



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

" E SCIENTIA HOMINIS SALUS "

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento de la autora.

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**“Evaluación de la capa física del estándar IEEE 802.11p para
redes vehiculares en un canal AWGN”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

JÉSSICA LISBETH SIGÜENZA RAMOS

jessy_aruta@hotmail.com

DIRECTORA: Dra. MARTHA CECILIA PAREDES

cecilia.paredes@epn.edu.ec

CODIRECTOR: Ing. JORGE CARVAJAL

jorge.carvajal@epn.edu.ec

Quito, marzo 2017

DECLARACIÓN

Yo, Jéssica Lisbeth Sigüenza Ramos, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Jéssica Lisbeth Sigüenza Ramos

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Jéssica Lisbeth Sigüenza Ramos, bajo nuestra supervisión.

Dra. Martha Cecilia Paredes
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Jorge Carvajal
CODIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A Dios por bendecirme en cada paso que daba caminando hacia mis metas.

A mi familia por su apoyo incondicional, sus consejos y comprensión durante esta etapa de mi vida.

A mi madre por brindarme su sabiduría y fortaleza cuando mi corazón sentía que ya no podía continuar.

A mi padre por su apoyo durante esta etapa universitaria.

A mis hermanas Yadira y Annabel por esos momentos de alegría, que embriagaban mi alma y la llenaban de paz y felicidad.

A Carlos Toapanta por cada recomendación, sacrificio y paciencia brindado durante las etapas más difíciles de mi vida.

A mis amigos por su presencia diaria, sus consejos y el tiempo compartido.

A mi directora MARTHA CECILIA PAREDES y Co-director Jorge Carvajal por la comprensión y su apoyo para culminar este trabajo.

Estoy eternamente agradecida

DEDICATORIA

A mis padres, hermanas y a mis abuelitos Carlos Ramos y Eulalia Hernández que descansan en paz.

CONTENIDO

RESUMEN	x
PRESENTACIÓN	xii
1. CAPÍTULO 1: REDES VANETS.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.1.1 ENMIENDAS IEEE 802.11	2
1.2 REDES VANETS	8
1.3 ARQUITECTURA DE UNA VANET	9
1.4 ESTÁNDARES WAVE	11
1.4.1 MODO WAVE.....	12
1.4.2 APLICACIONES DEL ESTÁNDAR WAVE.....	13
1.4.3 ESTÁNDAR IEEE 1609 Y ESTÁNDAR IEEE 802.2.....	15
1.4.4 ESTÁNDAR IEEE 802.11p	16
1.4.4.1. Especificación de canales del estándar IEEE 802.11p	17
1.4.5 SUB-CAPA MAC DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11p	18
1.5 CAPA FÍSICA DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11p.....	21
1.5.1 PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN IEEE 802.11 IEEE 802.11p	21
1.5.1.1 Trama de Subcapa PLCP	22
1.5.2 PARÁMETROS DEPENDIENTES DE LA MODULACIÓN	27
1.5.3 TIEMPOS DE DURACIÓN DE LOS PARÁMETROS	28
1.5.4 ALEATORIZADOR Y DESALEATORIZADOR DEL DATO PLCP	28
1.5.5 CODIFICADOR Y DECODIFICADOR	29
1.5.6 ENTRELAZADO (INTERLEAVING).....	30
1.5.7 MAPEO DE MODULACIÓN DE SUB-PORTADORA.....	31
1.7 OFDM (<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>).....	34
1.7.1 ENSAMBLADO DE LA TRAMA.....	35
1.7.2 IFFT	37
1.7.3 PREFIJO CÍCLICO	38
1.7.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE OFDM.....	39
1.8 CANAL INALÁMBRICO.....	40
1.9 MEDICIÓN DEL RENDIMIENTO DE LA COMUNICACIÓN	42
2. CAPÍTULO 2: DISEÑO	45
2.1 Diseño de la pantalla de presentación	45

2.2	Diseño de pantalla de simulación.....	46
2.2.1.	TRANSMISOR.....	52
2.2.1.1.	FUENTE.....	52
	ALEATORIZADOR.....	55
2.2.1.2.	CODIFICADOR.....	57
2.2.1.3.	ENTRELAZADO.....	58
2.2.1.4.	MODULACIÓN.....	62
2.2.1.5.	CONSTRUCCIÓN DEL SÍMBOLO OFDM.....	65
2.2.1.6.	TRANSFORMADA INVERSA DE FOURIER.....	67
2.2.1.7.	AGREGACIÓN DEL PREFIJO CÍCLICO.....	67
2.2.1.8.	AGREGACIÓN DEL PREÁMBULO.....	68
2.2.2.	CANAL INALÁMBRICO.....	68
2.2.3.	RECEPTOR.....	69
2.2.3.1.	RETIRO DEL PREÁMBULO Y PREFIJO CÍCLICO.....	69
2.2.3.2.	TRANSFORMADA DE FOURIER.....	71
2.2.3.3.	DES-ENSAMBLADO.....	71
2.2.3.4.	DEMODULACIÓN.....	72
2.2.3.5.	DES-ENTRELAZADO.....	74
2.2.3.6.	DECODIFICACIÓN.....	76
2.2.3.7.	DES-ALEATORIZADOR.....	78
2.2.4.	CÁLCULO DE LA BER.....	79
2.2.4.	CÁLCULO DE PER.....	80
2.5	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	80
2.5.1	Datos transmitidos y recibidos.....	80
2.5.1	DIAGRAMA DE CONSTELACIÓN.....	80
2.5.2	RESULTADOS.....	85
3.	CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	87
3.1	VALIDACIÓN DE RESULTADOS.....	87
3.2	SIMULACIÓN DE LA CAPA FÍSICA DE IEEE 802.11p.....	89
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS		
	101	
4.1	CONCLUSIONES.....	101

4.2 RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
ANEXO A: PROGRAMACIÓN EN MATLAB	109
ANEXO B: SIMULACIONES	111

INDICE DE TABLAS

TABLA 1.1 RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE ALGUNAS ENMIENDAS DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11.....	5
TABLA 1.2 ANCHO DE BANDA DE CANALES CON SUS RESPECTIVAS VELOCIDADES ESTABLECIDAS EN LOS ESTÁNDARES IEEE 802.11 E IEEE 802.11P.	22
TABLA 1.3 BITS DEL CAMPO SIGNAL Y SU RESPECTIVA VELOCIDAD	25
TABLA 1.4 PARÁMETROS DEPENDIENDO DEL TIPO DE MODULACIÓN [3].....	27
TABLA 1.5 PARÁMETROS DEFINIDOS EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.11 [3].....	28
TABLA 1.6 FACTOR DE NORMALIZACIÓN PARA DEFINIDOS EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.11P [3].	31
TABLA 1.7 CODIFICACIÓN BPSK.....	32
TABLA 1.8 CODIFICACIÓN QPSK.	32
TABLA 1.9 CODIFICACIÓN 16-QAM [3].....	32
TABLA 1.10 CODIFICACIÓN 64-QAM [3].....	33
TABLA 1.11 PARÁMETROS DE OFDM [3]	37
TABLA 2.1 COMANDOS EMPLEADOS EN EL BOTÓN AXES.	46
TABLA 2.2 COMANDOS PARA GUARDAR LOS VALORES SELECCIONADOS POR EL USUARIO [44].	47
TABLA 2.3 COMANDO USADO PARA GENERAR UN MENSAJE DE AYUDA.....	47
TABLA 2.4 COMANDO USADO PARA BORRAR LA GRÁFICA.	48
TABLA 2.5 COMANDO UTILIZADO PARA CARGAR UNA VARIABLE GUARDADA.	53
TABLA 2.6 COMANDO UTILIZADO PARA GENERAR ACUERDOS CONDICIONALES.....	53
TABLA 2.7 COMANDOS EMPLEADOS EN MATLAB PARA GENERAR LA FUENTE.	55
TABLA 2.8 TABLA DE VERDAD DE XOR	56
TABLA 2.9 COMANDOS PARA ALEATORIZAR	56
TABLA 2.10 PERFORADO PARA LAS TASA DE TRANSMISIÓN DEFINIDOS EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.11P.....	57
TABLA 2.11 COMANDO UTILIZADO PARA GENERAR LA ESTRUCTURA DE TRELIS.	57
TABLA 2.12 COMANDO UTILIZADO PARA GENERAR LA CODIFICACIÓN.	58
TABLA 2.13 COMANDO MATLAB PARA PASAR DE SERIE A PARALELO.	62
TABLA 2.14 COMANDO MATLAB PARA CONVERTIR DE BINARIO A DECIMAL.	62
TABLA 2.15 COMANDOS MATLAB PARA CREAR UN MODEN PARA CADA TIPO DE MODULACIÓN.	63
TABLA 2.16 COMANDOS MATLAB USADOS PARA LA MODULACIÓN.	63
TABLA 2.17 COMANDO MATLAB PARA LA TRANSFORMADA INVERSA DE FOURIER.....	67
TABLA 2.18 COMANDO UTILIZADO PARA CREAR EL CANAL AWGN [44].....	69
TABLA 2.19 COMANDO UTILIZADO PARA EL REALIZAR EL PROCESO DE TRANSFORMADA DE FOURIER.	71
TABLA 2.20 COMANDOS UTILIZADOS PARA EL PROCESO DE DEMODULACIÓN.	73
TABLA 2.21 COMANDOS MATLAB PARA LA DECODIFICACIÓN.	76
TABLA 2.22 COMANDOS UTILIZADOS PARA CALCULAR LA BER.	80
TABLA 2.23 COMANDOS MATLAB PARA CALCULAR LA PER.....	80

TABLA 2.24 COMANDOS UTILIZADOS PARA GRAFICAR.	84
TABLA 2.25 COMANDOS UTILIZADOS PARA GRAFICAR LA BER REAL.....	86

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 ARQUITECTURA DE REFERENCIA PARA REDES VEHICULARES	11
FIGURA 1.2 COMUNICACIÓN MÓVIL VEHICULAR MULTI-SALTO	11
FIGURA 1.3 ESTÁNDARES WAVE	12
FIGURA 1.4 CANALES DE CONTROL Y SERVICIO PARA ESTADOS UNIDOS	17
FIGURA 1.5 CANALES DE CONTROL Y SERVICIO PARA EUROPA	17
FIGURA 1.6 CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS DE BACKOFF EN IEEE 802.11P	20
FIGURA 1.7 FORMATO DE LA TRAMA PPDU 802.11	22
FIGURA 1.8 ESTRUCTURA DEL PREÁMBULO PARA 10MHZ	23
FIGURA 1.9 BITS CORRESPONDIENTES AL CAMPO SIGNAL	24
FIGURA 1.10 ESTRUCTURA DEL SUB-CAMPO SERVICIO	26
FIGURA 1.11 CODIFICADOR CONVOLUCIONAL DEFINIDO EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.11P	29
FIGURA 1.12 DIAGRAMA DE CONSTELACIÓN PARA BPSK	32
FIGURA 1.13 DIAGRAMA DE CONSTELACIÓN QPSK	32
FIGURA 1.14 DIAGRAMA DE CONSTELACIÓN PARA 16QAM	32
FIGURA 1.15 DIAGRAMA DE CONSTELACIÓN 64-QAM	33
FIGURA 1.16 ESPECTRO DE UNA FDM Y OFDM	35
FIGURA 1.17 LOCALIZACIÓN DE LAS SUB-PORTADORAS	36
FIGURA 1.18 AGREGACIÓN DEL PREFIJO CÍCLICO AL SÍMBOLO OFDM	38
FIGURA 1.19 RECEPCIÓN DEL SÍMBOLO SIN PREFIJO CÍCLICO	39
FIGURA 1.20 RECEPCIÓN DEL SÍMBOLO CON PREFIJO CÍCLICO EN UN MULTI-TRAYECTO	39
FIGURA 1.21 PROPAGACIÓN MULTI-TRAYECTORIA	42
FIGURA 2.1 PANTALLA DE INICIO	45
FIGURA 2.2 PANTALLA DE SIMULACIÓN	46
FIGURA 2.3 MENSAJE DE AYUDA	47
FIGURA 2.4 MENSAJE DE ERROR CUANDO EL USUARIO NO SELECCIONÓ LOS DATOS	48
FIGURA 2.5 MENSAJE DE ERROR CUANDO EL USUARIO SELECCIONÓ LOS DATOS INCORRECTAMENTE	49
FIGURA 2.6 DIAGRAMA DE FLUJO PARA VALIDAR LOS DATOS SELECCIONADOS POR EL USUARIO	49
FIGURA 2.7 MENSAJE DE ERROR CUANDO NO SE SELECCIONA AMBOS DATOS	50
FIGURA 2.8 DIAGRAMA DE FLUJO PARA GRAFICAR LOS DATOS CON UN VALOR DE SNR SELECCIONADO	50
FIGURA 2.9 PROCESO DE COMUNICACIÓN IEEE 802.11P	50
FIGURA 2.10 DIAGRAMA DE FLUJO PARA REALIZAR LA COMUNICACIÓN HASTA SNR DE 40 DB	51
FIGURA 2.11 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL TRANSMISOR	52

FIGURA 2.12 PROCESO GENERAR FUENTE DEL BLOQUE DE TRANSMISIÓN.....	52
FIGURA 2.13 DIAGRAMA DE FLUJO PARA ALMACENAR EL VALOR DE M Y EL FACTOR DE NORMALIZACIÓN SEGÚN LA SELECCIÓN	54
FIGURA 2.14 DIAGRAMA DE FLUJO PARA GUARDAR EL VALOR DE LA TASA DE CODIFICACIÓN.	54
FIGURA 2.15 PROCESO PARA ALEATORIZAR DEL BLOQUE DE TRANSMISIÓN.....	55
FIGURA 2.16 PROCESO PARA ALEATORIZAR.	56
FIGURA 2.17 PROCESO PARA CODIFICAR DEL BLOQUE DE TRANSMISIÓN.....	57
FIGURA 2.18 DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA CODIFICACIÓN CON PERFORADO SEGÚN LA TASA DE CODIFICACIÓN.	58
FIGURA 2.19 PROCESO PARA ENTRELAZAR DEL BLOQUE DE TRANSMISIÓN.....	58
FIGURA 2.20 DIAGRAMA DE FLUJO PARA ASIGNAR EL VALOR DE N_{cbps} PARA EL ENTRELAZADO.	59
FIGURA 2.21 PROCESO DE ENTRELAZADO.....	60
FIGURA 2.22 DIAGRAMA DE FLUJO PARA ENTRELAZAR TODOS LOS BITS RECIBIDOS.....	61
FIGURA 2.23 DIAGRAMA DE FLUJO PARA REALIZAR EL RELLENO ANTES DEL ENTRELAZADO. .	61
FIGURA 2.24 PROCESO PARA MODULAR DEL BLOQUE DE TRANSMISIÓN.	62
FIGURA 2.25 DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA MODULACIÓN.	64
FIGURA 2.26 PROCESO PARA ENSAMBLAR DEL BLOQUE DE TRANSMISIÓN.....	65
FIGURA 2.27 UBICACIÓN DE LOS DATOS EN SUB-PORTADORAS.....	66
FIGURA 2.28 UBICACIÓN DE LOS DATOS EN SUB-PORTADORAS.....	66
FIGURA 2.29 PROCESO PARA REALIZAR LA IFFT DEL BLOQUE DE TRANSMISIÓN.	67
FIGURA 2.30 PROCESO PARA AGREGAR EL PREFIJO CÍCLICO.....	67
FIGURA 2.31 UBICACIÓN DE LOS PREÁMBULOS, PREFIJO CÍCLICO Y DATOS.	68
FIGURA 2.32 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL RECEPTOR.	69
FIGURA 2.33 PROCESO PARA RETIRAR EL PREÁMBULO DEL BLOQUE DE RECEPCIÓN.....	69
FIGURA 2.34 RETIRO DEL PREÁMBULO.....	70
FIGURA 2.35 RETIRAR EL PREFIJO CÍCLICO.	70
FIGURA 2.36 PROCESO PARA REALIZAR EL PROCESO DE FFT DEL BLOQUE DE RECEPCIÓN. .	71
FIGURA 2.37 PROCESO PARA DES-ENSAMBLAR DEL BLOQUE DE RECEPCIÓN.....	71
FIGURA 2.38 PROCESO PARA DEMODULAR DEL BLOQUE DE RECEPCIÓN.	72
FIGURA 2.39 DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA DEMODULACIÓN.	73
FIGURA 2.40 PROCESO PARA DES-ENTRELAZAR DEL BLOQUE DE RECEPCIÓN.....	74
FIGURA 2.41 DIAGRAMA DE FLUJO PARA ASIGNAR EL VALOR A N_{cbpsRx} PARA EL DES-ENTRELAZADO.....	74
FIGURA 2.42 DIAGRAMA DE FLUJO PARA REALIZAR EL PROCESO DE DES-ENTRELAZADO.....	75
FIGURA 2.43 DIAGRAMA DE FLUJO PARA RETIRAR EL RELLENO PARA EL DES-ENTRELAZADO.	75
FIGURA 2.44 DECODIFICAR EN LA RECEPCIÓN.	76
FIGURA 2.45 DIAGRAMA DE FLUJO PARA ASIGNAR EL VALOR A LA VARIABLE t_{blenRx} PARA LA DECODIFICACIÓN.	77
FIGURA 2.46 DES-ALEATORIZAR EN LA RECEPCIÓN.	78

FIGURA 2.47 DES-ALEATORIZACIÓN PARA 5 BITS.	79
FIGURA 2.48 DIAGRAMA DE FLUJO PARA GUARDAR LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN CADA PROCESO.....	81
FIGURA 2.49 DIAGRAMA DE FLUJO PARA GUARDAR EL VALOR DE SNR QUE EL USUARIO SELECCIONÓ.	82
FIGURA 2.50 DIAGRAMA DE FLUJO PARA GRAFICAR LOS DATOS QUE EL USUARIO SELECCIONA.	83
<i>FIGURA 2.51 MENSAJE DE ERROR SI EL USUARIO NO HA SELECCIONADO SNR Y DATOS.</i>	<i>84</i>
FIGURA 2.52 SECUENCIA DE BITS TRANSMITIDOS Y RECIBIDOS.	84
FIGURA 3.1 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA UNA COMUNICACIÓN CON MODULACIÓN Y ENSAMBLADO.	88
FIGURA 3.2 BER VS SNR TEÓRICO PARA TODAS LAS MODULACIONES DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11P.....	88
FIGURA 3.3 DIAGRAMA DE CONSTELACIÓN	89
FIGURA 3.4 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA UNA COMUNICACIÓN CON MODULACIÓN Y AGREGACIÓN DEL PREFIJO.....	90
FIGURA 3.5 BER VS SNR PARA TODAS LAS VELOCIDADES DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11P CON LOS PROCESO DE MODULACIÓN, ENSAMBLADO, IFFT, PREFIJO CÍCLICO.	90
FIGURA 3.6 PER VS SNR PARA TODAS LAS VELOCIDADES DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11P CON LOS PROCESO DE MODULACIÓN, ENSAMBLADO, IFFT, PREFIJO CÍCLICO.	91
FIGURA 3.7 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA UNA COMUNICACIÓN CON ALEATORIZACIÓN, MODULACIÓN Y AGREGACIÓN DEL PREFIJO CÍCLICO.	92
FIGURA 3.8 BER VS SNR PARA TODAS LAS VELOCIDADES DEL IEEE 802.11P CON LOS PROCESO DE ALEATORIZACIÓN, MODULACIÓN, ENSAMBLADO, IFFT Y PREFIJO.	93
FIGURA 3.9 GRÁFICA DEL PER VS SNR PARA TODAS LAS VELOCIDADES DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11P CON LOS PROCESO DE ALEATORIZACIÓN, MODULACIÓN, ENSAMBLADO, IFFT Y PREFIJO.....	93
FIGURA 3.10 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA UNA COMUNICACIÓN CON ALEATORIZACIÓN, CODIFICACIÓN, MODULACIÓN, Y AGREGACIÓN DEL PREFIJO.	94
FIGURA 3.11 BER VS SNR TODAS LAS VELOCIDADES PERMITIDAS EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.11P CON LOS PROCESO DE ALEATORIZACIÓN, CODIFICACIÓN, MODULACIÓN, ENSAMBLADO, IFFT, PREFIJO CÍCLICO.	95
FIGURA 3.12 PER VS SNR TODAS LAS VELOCIDADES PERMITIDAS EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.11P CON LOS PROCESO DE ALEATORIZACIÓN, CODIFICACIÓN, MODULACIÓN, ENSAMBLADO, IFFT, PREFIJO CÍCLICO.	95
FIGURA 3.13 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA UNA COMUNICACIÓN CON ALEATORIZACIÓN, CODIFICACIÓN, ENTRELAZADO, MODULACIÓN Y AGREGACIÓN DEL PREFIJO.....	96
FIGURA 3.14 BER VS SNR TODAS LAS VELOCIDADES PERMITIDAS EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.11P CON LOS PROCESO DE ALEATORIZACIÓN, ENTRELAZADO, CODIFICACIÓN, MODULACIÓN, ENSAMBLADO, IFFT, AGREGACIÓN DEL PREFIJO.....	97

FIGURA 3.15 PER vs SNR PARA TODAS LAS VELOCIDADES DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11P CON LOS PROCESO DE ENTRELAZADO, CODIFICACIÓN, MODULACIÓN, ENSAMBLADO, IFFT, AGREGACIÓN DEL PREFIJO.....	97
FIGURA 3.16 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA UNA COMUNICACIÓN CON LA CAPA FÍSICA DEFINIDA EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.11P.	98
FIGURA 3.17 BER vs SNR PARA TODAS LAS VELOCIDADES DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11P CON LOS PROCESO DE ENTRELAZADO, MODULACIÓN, ENSAMBLADO, IFFT, PREFIJO Y PREÁMBULO.	99
<i>FIGURA 3.18 GRÁFICAS DE BER vs SNR EMPLEANDO TODO EL PROCESO DEFINIDO EN EL ESTÁNDAR IEEE 80211P.</i>	<i>99</i>

RESUMEN

Una red VANET es una tecnología inalámbrica desarrollada para el control y mejoramiento del tráfico en las carreteras, permite la comunicación entre vehículos y entre el vehículo y la infraestructura colocada a lo largo de las carreteras. Para posibilitar esta comunicación se ha desarrollado el estándar IEEE 802.11p basado en el IEEE 802.11.

El presente trabajo tiene como objetivo medir el rendimiento de la capa física del estándar IEEE 802.11p mediante simulaciones en la GUI (*Graphical User Interface*) de MATLAB. Además, para visualización de los datos, el usuario puede graficar los resultados de algunas etapas de la comunicación con diferentes valores de SNR (*Signal to Noise Ratio*) y diferentes tipos de modulación.

Se analiza cada etapa de la capa física tanto para transmisión como recepción. La conexión entre ellos se realiza a través de un canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*). Así, en el transmisor se tienen las etapas: aleatorización, codificación, entrelazado, modulación, construcción del símbolo OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), agregación del prefijo cíclico y agregación del preámbulo en el transmisor. En el canal se añade ruido AWGN a los datos. En la recepción se realiza el proceso de retiro del preámbulo, retiro del prefijo cíclico, des-entramado, demodulación, des-entrelazado, decodificación y des-aleatorización.

En este proyecto de titulación se explica cómo se realiza cada uno de los procesos mencionados, la programación empleada en la simulación de los mismos, la simulación y análisis de resultados. Además, de los conocimientos teóricos básicos para la comprensión de las redes Vehiculares Ad-Hoc (VANETs, *Vehicular Ad-Hoc Network*).

A fin de medir dicho rendimiento, tanto en la transmisión como en la recepción se varían los parámetros según el estándar; los resultados se presentan en términos de BER (*Bit Error Rate*) vs SNR y PER (*Packet Error Rate*) vs SNR; además, se varían ciertos parámetros como: tipo de modulación, tasas de codificación y los valores de

SNR. Por lo que este proyecto se ha dividido en cuatro capítulos, como se detalla a continuación.

CAPÍTULO 1: en este capítulo se describen las características de las redes inalámbricas, las enmiendas establecidas a partir del estándar IEEE 802.11, las características, elementos y arquitectura de las redes VANETs, además, se estudia los estándares WAVE (*Wireless Access Vehicular Environments*), y se realiza un estudio más detallado de la capa física del estándar IEEE 802.11p.

Además, una breve descripción de la capa MAC. Finalmente, se analiza las características, ventajas, desventajas, y aplicaciones de OFDM.

CAPÍTULO 2: en este capítulo se describe el diseño del transmisor y receptor a través de la simulación realizada en la GUI de MATLAB, de cada uno de los procesos utilizados para la comunicación a través del canal inalámbrico AWGN. Además, se muestra la programación para la obtención de los resultados.

CAPÍTULO 3: en este capítulo se muestran los resultados obtenidos con cada opción de transmisión, variando los parámetros definidos en el estándar IEEE 802.11p. También, se muestran los valores de BER vs SNR y PER vs SNR que se obtienen con estas transmisiones. Finalmente, se presentan resultados que permitan comparar curvas de BER vs SNR y PER vs SNR de todas las opciones de transmisión que permite la simulación.

CAPÍTULO 4: en el último capítulo se puede observar las conclusiones, recomendaciones y propuestas de trabajos futuros con base en los resultados y análisis del presente proyecto de titulación.

PRESENTACIÓN

La historia de la humanidad ha enseñado las grandes necesidades de desarrollar nuevas tecnologías, cada vez con mejores características, mayor número de aplicaciones, que solventen los requisitos de los usuarios que cada día son más exigentes. Ante éstas demandas, los científicos e investigadores han dedicado su vida para satisfacer los requerimientos y exigencias de la sociedad. Siendo así, las tecnologías inalámbricas una de las tecnologías con mayor demanda y aplicaciones requeridas.

Es por ello que entre los tantos estándares existentes, se ha visto la necesidad de desarrollar un estándar enfocado en redes vehiculares Ad-Hoc (VANETs), con el fin de proporcionar seguridad, optimizar el tráfico vehicular y brindar confort a los viajeros, haciendo el viaje por carretera más ameno y seguro.

El estándar IEEE 802.11p es una enmienda del IEEE 802.11 que define la capa física (PHY) y la subcapa MAC para redes VANETs.

La implementación de los servicios mencionados en ambiente vehiculares requiere que el desempeño de la capa física (PHY) del estándar sea satisfactorio para garantizar comunicaciones confiables. Razón por la cual es importante evaluar el rendimiento de dicha capa física, ya que juega un papel importante en el proceso de comunicación de mensajes entre vehículos.

Es importante destacar que el presente trabajo de titulación es un estudio técnico que forma parte del Proyecto de Investigación Interno PII-DETRI-001-2016 “Evaluación de la técnica OPS-SAP para la reducción de la PAPR en escenarios VANETs”.

CAPÍTULO 1: REDES VANETs

1.1 INTRODUCCIÓN

Las redes inalámbricas han cambiado la manera de realizar las actividades diarias en la sociedad, la forma en que nos comunicamos, ofreciendo mayor confort, conectividad rápida y en cualquier lugar. Además, proporcionan gran cantidad de ventajas y beneficios para los usuarios tales como movilidad, flexibilidad, bajos costos, escalabilidad [1]. A continuación se revisa estos conceptos:

- **Movilidad:** los usuarios pueden transportarse mientras están comunicándose sin perder conectividad; y pueden acceder a los servicios de la red en cualquier momento y de forma rápida [1].
- **Flexibilidad:** es posible llegar a lugares inaccesibles físicamente o económicamente si los costes de cableado son elevados [1].
- **Escalabilidad:** se puede ampliar la red con mucha facilidad o realizar cambios de topología en la red [1].
- **Bajos costos:** es posible llegar a lugares inaccesibles con una instalación de red inalámbrica más barata que una estructura cableada [1].

Sin embargo, existen desventajas que con el desarrollo de la tecnología se han tratado de disminuir, entre las desventajas se encuentran: la baja velocidad de transmisión y la seguridad (cabe mencionar que con el paso de los años se tienen nuevos protocolos y métodos para mejorar la seguridad en las comunicaciones inalámbricas).

Existen dos modos de funcionamiento para las redes inalámbricas: el modo infraestructura y el modo Ad-Hoc.

- **Modo infraestructura:** se requiere un punto de acceso o infraestructura para que las estaciones sean capaces de comunicarse entre sí [1].
- **Modo Ad-Hoc:** se caracteriza porque todas las estaciones son capaces de comunicarse entre sí, sin la necesidad de un punto de acceso, los nodos pueden funcionar como clientes o como puntos de acceso para la comunicación con otros nodos [1].

1.1.1 ENMIENDAS IEEE 802.11

Una WLAN (*Wireless Local Area Network*) es una red de cobertura local con un alcance aproximado de 100 m, cuyas características de cobertura son iguales a la de una red LAN (*Local Area Network*), la diferencia se encuentra en la conexión entre los terminales que pertenecen a estas redes, la primera utiliza conexión inalámbrica entre terminales, mientras que la segunda usa el cable.

Para el buen funcionamiento de las redes, se definen reglas y requerimientos para el proceso de comunicación, a este conjunto de reglas y requerimientos se lo conoce con el nombre de estándar.

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) es una organización internacional sin fines de lucro, líder en el campo de la promoción de estándares internacionales, particularmente en el campo de las telecomunicaciones y la tecnología de la información, ha desarrollado estándares para redes: PAN (*Personal Area Network*), LAN, MAN (*Metropolitan Area Network*) tanto cableadas como inalámbricas. Como es objeto de este proyecto el estudio de una red inalámbrica, a continuación se detalla el estándar IEEE 802.11 y sus enmiendas.

Para las comunicaciones WLAN, la IEEE crea un grupo de estándares que se le conoce como IEEE 802.11 [2], posteriormente se desarrollaron nuevas enmiendas

(corresponden a mejoras o cambios del estándar original) para redes inalámbricas con diferentes especificaciones, características, y aplicaciones que tienen como base al estándar IEEE 802.11. A continuación se explican brevemente cada una de estas enmiendas:

- **IEEE 802.11** [2]: este estándar fue publicado en 1997 y es el primer estándar definido por la IEEE y diseñado para redes inalámbricas de área local, se lo conoce como IEEE 802.11 *legacy*. Permite velocidades de 1 a 2 Mbps, posteriormente al estándar se realizó modificaciones llamadas enmiendas con el propósito de mejorar las características técnicas y de seguridad.

Actualmente, el estándar IEEE 802.11-2012 está vigente, en él se recogen las enmiendas 802.11 a/b/g/n [2].

- **IEEE 802.11a** [3]: esta enmienda fue modificada del original en 1999, la diferencia principal con el estándar IEEE 802.11 *legacy* es la frecuencia de 5 GHz a la que trabaja, una ventaja que se deriva de esto es que alcanza mayores velocidades; sin embargo, no es compatible con tecnologías que trabajan a 2.4 GHz y alcanza menor distancia que el estándar original. Se utiliza para aplicaciones de video, voz e imágenes grandes.
- **IEEE 802.11b** [4]: fue ratificada en 1999, siendo una extensión directa del estándar original ya que utiliza la misma técnica de modulación y los productos se actualizaron rápidamente. Además, es compatible con tecnologías desarrolladas en base al estándar IEEE 802.11 *legacy* y soporta mayor velocidad. Se utiliza principalmente en configuraciones punto multi-punto y punto a punto para conectar dos LANs. También, soporta tres canales para la transmisión de datos.

- **IEEE 802.11g** [5]: trabaja a las mismas velocidades que IEEE 802.11a, mantiene la banda 2.4 GHz, es compatible con IEEE 802.11b.
- **IEEE 802.11n** [6]: permite mayor alcance y velocidades que las tecnologías IEEE 802.11a, IEEE 802.11b e IEEE 802.11g, para ello utiliza varias antenas para la transmisión y recepción (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*; esta técnica utiliza los recursos de antena para transmitir múltiples tramas para diferentes usuarios); además, es compatible con versiones anteriores como IEEE 802.11a (puede trabajar a 5 GHz) e IEEE 802.11b (24GHz). Entre las aplicaciones más relevantes para este estándar se encuentran: transmisión de video e imágenes con mayor ancho de banda y aplicaciones multimedia.
- **IEEE 802.11ac** [7]: es una mejora al estándar IEEE 802.11n, teóricamente alcanza velocidades de 1.3 Gbps, utiliza hasta 8 flujos MIMO. Es la quinta generación de Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), empujado en aplicaciones que requieran un alto ancho de banda, es compatible con tecnologías que operan a 5GHz y los dispositivos que emplean este estándar tienen menor consumo energético, emplea la técnica MU-MIMO.
- **IEEE 802.11p**: está basado en el estándar IEEE 802.11 para redes Ad-Hoc, alcanza velocidades de hasta 27 Mbps, trabaja en la banda de 5GHz, el rango de alcance varía entre los 100 a 300 m. Emplea la técnica OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) y es implementado en aplicaciones de redes vehiculares.

En la Tabla 1.1 se realiza un resumen de las principales características de estas enmiendas.

En la literatura, los esquemas de transmisión son a veces llamados como esquemas de modulación por lo que se usará cualquiera de estos dos términos para referirse a los esquemas de transmisión.

Es importante resaltar el significado de cada una de las siglas mencionadas en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Resumen de características de algunas enmiendas del estándar IEEE 802.11

Enmiendas IEEE 802.11	Banda	Canales	Velocidades	Esquema de transmisión	Modulación	Acceso al medio	Rango
IEEE 802.11	2.4 GHz	20 MHz, 10MHz, 5MHz	6 a 54 Mbps según el ancho de banda	OFDM	BPSK, QPSK, 16-QAM 64-QAM	DC/PCF	250-300 m
IEEE 802.11 a	5 GHz	20 MHz,	3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 27 Mbps	OFDM	BPSK, QPSK, 16-QAM 64-QAM	DC/PCF	50-100 m
IEEE 802.11b	2.4 GHz	20 MHz,	1.5, 2.25, 3, 4.5, 6, 9, 12, 13.5 Mbps	DSSS, CCK	BPSK, QPSK,	DC/PCF	250-300 m
IEEE 802.11g	2.4 GHz	20 MHz,	1, 2, 5.5, 11, 18, 24, 36, 48 , 54 Mbps	CCK OFDM	BPSK, 64-QAM	DC/PCF	50-100 m
IEEE 802.11 n	2.4 GHz 5 GHz	20MHz	600 Mbps	CCK DSSS OFDM	Hasta 64-QAM	EDCA/HCCA	300m (exterior) 120 m (interior)
IEEE 802.11 ac	5 GHz	20 MHz, 40 MHz, 80 MHz,	1.3 Gbps	OFDM	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM	EDCA/HCCA	100 m
IEEE 802.11p	5 GHz	10 MHz,	3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 27 Mbps	OFDM	BPSK, QPSK, 16-QAM 64-QAM	EDCA	100-300

Esquemas de transmisión

- FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*): es una técnica de radio frecuencia de espectro ensanchado utilizado para combatir interferencias, consiste en expandir la señal que se transmite en una banda de frecuencia

mayor, proporcionando mayor robustez en cuanto al *fading*. En FHSS la señal banda base se expande en base a un código *spreading* o pseudo aleatorio, el cual maneja un sintetizador de frecuencias para ir de una de las frecuencias del generador a otra frecuencia [8].

- DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*): es un método de modulación en espectro ensanchado para la transmisión de señales digitales, consiste en usar una señal de chip llamada señal pseudo-ruido para modular una portadora de manera directa aumentando el ancho de banda de la transmisión y reduciendo la densidad espectral [8].
- OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*): es un método de modulación empleado para transmisiones inalámbricas consiste en la multiplexación de portadoras con diferentes frecuencias de tal manera que sean ortogonales [9].
- CCK (*Complementary Code Keying*): Es un método de modulación multi-portadora de espectro ensanchado para medios inalámbricos, consiste en tener varios símbolos, cada símbolo tiene un código equivalente. Se tiene un total de 64 palabras código de 8 bits cada una [10].

Esquemas de modulación

- BPSK (*Binary Phase Shift Keying*): consiste en variar la fase de la portadora entre dos valores discretos. Una fase de salida representa el 1L y la otra fase representa el 0L [11].
- QPSK: (*Quaternary Phase Shift Keying*): consiste en variar la fase de la portadora entre 4 valores discretos. Los datos se divide en dos canales (I, Q, donde I corresponde a la modulación en fase y Q a la modulación en cuadratura)

cada uno de los arreglos corresponde a una fase con QPSK es posible cuatro fases de salida [11].

- 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*): la información digital se modula tanto en fase como en amplitud. Se tiene 16 distintas posibilidades [11].
- 64-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*): la información digital se modula tanto en fase como en amplitud. Se tiene 64 distintas posibilidades [11].

Acceso al medio

- Un protocolo de acceso al medio empleado en estas redes es PCF (*Point Coordination Function*), este se basa en sondeo libre de colisiones y prioridad, se emplea en redes con infraestructura [12].
- CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Acces / Collision Avoidance*): es un método de acceso en el que los terminales escuchan el canal para saber si está libre o no, el terminal que quiere transmitir si escucha el canal libre, envía una solicitud para transmitir y espera recibir una confirmación por parte del receptor, cuando recibe la confirmación el terminal transmite los datos [13].
- La DCF (*Distributed Coordination Function*) lleva el control de acceso al medio de manera distribuida en todas las estaciones, es más empleado mayormente en redes Wi-Fi, también, se puede utilizar en entornos con o sin infraestructura, basado en CSMA/CA [12].
- EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*) : para lograr el acceso al medio con calidad de servicio el mecanismo CSMA/CA puede emplear el mecanismo EDCA, el cual diferencia cuatro categorías de acceso, mejorando el tiempo de respuesta y la tasa de transferencia [14].

- HCCA (*HCF Controlled Channel Access*) es un método que incorpora mayor control de tráfico, siendo una variación de PCF, al igual que PCF envía una trama secuencialmente interrogando a sus clientes para saber si disponen de tráfico para enviar, el cliente responde, si dispone de tráfico también informa el tipo tráfico, finalmente el punto de acceso indica al cliente que puede transmitir y el tiempo que tiene para hacerlo [14].

1.2 REDES VANETS

El notable incremento de redes Ad-Hoc ha permitido a los usuarios de dispositivos con tecnología inalámbrica conectarse sin uso de infraestructura, existen varias categorías de redes Ad-Hoc: WMN (*Wireless Mesh Network*), WSN (*Wireless Sensor Network*) y MANET (*Mobile Ad-Hoc Networks*), siendo este último un campo desarrollado en los últimos años lo que corresponde a redes Ad-Hoc para vehículos, a este tipo de redes se lo conoce como redes VANETs (*Vehicular Ad-Hoc Networks*) y permiten el intercambio de información tanto con otros vehículos como con la infraestructura ubicada a lo largo de las carreteras.

Las redes VANETs son un caso específico de las redes MANETS [15], se caracterizan porque los vehículos corresponden a los nodos, por lo que puede existir comunicación vehículo a vehículo (V2V) pero también el vehículo puede comunicarse con la infraestructura (V2I) colocada a lo largo de las carreteras, para el caso de redes vehiculares es indispensable que no exista un nodo central que se encargue de la comunicación con los otros elementos de la red Ad-Hoc, ya que todos los vehículos deben ser capaces de comunicarse entre sí.

Uno de los inconvenientes que estas redes presentan es el cambio continuo de topología, por lo que es necesario reducir considerablemente el tiempo de acceso al medio; sin embargo, es importante que se asegure la confiabilidad y seguridad de los mensajes, especialmente para mensajes de emergencias.

Otro problema que estas redes presentan es la alta velocidad a la que los vehículos pueden viajar, además del cambio de velocidad que puede tener un mismo vehículo en los diferentes tramos de la carretera y las condiciones hostiles de propagación.

Sin embargo, también existen ventajas en redes VANETs, por ejemplo: no existe una trayectoria aleatoria en los vehículos porque únicamente pueden transitar por la carretera en una determinada dirección y velocidad, no tienen limitación de recursos en cuanto a la potencia, almacenamiento de datos y energía ya que los vehículos poseen energía propia e ilimitada.

La ubicación y localización del vehículo es sencillo gracias al uso del GPS (*Global Positioning System*), lo que facilita la sincronización y a su vez brinda aplicaciones de localización al vehículo [16].

1.3 ARQUITECTURA DE UNA VANET

Una red VANET está compuesta por los siguientes elementos

- OBU (*On Board Unit*): interfaz inalámbrica que se encuentra en el vehículo y se comunica con la infraestructura (puntos de acceso) colocados a lo largo de las vías y también con otros vehículos (OBU) [17].
- VSN (*Vehicular Sensor Networks*): se encargan de tomar datos sobre la red y las condiciones del entorno, registrar datos de los vehículos, condiciones ambientales, etc. [17].
- RSU (*Road Site Unit*): es la infraestructura colocada a lo largo de la carretera que facilita el intercambio de mensajes [18]. Se encarga de la transmisión y recepción de datos, permite ampliar el rango de cobertura (100m-300m) [19].

- *AU (Applications Unit)*: son dispositivos capaces de ejecutar aplicaciones, estos dispositivos pueden ser portátiles, teléfonos inteligentes, en este grupo también se incluyen los sensores que se encuentran integrados en el vehículo, entre otros [18].

En la arquitectura VANET es posible diferenciar tres dominios, en la Figura 1.1 se puede visualizar cada uno de ellos.

Como se puede observar en la Figura 1.1, el primer dominio corresponde al dominio en el vehículo: aquí interactúan la OBU, AU y los sensores incorporados en el vehículo. Las conexiones pueden ser cableadas o inalámbricas.

El segundo dominio corresponde al dominio Ad-Hoc: aquí interactúan dos vehículos (V2V), si la comunicación no puede ser directa existe la posibilidad de una comunicación multi-salto, siendo los vehículos los nodos intermedios.

El último dominio es la comunicación entre el vehículo y la infraestructura de red, la OBU puede acceder mediante la RSU o redes celulares y tecnologías de radio que el vehículo tenga incorporado.

En la Figura 1.1 se puede observar los elementos que componen una red VANET. También, se puede observar una comunicación multi-salto entre los vehículos que circulan en la carretera en la Figura 1.2

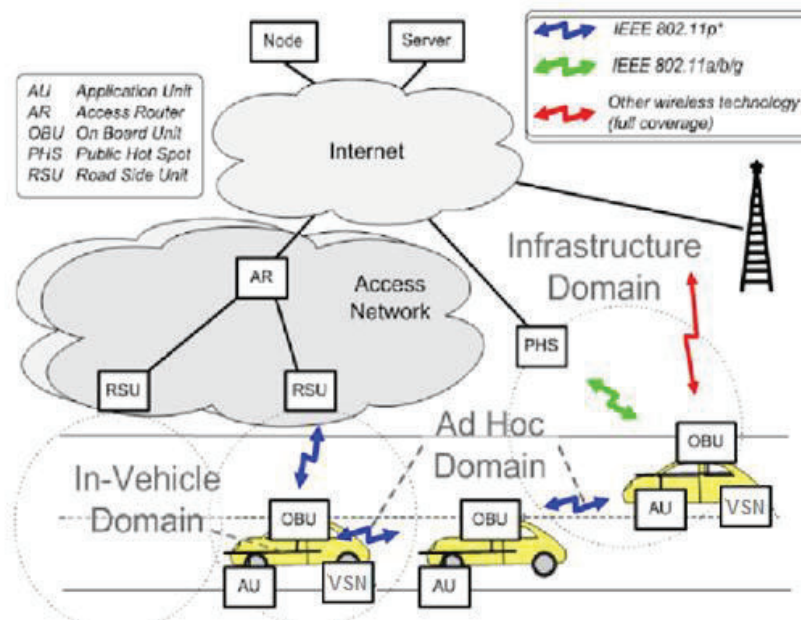


Figura 1.1 Arquitectura de referencia para redes vehiculares [18].

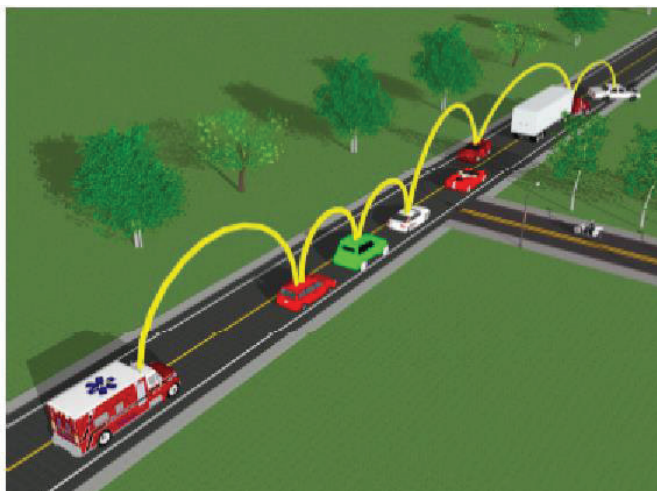


Figura 1.2 Comunicación móvil vehicular multi-salto [20].

1.4 ESTÁNDARES WAVE

Para un óptimo funcionamiento de una red VANET es necesario el uso de estándares que rijan la comunicación entre vehículo-vehículo y vehículo-infraestructura, este conjunto de estándares se lo denomina WAVE (*Wireless Access in the Vehicular Environment*).

WAVE propuesta por IEEE, es una pila de protocolos que soporta tráfico TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*), protocolos de aplicación, transporte y red [15]. WAVE cubre todas las capas de los protocolos DSRC (*Dedicated Short Range Communications*), el estándar IEEE 802.11p (cubre la capa física y capa de enlace del modelo de referencia OSI) y el estándar IEEE 1609 (abarca capa de red, transporte, sesión, presentación y aplicación del modelo de referencia OSI) [21] como se observa en la Figura 1.3.

Las principales funciones del estándar WAVE son: permitir la comunicación e intercambio de mensajes sin que el vehículo se una a un BSS (*Basic Service Set*, corresponde a un conjunto de estaciones) con el objetivo de reducir el tiempo de acceso y definir las funciones del interfaz para WAVE [21].

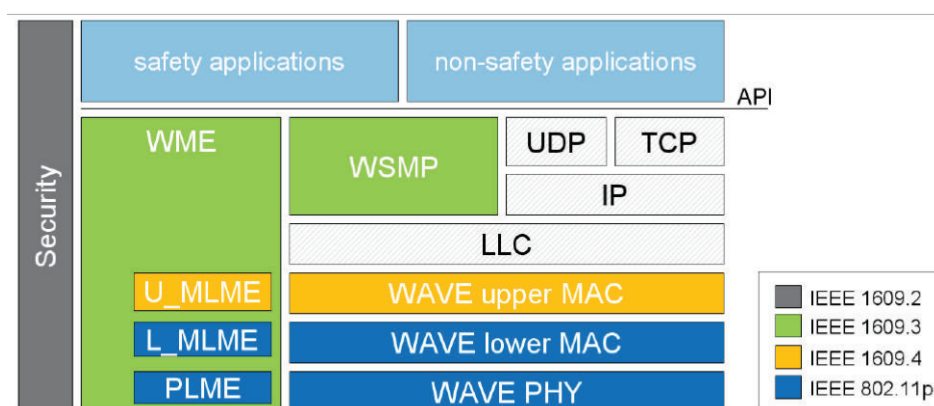


Figura 1.3 Estándares WAVE [22].

En las siguientes secciones se analizarán los estándares que conforman la pila de protocolos WAVE, estos estándares son IEEE 802.11p e IEEE 1609.

1.4.1 MODO WAVE

Debido a la velocidad con la que cambia la topología de las redes vehiculares, se requiere una manera rápida y eficiente para que una estación pueda pertenecer al BSS, las estaciones en redes vehiculares se encuentran en el modo WAVE, existe el nodo que inicia un WBSS (*Wave Mode Basic Set*) a este nodo se lo conoce como

“proveedor WBSS” y los nodos que se asocian a esta WBSS se los conoce como “usuarios WBSS”, es importante mencionar que a diferencia de lo que ocurre con un BSS del estándar IEEE 802.11, los nodos no requieren autenticarse y asociarse para pertenecer a un WBSS, además el proveedor WBSS puede abandonar a la WBSS sin que el conjunto de servicios básicos WAVE se pierda [22].

