



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA TELECOMUNICACIONES**  
**Y REDES**

**“DESARROLLO DE UN ALGORITMO DE LA TÉCNICA DE ESPECTRO  
ENSANCHADO EN MATLAB PARA EVALUAR EL RENDIMIENTO DEL  
CANAL DE TRANSMISION EN GPS L1”**

Trabajo de titulación presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES**

**AUTOR: ARMIJO GUAMÁN IVÁN OLMEDO**

**TUTOR: Ing. PAÚL DAVID MORENO AVILÉS Ph. D.**

Riobamba-Ecuador

2017

©2017, Iván Olmedo Armijo Guamán

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**

**ESCUELA EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA TELECOMUNICACIONES Y REDES**

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: **“DESARROLLO DE UN ALGORITMO DE LA TÉCNICA DE ESPECTRO ENSANCHADO EN MATLAB PARA EVALUAR EL RENDIMIENTO DEL CANAL DE TRANSMISION EN GPS L1”**, de responsabilidad del señor Iván Olmedo Armijo Guamán, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación quedando autorizada su presentación.

**ING. WASHINGTON LUNA  
DECANO DE LA FACULTAD DE  
INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**

\_\_\_\_\_

**ING. FRANKLIN MORENO  
DIRECTOR DE LA ESCUELA DE  
INGENIERIA ELECTRÓNICA,  
TELECOMUNICACIONES Y REDES**

\_\_\_\_\_

**ING. PAÚL MORENO  
DIRECTOR DE TESIS**

\_\_\_\_\_

**ING. MÓNICA ZABALA  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

\_\_\_\_\_

Yo, Iván Olmedo Armijo Guamán declaro ser el autor del presente trabajo de titulación **“DESARROLLO DE UN ALGORITMO DE LA TÉCNICA DE ESPECTRO ENSANCHADO EN MATLAB PARA EVALUAR EL RENDIMIENTO DEL CANAL DE TRANSMISION EN GPS L1”**, que fue elaborado en su totalidad por mí, bajo la dirección del Ing. Paúl David Moreno Avilés Ph. D., haciéndome totalmente responsable por las ideas, criterios, doctrinas y resultados expuestos en este Trabajo de Titulación, y el patrimonio de la misma pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

Iván Olmedo Armijo Guamán

## **DEDICATORIA**

A mis maestros que formaron parte de mi vida estudiantil, y que aportaron con sus conocimientos para poder cumplir una etapa de mi vida.

## **AGRADECIMIENTO**

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por darme la oportunidad de obtener una profesión y ser una ayuda para la sociedad.

A mi familia por su apoyo y comprensión.

Iván

## TABLA DE CONTENIDO

PORTADA.....	i
DERECHO DE AUTOR.....	ii
FIRMA DE RESPONSABILIDADES.....	iii
RESPONSABILIDAD DE AUTOR.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xvi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xix
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	xxi
RESUMEN.....	xxii
SUMARY.....	xxiii
INTRODUCCIÓN.....	1

## CAPÍTULO I

### 1 MARCO TEÓRICO

1.1 GPS.....	5
1.1.1 <i>Definición</i> .....	5
1.1.2 <i>Servicios de GPS</i> .....	5
1.1.2.1 <i>SPS (standard position service)</i> .....	5
1.1.2.2 <i>PPS (precise position service)</i> .....	6
1.1.3 <i>Arquitectura GPS</i> .....	6
1.1.3.1 <i>Segmento espacial</i> .....	6
1.1.3.2 <i>Segmento de control</i> .....	6
1.1.3.3 <i>Segmento de usuario</i> .....	7
1.1.4 <i>Funcionamiento</i> .....	8
1.1.4.1 <i>Fundamentos</i> .....	8
1.1.4.2 <i>Pseudorange</i> .....	8
1.1.4.3 <i>Estimación de la posición</i> .....	9
1.1.4.4 <i>Medición precisa del tiempo</i> .....	11
1.1.4.5 <i>Conocimiento preciso de la órbita del satélite</i> .....	11
1.1.5 <i>Estructura de la señal de GPS</i> .....	12

1.1.5.1	<i>Señales en el espacio</i> .....	12
1.1.5.2	<i>Mensaje de navegación</i> .....	13
1.1.5.3	<i>Códigos C/A</i> .....	14
1.1.5.4	<i>Códigos P</i> .....	16
1.1.6	<b>Generación de la señal GPS</b> .....	17
1.1.7	<b>UERE</b> .....	20
1.1.7.1	<i>Retardo ionosférico</i> .....	20
1.1.7.2	<i>Retardo troposférico</i> .....	22
1.1.7.3	<i>Multicamino</i> .....	22
1.1.7.4	<i>Efemérides y reloj de satélites</i> .....	23
1.2	<b>Espectro Ensanchado</b> .....	24
1.2.1	<b>Generalidades</b> .....	24
1.2.2	<b>Secuencia directa</b> .....	25
1.2.3	<b>Salto de frecuencia</b> .....	27
1.3	<b>Codificación de canal</b> .....	29
1.3.1	<b>Generalidades</b> .....	29
1.3.2	<b>Codificación Hamming</b> .....	29
1.3.3	<b>Codificación Convolutiva</b> .....	31
1.3.4	<b>Codificación Diferencial</b> .....	32
1.3.5	<b>Decodificación Viterbi</b> .....	33
1.4	<b>Modelos de canal</b> .....	34
1.4.1	<b>Frecuencia Doppler</b> .....	34
1.4.2	<b>Canal con desvanecimiento tipo Rician</b> .....	34
1.4.3	<b>Canal con desvanecimiento tipo Rayleigh</b> .....	35

## CAPÍTULO II

2	<b>IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO EN MATLAB</b>	
2.1	<b>Diagrama de bloques señal GPS L1</b> .....	36
2.2	<b>Señal portadora L1</b> .....	37
2.3	<b>Mensaje de navegación</b> .....	38
2.4	<b>Código C/A</b> .....	39
2.5	<b>Suma módulo 2 (Ensanchamiento)</b> .....	41
2.6	<b>Codificación de canal</b> .....	43
2.6.1	<b>Codificación Hamming (2047, 2036)</b> .....	43
2.6.2	<b>Codificación Convolutiva (2, 1, 3)</b> .....	45
2.6.3	<b>Codificación Convolutiva (3, 2, 3)</b> .....	46

2.6.4	<i>Codificación Diferencial</i> .....	47
2.7	<b>Modulación BPSK</b> .....	49
2.8	<b>Canales con desvanecimiento y Ruido</b> .....	52
2.8.1	<i>Canal con desvanecimiento tipo Rayleigh</i> .....	52
2.8.2	<i>Canal con desvanecimiento tipo Rician</i> .....	54
2.8.3	<i>Ruido</i> .....	56
2.9	<b>Demodulación BPSK</b> .....	57
2.10	<b>Decodificación lineal</b> .....	61
2.10.1	<i>Decodificación Diferencial</i> .....	61
2.10.2	<i>Decodificación Hamming (2047, 2036)</i> .....	63
2.10.3	<i>Decodificación Viterbi (2, 1, 3)</i> .....	64
2.10.4	<i>Decodificación Viterbi (3, 2, 3)</i> .....	64
2.11	<b>Suma modulo-2 (Desensanchamiento)</b> .....	65
2.12	<b>Mensaje de navegación recuperado</b> .....	66

### **CAPÍTULO III**

<b>3</b>	<b>SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE TRANSMISIÓN DE LA SEÑAL GPS L1</b>	
3.1	<b>Análisis de la técnica de espectro ensanchado en GPS L1</b> .....	69
3.2	<b>Rendimiento del canal con y sin codificación Hamming (2047, 2036)</b> .....	74
3.2.1	<i>Canal Rayleigh</i> .....	75
3.2.2	<i>Canal Rician</i> .....	78
3.3	<b>Rendimiento del canal con y sin codificación Convolutacional (2, 1, 3)</b> .....	82
3.3.1	<i>Canal Rayleigh</i> .....	82
3.3.2	<i>Canal Rician</i> .....	85
3.4	<b>Rendimiento del canal con y sin codificación Convolutacional (3, 2, 3)</b> .....	89
3.4.1	<i>Canal Rayleigh</i> .....	89
3.4.2	<i>Canal Rician</i> .....	92

<b>CONCLUSIONES</b> .....	96
---------------------------	----

<b>RECOMENDACIONES</b> .....	97
------------------------------	----

### **BIBLIOGRAFÍA**

### **ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b>	Características de los osciladores de sistemas GPS.....	12
<b>Tabla 2-1:</b>	Bandas de frecuencias empleadas en microondas .....	13
<b>Tabla 3-1:</b>	Información contenida en cada mensaje de navegación de 1500 bits .....	13
<b>Tabla 4-1:</b>	Polinomios generadores y estados iniciales de los registros del código P.....	17
<b>Tabla 5-1:</b>	Tabla de verdad del operador lógico XOR.....	18
<b>Tabla 6-1:</b>	Producto aritmético entre -1 y +1 .....	19
<b>Tabla 7-1:</b>	Retardos producidos por el TEC en las frecuencias L1 y L2 .....	21
<b>Tabla 8-1:</b>	Características de la codificación Hamming .....	30
<b>Tabla 1-2:</b>	Parámetros del codificador Convolutivo (2, 1, 3).....	45
<b>Tabla 2-2:</b>	Parámetros del codificador Convolutivo (3, 2, 3).....	46
<b>Tabla 3-2:</b>	Frecuencias Doppler atribuidas a diferentes velocidades.....	54
<b>Tabla 4-2:</b>	SNR para evaluar el canal de transmisión .....	56

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1-1:</b>	Pseudorange.....	8
<b>Ecuación 2-1:</b>	Frecuencia L1 .....	12
<b>Ecuación 3-1:</b>	Frecuencia L2 .....	12
<b>Ecuación 4-1:</b>	Códigos P.....	16
<b>Ecuación 5-1:</b>	Señal transmitida por un satélite.....	20
<b>Ecuación 6-1:</b>	Retraso por electrones.....	20
<b>Ecuación 7-1:</b>	Refracción troposférica.....	22
<b>Ecuación 8-1:</b>	Efecto multicamino L1 .....	23
<b>Ecuación 9-1:</b>	Efecto multicamino L2 .....	23
<b>Ecuación 10-1:</b>	Señal espectro ensanchado .....	24
<b>Ecuación 11-1:</b>	Señal espectro ensanchado por secuencia directa.....	25
<b>Ecuación 12-1:</b>	Autocorrelación .....	25
<b>Ecuación 13-1:</b>	Señal espectro ensanchado por salto de frecuencia .....	27
<b>Ecuación 14-1:</b>	Estados codificador convolucional .....	31
<b>Ecuación 15-1:</b>	Bits codificador diferencial.....	32
<b>Ecuación 16-1:</b>	Bits decodificador diferencial.....	32
<b>Ecuación 17-1:</b>	Onda con alejamiento en el receptor.....	34
<b>Ecuación 18-1:</b>	Frecuencia Doppler.....	34
<b>Ecuación 19-1:</b>	Radio entre la varianza del multicamino y la potencia de la onda.....	35
<b>Ecuación 20-1:</b>	Comportamiento canal tipo Rayleigh .....	35
<b>Ecuación 1-2:</b>	Portadora L1 .....	37
<b>Ecuación 2-2:</b>	Periodo bit mensaje de navegación.....	37
<b>Ecuación 3-2:</b>	Número de chips por bit .....	37
<b>Ecuación 4-2:</b>	Periodo bit señal portadora .....	37
<b>Ecuación 5-2:</b>	Frecuencia de muestreo .....	37
<b>Ecuación 6-2:</b>	Periodo de chip .....	41
<b>Ecuación 7-2:</b>	Polinomio generador P1.....	45
<b>Ecuación 8-2:</b>	Polinomio generador P2.....	45
<b>Ecuación 9-2:</b>	Polinomio generador PO1.....	46
<b>Ecuación 10-2:</b>	Polinomio generador PO2.....	46

<b>Ecuación 11-2:</b>	Frecuencia doppler en sistema GPS.....	53
<b>Ecuación 12-2:</b>	Señal recibida en el receptor.....	58
<b>Ecuación 13-2:</b>	Propiedad identidad de trigonométrica.....	58
<b>Ecuación 14-2:</b>	Voltaje de recepción.....	58
<b>Ecuación 1-3:</b>	Ancho de banda mensaje de navegación.....	69
<b>Ecuación 2-3:</b>	Ancho de banda código C/A.....	71
<b>Ecuación 3-3:</b>	Ganancia de procesado.....	72
<b>Ecuación 4-3:</b>	Potencia de ruido.....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b>	Constelación de satélites del sistema GPS .....	5
<b>Figura 2-1:</b>	Ubicación de estaciones de control en el globo terráqueo... ..	7
<b>Figura 3-1:</b>	Receptor GPS .....	8
<b>Figura 4-1:</b>	Desfase existente entre el satélite y el receptor .....	9
<b>Figura 5-1:</b>	Pseudorange entre el satélite y el receptor .....	9
<b>Figura 6-1:</b>	Perímetro originado por la intersección de dos esferas .....	10
<b>Figura 7-1:</b>	Ubicación posible del objetivo en la intersección de tres esferas .....	10
<b>Figura 8-1:</b>	Variable tiempo originado por una cuarta esfera .....	11
<b>Figura 9-1:</b>	Estructura del mensaje de navegación GPS .....	14
<b>Figura 10-1:</b>	Polinomio generador G1 para el código C/A .....	15
<b>Figura 11-1:</b>	Polinomio generador G2 para el código C/A .....	15
<b>Figura 12-1:</b>	Estructura del código C/A .....	16
<b>Figura 13-1:</b>	Diagrama de bloques para generar la señal GPS.....	18
<b>Figura 14-1:</b>	XOR entre los datos y el código C/A .....	19
<b>Figura 15-1:</b>	Modulación BPSK.....	19
<b>Figura 16-1:</b>	Señal GPS atravesando la ionósfera.....	21
<b>Figura 17-1:</b>	Multitrayectoria de señales.....	23
<b>Figura 18-1:</b>	Angulo del Motor de Inclinacion .....	26
<b>Figura 19-1:</b>	Ensanchamiento de datos por secuencia directa con BPSK.....	27
<b>Figura 20-1:</b>	Diagrama de bloques para generar una señal por salto de frecuencia.....	28
<b>Figura 21-1:</b>	Diagrama de bloques del receptor por salto de frecuencia.....	28
<b>Figura 22-1:</b>	Degradación de la señal vs distancia.....	29
<b>Figura 23-1:</b>	Distribución de la palabra-código .....	30
<b>Figura 24-1:</b>	Diagrama de Trellis.....	31
<b>Figura 25-1:</b>	Sistema de codificación diferencial.....	32
<b>Figura 26-1:</b>	Secuencia de pasos dentro del diagrama de Trellis.....	33
<b>Figura 1-2:</b>	Diagrama de bloques para la implementación del algoritmo en Matlab .....	36
<b>Figura 2-2:</b>	Señal portadora GPS L1 .....	38
<b>Figura 3-2:</b>	Mensaje de navegación GPS .....	39
<b>Figura 4-2:</b>	Código C/A del satélite 2 .....	40

<b>Figura 5-2:</b>	Código C/A del satélite 17 .....	41
<b>Figura 6-2:</b>	20 códigos C/A por cada bit del mensaje de navegación .....	42
<b>Figura 7-2:</b>	Bits del mensaje de navegación acondicionado al código C/A.....	42
<b>Figura 8-2:</b>	Suma modulo-2 entre los bits de navegación y el código C/A.....	43
<b>Figura 9-2:</b>	Estructura de los datos codificados en Hamming (2047, 2036).....	44
<b>Figura 10-2:</b>	Bits codificados en Hamming (2047, 2036).....	44
<b>Figura 11-2:</b>	Propiedades del diagrama Trellis para una tasa de $R=1/2$ .....	45
<b>Figura 12-2:</b>	Bits codificados en Convolutacional (2, 1, 3). .....	46
<b>Figura 13-2:</b>	Propiedades del diagrama Trellis para una tasa de $R=2/3$ .....	47
<b>Figura 14-2:</b>	Bits codificados en Convolutacional (3, 2, 3). .....	47
<b>Figura 15-2:</b>	Codificación diferencial aplicada al sistema con Hamming (2047, 2036)...	48
<b>Figura 16-2:</b>	Codificación diferencial aplicada al sistema con Convolutacional (2, 1, 3) ...	48
<b>Figura 17-2:</b>	Codificación diferencial aplicada al sistema con Convolutacional (3, 2, 3) ...	49
<b>Figura 18-2:</b>	Modulación BPSK con el uso de un codificador NRZ.....	50
<b>Figura 19-2:</b>	Codificación NRZ de los bits del sistema con Hamming (2047, 2036) .....	50
<b>Figura 20-2:</b>	Codificación NRZ de los bits del sistema con Convolutacional (2, 1, 3) .....	51
<b>Figura 21-2:</b>	Codificación NRZ de los bits del sistema con Convolutacional (3, 2, 3) .....	51
<b>Figura 22-2:</b>	Modulación BPSK en sistema GPS L1 .....	52
<b>Figura 23-2:</b>	Desvanecimiento tipo Rayleigh por la propagación multicamino .....	53
<b>Figura 24-2:</b>	Propiedades del canal Rayleigh.....	54
<b>Figura 25-2:</b>	Desvanecimiento tipo Rician por línea de vista directa .....	55
<b>Figura 26-2:</b>	Propiedades del canal Rician.....	55
<b>Figura 27-2:</b>	Señal modulada con AWGN .....	57
<b>Figura 28-2:</b>	Diagrama de bloques del proceso de demodulación BPSK .....	57
<b>Figura 29-2:</b>	Señal demodulada en el sistema con Hamming (2047, 2036).....	58
<b>Figura 30-2:</b>	Señal demodulada en el sistema con Convolutacional (2, 1, 3) .....	59
<b>Figura 31-2:</b>	Señal demodulada en el sistema con Convolutacional (3, 2, 3).....	59
<b>Figura 32-2:</b>	Recuperación de bits aplicado al sistema con Hamming (2047, 2036).....	60
<b>Figura 33-2:</b>	Recuperación de bits aplicado al sistema con Convolutacional (2, 1, 3) .....	60
<b>Figura 34-2:</b>	Recuperación de bits aplicado al sistema con Convolutacional (3, 2, 3) .....	61
<b>Figura 35-2:</b>	Decodificación diferencial en el sistema con Hamming (2047, 2036) .....	62
<b>Figura 36-2:</b>	Decodificación diferencial en el sistema con Convolutacional (2, 1, 3) .....	62

<b>Figura 37-2:</b>	Decodificación diferencial en el sistema con Convolutacional (3, 2, 3).....	63
<b>Figura 38-2:</b>	Decodificación Hamming (2047, 2036).....	63
<b>Figura 39-2:</b>	Decodificación Viterbi (2, 1, 3) .....	64
<b>Figura 40-2:</b>	Decodificación Viterbi (3, 2, 3) .....	65
<b>Figura 41-2:</b>	Diagrama de bloques del desensanchamiento de los bits de información....	65
<b>Figura 42-2:</b>	Desensanchamiento de los bits de información con los códigos C/A .....	66
<b>Figura 43-2:</b>	Bits originales recuperados .....	66
<b>Figura 44-2:</b>	Mensaje de navegación completo recuperado.....	67

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-3:</b>	Espectro en magnitud del mensaje de navegación .....	70
<b>Gráfico 2-3:</b>	Espectro en dB del mensaje de navegación.....	70
<b>Gráfico 3-3:</b>	Espectro en magnitud del código C/A asociado al satélite 25.....	71
<b>Gráfico 4-3:</b>	Espectro en dB del código C/A asociado al satélite 25 .....	71
<b>Gráfico 5-3:</b>	Espectro en magnitud del resultado de aplicar DS-SS .....	73
<b>Gráfico 6-3:</b>	Espectro en magnitud del resultado al aplicar DS-SS .....	73
<b>Gráfico 7-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 0 m/s en un canal Rayleigh.....	75
<b>Gráfico 8-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 20 m/s en un canal Rayleigh.....	76
<b>Gráfico 9-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 40 m/s en un canal Rayleigh.....	76
<b>Gráfico 10-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 60 m/s en un canal Rayleigh.....	77
<b>Gráfico 11-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 80 m/s en un canal Rayleigh.....	77
<b>Gráfico 12-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 100 m/s en un canal Rayleigh. ....	78
<b>Gráfico 13-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 0 m/s en un canal Rician.....	79
<b>Gráfico 14-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 20 m/s en un canal Rician.....	79
<b>Gráfico 15-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 40 m/s en un canal Rician.....	80
<b>Gráfico 16-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 60 m/s en un canal Rician.....	80
<b>Gráfico 17-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 80 m/s en un canal Rician.....	81
<b>Gráfico 18-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 100 m/s en un canal Rician. ....	81
<b>Gráfico 19-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutional 1/2, a una velocidad de 0 m/s en un canal Rayleigh. ....	82

<b>Gráfico 20-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 1/2, a una velocidad de 20 m/s en un canal Rayleigh. ....	83
<b>Gráfico 21-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 1/2, a una velocidad de 40 m/s en un canal Rayleigh. ....	83
<b>Gráfico 22-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 1/2, a una velocidad de 60 m/s en un canal Rayleigh. ....	84
<b>Gráfico 23-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 1/2, a una velocidad de 80 m/s en un canal Rayleigh. ....	84
<b>Gráfico 24-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 1/2, a una velocidad de 100 m/s en un canal Rayleigh. ....	85
<b>Gráfico 25-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 1/2, a una velocidad de 0 m/s en un canal Rician. ....	86
<b>Gráfico 26-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 1/2, a una velocidad de 20 m/s en un canal Rician. ....	86
<b>Gráfico 27-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 1/2, a una velocidad de 40 m/s en un canal Rician. ....	87
<b>Gráfico 28-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 1/2, a una velocidad de 60 m/s en un canal Rician. ....	87
<b>Gráfico 29-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 1/2, a una velocidad de 80 m/s en un canal Rician. ....	88
<b>Gráfico 30-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 1/2, a una velocidad de 100 m/s en un canal Rician. ....	88
<b>Gráfico 31-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 2/3, a una velocidad de 0 m/s en un canal Rayleigh. ....	89
<b>Gráfico 32-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 2/3, a una velocidad de 20 m/s en un canal Rayleigh. ....	90
<b>Gráfico 33-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 2/3, a una velocidad de 40 m/s en un canal Rayleigh. ....	90
<b>Gráfico 34-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 2/3, a una velocidad de 60 m/s en un canal Rayleigh. ....	91
<b>Gráfico 35-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 2/3, a una velocidad de 80 m/s en un canal Rayleigh. ....	91
<b>Gráfico 36-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 2/3, a una velocidad de 100 m/s en un canal Rayleigh. ....	92

<b>Gráfico 37-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutional 2/3, a una velocidad de 0 m/s en un canal Rician. ....	93
<b>Gráfico 38-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutional 2/3, a una velocidad de 20 m/s en un canal Rician. ....	93
<b>Gráfico 39-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutional 2/3, a una velocidad de 40 m/s en un canal Rician. ....	94
<b>Gráfico 40-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutional 2/3, a una velocidad de 60 m/s en un canal Rician. ....	94
<b>Gráfico 41-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutional 2/3, a una velocidad de 80 m/s en un canal Rician. ....	95
<b>Gráfico 42-3:</b>	SNR vs BER con y sin codificación Convolutional 2/3, a una velocidad de 100 m/s en un canal Rician. ....	95

## ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** Fases del polinomio G2 para cada satélite.
- ANEXO B:** Estructura del código P.
- ANEXO C:** 10 primeros chips de los 32 códigos C/A.
- ANEXO D:** Errores presentados en un canal Rayleigh (0-100 m/s) a diferentes SNR, con y sin codificación Hamming.
- ANEXO E:** Comparación del BER en un canal Rayleigh (0-50 m/s) con y sin codificación Hamming.
- ANEXO F:** Comparación del BER en un canal Rayleigh (60-100 m/s) con y sin codificación Hamming.
- ANEXO G:** Errores presentados en un canal Rician (0-100 m/s) a diferentes SNR, con y sin codificación Hamming.
- ANEXO H:** Comparación del BER en un canal Rician (0-50 m/s) con y sin codificación Hamming.
- ANEXO I:** Comparación del BER en un canal Rician (60-100 m/s) con y sin codificación Hamming.
- ANEXO J:** Errores presentados en un canal Rayleigh (0-100 m/s) a diferentes SNR, con y sin codificación Convolutiva (2, 1, 3).
- ANEXO K:** Comparación del BER en un canal Rayleigh (0-50 m/s) con y sin codificación Convolutiva (2, 1, 3).
- ANEXO L:** Comparación del BER en un canal Rayleigh (60-100 m/s) con y sin codificación Convolutiva (2, 1, 3).
- ANEXO M:** Errores presentados en un canal Rician (0-100 m/s) a diferentes SNR, con y sin codificación Convolutiva (2, 1, 3).
- ANEXO N:** Comparación del BER en un canal Rician (0-50 m/s) con y sin codificación Convolutiva (2, 1, 3).
- ANEXO O:** Comparación del BER en un canal Rician (60-100 m/s) con y sin codificación Convolutiva (2, 1, 3).
- ANEXO P:** Errores presentados en un canal Rayleigh (0-100 m/s) a diferentes SNR, con y sin codificación Convolutiva (3, 2, 3).
- ANEXO Q:** Comparación del BER en un canal Rayleigh (0-50 m/s) con y sin codificación Convolutiva (3, 2, 3).
- ANEXO R:** Comparación del BER en un canal Rayleigh (60-100 m/s) con y sin codificación Convolutiva (3, 2, 3).

- ANEXO S:** Errores presentados en un canal Rician (0-100 m/s) a diferentes SNR, con y sin codificación Convolutiva (3, 2, 3).
- ANEXO T:** Comparación del BER en un canal Rician (0-50 m/s) con y sin codificación Convolutiva (3, 2, 3).
- ANEXO U:** Comparación del BER en un canal Rician (60-100 m/s) con y sin codificación Convolutiva (3, 2, 3).

