilizada y los anchos de banda tanto de la señal de información como de la señal después de la etapa de ensanchamiento, lo que confirmó que el ensanchamiento de la señal se realizó adecuadamente.
7. La simulación de sistemas de telecomunicaciones permiten manipular y predecir el comportamiento de redes y sistemas además de evaluar su desempeño para fines investigativos sin necesidad de implementarlos físicamente lo que implica una reducción de costos considerable.
8. El estándar IEEE 802.15.4 no establece relación entre el valor LQI y la potencia recibida.
9. Para los diferentes escenarios ya sea con interferencia o sin ella se observó que los valores del parámetro LQI disminuyen a medida que la distancia aumenta.
10. A medida que se realizaron las pruebas para cada uno de los escenarios se apreció que el valor del parámetro PER aumenta a medida que aumenta la distancia.
11. Se observó que un obstáculo como un muro disminuye considerablemente el valor LQI mientras que un obstáculo como una ventana de vidrio no afecta en gran medida el valor de LQI, de donde se deduce que el grosor de los obstáculos y el material son un factor que debe ser tenido en cuenta en el momento de implementar una red ZigBee sin línea de vista o cualquier red de tipo inalámbrica en interiores.

12. Las redes IEEE 802.15.4 son afectadas considerablemente por interferencia bajo la existencia de una red próxima de IEEE 802.11b configurada en un canal muy cercano al canal de operación de redes ZigBee. Característica de los sistemas basados en espectro ensanchado que son afectados considerablemente por interferencia banda ancha.
13. El valor de potencia recibida no pudo ser medida, por esto en el capítulo 5 se calculó por medio de la fórmula de espacio libre de Friss y también se hizo una estimación de potencia recibida a partir de los valores de LQI.
14. Los valores de E_b/N_0 calculados en el capítulo 5 a partir de la potencia recibida teórica para los escenarios 1, 2 y 3 fueron bastante altos, debido a que los cálculos se hicieron asumiendo condiciones ideales. Por otra parte los valores de E_b/N_0 calculados a partir de la potencia recibida estimada tienen valores mucho menores, aproximadamente 40 dB por debajo del E_b/N_0 teórico.
15. El Kit JN5139 EK020 de Jennic, no entrega medidas de BER, únicamente entrega valores de PER con los que no fue posible calcular el BER.
16. No fue posible realizar un análisis de interferencia con una red Bluetooth debido a que esta tecnología utiliza saltos de frecuencia que no permiten un estudio de interferencia basado en los canales como se hizo con IEEE 802.15.4.

RECOMENDACIONES

1. Es necesario e importante fomentar aun más el uso de metodologías y herramientas de simulación a lo largo de toda la carrera, ya que esto permite que un mayor número de estudiantes puedan analizar y estudiar más a fondo el comportamiento y funcionamiento de diferentes tecnologías a un bajo costo, y de esta manera mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje.
2. Trabajar con un kit de desarrollo que permita medir la potencia recibida y de esta manera obtener un valor de E_b/N_0 más acorde a la realidad.
3. Desarrollar a partir de esta simulación un sistema más complejo que incluya aspectos no tratados como la etapa de RF utilizando herramientas adecuadas para ello.

REFERENCIAS

- [1].Daintree Networks Inc, "Getting Started with ZigBee and IEEE 802.15.4", Febrero 2008. disponible en web: <http://www.daintree.net/resources/index.php>
- [2].Curso de ZigBee de Jennic "e-learning". Disponible en web: <http://www.jennic.com/elearning/zigbee/index.htm>
- [3].H. Labiod, H. Afifi, C. De Santis, Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee and WiMax, Springer, The Netherlands, 2007
- [4].J.-S. Lee. "Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 for Low-Rate Wireless Personal Area Networks", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol 52, No 3, Agosto 2006.
- [5].IEEE Std 802.15.4, "Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)". Septiembre 8, 2006.
- [6]. S. Farahani, "ZigBee Wireless Networks and Transceivers", Publicado por Elsevier, 2008
- [7]. Modulación en fase disponible en web: <http://www.answers.com/topic/phase-shift-keying>
- [8].Nikhil S. Bhatia. "A Physical Layer Implementation of Reconfigurable Radio". Tesis de la Universidad del estado de Virginia, Blacksburg, 2004.
- [9]. "Digital Communications-Lecture 4-QPSK and Offset QPSK (OQPSK)" Universidad de Queensland de tecnología, Septiembre 2008. Disponible en web: http://cmapspublic3.ihmc.us/rid=1224197201492_249384565_5980/L4.pdf
- [10]. A. Goldsmith, "Wireless Communications", Universidad de Stanford, Cambridge University Press, 2005
- [11]. M. Fitton, "Principle of Digital Modulation", Laboratorio de investigación en telecomunicaciones de Toshiba. Disponible en web: http://wireless.ictp.it/school_2001/lectures/fitton/digital_mod.pdf
- [12]. M. K. Simon, M.-S. Alouini, "Digital Communication Over Fading Channels", Segunda edición, Wiley-Interscience, 2005
- [13]. C. L. Muñoz R. "Metodología para la Simulación de Equipos de Telecomunicaciones". Tesis Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca. Popayán, 1995.
- [14]. J. M. Mera, M. David, "Simulación y análisis del nivel físico del estándar IEEE 802.11.b", 2007.
- [15]. S. Haykin, Communications Systems, Cuarta edición, Publicado por John Wiley & Sons, Inc. New York Estados Unidos 2001.

- [16].Glover, P. Grant, Digital Communications, Publicado por Prentice Hall, Edinburgh Gate; England, 200.
- [17].W. Tomasi, Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, cuarta edición, Publicado por Prentice Hall, Mexico , 2003.
- [18].H. Karl, A. Willig, Protocols and Architectures for Wireless Sensor Network, John Wiley & Sons, Inc, Alemania, 2005
- [19].Bruce Carlson, Paul B. Crilly, Janet C. Rutledge, “Communications Systems”, Publicado por McGraw-Hill, New York 2002.
- [20].M. Faúndez, “Sistemas de Comunicaciones”, Publicado por Marcombo, 2001.
- [21].Nikhil S. Bhatia. “A Physical Layer Implementation of Reconfigurable Radio”. Tesis de la Universidad del estado de Virginia, Blacksburg, 2004.
- [22].Coware Inc. “SPD User’s Guide”. SPD 2007.1. Octubre 2007.
- [23].M. Alnuaimi, K. Shuaib, I. Jawhar, “Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 Physical Layer Using MatLab/Simulink”, College of Information Technology, 2006-
- [24].NEC Electronics Corp. “Wireless Sensor Network Solution IEEE 802.15.4/ZigBee”, Disponible en web: http://www.larc.es.uece.br/~celestino/RSSF%20II/ZigBee_Solution_MAY07_Eng.pdf
- [25].S. Y. Shin, H. S. Parky, S. Choi, W. H. Kwon, “Packet Error Rate Analysis of IEEE 802.15.4 under IEEE 802.11b Interference” Universidad Nacional de Seoul, Korea
- [26].J. Zheng, M.J. Lee, “Will IEEE 802.15.4 make ubiquitous networking a reality: a discussion on a potential low power, low bit rate standard,” IEEE Communications Magazine, vol. 42, 2004.
- [27]. R. Khalili, K. Salamatian, “Evaluation of Packet Error Rate in Wireless Networks” Universidad Pierre et Marie Curie, Francia.
- [28]. L.W. Couch, II, “Complex Envelope Representations for Modulated Signals”. Mobile Communications Handbook. Publicado por Ed. Suthan S. Suthersan, Estados Unidos, 1999.