El proveedor WBSS usa el canal de control CCH (*Control Channel*) para la difusión tipo broadcast de la trama WSA (*WBSS Service Announcement*), en la cual se anuncia los servicios de la WBSS. La trama tiene la información necesaria para que los demás nodos la entiendan, entonces los nodos cercanos escuchan el canal CCH con el anuncio de servicios de la trama mediante la OBU equipada en el vehículo, y deciden si integrarse o no a la WBSS, por lo tanto no es necesario realizar intercambio de mensajes adicionales [23].

Una estación que pertenezca a un WBSS sí puede pertenecer a otra WBSS, esto facilita enviar mensajes en caso de emergencias o siniestros; por lo tanto cada nodo pertenece al menos a un WBSS. El envío y recepción de tramas sin la necesidad de establecer un BSS es posible mediante el uso de un *wilcard* BSSID (Todo en 1L, la máscara de *wilcard* es una secuencia de 32 dígitos binarios que muestran qué bits son relevantes para llevar a cabo una acción en el router) que por defecto vienen configurados con el mismo BSSID (*Basic Service Set Identifier*, el BSSID es un nombre de identificación único de los paquetes en una red WLAN) y en el mismo canal.

1.4.2 APLICACIONES DEL ESTÁNDAR WAVE

Existe una diversidad de aplicaciones del estándar WAVE para redes vehiculares, entre las que se encuentran:

a) Seguridad vial:

Debido al alarmante índice de accidentes y muertes ocasionados en las vías y carreteras, se ha visto la necesidad de reducir o evitarlos mediante el intercambio de

mensajes entre los elementos que conforman la red vehicular ya sea entre el vehículo-infraestructura o vehículo-vehículo.

De esta manera existe diferentes tipos de mensajes que se pueden intercambiar para cumplir este objetivo, así por ejemplo: informar o notificar acerca de las señales de tránsito para alertar a los conductores, enviar mensajes de violaciones de señales de tránsito (en tiempo real) o disminución de la velocidad en curvas o en tramos debido al mal estado de la carretera, estos mensajes se conocen como RSN (*Road Sing Notifications*) [24].

En caso que se quiera enviar colisiones, el conductor puede recibir un mensaje a través de la OBU, enviado por la RSU cuando detecta que dos vehículos corren el riesgo de chocar, de esta manera los conductores pueden tomar las debidas precauciones y evitar un accidente. Además, se pueden enviar mensajes de: advertencia de cambio de línea, de pre-colisión, de colisión en las intersecciones o alarma de estar en una ubicación peligrosa. A estos mensajes se los conoce como prevención de colisiones (*Collision Avoidance*) [24].

Cuando un accidente ha ocurrido, se pueden intercambiar mensajes para evitar un accidente mayor informando a los vehículos que se encuentran cerca que tomen precauciones disminuyendo la velocidad o a su vez que tomen rutas alternativas, además se informa inmediatamente a un vehículo de emergencia sobre el incidente con el fin de proveer a los heridos una rápida atención [24].

b) Optimización y eficiencia en carreteras:

Con el fin de mejorar la experiencia de los viajeros, se ha implementado aplicaciones que se controlan desde la RSU, estas aplicaciones son control de semáforos, cobro de peajes, control de velocidad, etc. De esta manera se puede realizar un sistema

inteligente de transporte (ITS, *Intelligent Transportation Systems*), cuyo propósito es optimizar las rutas, informando a los conductores de rutas alternativas para evitar congestión en las vías, con un sistema inteligente de semáforos se puede evitar congestión si en una de las intersecciones existe mayor cantidad de concurrencia [24].

Además, dentro de esta categoría se encuentran las aplicaciones de monitoreo y localización, que consisten en enviar a los conductores mensajes advirtiendo las malas condiciones de las vías, y también existen aplicaciones de localización del vehículo [24].

c) Información y entretenimiento:

Se ofrece a los conductores información acerca de lugares turísticos cercanos a su ubicación, restaurantes, además aplicaciones de ubicación y localización, mapas y reservas de estacionamientos, esto es en cuanto a las aplicaciones de información. Y las aplicaciones de entretenimiento ofrecen acceso a Internet mediante puntos de acceso Wi-Fi que se colocan a través de la carretera [24].

1.4.3 ESTÁNDAR IEEE 1609 Y ESTÁNDAR IEEE 802.2

El conjunto de estándares IEEE 1609 [25], se encargan de los aspectos y funciones de las capas superiores (ver Figura 1.3). Además, no realizan funciones de autenticación ni asociación. Pero define de manera general las funciones e interfaces WAVE, acceso inalámbrico al medio en redes vehiculares, estructura de OBUS y RSU. Estos estándares son:

- **IEEE 1609.1** [25]: se encarga de la gestión de recursos e interactúa con la OBU, maneja la capa de aplicación.
- **IEEE 1609.2** [26]: define formatos y procedimientos para la seguridad de los mensajes de administración y aplicación.

- **IEEE 1609.3** [27]: define servicios de la capa red, describe direccionamiento y enrutamiento y el uso de protocolos TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*), UDP (*User Datagram Protocol*). Además realiza la configuración y administra las conexiones de WAVE. Aquí se encuentra el WME (*WAVE Management Entity*) que se encarga de publicar los servicios [21].
- **IEEE 1609.4**: [28] describe parámetros de prioridad de mensajes, conmutación de canal, temporizadores, entre otros. En general se encarga de definir las operaciones multicanal y habilita operaciones con las capas superiores sin que sea necesario que conozca los parámetros de la capa física. Maneja paquetes IPv6 y WSMP (*Wave Short Message Protocol*). Junto a IEEE 802.11p coordina los cambios entre los canales de control y servicios y las colas de servicio [21].
- **IEEE 802.2** [29]: especifica la capa LLC (*Logical Link Control*), tiene dos modos operativos el primero orientado a la conexión (se enumeran los paquetes y es sin confirmación) y el segundo no orientado a conexión. Usa *multicast* y *broadcast*.

1.4.4 ESTÁNDAR IEEE 802.11p

El estándar IEEE 802.11p está limitado a la capa física y a la sub-capa MAC para redes vehiculares. Éste estándar define multiplexación OFDM, además establece las velocidades de transmisión de 3, 4, 5, 6, 9, 12, 18, 27 Mbps para canales de 10 MHz [2].

El espectro de frecuencia para el estándar IEEE 802.11p se encuentra en los 5.9 GHz. Se divide el ancho de banda en ciclos de transmisión con tramas de 50 ms. Además, el estándar IEEE 802.11p para redes vehiculares define 7 canales de 10 MHz cada uno.

1.4.4.1. Especificación de canales del estándar IEEE 802.11p

El estándar especifica en total 7 canales para servicio, control y canales reservados. En la Figura 1.4 y Figura 1.5 se observan los canales tanto para Estados Unidos (7 canales de 10 MHz) como para Europa (5 canales de 10 MHz).

Critical Safety of Life	SCH	SCH	Control Channel (CCH)	SCH	SCH	Hi-Power Public Safety
ch 172 5.860GHz	ch 174 5.870GHz	ch 176 5.880GHz	ch 178 5.890GHz	ch 180 5.900GHz	ch 182 5.910GHz	ch 184 5.920GHz

Figura 1.4 Canales de control y servicio para Estados Unidos [30].

SCH	SCH	SCH	SCH	CCH
ch 172 5.860GHz	ch 174 5.870GHz	ch 176 5.880GHz	ch 178 5.890GHz	ch 180 5.900GHz

Figura 1.5 Canales de control y servicio para Europa [30].

a) Canales de servicio:

Los canales de servicio (*SCH Service Channel*) se emplean para la transmisión de los servicios que la red presta, como transmisión de datos sobre administración remota, información sobre seguridad, entretenimiento, voz y video IP. Estos servicios pueden brindarse de forma paralela para el uso de distintos usuarios a través de diferentes canales de servicio (SCH) [30].

La comunicación usada entre la OBU y la RSU es a dos vías, es imprescindible que se establezca la comunicación Ad-Hoc mediante el establecimiento de un WBSS.

b) Canal de control:

El canal CCH (*Control Channel*) se emplea para mensajes de emergencia debido a la alta velocidad y baja latencia que requieren estos tipos de mensajes, su difusión es tipo *broadcast*. También se emplean los mensajes de control para iniciar la comunicación, se usa este canal para detectar a los vehículos cercanos y anunciar los servicios que se encuentran disponibles en los canales SCH.

Cabe mencionar que el canal de control no transmite en IP, en lugar de este, usa otro protocolo llamado WSMP (*WAVE Short Message Protocol*) [15]. Es importante considerar que los canales inician con un intervalo de guarda.

1.4.5 SUB-CAPA MAC DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11p

El estándar IEEE 802.11p define la capa de control de acceso al medio, la cual se encarga de gestionar y mantener la comunicación entre las estaciones, coordinando el acceso de las estaciones en el canal compartido.

La sub-capas MAC se encarga de determinar cuál estación de la red puede hacer uso del medio de transmisión y cómo debe hacerlo.

También, el protocolo de sub-capas MAC empleado en redes WAVE es EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*), el cual define un mecanismo que soporta calidad de servicio (*QoS, Quality of Service*), existen cuatro diferentes categorías de acceso para prioridad en la comunicación (AC 0-3). Sus parámetros consisten en tamaño mínimo y máximo de la ventana (*CWmin, CWmax*), el espacio arbitrario entre tramas (*AIFS, Arbitrary Inter-Frame Space*) y la oportunidad de transmisión (*TXOP*) [31].

EDCA se utiliza para la comunicación entre vehículos, y entre vehículo e infraestructura. Hay valores predeterminados definidos en el estándar, estos valores van del 0 al 3, siendo el 0 el valor de más baja prioridad. Estas cuatro interfaces para tener servicios con QoS son virtuales.

EDCA emplea el algoritmo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) que se fundamenta en escuchar si el canal está libre o no. A continuación más detalles.

Antes de analizar el proceso de transmisión de una estación es necesario definir el proceso de *Backoff*, cuando se produce una colisión las estaciones dejan de transmitir y esperan un tiempo aleatorio para intentar transmitir nuevamente, a este proceso en que las estaciones dejan de transmitir y esperan para volver a transmitir se denomina *Backoff*.

Para que una estación transmita, primero escucha el medio para saber si otra estación está transmitiendo, si no existe otra estación usando el canal, puede proceder a enviar los datos, caso contrario la estación que desea transmitir debe esperar hasta que la otra estación termine su transmisión. Cuando la estación no encuentra el canal ocupado el proceso de transmisión es el siguiente:

- Primero, a cada interfaz virtual se configura parámetros de manera independiente según la prioridad que ha sido asignada, estos parámetros son los tamaños máximo y mínimo de ventana (CW, *Contention Window*) y los AIFS [32].
- Segundo, las interfaces virtuales escuchan el medio durante el intervalo de tiempo AIFS, y realizan el proceso de *Backoff*, en el cual escogen un número aleatorio de slots que se encuentra entre los valores de tamaño máximo y tamaño mínimo de ventana para transmitir.
- Tercero, la estación selecciona un intervalo aleatorio de *Backoff*. Incrementa el contador de *Backoff* si el canal para transmitir no está ocupado.

- Cuarto, si ocurre una colisión, se repite nuevamente el proceso de *Backoff* decremental, para disminuir la probabilidad de que se produzca una nueva colisión se escogen nuevos parámetros de tamaño máximo y mínimo de ventana.

Si se alcanza el número máximo de intentos sin tener éxito en el envío del paquete, este es descartado y se procede a realizar el proceso para un paquete nuevo, reiniciando los valores del tamaño de ventana.

Es importante mencionar que antes del envío de datos por parte de la estación (cuando ha detectado el canal libre) se realiza un intercambio de tramas RTS (*Request to Send*) y CTS (*Clear to Send*) respectivamente entre la estación origen y destino. Una transmisión es exitosa cuando se recibe una trama ACK del destino, confirmando la recepción de la trama enviada por el origen

En la Figura 1.6 se indica los diferentes canales virtuales con sus respectivos parámetros:

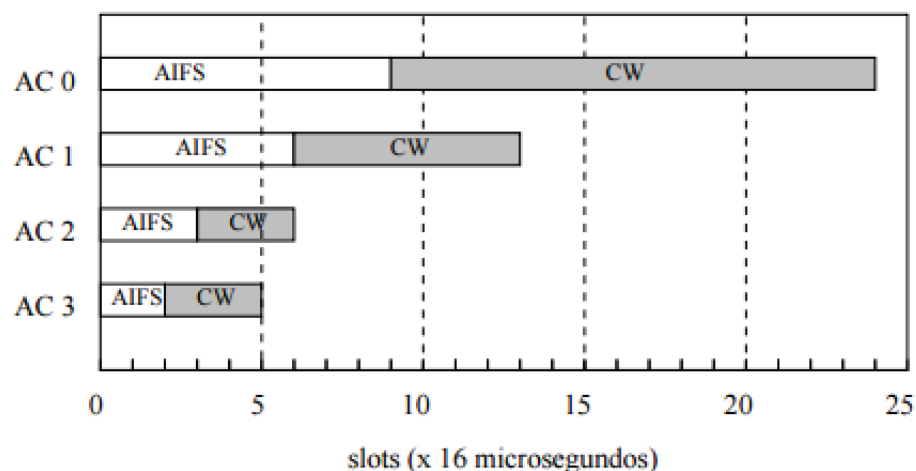


Figura 1.6 Configuración de parámetros de *Backoff* en IEEE 802.11p [32].

1.5 CAPA FÍSICA DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11p

La capa física definida en el estándar IEEE 802.11p se divide en dos sub-capas: la sub-capas PMD (*Physical Medium Dependent*) y la sub-capas PLCP (*Physical Layer Convergence Procedure*), encargada de proveer mecanismo para la transferencia entre dos o más estaciones sobre la capa PMD [2].

La división en sub-capas es primordial para tener una mínima dependencia de la sub-capas MAC con la subcapas PMD [2], así se tiene flexibilidad y adaptabilidad con nuevas tecnologías.

- **Sub-capas PLCP:** convierte la PDU MAC (*Protocol Data Unit MAC*) a un formato adecuado para su transmisión y recepción en el canal. Además, simplifica la interfaz física a los servicios de la capa superior MAC [2].
- **Sub-capas PMD:** define las características, métodos de transmisión y recepción de datos entre dos o más estaciones en medios inalámbricos, especifica técnicas de transmisión, codificación, modulación, etc. Provee mecanismos para enviar y recibir datos entre los vehículos y realiza la gestión de las funciones físicas locales junto con MLME (*MAC Layer Management Entity*) [2].

1.5.1 PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN IEEE 802.11 IEEE 802.11p

Se permite en el estándar IEEE 802.11 la transmisión de un vector de longitud de 14095 octetos, este valor es el mismo permitido para el estándar IEEE 802.11p [2].

A continuación, en la Tabla 1.2 se muestran las velocidades definidas para el estándar IEEE 802.11 e IEEE 802.11p [2].

Tabla 1.2 Ancho de banda de canales con sus respectivas velocidades establecidas en los estándares IEEE 802.11 e IEEE 802.11p.

Estándar	Canal	Velocidad Mbps
IEEE 802.11	20 MHz	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54
	10 MHz	3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 27
	5 MHz	1.5, 2.25, 3, 4.5, 6, 9, 12, 13.5
IEEE 802.11p	10 MHz	3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 27

1.5.1.1 Trama de Subcapa PLCP

A las tramas que se reciben de la capa superior MAC (llamadas PSDU por sus siglas en inglés: *PLCP Service Data Unit*) se agrega un preámbulo PLCP y cabecera PLCP, al resultado de esta trama se la conoce como PPDU (*Protocol PLCP Unit Data*), en el receptor se debe retirar esta cabecera y preámbulo.

A continuación, en la Figura 1.7 se observa el formato de la trama PPDU [2], formada por cabecera (*PLCP Header*), preámbulo (*PLCP preamble*), bits de cola (*Tail Bits*), bits de relleno (*Pad Bits*), datos (*Data*).

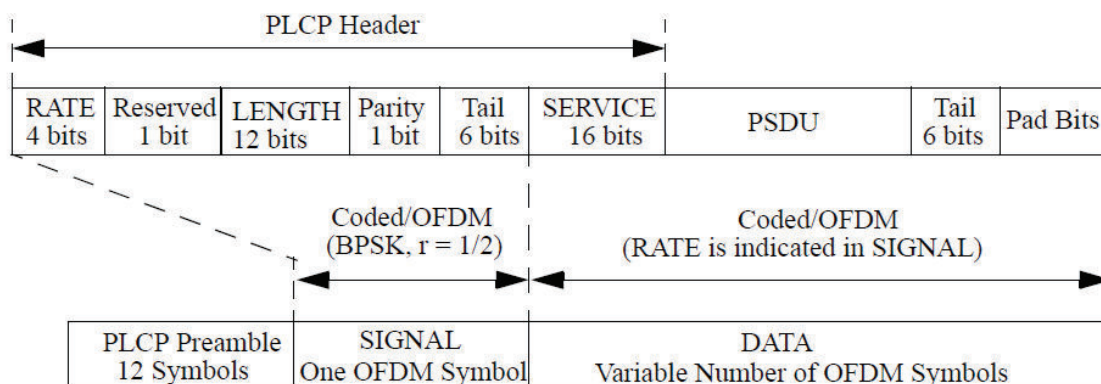


Figura 1.7 Formato de la trama PPDU 802.11 [2]

Continuando con el análisis se detalla el formato de la trama PPDU.

a. Cabecera (*PLCP Header*)

La cabecera PLCP tiene un total de 24 bits y está formada por los siguientes campos: velocidad (*Rate*), reservado (*Reserved*), longitud (*Length*), paridad (*Parity*), cola (*Tail*) y servicio (*Service*).

Los 5 primeros especifican los parámetros usados en el símbolo OFDM. A la cabecera se denomina "SIGNAL" [2]. Además, en la Figura 1.7 se observan los campos "SERVICE", PSDU, la cola de 6 bits (ceros) y el relleno de bits (*Pad bits*), los cuales constituyen el campo "DATA" (que se transmiten a la velocidad especificada en el primer campo de la cabecera) los mismos que pueden constituir múltiples símbolos OFDM.

b. Preámbulo (*PLCP Preamble*)

El preámbulo consta de 10 repeticiones de una secuencia corta, y dos de una secuencia larga. El preámbulo se utiliza para la sincronización. El estándar IEEE 802.11p define 10 símbolos cortos (t_1, t_2, \dots, t_{10}) y 2 símbolos largos (T1, T2) [2]. Las estructuras se puede observar en la Figura.1.8. En total el preámbulo dura 16 μ s [2].

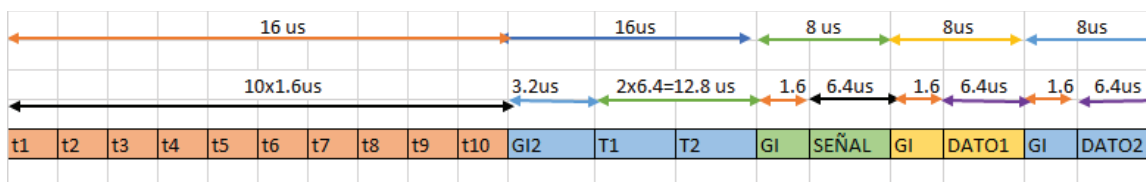


Figura 1.8 Estructura del preámbulo para 10MHz

El preámbulo corto consiste de 12 sub-portadoras, las cuales se modulan con los siguientes elementos [2] :

Tabla 1.3 Bits del campo SIGNAL y su respectiva velocidad

Bits				Velocidad canales de 20MHz [Mbps]	Velocidad canales de 10MHz [Mbps]	Velocidad canales de 5MHz [Mbps]
0	1	2	3			
1	1	0	1	6	3	1.5
1	1	1	1	9	4.5	2.25
0	1	0	1	12	6	3
0	1	1	1	18	9	4.5
1	0	0	1	24	12	6
1	0	1	1	36	18	9
0	0	0	1	48	24	12
0	0	1	1	54	27	13.5

- **R:** este campo está reservado para usos futuros corresponde al bit 4 [2].
- **Longitud:** corresponden los siguientes 12 bits, donde el bit menos significativo es el bit 5 (de izquierda a derecha) e indica el número de octetos que la sub-capa MAC quiere que la capa física transmita [2].
- **P:** bit de paridad, se realiza la paridad para los bits del 0 al 16 [2].
- **Cola de la señal:** corresponden los últimos bits del campo SEÑAL, está compuesto por 0 L [2].
- d. **Campo DATOS:** Los bits que corresponden a este campo son aleatorizados. Este campo está compuesto por los siguientes sub-campos: PSDU, cola (*Tail*), y relleno de bits (*Pad*), como se observa en la Figura 1.7.

A continuación más detalles:

- **Servicio:** del bit 0 al 6 son usados para sincronización del des-aleatorizador en el receptor, se compone de 0L. Mientras que los bits del 7 al 15 son bits para servicio reservados para uso futuro [2]. En la Figura 1.10 se puede observar la estructura del sub-campo servicio.

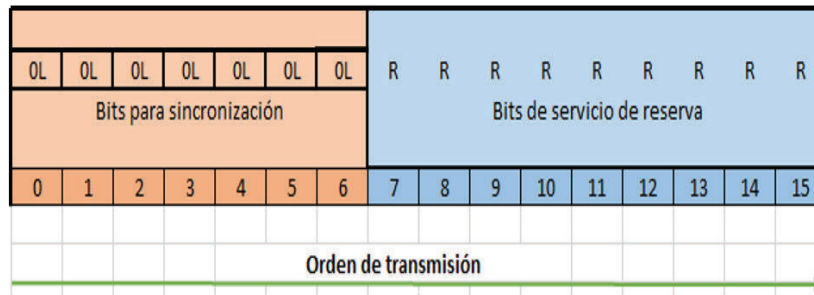


Figura 1.10 Estructura del sub-campo servicio [2].

- **Campo cola PPDU:** Este campo se compone por 6 bits de 0L, se usan para llevar al codificador convolucional al estado cero (esto permite la disminución de la probabilidad de error al momento de realizar la decodificación en el receptor) [2].
- **Bits de relleno (PAD):** El número de bits del campo datos debe ser un número entero múltiplo de N_{CBPS} , en ocasiones es necesario realizar un relleno de bits para completar el número de bits que se requiere [2]. El relleno de bits se calcula de la siguiente manera:

$$N_{SYM} = \text{Ceiling} ((16 + 8 * LENGTH + 6) / N_{DBPS}) \quad (1.1)$$

$$N_{DATA} = N_{SYM} * N_{DBPS} \quad (1.2)$$

$$N_{PAD} = N_{DATA} - (16 + 8 * LENGTH + 6) \quad (1.3)$$

Donde: N_{SYM} es el número de símbolos OFDM, N_{DATA} es el número de bits del campo DATO, N_{PAD} es el número de bits de relleno y corresponden a 0L, N_{DBPS} corresponde al número de bits de datos por símbolo OFDM, *Ceiling* retorna el número entero (el más pequeño) mayor o igual a su argumento. Y es necesario conocer la longitud del

PSDU que proviene de la capa superior, en este caso se representa la longitud del PSDU como **LENGTH** [2].

1.5.2 PARÁMETROS DEPENDIENTES DE LA MODULACIÓN

En la Tabla 1.4 se indican los parámetros y características de cada uno de los tipos de modulaciones con las diferentes tasas de codificación definidos en el estándar IEEE 802.11.

Es importante mencionar que el estándar IEEE 802.11p utiliza las especificaciones del estándar IEEE 802.11 para canales de 10 MHz.

En la Tabla 1.4 se muestra características como tasa de codificación, bits codificados por sub-portadoras, bits codificados por símbolo OFDM y bits codificados por símbolo OFDM según el tipo de modulación seleccionado.

Tabla 1.4 Parámetros dependiendo del tipo de modulación [2].

Modulation	Coding rate (R)	Coded bits per subcarrier (N_{BPSC})	Coded bits per OFDM symbol (N_{CBPS})	Data bits per OFDM symbol (N_{DBPS})	Data rate (Mb/s) (20 MHz channel spacing)	Data rate (Mb/s) (10 MHz channel spacing)	Data rate (Mb/s) (5 MHz channel spacing)
BPSK	1/2	1	48	24	6	3	1.5
BPSK	3/4	1	48	36	9	4.5	2.25
QPSK	1/2	2	96	48	12	6	3
QPSK	3/4	2	96	72	18	9	4.5
16-QAM	1/2	4	192	96	24	12	6
16-QAM	3/4	4	192	144	36	18	9
64-QAM	2/3	6	288	192	48	24	12
64-QAM	3/4	6	288	216	54	27	13.5

1.5.3 TIEMPOS DE DURACIÓN DE LOS PARÁMETROS

En la Tabla 1.5 se observan los parámetros de tiempo del estándar IEEE 802.11 y se han resaltado lo que corresponde al estándar IEEE 802.11p a fin de ubicar mejor al lector.

Tabla 1.5 Parámetros definidos en el estándar IEEE 802.11 [2]

Parámetro	Valor para canal de 20MHZ	Valor para canal de 10MHZ	Valor para canal de 5MHZ
NSD: Número de sub-portadoras de datos	48	48	48
NSP: Número de sub-portadoras piloto	4	4	4
NST: Número de sub-portadoras, total	52 (<i>NSD + NSP</i>)	52 (<i>NSD + NSP</i>)	52 (<i>NSD + NSP</i>)
Δ_f : Espaciamiento de frecuencia de sub portadora	0.3125 MHz (=20 MHz/64)	0.15625 MHz (= 10 MHz/64)	0.078125 MHz (= 5 MHz/64)
T_{FFT} : Período de la Transformada Inversa rápida de Fourier (IFFT) / Transformada rápida de Fourier (FFT)	3.2 μ s ($1/\Delta_f$)	6.4 μ s ($1/\Delta_f$)	12.8 μ s ($1/\Delta_f$)
T_{PREAMBLE} : Duración del preámbulo PLCP	16 μ s (TSHORT + TLONG)	32 μ s (TSHORT + TLONG)	164 μ s (TSHORT + TLONG)
T_{SIGNAL} : Duración de "SIGNAL", símbolo OFDM-BPSK	4.0 μ s (<i>TGI + TFFT</i>)	8.0 μ s (<i>TGI + TFFT</i>)	16.0 μ s (<i>TGI + TFFT</i>)
T_{GI} : Duración del intervalo de guarda	0.8 μ s (<i>TFFT/4</i>)	1.6 μ s (<i>TFFT/4</i>)	3.2 μ s (<i>TFFT/4</i>)
TGI/2:	1.6 μ s (<i>TFFT/2</i>)	3.2 μ s (<i>TFFT/2</i>)	6.4 μ s (<i>TFFT/2</i>)
T_{SYM} : Intervalo de símbolo	4 μ s (<i>TGI + TFFT</i>)	8 μ s (<i>TGI + TFFT</i>)	16 μ s (<i>TGI + TFFT</i>)
T_{SHORT} : Formación de secuencia de corta duración	8 μ s ($10 \times TFFT / 4$)	16 μ s ($10 \times TFFT / 4$)	32 μ s ($10 \times TFFT / 4$)
T_{LONG} : Formación de secuencia de larga duración	8 μ s (<i>TGI/2 + 2 x TFFT</i>)	16 μ s (<i>TGI/2 + 2 TFFT</i>)	32 μ s (<i>TGI/2 + 2 xTFFT</i>)

1.5.4 ALEATORIZADOR Y DESALEATORIZADOR DEL DATO PLCP

El aleatorizador impide que se genere secuencias largas de 1L y 0L. Para ello se crea un generador de secuencia aleatoria. Este generador se conforma del polinomio generador, el estándar IEEE 802.11p define al polinomio generador como x^7+x^4+1 .

La secuencia de 127 bits generada repetidamente debe ser 00001110 11110010 11001001 00000010 00100110 00101110 10110110 00001100 11010100 11100111 10110100 00101010 11111010 01010001 10111000 11111111 [2], cuando se transmite el estado inicial del aleatorizador debe ser colocado en un estado de no cero aleatorio [2]. Es importante recalcar que se usa el mismo aleatorizador para la transmisión y recepción.

1.5.5 CODIFICADOR Y DECODIFICADOR

La codificación de canal ayuda a contrarrestar los efectos producidos por el canal. El estándar IEEE 802.11p define una codificación a nivel de bit, se usa la codificación convolucional, este proceso se lo realiza a tasas de codificación de 1/2, 3/4 y 2/3 [2], la codificación convolucional depende tanto de los bits de entrada como del registro de desplazamiento, el registro de desplazamiento se representa por los polinomios generadores definidos en el estándar IEEE 802.11p como g_0 : 133, y g_1 : 171 [2] (cabe mencionar que el polinomio generador está escrito en base octal).

Además, para la codificación se tiene el perforado (*puncturing*), este proceso omite algunos de los bits codificados en el transmisor [2], lo que permite el aumento de la velocidad al tener una menor cantidad de bits a transmitir. [2]. Para el proceso de decodificación en el receptor, se utiliza el algoritmo de *Viterbi* [2] (*Viterbi* es un algoritmo de programación dinámica que permite hallar la secuencia más probable de estados ocultos que produce una secuencia de fuentes de información de *Márkov*).

En el receptor es necesario realizar el proceso inverso, a este proceso se lo conoce como decodificador, para ello se requieren el mismo polinomio generador del transmisor.

En la Figura 1.11 se muestra el codificador convolucional definido para el estándar IEEE 802.11p.

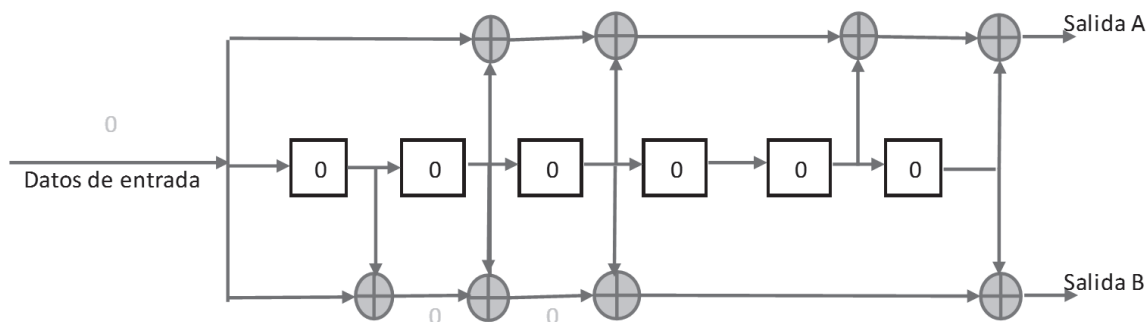


Figura 1.11 Codificador convolucional definido en el estándar IEEE 802.11p.

1.5.6 ENTRELAZADO (INTERLEAVING)

Los bits codificados se intercalan en un bloque de tamaño correspondiente del número de bits de un símbolo OFDM (N_{CBPS}), el entrelazado se define por dos permutaciones: la primera permutación asegura que los bits codificados adyacentes sean mapeados en sub-portadoras no adyacentes, mientras que la segunda permutación asegura que los bits codificados adyacentes sean mapeadas alternadamente sobre el bit menos significativo al más significativo del diagrama de constelación [2].

A continuación se definen las reglas para cada una de las permutaciones [2]:

$$i = (NCBPS/16) (k \bmod 16) + \text{floor}(k/16) \quad k = 0, 1, \dots, NCBPS - 1 \quad (1.4)$$

$$j = s \times \text{floor}(i/s) + (i + NCBPS - \text{floor}(16 \times i/NCBPS)) \bmod s \quad i = 0, 1, \dots, NCBPS - 1 \quad (1.5)$$

$$s = \max(N_{BPSC}/2, 1) \quad (1.6)$$

Donde k corresponde al índice del bit codificado antes de la primera permutación [2], i corresponde después de la primera permutación y antes de la segunda permutación, j corresponde al índice después de la segunda permutación y por último s se determina por el número de bits codificados por sub-portadora N_{BPSC} [2].

En el receptor se realiza el proceso de de-intercalado de bits, de la misma manera se define por dos permutaciones [2]. La primera permutación se denota como [2]:

$$i = s \times \text{floor}(j/s) + (j + \text{floor}(16 \times j/NCBPS)) \bmod s \quad j = 0, 1, \dots, NCBPS - 1 \quad (1.7)$$

Esta permutación es la inversa de la permutación descrita con anterioridad. Mientras que la segunda permutación se calcula por [2]:

$$k = 16 \times i - (N_{CBPS} - 1) \text{ floor}(16 \times i / N_{CBPS}) \quad i = 0, 1, \dots ; N_{CBPS} - 1 \quad (1.8)$$

Donde el índice denotado con j corresponde al bit original recibido antes de la primera permutación [2], i es el índice después de la primera permutación y antes de la segunda [2] y k corresponde al índice después de la segunda permutación [2].

1.5.7 MAPEO DE MODULACIÓN DE SUB-PORTADORA

En el estándar IEEE 802.11p, la modulación de las sub-portadoras se realiza con BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM, además es dependiente de la velocidad con que se va a transmitir [2]. Los bits resultantes del intercalado (explicado anteriormente) son divididos en grupos de 1, 2, 4, o 6 bits (número de bits modulados por sub-portadora: N_{BPSK}) y convertidos a números complejos representando los puntos de constelación de BPSK, QPSK, 16-QAM, y 64-QAM [2]. El proceso se realiza de acuerdo a la codificación Gray [2]. Se debe normalizar el valor obtenido multiplicando por una constante (este proceso de normalización se lo realiza con el fin de tener una misma potencia promedio).

En la Tabla 1.6 se detallan los factores de normalización para cada tipo de modulación. Es importante mencionar que la codificación Gray se caracteriza porque dos números sucesivos únicamente varían en 1 bit.

Tabla 1.6 Factor de normalización para definidos en el estándar IEEE 802.11p [2].

MODULACIÓN	Factor de normalización
64-QAM	$1/\sqrt{42}$
16-QAM	$1/\sqrt{10}$
QPSK	$1/\sqrt{2}$
BPSK	1

En las Tablas 1.7-1.10 y Figuras 1.12-1.15 se detallan los resultados de las modulaciones y los diagramas de constelación para cada tipo de modulación [2].

Tabla 1.7 Codificación BPSK

Bits de entrada	Bits de salida	
b0	I	Q
0	-1	0
1	1	0

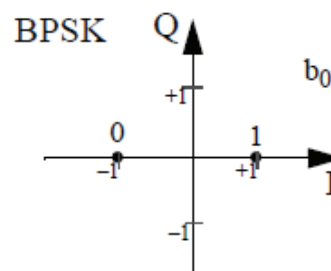


Figura 1.12 Diagrama de constelación para BPSK [2].

Tabla 1.8 Codificación QPSK.

Bits de entrada		Bits de salida	
b0	b1	I	Q
0	0	-1	-1
0	1	-1	1

1	0	1	-1
1	1	1	1

Figura 1.13 Diagrama de constelación QPSK [2].

Tabla 1.9 Codificación 16QAM [2].

Bits de entrada				Bits de salida	
b0	b1	b2	b3	I	Q
0	0	0	0	-3	-3
0	0	0	1	-3	-1
0	0	1	0	-3	3
0	0	1	1	-3	1
0	1	0	0	-1	-3
0	1	0	1	-1	-1
0	1	1	0	-1	3
0	1	1	1	-1	1
1	0	0	0	3	-3
1	0	0	1	3	-1
1	0	1	0	3	3
1	0	1	1	3	1
1	1	0	0	1	-3
1	1	0	1	1	-1
1	1	1	0	1	3
1	1	1	1	1	1

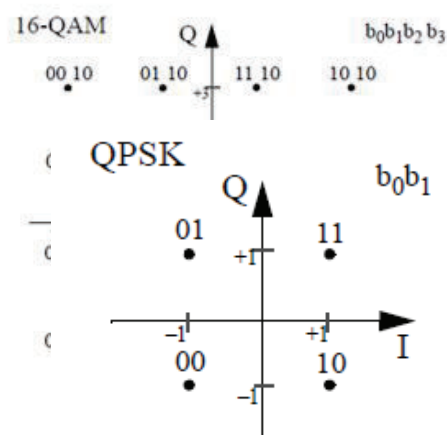


Figura 1.14 Diagrama de constelación para 16QAM [2]

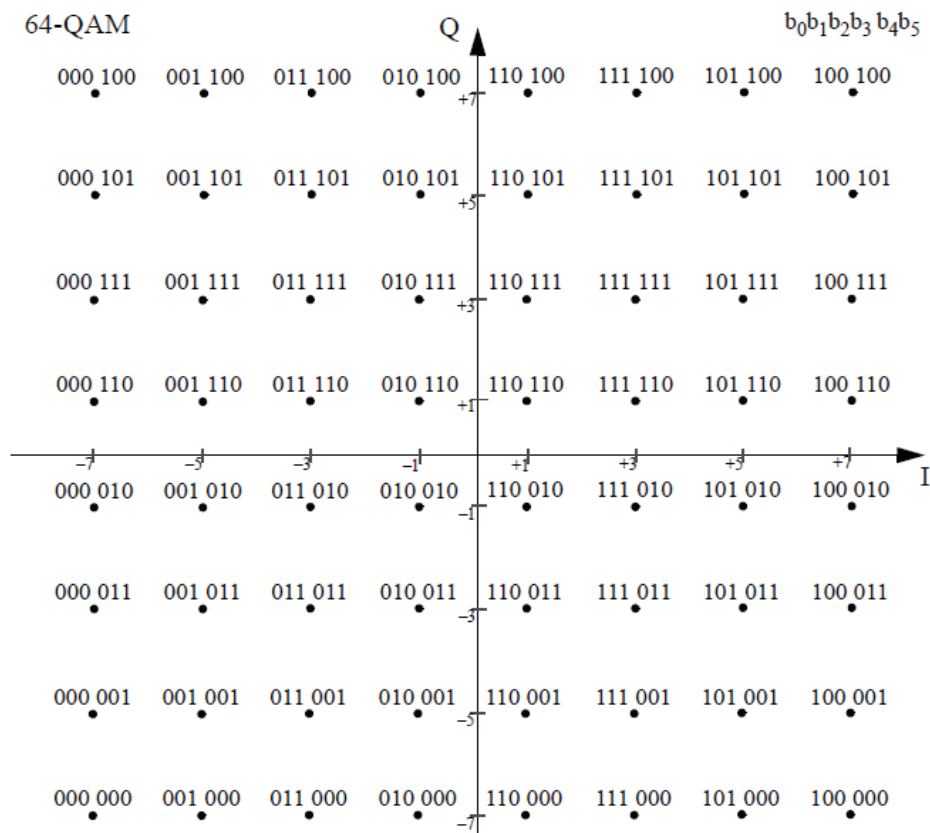


Figura 1.15 Diagrama de constelación 64-QAM [2].

Tabla 1.10 Codificación 64-QAM [2].

Bits de entrada	Bits de salida	Bits de entrada	Bits de salida
b0b1b2	I	b3b4b5	Q
000	-7	000	-7
001	-5	001	-5
011	-3	011	-3
010	-1	010	-1
110	1	110	1
111	3	111	3
101	5	101	5
100	7	100	7

En el receptor se realiza la demodulación considerando los datos de tipo de modulación y tasa de codificación usadas en la transmisión.

1.7 OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)

Su antecesor es FDM (*Frequency Division Multiplexing*), el cual consiste en dividir el espectro de frecuencia en varios canales de igual ancho de banda, estos canales deben tener una separación suficiente de tal manera que no se produzca interferencia entre ellos, a esta separación se la conoce como intervalo de guarda [34]. El inconveniente de FDM es la limitación del espectro de frecuencias, para superar este inconveniente se desarrolló la técnica OFDM.

OFDM es una tecnología de modulación digital multi-portadora (las sub-portadoras son ortogonales y se sobrelapan sin interferir entre ellos), para saber si dos señales son ortogonales es necesario realizar el producto escalar, si el resultado es nulo son ortogonales.

La técnica OFDM se emplea en servicios que requieren altas velocidades y banda ancha, que trabajan en ambientes hostiles por lo que requieren robustez y resistencia frente a interferencias y a los efectos de pequeña y gran escala, frecuencia selectiva y multi-trayectoria.

La característica principal de OFDM es la división del espectro en sub-canales ortogonales (así no es necesario tener intervalos de guarda), el hecho que los sub-canales sean ortogonales permite que no exista interferencia entre sí. Además, como se tiene multi-portadoras los símbolos son enviados de manera paralela.

En la Figura 1.16 se puede observar las frecuencias de FDM y OFDM, además, existe ahorro de ancho de banda ODFM. Gracias a la división del espectro se tiene una alta

eficiencia espectral y se supera problemas relacionados con la propagación multi-trayecto que son frecuentes en ambientes *outdoor* como es el caso en redes vehiculares.

El bloque OFDM consta de tres procesos:

1. Ensamblado de la trama
2. IFFT (*Fast Fourier Transform*) en el transmisor y FFT en el receptor.
3. Prefijo cíclico

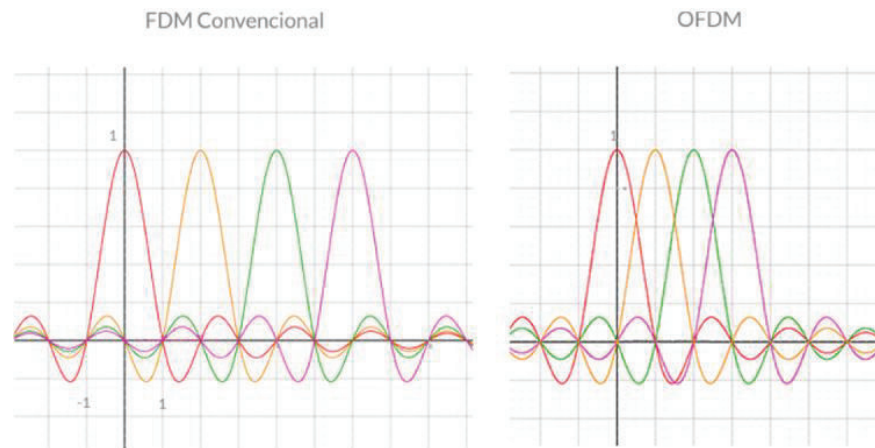


Figura 1.16 Espectro de una FDM y OFDM [34].

1.7.1 ENSAMBLADO DE LA TRAMA

A parte de las sub-portadoras de datos, el símbolo OFDM está formado por sub-portadoras pilotos y bandas vacías.

El símbolo OFDM del estándar IEEE 802.11p está formado de 64 sub-portadoras de las cuales 4 sub-portadoras son piloto, 48 sub-portadoras de datos, 11 sub-portadoras vacías y 1 sub-portadora DC (esta sub-portadora es asociada con la frecuencia central y no es utilizada, para evitar problemas en la conversión digital-análogo).

Tabla 1.11 Parámetros de OFDM [2]

Information data rate	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, and 54 Mb/s (6, 12, and 24 Mb/s are mandatory) (20 MHz channel spacing)	3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24, and 27 Mb/s (3, 6, and 12 Mb/s are mandatory) (10 MHz channel spacing)	1.5, 2.25, 3, 4.5, 6, 9, 12, and 13.5 Mb/s (1.5, 3, and 6 Mb/s are mandatory) (5 MHz channel spacing)
Modulation	BPSK OFDM QPSK OFDM 16-QAM OFDM 64-QAM OFDM	BPSK OFDM QPSK OFDM 16-QAM OFDM 64-QAM OFDM	BPSK OFDM QPSK OFDM 16-QAM OFDM 64-QAM OFDM
Error correcting code	K = 7 (64 states) convolutional code	K = 7 (64 states) convolutional code	K = 7 (64 states) convolutional code
Coding rate	1/2, 2/3, 3/4	1/2, 2/3, 3/4	1/2, 2/3, 3/4
Number of subcarriers	52	52	52
OFDM symbol duration	4.0 μ s	8.0 μ s	16.0 μ s
GI	0.8 μ s* (T_{GI})	1.6 μ s (T_{GI})	3.2 μ s (T_{GI})
Occupied bandwidth	16.6 MHz	8.3 MHz	4.15 MHz

1.7.2 IFFT

Un símbolo OFDM es la suma de N señales independientes moduladas en canales de igual ancho de banda, que puede implementarse por medio de la transformada Inversa de Fourier (IFFT) dada en la siguiente ecuación.

La Transformada Inversa de Fourier (IFFT) se define mediante la siguiente fórmula:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{\frac{2\pi j k N}{n}}, \quad 0 \leq n \leq N - 1 \quad (1.9)$$

Donde $x[n]$ representa el símbolo OFDM en el dominio del tiempo, $X(k)$ representan las muestras del símbolo OFDM en el dominio de la frecuencia que pertenecen a una constelación, n y k representan los índices en tiempo y frecuencia respectivamente y N es el número de sub-portadoras.

1.7.3 PREFIJO CÍCLICO

El prefijo cíclico se emplea para reducir los efectos del ISI (*Intersymbol Interference*) e ICI (*Inter-Carrier Interference*), este trabaja como una banda de guarda entre símbolos en la transmisión, mientras mayor sea el tamaño del símbolo menos errores se produce en la comunicación pero el tamaño de la trama incrementa y la eficiencia disminuye.

El prefijo cíclico se forma con las muestras de la última parte de la señal en el dominio del tiempo, este tramo se coloca al inicio del símbolo, su duración debe ser al menos el tiempo máximo de exceso de retardo del canal [35], en general es de $1/4$ del tiempo de la duración del símbolo OFDM.

La colocación del prefijo se la realiza en el transmisor y en el receptor es retirado. Gracias al prefijo cíclico se evita el efecto del ISI e ICI, además permite mantener la ortogonalidad de las sub-portadoras durante la transmisión.

En la Figura 1.18 se representa el prefijo cíclico agregado al símbolo.

En la Figura 1.19 se presenta la pérdida de bits de los símbolos cuando no se transmite con prefijo cíclico y en la Figura 1.20 se observa lo que el receptor recibe al agregar el prefijo cíclico para un canal multi-trayecto.

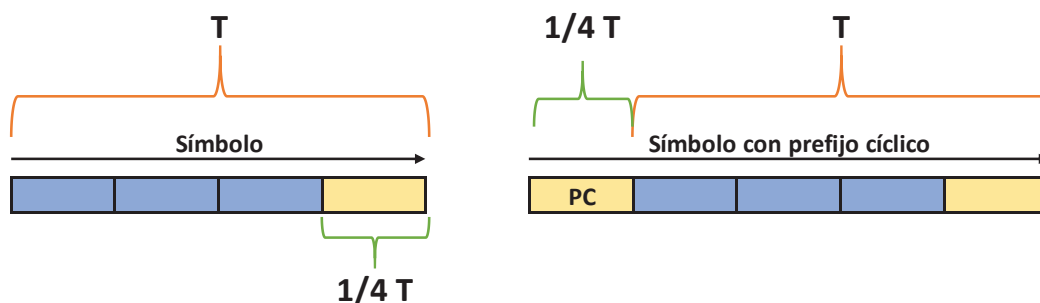


Figura 1.18 Agregación del prefijo cíclico al símbolo OFDM.