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

<b>GPS</b>	Global Positioning System (Sistema de posicionamiento global)
<b>SPS</b>	Standar Positioning Service (Servicio de posicionamiento estándar)
<b>PPS</b>	Precise Positioning Service (Servicio de posicionamiento preciso)
<b>L1</b>	Frecuencia comprendida en 1575.42 MHz
<b>L2</b>	Frecuencia comprendida en 1227.6 MHz
<b>AS</b>	Antispoofing
<b>SA</b>	Selective Availability
<b>BANDA L</b>	Frecuencias comprendidas entre 1 y 2 GHz
<b>UTC</b>	Universal Time Coordinate (Tiempo universal coordinado)
<b>Code C/A</b>	Coarse Acquisition (Código de adquisición común)
<b>Code P</b>	Code Precision (Código de precisión)
<b>BPSK</b>	Binary Phase Shift Keying (Modulación por desplazamiento de fase binaria)
<b>UERE</b>	User equivalent range errors (Errores de rango equivalente del usuario)
<b>TEC</b>	Contenido total de electrones
<b>DS-SS</b>	Direct Sequence Spread Spectrum (Espectro Ensanchado por Secuencia Directa)
<b>FH-SS</b>	Frequency Hopping Spread Spectrum (Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencia)
<b>PRN</b>	Pseudo Random Noise (Ruido Pseudo Aleatorio)
<b>NRZ</b>	Non-return-to-zero (No retorno a cero)
<b>AWGN</b>	Additive White Gaussian Noise (Ruido Aditivo Gaussiano Blanco)
<b>SNR</b>	Signal to noise ratio (Relación señal a ruido)
<b>BER</b>	Bit error rate (Tasa de error binario)

## RESUMEN

Se desarrolló y evaluó un algoritmo mediante el software Matlab para la medición del rendimiento del canal de transmisión con la implementación de la técnica de espectro ensanchado en un sistema de posicionamiento global (GPS) L1 además de aplicar técnicas de codificación de canal para la seguridad de la información transmitida. La metodología empleada fue de tipo cuantitativa descriptiva mediante la cual se desarrolló el algoritmo en tres bloques principales que representan el proceso que se lleva a cabo durante la transmisión y recepción de un sistema GPS L1 los cuales son: Etapa de Transmisión (Generación de la señal GPS L1 y codificación de información), creación de canales de transmisión (Rayleigh, Rician y Ruido Blanco Aditivo Gaussiano (AWGN)) y Etapa de Recepción (Decodificación y Recuperación de información). Las herramientas manejadas para la elaboración del algoritmo constan básicamente del software Matlab y computador. Los resultados obtenidos luego de las mediciones ejecutadas determinaron que la aplicación de la técnica de espectro ensanchado permite la disminución de la densidad de potencia espectral logrando una inmunidad al ruido a expensas de requerir un ancho de banda de 2 MHz mucho mayor que el usado originalmente además se determinó que el algoritmo de detección y corrección de errores con mayor robustez frente al ruido introducido fue el Convolutacional (2, 1, 3). El algoritmo implementado en Matlab permite determinar el comportamiento de la técnica de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DS-SS) aplicado a GPS L1, además de establecer el algoritmo de detección y corrección más óptimo. Se recomienda, para futuras investigaciones, utilizar computadoras de alta capacidad para el procesamiento de este tipo de señales en Matlab debido a que son sistemas que trabajan a una alta frecuencia de operación, por lo que se necesitan muchos datos a procesar debido al número de muestras generadas.

**PALABRAS CLAVE:** <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <TELECOMUNICACIONES>, <SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)>, <MATLAB (SOFTWARE)>, <ESPECTRO ENSANCHADO POR SECUENCIA DIRECTA>, <MODULACION>, <DEMODULACION>, <CODIFICACION DE CANAL>, <CANALES DE DESVANECIMIENTO>.

## SUMMARY

An algorithm was designed and assessed by means of Matlab software for performance measurement of the transmission channel by implementing the spread spectrum technique on a global positioning system (GPS) L1, in addition to applying channel coding techniques to protect the security of the information transmitted. The methodology used was a quantitative descriptive type by which the algorithm was developed in three main blocks representing the process carried out during the transmission and reception of a GPS L1 system which are: Transmission Stage (Signal Generation GPS L1 and encoding information), creation of transmission channels (Rayleigh, Rician and Additive White Gaussian Noise (AWGN)) and Reception Stage (Decoding and information Retrieval). Handled tools for the development of the algorithm consists of Matlab software and computer. The results obtained after the measurements carried out determined that the application of the spread spectrum technique allows decreasing the spectral power density achieving a noise immunity at the expense of requiring a bandwidth of 2 MHz much greater than the one originally used. In addition, it was determined that the algorithm of error detection and correction with higher robustness against the introduced noise was the convolutional one (2, 1, 3). The algorithm implemented in Matlab allows to determine the compartment of the Direct Sequence Spread Spectrum (DS-SS) technique applied to GPS L1, besides establishing the most optimal detection and correction algorithm. It is recommended for future research, to use high capacity computers for the processing of this type of signals in Matlab software because they are systems that work at a high frequency of operation, so a lot of data to be processed due to the number of samples generated.

**KEY WORDS:** TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCES, TELECOMMUNICATIONS, GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS), MATLAB (SOFTWARE), DIRECT-SEQUENCE SPREAD SPECTRUM, MODULATION, DEMODULATION, CHANNEL CODING, FADING CHANNELS.

# INTRODUCCIÓN

## ANTECEDENTES

La tecnología basada en el espectro ensanchado se originó alrededor de la segunda guerra mundial (1939-1945) atribuida a la actriz hollywoodiense e ingeniera de telecomunicaciones, Hedy Lamarr, la cual surgió como una medida para eludir la interceptación de señales (jamming). Posteriormente en 1957, ingenieros de la empresa estadounidense Sylvania Electronics Systems Division usaron transistores para implementar el sistema inventado por Lamarr y, en 1962, este concepto fue acogido por los EEUU para las transmisiones militares. A la par debido a las necesidades del ejército en el año 1963, la división espacial de la U.S Air Force da su respaldo para la implementación de un sistema de radionavegación, este proyecto se lo nombro 621B.

El 31 de mayo de 1967 se puso en órbita el primer satélite denominado Timation, y posteriormente en abril de 1973, el departamento de defensa de los Estados Unidos reagrupó en un solo proyecto el sistema 621B y el sistema Timation, este nuevo proyecto de posicionamiento y navegación por satélite se lo nombro Navstar GPS, disminuyendo la vulnerabilidad de las estaciones terrestres de radionavegación. En la década de los 70 se origina la necesidad de detectar y corregir errores siendo los precursores Golay, Hamming y Shannon garantizando en parte que los datos recibidos sean iguales a los transmitidos. Se puso en órbita el primer satélite GPS el 22 de febrero de 1978 declarándolo oficialmente operativo después de un mes. En 1989 la tecnología Spread Spectrum se comenzó a utilizar en el ámbito civil, cuando esta fue liberada por el gobierno de los Estados Unidos, entre 1995 y 1997. Spread Spectrum se acopló rápidamente a GPS ya que representaba una modulación más resistente a la multitrayectoria, baja probabilidad de interceptación y alta confidencialidad.

Actualmente se ha incorporado tres frecuencias más para uso civil: L2C, L1C y L5, lo que permitirá estimar los errores ionosféricos, adquisición de la señal más rápida, mayor fiabilidad, poder de transmisión superior, más estabilidad de la señal, mayor resistencia al efecto multicamino, menos ciclos perdidos en áreas con obstrucciones. La estación experta se la ha rediseñado con un total de veinte estaciones monitoras, con lo que se tiene un control más preciso de las efemérides y de los relojes de los satélites. Para abarcar los estándares minuciosos de seguridad, en Europa se desarrolló EGNOS reduciéndose los errores en posicionamiento al añadir un sistema de 34 antenas para recepción fija (RIMS), usando los

nuevos satélites INMARSAT geoestacionarios. En Estados Unidos se crearon sistemas similares como el WAAS, en Japón MTSAS y en Europa se puso a trabajar GNSS-1(Global Navigation Satellite System 1) que conforman los servicios de GPS, GLONASS y de las redes EGNOS, WAAS y MTSAS.

GPS hoy en día tiene un gran impacto en la sociedad ya que se lo considera una herramienta de navegación y localización masivamente implantada en áreas que van desde la explotación minera, la aeronáutica, las telecomunicaciones, y los sistema de respuesta a emergencias, hasta el transporte ferroviario, marítimo y automovilístico. Los sistemas de telefonía emiten constantemente su ubicación, por ende al llevarse a cabo el almacenamiento de esta data se eleva potencialmente el daño a la vida privada, al poderse reconstruir cada movimiento hecho, iniciándose todo un mercado para los servicios de telecomunicaciones basados en la localización. Espectro Ensanchado genero un gran impacto ya que se lo pudo implantarse en la telefonía móvil celular (con el objeto tanto de proteger la señal de interferencia como de garantizar la intimidad de las llamadas), y más en general en la transmisión de datos sin cable como en las tecnologías Wifi, Bluetooth, GPS.

## **FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

El sistema GPS ofrece una alta gama de aplicaciones cuyo rendimiento depende del número de errores que se presenten debido a los diferentes factores que intervienen ya sean propios del sistema o los originados por el medio de transmisión como son la ionósfera, tropósfera, multicamino y las imprecisiones en las efemérides como también en los relojes de satélites. Estos juegan un papel importante debido a que existen ámbitos en donde se necesitan una alta precisión en el posicionamiento como lo son en transporte aéreo, agricultura, geodesia, transporte ferroviario y muchas otras.

## **SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA**

- ¿Cuáles son las partes que integran un sistema GPS L1?
- ¿Qué es y cómo funciona la técnica de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa en GPS L1?
- ¿Cuántos errores se podrán disminuir con la implementación de codificadores de canal en GPS L1?

## **JUSTIFICACIÓN TEÓRICA**

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo aportar un análisis del comportamiento de canal frente a efectos de trayectoria debido a que es un tema ampliamente investigado por la necesidad de crear métodos capaces de minimizar interferencias y pérdidas de datos, con el objetivo final de recibir en lo posible lo que se envió originalmente. Para mitigar esto, existen técnicas de modulación así como también algoritmos de detección y corrección de errores que protegen a la información durante el proceso de transmisión a través de un canal. Una de estas técnicas es Espectro Ensanchado que consiste en realizar una transformación reversible de la señal de forma que su energía quede dispersada a lo largo de una banda de frecuencias mayor que la ocupada originalmente. Para realizar el análisis se tomará en cuenta canales de desvanecimiento los cuales simularan los efectos producidos por las diferentes trayectorias. La investigación determinará un algoritmo para generar y recuperar una señal ajustado a los parámetros GPS L1 con lo cual se podrá medir el rendimiento del canal a través de parámetros tales como el BER, SNR, ancho de banda para establecer los efectos producidos por los canales implementados con métodos de detección y corrección de errores.

## **JUSTIFICACIÓN APLICATIVA**

La generación de la señal GPS L1 se implementara en Matlab a través de un algoritmo que describa las diferentes etapas para generar esta señal así como el canal a utilizar para su transmisión y las diferentes etapas que conforman el receptor, ya que Matlab es un entorno de cálculo técnico de altas prestaciones para cálculo numérico y visualización el cual integra: análisis numérico, cálculo matricial, procesamiento de señales, gráficos, simulación de sistemas dinámicos, identificación de sistemas, redes neuronales y otros. El código de detección y corrección de errores se lo implementara en el sistema GPS L1 mediante un algoritmo el cual permita tener una información más fiable en el sistema, la evaluación del rendimiento de canal se lo efectuara aplicando los efectos de trayectoria a través de canales de desvanecimiento tipo Rayleigh y Rician.

Los sistemas actuales tienen inconvenientes en lo referente a la pérdida de información así como también tienden a disminuir su rendimiento debido a efectos de trayectoria como los desvanecimientos es así como este proyecto se lo realiza para arrojar un análisis que podrá formar parte de estudios a futuros que permitan impulsar el desarrollo a crear mecanismos para la detección y corrección de errores que se originan en el medio de transmisión además de establecer el funcionamiento y características de la técnica de espectro ensanchado por secuencia directa en GPS L1.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVOS GENERALES**

Desarrollar un algoritmo de la técnica de Espectro Ensanchado en Matlab para evaluar el rendimiento del canal de transmisión en GPS L1.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Desarrollar el script en Matlab para simular los algoritmos de generación, modulación y demodulación de la señal GPS que opera en la frecuencia L1.
- Determinar el algoritmo necesario para simular los efectos de trayectoria que influyen en la señal GPS L1.
- Generar el código apropiado para la detección y corrección de errores más óptimo.
- Analizar el rendimiento SNR, BER de la señal GPS L1.

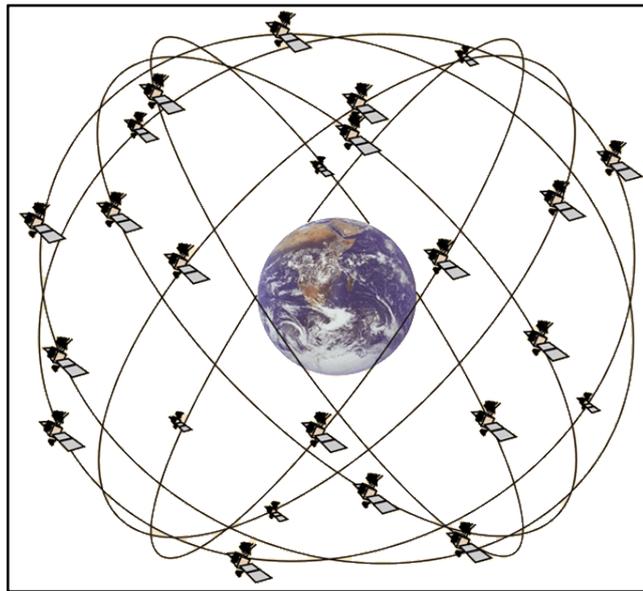
## CAPITULO I

### 1. MARCO TEÓRICO

#### 1.1 GPS

##### 1.1.1 *Definición*

Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es un conjunto de satélites ubicados a 20200 Km de altura sobre la superficie terrestre (ver **Figura 1-1**) utilizados en la navegación el cual permite establecer la posición en las 24 horas del día en torno a cualquier lugar del planeta Tierra en diferentes situaciones climáticas. Este sistema se encuentra formado por 24 satélites que se encuentran alrededor de la Tierra y envían señales de radio constantemente (Letham, 2001, p.5).



**Figura 1-1.**Constelación de satélites del sistema GPS

Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Mechanics/imgmech/GPSorbits.gif>

##### 1.1.2 *Servicios de GPS*

###### 1.1.2.1 *SPS (standard positioning service)*

El servicio de posicionamiento estándar se encuentra disponible a la sociedad civil en la frecuencia L1, es decir el servicio se ofrece sin ningún tipo de restricciones para los usuarios, se

caracteriza por proveer una exactitud de 100 m de forma horizontal, 156 m en vertical y finalmente 340 ns en el tiempo.

#### *1.1.2.2 PPS (precise positioning service)*

Este servicio de posicionamiento preciso está dispuesto sobre la frecuencia L2 y es usado por la milicia, ofrece una precisión alrededor de 22 m de forma horizontal y 27,7 m en orientación vertical, presenta una alta fidelidad en la transferencia temporal de 200 nanosegundos además de una alta precisión en su velocidad de 0,2 m/s.

El servicio se restringe mediante los sistemas criptográficos Antispoofing(AS) el cual evita las malas intenciones de realizar una réplica de los datos originales con el propósito de falsear la información, el acceso también está restringido por el Selective Availability(SA), este varía el registro del reloj del satélite de tal manera que se produce una alteración en el tiempo de transmisión desde el satélite provocando errores en los datos de navegación(Kaplan y Hegarty, 2006: p.4).

### *1.1.3 Arquitectura GPS*

#### *1.1.3.1 Segmento espacial*

Las funciones de este segmento dependen de las órdenes que reciba del segmento de control, entre sus funciones tenemos el de proveer una referencia de tiempo atómico, la generación de señales de radiofrecuencia pseudoaleatorias, enviar y guardar el mensaje de navegación (Hernández et al., 2001: pp.15-19).

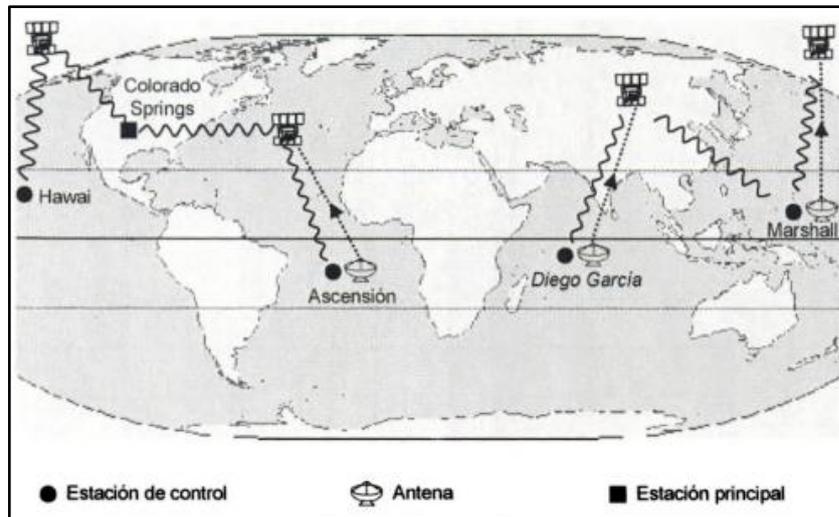
El segmento espacial está formado por:

- Constelaciones
- Satélites
- Señal GPS

#### *1.1.3.2 Segmento de control*

El segmento de control se encuentra constituido por cinco estaciones alrededor de la Tierra, además posee una estación principal que se asegura del correcto cálculo de las correcciones a los mensajes enviados por los satélites. Existen tres antenas terrenas que envían estas

correcciones a los satélites en la **Figura 2-1** se muestra la localización de las estaciones de control y las antenas.



**Figura 2-1.** Ubicación de estaciones de control en el globo terráqueo

Fuente: (Correia, 2000, p. 12)

Las cinco estaciones se localizan en Colorado Spring, Diego García, Ascensión, Marshall y en Hawái, estas cumplen el objetivo de recibir las señales enviadas por los satélites, además guardan los mensajes recogidos y transmiten esta información a la estación principal. El segmento de control establece conexiones diarias con hasta tres satélites con lo cual se garantiza una alta precisión en el sistema (Paul Correia, 2000, pp.11-12).

### 1.1.3.3 Segmento de usuario

Está conformado por los dispositivos que se encargan de recibir y procesar la señal enviada por los satélites, básicamente se encuentran compuestos por una antena y un receptor, las coordenadas a calcular pertenecen a la parte central radioeléctrica de la antena.

En lo referido al receptor este posee como mínimo 4 canales lo cual le permite recibir y llevar un procesamiento simultáneo de la señal emitida por cada satélite, además incluye un oscilador de cuarzo que genera la frecuencia de referencia para realizar la medición.

Mediante un microprocesador interno el receptor realiza los cálculos de las coordenadas de la antena, acimut y velocidad, en la **Figura 3-1** se observa el receptor GPS (Huerta et al., 2005: pp.19-111).



**Figura 3-1.** Receptor GPS

Fuente: ([http://www.prometric.com.mx/index\\_htm\\_files/807.jpg](http://www.prometric.com.mx/index_htm_files/807.jpg))

#### **1.1.4** *Funcionamiento*

##### **1.1.4.1** *Fundamentos*

El sistema GPS se fundamenta en la medición de las distancias mediante las señales de radio que se transmiten por un conjunto de satélites artificiales, cuyas orbitas son conocidas con precisión. Si se miden los pseudorangos o distancias de por lo menos tres satélites diferentes entre sí se puede establecer la ubicación de un punto sobre la superficie terrestre mediante la técnica de trilateración.

##### **1.1.4.2** *Pseudorango*

El pseudorango se obtiene al medir el tiempo que le toma a la señal de radio viajar desde el satélite hacia el receptor, al conocer la velocidad de la señal propagada se puede calcular la distancia mediante la ecuación de movimiento con velocidad uniforme como se observa en la **Ecuación. 1-1.**

$$D = v \cdot t \qquad \text{Ecuación. 1-1}$$

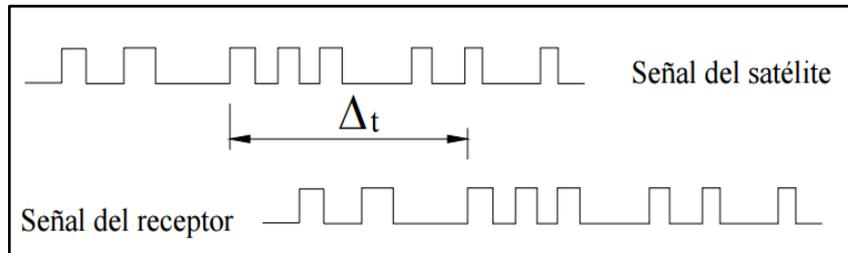
En donde:

$D$  = distancia que existe entre el punto a medir y el satélite

$v$  = velocidad de la onda de radio, alrededor de 300.000 Km/s

$t$  = tiempo de viaje en segundos

Para realizar la medición del tiempo de viaje de la señal, se lo hace a través del instante de partida de la señal desde el satélite, esto se obtiene mediante la sincronización de los códigos pseudoaleatorios tanto del satélite como la proporcionada por el receptor, luego se compara ambas señales para medir el desfase que existe en tiempo ( $\Delta t$ ) cuando se genera el mismo código pseudoaleatorio localmente como se observa en la **Figura 4-1**.



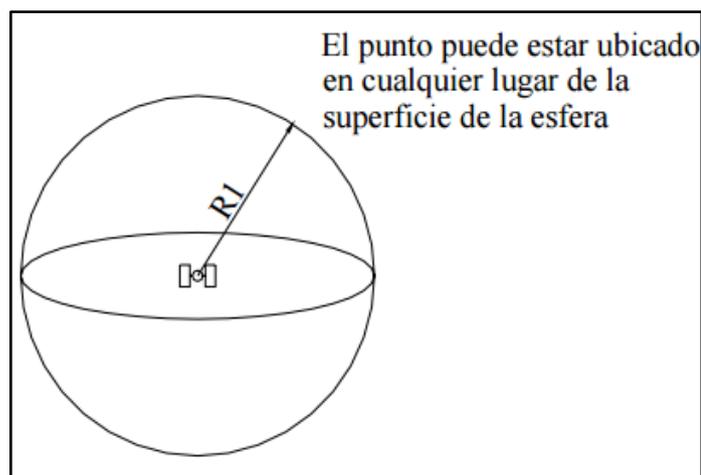
**Figura 4-1** Desfase existente entre el satélite y el receptor

Fuente: (Casanova, 2002, p.10-4)

#### 1.1.4.3 Estimación de la posición

El principio de trilateración es la definición matemática para determinar las ubicaciones relativas de cuerpos valiéndose de la geometría de triángulos de forma equivalente a la triangulación.

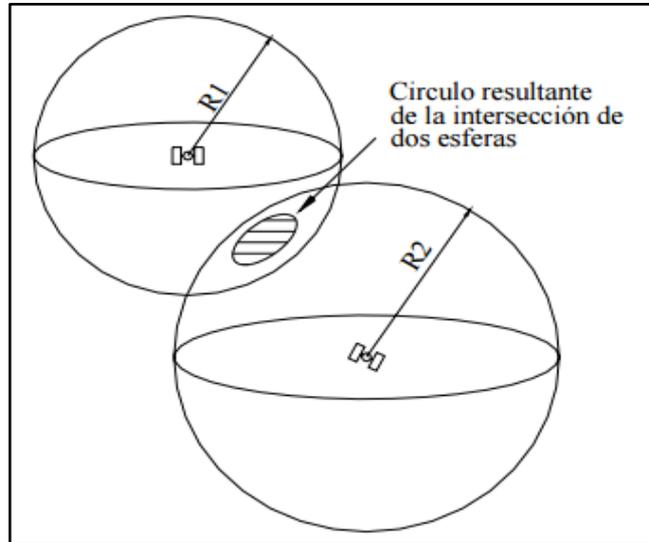
Al ubicar un receptor en un punto cualesquiera de la Tierra, este capta la señal del satélite con lo cual se puede calcular el pseudorange definido como  $R_1$  que hay entre ellos como se muestra en la **Figura 5-1**.



**Figura 5-1.** Pseudorange entre el satélite y el receptor

Fuente: (Casanova, 2002, p. 10-2)

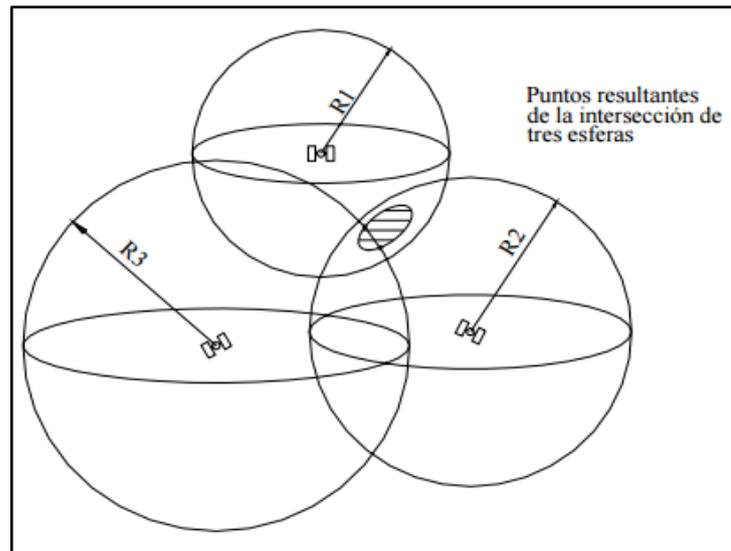
Al colocar el mismo receptor el cual recibe las ondas de radio de un segundo satélite se obtiene otra esfera con un pseudorango  $R_2$ , en donde al intersectarse con la primera esfera se origina un segmento de un círculo en el cual puede estar el objeto a medir como se observa en la **Figura 6-1**.



**Figura 6-1.** Perímetro originado por la intersección de dos esferas

Fuente: (Casanova, 2002, p. 10-3)

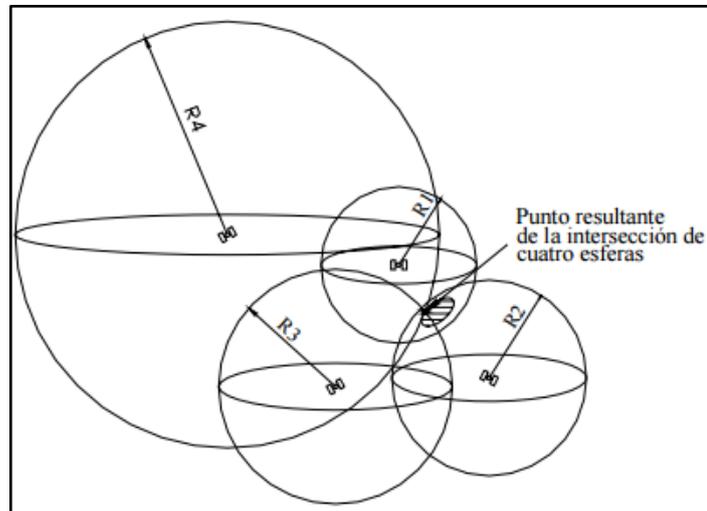
Al agregarse una tercera esfera originada por un tercer satélite la intersección de esta con las otras dos antes mencionadas, permite que la ubicación del objetivo se reduzca a dos puntos posibles sobre el nuevo perímetro formado (ver **Figura 7-1**), uno de los dos puntos es descartado debido a que se encuentra fuera de espacio o porque se mueve a una velocidad muy alta.



**Figura 7-1.** Ubicación posible del objetivo en la intersección de tres esferas

Fuente: (Casanova, 2002, p. 10-3)

Matemáticamente si se desea obtener la incógnita tiempo es necesario agregar una cuarta medición dada por un satélite distinto, con esto se calcularía las incógnitas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  y la mencionada anteriormente como se aprecia en la **Figura 8-1**.



**Figura 8-1.** Variable tiempo originado por una cuarta esfera

Fuente: (Casanova, 2002, p. 10-3)

#### 1.1.4.4 Medición precisa del tiempo

El tiempo de viaje es una medida difícil de determinar ya que las señales de radio poseen una gran velocidad en comparación a las pequeñas distancias que recorren desde el satélite hacia la Tierra, el promedio de este tiempo es de 0.067 segundos por lo cual se necesitan relojes de alta precisión.

Los satélites cuentan con relojes de alta precisión en nanosegundos, al contrario de los receptores lo cual significa un alto costo al implementarlos, para eliminar este problema los receptores utilizan un cuarto satélite para corregir la medición del tiempo.

#### 1.1.4.5 Conocimiento preciso de la órbita del satélite

Los 24 satélites operacionales en el sistema GPS se encuentran orbitando la tierra, existiendo seis diferentes orbitas con 55 grados de inclinación con respecto al Ecuador. En la Tierra se encuentran cinco estaciones de seguimiento y control de las cuales tres son para alimentación de datos y una para el control maestro, al utilizar los datos de las estaciones de seguimiento calcula la posición de los satélites en las efemérides y los coeficientes respectivos para realizar las correcciones de los tiempos (Casanova, 2002, pp.10-2,10-5).

### 1.1.5 Estructura de la señal de GPS

#### 1.1.5.1 Señales en el espacio

El sistema GPS tiene la característica de poseer una medición precisa del tiempo, de tal forma que cada uno de los satélites poseen varios osciladores y estabilizadores de alta precisión para tiempos en el orden de  $10^{-14}$ , en la **Tabla 1-1** se observa los diferentes tipos de osciladores para sistemas GPS.

**Tabla 1-1:** Características de los osciladores de sistemas GPS

Tipo de Oscilador	Precisión para medidas de tiempo
Rubidio	$10^{-11}$ - $10^{-12}$
Cesio	$10^{-12}$ - $10^{-13}$
Hidrógeno	$10^{-14}$ - $10^{-15}$

Realizado por: Iván Armijo (2017)

El oscilador del satélite genera una frecuencia fundamental de 10.23 MHz de donde se derivan las frecuencias L1 y L2. Los valores de las frecuencias proceden de la **Ecuación. 2-1** y la **Ecuación. 3-1**, estas frecuencias forman parte de la banda L de radiofrecuencias que van desde 1GHz hasta 2 GHz como se observa en la **Tabla 2-1**.

$$L1 = 154 \times f_0 \quad \text{Ecuación. 2-1}$$

$$L2 = 120 \times f_0 \quad \text{Ecuación. 3-1}$$

En donde:

$f_0$  = Frecuencia fundamental del oscilador

Al realizar las operaciones matemáticas pertinentes la portadora L1 tiene un valor de 1575.42 MHz cuya longitud de onda es 19.05 cm, por otra parte se tiene la portadora L2 de 1227.60 MHz con una longitud de onda de 24.45 cm (Peñañiel y Zayas, 2001: pp.34-35).

**Tabla 2-1:** Bandas de frecuencias empleadas en microondas

<b>Banda</b>	<b>Frecuencias (GHz)</b>
L	1-2
S	2-4
C	4-8
X	8-12
K <sub>u</sub>	12-18
K	18-27
K <sub>a</sub>	27-40
Q	33-50
V	50-75
W	75-100

Realizado por: Iván Armijo (2017)

#### 1.1.5.2 Mensaje de navegación

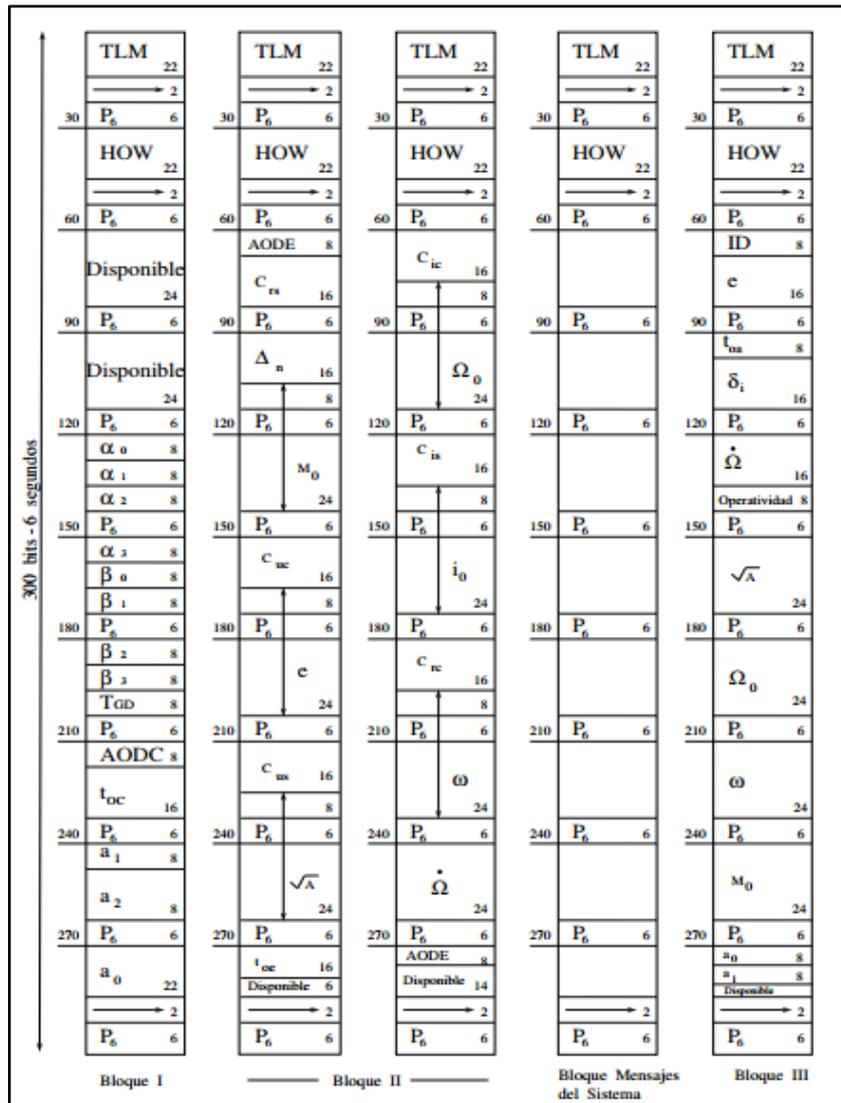
El mensaje de navegación está compuesto por los datos de parámetros orbitales, la condición del reloj y otra serie de datos temporales como se observa en la **Tabla 3-1**, estos son emitidos por los satélites a una tasa de 50 bps con una duración de 30 segundos, e iniciándose uno nuevo cada 1500 bits de información que corresponden a un bloque de datos.

Cada bloque de datos se divide en 5 subestructuras de 6 segundos cada uno, estas están compuestas de 10 palabras formadas por 30 bits cada una de ellas, un mensaje de navegación completo está formado por 25 bloques es decir se tarda 12.5 minutos en enviarse el mensaje totalmente, en la **Figura 9-1** se observa la estructura del mensaje (Berrocso, 2004, pp.12-16).

**Tabla 3-1:** Información contenida en cada mensaje de navegación de 1500 bits

<b>Subestructura</b>	<b>Información</b>
Subestructura 1	Se encuentra la información sobre la condición del reloj del satélite, la salud del satélite y la información de la vejez del mensaje.
Subestructura 2 y 3	Tienen a su disposición las efemérides del satélite.
Subestructura 4	Se alojan los parámetros del modelo ionosférico, un fragmento del almanaque, información UTC, información sobre si está activado el Anti-Spoofing y finalmente el A/S (convierte el código P en la encriptación Y).
Subestructura 5	Contiene la información sobre el almanaque y la condición de la constelación.

Realizado por: Iván Armijo (2017)



**Figura 9-1.** Estructura del mensaje de navegación GPS

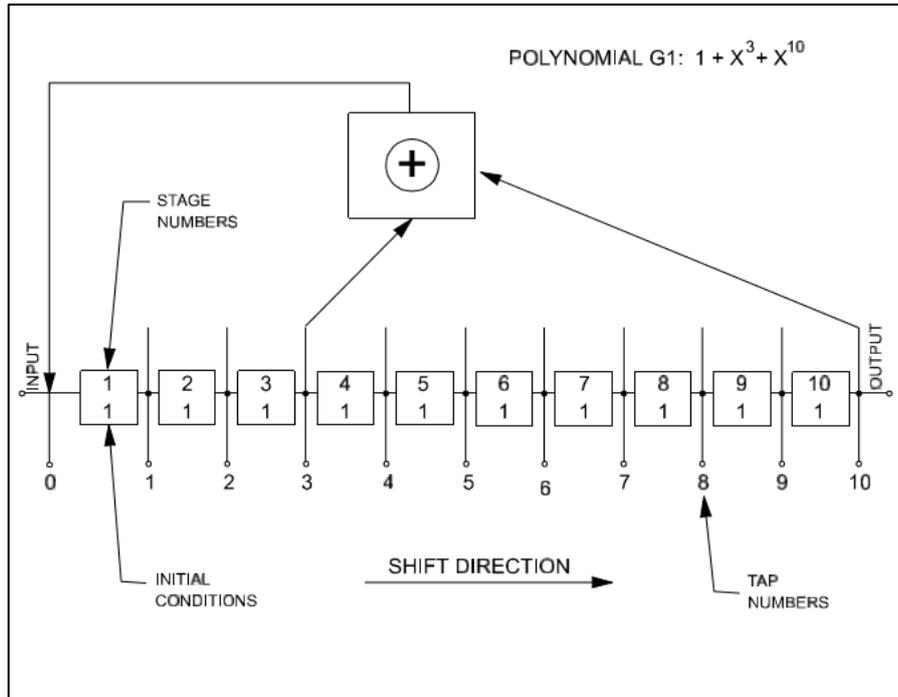
Fuente: (Berrocoso, 2004, p.14)

### 1.1.5.3 Códigos C/A

Este código es para uso civil y tiene una secuencia de 1023 bits, se generan por los registros de desplazamiento retroalimentados G1 y G2 de 10 bits cada uno, estos registros se forman a partir de un polinomio generador en el caso de G1 se obtiene mediante el polinomio  $G1=X^{10}+X^3+1$  como se observa en la **Figura 10-1** y en el caso del registro G2 viene dado por el polinomio generador  $G2=X^{10}+X^9+ X^8+ X^6 +X^3+ X^2+1$  (ver **Figura 11-1**), en ambos caso los registros se inician con un valor de todo los bits en 1.

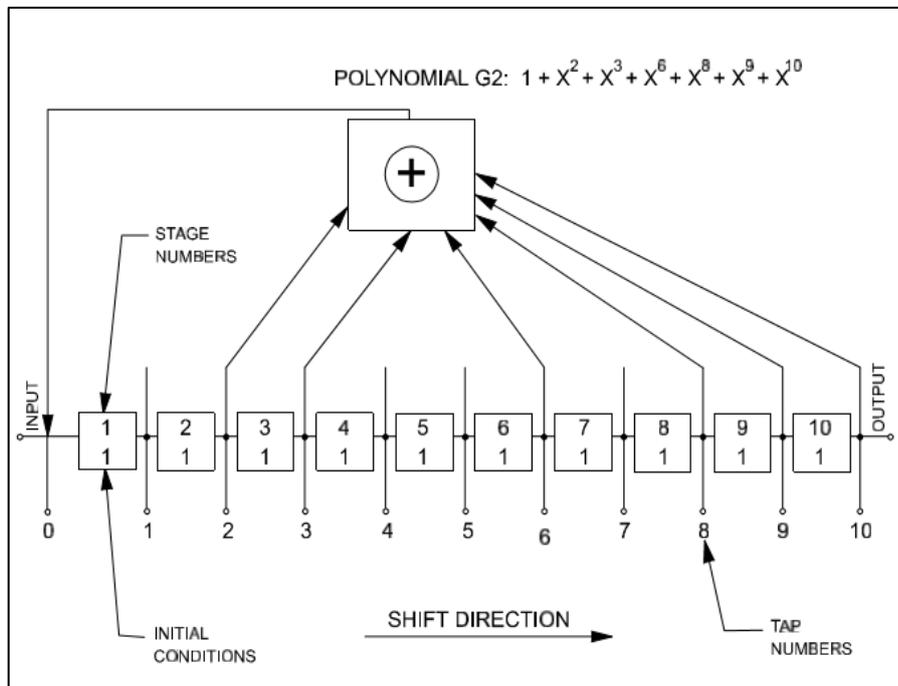
El código C/A resultante se lo obtiene al realizar la suma de módulo 2 entre los registro G1 y G2 como se puede apreciar en la **Figura 12-1**, este código funciona a una frecuencia de 1.023 MHz y únicamente modula a la señal L1.

Al utilizar diferentes combinaciones entre las celdas del registro G2 se pueden formar 36 códigos C/A distintos (ver en **ANEXO A**) de los cuales se toman 32 para los satélites existentes y los 4 restantes para las estaciones terrenas (NAVSTAR GPS, 1995, p.14).



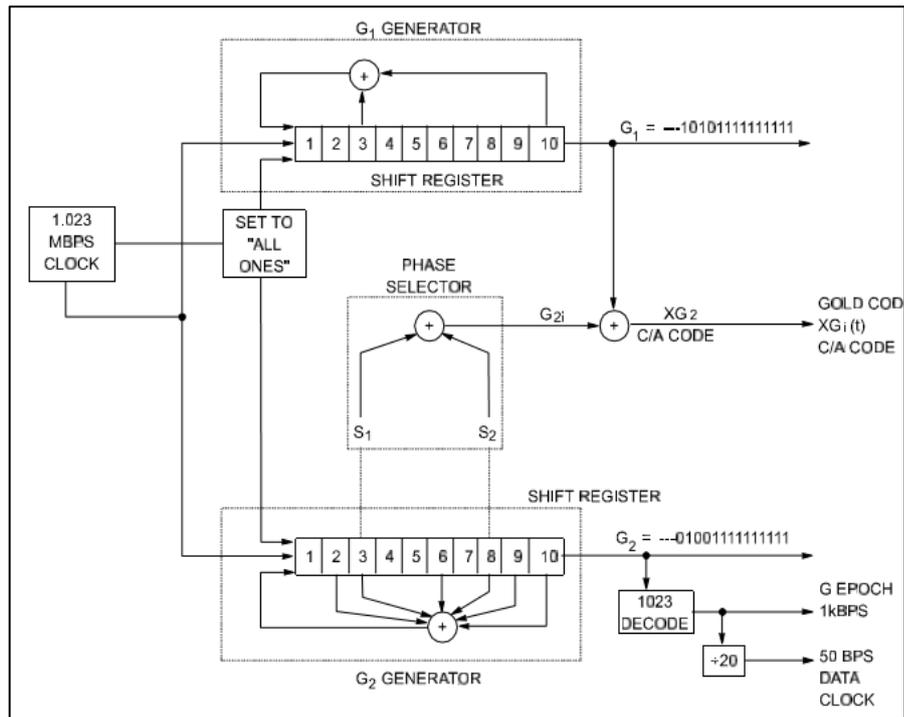
**Figura 10-1.** Polinomio generador G1 para el código C/A

Fuente: (NAVSTAR, 1995, p.16)



**Figura 11-1.** Polinomio generador G2 para el código C/A

Fuente: (NAVSTAR, 1995, p.16)



**Figura 12-1.** Estructura del código C/A

Fuente: (NAVSTAR, 1995, p.16)

#### 1.1.5.4 Códigos P

La generación del código P se asemeja a los principios de funcionamiento del código C/A aunque un poco más compleja, funciona con 4 registros de desplazamientos y cada uno está compuesto por 12 celdas como se observa en el **ANEXO B**, este código tiene la característica de estar encriptado por tal motivo se lo usa en servicios militares y en seguridad, funciona a una frecuencia de 10.23 MHz con lo cual se repite el código cada 266.41 días.

Para generar los 38 códigos diferentes para la identificación de cada satélite se realiza un reset a las cero horas del día domingo de esta forma se obtiene la **Ecuación. 4-1**, en donde al realizar la evaluación se obtiene aproximadamente 38.06 códigos (Kaplan y Hegarty, 2006: pp.130-132).

$$codes = D \times d \quad \text{Ecuación. 4-1}$$

En donde:

$D$  = número de días para que se repita el código P

$d$  = días de la semana

Los polinomios generadores de cada registro de desplazamiento y los bits iniciales con los cuales inician los registros se pueden ver en la **Tabla 4-1**.

**Tabla 4-1:** Polinomios generadores y estados iniciales de los registros del código P

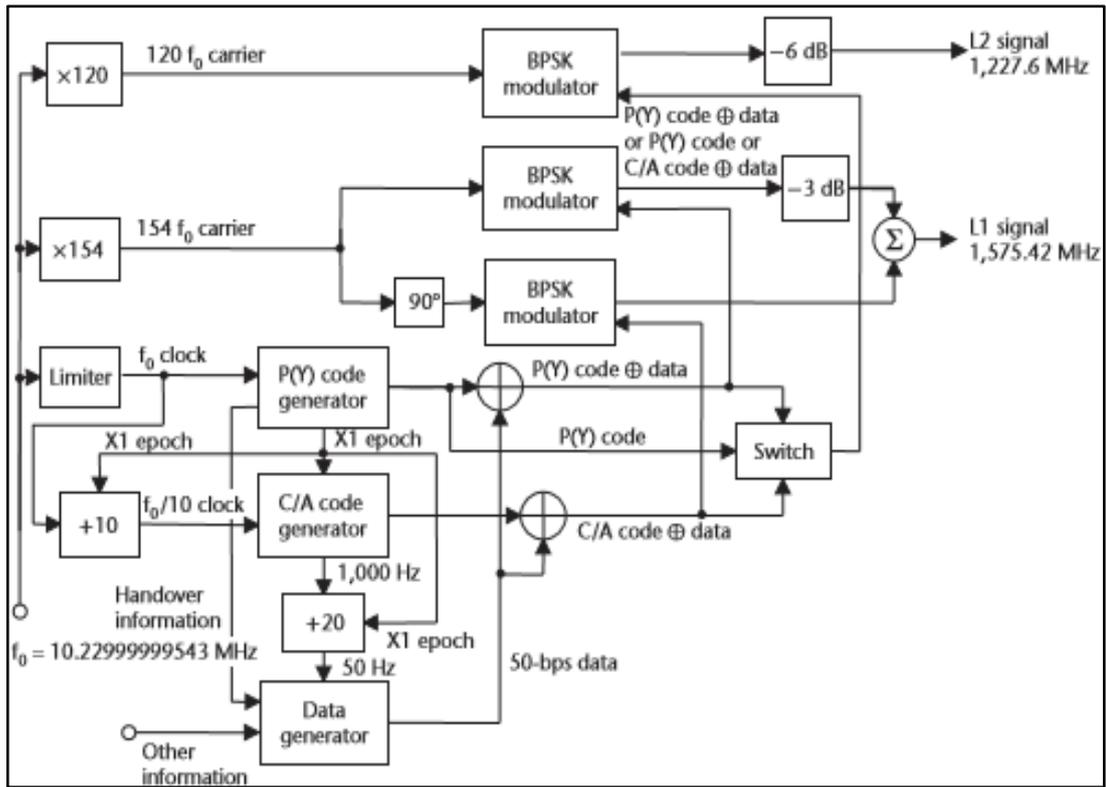
Registro	Polinomio generador	Bits iniciales
X1A	$1 + X^6 + X^6 + X^{11} + X^{12}$	001001001000
X1B	$1 + X^1 + X^2 + X^3 + X^8 + X^9 + X^{10} + X^{11} + X^{12}$	010101010100
X2A	$1 + X^1 + X^3 + X^4 + X^5 + X^7 + X^8 + X^9 + X^{10} + X^{11} + X^{12}$	100100100101
X2B	$1 + X^2 + X^3 + X^4 + X^8 + X^9 + X^{12}$	010101010100

Realizado por: Iván Armijo (2017)

### 1.1.6 Generación de la señal GPS

La generación de la señal GPS se la puede observar en el diagrama de bloques de la **Figura 13-1** en donde se tiene la frecuencia fundamental proporcionada por el reloj de alta precisión del satélite que al ser multiplicada por 154 y 120 se originan las frecuencias respectivas para las ondas portadoras L1 y L2, este mismo reloj alimenta al bloque del código C/A y código P.

Debido a la frecuencia utilizada en el mensaje de navegación esta va 20 veces más lento que la frecuencia utilizada por el código C/A, es decir por cada 20 códigos de C/A se tiene 1 bit del mensaje de navegación, a través del generador P se admite la sincronización exacta entre las tasas del mensaje de navegación y las secuencias de ensanchado.



**Figura 13-1.** Diagrama de bloques para generar la señal GPS

Fuente: (Kaplan y Hegarty, 2006, p.124)

El mensaje de navegación con los códigos C/A y P se los suma respectivamente mediante una adición de módulo 2 el cual corresponde a una XOR lógica o también a un producto aritmético entre niveles +1 y -1 como se muestra en la **Tabla 5-1** y la **Tabla 6-1**.

**Tabla 5-1:** Tabla de verdad del operador lógico XOR

Entrada 1	Entrada 2	Salida
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

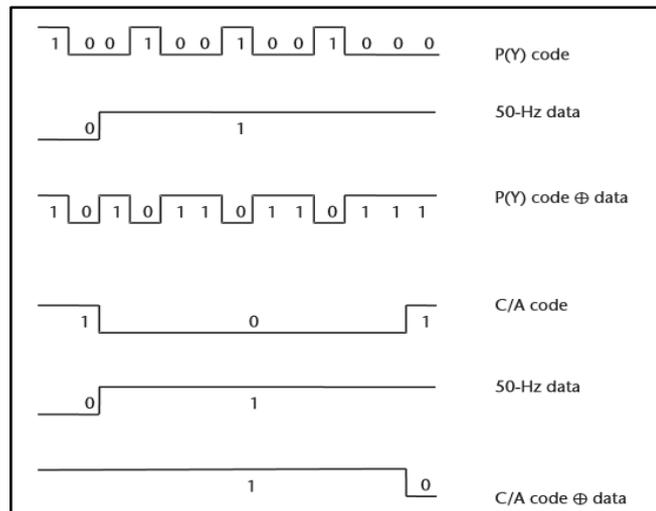
Realizado por: Iván Armijo (2017)

**Tabla 6-1:** Producto aritmético entre -1 y +1

Entrada 1	Entrada 2	Salida
-1	-1	+1
-1	+1	-1
+1	-1	-1
+1	+1	+1

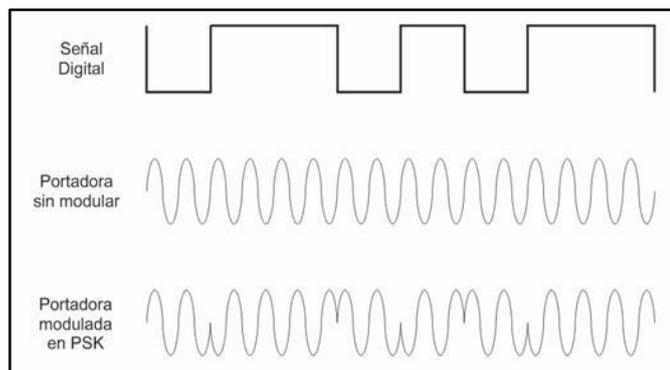
Realizado por: Iván Armijo (2017)

La nueva señal resultante luego de aplicar la suma módulo-2 (ver **Figura 14-1**) se la combina con la señal portadora L1 y L2 mediante la modulación BPSK en la cual la portadora varía su fase en 180 grados como se observa en la **Figura 15-1** cada vez que se detecta un cambio en el nivel de la señal binaria, la portadora L1 se modula en fase mientras que la L2 lo hace en cuadratura (Kaplan y Hegarty, 2006: pp.123-127).