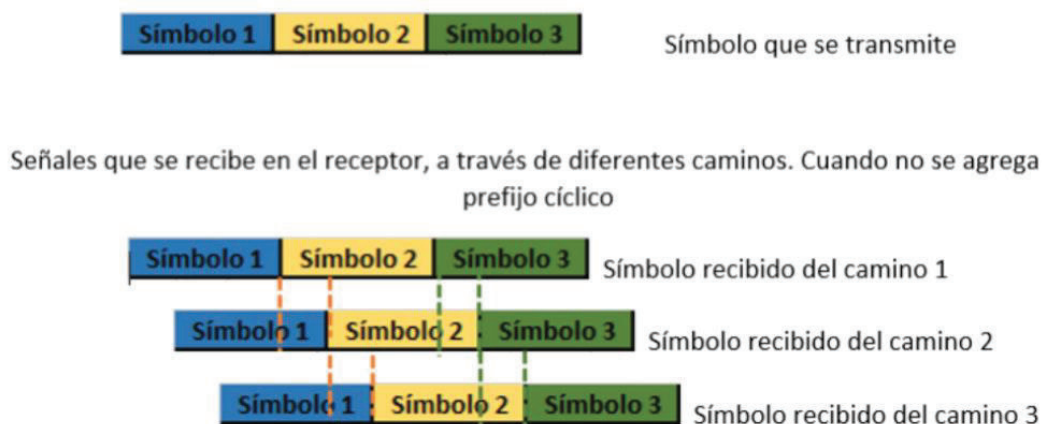


Figura 1.19 Recepción del símbolo sin prefijo cíclico [36]

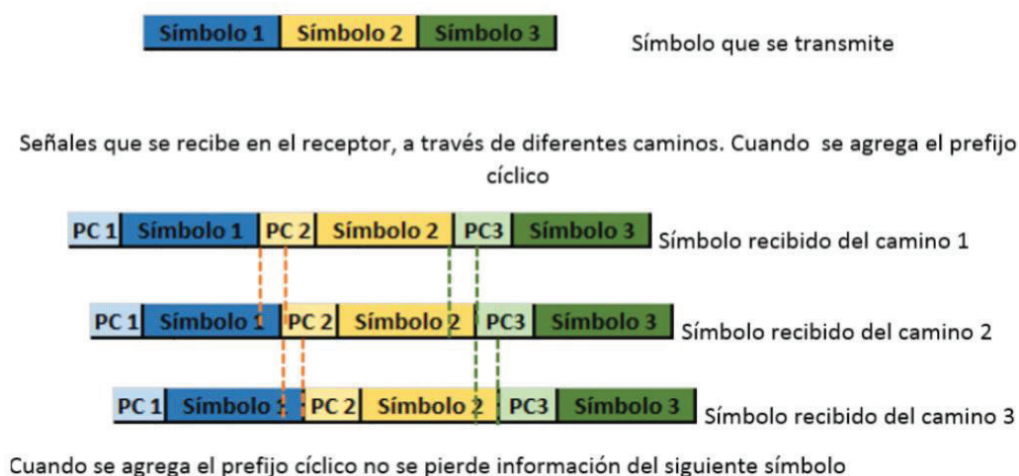


Figura 1.20 Recepción del símbolo con prefijo cíclico en un multi-trayecto [36].

1.7.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE OFDM

Entre las ventajas de OFDM se encuentra: robustez ante canales con frecuencia selectiva, además, con la agregación del prefijo cíclico se elimina el efecto del ISI e ICI permite recuperar errores con el uso de la codificación de canal y entrelazado, es muy eficiente debido al empleo de FFT. Además, OFDM no es tan sensible a la dispersión de canal por lo que es muy empleado en ambientes con multi-propagación [37], la

ecualización es más simple que en los sistemas de una portadora. También proporciona protección contra el ruido impulsivo [38]. Y una señal OFDM proporciona ventaja cuando existe desvanecimiento selectivo en frecuencia frente a una señal simple con FDM [39].

Sin embargo, también existen desventajas: es sensible al efecto doppler y a errores de sincronización (en tiempo o en frecuencia). La señal OFDM transmitida presenta ocasionalmente picos de potencia elevados, lo que en sistemas con amplificadores no lineales la señal OFDM puede ser recortada causando distorsiones indeseadas [39].

1.8 CANAL INALÁMBRICO

Cuando se habla de comunicaciones inalámbricas, la información se transmite a través de la interfaz aire. Al usar un canal inalámbrico hay que tener en cuenta los problemas que se presentan debido a su naturaleza aleatoria, como por ejemplo: ruido blanco, multi-trayecto, desvanecimiento, efecto doppler, efecto sombra, etc.

Estos fenómenos se explicarán brevemente y de manera general por no ser objeto de estudio en el presente proyecto y simplemente conectará el transmisor y receptor a través de un canal AWGN, por lo tanto se revisará dicho canal.

1.8.1 Canal AWGN

El canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) o canal con ruido blanco Gaussiano es estadísticamente aleatorio y abarca todo el rango de frecuencias. El ruido blanco se caracteriza por ser aditivo para el canal inalámbrico, de densidad espectral constante y distribución de amplitud Gaussiana [40]. Es un modelo de canal simple pues no considera problemas como dispersión, no linealidades, selectividad de frecuencia e interferencias.

1.8.2 Efectos del Canal

El canal inalámbrico experimenta diferentes fenómenos, los cuales se explicarán a continuación:

- a) **Efecto Doppler:** es un fenómeno que se produce cuando la fuente se encuentra en movimiento, provocando un cambio aleatorio y desplazamiento de las frecuencias. Como consecuencia de ello existe un ensanchamiento del espectro de la señal. Es decir, el efecto Doppler es la medida de la velocidad con la que las características del canal cambian mientras que el tiempo de coherencia es el tiempo que el canal permanece constante. Esto produce desvanecimiento rápido y desvanecimiento lento. Cuando la velocidad de símbolo es menor que los cambios de canal tenemos desvanecimiento rápido y si ocurre lo contrario existe desvanecimiento lento [41].

- b) **Efecto sombra o Shadowing:** Cuando el receptor se encuentra detrás de obstáculos existe un efecto sombra y se reduce la potencia de la señal que fue transmitida, además que viaja a través de diferentes caminos ya que no existe línea de vista directa entre el transmisor y receptor [42].

- c) **Efecto multi-trayectoria:** Cuando existe la presencia de muchos objetos entre el transmisor y receptor, escenario común en ciudades y carreteras y no hay línea de vista entre el transmisor y receptor, las señales se reflejan generando problemas de ISI y desvanecimiento [34], si el retraso producido es mayor a un símbolo tenemos desvanecimiento selectivo en frecuencia, pero si es menor tenemos desvanecimiento plano (el objetivo es conseguir desvanecimiento plano para no tener pérdida de información) [39]. Como se observa en la Figura 1.21

En el receptor estas señales son recibidas a través de diferentes trayectos, pero las señales han viajado en distintas direcciones por lo que también llegan en distintos

tiempos; la señal con línea de vista directa es la que llega en menor tiempo, incluso algunas señales se cancelan o llegan con diferente amplitud o desfasadas [39].

De este fenómeno se produce fading de frecuencia selectiva o plano. Es frecuencia selectiva cuando $B_c < B_w$, siendo B_c ancho de banda coherente y B_w el ancho de banda de la señal, el objetivo es tener un desvanecimiento plano: $B_c > B_w$ para evitar ISI [39].

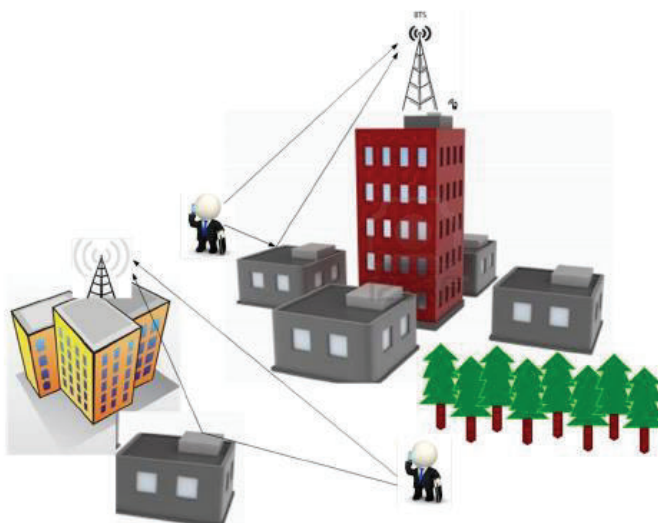


Figura 1.21 Propagación multi-trayectoria [39].

1.9 MEDICIÓN DEL RENDIMIENTO DE LA COMUNICACIÓN

Para medir el rendimiento de una comunicación se puede realizar el análisis con base en dos resultados, dichos resultados son la BER (*Bit Error Rate*) y el PER (*Packet Error Rate*) obtenidos a partir de diferentes valores de SNR (*Signal to Noise Ratio*).

La PER, al igual que la BER son medidas para analizar el rendimiento de una comunicación.

- **BER:** corresponde al número de bits errados en la comunicación en función al número total de bits transmitidos.

- **PER:** corresponde al número de paquetes errados en la comunicación en función al número total de paquetes.
- **SNR:** es la proporción de la cantidad de potencia de la señal que se transmite y la potencia de ruido que degrada la señal, se mide en dB.

Para el caso de una modulación M-PSK, la BER se obtiene a través de la fórmula dada en la ecuación (1.12).

$$z = \sin\left(\frac{\pi}{M}\right) \cdot \sqrt{\log_2 M} \sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \quad (1.10)$$

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{C}{N} \times \frac{B}{f} \quad (1.11)$$

$$P(e) = \frac{1}{\log_2 M} \operatorname{erf}(z) \quad (1.12)$$

Donde $\operatorname{erf}(z)$ corresponde a la función de error, M corresponde al número de fases. E_b/N_o es la relación de densidad de potencia de energía por bit a ruido, C/N es la relación de potencia de portadora a ruido, B/f_o es la relación del ancho de banda de ruido a la tasa de bit y $P(e)$ corresponde a la probabilidad de error.

Es importante mencionar que $P(e)$ y BER a veces se emplea en forma intercambiable, sin embargo, tienen significados un poco diferentes. El primero es la expectativa teórica o matemática de la tasa de error de bit y la BER es un registro empírico del rendimiento de error.

Para el caso de la modulación M-QAM, la BER se obtiene a través de la fórmula dada en la ecuación (3.6).

$$d = \frac{\sqrt{2}}{L-1} D \quad (1.13)$$

$$z = \frac{\sqrt{\log_2 L}}{L-1} \sqrt{\frac{Eb}{No}} \quad (1.14)$$

$$P(e) = \frac{1}{\log_2 L} \binom{L-1}{L} \operatorname{erfc}(z) \quad (1.15)$$

Donde d es la distancia de error, L corresponde al número de niveles en cada eje y D es la amplitud pico de la señal.

Para calcular el PER se emplea las siguientes fórmulas.

$$[PER(i)] = 1 - (1 - BER(i))^L \quad (1.16)$$

$$L = \text{length}(\text{señal}) \quad (1.17)$$

Donde L , corresponde a la longitud del paquete que se transmite.

CAPÍTULO 2: DISEÑO

En este capítulo se presenta el proceso de programación para el transmisor y receptor para una comunicación de redes vehiculares. Además se presenta la programación para la simulación del canal inalámbrico AWGN, para lo cual se utiliza la interfaz gráfica GUI de MATLAB.

2.1 Diseño de la pantalla de presentación

La simulación inicia con una ventana de presentación como se muestra en la Figura 2.1. También, se ha creado una pantalla de simulación en la cual el usuario puede seleccionar varios parámetros de la capa física del estándar IEEE 802.11p con el fin de calcular la BER y PER.

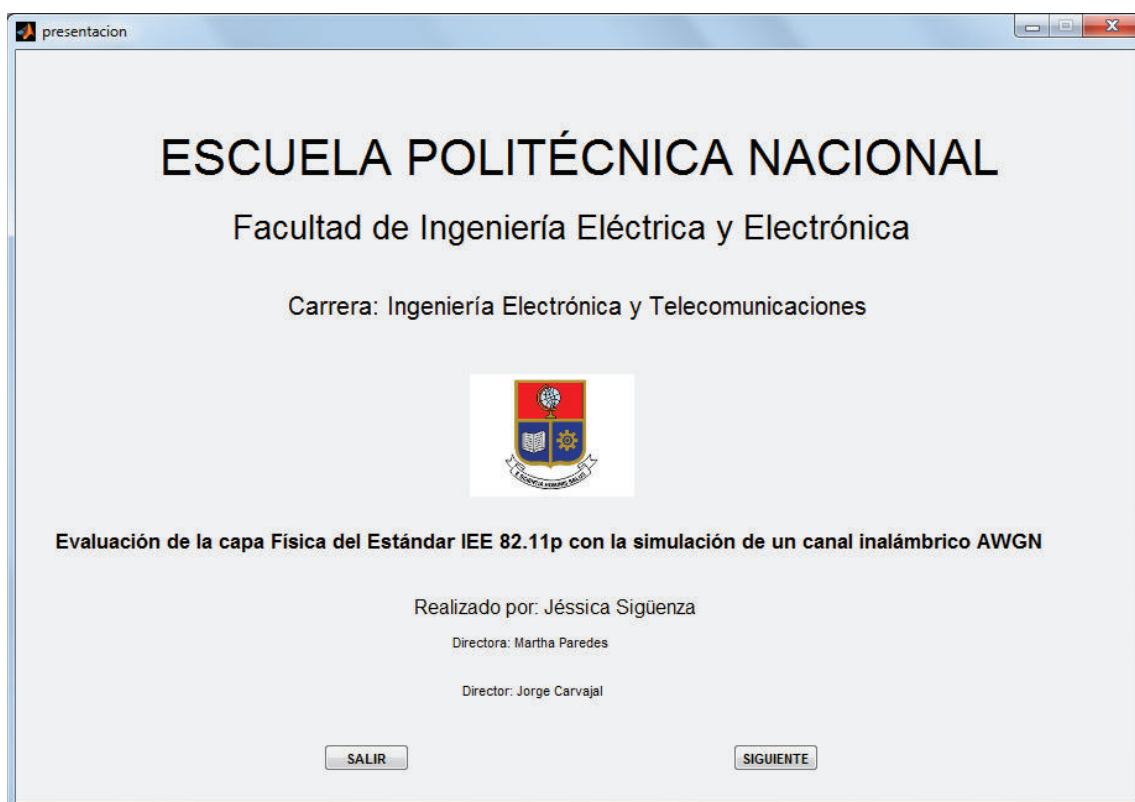


Figura 2.1 Pantalla de inicio

Los comandos utilizados para programar en la interfaz de presentación se detallan en la Tabla 2.1 [43]:

Tabla 2.1 Comandos empleados en el botón Axes.

Comando	Descripción
imread ('name.png')	Lee la imagen llamada: " name ", del formato especificado, en este caso es de formato png.
imshow (I)	Muestra la imagen llamada: I .
close ('Título')	Cierra la ventana de nombre ' Título '
run ('Nombre de la ventana')	Abre la ventana llamada: " Nombre de la ventana ".

2.2 Diseño de pantalla de simulación

En la pantalla de simulación, el usuario podrá seleccionar el tipo de demodulación, tasa de codificación, el tipo de resultado que desea obtener (con aleatorización, codificación, modulación, entrelazado, bloque OFDM, etc.). Además, el rango de SNR con el cual se mostrarán los resultados y el diagrama de constelación. En la Figura 2.2 se observa la pantalla de simulación.

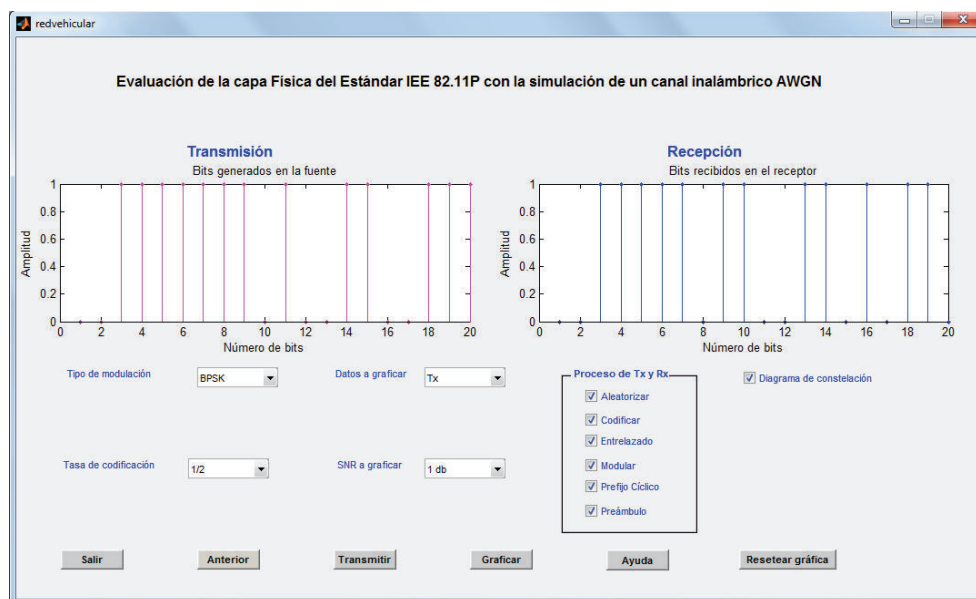


Figura 2.2 Pantalla de simulación

Para programar estos botones de *check box*: Aleatorizar, Codificar, Entrelazado, Modular, Prefijo Cíclico, Preámbulo, se emplearon los comandos **get** y **save**, cuyos detalles se presentan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Comandos para guardar los valores seleccionados por el usuario [43]

Comando	Descripción
get(hObject,'Value')	Obtener valor seleccionado
save ('variable')	Guarda dato con el nombre variable

La programación y resultados de los botones: Salir, Anterior, Transmitir, Graficar, Ayuda y Resetear gráfica se detallan a continuación.

El botón de Ayuda, permite al usuario conocer las tasas de codificación con el tipo de modulación establecidas por el estándar IEEE 802.11p, para dicha programación se empleó el comando **helpdlg** [43], como se muestra en la Tabla 2.3. Mientras que en la Figura 2.3 se muestra el resultado de la programación.

Tabla 2.3 Comando usado para generar un mensaje de Ayuda.

Comando	Descripción
Helpdlg (HELPSTRING,DLGNAME)	Muestra el mensaje HELPSTRING, y DLGNAME es el título de la ventana.

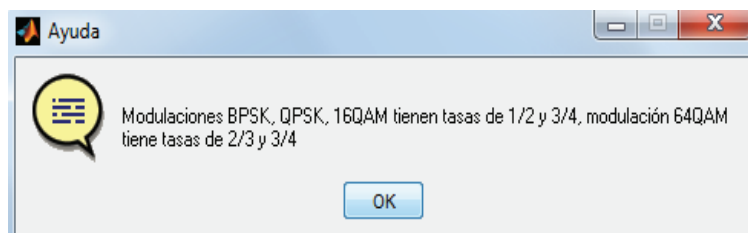


Figura 2.3 Mensaje de ayuda

Para el botón: “Resetear gráfica” se emplea el comando **cla RESET** [43].

En la tabla 2.4 se muestra los detalles de este comando.

Tabla 2.4 Comando usado para borrar la gráfica.

Comando	Descripción
cla (AX,'RESET)	Resetea los objetos y las propiedades de los Axes, excepto posiciones y unidades.

El usuario puede graficar el diagrama de constelación para valores de SNRs de 1dB, 10 dB y 40 dB.

- **Mensajes de error en los datos seleccionados para la comunicación:**

En primer lugar, el usuario debe seleccionar la tasa de transmisión y la modulación, si el usuario no selecciona uno de estos datos aparece un mensaje de error como de la Figura. 2.4; también, hay que verificar que los datos seleccionados sean los valores admitidos en el estándar IEEE 802.11p en caso de no serlo se muestra un mensaje de error como el de la Figura. 2.5.

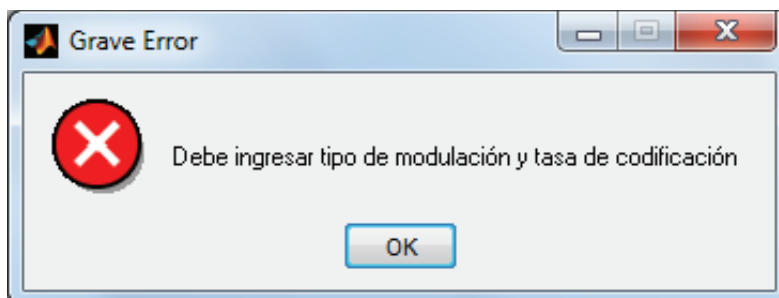


Figura 2.4 Mensaje de error cuando el usuario no seleccionó los datos.

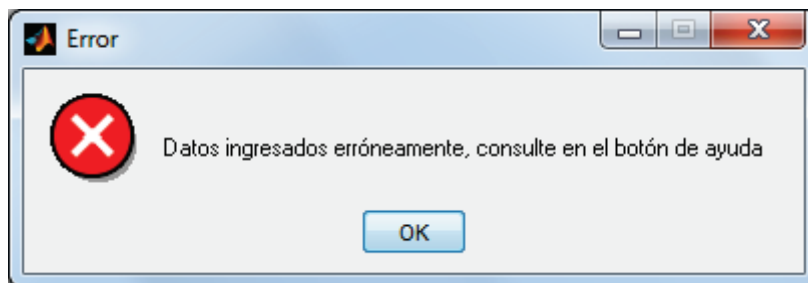


Figura 2.5 Mensaje de error cuando el usuario seleccionó los datos incorrectamente.

La Figura 2.6 describe el diagrama de flujo y la programación realizada para validar los datos seleccionados por el usuario.

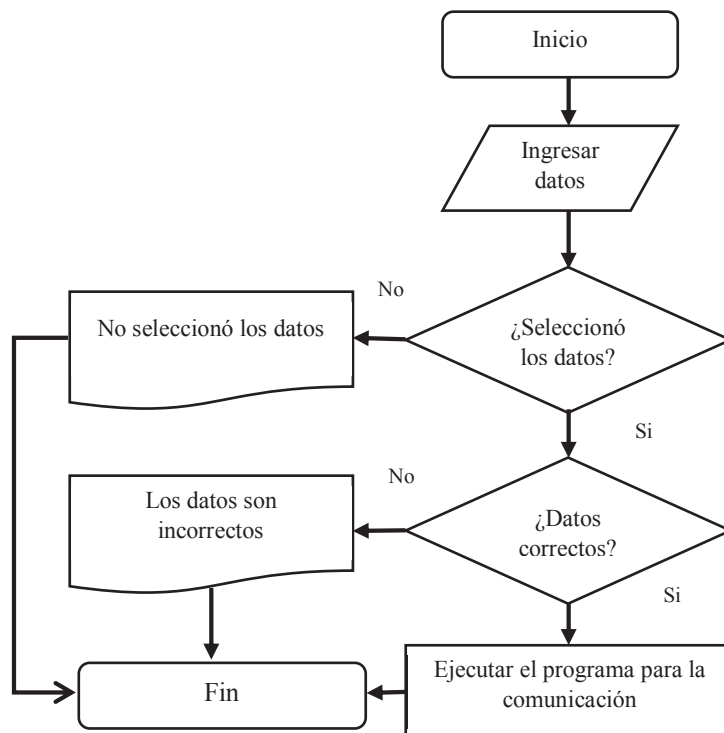


Figura 2.6 Diagrama de flujo para validar los datos seleccionados por el usuario

- **Mensajes de error cuando se grafica un proceso de la comunicación:**
 Cuando el usuario quiere graficar sin seleccionar los datos que se desean obtener o el valor de SNR con los que quiere graficar los datos, aparece un mensaje de error, que se puede observar en la Figura 2.7.

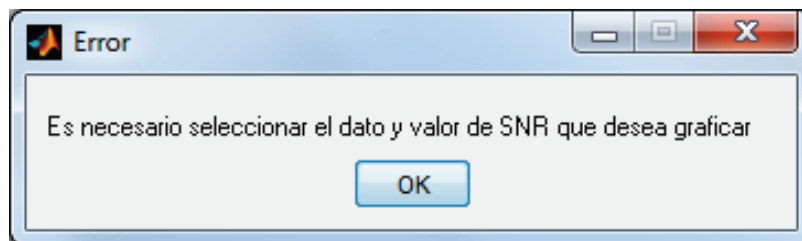


Figura 2.7 Mensaje de error cuando no se selecciona ambos datos.

En la Figura 2.8 se presenta el diagrama de flujo que se sigue para presentar gráficamente los resultados seleccionados.

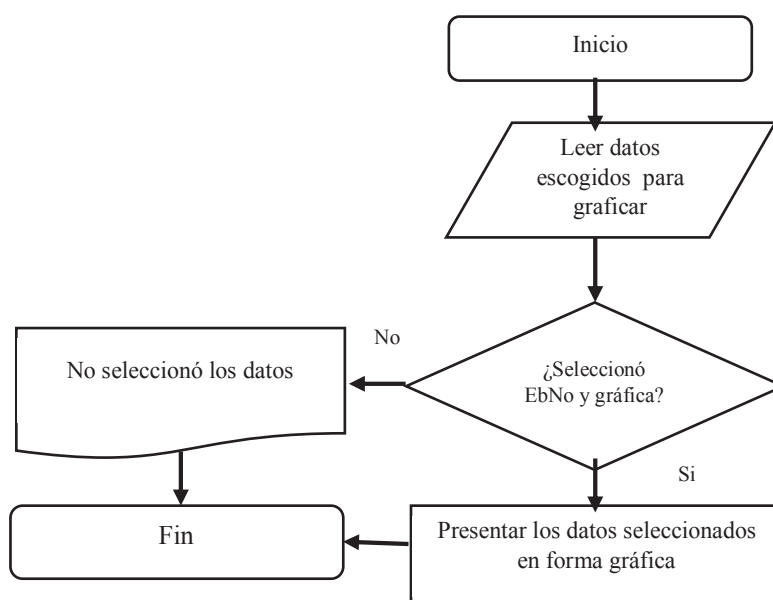


Figura 2.8 Diagrama de flujo para graficar los datos con un valor de SNR seleccionado.

- **Programación de la comunicación:** Para la simulación de la capa física del estándar IEEE 802.11p, es necesario dividir el proceso de comunicación en: transmisión, canal inalámbrico y recepción. Este proceso se observa en la Figura 2.9.

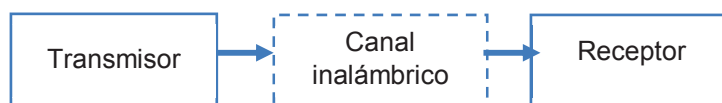


Figura 2.9 Proceso de comunicación IEEE 802.11p.

A fin de contar con un análisis más profundo de la capa física se divide el proceso de transmisión y recepción mediante bloques. A continuación se detalla las características de cada bloque.

Con objeto de presentar los resultados en términos de BER vs SNR y PER vs SNR es importante mencionar que el proceso de transmisión y recepción se realiza primero para SNR=1 dB, una vez terminado se ejecuta el mismo procedimiento para SNR=2 dB y sucesivamente hasta llegar a 40 dB.

En la Figura 2.10 se presenta el diagrama de flujo que sigue la programación para presentar los resultados.

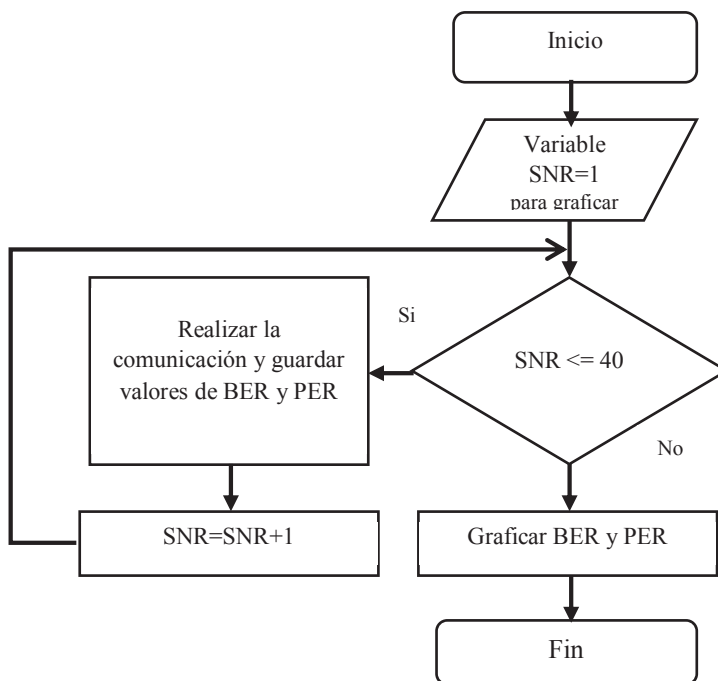


Figura 2.10 Diagrama de flujo para realizar la comunicación hasta SNR de 40 dB.

2.2.1. TRANSMISOR

En el transmisor se realizan los procesos de aleatorización, codificación, entrelazado, modulación, modulación OFDM, transformada Inversa de Fourier, ensamblado, agregación del prefijo cíclico y agregación del preámbulo (ver la Figura 2.11).

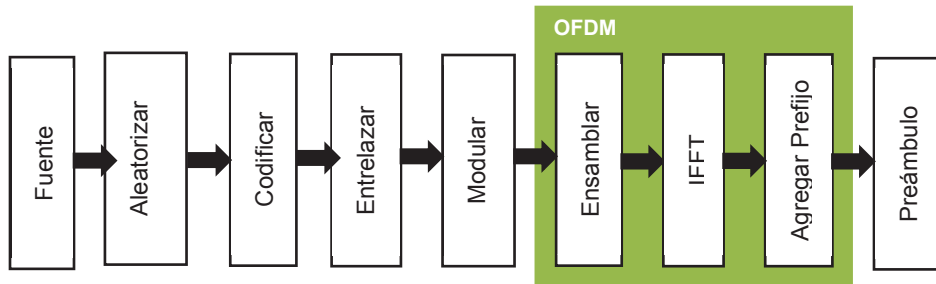


Figura 2.11 Diagrama de bloques del transmisor.

2.2.1.1. FUENTE

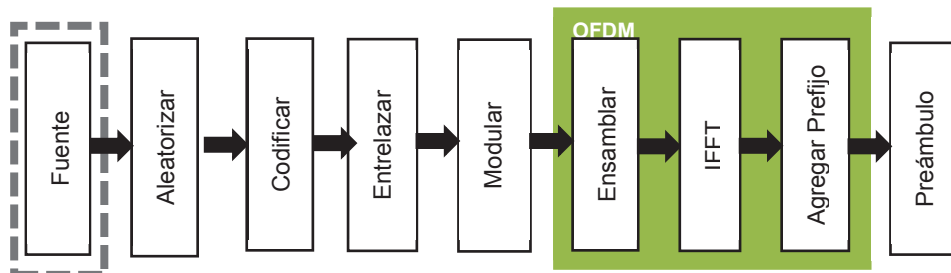


Figura 2.12 Proceso generar fuente del bloque de transmisión.

La fuente se forma de una secuencia de 1L y 0L, puede ser desde un único valor hasta miles de bits. Para simular la fuente en MATLAB se genera bits (1L y 0L) aleatoriamente, los cuales serán necesarios para formar un símbolo OFDM.

Primero, se asigna el valores de M ($M = 2^m$), donde M corresponde al número de símbolos distintos, el valor de $M = 2$ corresponde a la modulación BPSK, $M = 4$ a QPSK, $M = 16$ a 16-QAM y $M = 64$ a 64-QAM.

Segundo, se asigna el factor de normalización correspondiente para cada modulación.

En el diagrama de flujo de la Figura 2.13 se presenta la secuencia de programación para almacenar el valor de M seleccionado por el usuario y el factor de normalización.

En las Tablas 2.5 y 2.6 se muestran los comandos empleados para almacenar las variables. Mientras que la Tabla 2.7 muestra los comandos utilizados para generar la fuente [43]:

Tabla 2.5 Comando utilizado para cargar una variable guardada.

Comando	Descripción
S = load(FILENAME)	Cargar las variables de un archivo *.mat en una estructura de matriz.

Tabla 2.6 Comando utilizado para generar acuerdos condicionales.

Comando	Descripción
if expression statements ELSEIF expression statements ELSE statements END	Ejecuta proceso de acuerdo a condicionales, se ejecuta la primera expresión si se cumple la condición caso contrario debe cumplirse la otra expresión. Existen condiciones anidadas, es decir un condicional dentro de otro.

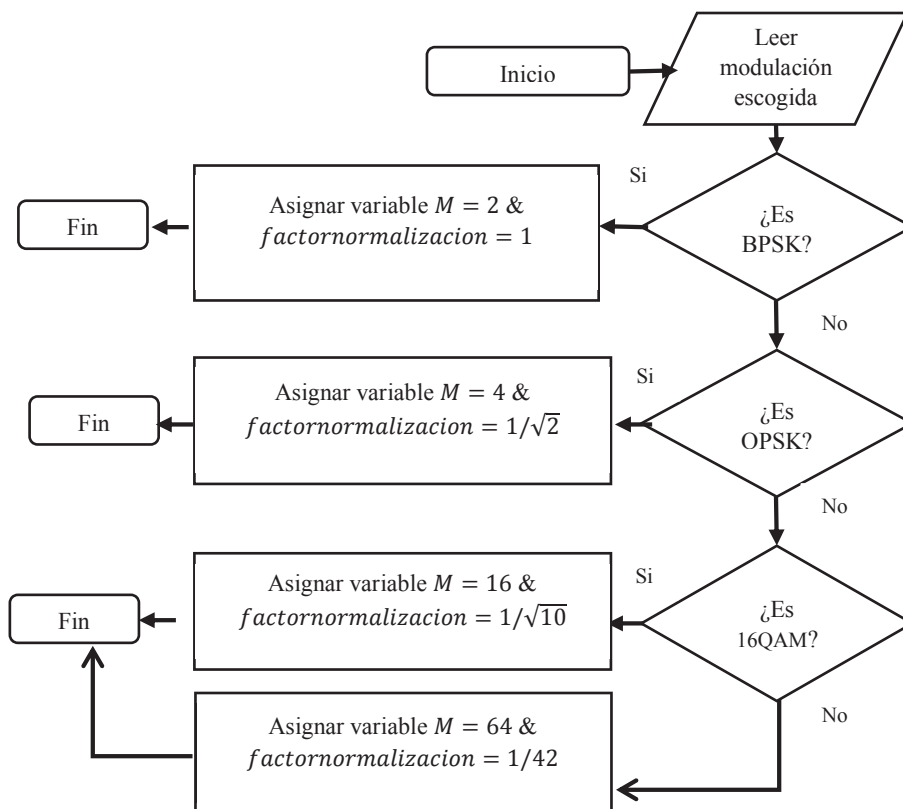


Figura 2.13 Diagrama de flujo para almacenar el valor de M y el factor de normalización según la selección del usuario.

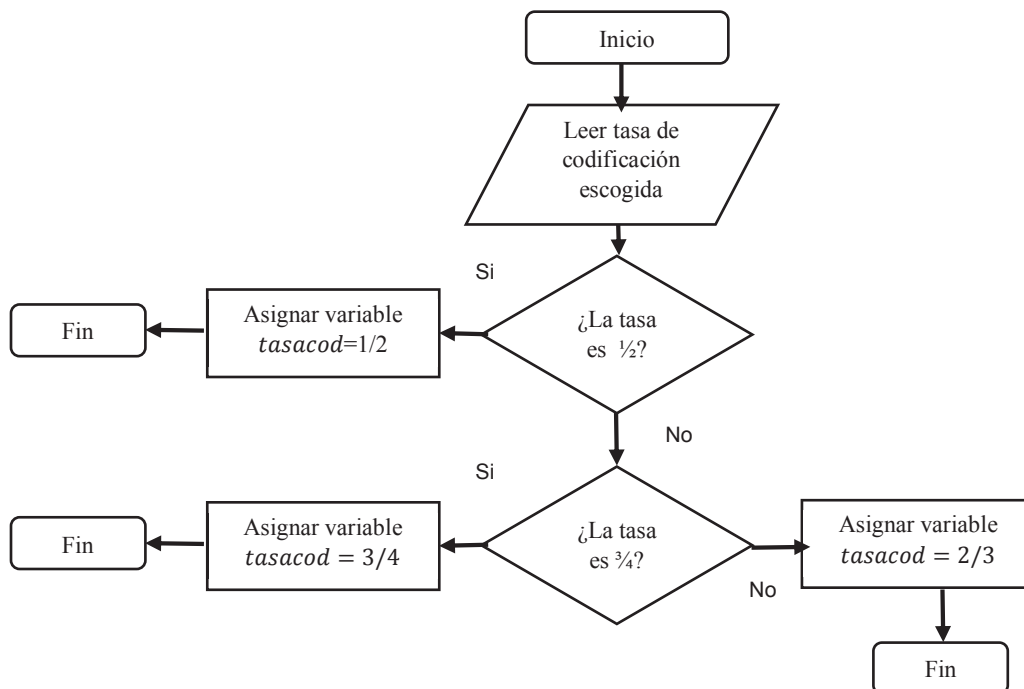


Figura 2.14 Diagrama de flujo para guardar el valor de la tasa de codificación.

De forma similar a la asignación del valor M se debe asignar el valor de la tasa de codificación asociada a cada modulación (mirar Tabla 1.4) en el diagrama de flujo de la Figura 2.14 se presenta la asignación de esta variable.

Para generar la fuente en MATLAB, se utiliza **rand** y **round**.

Tabla 2.7 Comandos empleados en MATLAB para generar la fuente.

Comando	Descripción
rand ([M,N])	Genera una matriz de dimensiones $M \times N$ con valores aleatorios en el intervalo de 0 a 1 con una distribución normal.
round (X)	Redondea los elementos de X al valor más cercano.

ALEATORIZADOR

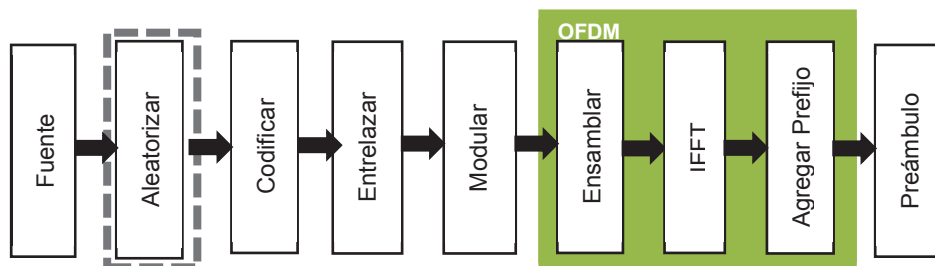


Figura 2.15 Proceso para aleatorizar del bloque de transmisión.

Para realizar el proceso de aleatorización, en MATLAB se define los valores del polinomio generador y el estado inicial y mediante la operación XOR se realiza la aleatorización.

A continuación, en la Tabla.2.8 se muestra la tabla de verdad de XOR, además de un ejemplo del proceso de aleatorización para 5 bits en la Figura 2.16.

Tabla 2.8 Tabla de verdad de XOR

Entrada 1	Entrada 2	XOR
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

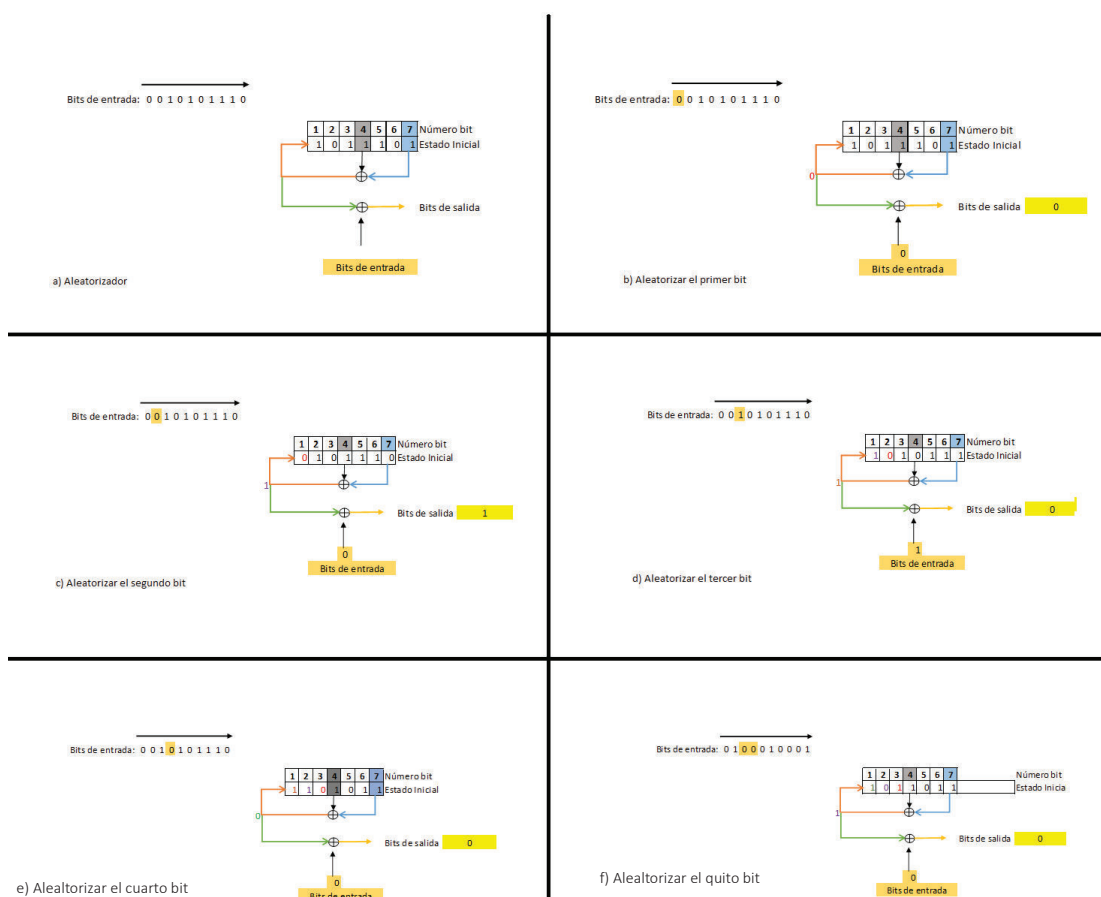


Figura 2.16 Proceso para aleatorizar.

En la Tabla 2.9 se detalla los comandos empleados para realizar el proceso de aleatorización.

Tabla 2.9 Comandos para aleatorizar

Comando	Descripción
xor (S,T)	Es la diferencia lógica de los elementos S y T, el resultado es 1L cuando S y T son diferentes, y 0L si S y T son iguales.

2.2.1.2. CODIFICADOR

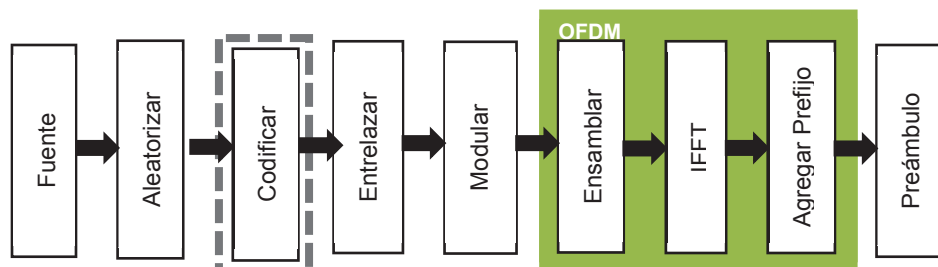


Figura 2.17 Proceso para codificar del bloque de transmisión.

Para simular el codificador, en MATLAB, se realizan los procesos: perforado y codificación.

- **Perforado:** el perforado se utiliza para el proceso de codificación convolucional. En la Tabla 2.10 se puede observar los bits de perforado correspondientes con las tasas de codificación establecidas en el estándar IEEE 802.11p [2].

Tabla 2.10 Perforado para las tasa de transmisión definidos en el estándar IEEE 802.11p.

Tasa de codificación	Perforado
$\frac{1}{2}$	1
$\frac{2}{3}$	[1 1 1 0]
$\frac{3}{4}$	[1 1 1 0 0 1]

Antes de programar la codificación convolucional en MATLAB, es necesario crear la estructura de Trellis, que se la realiza con el comando **poly2trellis** [43], en la Tabla 2.11 se presenta la información de este comando.

Tabla 2.11 Comando utilizado para generar la estructura de Trellis.

Comando	Descripción
poly2trellis (CONSTRAINTLENGTH, CODEGENERATOR)	Convierte el código polinomial del codificador convolucional a la estructura de Trellis.

La codificación convolucional en MATLAB se la realiza mediante el comando **convenc** [43], como se muestra detalladamente en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12 Comando utilizado para generar la codificación.

Comando	Descripción
convenc (MSG, TRELIS, PUNCPAT)	Codifica el vector binario MSG con codificador convolucional con la estructura de TRELIS y se especifica el camino de perforado PUNCPAT.

En Figura 2.18 se muestra el diagrama de flujo seguido para la programación del proceso de selección del perforado según la tasa de codificación.

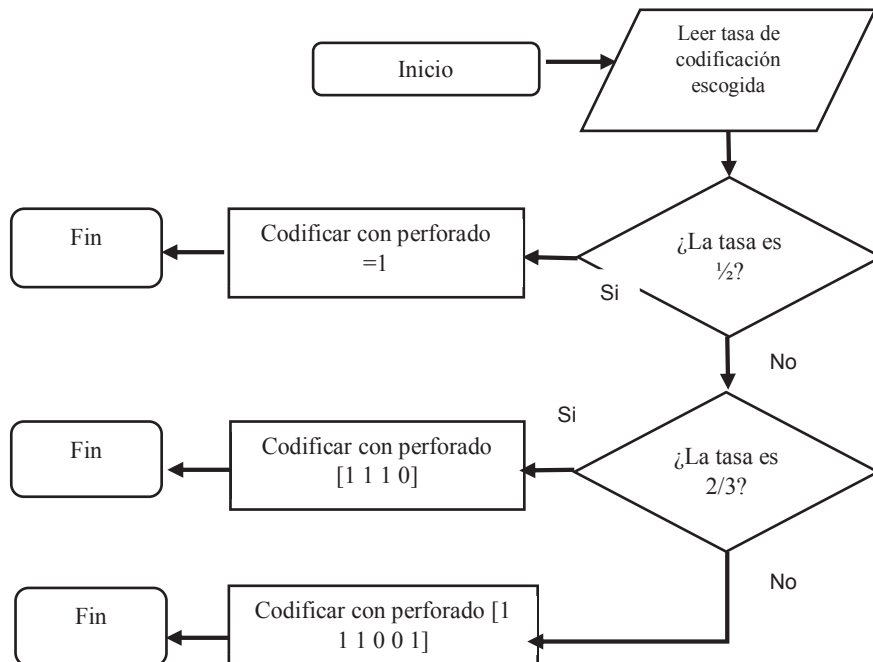


Figura 2.18 Diagrama de flujo para la codificación con perforado según la tasa de codificación.

2.2.1.3. ENTRELAZADO

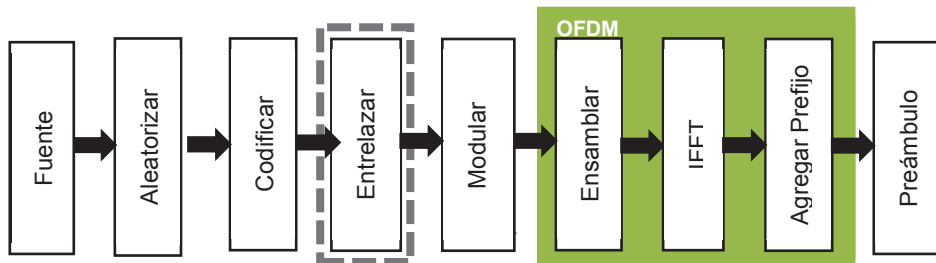


Figura 2.19 Proceso para entrelazar del bloque de transmisión.

El proceso de entrelazado protege de los errores de ráfagas que son muy frecuentes en trayectorias multi-camino, en OFDM es posible realizar el entrelazado en tiempo y en frecuencia, gracias a esto, los errores de ráfagas se ven aisladas en cada palabra código (técnica de diversidad en tiempo), además como se colocan los bits consecutivos en portadoras no adyacentes (técnica de diversidad en frecuencia) se permite que las atenuaciones que se produzcan en los bits sean independientes.

Si se tiene varios símbolos OFDM, el proceso de entrelazado se realiza en grupos de 48, 96, 192, y 288 bits para las modulaciones BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM respectivamente. En el diagrama de flujo de la Figura 2.20 se muestran las secuencias de programación seguidas para este proceso.