**Figura 14-1.** XOR entre los datos y el código C/A

Fuente: (Kaplan y Hegarty, 2006, p.125)



**Figura 15-1.** Modulación BPSK

Fuente: (<http://www.monografias.com/trabajos-pdf/radar-virtual/image014.jpg>)

La señal transmitida por un satélite k se describe en la **Ecuación. 5-1**:

$$S^k(t) = \sqrt{2P_{\frac{C}{A}}} (C^k \oplus D^k(t)) \cos(2\pi f_{L1}t) + \sqrt{2P_{PL1}} (P^k \oplus D^k(t)) \operatorname{sen}(2\pi f_{L1}t) + \sqrt{2P_{PL2}} (P^k \oplus D^k(t)) \operatorname{sen}(2\pi f_{L2}t) \quad \text{Ecuación. 5-1}$$

En donde:

$k$  = Satélite

$P_{C/A}$  = Potencia de la señal con C/A

$P_{PL1}$  = Potencia de la señal con el código P en la portadora L1

$P_{PL2}$  = Potencia de la señal con el código P en la portadora L2

$C^k$  = Código C/A correspondiente al satélite k

$D^k$  = Datos del satélite k

$P^k$  = Código P correspondiente al satélite k

$f_{L1}$  = frecuencia de la señal portadora L1

$f_{L2}$  = frecuencia de la señal portadora L2

### 1.1.7 UERE (User equivalent range errors)

La señal desde la transmisión sufre errores o distorsiones como las variaciones en los relojes de los satélites, las producidas por la Ionósfera, errores en el reloj del receptor, alteraciones en las orbitas de los satélites, distorsiones por las capas atmosféricas bajas y el multicamino estas afectan la precisión en el rango de 0-30m, los más críticos se consideran a:

#### 1.1.7.1 Retardo ionosférico

Los satélites al emitir las ondas de radio desde 20200 Km de altitud, deben atravesar la ionósfera (ver **Figura 16-1**) la cual va desde los 60 km de altitud en donde existe la ionización de las moléculas de gas que durante este proceso se liberan electrones, estos influyen de forma directa en la velocidad de propagación y por lo tanto introducen cierto retraso la cual puede ser calculado con la **Ecuación. 6-1**.

$$d_{ion} = \alpha_f \cdot I \quad \text{Ecuación. 6-1}$$

En donde

$I = \text{TEC}$  en la dirección de observación (en electrones por metro cuadrado,  $e/m^2$ )

$$\alpha_f = 40.3/f^2 \text{ (en } m^3/e \text{)}$$

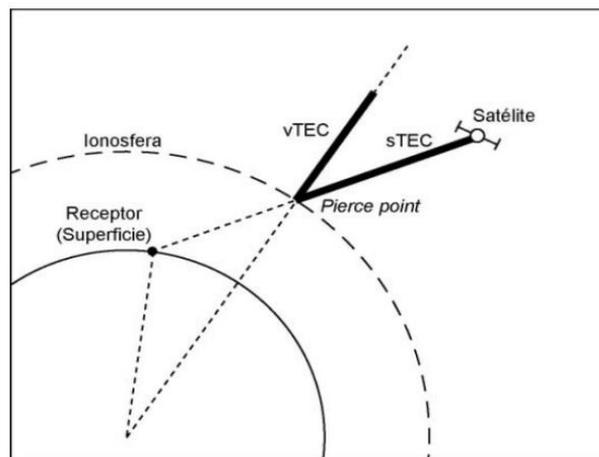
En base a esto se deduce que las medidas en fase  $-d_{ion}$  representan un avance al ingresar la ionósfera y las medidas en pseudodistancia  $+d_{ion}$  significan un retardo al pasar a través de la capa, en la **Tabla 7-1** se puede observar los retardos registrados cuando se tiene un TEC (contenido total de electrones) nocturno de  $10^{16} e/m^2$  y un TEC diurno de  $10^{18} e/m^2$  en las frecuencias L1 y L2 (Sardon et al., 1993: pp. 171-172).

**Tabla 7-1:** Retardos producidos por el TEC en las frecuencias L1 y L2

Frecuencia	Retardo con un TEC nocturno de $10^{16} e/m^2$	Retardo con un TEC diurno de $10^{18} e/m^2$
L1=1575.42 MHz	16.2 cm	16.2 m
L2=1227.6 MHz	26.7 cm	26.7 m

Realizado por: Iván Armijo (2017)

Este retraso de las ondas puede ser corregido a través del teorema del retraso de las señales las cuales son inversamente proporcionales al cuadrado de las frecuencias, al tener en cuenta esto las emisión de las dos señales en dos frecuencias distintas L1 y L2, facilitan una vez que llegan las ondas al receptor el cálculo del desfase entre las dos señales o también conocido como el retraso ionosférico, con estos datos se aplican las debidas correcciones (Franco, 1999, pp.80-81).



**Figura 16-1.** Señal GPS atravesando la ionósfera

Fuente: (Herraiz et al., 2014, p.56)

### 1.1.7.2 Retardo troposférico

La tropósfera al ser un medio no dispersivo influye sobre las ondas de radio enviadas por los satélites lo cual provoca la denominada refracción troposférica causada por las moléculas neutras y los átomos presentes en esta capa.

Esta refracción influye directamente sobre la estimación de la posición, específicamente afecta a las portadoras L1, L2 y a los códigos propios del GPS, el retardo se puede calcular mediante la refractividad  $N$  a través del recorrido de la señal.

La refractividad  $N$  es una función en la que incluyen datos meteorológicos como lo son la temperatura, presión, y humedad, en este efecto toma un papel importante el índice de refracción  $n$  el cual representa la variabilidad atmosférica neutra, con esta información se puede obtener el retardo o refracción troposférica con la ayuda de la **Ecuación. 7-1** en el cual la integración se lo hace durante la trayectoria de la señal (Cioce et al., 2011, pp.721-730).

$$\Delta\rho = \int (n - 1)ds = 10^{-6} \int Nds \quad \text{Ecuación. 7-1}$$

En donde:

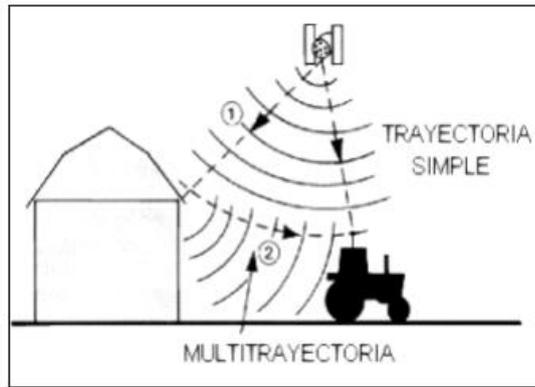
$N$  = refractividad

$ds$  = integración a lo largo de la trayectoria  $S$  de la señal

### 1.1.7.3 Multicamino

La señal que ingresa al receptor con línea directa de vista puede ser perturbada por otras que llegan por distintos caminos, esto es interpretado por el receptor como ruido y por ende produce un error en el cálculo de la posición (ver **Figura 17-1**).

Este tipo de error puede afectar a las medidas en fase y a las de código, en el primer caso se pueden producir errores de hasta 5 cm mientras que para los errores en base al código C/A en L1 y L2 pueden ser menor a 2 o 3 metros, actualmente los receptores usan antenas que mitigan el efecto multicamino (Jorge Fallas, 2010, p.10).



**Figura 17-1.** Multitrayectoria de señales

Fuente: (Von Martini et al., 2005, p.10)

El efecto multicamino sobre L1 puede ser calculado con la **Ecuación. 8-1** mientras que el efecto que se produce sobre L2 puede ser determinado con la **Ecuación. 9-1** estos errores estocásticos se dan en la unidad de metros (Herrada et al., 2010: p.57).

$$Mp1 = P_1 - \left(1 + \frac{2}{(f_1/f_2)^2 - 1}\right) \phi_1 + \left(\frac{2}{(f_1/f_2)^2 - 1}\right) \phi_2 \quad \text{Ecuación. 8-1}$$

$$Mp2 = P_2 - \left(\frac{2}{(f_1/f_2)^2 - 1}\right) \phi_1 + \left(\frac{2}{(f_1/f_2)^2 - 1} - 1\right) \phi_2 \quad \text{Ecuación. 9-1}$$

En donde:

$Mp1$  = efecto del multicamino en  $L_1$  medido en metros

$Mp2$  = efecto del multicamino en  $L_2$  medido en metros

$P$  = observación de pseudodistancia

$\Phi$  = observación en la fase de la portadora

$f_1$  y  $f_2$  = frecuencias de  $\Phi_1$  y  $\Phi_2$  respectivamente

#### 1.1.7.4 Efemérides y reloj de satélites

Los satélites emiten su posición en el espacio a esta información se lo conoce como efemérides, esto es captado por los receptores para realizar los cálculos de posicionamiento pero a pesar que los satélites están colocados en orbitas exactas se debe mantener un constante monitoreo para vigilar su velocidad, altura y posición ya que la variación de estos parámetros producen errores debido a la influencia de la gravedad del Sol, la Luna y la radiación solar.

Los relojes de los receptores y satélites deben mantener una sincronía casi perfecta, si no se llega a establecer se da lugar a errores de posicionamiento debido a que los satélites trabajan con relojes atómicos los cuales son caros en comparación a los usados por los receptores.

Cada satélite tiene a su disposición cuatro relojes atómicos en caso de que alguno falle, pero se suelen dar casos en los que el reloj del satélite presenta una variación, esto es corregido inmediatamente por el segmento de control, los relojes de los satélites no son los únicos que pueden sufrir variaciones debido a que los relojes de los receptores están propensos a interferencias eléctricas que pueden ser desde muy pequeños a muy grandes (Pachas, 2010, p.8).

## 1.2 Espectro Ensanchado

GPS utiliza la técnica de espectro ensanchado debido a los beneficios que presta tales como: resistencia a todo tipo de interferencias, disminuye el efecto multicamino, reutilización de frecuencias, utilización de códigos pseudoaleatorios para una alta confidencialidad, por estos motivos se utiliza en estos tipos de sistemas.

### 1.2.1 Generalidades

Los sistemas que manejan la técnica de espectro ensanchado se caracterizan por cumplir dos principios:

- El ancho de banda del mensaje  $m(t)$  es mucho menor, que el ancho de banda de la señal enviada  $s(t)$ .
- El ancho de banda de la señal enviada  $s(t)$  se lo determina por medio de alguna función independiente  $c(t)$  denominada señal ensanchadora, de tal forma que el receptor tenga conocimiento de esta señal para la recuperación del mensaje  $m(t)$ .

La señal en espectro ensanchado viene dada por la **Ecuación. 10-1** en la cual  $m(t)$  y  $c(t)$  forman parte de la envolvente compleja:

$$s(t) = \text{Re}\{g_m(t)g_c(t)e^{jw_c t}\} \quad \text{Ecuación. 10-1}$$

En donde:

$g_m(t)$  y  $g_c(t)$  = funciones de la envolvente compleja

### 1.2.2 Secuencia directa

En este tipo de técnica DS-SS la información  $m(t)$  es generada por una fuente digital polar con datos de +1 y -1, en el caso de la modulación BPSK las envolventes vienen dadas por  $g_m(t)=A_c m(t)$  y  $g_c(t)=c(t)$ , con lo cual se obtiene la **Ecuación. 11-1**.

$$s(t) = \text{Re}\{A_c m(t)c(t)e^{jw_c t}\} \quad \text{Ecuación. 11-1}$$

En donde:

$A_c m(t)$  = función de la envolvente compleja

$c(t)$  = señal polar ensanchadora

Esta nueva señal resultante se la denomina como señal de espectro ensanchado con corrimiento de fase binaria (BPSK), en la **Figura 18-1** se aprecia las partes que conforman un sistema de espectro ancho, en este sistema al ancho de pulso de la señal  $c(t)$  se lo denota como intervalo de chip  $T_c$ .

Cada  $T_c$  segundos se lleva a cabo una sincronización con las diferentes  $r$  etapas del registro, de esta manera  $c(t)$  posee un periodo máximo de  $N=2^r-1$  chips (Couch, 2008, pp.372-375).

Básicamente la modulación BPSK consiste en variar la fase de la señal portadora, cuando se detecta un 0 o su equivalente +1 la fase de la portadora varía 0 grados mientras que cuando se tiene un 1 o su semejante -1 la portadora varía 180 grados como se observa en la **Figura 19-1**.

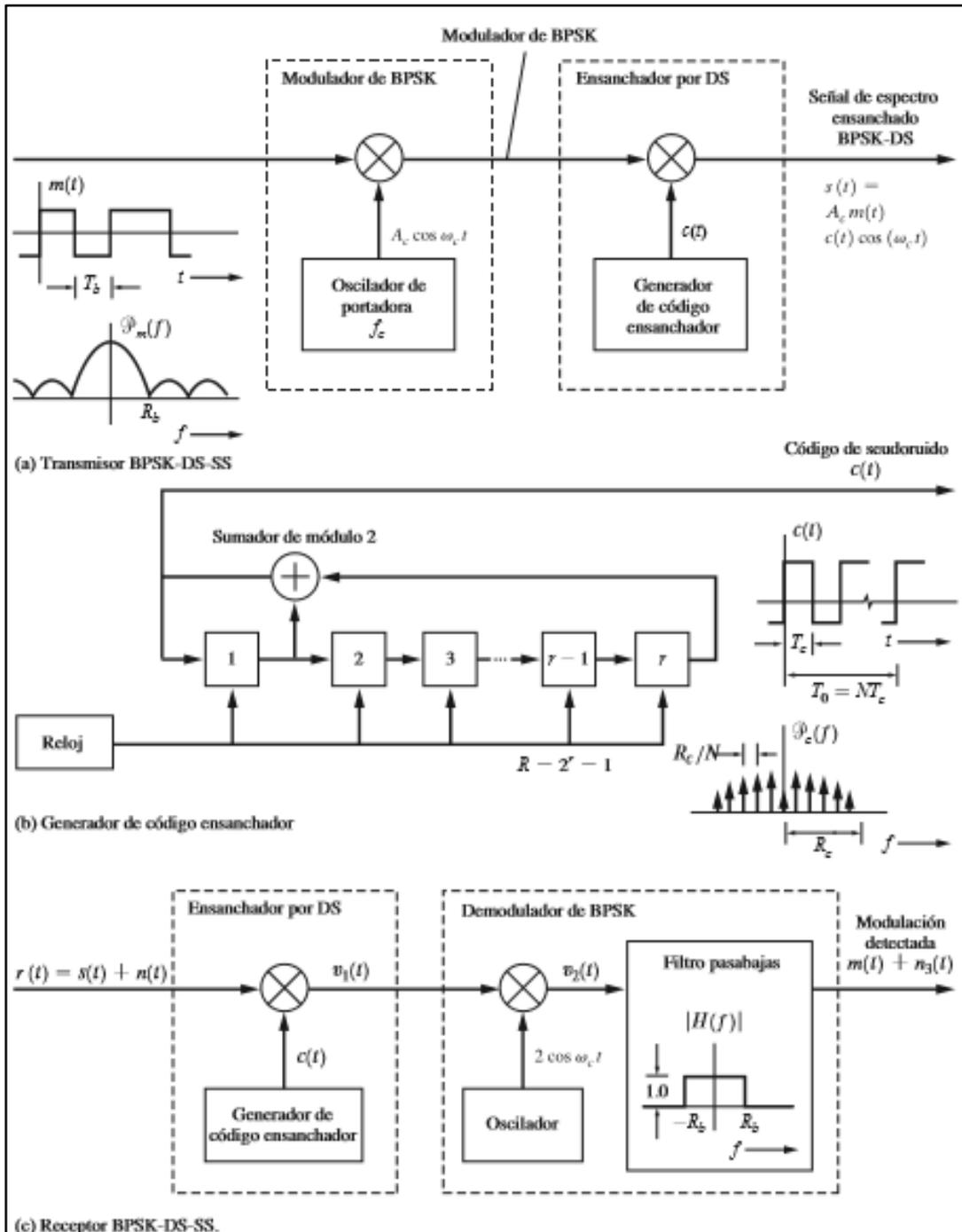
La autocorrelación de la secuencia  $m$  cuando el 0 y 1 son representados por -1 y +1 respectivamente viene dada por la **Ecuación. 12-1**.

$$R_c(k) = \begin{cases} 1, & k = lN \\ -\frac{1}{N}, & k \neq lN \end{cases} \quad \text{Ecuación. 12-1}$$

En donde:

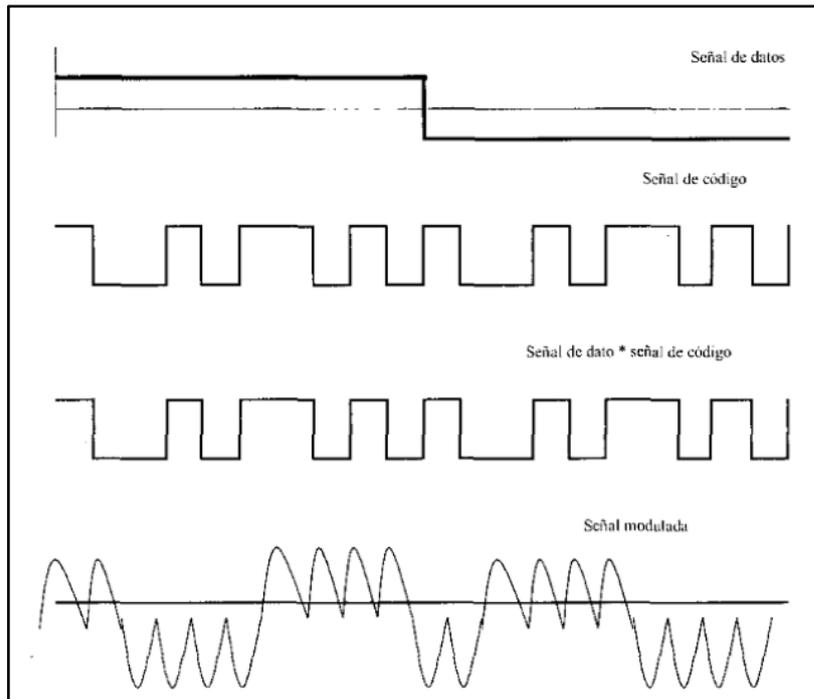
$$R_c(k) \triangleq (1/N) \sum_{n=0}^{N-1-k} c_n c_{n+k}$$

$$c_n = \pm 1$$



**Figura 18-1.** Sistema de espectro ensanchado por secuencia directa BPSK

Fuente: (Couch, 2008, pág.374)



**Figura 19-1.** Ensanchamiento de datos por secuencia directa con BPSK

Fuente: (Poveda, 1999, p.73)

### 1.2.3 Salto de frecuencia

En FH-SS la densidad espectral de la señal portadora modulada se ensancha de tal forma que se produce una cierta tasa de salto en la portadora, estos sistemas usan frecuentemente la conmutación de frecuencia para modular la señal de datos, al utilizar FSK binaria en esta técnica la señal en espectro ensanchado por salto de frecuencia se expresa por la siguiente **Ecuación. 13-1.**

$$X(t) = A \operatorname{sen} \left\{ \int_0^t [w_c + (\Delta w)p(t)] dt \right\} \quad \text{Ecuación. 13-1}$$

En donde:

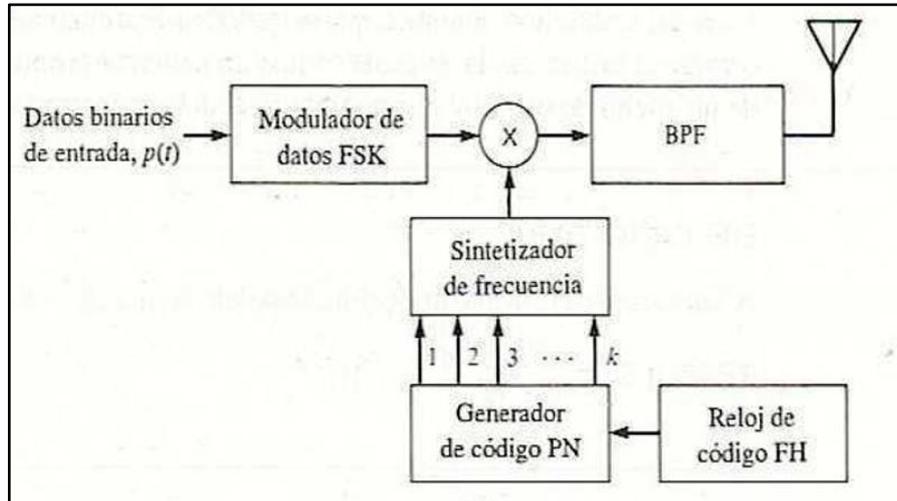
$\Delta w$  = desplazamiento de frecuencia de la señal portadora

$p(t)$  = función de conmutación binaria

$w_c$  = frecuencia de la señal portadora

La frecuencia de la señal portadora se mantiene durante un intervalo de tiempo  $T_h$ , para luego cambiar de frecuencia en el siguiente intervalo, la velocidad durante la realización de este cambio se la denomina tasa de salto de frecuencia.

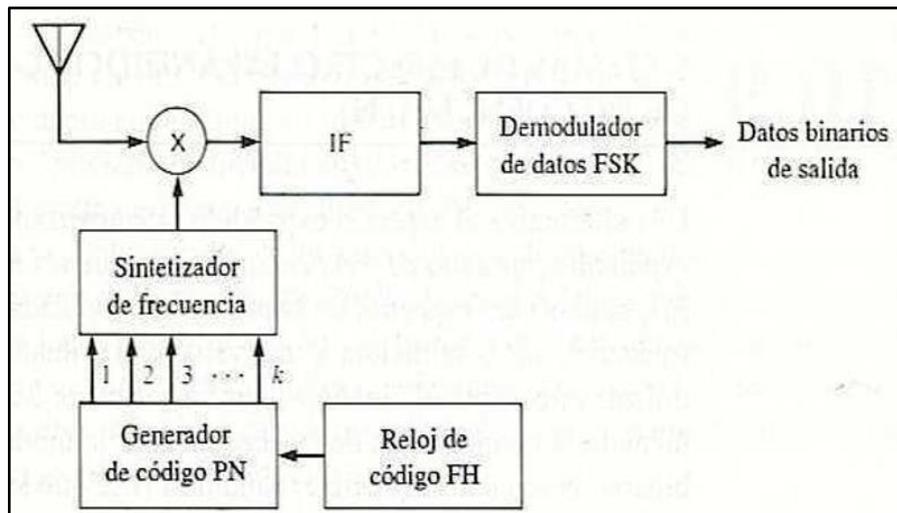
El diagrama de bloques de la **Figura 20-1** se muestra el proceso para generar una señal en espectro ensanchado por salto de frecuencia, una de las partes principales de este sistema es el sintetizador de frecuencia el cual genera una onda senoidal con amplitud constante en la cual su frecuencia viene dada por el código digital inyectado en el sintetizador (Ferrel, 1993, pp.655-657).



**Figura 20-1.** Diagrama de bloques para generar una señal por salto de frecuencia

Fuente: (Ferrel, 1993, p.656)

Para eliminar el salto de frecuencia en el receptor se procede a mezclar esta señal con una generada por un oscilador local que salta de forma sincronizada con la señal a eliminar esto se observa en la **Figura 21-1**.



**Figura 21-1.** Diagrama de bloques del receptor por salto de frecuencia

Fuente: (Ferrel, 1993, p.656)

### 1.3 Codificación de canal

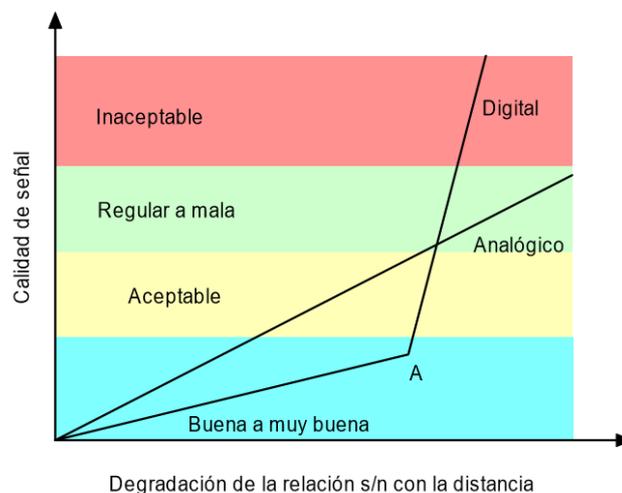
#### 1.3.1 Generalidades

La codificación de canal tiene como objetivo la detección y corrección de errores que se producen en los canales de transmisión, existen dos motivos principales que afectan a la señal recibida. La primera causa se debe al ruido provocado por el propio canal de transmisión, en el cual influyen directamente los mecanismos de propagación, la segunda causa es el que se origina por el proceso de codificación denominado ruido de cuantificación, el cual es introducido desde el transmisor y se propaga por todo el sistema hasta el receptor.

Los errores de transmisión se deben al ruido que se introduce en el canal, lo cual hace que la señal recuperada por el receptor sea distinta a la enviada. La cantidad de bits de información recibidos debe ser lo más parecido a lo enviado por ende la información se la debe proteger lo máximo posible contra las perturbaciones.

El efecto multicamino contribuye notablemente en el retardo y atenuación de la señal que llega al receptor además de influir el desvanecimiento provocado por el entorno donde se propaga la señal todo esto genera dispersión temporal, dispersión frecuencial y una atenuación variable provocando el deterioro de la información y por lo tanto el aumento en la tasa de errores.

Los receptores son capaces de recibir información hasta una cierta tasa de errores pero si sobrepasa este límite la señal deja de recibirse, en la **Figura 22-1** se observa cómo se degrada la señal conforme aumenta la distancia (Pérez et al., 2003: p.313).



**Figura 22-1.** Degradación de la señal vs distancia

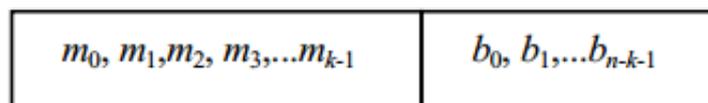
Fuente: (Pérez,2003, p.313)

### 1.3.2 Codificación Hamming

Este tipo de codificador de bloque posee un conjunto de  $m$  bits de datos, a los cuales se les suma un conjunto de  $k$  bits conocidos como paridad lo cual da como salida un nuevo conjunto de  $n$  bits denominado palabra-código.

Este codificador lineal cumple la propiedad de que al realizar una suma de un par de palabra-código en módulo 2 el resultado es una nueva palabra-código que existe en el conjunto que se usa para la codificación de los posibles mensajes.

El codificador Hamming es sistemático puesto que al agregarse bits de paridad no altera la ubicación de los bits que conforman el mensaje, la palabra-código  $(n, k)$  puede ser organizada de tal forma que los bits de paridad se mantengan hacia la derecha y los bits de información hacia la izquierda como se observa en la **Figura 23-1**, estos códigos son empleados en la corrección de un solo error por bloque cuyas características vienen dadas por la **Tabla 8-1**.



**Figura 23-1.** Distribución de la palabra-código

Fuente: Alvarado, 2004, p.52

**Tabla 8-1:** Características de la codificación Hamming

Parámetro	Descripción	Unidad
Tamaño del bloque	$n=2^m-1$	Bits
Bits de paridad	$m; (m \geq 3)$	Bits
Tamaño del mensaje	$K$	Bits
Distancia mínima	$d_{min} \geq 2t+1$	Bits
Errores a corregir	$T$	Bits

Realizado por: Iván Armijo (2017)

La distancia Hamming representa la cantidad de bits diferentes que hay entre los vectores que simbolizan las palabras-código, así mismo esta distancia se obtiene con los pesos mínimos de los vectores no ceros, este peso Hamming resulta de la diferenciación de los vectores de las palabras-código con el vector de puros ceros (Alvarado, 2004, pp.52-54).

### 1.3.3 Codificación Convolutiva

Esta codificación se produce al llevar los bits de información a través de registros de desplazamientos que están formados por dos o más conjunto de derivaciones los cuales se encuentran conectados mediante un sumador módulo 2.

El código se forma al tomar los bits resultantes de los sumadores en cada periodo, siendo así que la salida del codificador se produce por la convolución de los bits de entrada con la respuesta al impulso del codificador.

Este tipo de codificador posee una memoria, por ende su salida depende de gran parte de los eventos anteriores, el número de estados vienen dado por la **Ecuación. 14-1**.

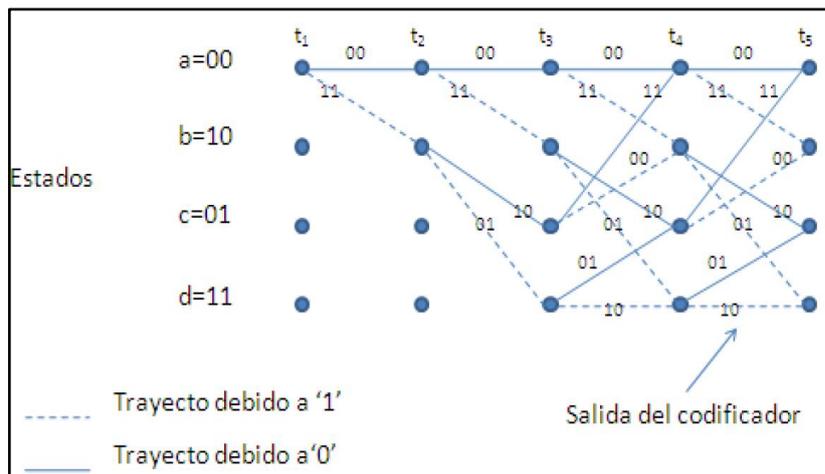
$$\text{número de estados} = m (K - 1) \quad \text{Ecuación. 14-1}$$

En donde:

$m$  = cantidad de bits que entran en cierto momento

$K$  = constante de restricción

Una de las representaciones que se usan a menudo para representar los cambios de estados en función del tiempo es el diagrama de Trellis (ver **Figura 24-1**), el cual relaciona una cadena de datos de entrada con el código formado en cierto momento (Luna et al., 2014: p.302).



**Figura 24-1.** Diagrama de Trellis

**Fuente:** Luna et al., 2014, p.302

### 1.3.4 Codificación Diferencial

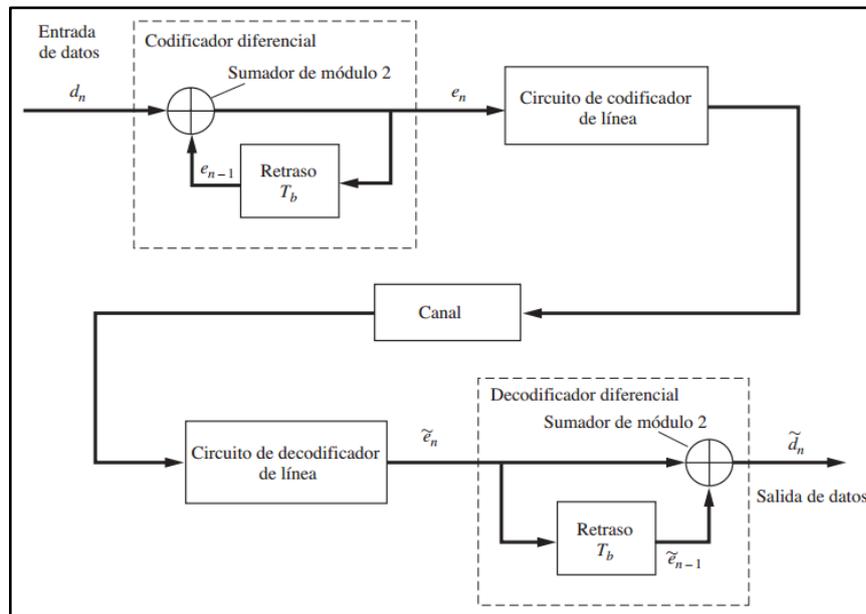
Cuando los datos atraviesan un canal de radiocomunicaciones, la onda presenta una variación al azar es decir los datos son intercambiados. Para eliminar este inconveniente se emplea la codificación diferencial (ver **Figura 25-1**) en donde los bits diferenciales provienen de la **Ecuación. 15-1** que se fundamenta en el operador OR exclusivo.

$$e_n = d_n \oplus e_{n-1} \quad \text{Ecuación. 15-1}$$

En donde:

$d_n$  = entrada actual

$e_{n-1}$  = entrada anterior



**Figura 25-1.** Sistema de codificación diferencial

Fuente: (Couch, 2008, p.169)

En el lado del receptor el proceso de decodificación se produce al llevar una comparación del estado de los bits adyacentes, si el bit que ingresa en el presente posee una similitud con el bit codificado anterior entonces se tiene a la salida un 0 binario, de la misma forma sucede para la decodificación de un 1 binario, la expresión de la **Ecuación. 16-1**. representa el decodificador (Couch, 2008, pp.169-170).

$$\tilde{d}_n = \tilde{e}_n \oplus \tilde{e}_{n-1} \quad \text{Ecuación. 16-1}$$

En donde:

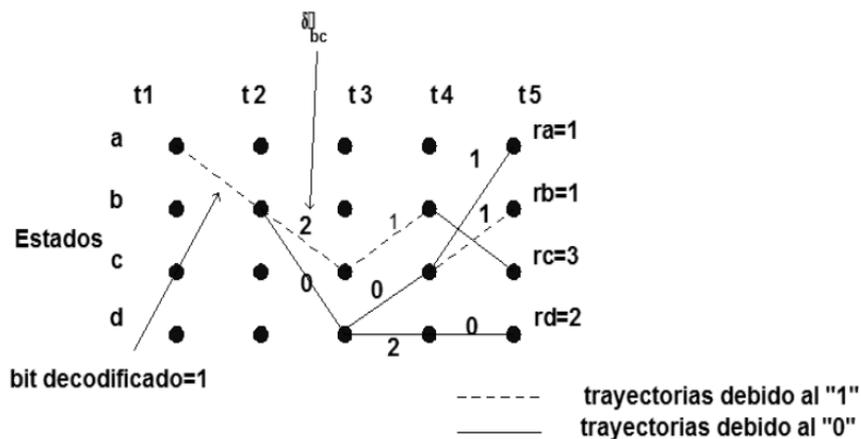
$\tilde{e}_n$  = entrada actual en el receptor

$\tilde{e}_{n-1}$  = entrada anterior en el receptor

### 1.3.5 Decodificación Viterbi

Se fundamenta en la máxima verosimilitud y en la propiedad de recursividad del diagrama de Trellis usado en el codificador convolucional, este algoritmo realiza una comparación de la cadena que se recibe en los diferentes instantes con todos los caminos descritos por Trellis, esta comparación señalan los caminos los cuales se los denota como Distancia de Hamming con ellos se procede a calcular la distancia de Hamming acumulada para los diferentes estados en distintos instantes de tiempo.

Luego de calculada la distancia de Hamming acumulada para los diferentes estados se procede a comparar las pertenecientes a un similar estado, de tal forma que se eliminan las distancias acumuladas de mayor tamaño con el cual queda únicamente un camino para cada estado, este proceso se repite para los tiempos posteriores que después de cierta cantidad de comparaciones y avances en el diagrama de Trellis, los caminos descritos van a converger en un similar origen como se observa en la **Figura 26-1** de donde se extraen los datos codificados (Luna et al., 2013, p.85).



**Figura 26-1.** Secuencia de pasos dentro del diagrama de Trellis

Fuente: Luna et al., 2013, p.85

## 1.4 Modelos de canal

### 1.4.1 Frecuencia Doppler

Cuando la fuente o el receptor se trasladan hacia diferentes puntos, esto provoca una variación en el nivel de la señal recibida y además surge un desplazamiento en la frecuencia de la señal portadora la cual es proporcional a la velocidad del terminal.

Al enviarse por un medio una portadora sin modular a una frecuencia  $f_0$ , la onda que recibe un dispositivo que experimenta un alejamiento de la antena de transmisión a una velocidad  $v$  viene dada por la **Ecuación. 17-1**.

$$r(t) = A \cos(2\pi f_0 t - 2\pi \frac{v}{\lambda} t) \quad \text{Ecuación. 17-1}$$

En donde:

$A$  = amplitud de la señal portadora

$f_0$  = frecuencia de la señal portadora

$v$  = velocidad del dispositivo

$\lambda$  = longitud de onda

Por lo tanto el desplazamiento que se da en la frecuencia portadora se expresa en la **Ecuación. 18-1**, si el dispositivo presenta un desplazamiento en un lugar donde recibe la señal desde diferentes caminos o trayectorias, estas llegan al terminal con diferentes ángulos que se representa mediante  $\cos(\phi) \times (v/\lambda)$  (Sallent et al., 2003: pp.63-64).

$$f_d = \frac{v}{\lambda} \quad \text{Ecuación. 18-1}$$

En donde:

$v$  = velocidad del dispositivo

$\lambda$  = longitud de la onda que se recibe

### 1.4.2 Canal con desvanecimiento tipo Rician

Este tipo de desvanecimiento se caracteriza por ser de baja escala y por influir directamente sobre la onda estacionaria dominante en un escenario en donde existe visión directa en el trayecto que se describe entre el transmisor y receptor.

La distribución Rician se basa en la amplitud pico de la onda dominante y su función Bessel de orden cero y de primera clase, esta distribución se describe en base al parámetro  $K$  que simboliza el radio que hay entre la varianza del multicamino y la potencia de la onda lo cual se representa por la **Ecuación. 19-1**.

$$K(db) = 10 \log \frac{A^2}{2\sigma^2} dB \quad \text{Ecuación. 19-1}$$

En donde:

$A$  = amplitud de la onda dominante

$\sigma$  = varianza de multitrayecto

La variable  $K$  se define como el factor Rician, el cual en simulaciones se lo denota linealmente y que comúnmente toma el valor de 1, aunque puede tomar cualquier tipo de valor para efectuar diferentes análisis (Monclou et al., 2003: p.42).

#### **1.4.3 Canal con desvanecimiento tipo Rayleigh**

Este tipo de desvanecimiento se da cuando la línea de vista directa que existe entre el transmisor y receptor se ve afectada por elementos que interrumpen esta enlace o también porque su nivel es mucho menor que el ruido.

El enlace se establece cuando se adicionan todas las contribuciones multicamino, esto permite la existencia de cobertura en el interior de estructuras sin línea de vista directa con el emisor, la **Ecuación. 20-1** representa este comportamiento (Sklar, 1997, p.93).

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right] & 0 \leq r \leq \\ 0 & r < 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación. 20-1}$$

En donde:

$r$  = envolvente de la señal

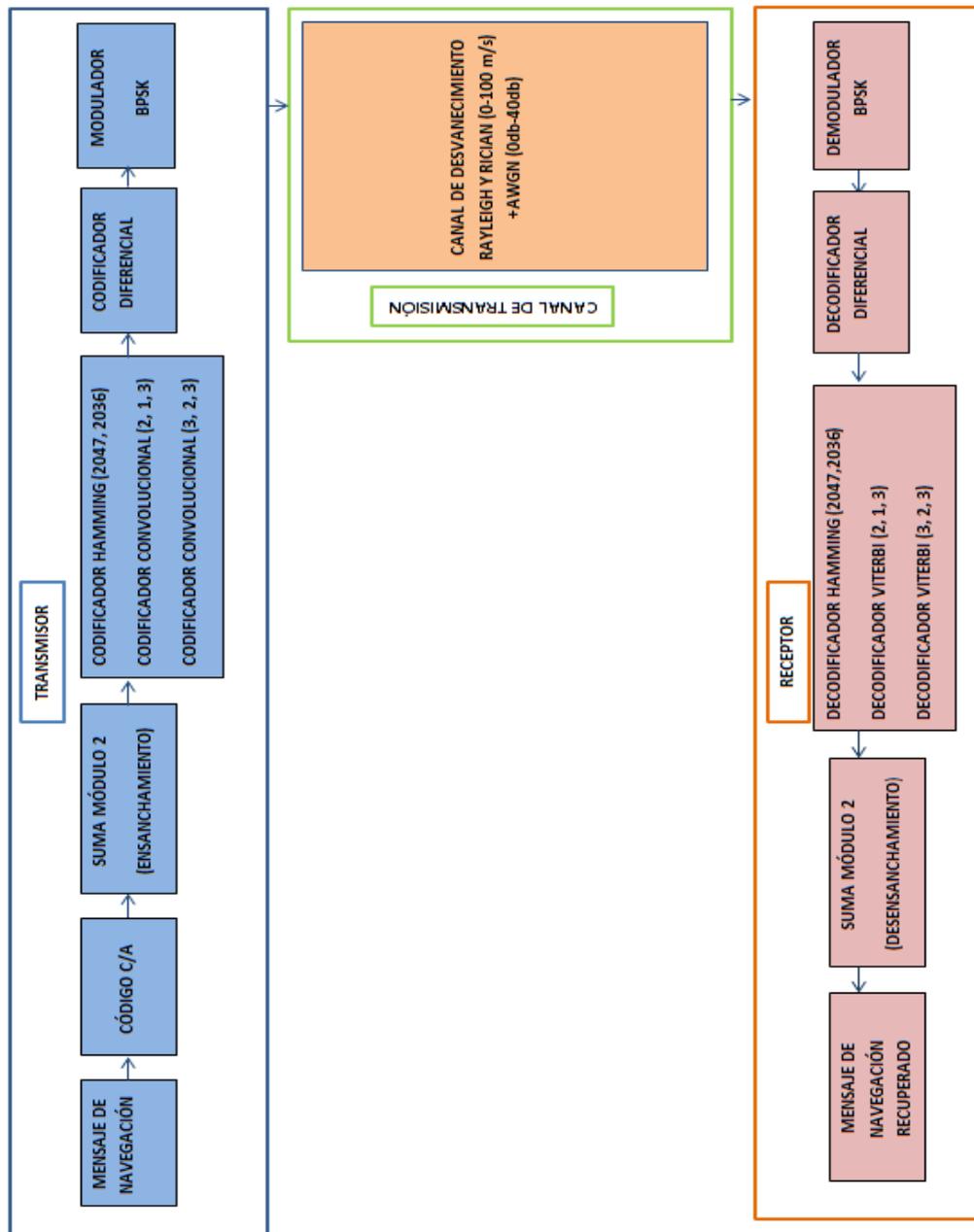
$\sigma$  = desviación típica

## CAPITULO II

### 2. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO EN MATLAB

#### 2.1 Diagrama de bloques señal GPS L1

Para generar la señal GPS L1 que permita la evaluación del rendimiento del canal de transmisión con la implementación de la técnica de espectro ensanchado se elaboró un algoritmo que sigue el esquema de la **Figura 1-2**.



**Figura 1-2.** Diagrama de bloques para la implementación del algoritmo en Matlab

Realizado por: Iván Armijo (2017)

## 2.2 Señal portadora L1

Para generar la señal portadora se establece la frecuencia a la que va a funcionar el sistema en el proceso de transmisión en este caso la frecuencia viene dado por el producto entre la frecuencia fundamental 10.23 MHz proveniente del reloj atómico del satélite y la relación 154, como se observa en la **Ecuación. 1-2**.

$$f_{L1} = 10.23 \text{ MHz} \times 154 = 1575.42 \text{ MHz} \quad \text{Ecuación. 1-2}$$

Dentro de los parámetros de la señal portadora L1 se tiene la amplitud de 5 voltios, además de que al transmitir el mensaje de navegación a 50 Hz se tiene un periodo de bit dado por la **Ecuación. 2-2** cuya evaluación resulta 0.02 segundos el cual se relaciona con el número total de bits que conforman el código C/A a 1.023 MHz.

$$\text{Periodo bit mensaje de navegación} = \frac{1}{50\text{Hz}} = 0.02 \text{ s} = 20 \text{ ms} \quad \text{Ecuación. 2-2}$$

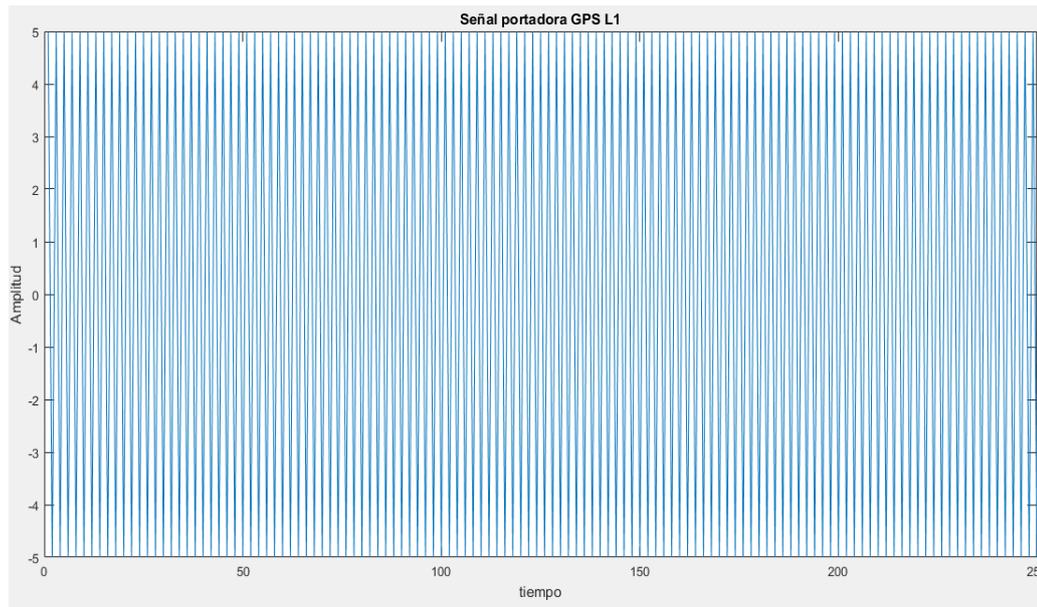
Al realizar la relación entre el periodo del mensaje de navegación con el número total de chips del código C/A por periodo como se muestra en la **Ecuación. 3-2**, se consigue un periodo de bit dada por la **Ecuación. 4-2** para la señal portadora.

$$\text{chips/bit de navegación} = 20 \times 1023 \text{ chips} = 20460 \text{ chips} \quad \text{Ecuación. 3-2}$$

$$\text{Periodo bit señal portadora} = \frac{0.02 \text{ s}}{20460 \text{ chips}} = 0.977 \mu\text{s} \cong 1 \mu\text{s} \quad \text{Ecuación. 4-2}$$

Aplicando el teorema de Nyquist-Shannon dada en la **Ecuación. 5-2** se obtiene una frecuencia de muestreo de 3150.84 MHz con lo cual se forma el vector tiempo para la señal portadora L1 y así se logra finalmente generar la señal portadora cosenoidal deseada la cual se muestra en la **Figura 2-2** correspondiente a la banda L de frecuencias.

$$\text{Frecuencia de muestreo} = 2 \times f_{L1} = 2 \times 1575.42 \text{ MHz} = 3150.84 \text{ MHz} \quad \text{Ecuación. 5-2}$$

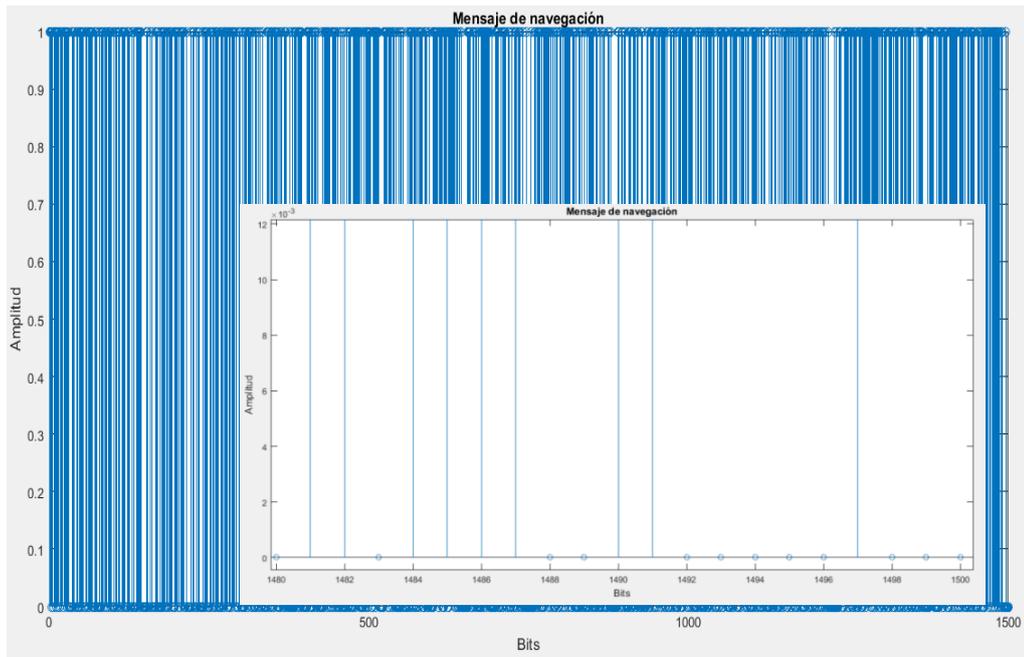


**Figura 2-2.** Señal portadora GPS L1

Realizado por: Iván Armijo (2017)

### 2.3 Mensaje de navegación

El mensaje de navegación básicamente es una señal binaria funcionando a 50 Hz por ende su periodo es de 20 ms como se aprecia en la **Ecuación. 2-2**, dentro de este mensaje se encuentra información como las correcciones de reloj, las órbitas de satélites, e información acerca de la salud de los satélites, está constituido por 5 subtramas de 300 bits en este caso aleatorios cada uno de ellos, estos se obtienen mediante la creación de un ciclo que genere 5 veces una subtrama de esta forma al concatenarlos se obtiene el mensaje de navegación deseado (ver **Figura. 3-2**) que para su transmisión van a ser tomados trenes de dos bits cada uno.

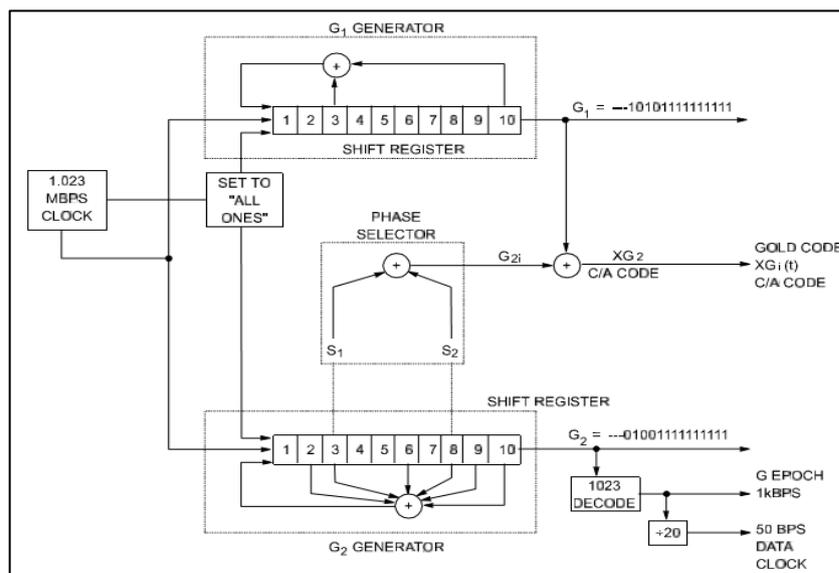


**Figura 3-2.** Mensaje de navegación GPS

Realizado por: Iván Armijo (2017)

## 2.4 Código C/A

Para la generación de la señal GPS L1 una de las partes indispensables es el código C/A que permite la aplicación de la técnica de espectro ensanchado por secuencia directa, este código se obtiene a partir de un generador como se observa en la **Figura 12-1** que se encuentra formado por dos registros de desplazamientos cada uno de 10 bits, las salidas  $G_1$  y  $G_2$  se encuentran realimentándose linealmente con lo cual se genera un código PRN con un total de 1023 bits.



**Figura 12-1.** Estructura del código C/A

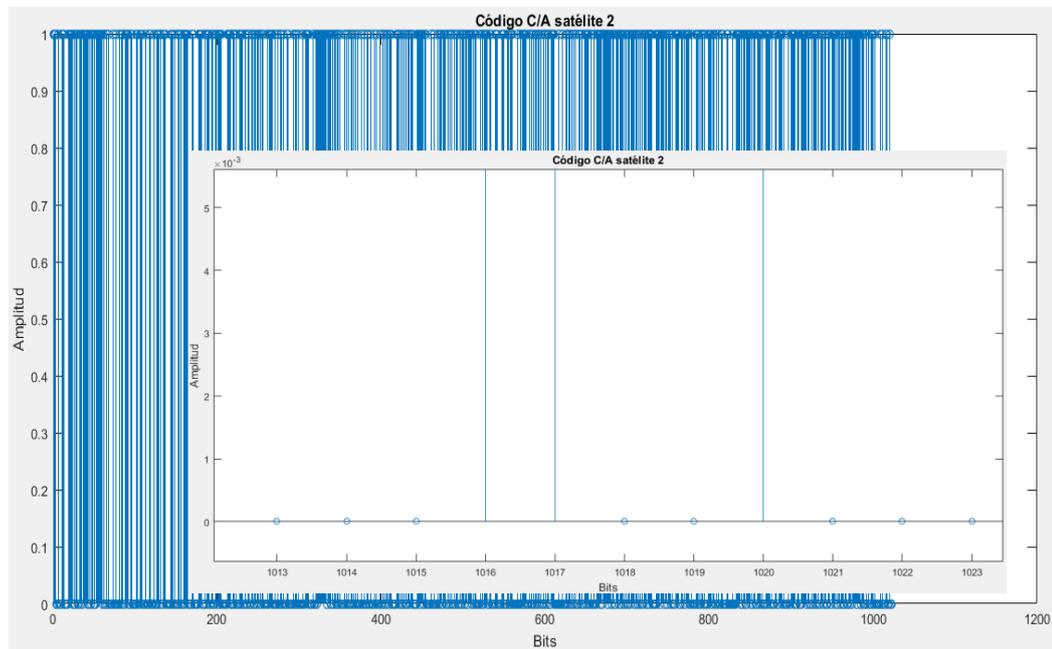
Fuente: (NAVSTAR, 1995, p.16)

Inicialmente los 10 registros que conforman los generadores G1 y G2 toman el valor de 1 o su equivalente -1 cuando se usa la representación polar de no retorno a cero, al utilizar diferentes combinaciones de celdas entre el S1 y S2 en el segundo registro se logra generar 36 códigos C/A únicos, de los cuales 32 se toman para identificar los diferentes satélites y los otros 4 restantes se usan para la emisión de mensajes por parte de las estaciones terrestres.