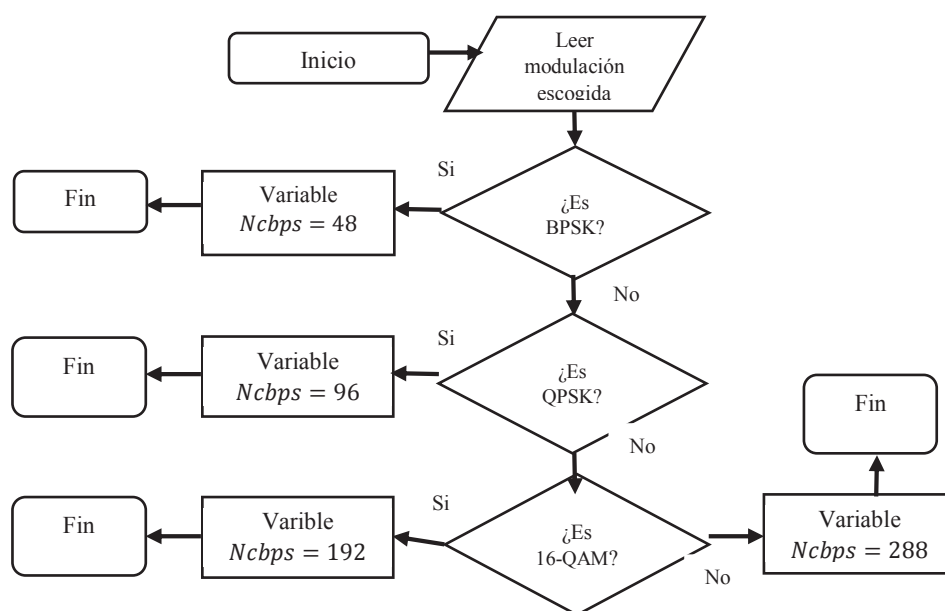


Figura 2.20 Diagrama de flujo para asignar el valor de N_{cbps} para el entrelazado.

Donde la variable N_{cbps} es el número de bits de cada bloque a entrelazar (Ver Tabla 1.4).

No siempre el número de bits generados va a coincidir con el valor de N_{cbps} , por ello es necesario conocer el número de veces que el proceso de entrelazado se debe

realizar para entrelazar todos los bits, si no es un número entero hay que realizar relleno de 0L.

En el ejemplo de la Figura 2.21 se realiza 3 veces el proceso de entrelazado y sin relleno de 0L: se toma un número de bits correspondientes al valor de N_{cbps} , este primer bloque de bits se entrelaza, posteriormente, se toman los siguientes bits la cantidad de bits corresponde al mismo valor N_{cbps} y se realiza el entrelazado nuevamente, este proceso se lo repite hasta realizar el entrelazado a todos los bits recibidos después del proceso de codificación.

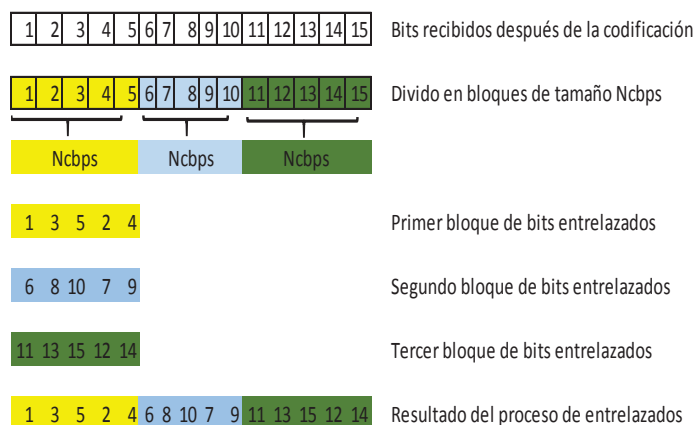


Figura 2.21 Proceso de entrelazado.

En los diagramas de flujo de la Figura 2.22 se muestra la secuencia de programación que se ha seguido para realizar el entrelazado en MATLAB, también, se calcula el número de veces que se va a realizar el proceso de entrelazado y se repite dicho proceso hasta entrelazar todos los bits que ingresan. Se incrementan las variables: p , n y u para tomar el siguiente bloque de bits que se desea entrelazar.

En la Figura 2.23 se muestra el proceso para verificar si es necesario o no realizar relleno con 0L antes del entrelazado. En caso que sea necesario el relleno se procede a calcular el número de 0L necesarios cuando se transmite un único símbolo o varios símbolos y se agrega el relleno al símbolo o a los símbolos.

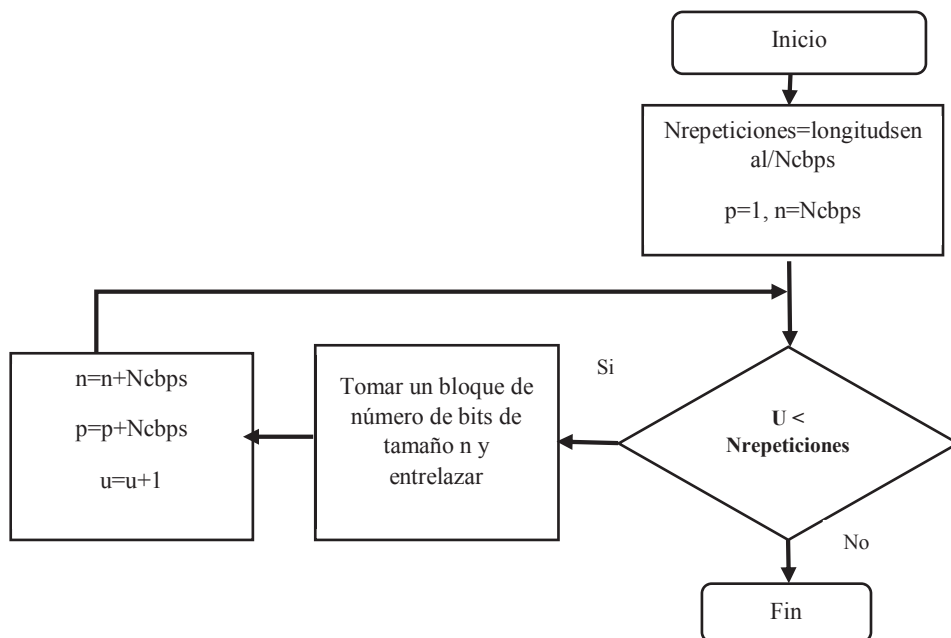


Figura 2.22 Diagrama de flujo para entrelazar todos los bits recibidos.

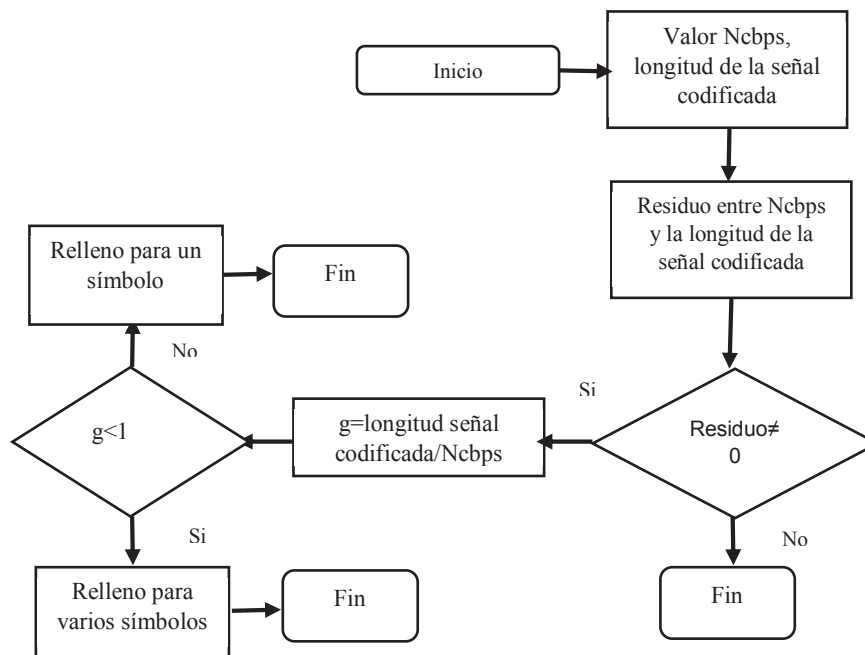


Figura 2.23 Diagrama de flujo para realizar el relleno antes del entrelazado.

2.2.1.4. MODULACIÓN

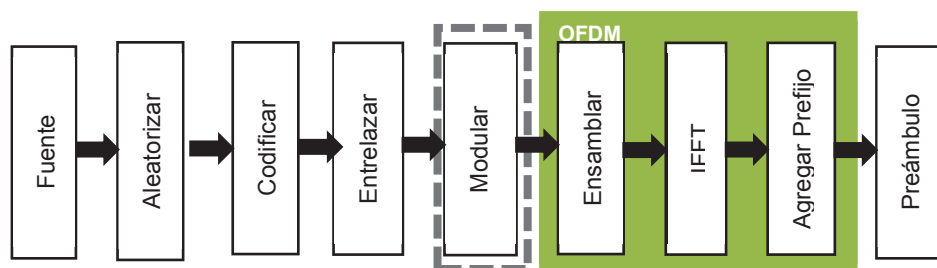


Figura 2.24 Proceso para modular del bloque de transmisión.

Los datos recibidos después del proceso de entrelazado llegan en serie y para colocarlos en las sub-portadoras es necesario poner los datos en paralelo. A cada arreglo de bits que conforma una fila se le asigna un número decimal y así se obtiene los diferentes valores de la modulación multi-nivel.

Finalmente se construye el modulador. En las Tablas 2.13-2.16 se observa los detalles de los comandos [43].

Tabla 2.13 Comando MATLAB para pasar de serie a paralelo.

Comando	Descripción
reshape(X,M,N)	Retorna una matriz de dimensiones $M \times N$, formado con los elementos de X .

Tabla 2.14 Comando MATLAB para convertir de binario a decimal.

Comando	Descripción
D=bi2de(B, MSBFLA)	Convierte un vector (B) binario a un valor decimal (D), si B es una matriz la conversión se realiza fila a fila. Además MSBFLAG me permite orientar la señal de entrada, siendo 'left-msb' para orientar el bit más significativo a la izquierda, mientras que 'right-msb' lo orienta a la derecha (este es el valor por defecto).

Tabla 2.15 Comandos MATLAB para crear un moden para cada tipo de modulación.

MODULACIÓN	Comando en MATLAB
BPSK	modem.pskmod
QPSK	modem.pskmod
16-QAM	modem.qammod
64-QAM	modem.qammod

Tabla 2.16 Comandos MATLAB usados para la modulación.

Comando	Descripción
modem.qammod('M', 64, 'PHASEOFFSET', 0, 'SYMBOLORDER', 'BINARY', ... 'INPUTTYPE', 'INTEGER')	Construye un modulador QAM con los valores de las propiedades establecidos.
modulate (H, X)	Se modula los datos X con el esquema demodulación H . (para nuestro caso)

Es importante describir cada una de las propiedades que se puede definir en el modulador:

M : puede tomar los valores: 2 (si es BPSK), 4 (si es QPSK), de 16 (si es 16-QAM), de 64 (si es 64-QAM).

PHASEOFFSET: desfasa la fase (en radianes) de la constelación. Para el ejemplo este valor es de 0.

SYMBOLORDER: es un tipo de asignación de los bits con los puntos de constelación, se puede escoger entre 3 opciones:

- **Binary**: para mapeo binario
- **Gray**: para mapeo Gray
- **User-defined**: el usuario define

En el presente proyecto, como el estándar IEEE 802.11p recomienda un formato en codificación Gray, se escogió la segunda opción.

SYMBOLMAPPING: es una lista de valores pertenecientes desde el 0 al $M-1$ correspondientes a la constelación ideal. Solo se escribe esta propiedad cuando se ha seteado User-defined. Para el propósito del proyecto no se setea User-defined, por lo tanto tampoco se escribe en esta opción.

INPUTTYPE: tipo de entrada a ser procesada por el modulador. Se puede escoger entre 2 opciones:

- **Entrada bit:** la salida es binaria
- **Entrada integer:** la salida es símbolo, esta opción se tiene por defecto.

En el diagrama de flujo de la Figura 2.25 se muestra la programación seguida para modular los datos.

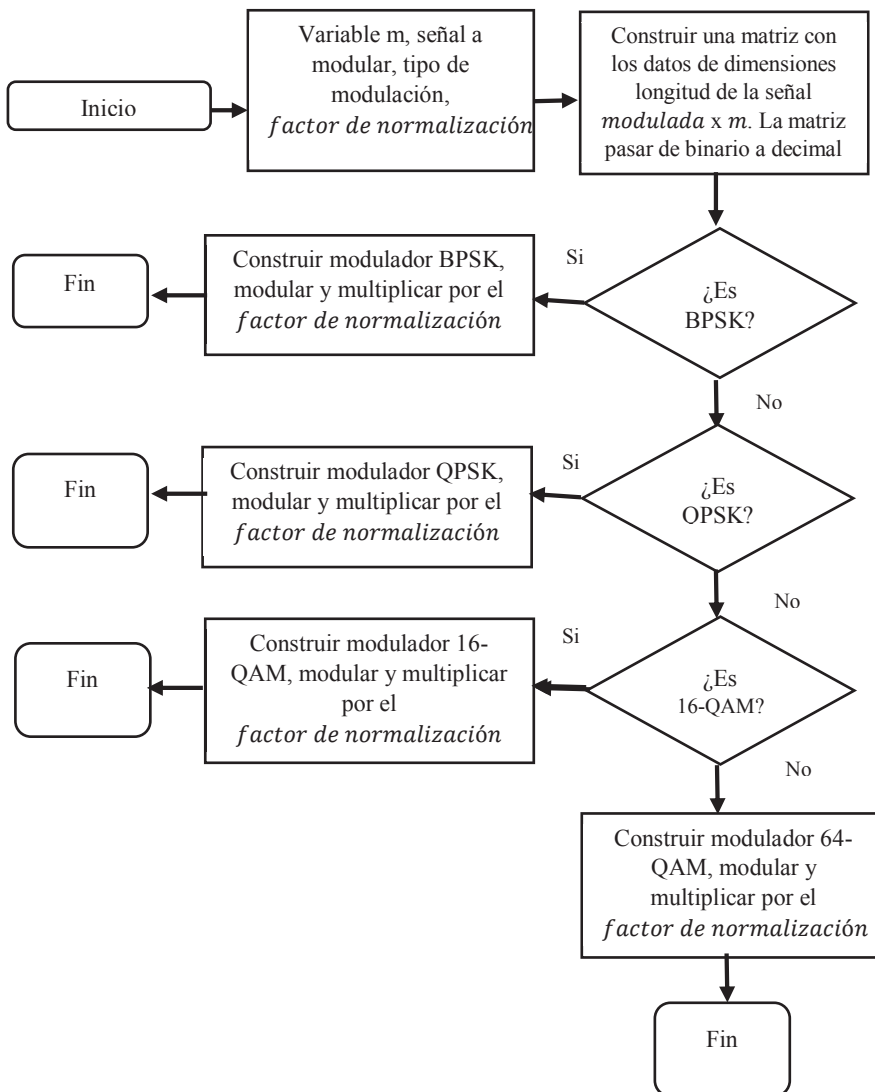


Figura 2.25 Diagrama de flujo para la modulación.

2.2.1.5. CONSTRUCCIÓN DEL SÍMBOLO OFDM

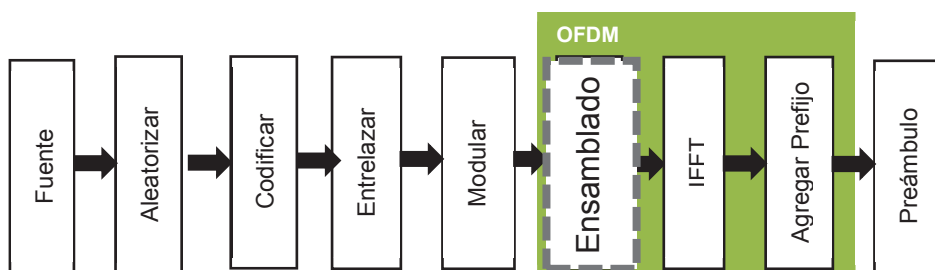


Figura 2.26 Proceso para ensamblar del bloque de transmisión.

Para construir el símbolo OFDM es necesario crear las sub-portadoras de datos y sub-portadoras total (el estándar lo define como 64), primero se saca el residuo entre los datos que ingresan y el número de sub-portadoras de datos (que el estándar le define a 48), se puede tener dos casos:

- **Si el residuo es cero:** no es necesario realizar ningún relleno.
- **Si el residuo es diferente de cero:** es necesario realizar un relleno, ya no hay el número de bits suficientes para crear la última sub-portadora de datos.

Posteriormente es necesario calcular la cantidad de símbolos que se va a tener, los símbolos se colocan en cada sub-portadora de datos, la ubicación de los datos en las sub-portadoras se puede observar en la Figura 2.27.

Es importante mencionar que el estándar IEEE 802.11p define la ubicación de cada sub-portadora de datos y de cada piloto, dentro de las 64 sub-portadoras totales, como se revisó en el capítulo 1. Los valores de las sub-portadoras piloto son [1, 1, 1, -1] que corresponde a las posiciones 8, 22, 52 y 58.

Las sub-portadoras de datos y sub-portadoras piloto corresponden a los lugares que se ilustra en la Figura 2.28:

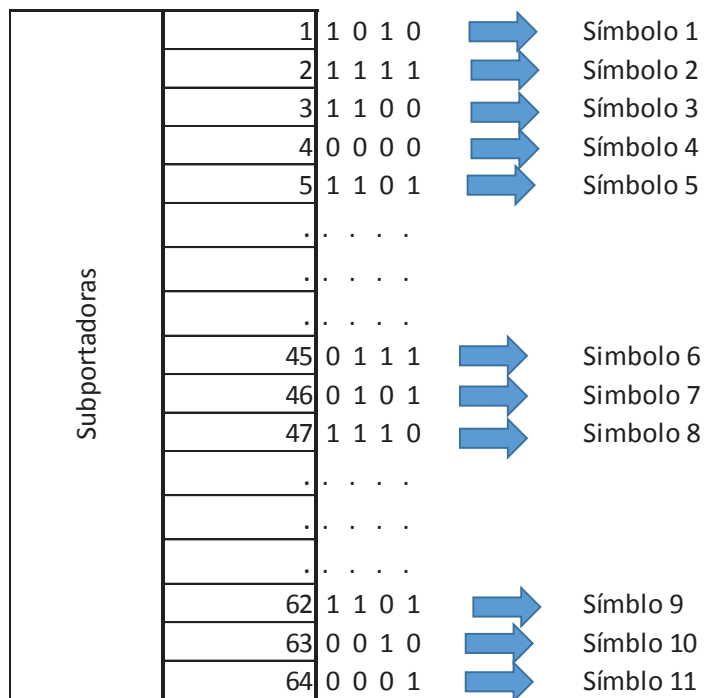


Figura 2.27 Ubicación de los datos en sub-portadoras

0	DC
1	DATOS
•	•
•	•
•	•
7	DATOS
8	PILOTO
9	DATOS
•	•
•	•
•	•
21	DATOS
22	PILOTO
23	DATOS
•	•
•	•
•	•
51	DATOS
52	PILOTO
53	DATOS
•	•
•	•
•	•
57	DATOS
58	PILOTO
59	DATOS
•	•
•	•
•	•
64	DATOS

Figura 2.28 Ubicación de los datos en sub-portadoras

2.2.1.6. TRANSFORMADA INVERSA DE FOURIER

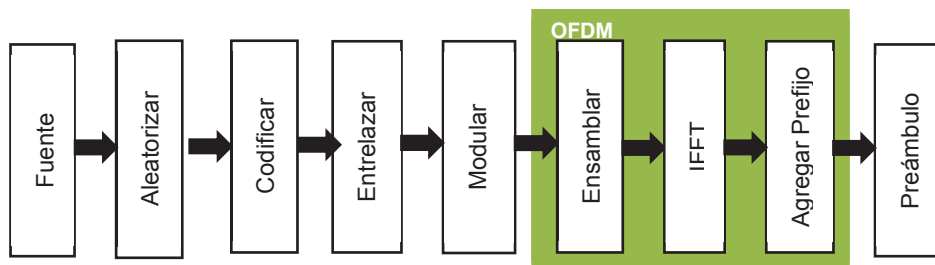


Figura 2.29 Proceso para realizar la IFFT del bloque de transmisión.

Mediante el proceso de transformada inversa de Fourier permite convertir los datos que se encuentran en el dominio de la frecuencia (estos datos proceden de la construcción del símbolo OFDM) al dominio del tiempo,

Este proceso en MATLAB se lo realiza con el comando **ifft**, en la tabla 2.17 se muestran los detalles [43].

Tabla 2.17 Comando MATLAB para la Transformada Inversa de Fourier.

Comando	Descripción
ifft(X)	Transformada inversa de Fourier.

2.2.1.7. AGREGACIÓN DEL PREFIJO CÍCLICO

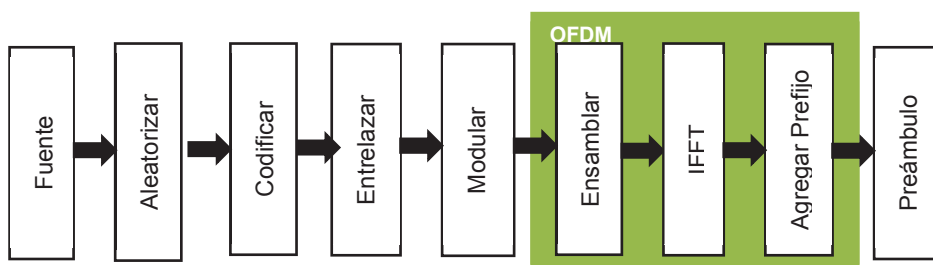


Figura 2.30 Proceso para agregar el prefijo cíclico.

El prefijo cíclico se construye con las últimas 16 sub-portadoras del símbolo OFDM, para ello se debe crear en una matriz cuyos valores correspondan a las 16 últimas muestras del símbolo, posteriormente esta matriz se le coloca al inicio del símbolo OFDM, como se observa en Figura. 2.31.

2.2.1.8. AGREGACIÓN DEL PREÁMBULO

Para agregar el preámbulo se realiza un proceso similar al que se hizo anteriormente, sin embargo, el vector que se agrega a los datos está definido en el estándar IEEE 802.11p, existe un preámbulo corto y uno largo.

Se puede observar el proceso de agregación del preámbulo en la Figura 2.31.

- 1) Se crea el preámbulo corto.
- 2) Se crea el preámbulo largo.
- 3) Se agrega ambos preámbulos y se crea un único vector.
- 4) Se agrega el preámbulo completo al vector de datos.

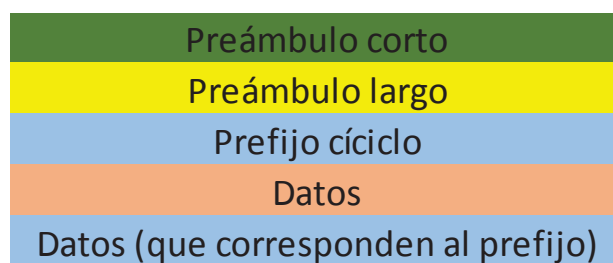


Figura 2.31 Ubicación de los preámbulos, prefijo cíclico y datos.

2.2.2. CANAL INALÁMBRICO

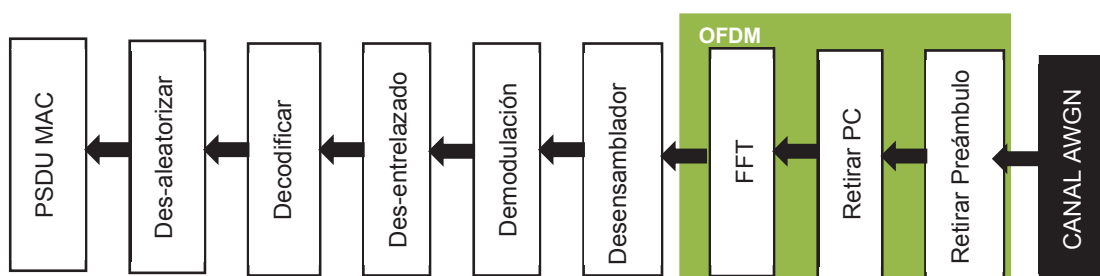
El canal inalámbrico AWGN en MATLAB se realiza utilizando el comando **awgn** [43], los detalles se observan en la Tabla 2.18:

Tabla 2.18 Comando utilizado para crear el canal AWGN [43]

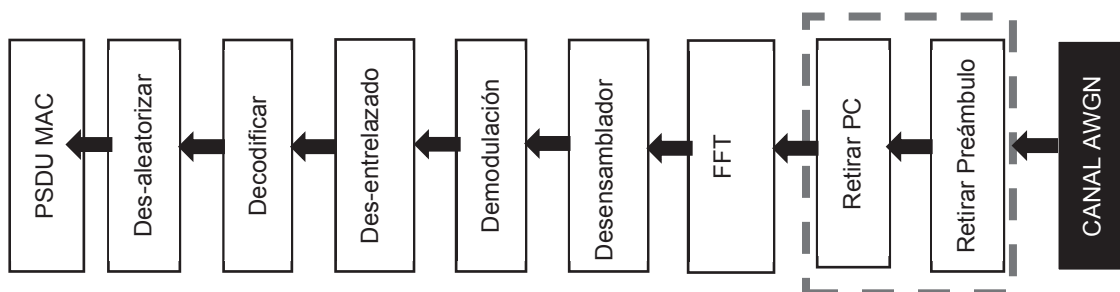
Comando	Descripción
awgn(X,SNR)	Añade ruido blanco a la señal X , con una SNR en dB, se asume que la potencia de X es 0 dBw, si X es complejo el ruido añadido también es complejo.

2.2.3. RECEPTOR

En el receptor se realiza el proceso inverso del transmisor, estos procesos son los siguientes: retiro del preámbulo, retiro del prefijo cíclico, transformada de Fourier, desensamblado de la trama, demodulación, des-entrelazado, decodificación, des-aleatorización, como se ilustra en la Figura 2.32.

**Figura 2.32** Diagrama de bloques del receptor.

2.2.3.1. RETIRO DEL PREÁMBULO Y PREFIJO CÍCLICO

**Figura 2.33** Proceso para retirar el Preámbulo del bloque de recepción.

Para realizar el proceso de retiro de preámbulo se crea un vector con los datos que van desde la posición: longitud del preámbulo más uno, así como se observa en la Figura 2.34.

Para retirar el prefijo cíclico se realiza de una manera similar al anterior proceso. Se toma únicamente los datos a partir del dato 17 (el prefijo cíclico tiene una longitud de 16), como se puede observar en la Figura 2.35.

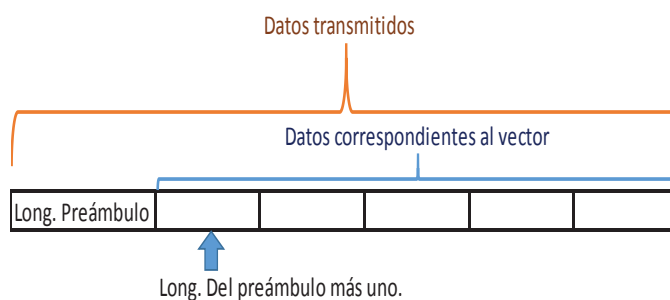


Figura 2.34 Retiro del preámbulo.

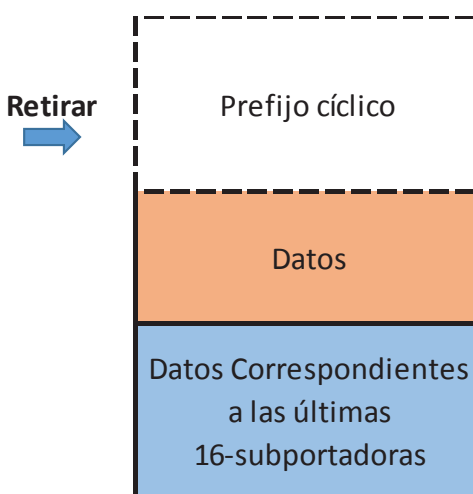


Figura 2.35 Retirar el prefijo cíclico.

2.2.3.2. TRANSFORMADA DE FOURIER

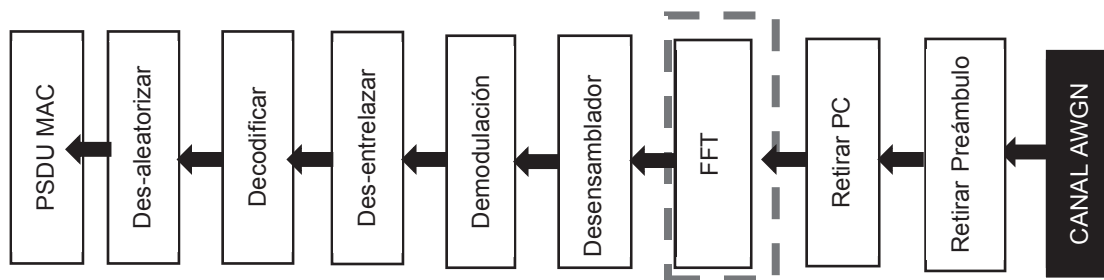


Figura 2.36 Proceso para realizar el proceso de FFT del bloque de recepción.

Para realizar el proceso de la transformada de Fourier se utiliza el siguiente comando `fft` [43], más detalles se observa en la Tabla 2.19:

Tabla 2.19 Comando utilizado para el realizar el proceso de Transformada de Fourier.

Comando	Descripción
<code>fft(X)</code>	Transformada de Fourier.

La transformada rápida de Fourier es el proceso inverso de la transformada Inversa de Fourier.

2.2.3.3. DES-ENSAMBLADO

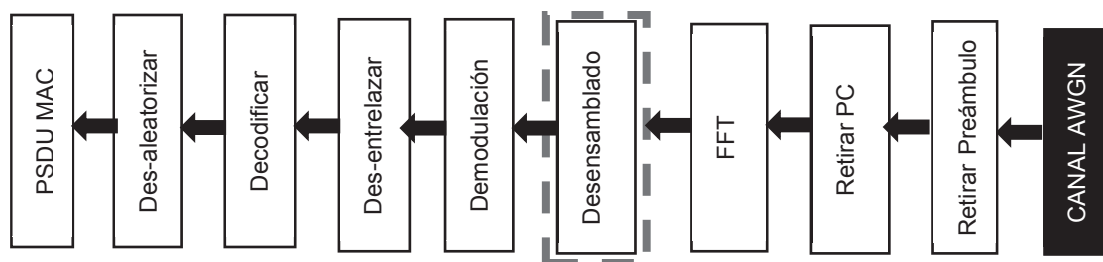


Figura 2.37 Proceso para des-ensamblar del bloque de recepción.

Este proceso consiste en obtener los datos que ingresaron antes del proceso de construcción del símbolo, es decir tener únicamente los datos sin portadoras virtuales.

Al igual que el proceso de construcción del símbolo se tiene dos opciones, si se realizó o no relleno con 0L.

- **Sin relleno de ceros:** se toman únicamente los valores correspondientes a las posiciones de las sub-portadoras de datos y se crea un vector con estos datos, y las posiciones de los pilotos se pone en 0L.
- **Con relleno de ceros:** primero se crea un vector con los datos correspondientes a las sub-portadoras de datos, incluidos el relleno de ceros. Además las posiciones de los pilotos se pone en 0L.

2.2.3.4. DEMODULACIÓN

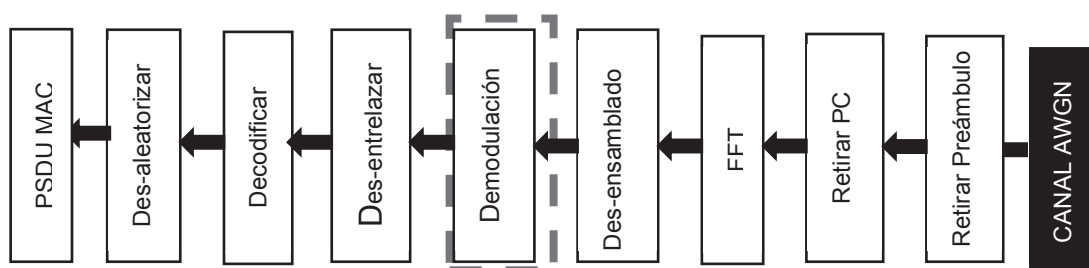


Figura 2.38 Proceso para demodular del bloque de recepción.

Se realiza el proceso de demodulación, para esto es necesario construir el demodulador. Posteriormente se quita la normalización que se realizó en el proceso de modulación en la transmisión.

La demodulación se la realiza en MATLAB con el comando **demodulate** [43], se deben poner las variables del modulador y la señal que se quiere demodular.

Del proceso de demodulación se obtiene una matriz con números decimales, es necesario transformar a binario, esto se hace en MATLAB con el comando **de2bi** [43], cuyos detalles se presentan en la Tabla 2.20.

Tabla 2.20 Comandos utilizados para el proceso de demodulación.

Comando	Descripción
Demodulate	Realiza la demodulación
de2bi(D)	Convierte un decimal no negativo a una matriz de elementos binarios.

Finalmente, para el proceso de demodulación, se colocan los datos en serie. El diagrama de flujo de la Figura 2.39 presenta la programación del demodulador.

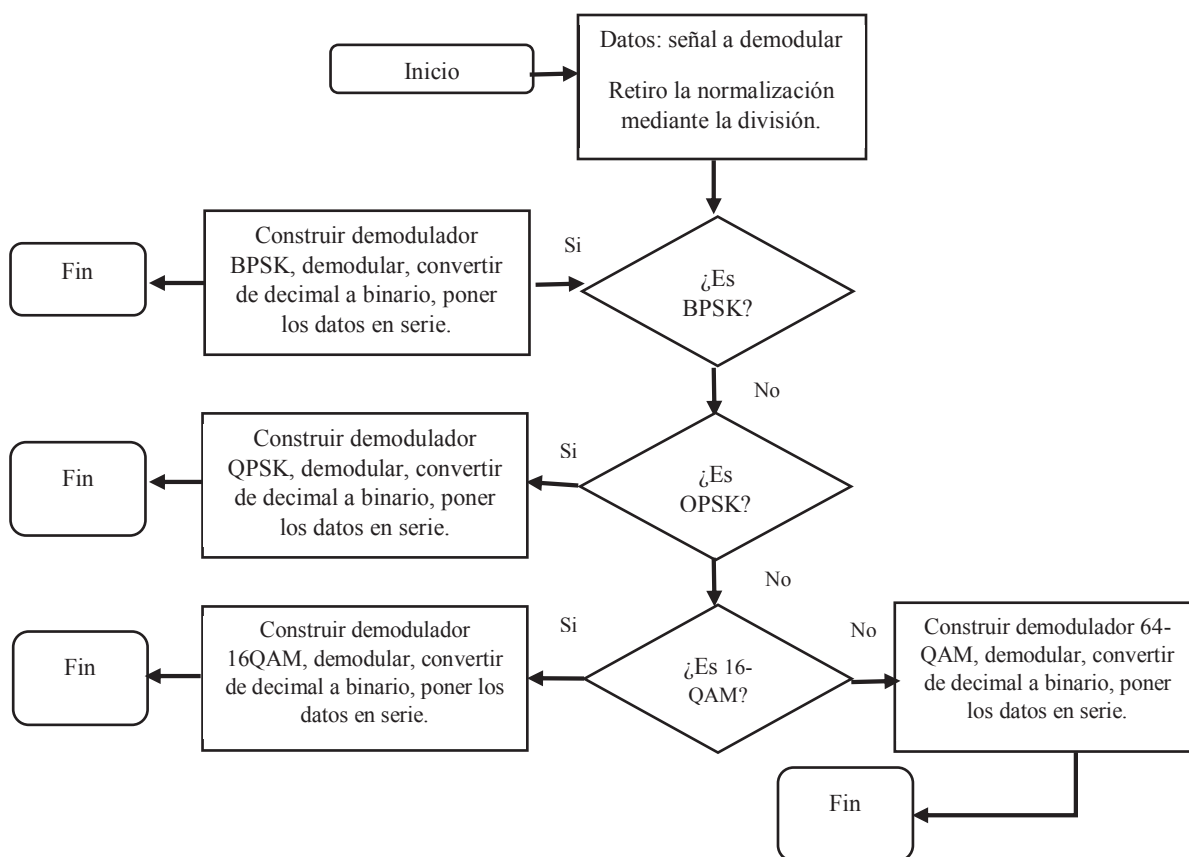


Figura 2.39 Diagrama de flujo para la demodulación.

2.2.3.5. DES-ENTRELAZADO

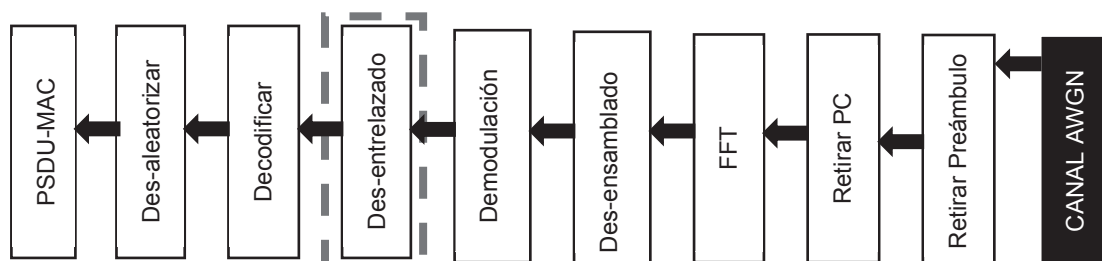


Figura 2.40 Proceso para des-entrelazar del bloque de recepción.

Para este proceso se emplean los mismos comandos que en entrelazado, en el diagrama de flujo de la Figura 2.41 se presenta la programación para asignar el valor a la variable N_{CBPSRx} según el tipo de modulación.

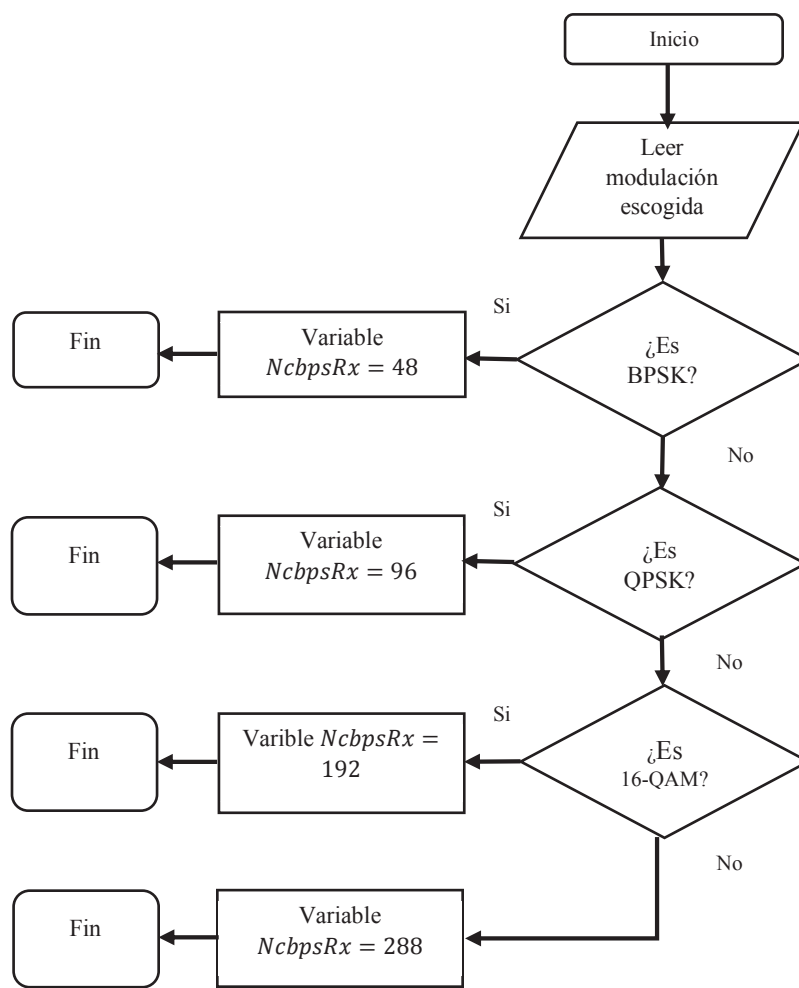


Figura 2.41 Diagrama de flujo para asignar el valor a N_{cbpsRx} para el des-entrelazado.

En el diagrama de flujo de la Figura 2.42 presenta la programación para calcular el número de veces que se va a realizar el proceso de des-entrelazado hasta des-entrelazar todos los bits.

Al igual que en el transmisor, se incrementan las variables: pRx , nRx y uRx para tomar el siguiente bloque de bits que se desea des-entrelazar.

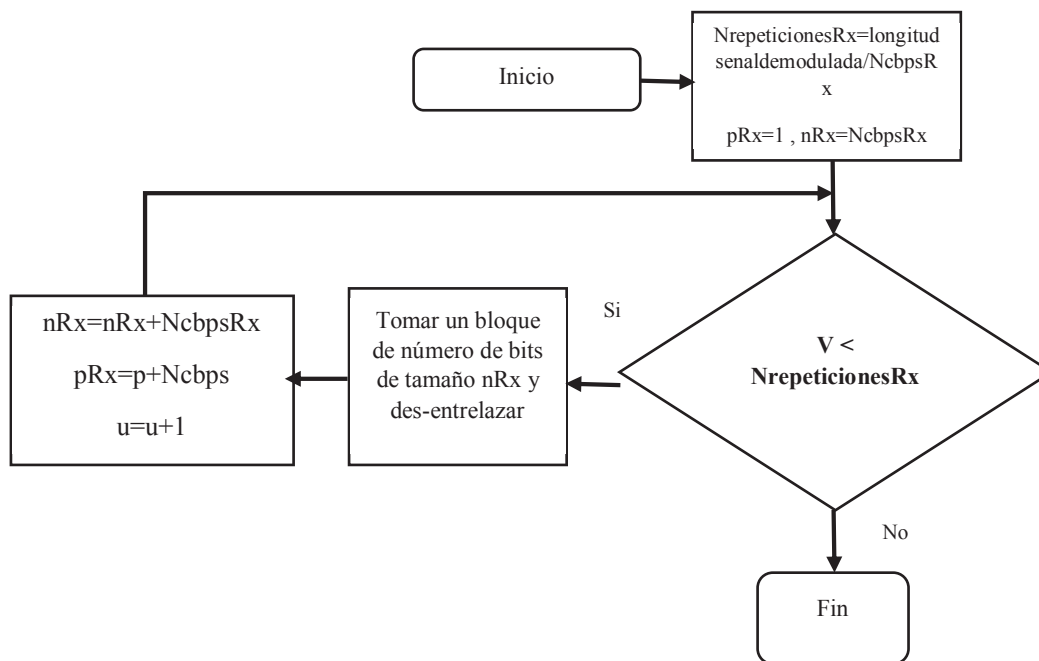


Figura 2.42 Diagrama de flujo para realizar el proceso de des-entrelazado.

En el diagrama de flujo de la Figura 2.48 se muestra el proceso para quitar el relleno de 0L (el retiro de relleno de 0L se efectúa si se agregó relleno en el transmisor).

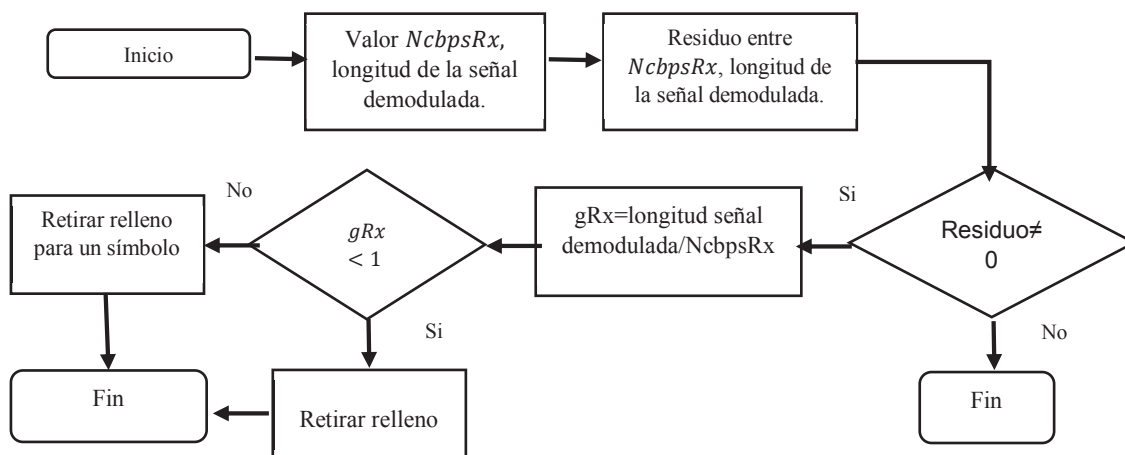


Figura 2.43 Diagrama de flujo para retirar el relleno para el des-entrelazado.

2.2.3.6. DECODIFICACIÓN

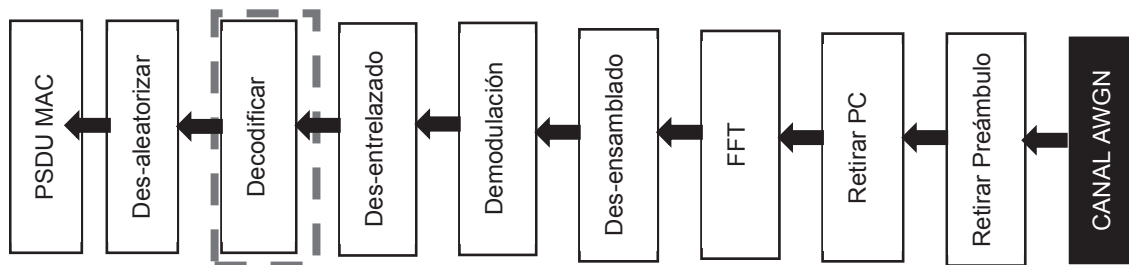


Figura 2.44 Decodificar en la recepción.

La decodificación se hace mediante el algoritmo de Viterbi. Para realizar la decodificación en MATLAB, se requiere convertir el código polinomial a la descripción de trellis (este proceso se lo realizó en la parte del codificador, por eso no se lo analizará en esta sección). Para decodificar en MATLAB con el algoritmo de Viterbi, se usa el comando **vitdec** [43]. En la Tabla 2.21 se describe este comando.

Tabla 2.21 Comandos MATLAB para la decodificación.

Comando	Descripción
vitdec(CODE, TRELIS, TBLEN, OPMODE, DECTYPE, PUNCPAT)	Decodifica el vector usado el algoritmo de Viterbi, se asume que la señal CODE es la salida de una codificación convolucional con estructura de Trellis.

Las opciones para escoger en OPMODE (especifica el modo de operación del decodificador):

- **Trunc:** el decodificador asume que tiene que iniciar en todos los estados 0. Se escoge el camino hacia atrás dependiendo del que tenga la mejor métrica
- **Term:** el decodificador asume que los estados inicial y final son 0.
- **Cont:** el decodificador asume que tiene que iniciar en todos los estados 0, el decodificador considera el camino hacia atrás en base al de mejor métrica, ocurre un retraso igual a TBLEN símbolos antes de que el símbolo decodificado aparezca a la salida.