Se genera un ciclo hasta obtener los 1023 bits aleatorios necesarios, en donde el registro G1 está compuesto por una suma módulo-2 (OR-exclusivo) o en este caso una simple multiplicación entre las celdas 3 y 10, que se retroalimenta a la entrada del registro.

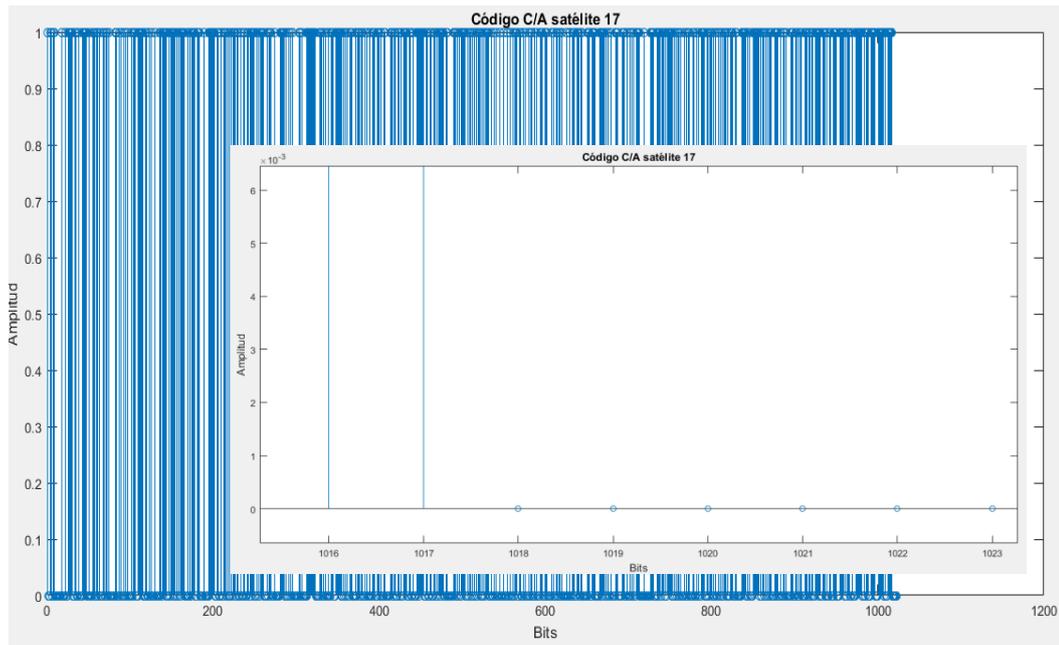
Por otro lado el registro G2 se encuentra constituido por dos sumas módulo-2, el primer OR de G2 incluyen las celdas 2, 3, 6, 8, 9 y 10 que retroalimentan a la entrada del registro, el segundo OR de G2 corresponde a la suma de las celdas que identifican a cada uno de los satélite en órbita.

En la **Figura 4-2** se observa el código C/A que corresponde al satélite 2 y en la **Figura 5-2** el código C/A del satélite 27.



**Figura 4-2.** Código C/A del satélite 2

Realizado por: Iván Armijo (2017)



**Figura 5-2.** Código C/A del satélite 17

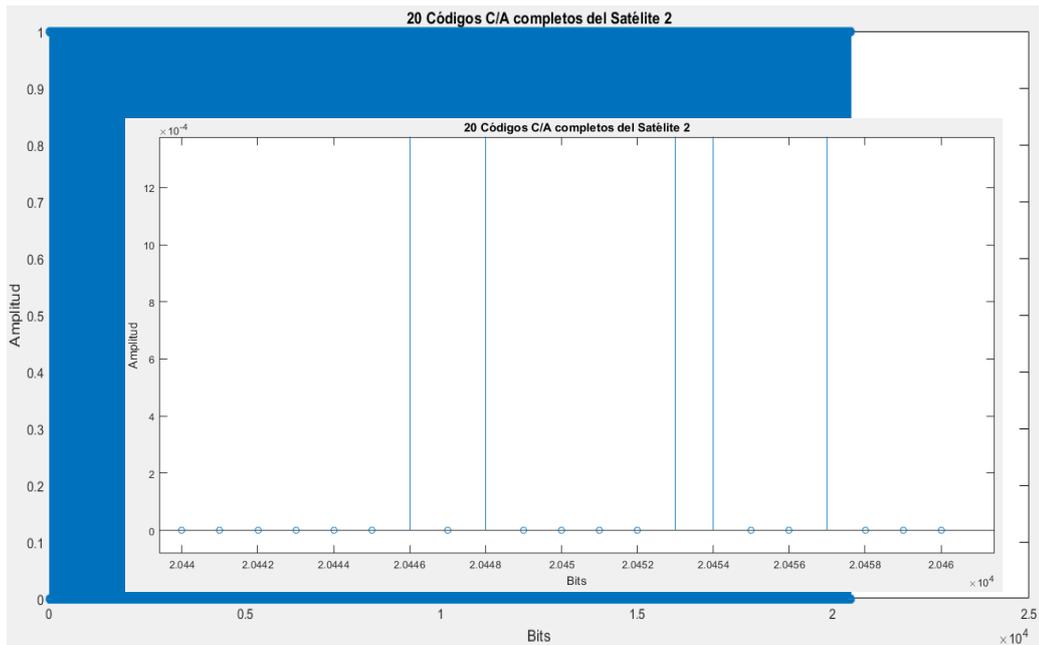
Realizado por: Iván Armijo (2017)

## 2.5 Suma módulo 2 (Ensanchamiento)

Dentro del proceso de modulación usado en GPS se toma en cuenta la secuencia ensanchadora o PRN que en este caso corresponde al código C/A el cual permite la aplicación de la técnica de espectro ensanchado por secuencia directa, el código C/A es una señal parecida al mensaje de navegación pero funciona a una tasa más alta a 1.023 MHz con lo cual su periodo viene dado por la **Ecuación. 6-2**.

$$T_{C/A} = \frac{1}{1.023 \text{ MHz}} = 0,977 \mu\text{s} \cong 1\mu\text{s} \times 1023 \text{ chips} = 1\text{ms} \quad \text{Ecuación. 6-2}$$

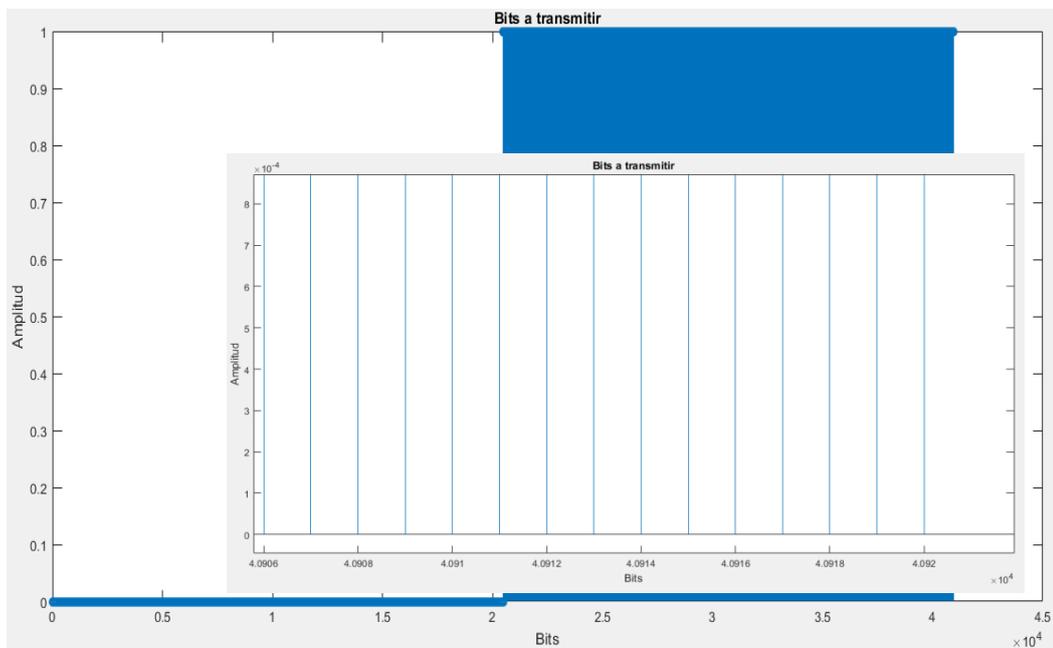
Al relacionar el mensaje de navegación cuyo periodo es de 20 ms con el del código C/A se tiene como resultado que por cada bit del mensaje le corresponde un total de 20 códigos C/A completos como se observa en la **Figura 6-2**.



**Figura 6-2.** 20 códigos C/A por cada bit del mensaje de navegación

Realizado por: Iván Armijo (2017)

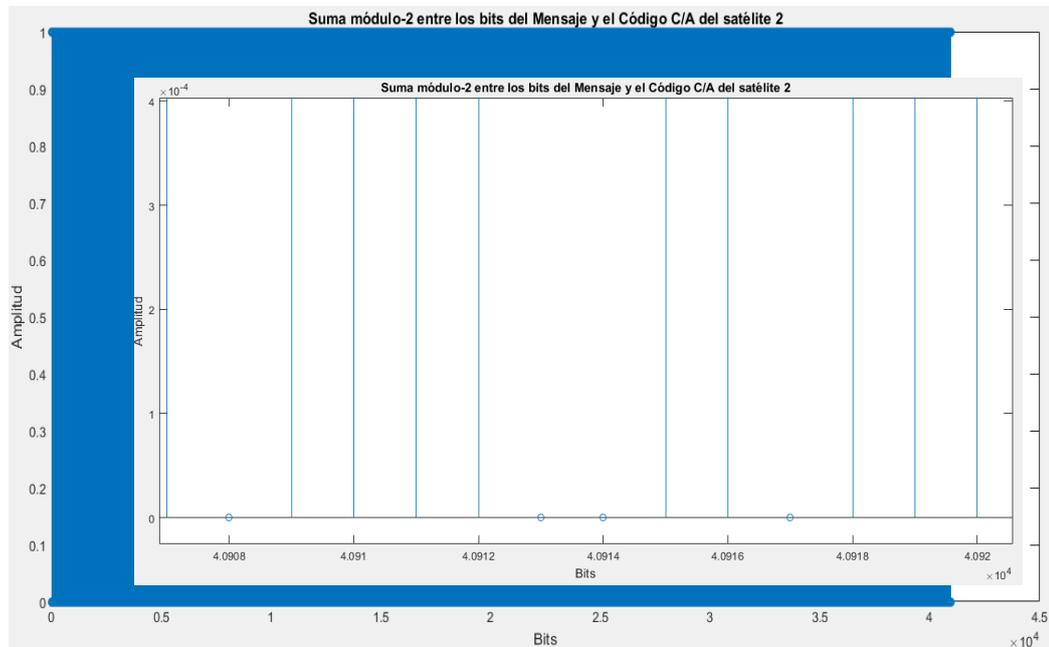
Para realizar la suma modulo-2 se debe ensanchar los bits de información que se van a transmitir de tal manera que se acondicionen al periodo del código C/A y poder realizar la operación bit a bit, por consecuencia se tiene un total de 20460 bits representando a cada bit del mensaje de navegación como se ve en la **Figura 7-2**.



**Figura 7-2.** Bits del mensaje de navegación acondicionado al código C/A

Realizado por: Iván Armijo (2017)

Al realizar esta operación (ver **Figura 8-2**) se logra el ensanchamiento de los datos y por ende se proyecta un ancho de banda mucho mayor al que originalmente se tenía de esta forma la densidad espectral de potencia luego del proceso de modulación está por debajo del nivel del ruido protegiéndolo de posibles interferencias.



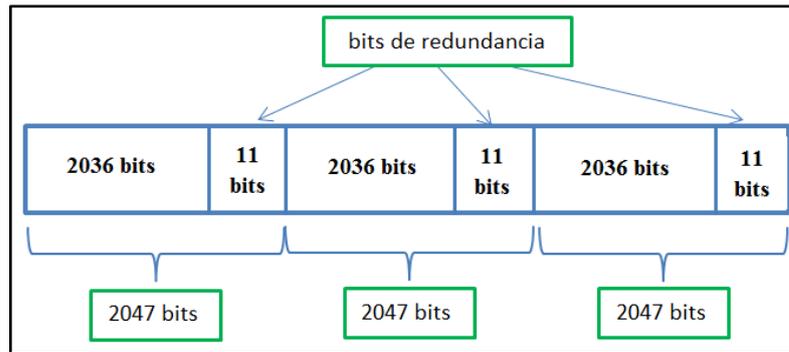
**Figura 8-2.** Suma modulo-2 entre los bits de navegación y el código C/A

Realizado por: Iván Armijo (2017)

## 2.6 Codificación de canal

### 2.6.1 Codificación Hamming (2047, 2036)

La codificación de canal eleva el rendimiento del sistema al añadir más resistencia de la señal frente a los diversos tipos de degradaciones como lo son el causado por el ruido atmosférico, la propagación multitrayectoria y el desvanecimiento de la señal. Una de las técnicas para la detección y corrección de errores es Hamming, en este proyecto se utilizó Hamming (2047, 2036) en el cual al ser lineal se toman bloques de 2036 y por cada uno de ellos se agregan 11 bits de redundancia o paridad como se observa en la **Figura 9-2** de esta forma se protegen los bits de información contra el deterioro.

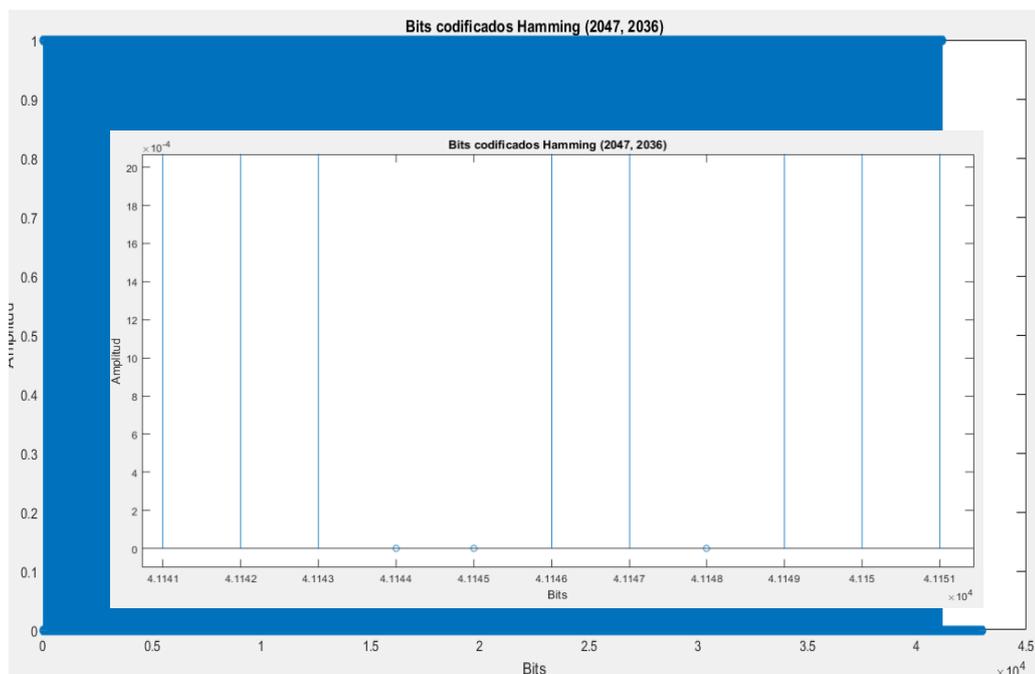


**Figura 9-2.** Estructura de los datos codificados en Hamming (2047, 2036)

Realizado por: Iván Armijo (2017)

Este tipo de codificación realiza la detección máxima de dos errores pero permite la corrección de solo un bit de información, en la **Figura 10-2** se presenta el proceso de codificación Hamming (2047,2036) para lo cual se toma los parámetros  $n=2047$ ,  $k= 2036$ , y una distancia de  $m=11$ , esto es aplicado a la señal resultante entre la operación XOR de los bits de navegación y el código C/A.

Un total de 40920 bits se disponen a ser codificados, por lo cual se agrupan en conjuntos de 2036 bits y por cada uno de estos se agregan 11 bits de paridad teniendo una cantidad total de 41151 bits, a partir de esta cifra los demás son bits de relleno.



**Figura 10-2.** Bits codificados en Hamming (2047, 2036)

Realizado por: Iván Armijo (2017)

## 2.6.2 Codificación Convolutiva (2, 1, 3)

La aplicación de este tipo de codificador permite la transformación de k bits de información en n bits codificados en el cual la tasa de codificación perteneciente a este código es k/n, utilizando una memoria de tamaño m, estas especificaciones se observan en la **tabla 1-2**.

**Tabla 1-2:** Parámetros del codificador Convolutiva (2, 1, 3)

Parámetro	Definición
K	1 bit
N	2 bits
R	1/2
M	3 bloques de memoria
C	4 ciclos/bit

Realizado por: Iván Armijo (2017)

Para emplear el codificador Convolutiva se utiliza el diagrama de estados representado por Trellis, esto se hace a través de la función poly2trellis debido a que permite la representación polinomial, para este caso fue empleado los polinomios generadores G1, G2 de la **Ecuación. 7-2** y la **Ecuación. 8-2** respectivamente.

$$G1 = 1 + X^3 + X^4 \quad \text{Ecuación. 7-2}$$

$$G2 = 1 + X + X^3 + X^4 \quad \text{Ecuación. 8-2}$$

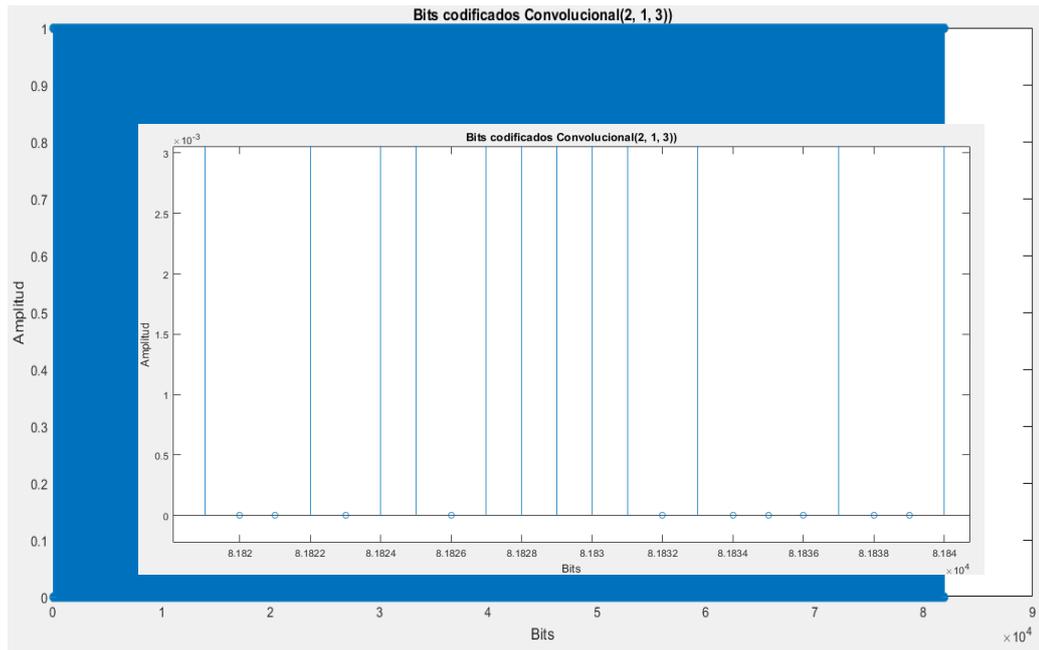
```
trellis =  
  
    numInputSymbols: 2  
    numOutputSymbols: 4  
    numStates: 4  
    nextStates: [4x2 double]  
    outputs: [4x2 double]
```

**Figura 11-2.** Propiedades del diagrama Trellis para una tasa de R=1/2

Realizado por: Iván Armijo (2017)

Al disponer de 40920 bits a codificar y una tasa de codificación R=1/2, se obtiene 81840 bits codificados a la salida (ver **Figura 12-2**), esto se debe a que por cada bit de entrada salen 2 bits codificados, en este tipo de codificador se permite la corrección de errores múltiples en los

datos de llegada y por ende se tiene la certeza de determinar los datos originales que fueron afectados con error.



**Figura 12-2.** Bits codificados en Convolutacional (2, 1, 3)

Realizado por: Iván Armijo (2017)

### 2.6.3 Codificación Convolutacional (3, 2, 3)

Para este tipo de codificador ingresan 2 bits al bloque de memoria y salen 3 bits codificados, con lo cual se tiene una tasa de rendimiento o codificación de  $2/3$ , las especificaciones se muestran en la **tabla 2-2** en este modelo se usaron los polinomios generadores de la **Ecuación. 9-2** y la **Ecuación. 10-2** para el diagrama de Trellis en donde sus propiedades se observan en la **Figura 13-2**.

$$G1 = 0 + 35X + 23X^2 \quad \text{Ecuación. 9-2}$$

$$G2 = 13 + 5X + 0X^2 \quad \text{Ecuación. 10-2}$$

**Tabla 2-2:** Parámetros del codificador Convolutacional (3, 2, 3)

Parámetro	Definición
K	2 bit
N	3 bits
R	$2/3$
K	4 ciclos/bit
C	3 bloques de memoria

Realizado por: Iván Armijo (2017)

```

trellis =

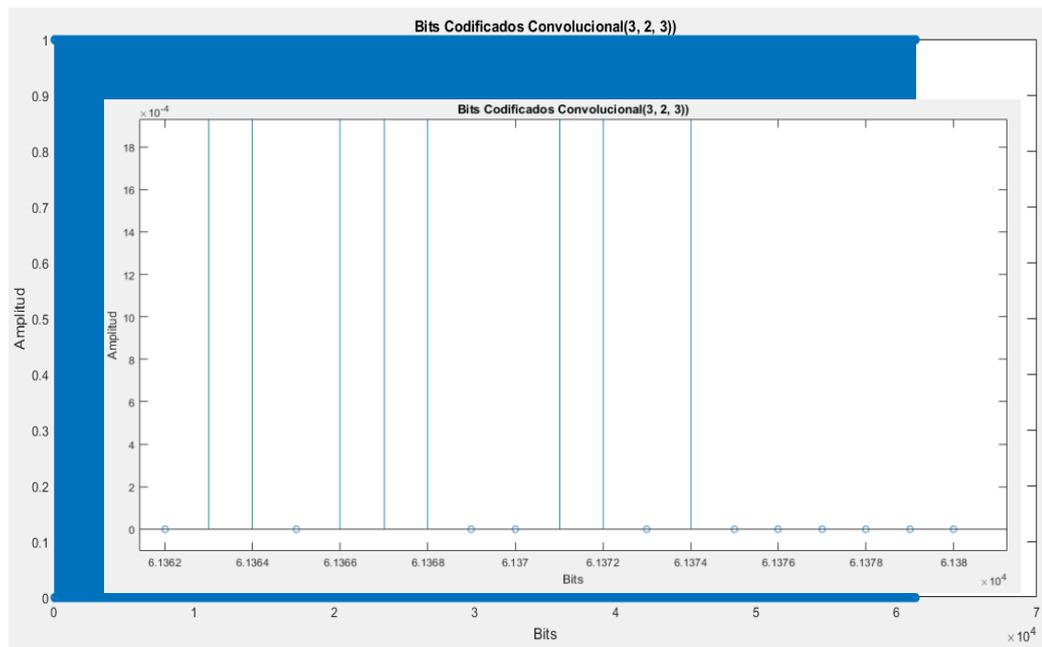
    numInputSymbols: 4
    numOutputSymbols: 8
    numStates: 128
    nextStates: [128x4 double]
    outputs: [128x4 double]

```

**Figura 13-2.** Propiedades del diagrama Trellis para una tasa de  $R=2/3$

**Realizado por:** Iván Armijo (2017)

Al realizar el proceso de codificación de los 40920 bits a una tasa de  $R= 2/3$ , se tiene a la salida 61380 bits codificados (ver **Figura 14-2**), esto resulta de que por cada 2 bits que ingresan a la salida se tiene 3 bits codificados.



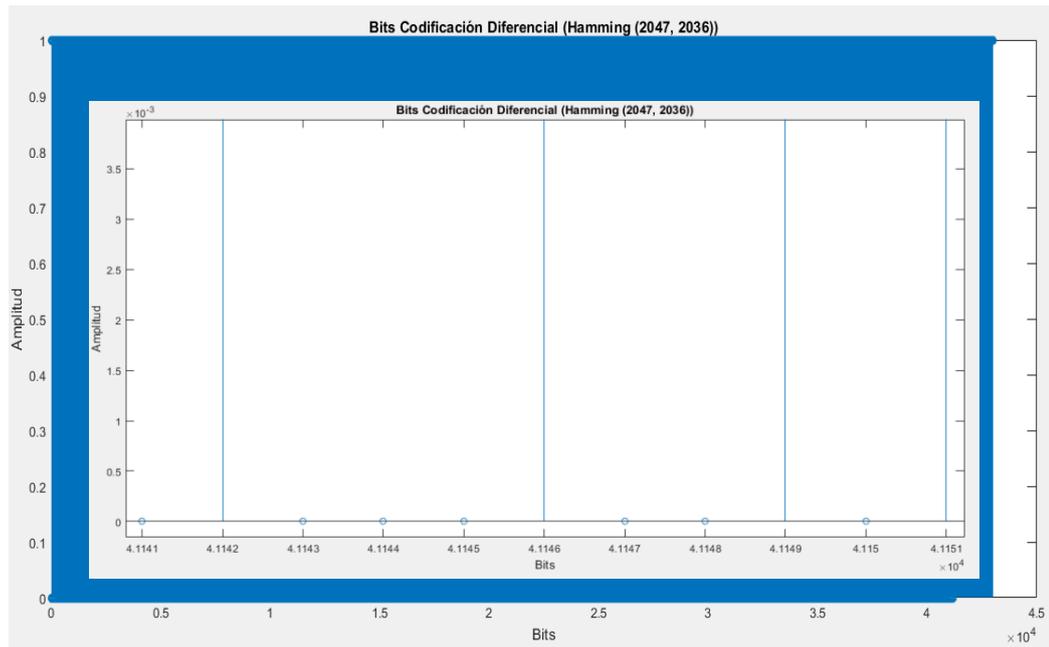
**Figura 14-2.** Bits codificados en Convolutacional (3, 2, 3)

**Realizado por:** Iván Armijo (2017)

#### 2.6.4 Codificación Diferencial

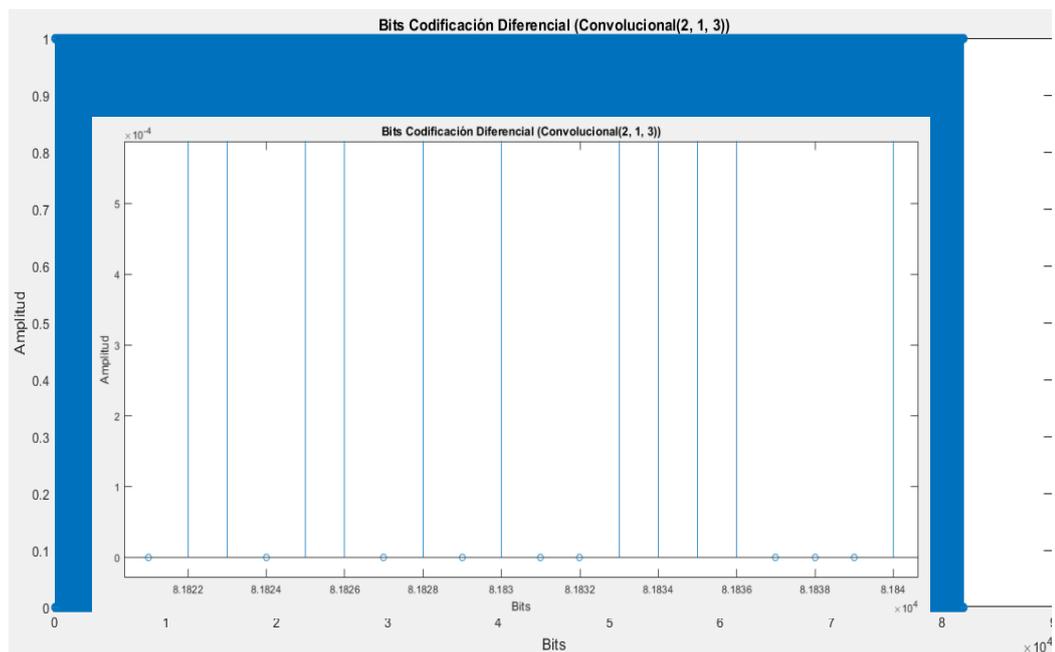
Al enviar la información a través de un canal de transmisión con desvanecimiento tipo Rayleigh o Rician la señal varía sin intención, como un método de solución se aplica el codificador diferencial lo cual no afecta en la detección de los datos. El codificador diferencial básicamente consiste en realizar la comparación con el uso del operador XOR el bit de entrada actual con el

bit anterior para generar la señal como se observan en la **Figura 15-2, Figura 16-2, Figura 17-2.**



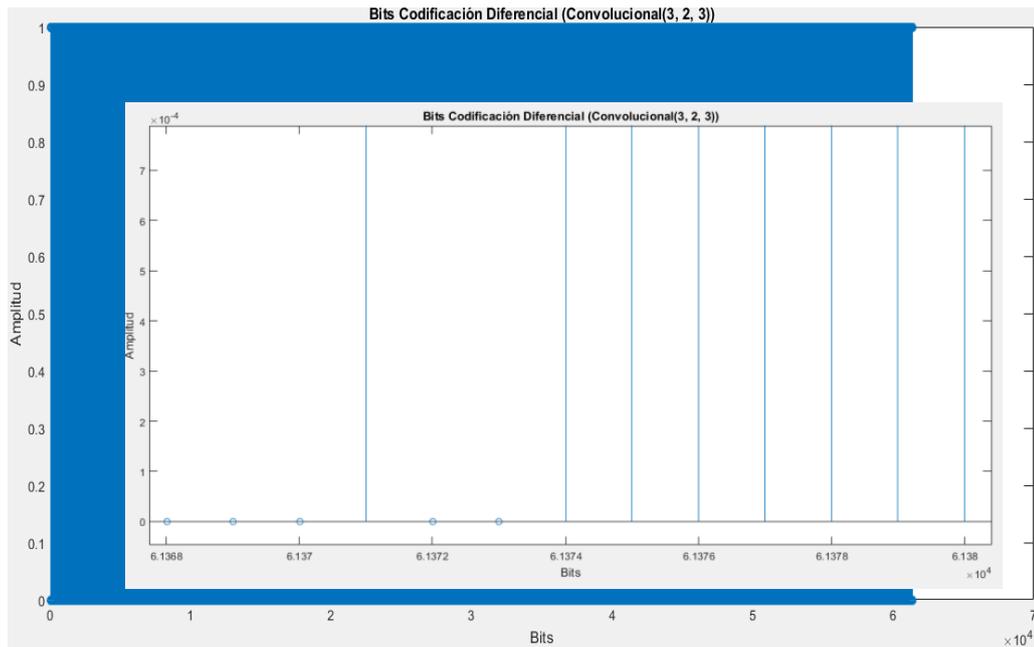
**Figura 15-2.** Codificación diferencial aplicada al sistema con Hamming (2047, 2036)

Realizado por: Iván Armijo (2017)



**Figura 16-2.** Codificación diferencial aplicada al sistema con Convencional (2, 1, 3)

Realizado por: Iván Armijo (2017)



**Figura 17-2.** Codificación diferencial aplicada al sistema con Convolutacional (3, 2, 3)

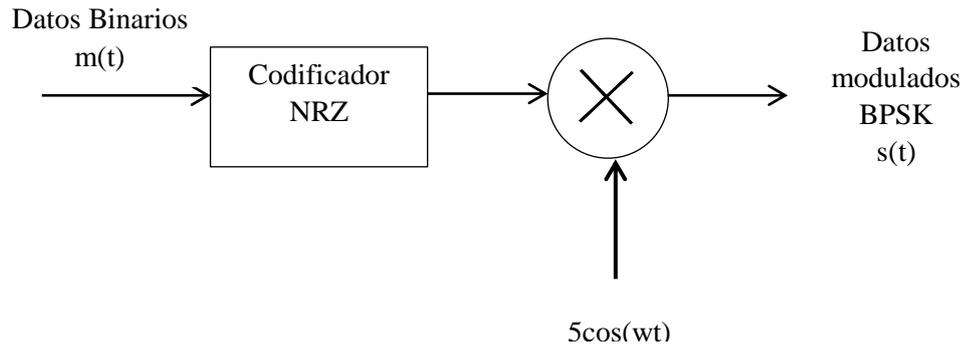
Realizado por: Iván Armijo (2017)

## 2.7 Modulación BPSK

Para realizar el proceso de modulación BPSK se procede a desarrollar el script en base al diagrama de bloque de la **Figura 18-2** en donde los bits provenientes de la codificación diferencial se transforman en niveles de -1 y +1 mediante el uso de un codificador NRZ como se muestra en la **Figura 19-2**, **Figura 20-2** y **Figura 21-2** para su posterior producto con la señal portadora.

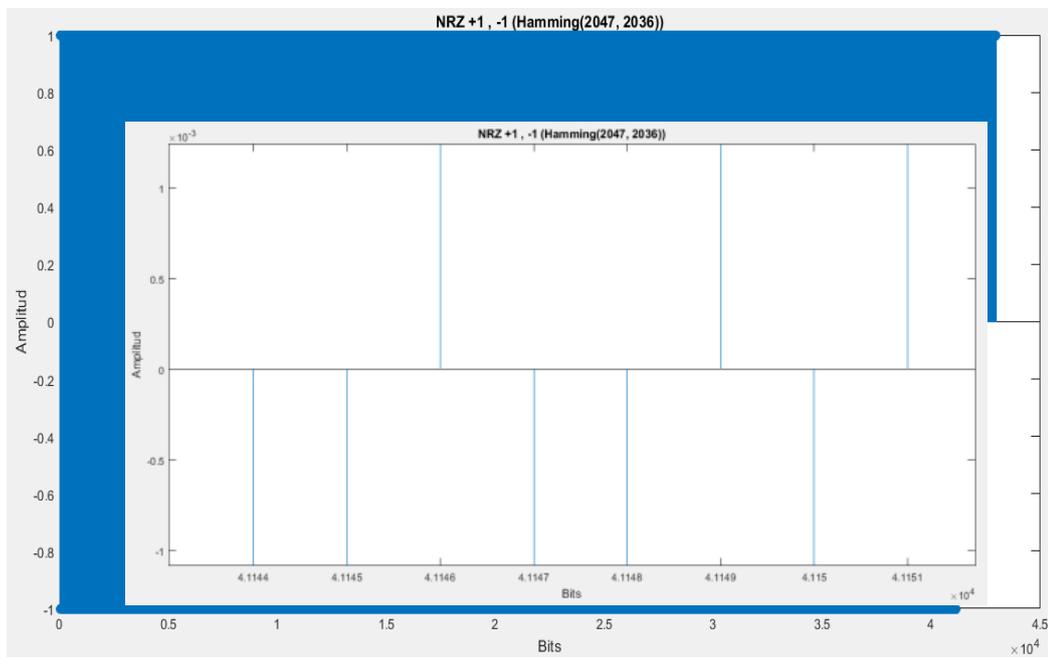
La señal GPS L1 utiliza como base la modulación BPSK para transmitir la información sobre la señal portadora, la cual varía 180 grados en su fase cuando se detecta un 0 o una variación de 0 grados para un bit igual a 1.

Al utilizar la modulación BPSK en este tipo de sistema (ver **Figura 22-2**) la señal RF se extiende debido al código de banda ancha utilizado proveniente de los diferentes tipos de codificación empleados, con lo cual resulta en una extensión simétrica de la señal alrededor de la señal portadora L1.



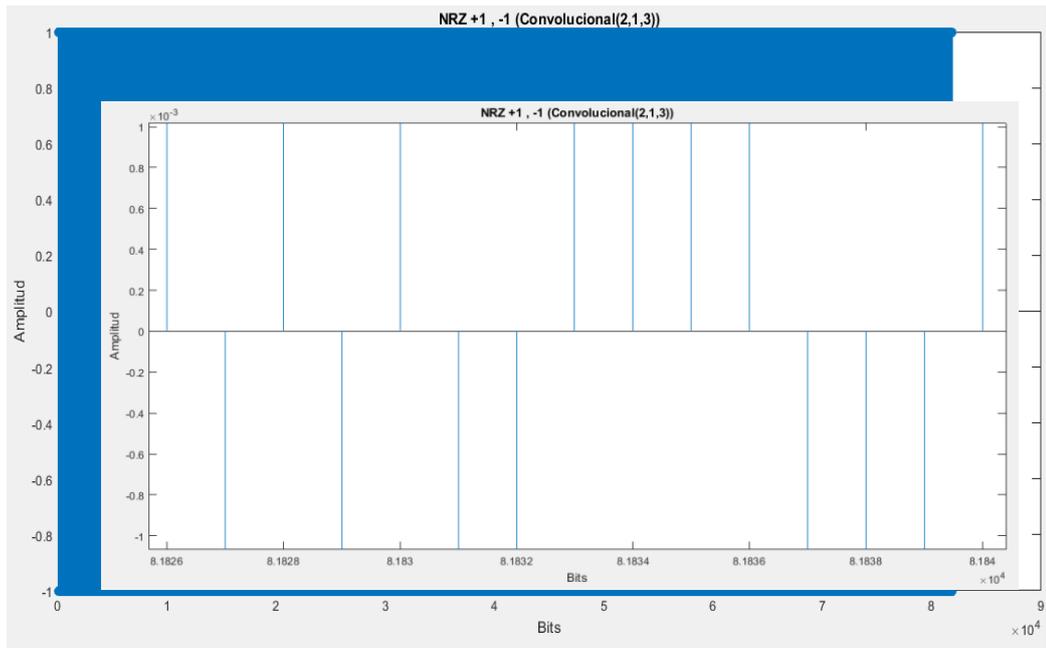
**Figura 18-2.** Modulación BPSK con el uso de un codificador NRZ

Realizado por: Iván Armijo (2017)



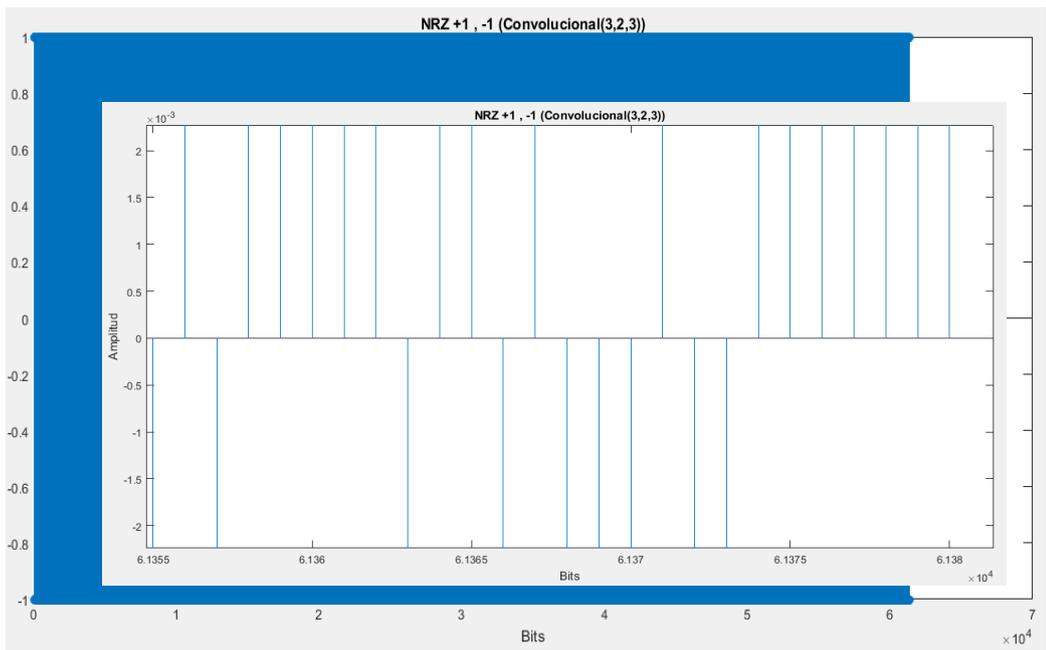
**Figura 19-2.** Codificación NRZ para los bits del sistema con Hamming (2047, 2036)

Realizado por: Iván Armijo (2017)



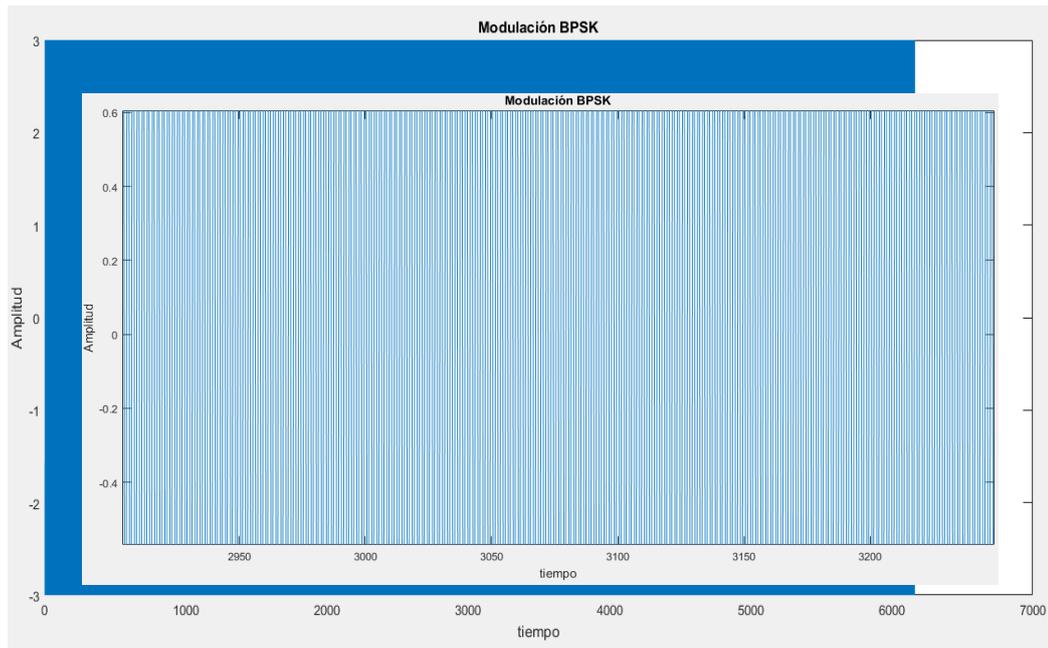
**Figura 20-2.** Codificación NRZ de los bits del sistema con Convolutcional (2, 1, 3)

Realizado por: Iván Armijo (2017)



**Figura 21-2.** Codificación NRZ de los bits del sistema con Convolutcional (3, 2, 3)

Realizado por: Iván Armijo (2017)



**Figura 22-2.** Modulación BPSK en sistema GPS L1

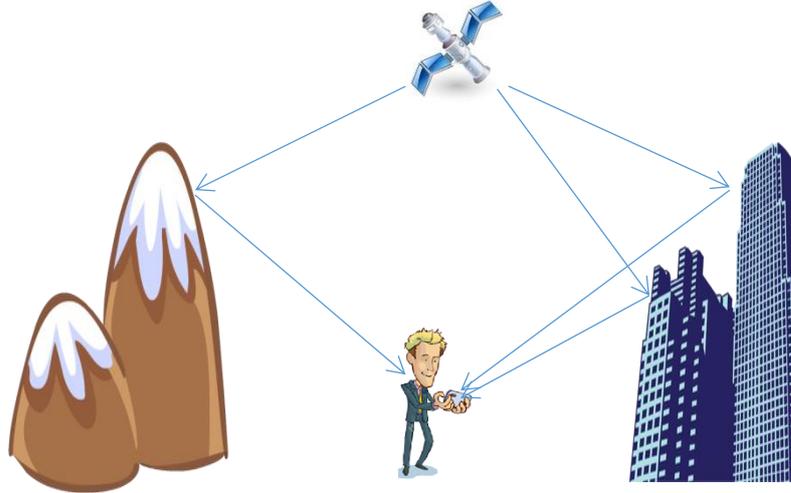
Realizado por: Iván Armijo (2017)

## 2.8 Canales con desvanecimiento y Ruido

### 2.8.1 Canal con desvanecimiento tipo Rayleigh

La señal GPS L1 para llegar al receptor debe recorrer una distancia aproximadamente de 20200 km durante este trayecto la señal atraviesa tres regiones el vacío, la ionosfera y la troposfera, en ciertos momentos la señal llega al receptor mediante la reflexión contra algún tipo de objeto como se observa en la **Figura 23-2**, en esta circunstancia el enlace se establece mediante la sumatoria de las contribuciones multitrayecto este comportamiento es representado mediante el desvanecimiento tipo Rayleigh.

Este tipo de desvanecimiento describe la variación estadística de la envolvente proveniente del resultado de la propagación multicamino, la cual experimenta desvanecimientos rápidos, cuando los distintos rayos poseen amplitudes similares y fases variantes.



**Figura 23-2.** Desvanecimiento tipo Rayleigh por la propagación multicamino

Realizado por: Iván Armijo (2017)

Para este caso la formación del canal Rayleigh se lo realiza con un solo rayo debido a la capacidad de procesamiento del equipo que se usa para el análisis, este canal además está constituido por el tiempo de muestreo de la señal que va a ingresar y la frecuencia Doppler la cual se origina al tomar como factor la velocidad del receptor GPS a diferentes velocidades como se muestra en la **tabla 3-2** cuyo valores se obtienen de la **Ecuación. 11-2** y en donde las propiedades de este canal se muestran en la **Figura 24-2**.

$$F_d = F_c \times \frac{V_{rx}}{C} \quad \text{Ecuación. 11-2}$$

En donde:

$F_c$  = Frecuencia central del sistema GPS L1

$V_{rx}$  = Velocidad del receptor en m/s

$C$  = Velocidad de la luz

**Tabla 3-2:** Frecuencias Doppler atribuidas a diferentes velocidades

Velocidad del receptor GPS	Frecuencia Doppler
0 m/s	0 Hz
10 m/s	52.51 Hz
20 m/s	105.03 Hz
30 m/s	157.54 Hz
40 m/s	210.06 Hz
50 m/s	262.57 Hz
60 m/s	315.08 Hz
70 m/s	367.60 Hz
80 m/s	420.11 Hz
90 m/s	472.63 Hz
100 m/s	525.14 Hz

Realizado por: Iván Armijo (2017)

```
PathDelays: 0
AvgPathGaindB: 0
NormalizePathGains: 1
StoreHistory: 0
StorePathGains: 0
PathGains: -0.7537 - 0.8258i
ChannelFilterDelay: 0
ResetBeforeFiltering: 1
NumSamplesProcessed: 1
ChannelType: 'Rayleigh'
InputSamplePeriod: 3.1738e-10
DopplerSpectrum: [1x1 doppler.jakes]
MaxDopplerShift: 5.2514
PathDelays: 0
AvgPathGaindB: 0
NormalizePathGains: 1
StoreHistory: 0
StorePathGains: 0
```

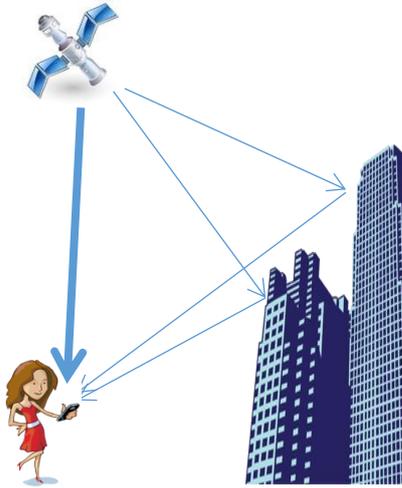
**Figura 24-2.** Propiedades del canal Rayleigh

Realizado por: Iván Armijo (2017)

### 2.8.2 Canal con desvanecimiento tipo Rician

En ciertas circunstancias la señal GPS L1 transmitida por el satélite viaja hacia el receptor mediante una línea de vista directa por lo que su alta potencia se encuentra por encima del nivel de las otras señales multicamino que son recibidas como se observa en la **Figura 25-2**, para este

tipo de situación se describe el modelo de desvanecimiento tipo Rician en este se considera el tiempo de muestreo de la señal de entrada, la frecuencia Doppler originada por el receptor al tener una velocidad variante como se muestra en la **tabla 3-2** además de tomar en cuenta la componente de la línea de vista K en el primer camino únicamente, sus propiedades se visualizan en la **Figura 26-2**.



**Figura 25-2.** Desvanecimiento tipo Rician por línea de vista directa

Realizado por: Iván Armijo (2017)

```

ChannelType: 'Rician'
InputSamplePeriod: 3.1738e-10
DopplerSpectrum: [1x1 doppler.jakes]
MaxDopplerShift: 5.2514
PathDelays: 0
AvgPathGaindB: 0
KFactor: 1
DirectPathDopplerShift: 0
DirectPathInitPhase: 0
DirectPathDopplerShift: 0
DirectPathInitPhase: 0
NormalizePathGains: 1
StoreHistory: 0
StorePathGains: 0
PathGains: 0.6657 - 0.7152i
ChannelFilterDelay: 0
ResetBeforeFiltering: 1
NumSamplesProcessed: 0

```

**Figura 26-2.** Propiedades del canal Rician

Realizado por: Iván Armijo (2017)

### 2.8.3 Ruido

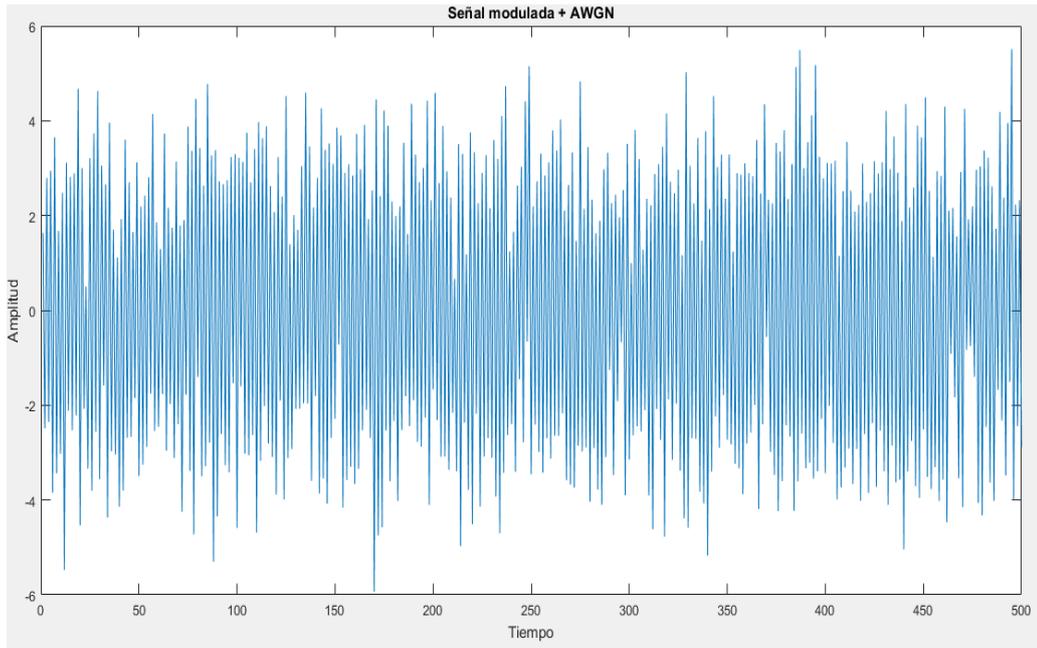
A la par que se transmite la señal GPS el canal es corrompido por una diversidad de componentes conocido comúnmente como ruido, el canal usado por el sistema GPS para transmitir su señal es propenso a ruidos específicos como lo son el generado por la tropósfera, la ionósfera, el multitrayecto entre otros.