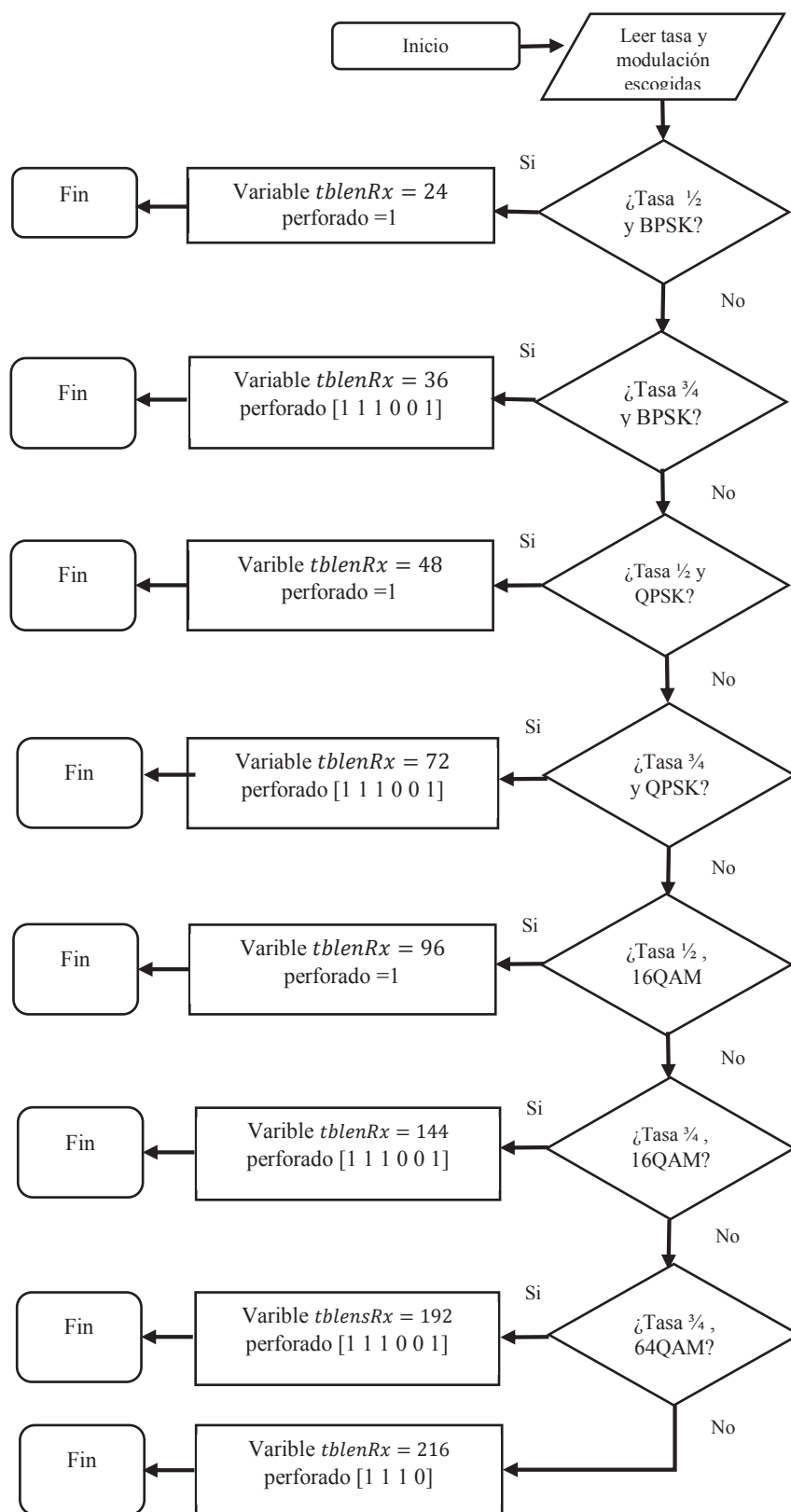


Figura 2.45 Diagrama de flujo para asignar el valor a la variable *tblenRx* para la decodificación.

Hay tres opciones para escoger en DECTYPE (indica cómo se representan los bits en la codificación):

- **Unquant:** el decodificador espera una señal de entrada con valores reales, +1 representa un 0L, mientras que -1 representa 1L.
- **Hard:** El decodificador espera valores de entrada binarios.
- **Soft:** decodifica el vector de entrada en valores entre 0 y $2^{NSDEC} - 1$. Se requiere el valor de *NSDEC*.

El diagrama de flujo de la Figura 2.45 se muestra la decodificación con el proceso de perforado dependiendo de la tasa de codificación. Además, se puede observar el proceso para asignar el valor de la variable *tblenRx* que depende del tipo de modulación usado en la comunicación.

2.2.3.7. DES-ALEATORIZADOR

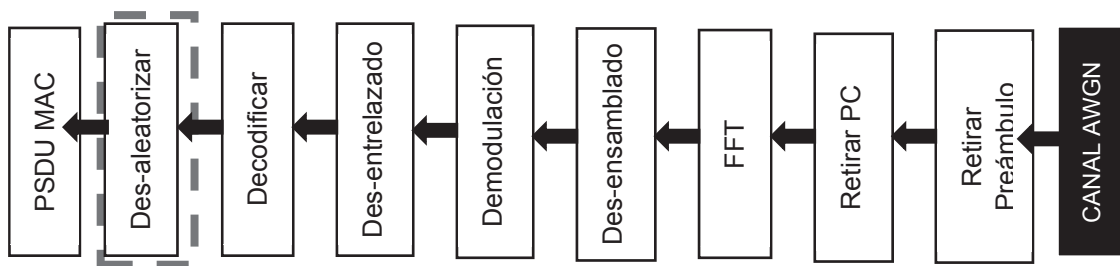


Figura 2.46 Des-aleatorizar en la recepción.

Para finalizar con las tareas del receptor a nivel de capa física, el des-aleatorizador coloca los bits en la forma que inicialmente fueron creados por la fuente.

El des-aleatorizador usa los mismos parámetros de polinomio generador y estado inicial empleados en el aleatorizador.

Se observa este proceso en la Figura 2.47 donde se observa el proceso de des-aleatorizador con 5 bits.

Es importante mencionar que los comandos utilizados en este proceso son los mismos empleados en el aleatorizador.

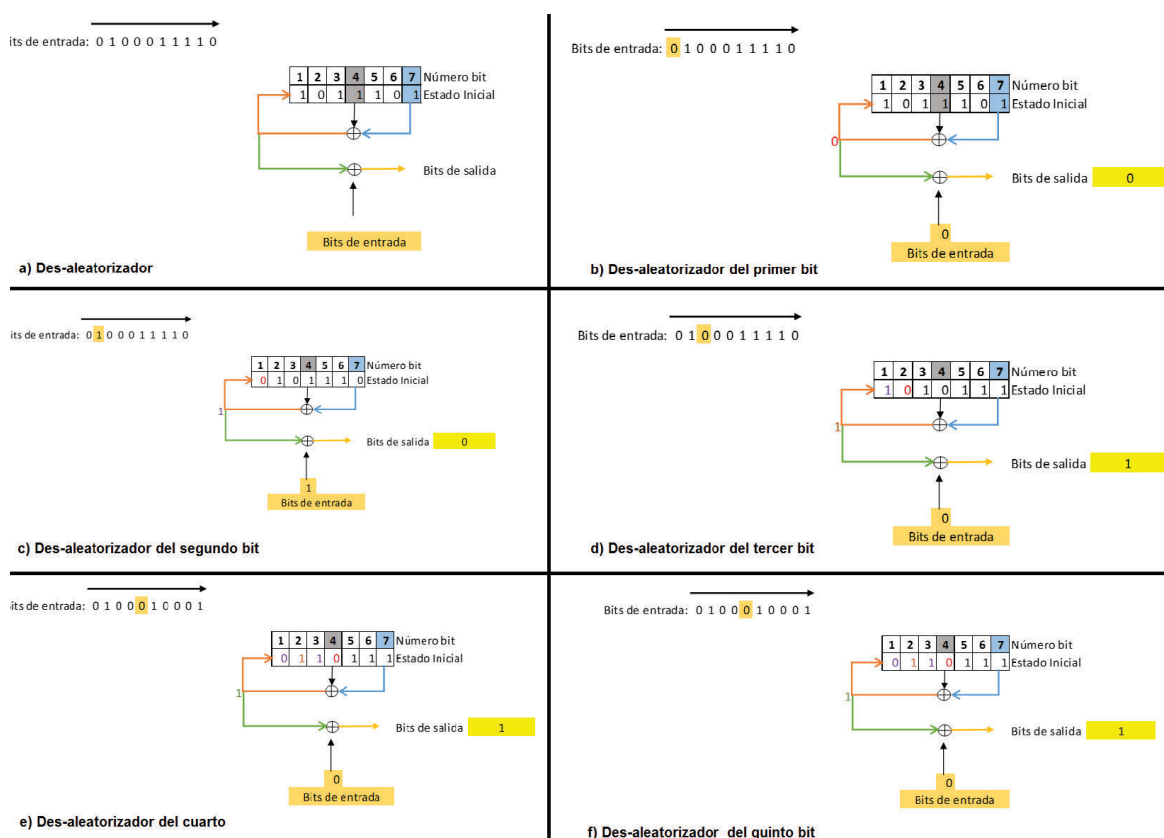


Figura 2.47 Des-aleatorización para 5 bits.

2.2.4. CÁLCULO DE LA BER

La BER (*Bit Error Rate*) se calcula comparando los bits recibidos y con los bits enviados y contando la cantidad de bits que llegaron diferentes a los que se transmitieron. Para este cálculo se emplean, los comandos detallados en la Tabla 2.22 [43]:

Tabla 2.22 Comandos utilizados para calcular la BER.

Comando	Descripción
sum(X)	Suma de los elementos de X
abs (X)	Obtiene el valor absoluto de los elementos de X

2.2.4. CÁLCULO DE PER

En la Tabla 2.23 se detalla los comandos empleados en MATLAB.

Tabla 2.23 Comandos MATLAB para calcular la PER.

Comando	Descripción
length(X)	Retorna la longitud de X

2.5 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

La evaluación de la capa física del estándar IEEE 802.11p se realiza analizando resultados que se presentan de forma gráfica a fin de que sean fáciles de interpretar. A continuación se detalla la programación de los diferentes resultados.

Para programar este proceso se realizan las siguientes tareas:

2.5.1 Datos transmitidos y recibidos

Entre los resultados presentados en el proyecto de titulación se muestra la secuencia de datos transmitidos y recibidos. Los datos recibidos pueden verse afectados por diferentes niveles de ruido, por tanto, el usuario de la aplicación tiene la posibilidad de seleccionar el valor de SNR.

A continuación se detallan, a través de los diagramas de flujos de las Figuras 2.48-2.50 empleados para la programación para presentar gráficamente los datos de transmisión y recepción.

1. Guardar en un vector los resultados obtenidos en cada proceso de comunicación: aleatorización, codificación, entrelazado, modulación y sus respectivos procesos en el receptor, desde el primer valor de SNR hasta el último (los valores a graficar son de 1dB, 10 dB, 20 dB y 30 dB).

Para guardar los resultados obtenidos con cada proceso de comunicación se crea un vector y se usa una variable *contadorSNR*, los resultados se almacenan en la fila del vector según el valor de la variable, ver el diagrama de flujo de la Figura 2.48.

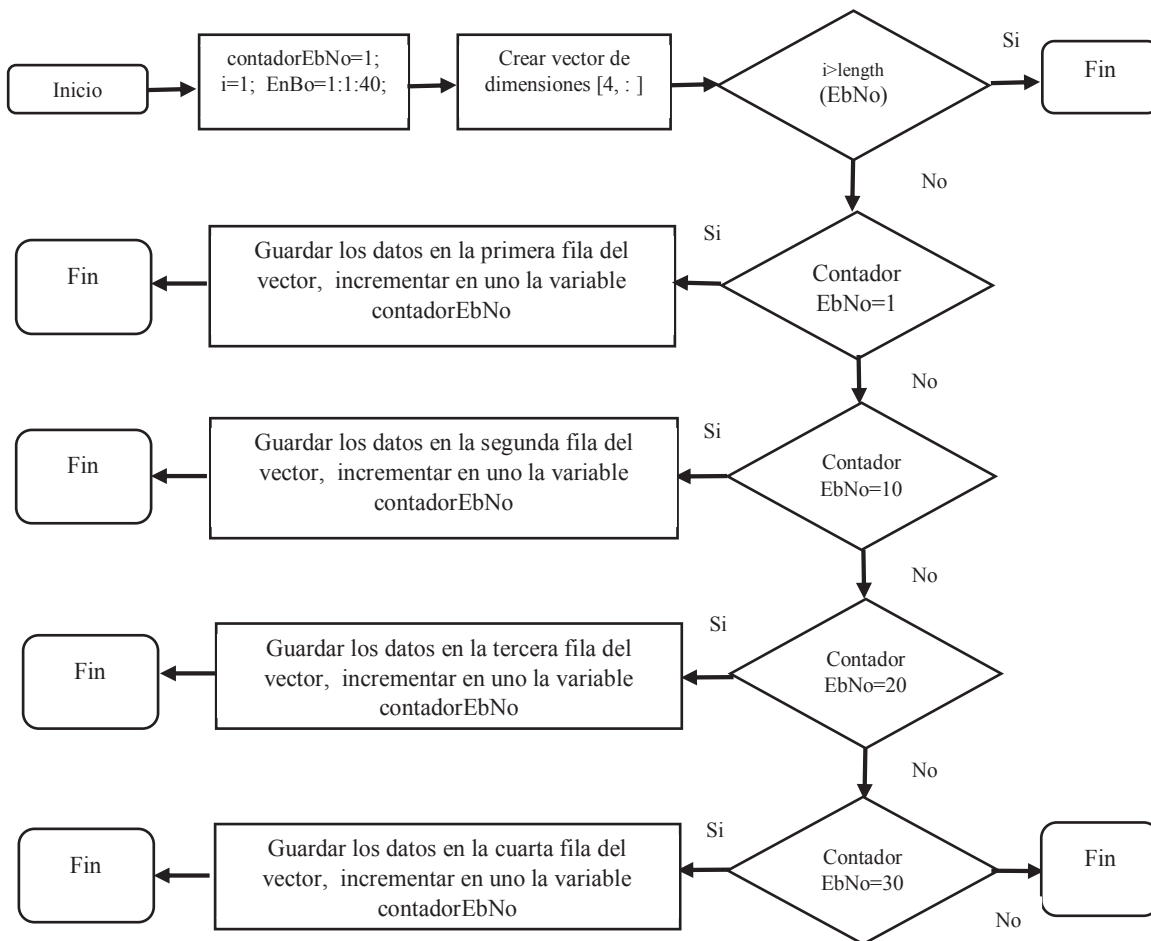


Figura 2.48 Diagrama de flujo para guardar los resultados obtenidos en cada proceso.

2. Guardar el valor de SNR seleccionados por el usuario para graficar y el proceso que se desea graficar de transmisión y recepción.

Para guardar el valor de SNR seleccionados se realiza el proceso representado en el diagrama de flujo de la Figura 2.49. El proceso se detalla a continuación:

- Se guarda el valor de la variable (*SNRgraficacion*) un vector según lo que el usuario ha seleccionado.
- Se carga el valor de la variable.
- Comparación el valor de la variable para almacenar en la fila correspondiente del vector.

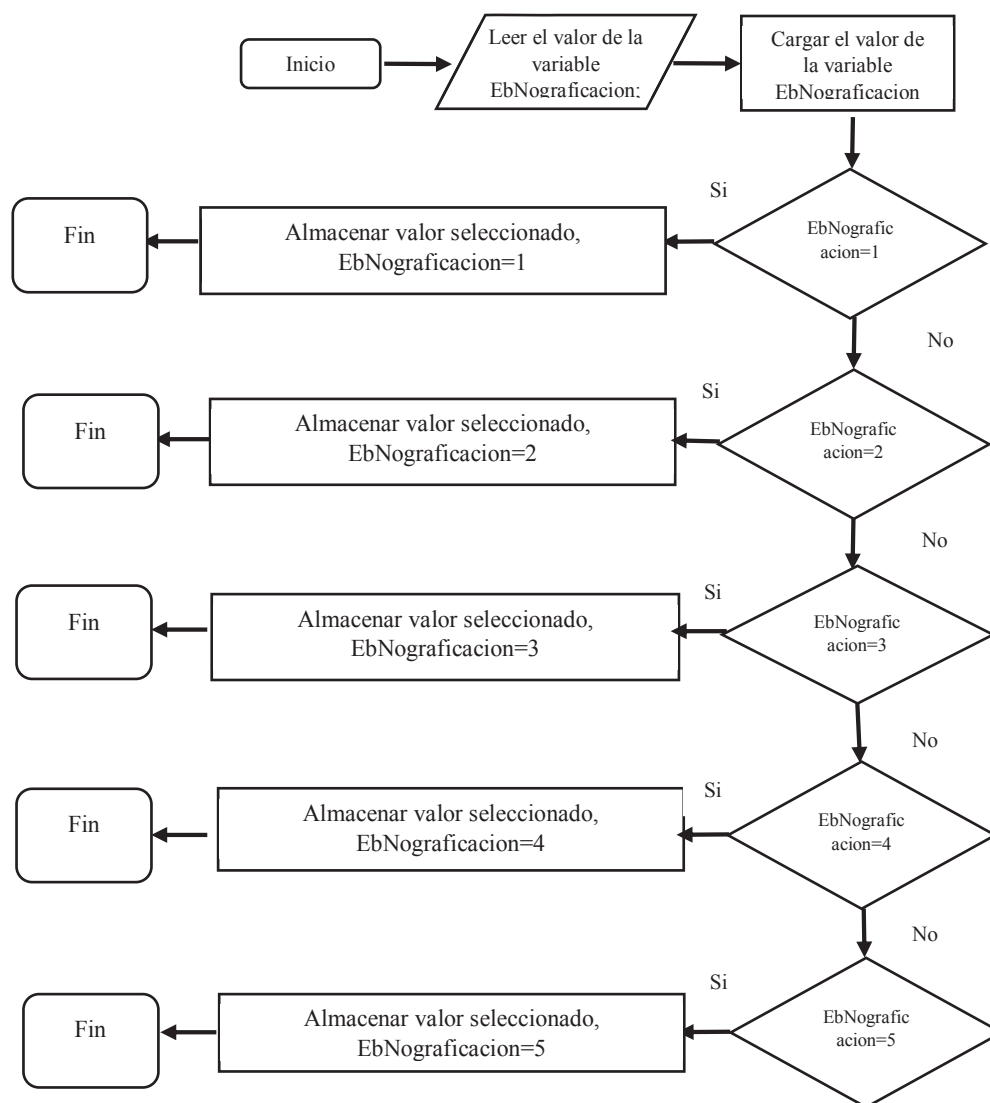


Figura 2.49 Diagrama de flujo para guardar el valor de SNR que el usuario seleccionó.

3. También, es necesario guardar el valor *Datos a graficar* que el usuario desea graficar, este proceso es realizado según el listado de proceso (fuente, aleatorización, codificación, scrambler) que el usuario puede graficar, el proceso para la programación se presenta en el diagrama de flujo correspondiente a la Figura 2.50.
4. Finalmente, se procede a graficar cargando los datos transmitidos antes seleccionados, este proceso es realizado en el botón de graficar. Si el usuario no selecciona los datos o el valor de *SNR* para graficar se mostrará un mensaje de advertencia como se observa en las Figuras 2.51.

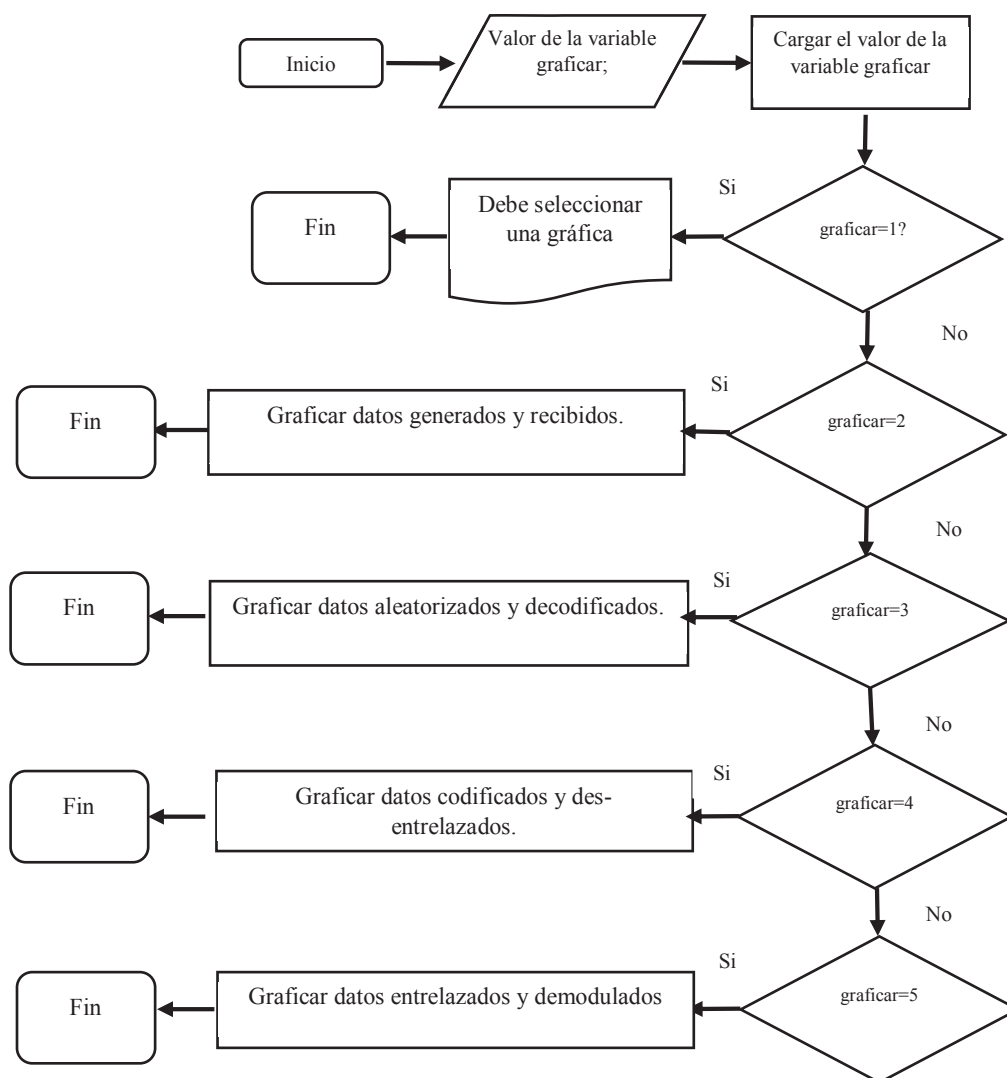


Figura 2.50 Diagrama de flujo para graficar los datos que el usuario selecciona.

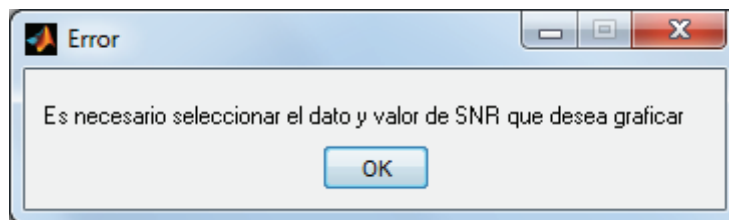


Figura 2.51 Mensaje de error si el usuario no ha seleccionado SNR y datos.

En la tabla 2.24 se presenta un resumen de los comandos MATLAB empleados para las gráficas.

Tabla 2.24 Comandos utilizados para graficar.

Comando	Descripción
axes(handles.axes1)	Permite enviar la gráfica al botón axes1
stem(X)	Graficar señales discretas.

En los resultados se presentan únicamente los primeros 20 bits a fin de tener una mejor visualización de la gráfica, como se observa en la Figura. 2.52

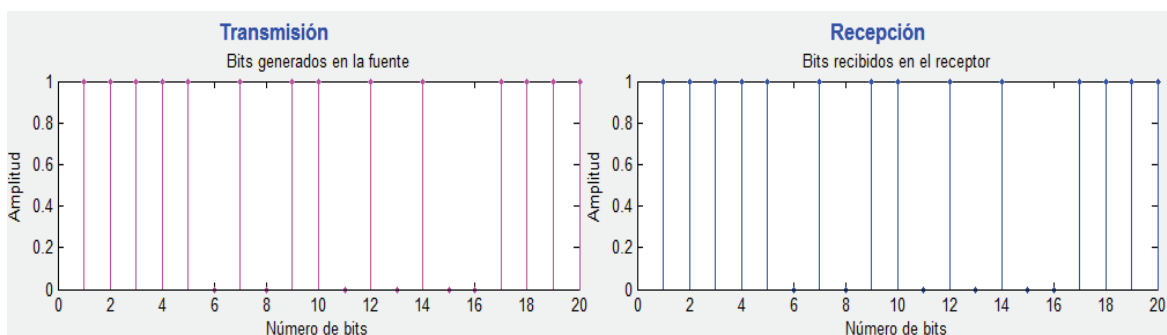


Figura 2.52 Secuencia de bits transmitidos y recibidos.

2.5.1 DIAGRAMA DE CONSTELACIÓN

El diagrama de constelación (o llamado espacio de señal) es una representación en el plano complejo de los diferentes estados de símbolo tanto en fase como en amplitud para los esquemas de modulación PSK y QAM.

Para la figura del diagrama de constelación, es necesario cargar los datos de la señal modulada y a esta señal se le añade ruido con diferentes valores de SNR= {1, 10, 40} dB; y se procede a graficar el diagrama de constelación de la señal modulada con y sin ruido en diferentes ventanas para los distintos valores de SNR.

El proceso para graficar se da cuando el usuario ha seleccionado el check-list: "Diagrama de constelación" en la ventana de simulación. Es importante mencionar que los diagramas se obtiene para cada tipo de modulación admitidos en el estándar IEEE 802.11p.

2.5.2 RESULTADOS

Los resultados de BER se muestran a través de curvas de BER vs SNR. Las curvas de BER que se presentan son las curvas teórica y simulada.

Se grafica la BER teórica y la BER simulada que se obtiene de la transmisión y recepción de los datos que el usuario ha seleccionado.

Para graficar la curva de la BER teórica, primero se realiza un análisis del tipo de modulación que el usuario ha seleccionado. Posteriormente se procede a graficar la BER vs SNR con los valores teóricos y reales.

Para graficar las curvas de BER vs SNR del proceso de comunicación con los datos seleccionados por el usuario y teórico. Los comandos que se utilizan se detallan en Tabla 2.25 [43]:

Para las gráficas del PER vs SNR se emplea el mismo proceso para realizar las gráficas la BER vs SNR.

Tabla 2.25 Comandos utilizados para graficar la BER real.

Comando	Descripción
semilogy(A,B)	Grafica un conjunto de puntos de los cuales el eje X usa escala lineal y el eje Y, usa una escala logarítmica en base 10.
title ('Titulo de la gráfica')	Añade un título a la figura , en este caso el título sería: 'Titulo de la gráfica'
grid on	Añade una línea de cuadrícula.
hold on	Mantiene las propiedades de la figura actual y permite añadir más curvas en una misma figura.
xlabel('...') ylabel('...')	Añade etiquetas en los ejes x E y respectivamente.
legend(...,'Location',LOC)	Añade una legenda, en la localización específica.
hold off	Proceso contrario a hold on.

Es importante mencionar que la programación realizada en cada botón de las interfaces gráficas de usuario se puede observar en el ANEXO A.

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analiza los diferentes resultados obtenidos a fin de conocer el comportamiento de la capa física del estándar IEEE 802.11p.

Para el análisis de resultados, se simula diferentes tipos de modulación con sus correspondientes tasas de codificación, analizando el proceso de transmisión completo y también omitiendo algunos procesos como la codificación con el objetivo de determinar la ganancia en dBs que se obtiene. Además, se analizan procesos como aleatorizador, codificación, entrelazado, agregación del prefijo y agregación del preámbulo.

Es importante mencionar que la modulación y la construcción del símbolo OFDM (ensamblado, IFFT/FFT) se incluyen para todos los procesos

3.1 VALIDACIÓN DE RESULTADOS

A continuación, en las figuras se muestran los resultados en términos de la BER vs SNR y PER vs SNR para cada una de las diferentes modulaciones que emplea el estándar IEEE 802.11p.

Y para confirmar la validez de los resultados simulados, se simulará un sistema únicamente con los bloques modulador/demodulador y bloque OFDM sin prefijo cíclico (como se muestra en la Figura. 3.1). De dicha simulación se obtienen las curvas de la Figura 3.2 donde se observa las curvas de BER teórica, estos resultados coinciden con los presentados en [44]. Para una comunicación con BPSK y QPSK en teoría se obtiene los mismos resultados.

Estos resultados se compara con las demás simulaciones, a fin de obtener las mejoras con respecto al BER vs SNR y PER vs SNR al agregar los diferentes procesos definidos en el estándar IEEE 802.11p.

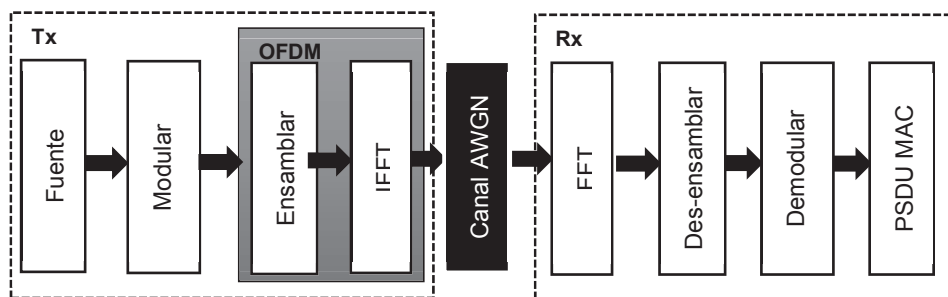


Figura 3.1 Diagrama de bloques para una comunicación con modulación y ensamblado.

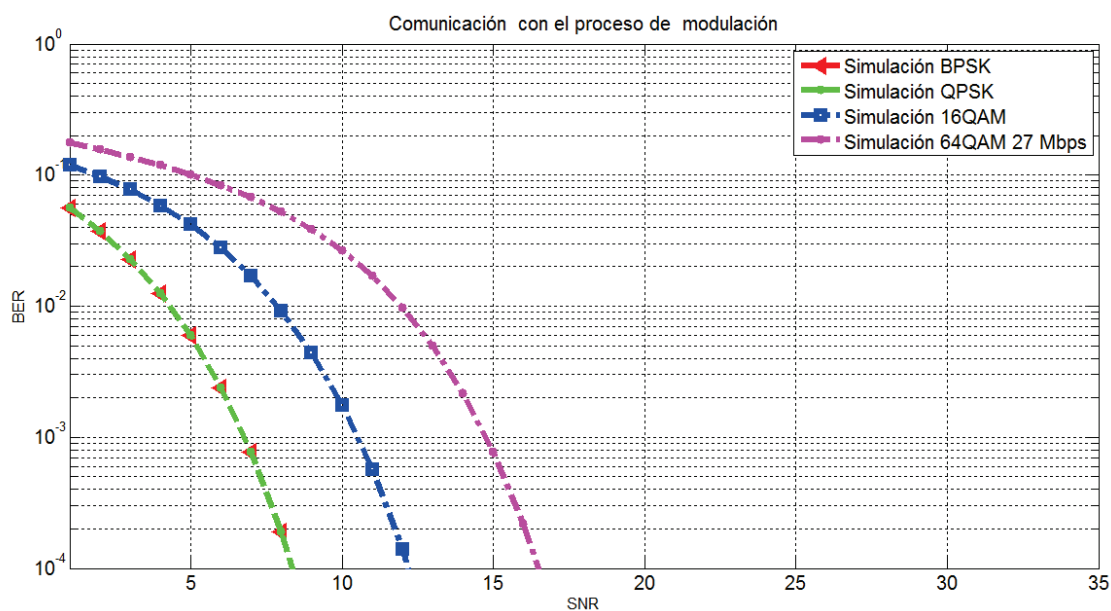


Figura 3.2 BER vs SNR teórico para todas las modulaciones del estándar IEEE 802.11p.

En la Figura 3.3 se presenta el resultado del diagrama de constelación para las modulaciones: BPSK, QPSK, 16-QAM Y 64-QAM respectivamente para un SNR de 40 dB. En los diagramas, de color rojo se representan los puntos de constelación transmitidos y en color azul los puntos de constelación recibidos con ruido. En todos los casos se observa que con un nivel de SNR=40 dB la distorsión de los puntos es menor.

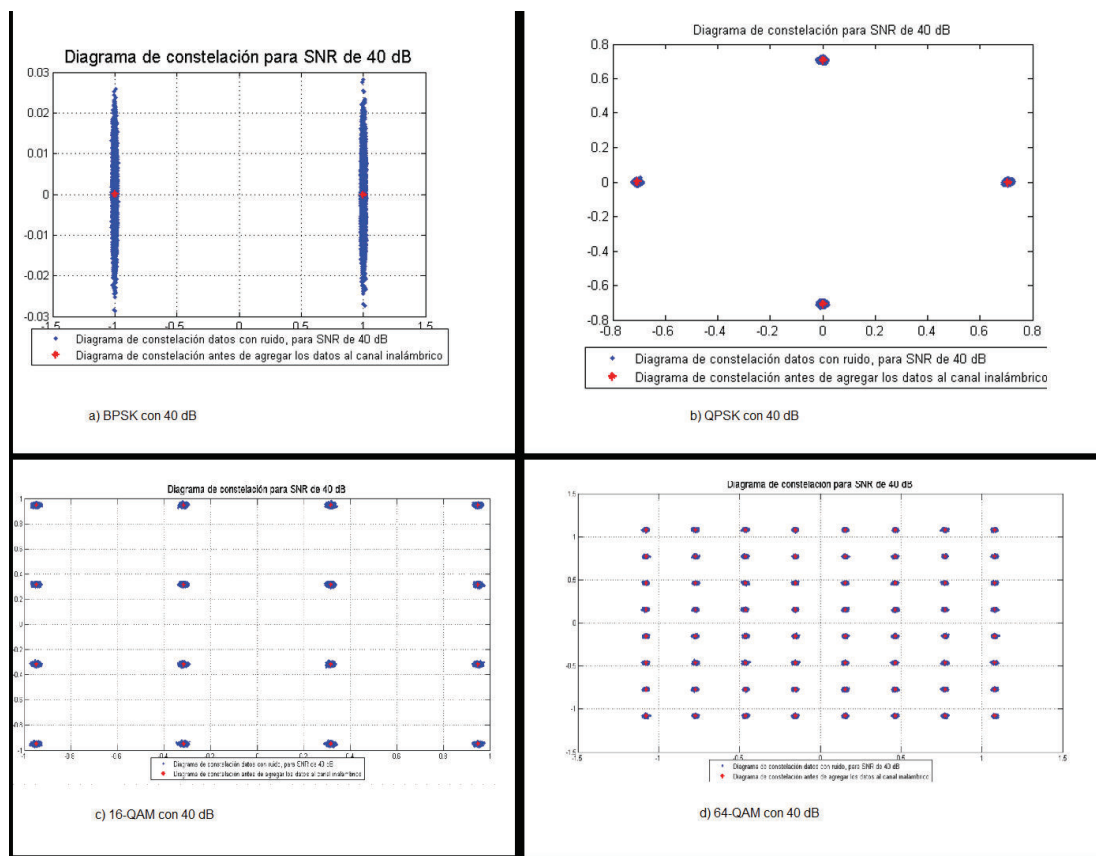


Figura 3.3 Diagrama de constelación

Cabe mencionar que para la simulación realizada en el presente proyecto de titulación se estableció el diagrama de constelación para valores de SNR de 1dB, 10 dB y 40dB.

Se puede observar en la Figuras 3.3 que el ruido afecta a las muestras del símbolo OFDM, lo cual también afectará la BER y PER.

3.2 SIMULACIÓN DE LA CAPA FÍSICA DE IEEE 802.11p.

A continuación se muestran las figuras con las curvas BER vs SNR y PER vs SNR para cada tipo de modulación. Se agregan los diferentes procesos definidos en IEEE 802.11p. Y también se presenta un análisis de los resultados

1. Comunicación con modulación, construcción del símbolo OFDM.

En esta sección se realiza el análisis de la comunicación utilizando los procesos de modulación, ensamblado del símbolo, transformada inversa de Fourier, y agregación del prefijo cíclico en el transmisor, y el proceso inverso en el receptor, observar la Figura 3.4.

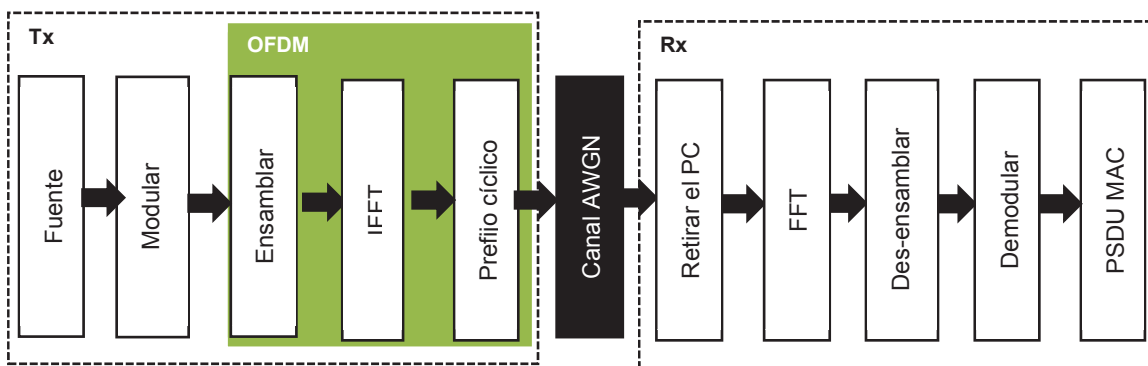


Figura 3.4 Diagrama de bloques para una comunicación con modulación y agregación del prefijo.

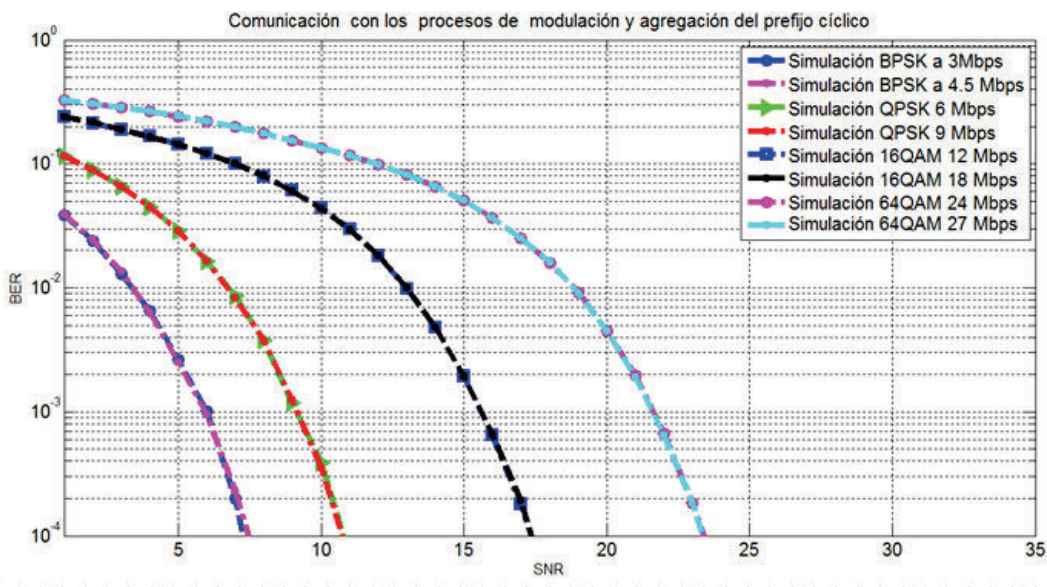


Figura 3.5 BER vs SNR para todas las velocidades del estándar IEEE 802.11p con los procesos de modulación, ensamblado, IFFT, prefijo cíclico.

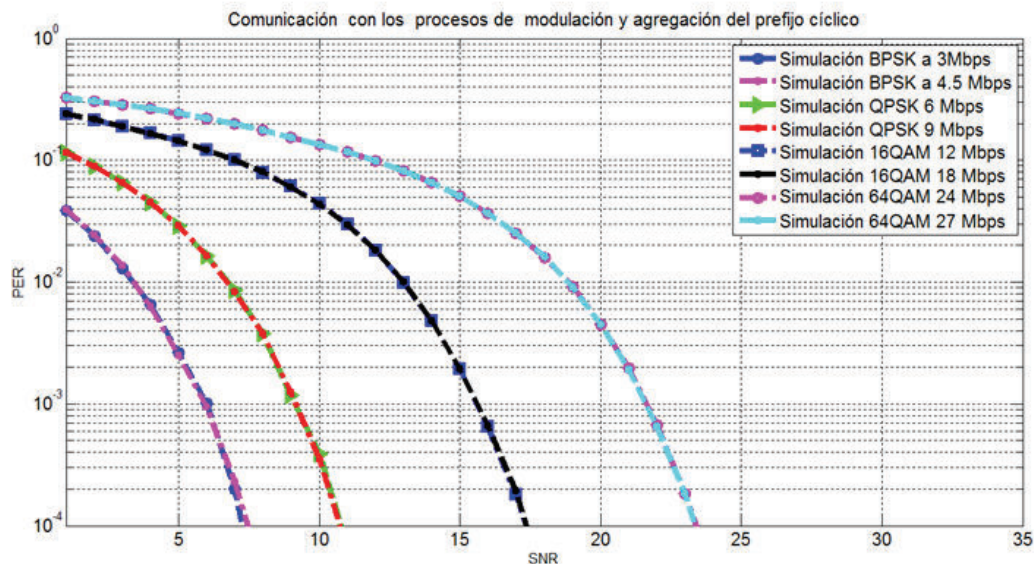


Figura 3.6 PER vs SNR para todas las velocidades del estándar IEEE 802.11p con los procesos de modulación, ensamblado, IFFT, prefijo cíclico.

Es posible observar que para las modulsiones BPSK, QPSK, con sus tasas de codificación correspondientes, a partir de un nivel (10 dB aproximadamente) de SNR la BER comienza a obtener el valor de cero. Sin embargo, para las modulsiones de 16-QAM y 64-QAM sería necesario un nivel de SNR mayor a 15 dB para obtener un BER de cero.

La modulación BPSK presenta mayores características de inmunidad al ruido en comparación a las modulsiones QPSK, 16-QAM y 64QAM, mientras que esta última es la modulación más susceptible al ruido; sin embargo también es la que mayores velocidades permite obtener. Además, es importante mencionar que en cada caso se obtiene la BER simulada mejor a la BER teórica, ya que se implementa la construcción del símbolo y transformada de Fourier que establece el estándar IEEE 802.11p, mientras que para obtener el resultado de la BER teórica, únicamente se considera el proceso de modulación.

Al analizar los diagramas de constelación obtenidos para las modulaciones BPSK, QPSK, 16-QAM, 64QAM, se verifica que la modulación BPSK es más robusta frente a la presencia de ruido. Además, la PER aumenta a medida que se emplean modulaciones multi-nivel con mayor número de niveles como es el caso de 64-QAM.

Al comparar las curvas de BER vs SNR y PER vs SNR obtenidos en esta sección con los resultados recopilados cuando se realiza únicamente el proceso de modulación, se observa que los valores son muy, ya que la simulación utiliza un canal inalámbrico AWGN y la incorporación del prefijo cíclico es muy útil en efectos de canal *Rayleigh* (*canal con multi-trayectoria*). El prefijo cíclico tiene que ser mayor al máximo retardo que puede sufrir el símbolo durante la transmisión.

2. Comunicación usando los bloques de aleatorización, modulación y construcción del símbolo OFDM.

Se analizan los resultados de BER vs SNR y PER vs SNR obtenidos utilizando los procesos de aleatorización, modulación, ensamblado de la trama y agregación del prefijo cíclico, como se muestra en la Figura 3.7

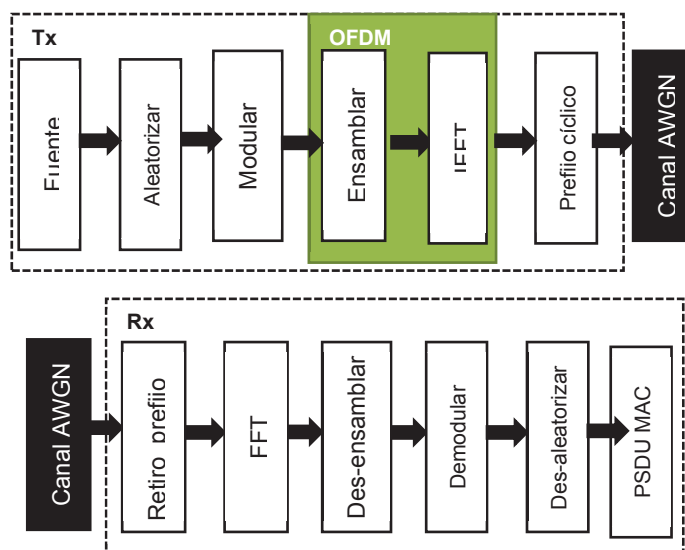


Figura 3.7 Diagrama de bloques para una comunicación con aleatorización, modulación y agregación del prefijo cíclico.

. En las Figuras 3.8-3.9 se muestran los resultados de la BER vs SNR y PER vs SNR.

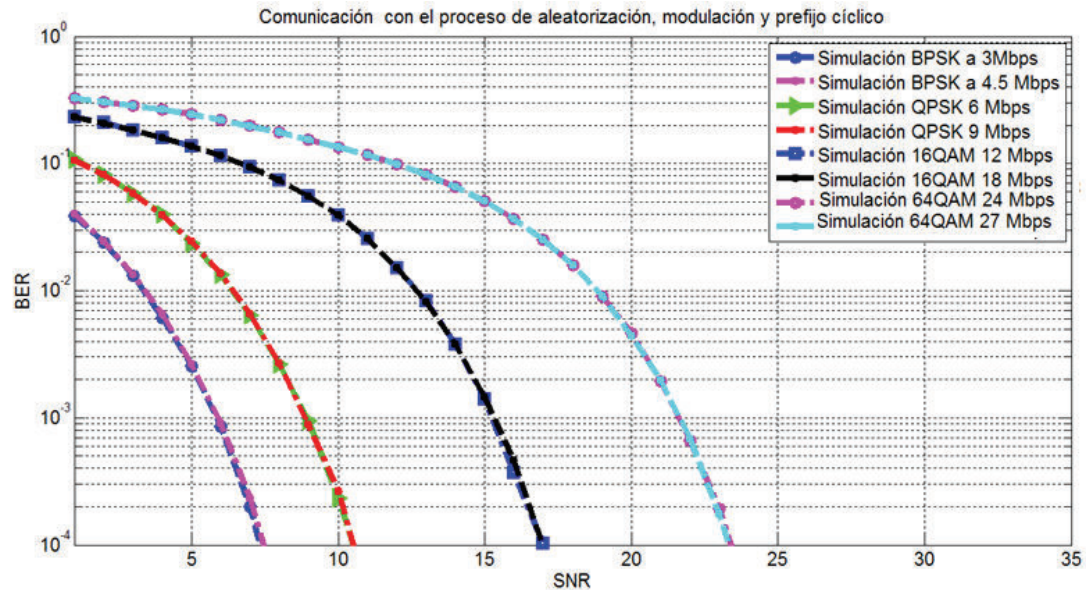


Figura 3.8 BER vs SNR para todas las velocidades del IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, modulación, ensamblado, IFFT y prefijo.

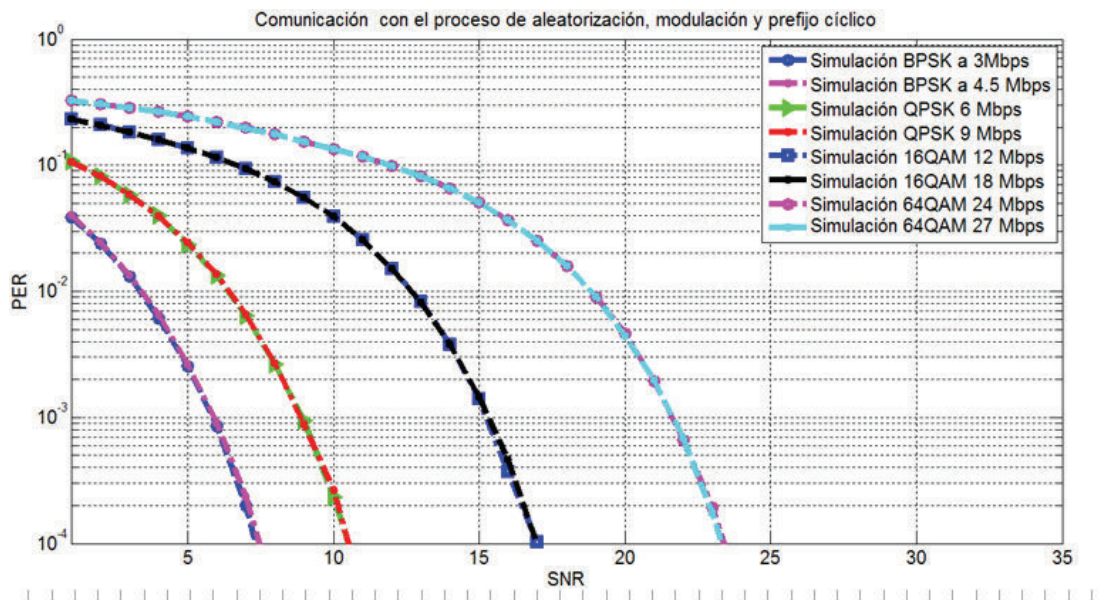


Figura 3.9 Gráfica del PER vs SNR para todas las velocidades del estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, modulación, ensamblado, IFFT y prefijo.

Al analizar y comparar los resultados obtenidos en esta sección con los resultados de la sección anterior, se puede observar que los valores de BER vs SNR y PER vs SNR para cada caso son similares, debido a que el proceso de aleatorización independiza la probabilidad de error en cada bit , además, la aleatorización evita problemas de sincronización y que se tenga una componente DC elevada, sin embargo para un canal inalámbrico AWGN no influye este proceso, por lo tanto la BER y la PER tampoco mejora con respecto a una transmisión utilizando únicamente el proceso de modulación.

3. Comunicación usando los bloques de aleatorización, codificación, modulación y construcción del símbolo OFDM

En la Figura 3.10 se presenta el diagrama de bloques para una comunicación con los procesos de: aleatorización, codificación, modulación, ensamble, IFFT en el transmisor y los respectivos procesos inversos en el receptor.

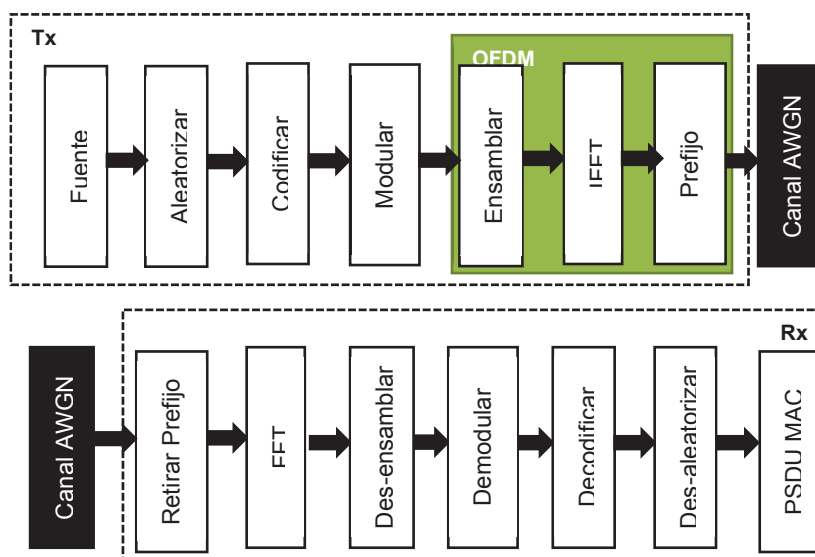


Figura 3.10 Diagrama de bloques para una comunicación con aleatorización, codificación, modulación, y agregación del prefijo.

En la Figura 3.11 y Figura 3.12 se presentan los resultados gráficos de las curvas de BER vs SNR y PER vs SNR respectivamente para la comunicación realizada en esta sección.

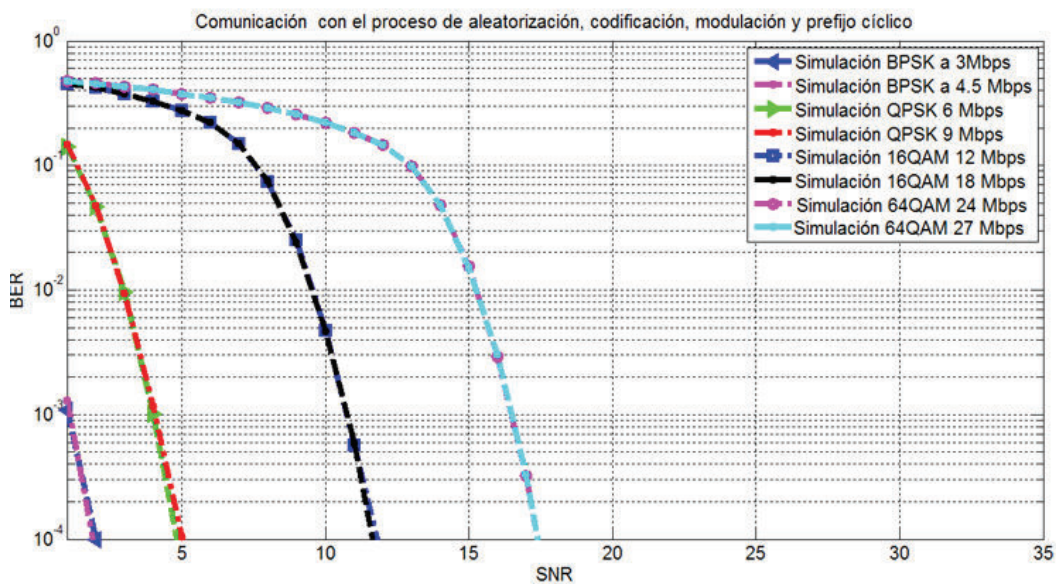


Figura 3.11 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, codificación, modulación, ensamblado, IFFT, prefijo cíclico.

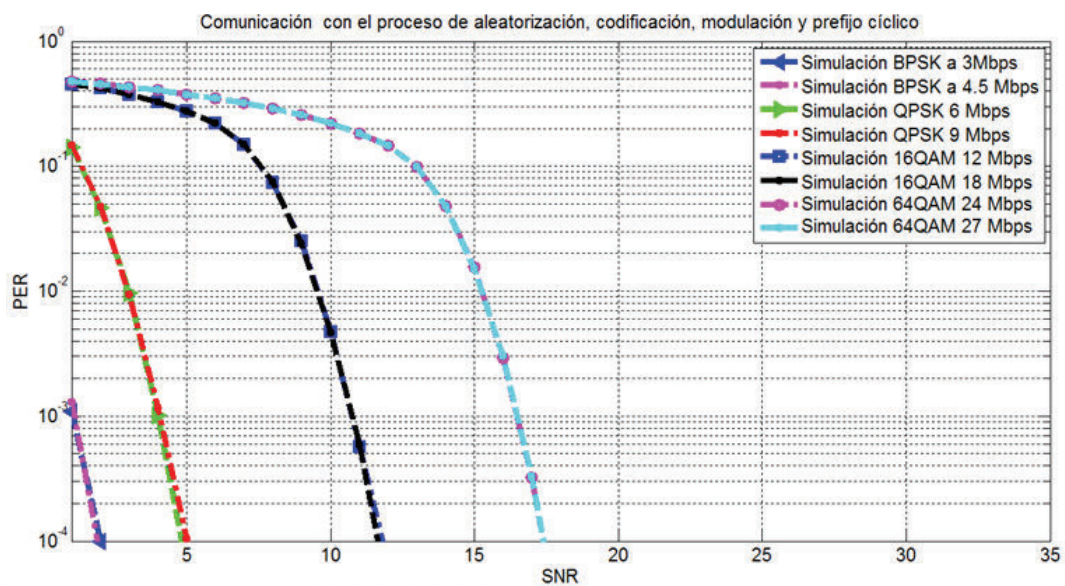


Figura 3.12 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, codificación, modulación, ensamblado, IFFT, prefijo cíclico.

Como se puede observar en las curvas obtenidas de BER y PER obtenidas después del proceso de transmisión, la codificación mejora la BER y por tanto la PER, debido a la capacidad de realizar corrección de errores. Para las modulaciones más susceptibles al ruido se requiere mayor valores de SNR para obtener mejores resultados de BER y PER. Por ejemplo a una probabilidad de error de 10^{-3} , en una modulación BPSK la mejora es de aproximadamente 6dB, QPSK la mejora es de aproximadamente 5 dB, para QAM-16 la mejora es alrededor de 4dB y para QAM-64 la mejora es de 4 dB aproximadamente.

4. Comunicación usando los bloques de aleatorización, codificación, entrelazado, modulación y construcción del símbolo OFDM.

La Figura 3.13 representa el diagrama de bloques para una comunicación con los procesos de: aleatorización/des-aleatorización, codificación/decodificación, entrelazado/des-entrelazado, modulación/demodulación, ensamblado de la trama/des-ensamblado, IFFT/FFT y agregación del prefijo cíclico/retiro del prefijo cíclico.

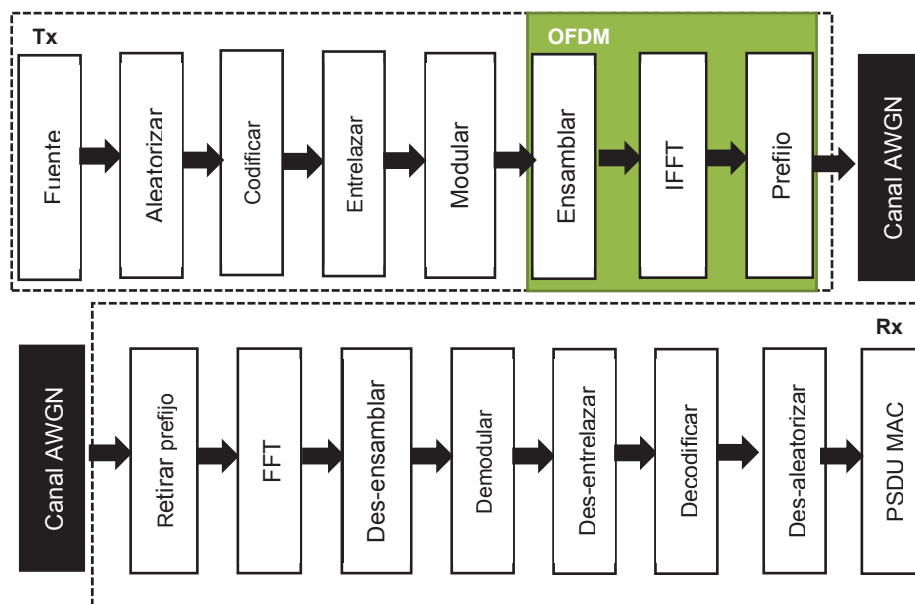


Figura 3.13 Diagrama de bloques para una comunicación con aleatorización, codificación, entrelazado, modulación y agregación del prefijo.

Además, las Figuras 3.14-3.15 muestran los resultados gráficos de la BER vs SNR y PER vs SNR respectivamente para todos los tipos de modulaciones establecidos en el estándar IEEE 802.11p.

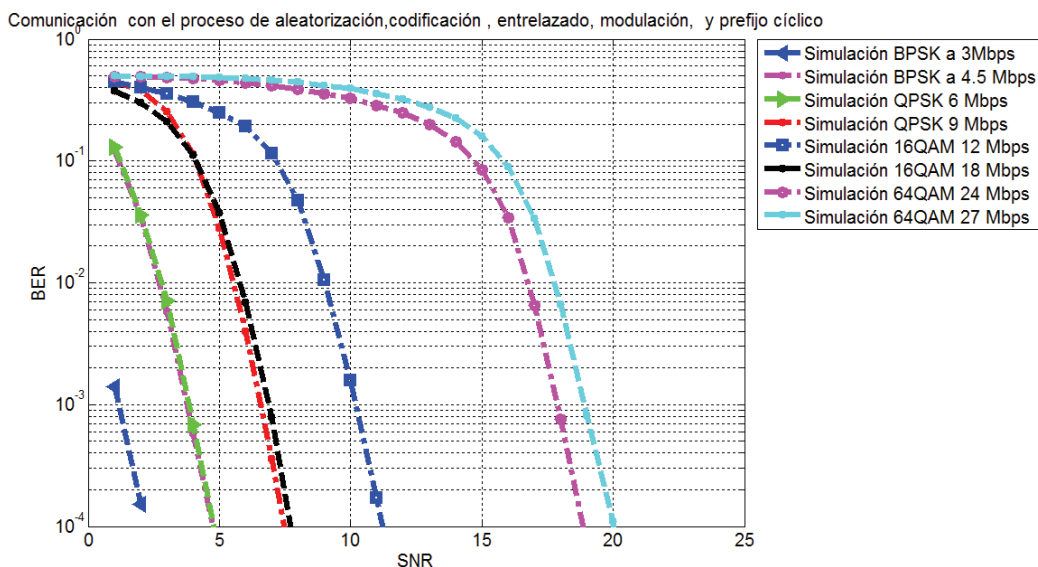


Figura 3.14 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, entrelazado, codificación, modulación, ensamblado, IFFT, agregación del prefijo.

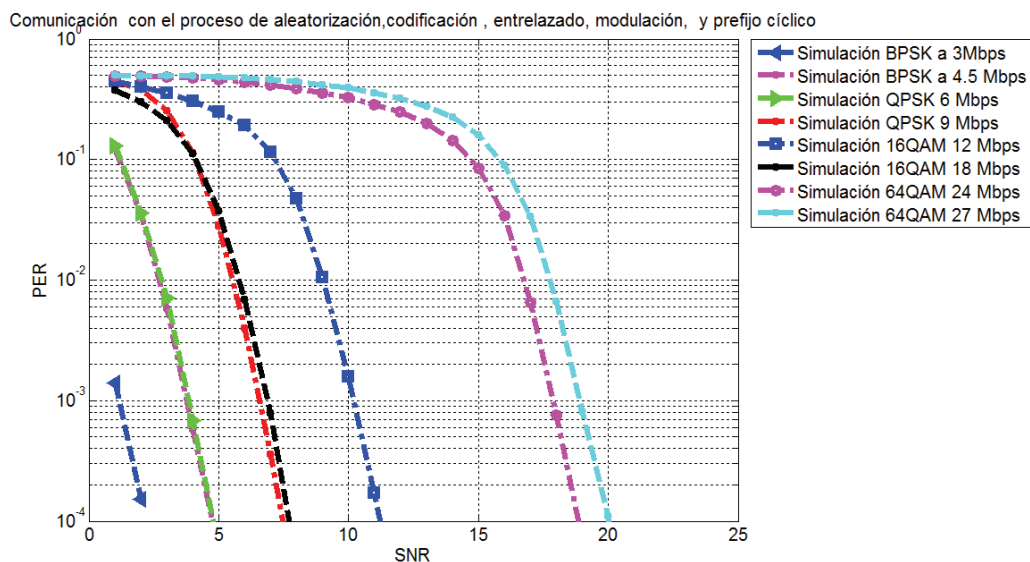


Figura 3.15 PER vs SNR para todas las velocidades del estándar IEEE 802.11p con los proceso de entrelazado, codificación, modulación, ensamblado, IFFT, agregación del prefijo.

A una probabilidad de error de 10^{-3} , en una modulación BPSK la mejora es de aproximadamente 6dB, QPSK la mejora es de aproximadamente 5 dB, para QAM-16 la mejora es alrededor de 4dB y para QAM-64 la mejora es de 4 dB aproximadamente.

5. Transmisión usando todo el proceso de comunicación

En esta sección se presenta los resultados de la simulación utilizando los procesos de: aleatorizar, codificar, entrelazar, modular, construcción del símbolo OFDM, agregar el prefijo cíclico, agregar el preámbulo en el transmisor y en el receptor los procesos inversos correspondientes, como se puede observar en la Figura 3.17 y Figura 3.18 respectivamente .

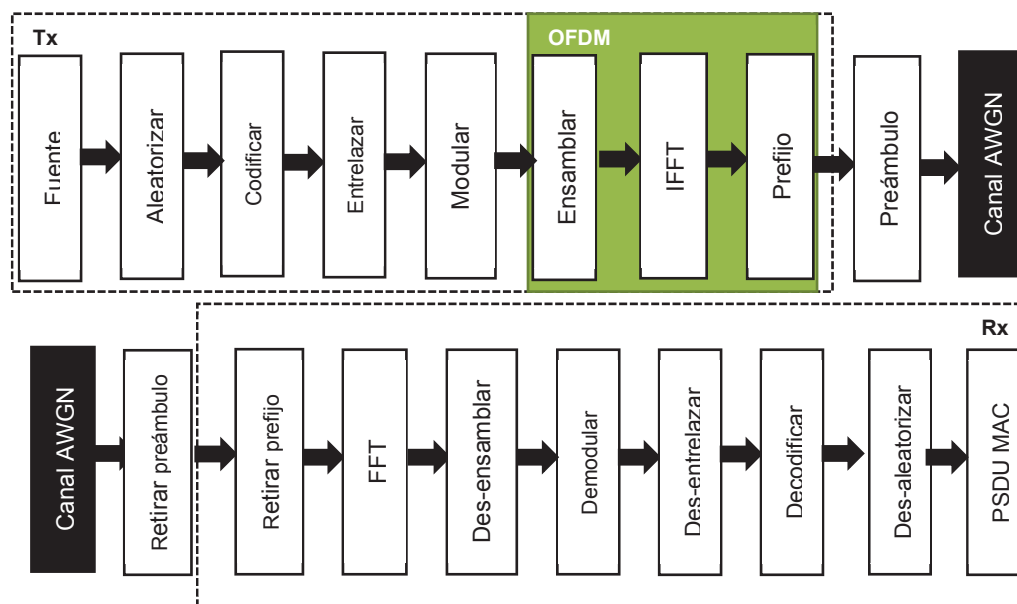


Figura 3.16 Diagrama de bloques para una comunicación con la capa física definida en el estándar IEEE 802.11p.

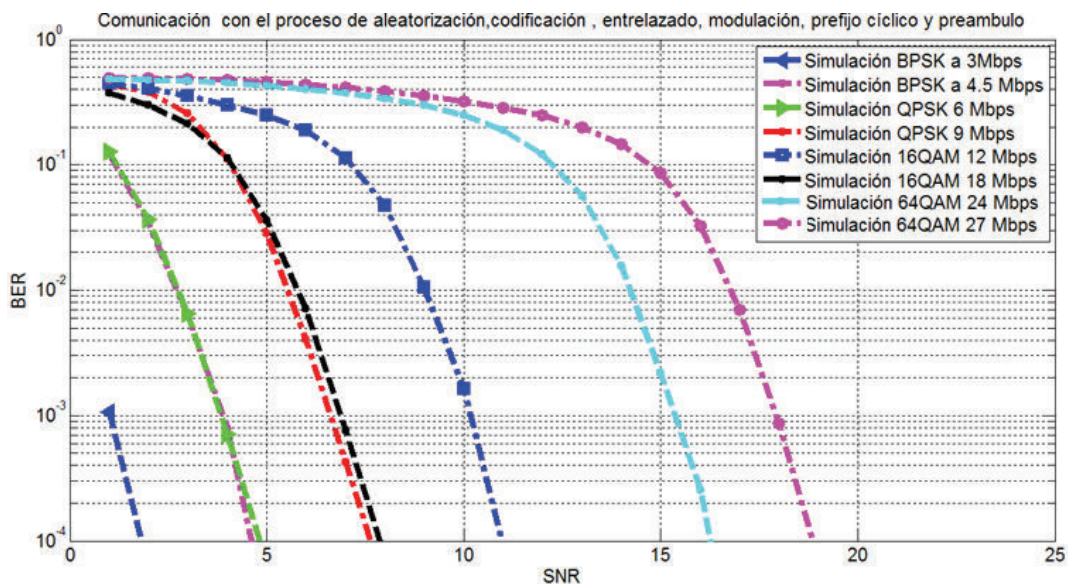


Figura 3.17 BER vs SNR para todas las velocidades del estándar IEEE 802.11p con los procesos de entrelazado, modulación, ensamblado, IFFT, prefijo y preámbulo.

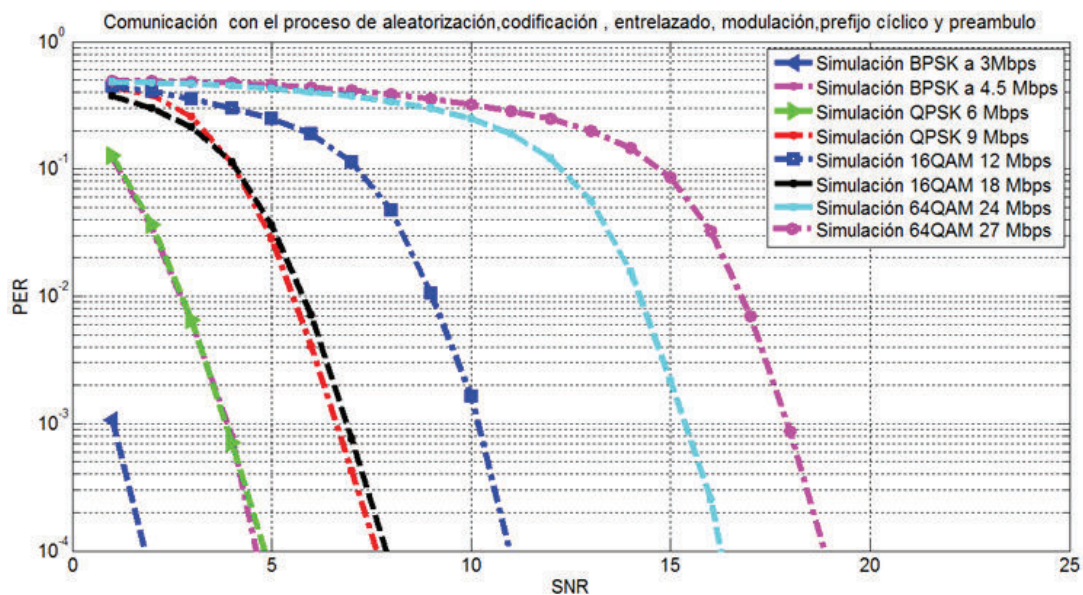


Figura 3.18 Gráficas de BER vs SNR empleando todo el proceso definido en el estándar IEEE 80211p.

Al comparar las curvas obtenidas con las anteriores se analiza que el proceso de agregación del preámbulo no mejora la BER vs SNR y PER vs SNR en un canal AWGN por las características del mismo, debido a que el preámbulo se utiliza para sincronización y transmitir información de los parámetros que utiliza la capa física.

Es importante recalcar que se presentan otras simulaciones con diferentes combinaciones de procesos en el ANEXO B del presente proyecto.

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1 CONCLUSIONES

- El desarrollo de las redes vehiculares se ha convertido en un punto de interés para la comunidad científica, debido a los grandes beneficios que otorga a los ciudadanos, siendo el transporte un medio de crecimiento económico y cultural para las poblaciones, nace la necesidad de garantizar seguridad en las carreteras, optimización del tráfico y brindar una comunicación eficaz y rápida en caso de emergencias, todas estas aplicaciones permitidas por el estándar IEEE 802.11p para redes vehiculares.
- Debido a las características de cambios topológicos a grandes velocidades, es indispensable contar con una eficiente comunicación entre los elementos que integran las redes vehiculares, y esto se logra con los cambios establecidos tanto en la capa MAC y capa física en el estándar IEEE 802.11p.
- El buen funcionamiento de la capa física del estándar IEEE 802.11p permitirá que los mensajes que se intercambian entre vehículos o entre vehículos e infraestructura lleguen correctamente a su destino.
- La capa física del estándar IEEE 802.11p está formado por un conjunto de procesos (bloques) que son: aleatorizador, codificador, modulador, multiplexación OFDM y agregación del preámbulo.
- El proceso de aleatorización evita que se genere en la fuente cadenas largas de 1L y 0L, evitando pérdidas de sincronismo y una componente DC elevada, con lo que se mejora el proceso de comunicación.

- La codificación convolucional permite corregir errores en el proceso de comunicación, mejorando los valores de BER vs SNR y PER vs SNR obtenidos, sin embargo, esto se logra con SNR mayores, con SNR muy bajos los errores incrementan. Se obtiene también reducción del PER vs SNR con el proceso de codificación.
- La codificación permite la corrección de errores a nivel de bit, por lo que se tiene una comunicación más eficiente con el proceso de entrelazado ya que este último convierte los errores de ráfaga en errores aleatorios, al implementar el proceso de codificación y entrelazado se observa mejoras tanto en BER vs SNR como PER vs SNR para todos los casos, siendo la modulación BPSK la que presenta menor cantidad de errores en la transmisión.
- Las mejoras de BER y PER obtenidas con el proceso de codificación a una probabilidad de error de 10^{-3} , para BPSK fue de aproximadamente 6dB, QPSK fue de aproximadamente 5 dB, para QAM-16 fue de 4dB y para QAM-64 fue de 4 dB aproximadamente.
- El proceso de perforado permite obtener mayores velocidades en la transmisión al omitir algunos bits, sin embargo, es necesario tener mayores valores de SNR para obtener resultados más satisfactorios.
- El proceso de modulación utiliza codificación de Gray, con lo que se obtiene un único bit de diferencia entre los símbolos cercanos, si un símbolo cae en el lugar de otro que está cercano, simplemente hay que corregir un solo bit.
- Al analizar los diferentes diagramas de constelación obtenidos, se observa que para bajos valores de SNR es difícil diferenciar los estados correspondientes a los símbolos, especialmente en las modulaciones 16-QAM Y 64-QAM.
- Los procesos de construcción de la trama y Transformada Inversa de Fourier y sus respectivo procesos en el receptor mejora los resultados de BER vs SNR y

PER vs SNR con relación a tener únicamente el proceso de modulación y demodulación. Cuando se tiene una comunicación con modulación y demodulación únicamente, la BER teórico y simulado son similares.

- La agregación del prefijo cíclico no influye en la comunicación con un canal AWGN, ya que este mejoraría los resultados en un canal multi-camino siempre que la duración del prefijo sea mayor al máximo retardo del canal.
- La agregación del preámbulo tampoco mejora la BER en un canal AWGN, sin embargo, en canales con efecto multi-camino si mejoraría. Y al agregar los procesos de IFFT/FFT y entramado la BER disminuye en el canal AWGN.
- Los procesos realizados en la capa física del estándar IEEE 802.11p son eficientes y reducen la BER y PER frente a los efectos de canal inalámbrico de manera óptima, mejorando la comunicación y permitiendo obtener los resultados esperados en ambientes *outdoor* típicos en redes vehiculares.

4.2 RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- Se recomienda el uso de diagrama de bloques y diagrama de flujo para implementar la programación y facilitar la comprensión de cada proceso empleado en la simulación de la capa física del estándar IEEE 802.11p.
- Para proporcionar la implementación de la simulación se recomienda agregar por procesos, observando los resultados que la BER arroja al agregar cada proceso en el transmisor y receptor, para corregir con mayor facilidad posibles errores y fallas cometidas en la programación.
- Como trabajo futuro se puede implementar a esta simulación en un canal *Raleigh* o canal *Rician* para acercarse más a un ambiente de comunicación real y a su vez comprobar los resultados que se obtendrían con cada modulación, tasa de codificación y procesos implementados en cada comunicación.
- También, se podría analizar una comunicación que inicia desde la capa MAC a través de la capa física y con el uso del canal inalámbrico. Para verificar las mejoras de la capa MAC en conjunto con la capa física implementados en los estándares IEEE 802.11p, IEEE 1609.
- Este trabajo puede servir como base para implementar mejoras en la capa física del IEEE 802.11p, por ejemplo implementar algoritmos de reducción de los picos de potencia de OFDM, evaluar diferentes técnicas de sincronización del símbolo OFDM en ambientes VANETs, estimación del canal, etc.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. P. A. L. Fernando Andreu, Redes WLAN, Barcelona, España: Ed. MARCOMBO S.A, 2006, pp. 1-30.
- [2] 8. IEEE, «Estándar para redes inalámbricas de área local,» 2012. [En línea].
- [3] I. IEEE 802.11a, 2010. [En línea].
- [4] I. IEEE 802.11b, 2007. [En línea].
- [5] I. IEEE 802.11g, 2003. [En línea].
- [6] I. 802.11n, 2004. [En línea].
- [7] I. 802.11ac, 2014. [En línea].
- [8] P. S. Duke, «NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL,» Septiembre 2002. [En línea].
Available:
http://calhoun.nps.edu/bitstream/handle/10945/5321/02Sep_Duke.pdf?sequence=1.
- [9] G. Jimenez, «UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID,» Junio 2005. [En línea].
Available:
http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/11434/victor_gil_tesis.pdf?sequence=1.
- [10] Proz, «PROZ.COM,» 14 Julio 2007. [En línea]. Available:
http://www.proz.com/kudoz/english_to_spanish/it_information_technology/2004695-complementary_code_keying_cck.html.
- [11] H. S, Communications Systems, Ed. Jhon Wiley & Sons, 2010.
- [12] R. Vozmediano, «REDES: ACCESO MÚLTIPLE Y REDES DE ÁREA LOCAL,» [En línea]. Available:
<http://www.fdi.ucm.es/profesor/rubensm/redes/Trasparencias/Tema%204.pdf>.
- [13] A. Y. Z. Yerobi, «Escuela Politecnica Superiro de Chimborazo,» 2010. [En línea].
Available:
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/328/1/18T00409.pdf>.
- [14] G. Friedrich, «Evaluación de una Variante de Control de Acceso al,» 2010. [En línea]. Available:

http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/19347/Documento_completo.pdf?sequence=1.

- [15] B. A. G. , J. M. M. O. y. G. A. M. Caicedo et all, «Evaluación del Desempeño de Redes 802.11p/WAVE en la Transmisión de Datos, Voz y Video IP,» *Revista Universitaria en Telecomunicaciones, Informática y Control. Volumen 1. N° 1.*, pp. 16-17, 2012.
- [16] P. G. L. D. P. L. F. Jiménez et all, «Simulación y análisis de desempeño de,» *Revista Tecnura, Volumen 16, Numero 31*, pp. 66-75, 2012.
- [17] A. M. , G. L. R. M. Orozco, «Redes vehiculares Ad-hoc: aplicaciones basadas en simulación,» *Ingenlun ciencia y tecnología*, pp. 3-5, 2012.
- [18] N. V. E. Maldonado, «Universidad Técnica Particular de Loja,» 2012. [En línea]. Available: <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/4276>.
- [19] D. E. T. E. Aucancela et all, «UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA SEDE CUENCA,» MARZO 2015. [En línea]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8962/1/UPS-CT005237.pdf>.
- [20] J. G. F. R. B. Sempere, «Universidad Miguel Hernández,» [En línea]. Available: http://www.uwicore.umh.es/files/paper/2008_national/uwicore_IST08_Protocolos%20para%20Comunicaciones%20M%C3%B3viles%20Vehiculares%20Multihop.pdf.
- [21] H. M. G. Calderon, «UNIVERSIDAD DE VALLADOLID,» 2015. [En línea]. Available: <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/15205>.
- [22] T. G. J. Bautista, «Universidad Politécnica de Cartagena,» 2009. [En línea]. Available: <http://www.ait.upct.es/~eegea/pub/jitel09-2.pdf>.
- [23] J. A. , C. F. B. M. R. Guerrero Ibáñez, «XXIII Congreso Nacional y IX Congreso Internacional de Informática y Computación,» 13,14,15 Octubre 2010. [En línea]. Available: http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/11304/CNCIIC-2010_angelica.pdf.
- [24] O. Oscar, 12 Mayo 2014. [En línea].
- [25] IEEE 1609 Series, 2012. [En línea]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7428792/>.
- [26] T.-U. S. f. W. A. i. V. E. (. S. S. f. A. a. M. M. IEEE 1609.2, 2006. [En línea].
- [27] T.-U. S. d. W. A. i. V. E. (. M.-C. O. IEEE 1609.3, 2007. [En línea].

- [28] I. 1. T.-U. S. f. W. A. i. V. E. IEEE 1609.4, 2006. [En línea].
- [29] IEEE , «IEEE Standar Association,» 1098. [En línea]. Available: <https://standards.ieee.org/about/get/802/802.2.html>.
- [30] «IEEE Vehicular Networking Conference,» 14-16 Noviembre 2011. [En línea].
- [31] D. M. Gallardo. J. R., «IEEE,» de *Performance Analysis of the EDCA Medium Access Mechanism over the Control Channel of an IEEE 802.11p WAVE Vehicular Network*, 2009.
- [32] E. E. L. J. G. H. Juan Bautista Tomas Gabarron, «Evaluacion de mecanismos de priorizacion en 802.11p con VHDL,» de *VII Jornada de Ingenieria Telematica 190-196*, Cartagena, 2009.
- [33] IEEE , «IEEE Computer Society,» 15 Julio 2010. [En línea].
- [34] S. Alvaro, «OFDM: MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIAS ORTOGONALES,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.modulo0tutoriales.com/tutorial/ofdm-multiplexacion-por-division-de-frecuencias-ortogonales/>.
- [35] J. M. V. González, «Escuela Superior Politécnica del Litoral,» 2008. [En línea]. Available: www.cib.espol.edu.ec/Digipath/D_Tesis_PDF/D-38117.pdf.
- [36] TelecomHall, «TelecomHall ES,» 14 Noviembre 2014. [En línea]. Available: <http://www.telecomhall.com/es/que-es-cp-prefijo-ciclico-en-lte.aspx>.
- [37] O. B. González Hernández, «ciencias y tecnologías,» 2005. [En línea]. Available: <ftp://tesis.bbt.k.ull.es/ccppytec/cp192.pdf>.
- [38] J. P. Q. C. S. C. Jiménez Leonardo, «Modulación multiportadora OFDM,» *RevistasUdistral*, pp. 30-34, 2001.
- [39] J. M. Serrano Rubio, «Universidad de Sevilla,» [En línea].
- [40] C. F. Rodríguez Patricia, «Universidad de la República,» 2008. [En línea]. Available: iee.fing.edu.uy/publicaciones/2008/RC08/RC10.pdf.
- [41] Y. Paulina, «Escuela Politécnica Nacional,» Febrero 2009. [En línea]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1455/1/CD-2729.pdf>.
- [42] J. Jaime, «Escuela Politécnica del Ejército,» 16 Agosto 2012. [En línea]. Available: repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5590/1/T-ESPE-033736.pdf.

- [43] MATLABR2012a, *Ayuda de Matlab*, 2012.
- [44] E. Rueda, « Análisis comparativo del BER para modulaciones BPSK y QPSK,» [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/doc/111228652/analisis-comparativo-de-ber-para-modulaciones-bpsk-y-qpsk-en-distintos-tipos-de-canales>.
- [45] H. R. Dorath Morales, «Análisis de seguridad en la comunicación inalámbrica,» Universidad Don Bosco, FEBRERO 2015. [En línea].
- [46] L. D. Daniel Jiang, «IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments,» 23 MAYO 2010. [En línea].
- [47] J. J. J. Rodriguez, «Universidad Autonoma de San Luis Potos,» Enero 2014. [En línea].
- [48] L. M. M. GUZMAN, «Universidad Austral de Chile,» 2005. [En línea]. Available: cybertesis/uach.cl/tesis/uach/2005/bmfcim971a/doc/bmfcim971a.pdf.
- [49] J. A. S. Bravo, «Universidad Austral de Chile,» 2004. [En línea]. Available: cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2004/bmfcis684e/doc/bmfcis684e.pdf.
- [50] D. Morales, «Universidad Don Bosco,» Febrero 2015. [En línea].
- [51] J. G. Sempere, «Universidad Miguel Hernández,» Noviembre 2015. [En línea]. Available: http://www.uwicore.umh.es/files/paper/2008_national/uwicore_IST08_Protocolos%20para%20Comunicaciones%20M%C3%B3viles%20Vehiculares%20Multihop.pdf.

ANEXOS

ANEXO A: PROGRAMACIÓN EN MATLAB

Este ANEXO se adjunta en el CD.

ANEXO B: SIMULACIONES

B 1 Comunicación con modulación y construcción del símbolo OFDM sin prefijo cíclico.

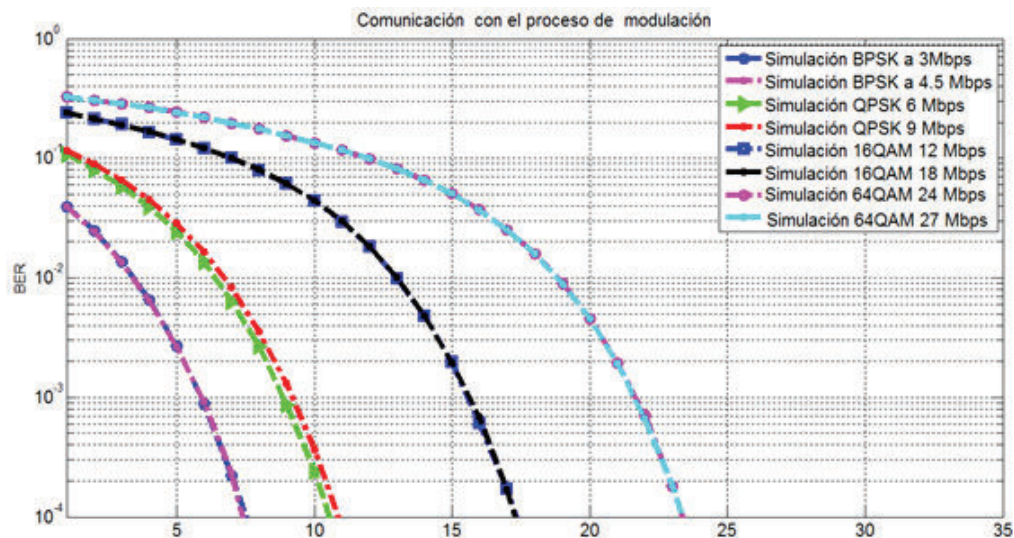


Figura B-1 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de modulación, ensamblado, IFFT.

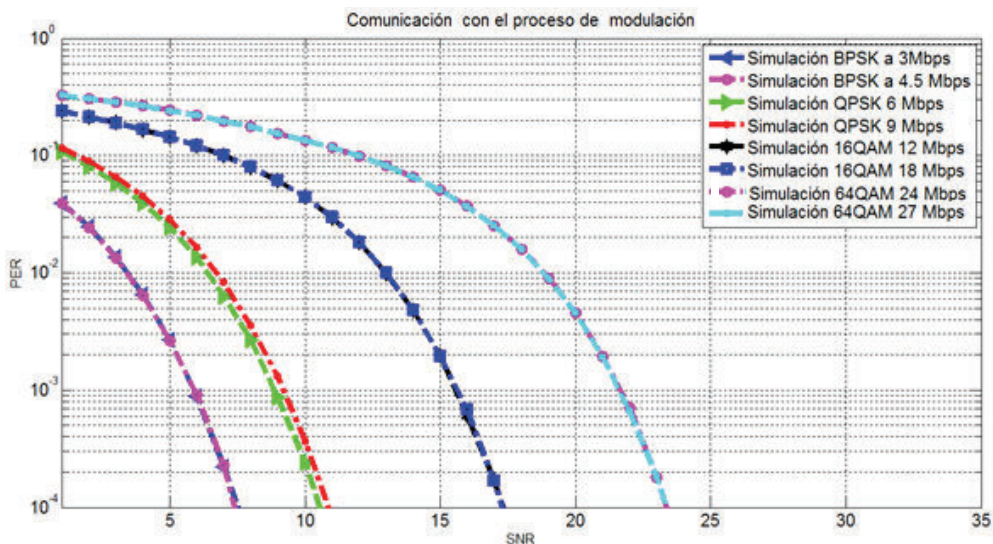


Figura B-2 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de modulación, ensamblado, IFFT.

B 2 Comunicación con los bloques de aleatorización, modulación y construcción del símbolo OFDM sin prefijo cíclico.

Se agrega el proceso de aleatorización en comparación con las simulaciones del punto uno de esta sección.

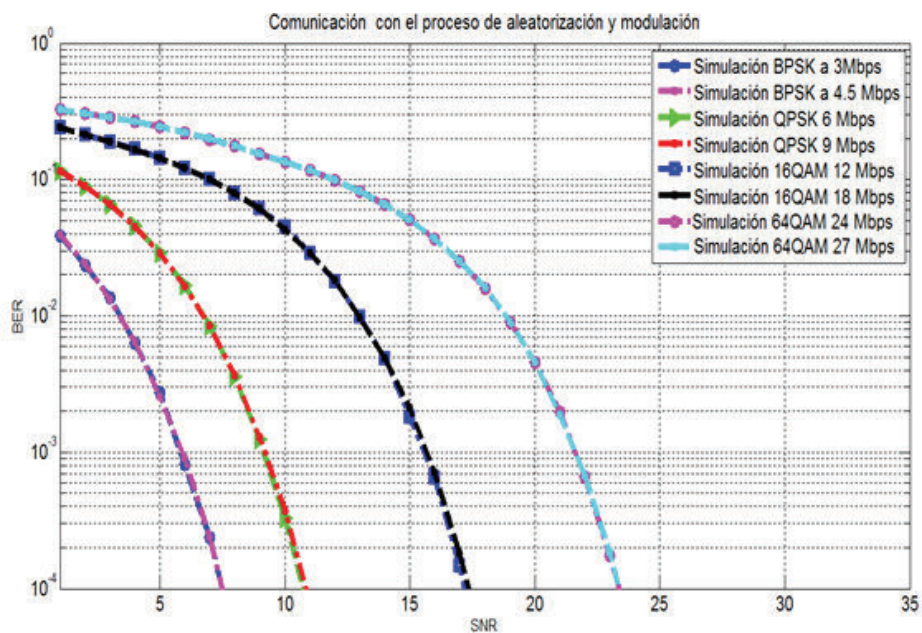


Figura B-3 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, modulación, ensamblado, IFFT.

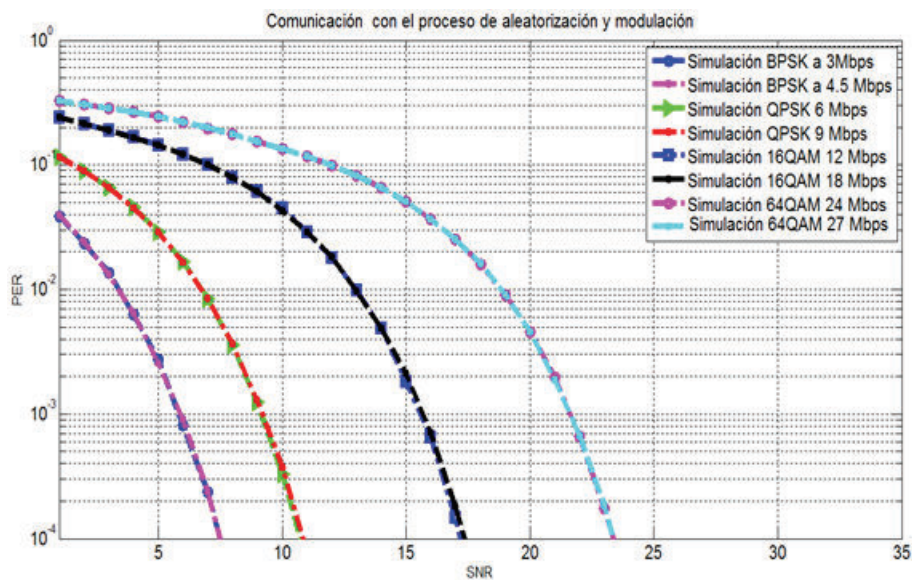


Figura B-4 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, modulación, ensamblado, IFFT.

B 3 Comunicación usando los bloques de aleatorizar, codificar, modulación y construcción del símbolo OFDM sin prefijo cíclico.

Se agrega el proceso de codificación en comparación con las simulaciones del punto dos de esta sección.

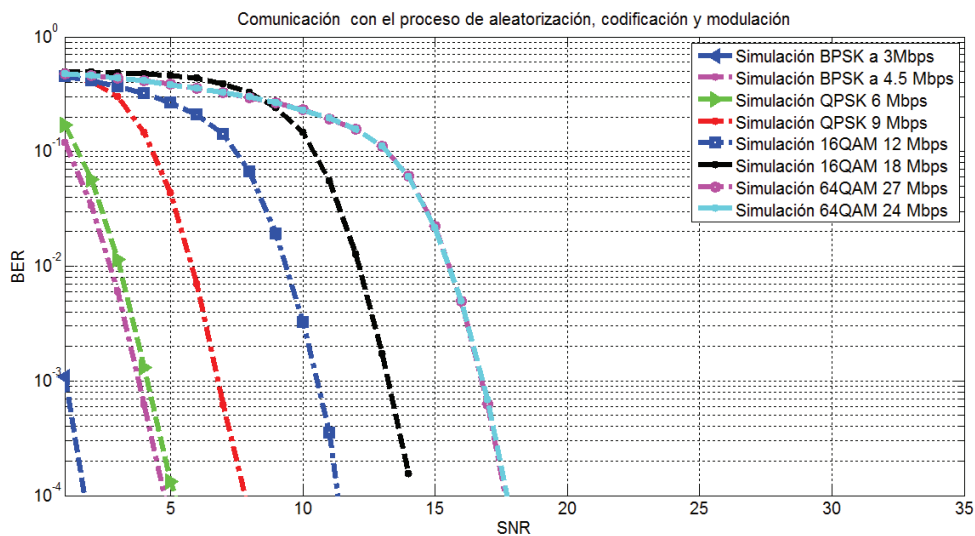


Figura B-5 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, codificación, modulación, ensamblado, IFFT.

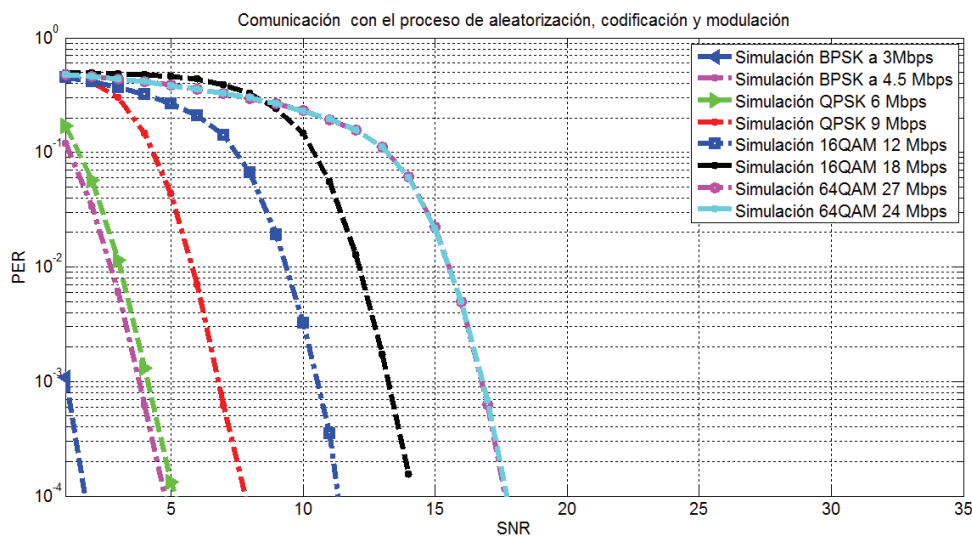


Figura B-6 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, codificación, modulación, ensamblado, IFFT.

B 4 Comunicación usando los bloques de aleatorizar, entrelazar, modulación, construcción del símbolo OFDM sin prefijo cíclico.

Se agrega el proceso de entrelazado en comparación con las simulaciones del punto dos de esta sección.

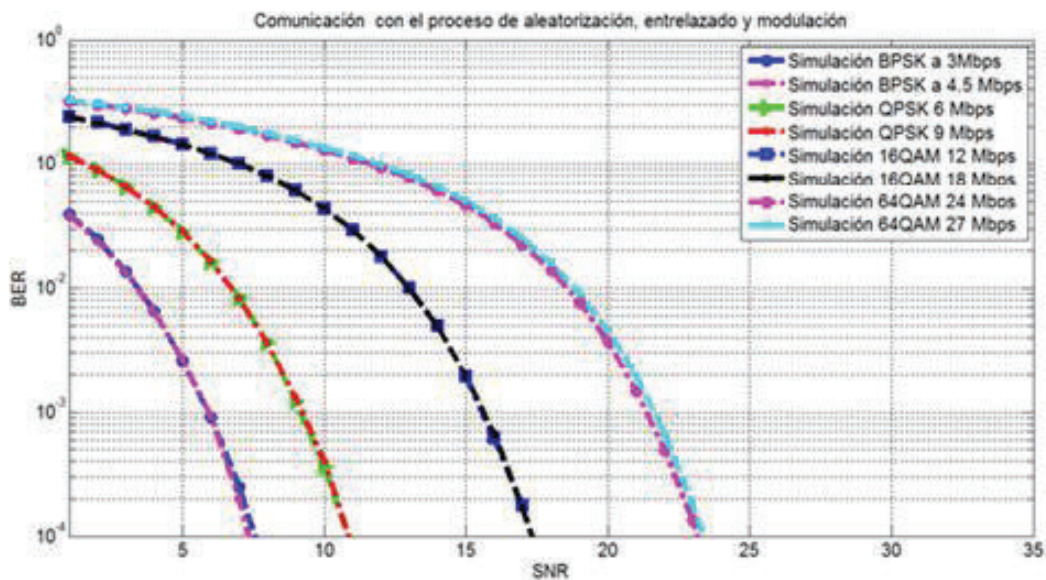


Figura B-7 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, entrelazado, modulación, ensamblado, IFFT.

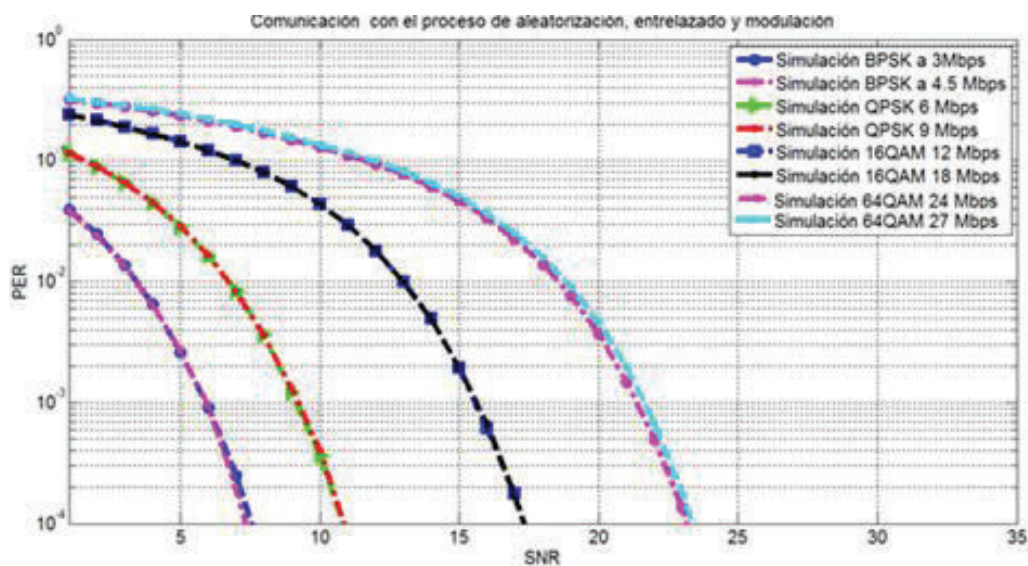


Figura B-8 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, entrelazado, modulación, ensamblado, IFFT.

B 5 Comunicación usando los bloques de aleatorización, modulación, construcción del símbolo OFDM sin prefijo cíclico y agregación del preámbulo.

Se agrega el preámbulo en comparación con las simulaciones del punto dos de esta sección.

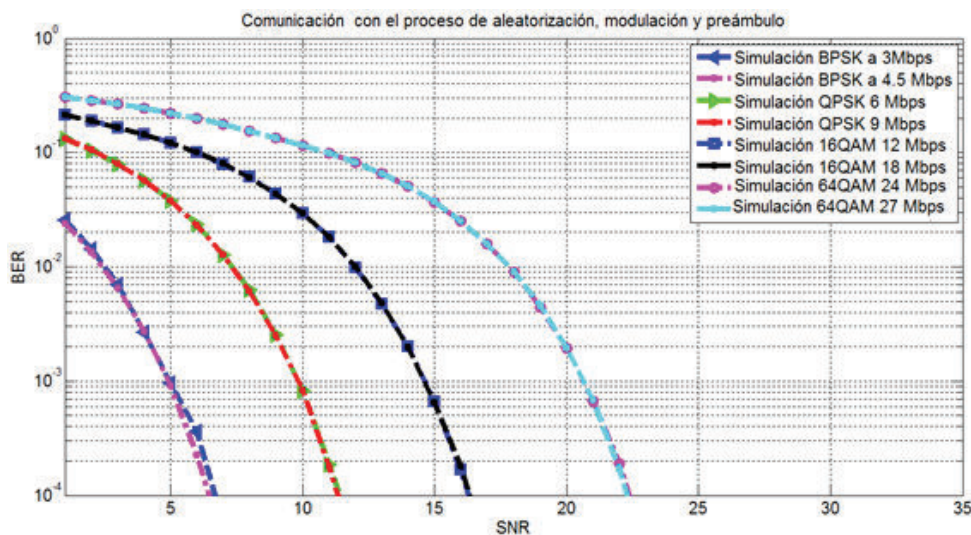


Figura B-9 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, modulación, ensamblado, IFFT y preámbulo.

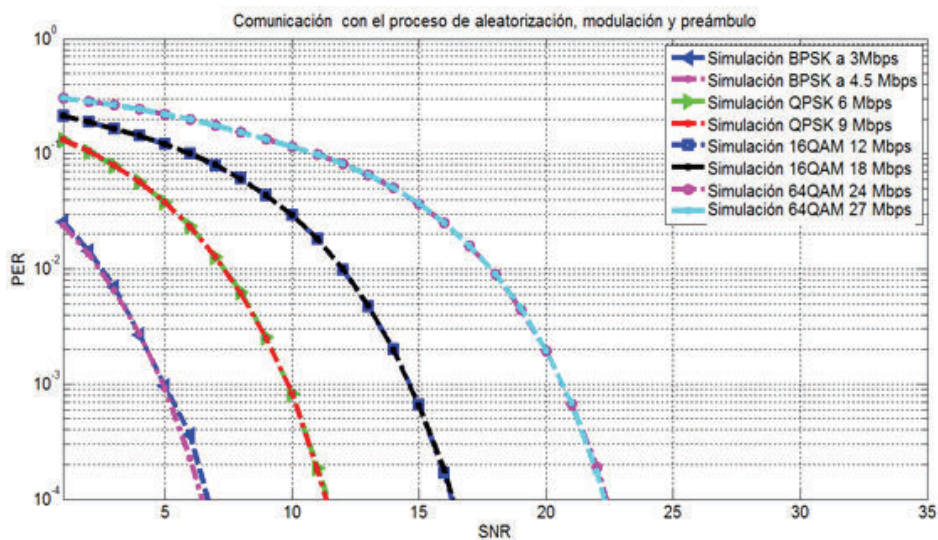


Figura B-10 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, modulación, ensamblado, IFFT y preámbulo.

Comparación de los resultados de BER vs SNR y PER vs SNR conseguidos en los puntos 2-5, la comunicación se realiza con 10 000 símbolos transmitidos, se analiza el resultado de SNR obtenido para BER y PER de 10^{-3} .

Tabla B- 1 Valores de SNR obtenidos con el proceso base 1

Procesos agregados/SNR[dB]	BPSK ½	BPSK ¾	QPSK 1/2	QPSK ¾	16QAM ½	16QAM ¾	64QAM ¾	64QAM 2/3
Proceso Base 1	6 dB	6 dB	9 dB	9 dB	16 dB	16 dB	22 dB	22 dB
Codificar	1 dB	3 dB	4 dB	7 dB	11 dB	13 dB	16 dB	16 dB
Entrelazar	6 dB	6 dB	9 dB	9 dB	16 dB	16 dB	22 dB	22 dB
Preámbulo	5 dB	5 dB	10 dB	19 dB	15 dB	15 dB	21 dB	21 dB

Proceso Base 1: Aleatorizar + Modulación + IFFT/FFT+ ensamblado.

B 6 Comunicación usando los bloques de codificación, modulación y construcción del símbolo OFDM sin prefijo cíclico.

Se agrega el proceso de codificación en comparación con las simulaciones del punto uno de esta sección.

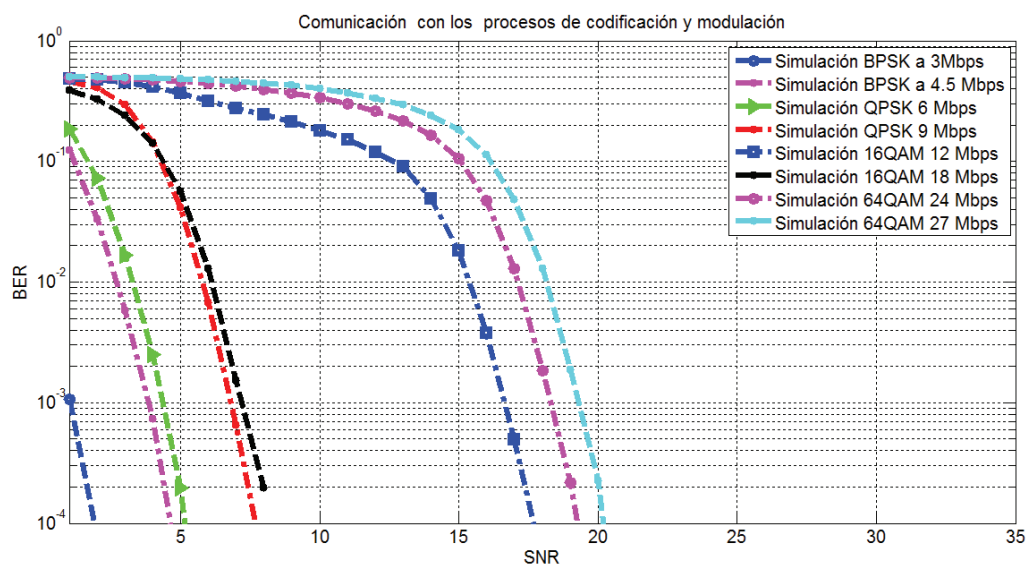


Figura B-11 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de codificación, modulación, ensamblado, IFFT.

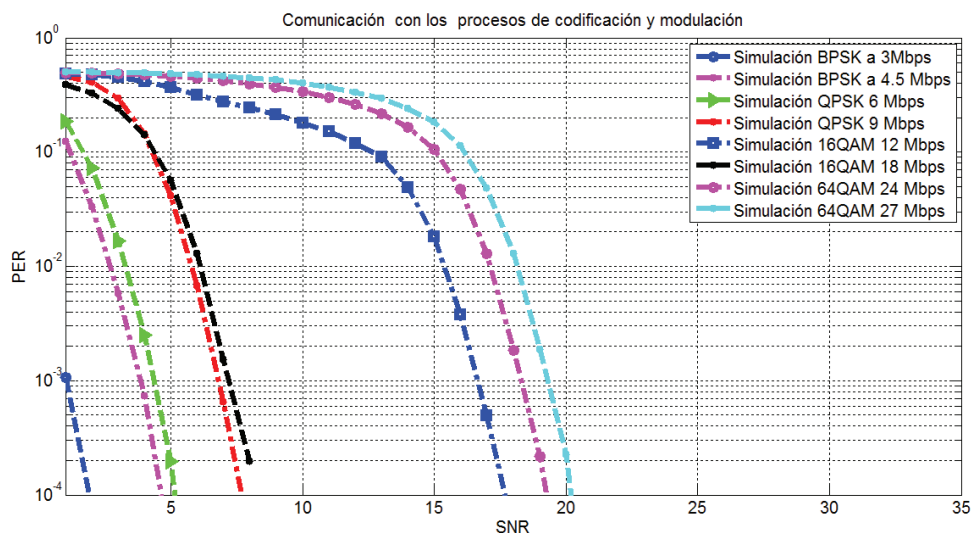


Figura B-12 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de codificación, modulación, ensamblado, IFFT.

B 7 Comunicación usando los bloques de codificación, entrelazado, modulación y construcción del símbolo OFDM sin prefijo cíclico.

Se agrega el proceso de entrelazado en comparación con las simulaciones del punto seis de esta sección.

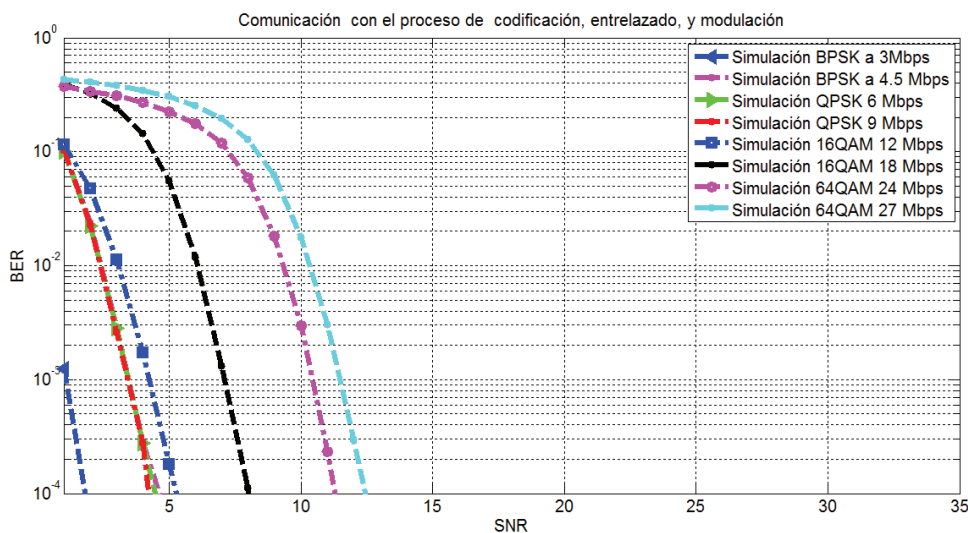


Figura B-13 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de codificación, entrelazado, modulación, ensamblado, IFFT.

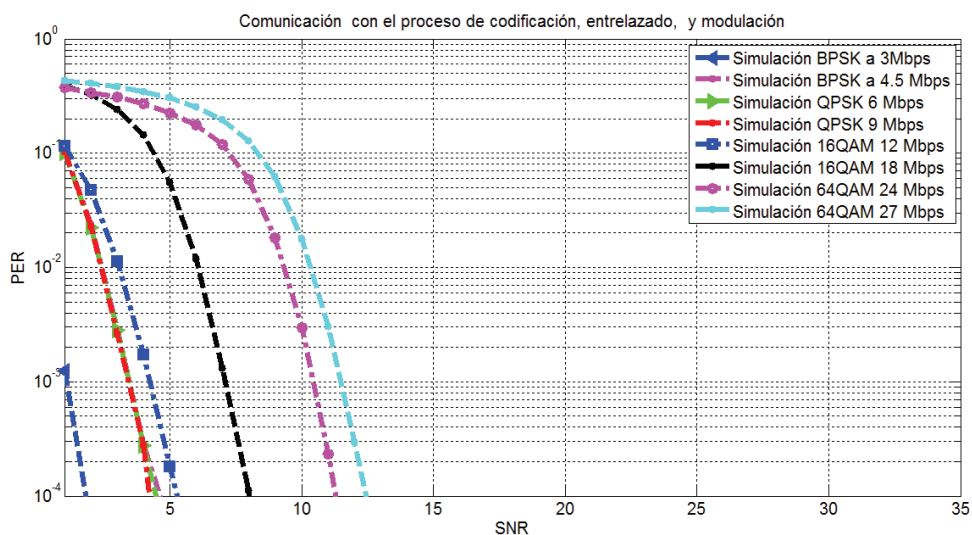


Figura B-14 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de codificación, entrelazado, modulación, ensamblado, IFFT.

B 8 Comunicación usando los bloques de codificación, modulación y construcción del símbolo OFDM.

Se agrega el prefijo cíclico en comparación con las simulaciones del punto seis de esta sección.

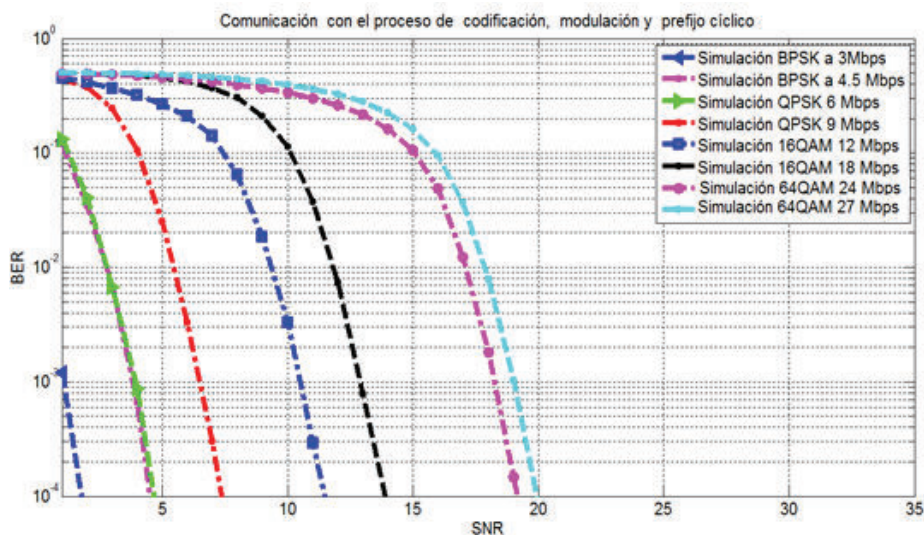


Figura B-15 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de codificación, modulación, ensamblado, IFFT y prefijo.

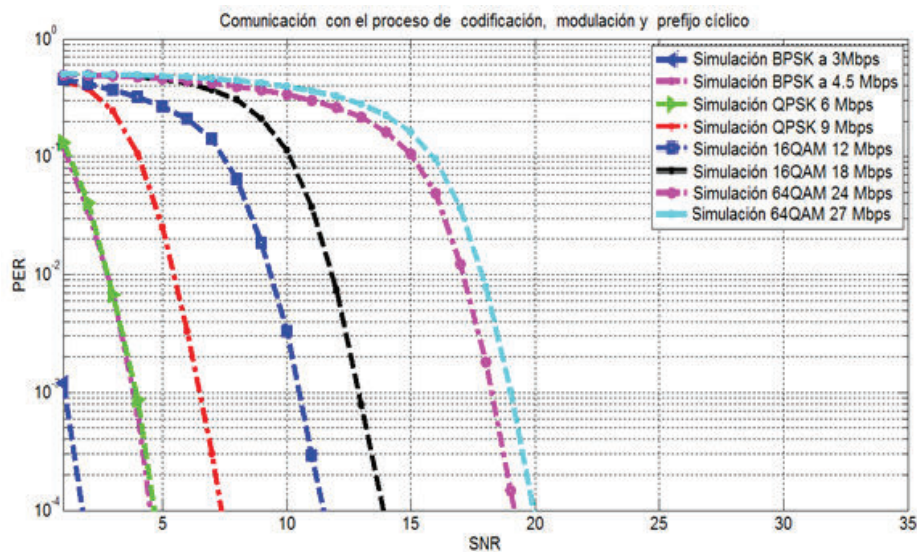


Figura B-16 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de codificación, modulación, ensamblado, IFFT y prefijo.

B 9 Comunicación usando los bloques de codificación, modulación, construcción del símbolo OFDM sin prefijo cíclico y agregación del preámbulo:

Se agrega el preámbulo en comparación con las simulaciones del punto seis de esta sección.

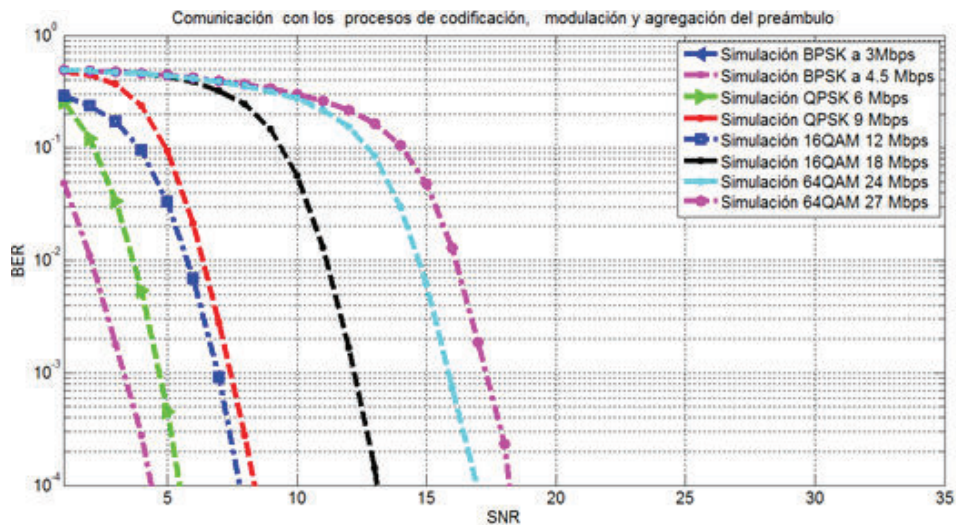


Figura B-17 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de codificación, modulación, ensamblado, IFFT y preámbulo.

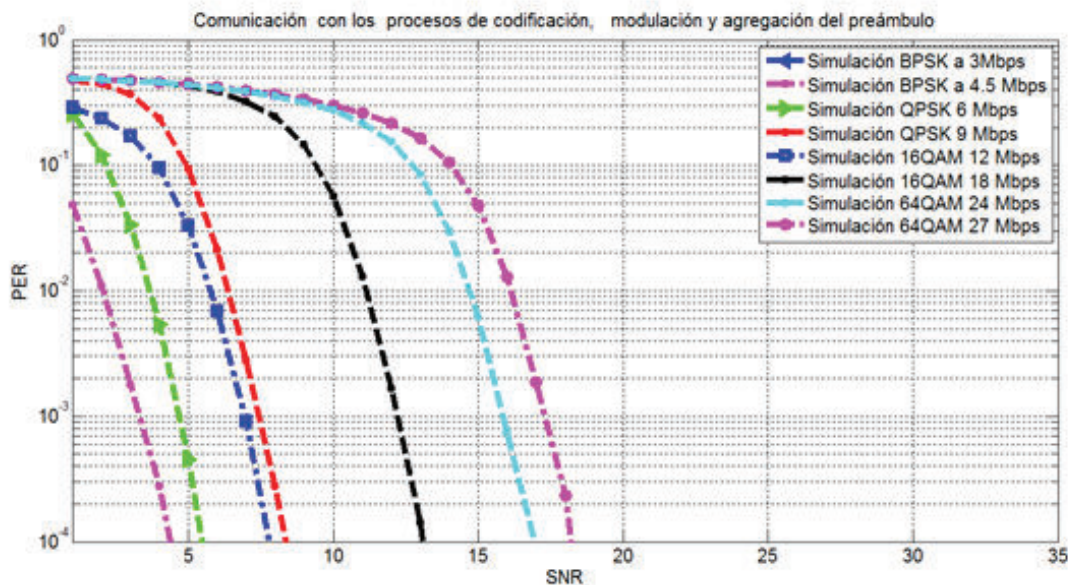


Figura B-18 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de codificación, modulación, ensamblado, IFFT y preámbulo.

Comparación de los resultados de BER vs SNR y PER vs SNR conseguidos en los puntos 6-9, la comunicación se realiza con 10 000 símbolos transmitidos, se analiza el resultado de SNR obtenido para BER y PER de 10^{-3} .

Tabla B- 2 Valores de SNR obtenidos con el proceso base 2

Procesos agregados/SNR[dB]	BPSK ½	BPSK ¾	QPSK 1/2	QPSK ¾	16QAM ½	16QAM ¾	64QAM ¾	64QAM 2/3
Proceso Base 2	1dB	3 dB	4dB	7 dB	8dB	14 dB	19 dB	21 dB
Entrelazar	1 dB	3 dB	3 dB	3 dB	4 dB	7 dB	11 dB	12 Db
Prefijo cíclico	1 dB	3dB	4dB	7 dB	11 dB	14 dB	18 dB	19 dB
Preámbulo	1 dB	4dB	5 dB	8 dB	9 dB	14 dB	16 dB	18 dB

Proceso base 2: Codificar + Modulación + IFFT/FFT+ ensamblado

B 10 Comunicación usando los bloques de entrelazado, modulación y construcción del símbolo OFDM sin prefijo cíclico.

Se agrega el proceso de entrelazado en comparación con las simulaciones del punto uno de esta sección.

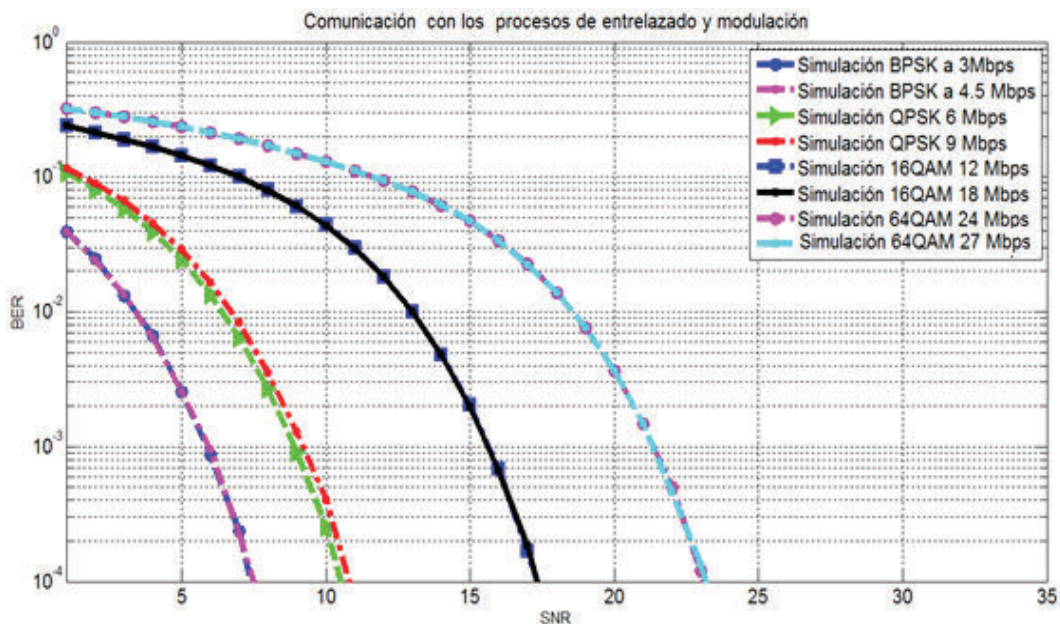


Figura B-19 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de entrelazar, modulación, ensamblado, IFFT.

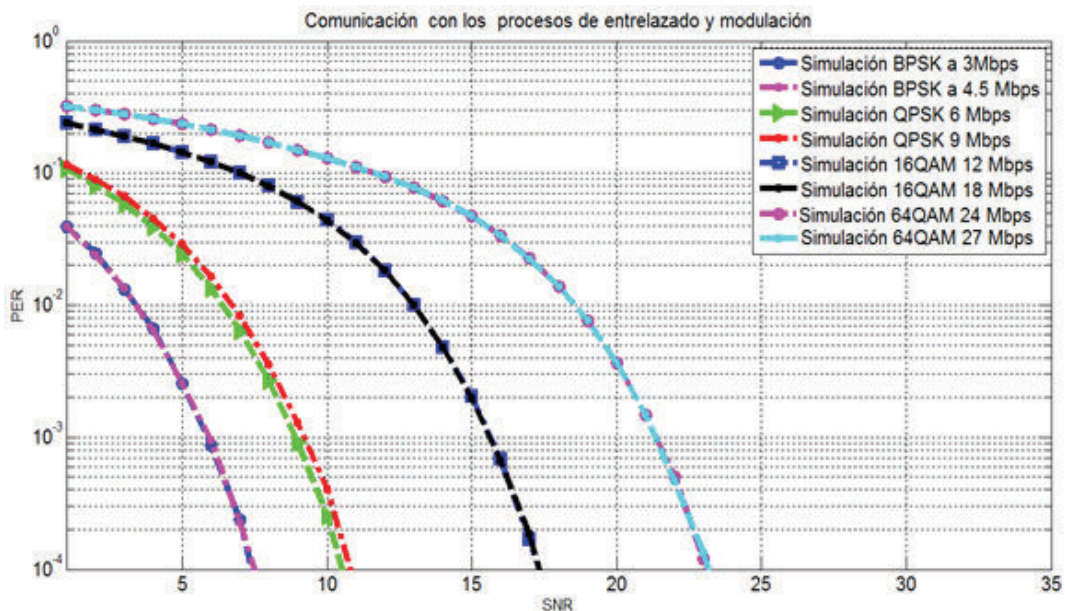


Figura B-20 Gráfica del PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de entrelazar, modulación, ensamblado, IFFT.

B 11 Comunicación usando los bloques de entrelazado, modulación, construcción del símbolo OFDM.

Se agrega el prefijo cíclico en comparación con las simulaciones del punto diez de esta sección.

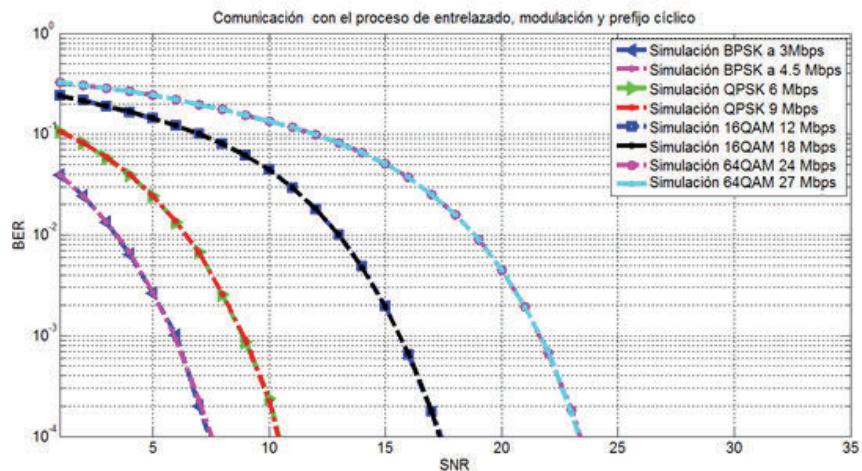


Figura B-21 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de entrelazar, modulación, ensamblado, IFFT y prefijo.

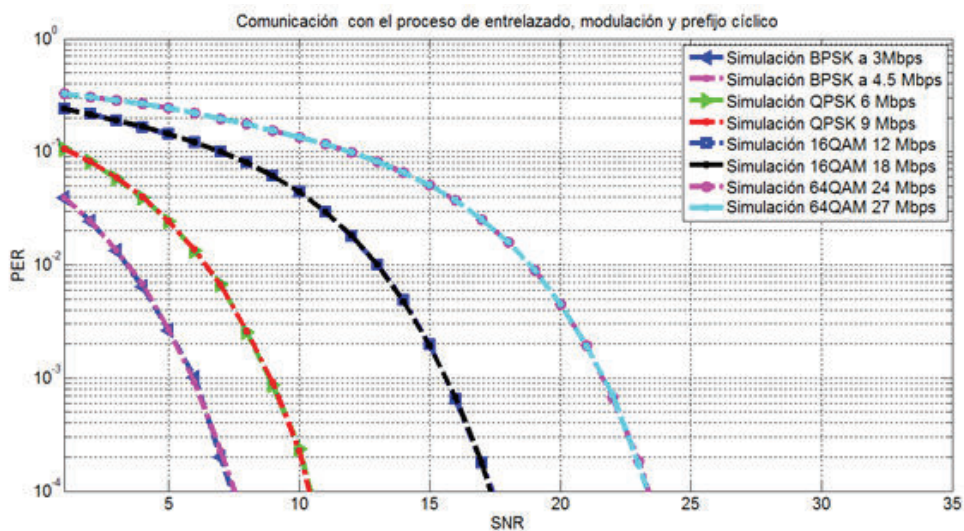


Figura B-22 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de entrelazar, modulación, ensamblado, IFFT y prefijo.

B 12 Comunicación usando los bloques de entrelazado, modulación, construcción del símbolo OFDM sin prefijo cíclico y agregación del preámbulo.

Se agrega el preámbulo en comparación con las simulaciones del punto diez de esta sección.

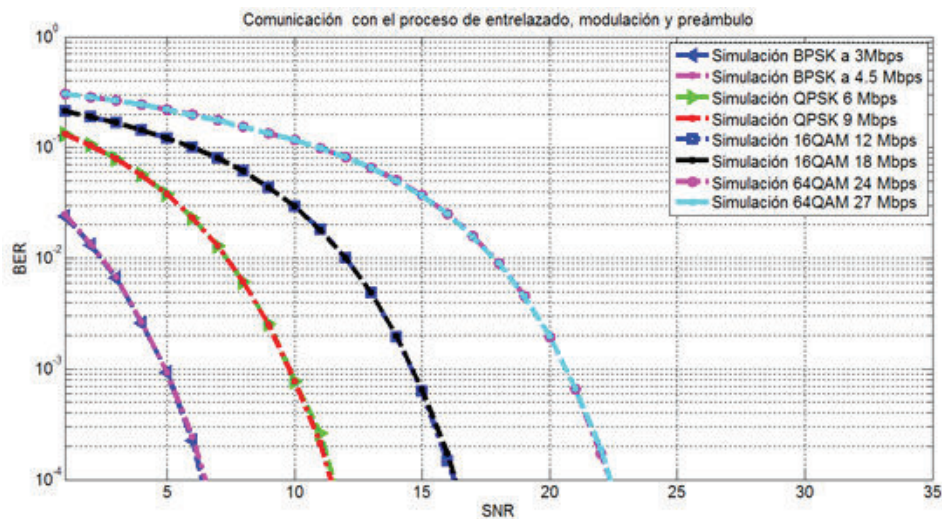


Figura B-23 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de entrelazar, modulación, ensamblado, IFFT y preámbulo.

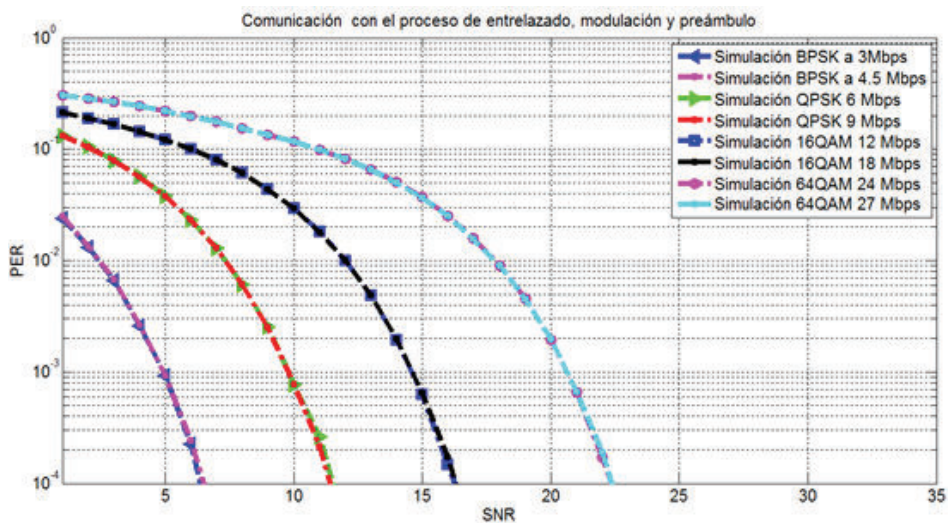


Figura B-24 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de entrelazar, modulación, ensamblado, IFFT y preámbulo.

Comparación de los resultados de BER vs SNR y PER vs SNR conseguidos en los puntos 10-12, la comunicación se realiza con 10 000 símbolos transmitidos, se analiza el resultado de SNR obtenido para BER y PER de 10^{-3} .

Tabla B- 3 Valores de SNR obtenidos con el proceso base 3

Procesos agregados/SNR[dB]	BPSK $\frac{1}{2}$	BPSK $\frac{3}{4}$	QPSK $\frac{1}{2}$	QPSK $\frac{3}{4}$	16QAM $\frac{1}{2}$	16QAM $\frac{3}{4}$	64QAM $\frac{3}{4}$	64QAM $\frac{2}{3}$
Proceso Base 3	6 Db	6 dB	8 dB	9 dB	15 dB	15 dB	21 dB	21 dB
Prefijo cíclico	6 Db	6 dB	9 dB	9 dB	16 dB	16 dB	22 dB	22 dB
Preámbulo	5 Db	5 dB	9 dB	9 dB	14 dB	14 dB	21 dB	21 dB

Proceso base 3: Entrelazar + Modulación + IFFT/FFT+ ensamblado.

B 13 Comunicación usando los bloques de modulación, construcción del símbolo OFDM sin prefijo cíclico y agregación del preámbulo.

Se agrega el preámbulo en comparación con las simulaciones del punto uno de esta sección.

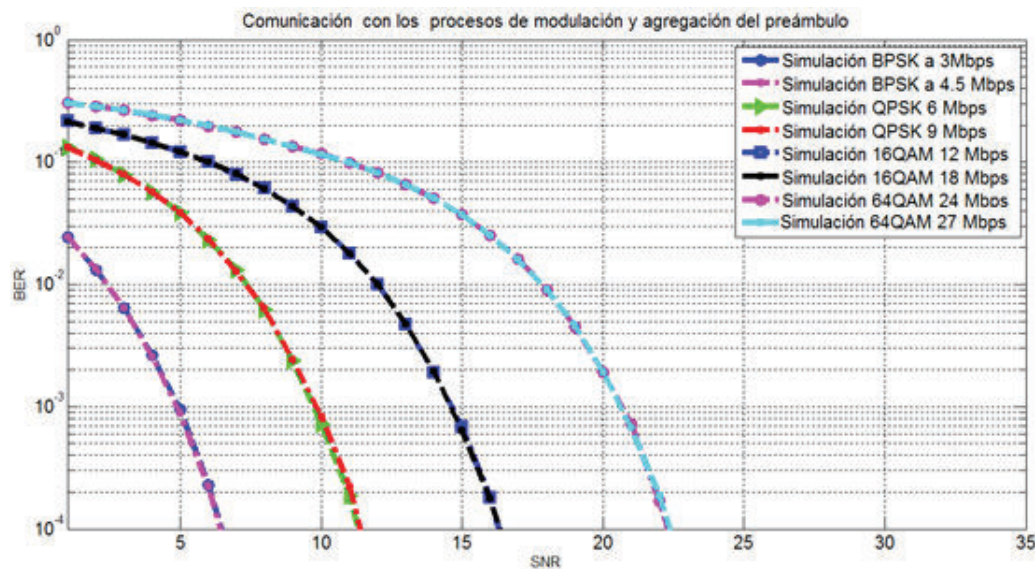


Figura B-25 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de modulación, ensamblado, IFFT, preámbulo.

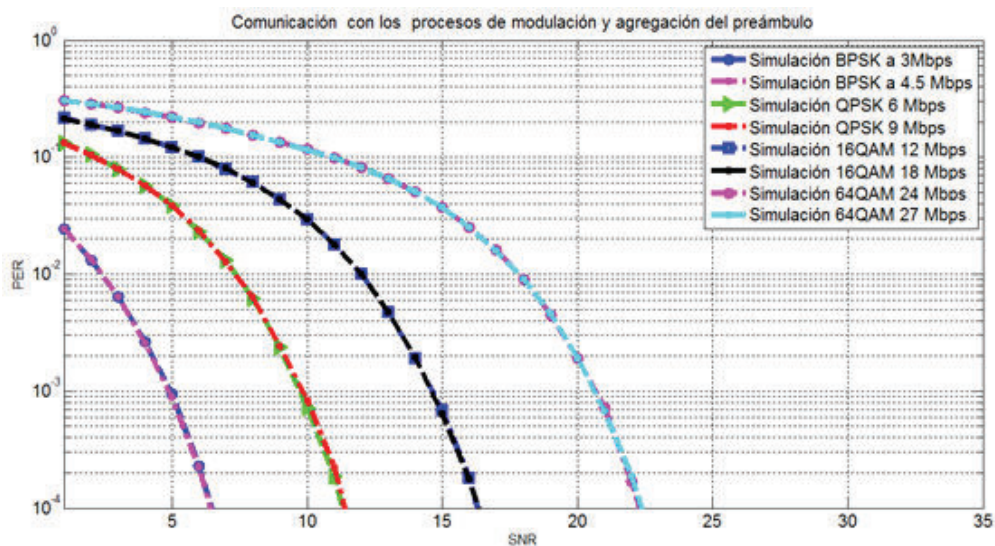


Figura B-26 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de modulación, ensamblado, IFFT, preámbulo.

B 14 Comunicación usando los bloques de modulación, construcción del símbolo OFDM y agregación del preámbulo.

Se agrega el prefijo cíclico en comparación con las simulaciones del punto trece de esta sección.

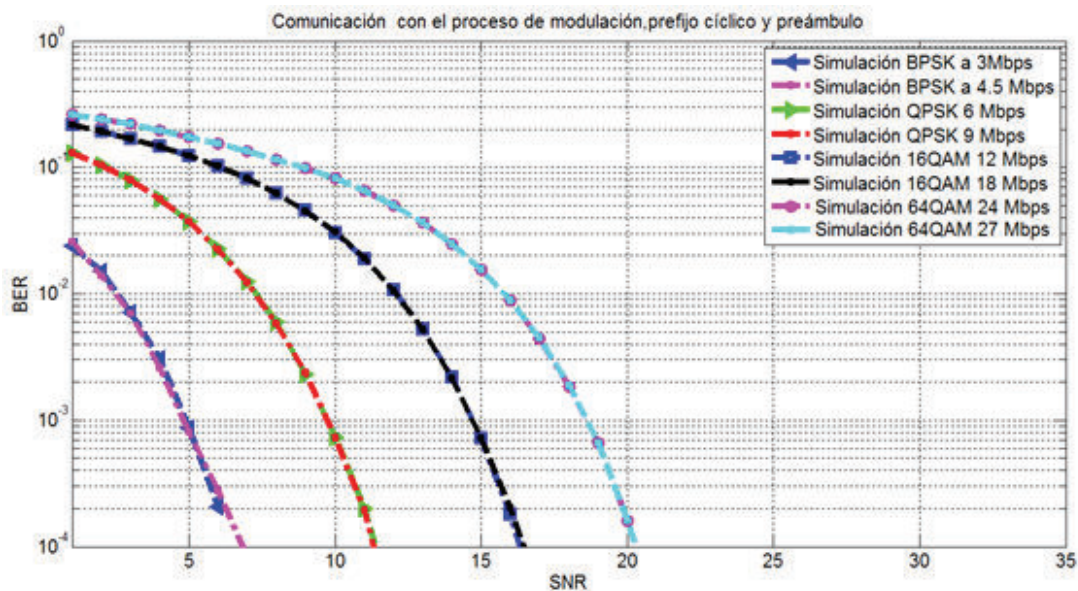


Figura B-27 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de modulación, ensamblado, IFFT, prefijo y preámbulo.

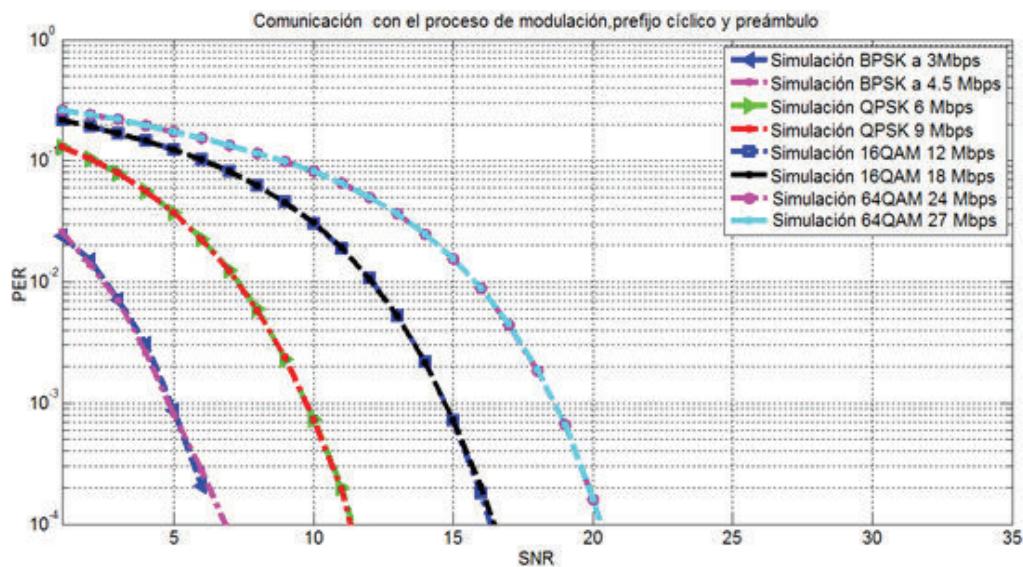


Figura B-28 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los procesos de modulación, ensamblado, IFFT, prefijo y preámbulo.

Comparación de los resultados de BER vs SNR y PER vs SNR conseguidos en los puntos 13-14, la comunicación se realiza con 10 000 símbolos transmitidos, se analiza el resultado de SNR obtenido para BER y PER de 10^{-3} .

Tabla B- 4 Valores de SNR obtenidos con el proceso base 4

Procesos agregados/SNR[dB]	BPSK 1/2	BPSK 3/4	QPSK 1/2	QPSK 3/4	16QAM 1/2	16QAM 3/4	64QAM 3/4	64QAM 2/3
Proceso Base 4	5 dB	5 dB	10 dB	10 dB	14 dB	14 dB	21 dB	21 dB
Prefijo cíclico	5 dB	5 dB	9 dB	9 dB	14 dB	14 dB	19 dB	19 dB

Proceso base 4: Modulación + IFFT/FFT+ ensamblado + preámbulo

B 15 Comunicación usando los bloques de aleatorización, codificación, entrelazado, modulación y construcción del símbolo OFDM sin prefijo,

Se agrega el proceso de entrelazado en comparación con las simulaciones del punto tres de esta sección.

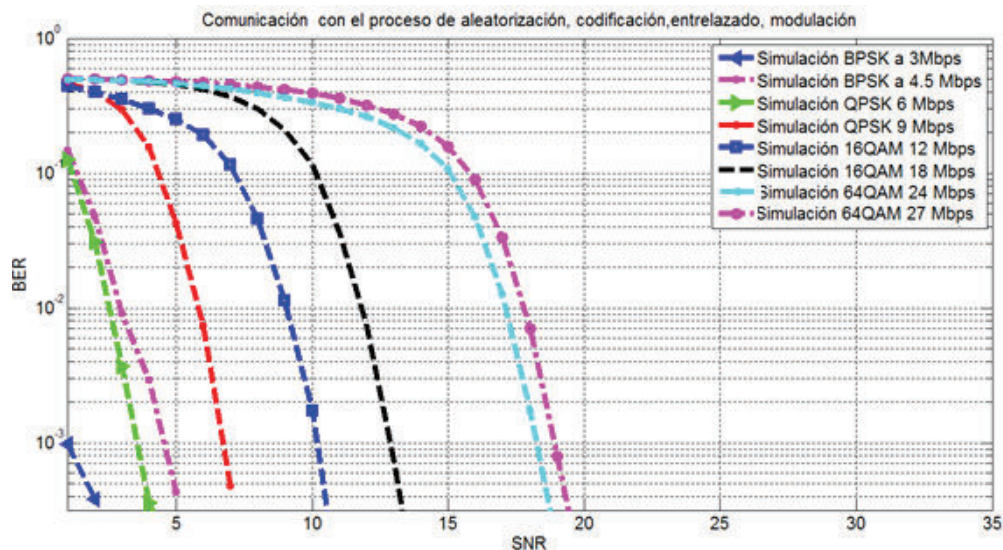


Figura B-29 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, codificación, entrelazado, modulación, ensamblado, IFFT.

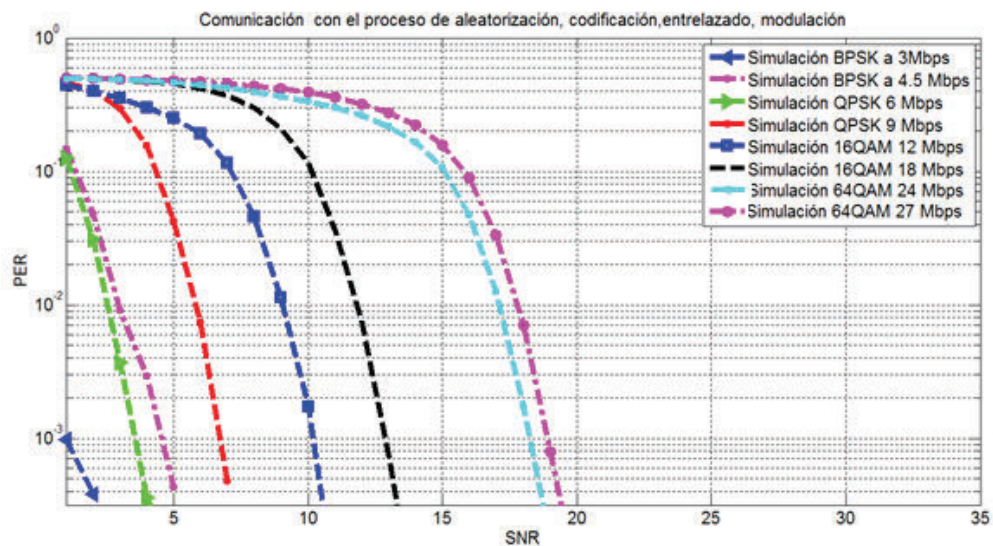


Figura B-30 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, codificación, entrelazado, modulación, ensamblado, IFFT.

B 16 Comunicación usando los bloques de aleatorización, codificación, modulación, construcción del símbolo OFDM sin prefijo cíclico y agregación del preámbulo.

Se agrega el preámbulo en comparación con las simulaciones del punto quince de esta sección.

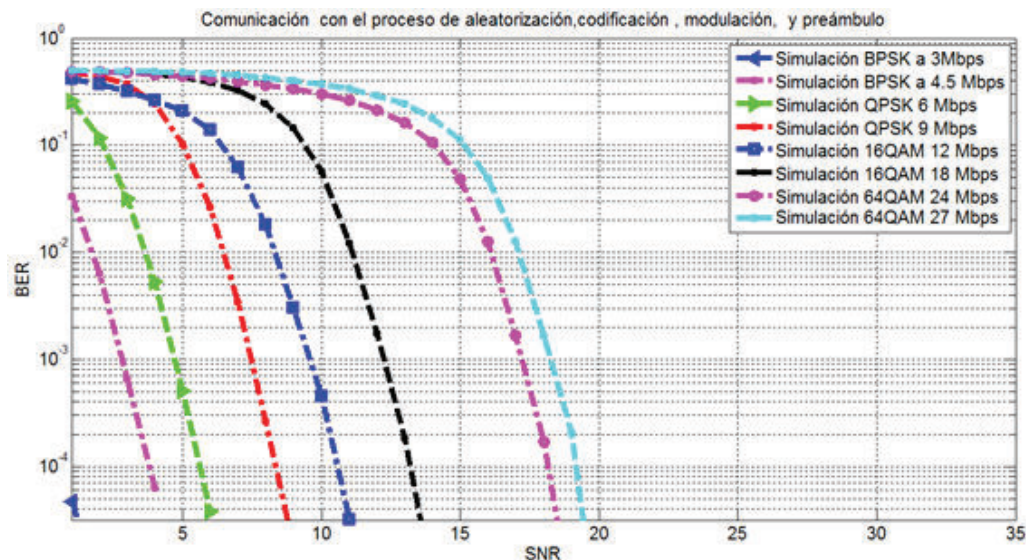


Figura B-31 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, codificación, modulación, ensamblado, IFFT, preámbulo.

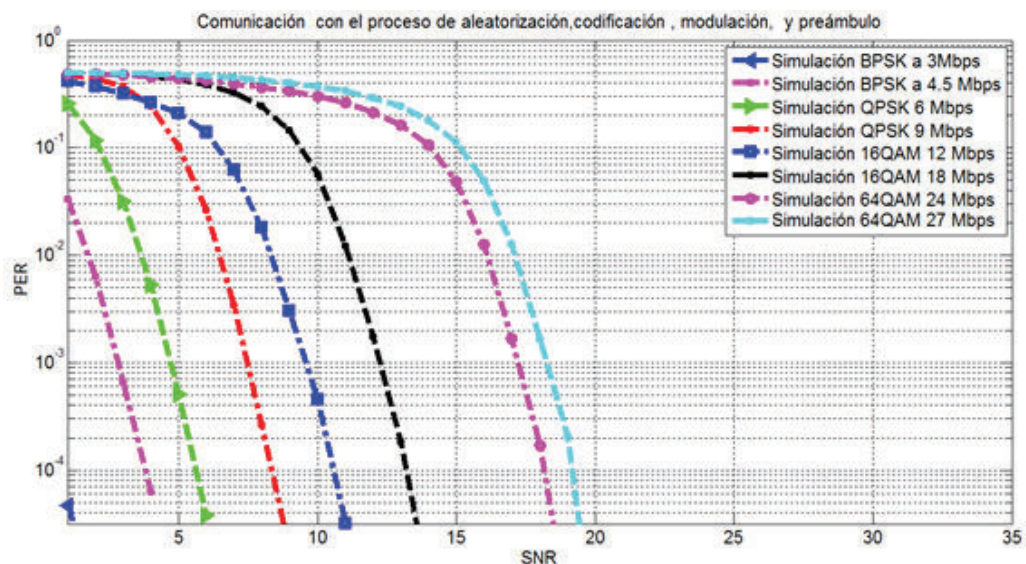


Figura B-32 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, codificación, modulación, ensamblado, IFFT, preámbulo.

Comparación de los resultados de BER vs SNR y PER vs SNR conseguidos en los puntos 15-17, la comunicación se realiza con 10 000 símbolos transmitidos, se analiza el resultado de SNR obtenido para BER y PER de 10^{-3} .

Tabla B- 5 Valores de SNR obtenidos en el proceso base 5

Procesos agregados/SNR[dB]	BPSK 1/2	BPSK 3/4	QPSK 1/2	QPSK 3/4	16QAM 1/2	16QAM 3/4	64QAM 3/4	64QAM 2/3
Proceso Base 5	1 dB	3 dB	4 dB	7 dB	11 dB	13 dB	16 dB	16 dB
Entrelazar	1 dB	4 dB	5 dB	7 dB	10 dB	13 dB	18 dB	19 dB
Preámbulo	1 dB	3 dB	5 dB	7 dB	10 dB	13 dB	17 dB	18 dB

Procesos base 5: Aleatorizar+ Codificar+ Modulación + IFFT/FFT+ ensamblado.

B 17 Comunicación usando los bloques de aleatorización, entrelazado, modulación y construcción del símbolo OFDM sin prefijo.

Se agregan los procesos de aleatorización y entrelazado en comparación con las simulaciones del punto uno de esta sección.

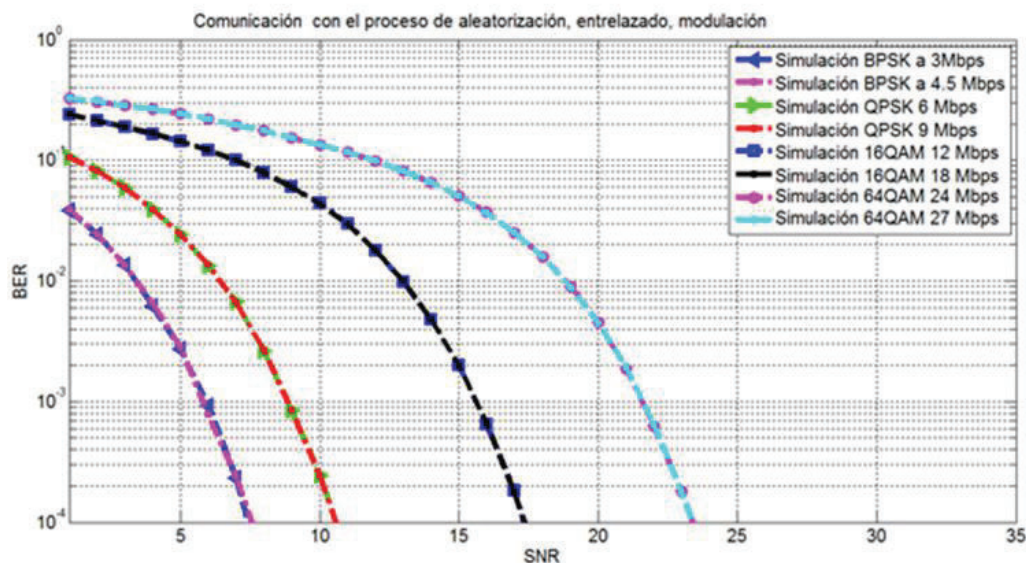


Figura B-33 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los procesos de aleatorización, entrelazado, modulación, ensamblado, IFFT.

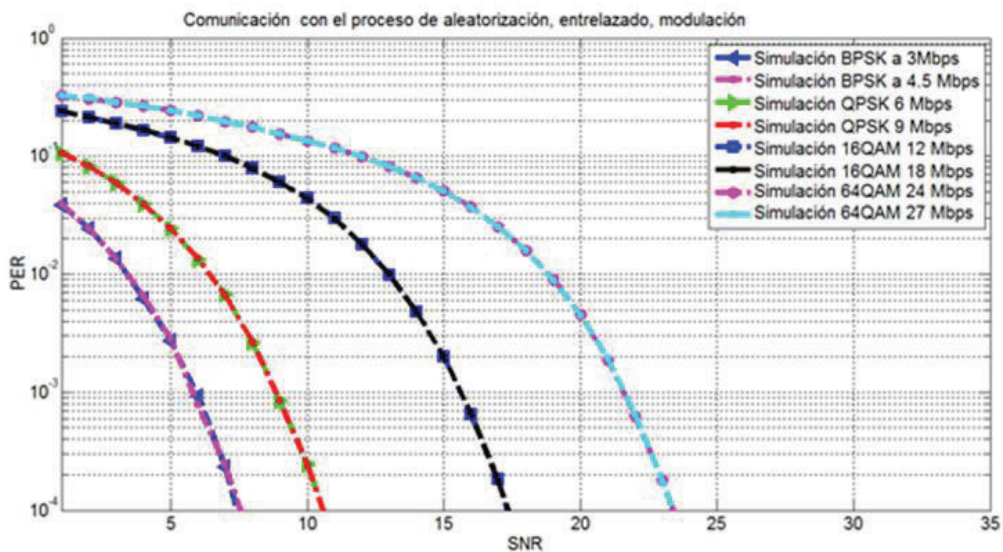


Figura B-34 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, entrelazado, modulación, ensamblado, IFFT.

B 18 Comunicación usando los bloques de aleatorización, entrelazado, modulación y construcción del símbolo OFDM.

Se agrega el prefijo cíclico en comparación con las simulaciones del punto diecisiete de esta sección.

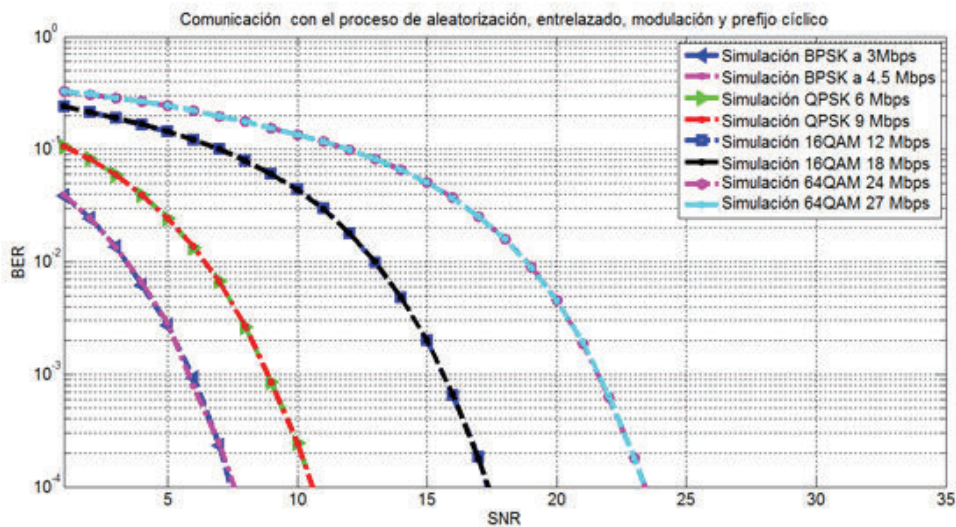


Figura B-35 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, entrelazado, modulación, ensamblado, IFFT.

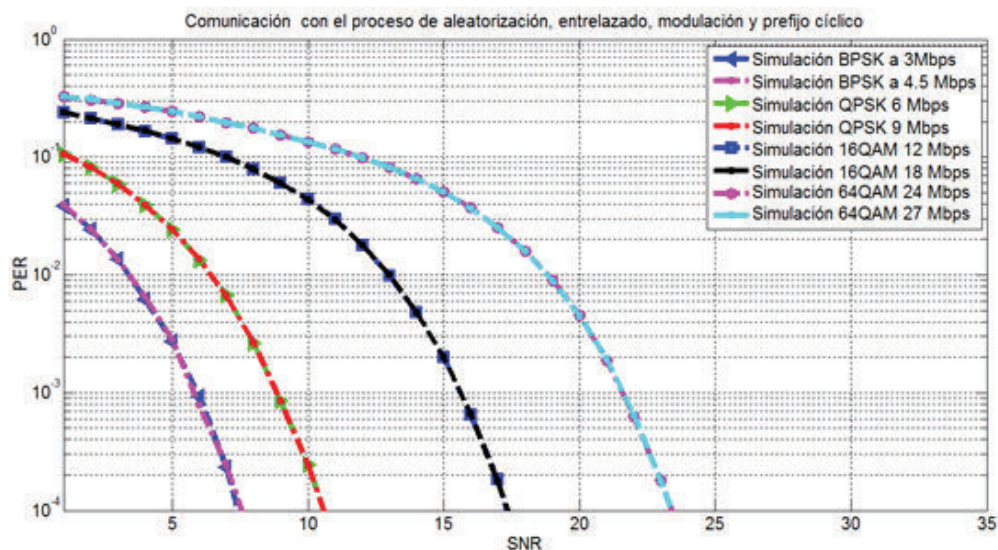


Figura B-36 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, entrelazado, modulación, ensamblado, IFFT.

B 19 Comunicación usando los bloques de aleatorización, entrelazado, modulación, construcción del símbolo OFDM sin prefijo cíclico y agregación del preámbulo.

Se agrega el preámbulo en comparación con las simulaciones del punto dieciocho de esta sección.

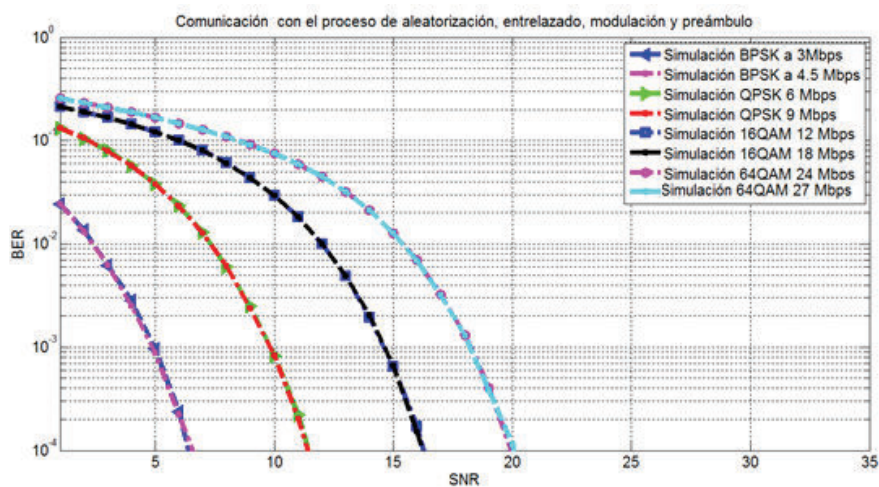


Figura B-37 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, entrelazado, modulación, ensamblado, IFFT, preámbulo.

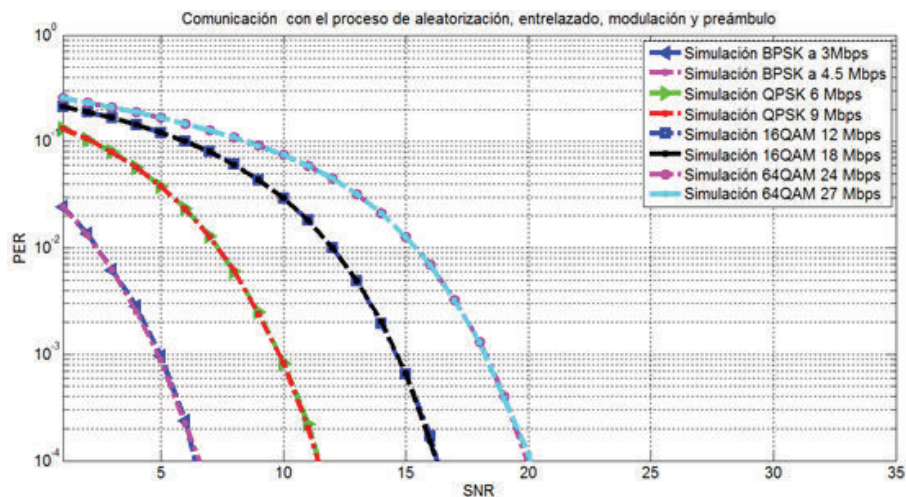


Figura B-38 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, entrelazado, modulación, ensamblado, IFFT, preámbulo.

Comparación de los resultados de BER vs SNR y PER vs SNR conseguidos en los puntos 18-20, la comunicación se realiza con 10 000 símbolos transmitidos, se analiza el resultado de SNR obtenido para BER y PER de 10^{-3}

Tabla B- 6 Valores de SNR obtenidos en el proceso base 6

Procesos agregados/SNR[dB]	BPSK 1/2	BPSK 3/4	QPSK 1/2	QPSK 3/4	16QAM 1/2	16QAM 3/4	64QAM 3/4	64QAM 2/3
Proceso Base 6	6 dB	6 dB	9 dB	9 dB	16 dB	16 dB	21 dB	21 dB
Prefijo cíclico	6 dB	6 dB	9 dB	9 dB	16 dB	16 dB	21 dB	21 dB
Preámbulo	5dB	5 dB	10 dB	10 dB	15 dB	15 dB	19 dB	19 dB

Proceso base 6: Aleatorizar+ Entrelazar+ Modulación + IFFT/FFT+ ensamblado

B 20 Comunicación usando los bloques de aleatorización, modulación, construcción del símbolo OFDM y agregación del preámbulo.

Se agregan los procesos de aleatorización, prefijo cíclico y preámbulo en comparación con las simulaciones del punto uno de esta sección.

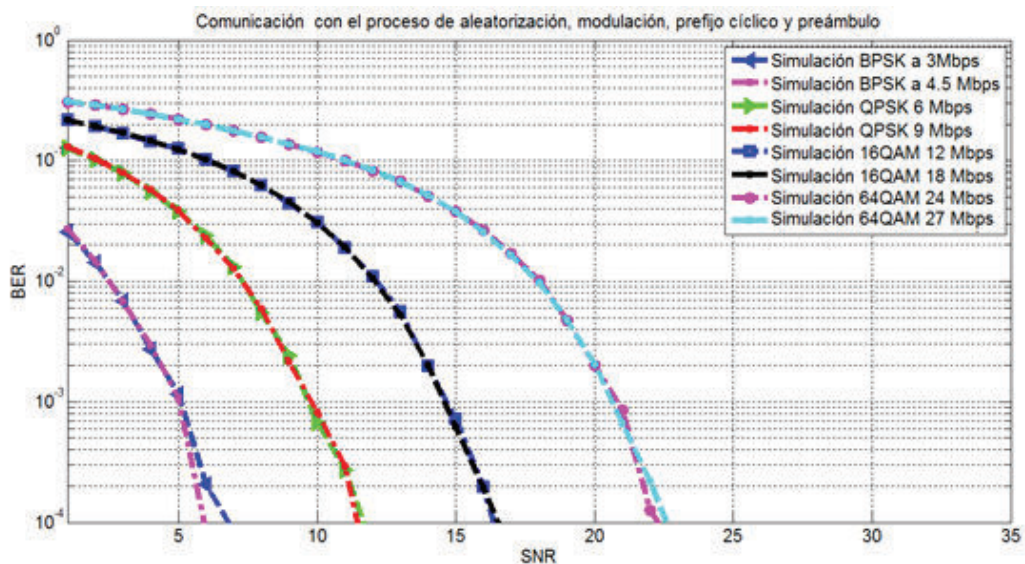


Figura B-39 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, modulación, ensamblado, IFFT, prefijo y preámbulo.

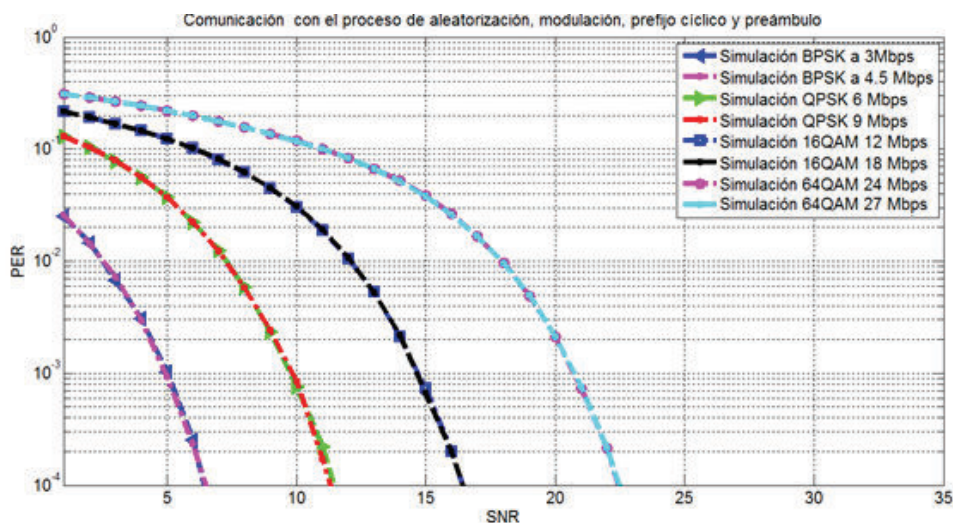


Figura B-40 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, modulación, ensamblado, IFFT, prefijo y preámbulo.

B 21 Comunicación usando los proceso de aleatorización, entrelazado, construcción del símbolo OFDM y agregación del preámbulo.

Se agregan los procesos de entrelazado en comparación con las simulaciones del punto veintiuno de esta sección.

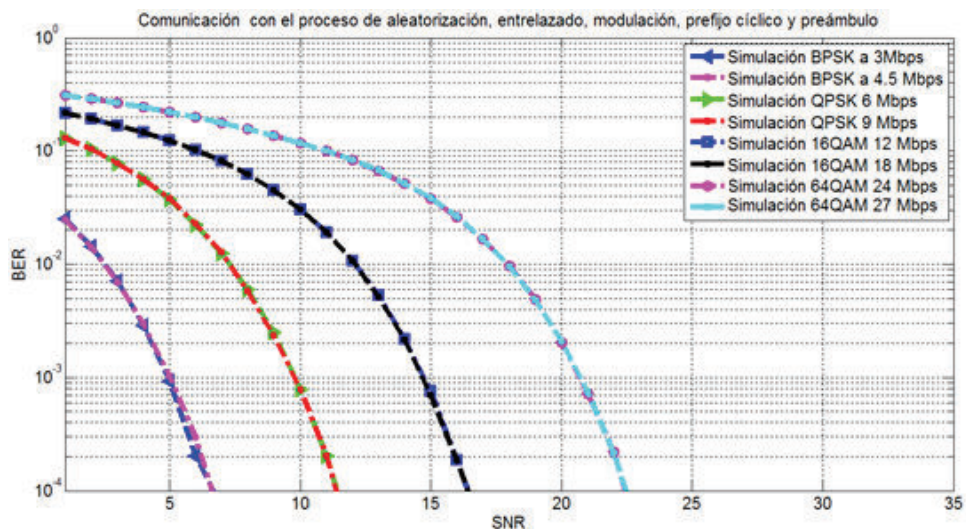


Figura B-41 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, entrelazado, modulación, ensamblado, IFFT, agregación del prefijo cíclico y preámbulo.

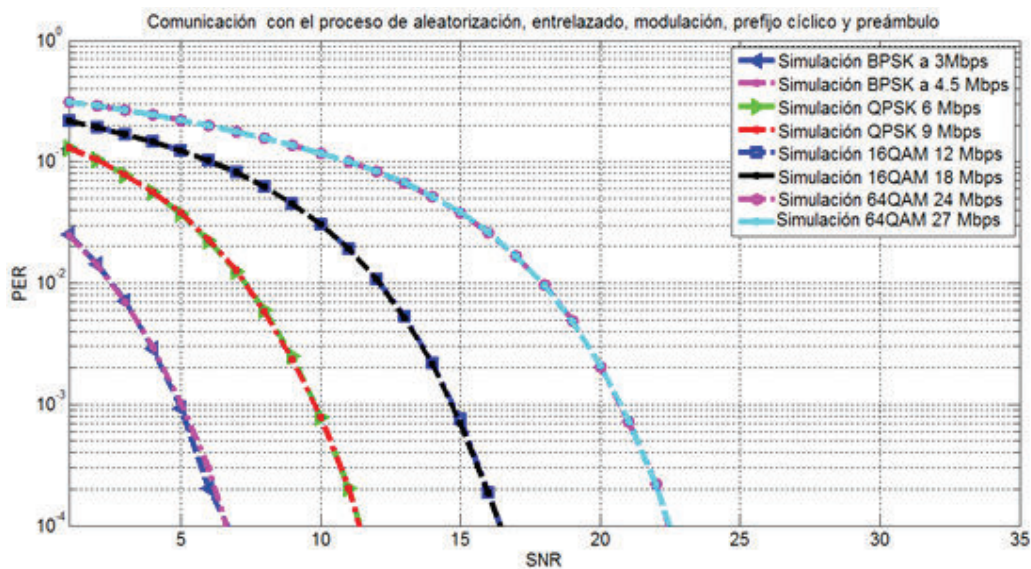


Figura B-42 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, entrelazado, modulación, ensamblado, IFFT, agregación del prefijo cíclico y preámbulo.

Comparación de los resultados de BER vs SNR y PER vs SNR conseguidos en los puntos 21-22, la comunicación se realiza con 10 000 símbolos transmitidos, se analiza el resultado de SNR obtenido para BER y PER de 10^{-3}

Tabla B- 7 Valores de SNR obtenidos en el proceso base 7

Procesos agregados/SNR[dB]	BPSK 1/2	BPSK 3/4	QPSK 1/2	QPSK 3/4	16QAM 1/2	16QAM 3/4	64QAM 3/4	64QAM 2/3
Proceso Base 7	5 dB	5 dB	10 dB	10 dB	15 dB	15 dB	21 dB	21 dB
Entrelazado	5 dB	5 dB	10 dB	10 dB	15 dB	15 dB	21 dB	21 dB

Proceso base 7: Aleatorizar+ Modulación + IFFT/FFT+ ensamblado + prefijo cíclico+ preámbulo

B 22 Comunicación usando los procesos de codificación, entrelazado, modulación y construcción del símbolo OFDM.

Se agregan los procesos de codificación, entrelazado y prefijo cíclico en comparación con las simulaciones del punto uno de esta sección.

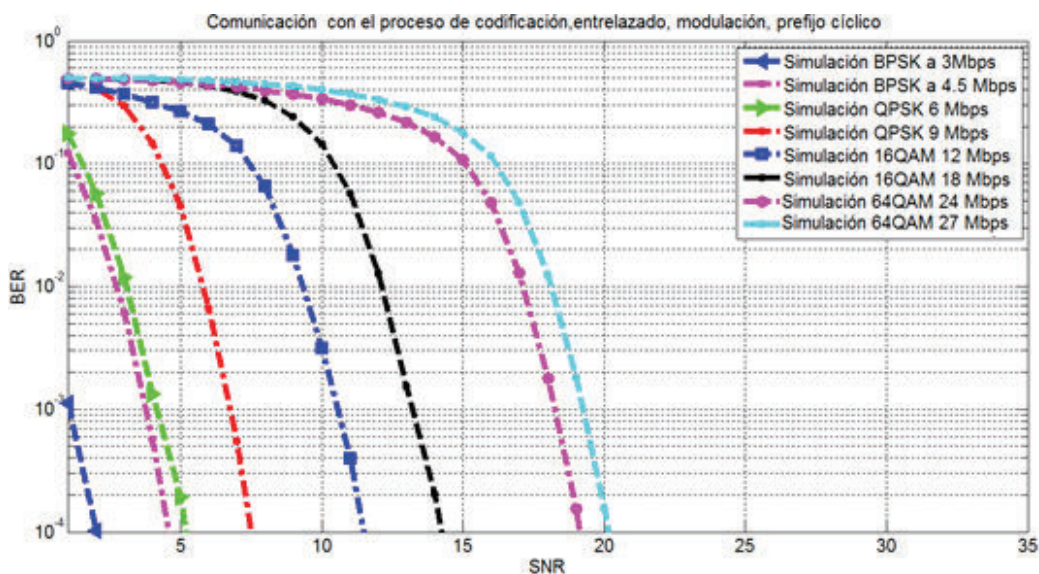


Figura B-43 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los procesos de codificación, entrelazado, modulación, ensamblado, IFFT, agregación del prefijo cíclico.

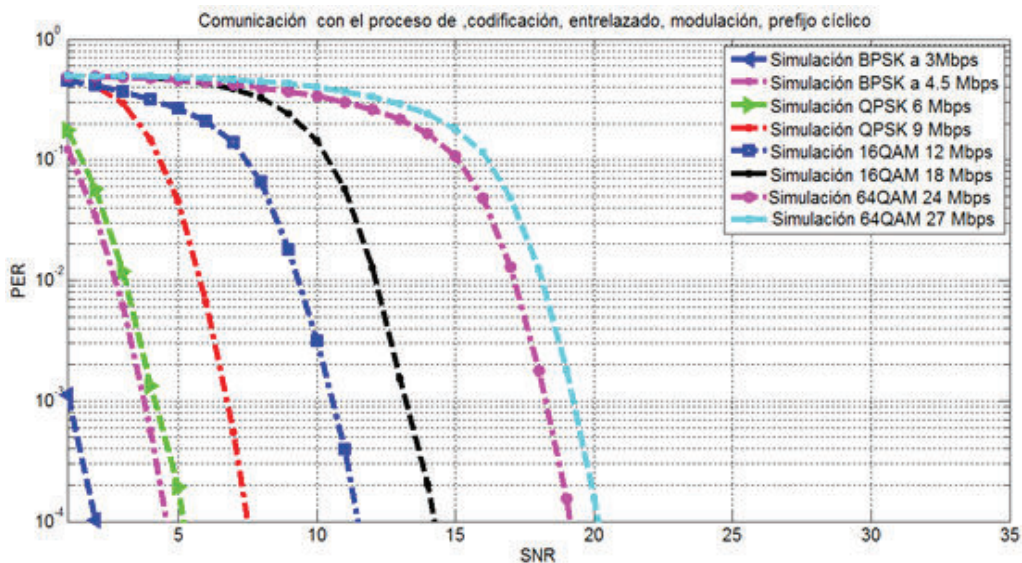


Figura B-44 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los procesos de codificación, entrelazado, modulación, ensamblado, IFFT, agregación del prefijo cíclico.

B 23 Comunicación usando los bloques de codificación, entrelazado, modulación, construcción del símbolo OFDM sin prefijo cíclico y agregación del preámbulo.

Se agregan los procesos de codificación, entrelazado y preámbulo en comparación con las simulaciones del punto uno de esta sección.

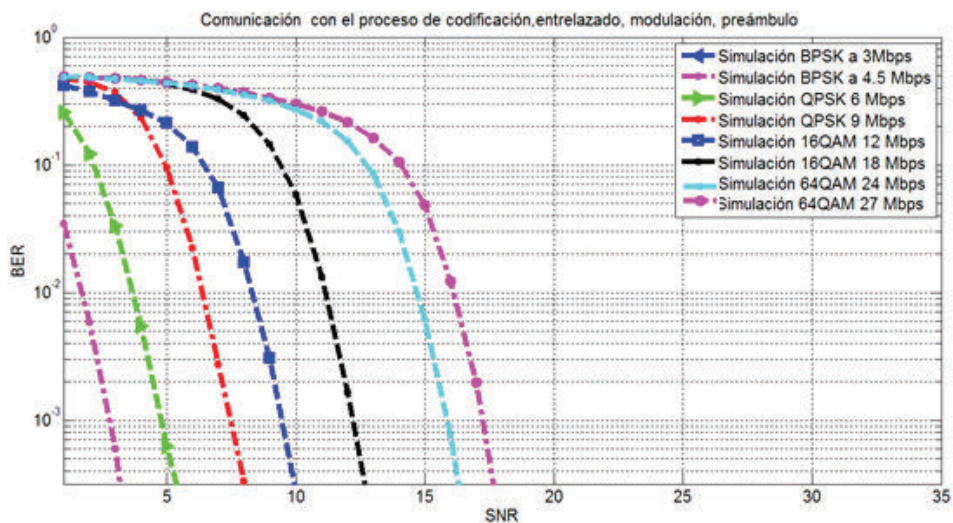


Figura B-45 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en IEEE 802.11p con aleatorización, entrelazado, modulación, ensamblado, IFFT, prefijo y preámbulo.

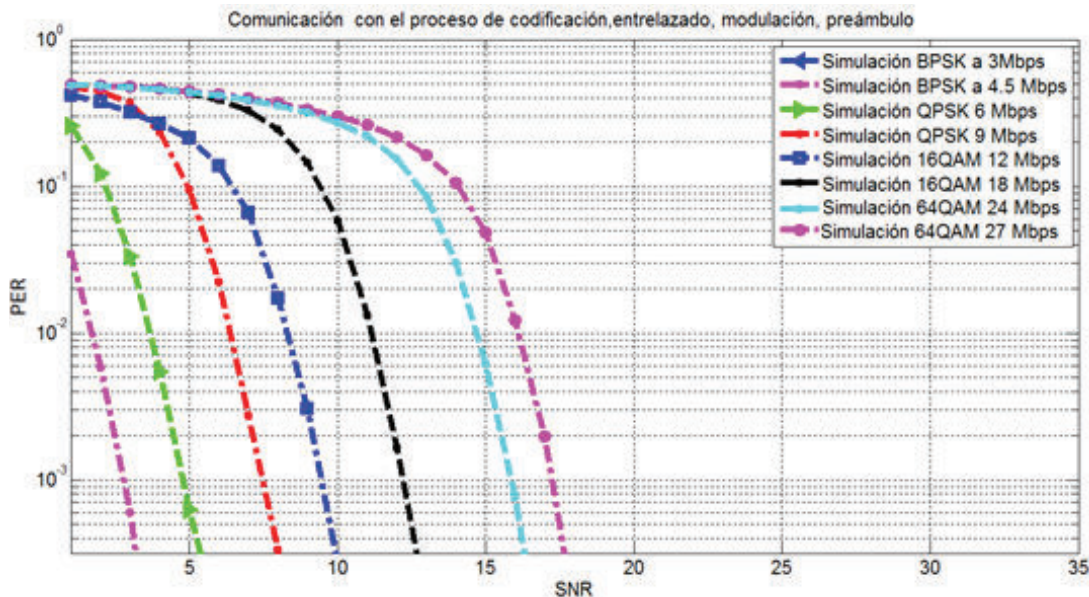


Figura B-46 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, entrelazado, modulación, ensamblado, IFFT, agregación del prefijo cíclico y preámbulo.

Tabla B- 8 Valores de SNR obtenidos en el proceso base 8

Procesos agregados/SNR[dB]	BPSK 1/2	BPSK 3/4	QPSK 1/2	QPSK 3/4	16QAM 1/2	16QAM 3/4	64QAM 3/4	64QAM 2/3
Prefijo cíclico	1 dB	3 dB	4 dB	4 dB	7 dB	11 dB	18 dB	19 dB
Preámbulo	1 dB	3 dB	4 dB	4 dB	7 dB	11 dB	18 dB	19 dB

Proceso base 8: Codificar+ Entrelazar+ Modulación + IFFT/FFT+ ensamblado

B 24 Comunicación usando los bloques de codificación, modulación, construcción del símbolo OFDM y agregación del preámbulo.

Se agregan los procesos de codificación, prefijo cíclico y preámbulo en comparación con las simulaciones del punto uno de esta sección.

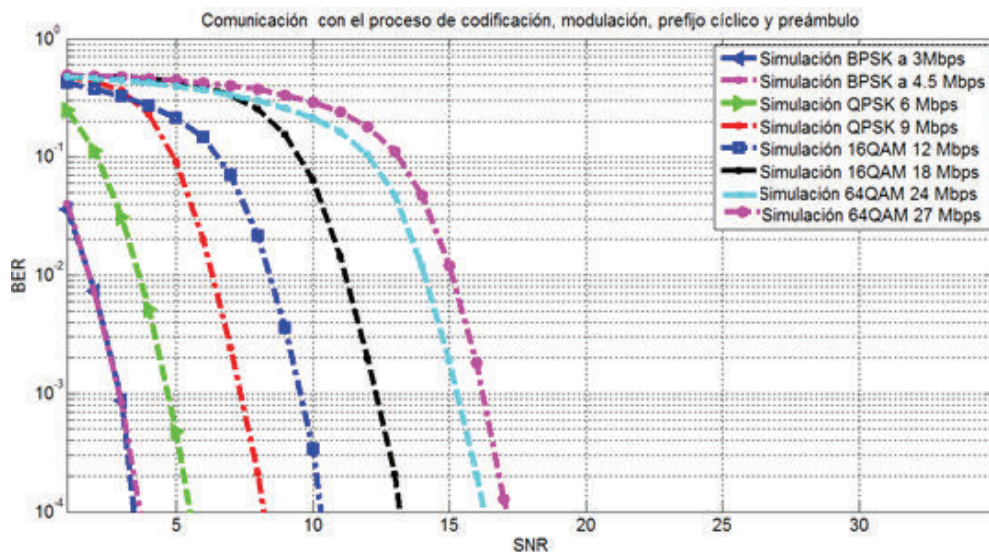


Figura B-47 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de codificación, modulación, ensamblado, IFFT, agregación del prefijo cíclico y preámbulo.

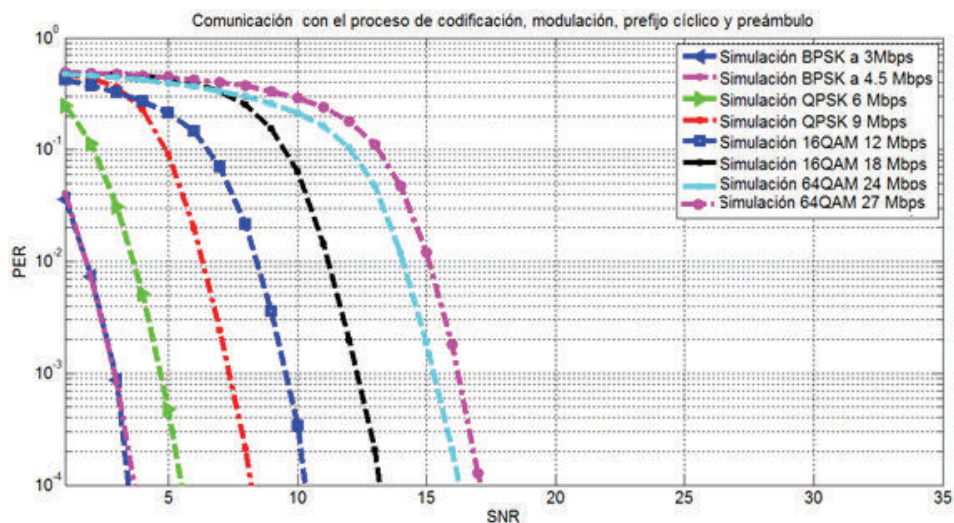


Figura B-48 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de codificación, modulación, ensamblado, IFFT, agregación del prefijo cíclico y preámbulo.

B 25 Comunicación usando los procesos de entrelazado, modulación, construcción del símbolo OFDM y agregación del preámbulo.

Se agregan los procesos de entrelazado, prefijo cíclico y preámbulo en comparación con las simulaciones del punto uno de esta sección.

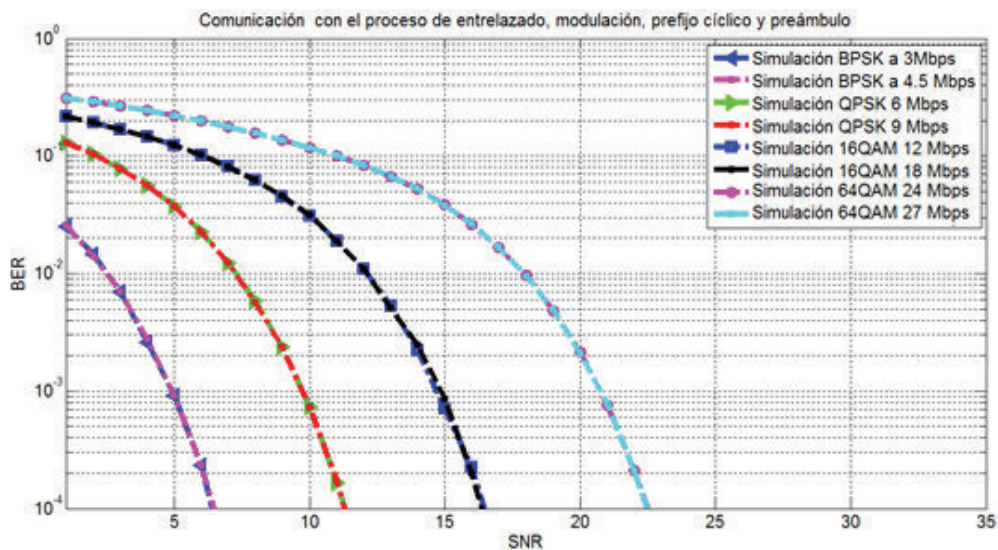


Figura B-49 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de entrelazado, modulación, ensamblado, IFFT, prefijo y preámbulo.

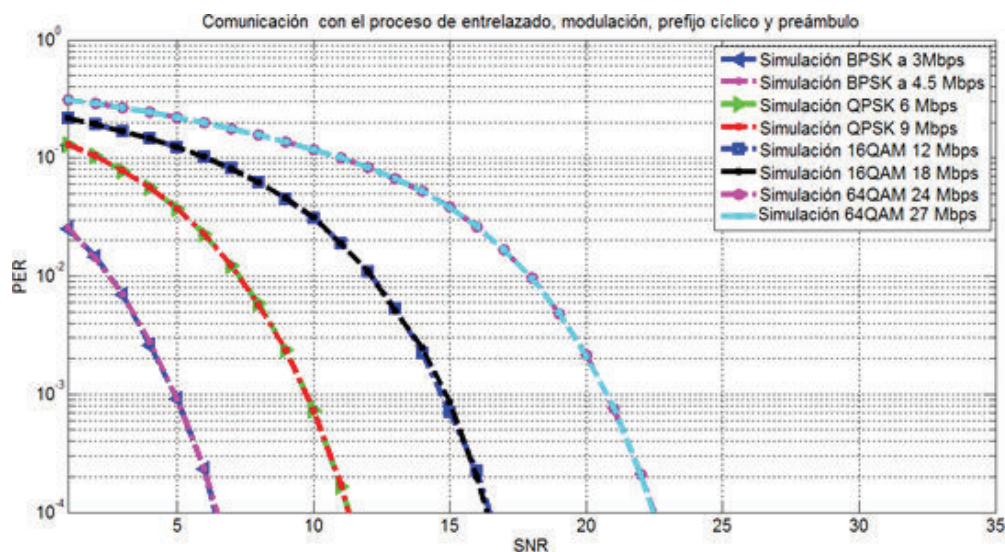


Figura B-50 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de entrelazado, modulación, ensamblado, IFFT, prefijo y preámbulo.

Tabla B- 9 Valores de SNR obtenidos en el proceso base 9

Procesos agregados/SNR[dB]	BPSK 1/2	BPSK 3/4	QPSK 1/2	QPSK 3/4	16QAM 1/2	16QAM 3/4	64QAM 3/4	64QAM 2/3
Codificar	4 dB	4 dB	5 dB	7 dB	10 dB	13 dB	15 dB	16 dB
Entrelazar	5 dB	5 dB	10 dB	10 dB	15 dB	15 dB	21 dB	21 dB

Proceso base 9: Modulación + IFFT/FFT+ ensamblado+ prefijo cíclico +preámbulo.

B 26 Comunicación usando los bloques de aleatorización, codificación, entrelazado, modulación, construcción del símbolo OFDM sin prefijo cíclico y agregación del preámbulo.

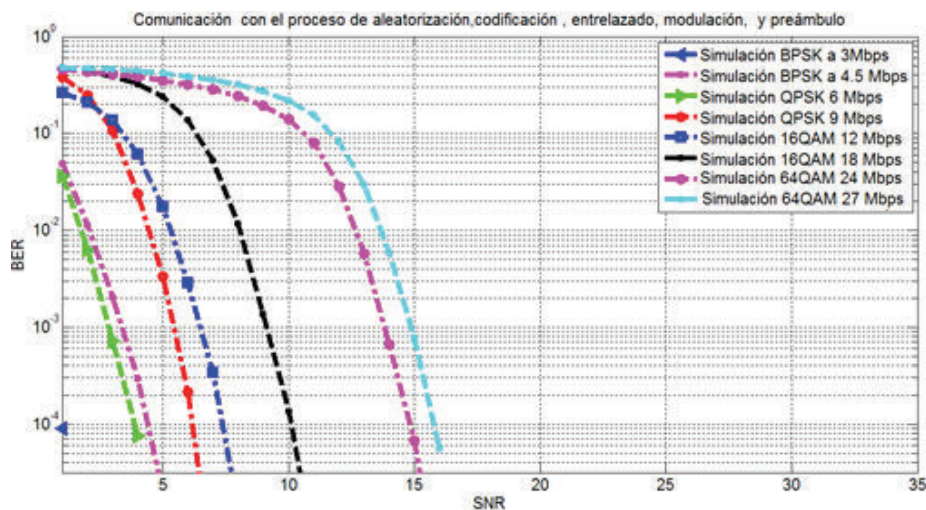


Figura B-51 BER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, codificación, entrelazado, modulación y agregación del preámbulo.

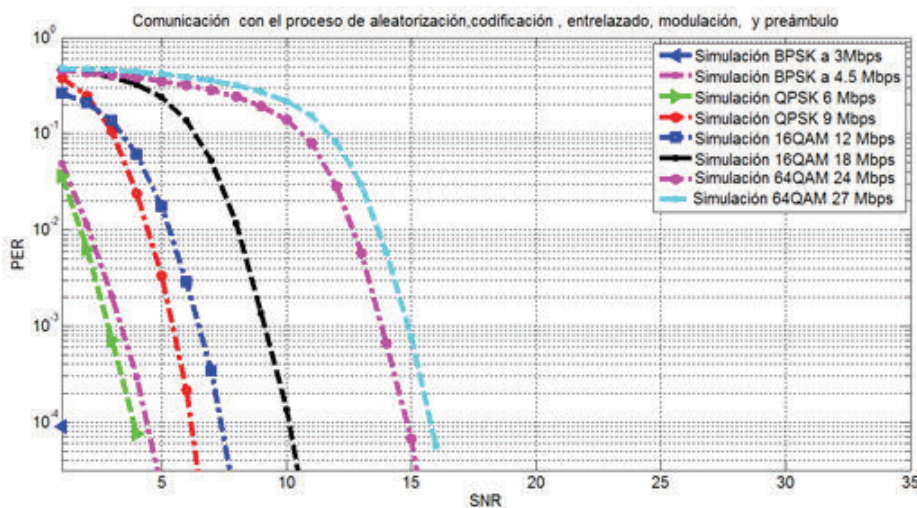


Figura B-52 PER vs SNR todas las velocidades permitidas en el estándar IEEE 802.11p con los proceso de aleatorización, codificación, entrelazado, modulación y agregación

Tabla B- 10 Valores de SNR obtenidos en el proceso base 9

Procesos agregados/SNR[dB]	BPSK 1/2	BPSK 3/4	QPSK 1/2	QPSK 3/4	16QAM 1/2	16QAM 3/4	64QAM 3/4	64QAM 2/3
Proceso base 10	1dB	3 dB	4 dB	6 dB	8 dB	9 dB	14 dB	15 dB

Proceso base 10: Aleatorizar+ codificar+ entrelazar+ Modulación + IFFT/FFT+ ensamblado+ preámbulo.