Para esta investigación se emplea un canal AWGN para simular las pérdidas producidas por los diferentes factores que afectan el rendimiento del sistema GPS (ver **Figura 27-2**), en este escenario se manejan los siguientes radios SNR de la **tabla 4-2** de esta forma se evalúa el rendimiento del canal de transmisión con el uso de la técnica de espectro ensanchado y con la implementación de algoritmos de codificación de canal.

**Tabla 4-2:** SNR para evaluar el canal de transmisión

SNR(dB)	SNR(lineal)
0 dB	1
2 dB	1.59
4 dB	2.51
6 dB	3.98
8 dB	6.31
10 dB	10
12 dB	15.85
14 dB	25.12
16 dB	39.81
18 dB	63.10
20 dB	100
22 dB	158.49
24 dB	251.19
26 dB	398.11
28 dB	630.96
30 dB	1000
32 dB	1584.90
34 dB	2511.90
36 dB	3981.10
38 dB	6309.60
40 dB	10000

Realizado por: Iván Armijo (2017)

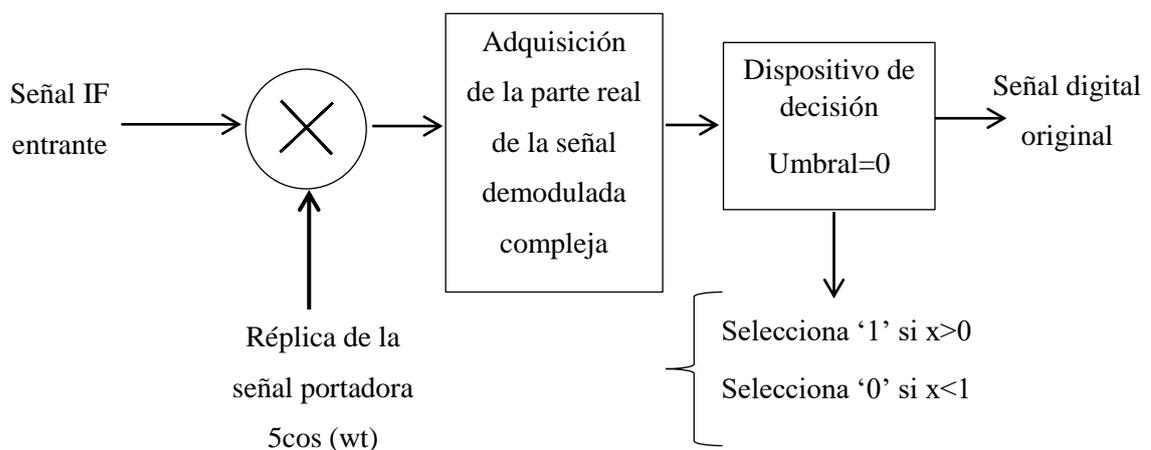


**Figura 27-2.** Señal modulada con AWGN

Realizado por: Iván Armijo (2017)

## 2.9 Demodulación BPSK

Para el proceso de demodulación se emplea el método coherente en donde la señal recibida se multiplica por una réplica de la onda portadora sincronizada en frecuencia y en fase (ver **Figura 28-2**), esta operación se la realiza por cada bit que fue modulado.



**Figura 28-2.** Diagrama de bloques del proceso de demodulación BPSK

Realizado por: Iván Armijo (2017)

Desde una perspectiva matemática, la señal que ingresa al receptor viene dada por  $5\cos(w_c t)$  que al multiplicarla por la señal replica local se tiene como resultado la **Ecuación. 12-2** en la cual se aplica las propiedades de identidades trigonométricas para obtener finalmente la **Ecuación. 13-2**.

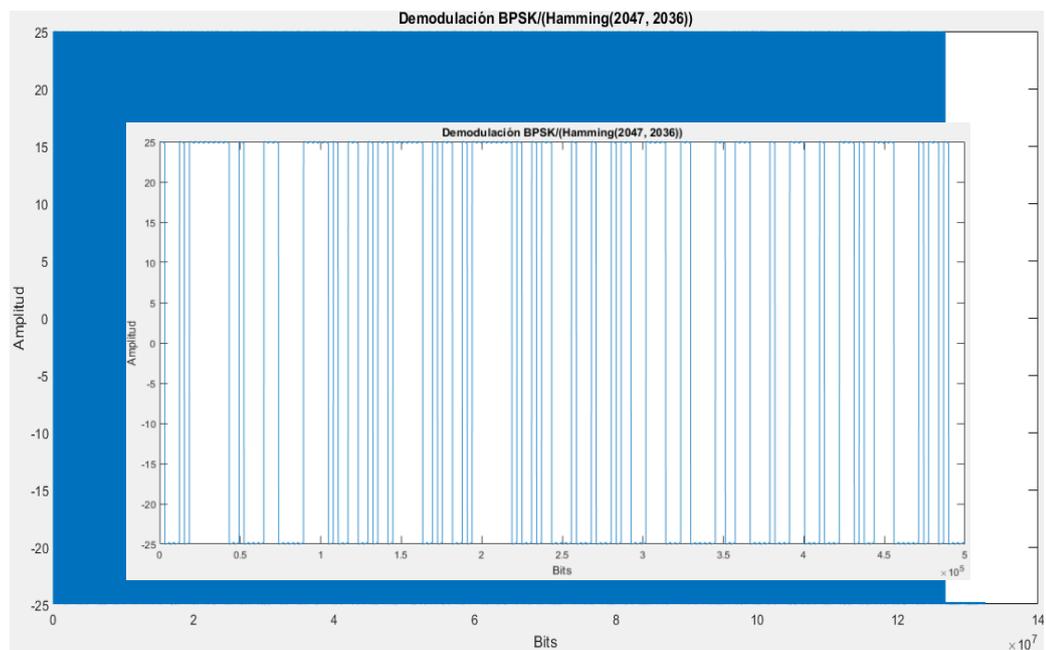
$$SigRx = 5 \cos(w_c t) \times 5 \cos(w_c t) = 25 \cos^2 w_c t \quad \text{Ecuación. 12-2}$$

$$25 \cos^2 w_c t = \frac{25}{2} (1 + \cos 2w_c t) = \frac{25}{2} + \frac{25}{2} \cos 2w_c t \quad \text{Ecuación. 13-2}$$

Se observa que la onda resultante se encuentra compuesta por el voltaje positivo y una onda coseno que tiene el doble de frecuencia que la señal portadora, esta señal se la pasa a través de un filtro pasa bajo de tal forma que se obtenga la parte real y con esto se logra eliminar la segunda armónica de la portadora dando como resultado la **Ecuación. 14-2** el cual al ser mayor al umbral establecido corresponde a un 1 lógico y en caso contrario un 0 lógico.

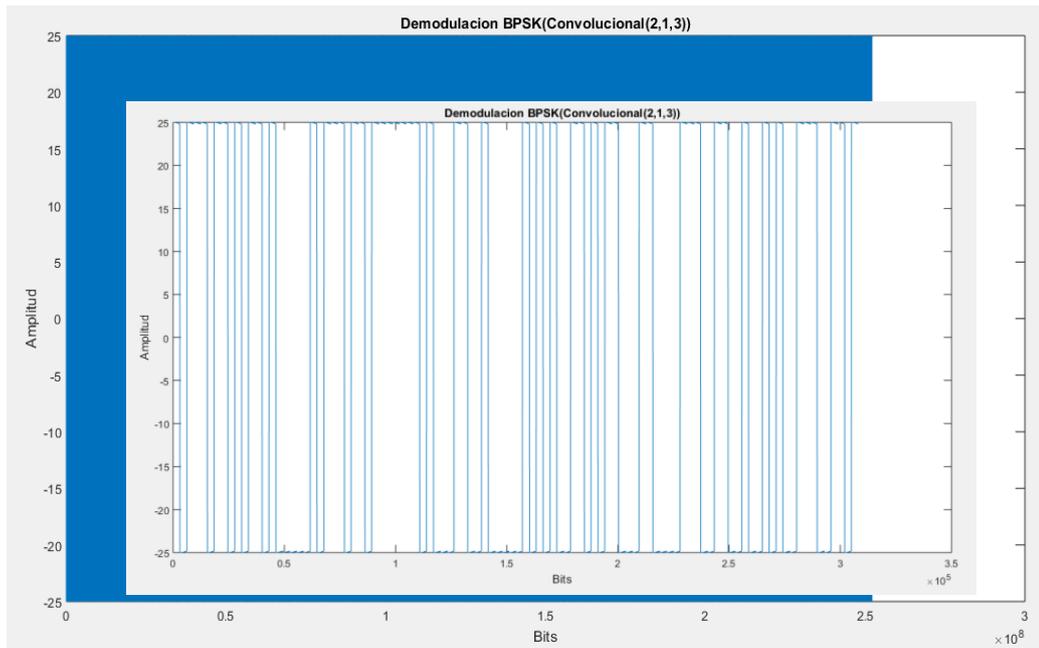
$$Rx = +\frac{25}{2} V = 1 \text{ lógico} \quad \text{Ecuación. 14-2}$$

Al realizar la multiplicación por una onda similar a la portadora se produce una parte imaginaria compleja la cual no es deseada esta se elimina al obtener la parte real del producto, en donde se encuentra el mensaje de navegación y el código C/A respectivo de cada satélite que fue enviado (ver **Figura 29-2**, **Figura 30-2**, **Figura 31-2**).



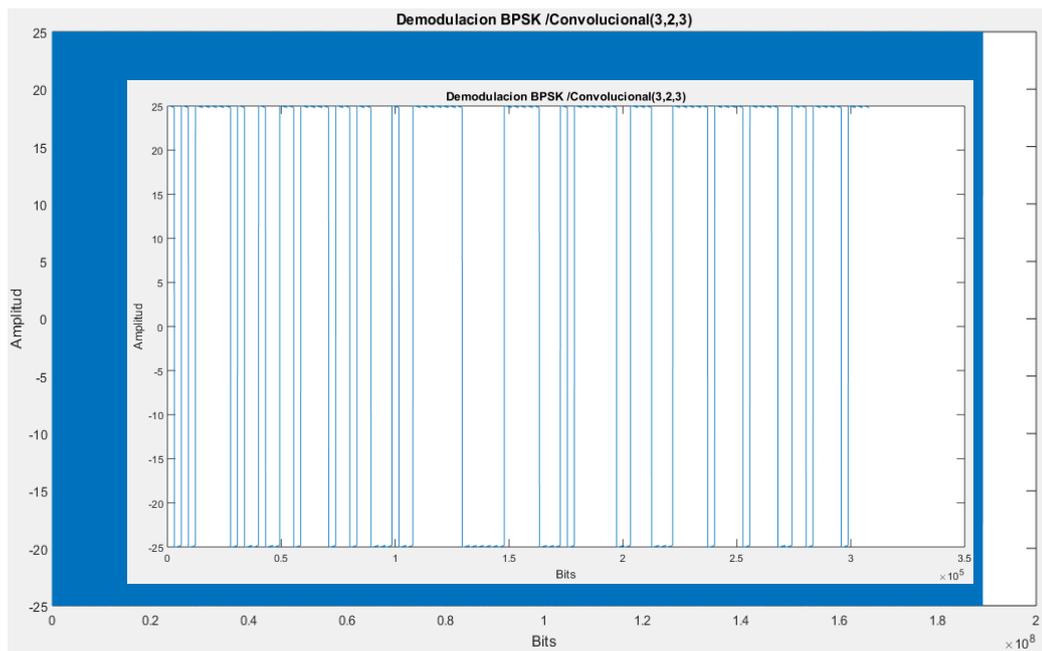
**Figura 29-2.** Señal demodulada en el sistema con Hamming (2047, 2036)

Realizado por: Iván Armijo (2017)



**Figura 30-2.** Señal demodulada en el sistema con Convolicional (2, 1, 3)

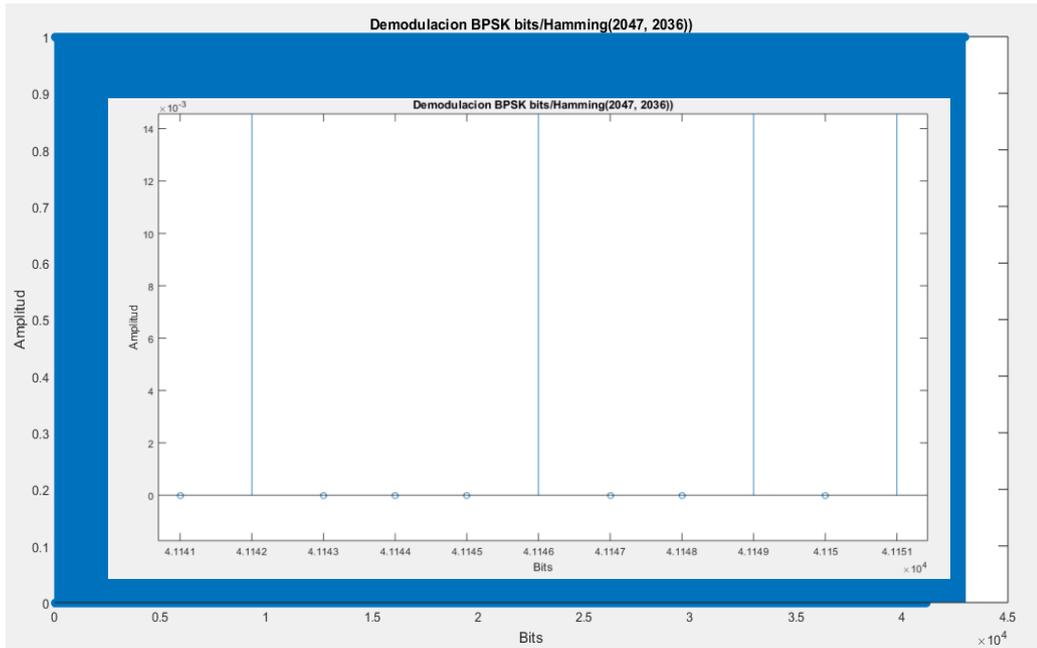
Realizado por: Iván Armijo (2017)



**Figura 31-2.** Señal demodulada en el sistema con Convolicional (3, 2, 3)

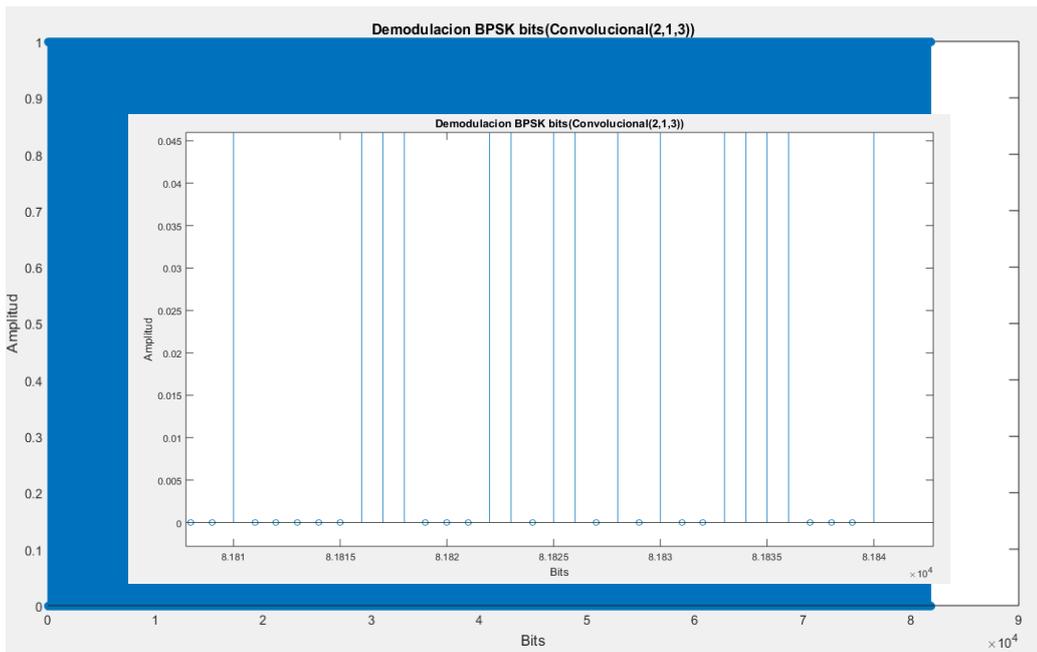
Realizado por: Iván Armijo (2017)

Para recuperar los bits originales se emplea un umbral de recepción en donde si es mayor que cero corresponde a un “1” y si es menor que cero es un “0” de tal manera que se obtienen los bits originales (ver **Figura 32-2**, **Figura 33-2**, **Figura 34-2**).



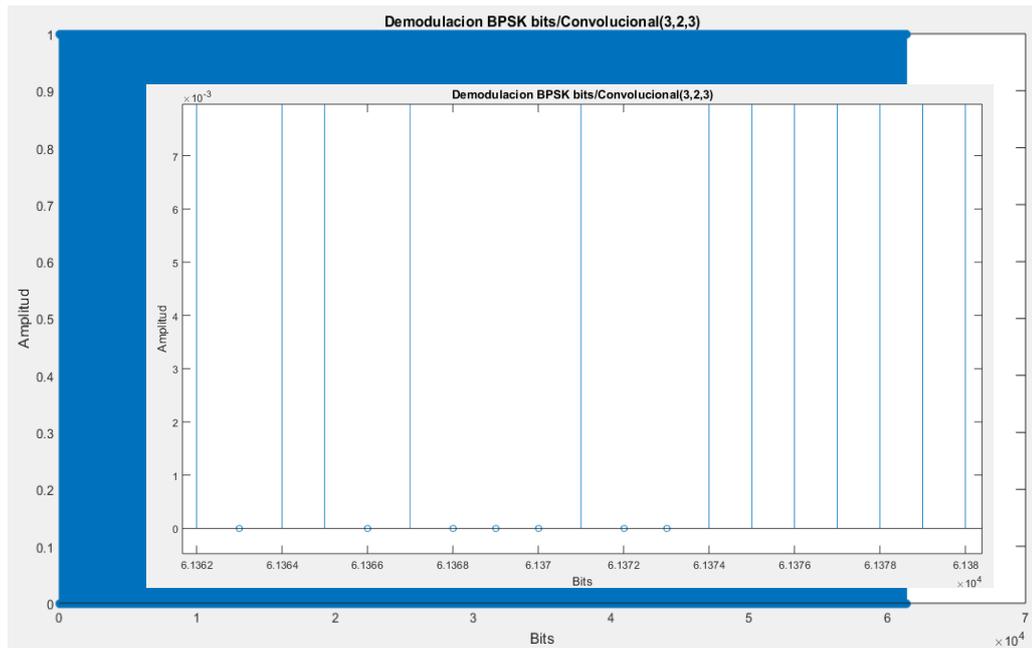
**Figura 32-2.** Recuperación de bits aplicado al sistema con Hamming (2047, 2036)

Realizado por: Iván Armijo (2017)



**Figura 33-2.** Recuperación de bits aplicado al sistema con Convocional (2, 1, 3)

Realizado por: Iván Armijo (2017)



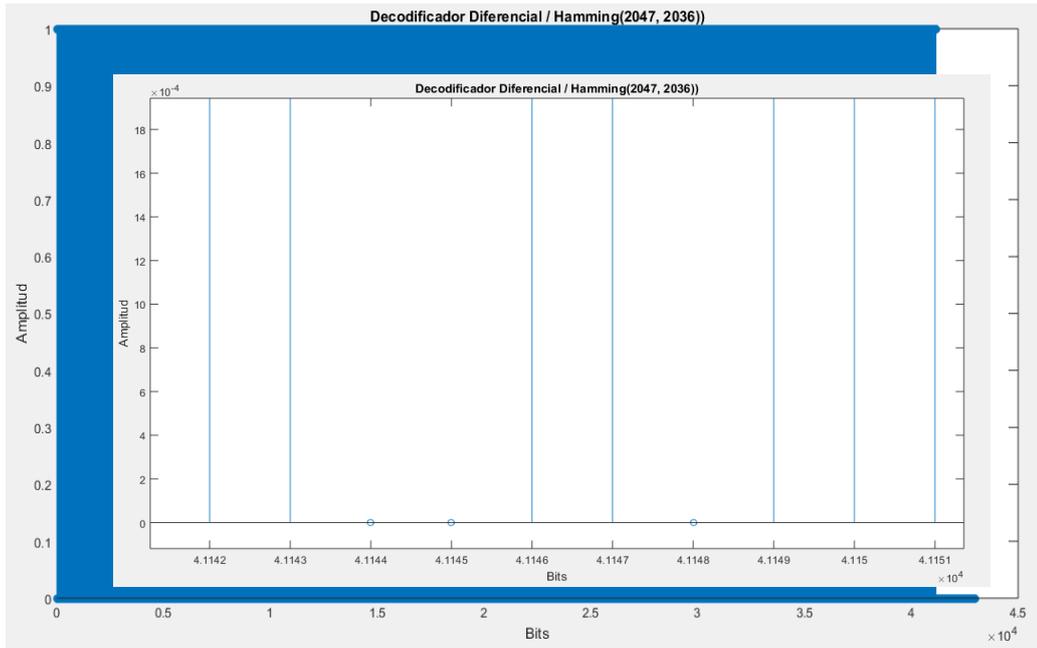
**Figura 34-2.** Recuperación de bits aplicado al sistema con Convolutional (2, 1, 3)

Realizado por: Iván Armijo (2017)

## 2.10 Decodificación lineal

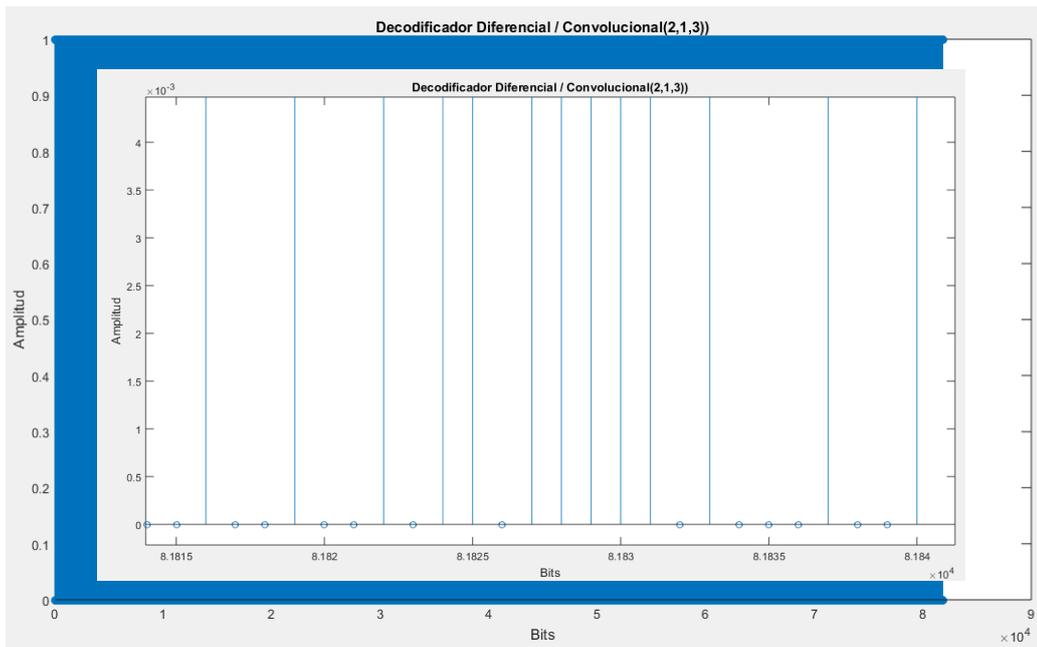
### 2.10.1 Decodificación Diferencial

Para recuperar la señal binaria correctamente se procede a decodificar de forma diferencial la señal previamente codificada por el transmisor este proceso se lo realiza debido a los cambios involuntarios producidos en un canal de transmisión, esta técnica consiste en comparar con el uso del operador XOR los bits adyacentes de tal forma que se determina cuando corresponde a un bit '1' y caso contrario a un '0' binario (ver **Figura 35-2, Figura 36-2, Figura 37-2**).



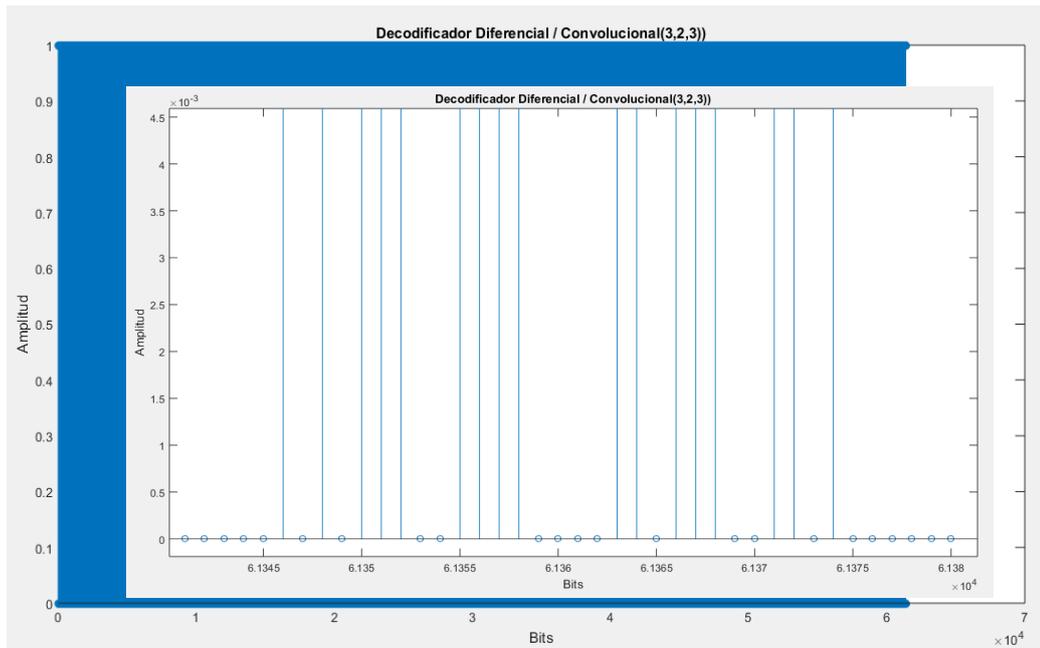
**Figura 35-2.** Decodificación diferencial en el sistema con Hamming (2047, 2036)

Realizado por: Iván Armijo (2017)



**Figura 36-2.** Decodificación diferencial en el sistema con Convolutacional (2, 1, 3)

Realizado por: Iván Armijo (2017)

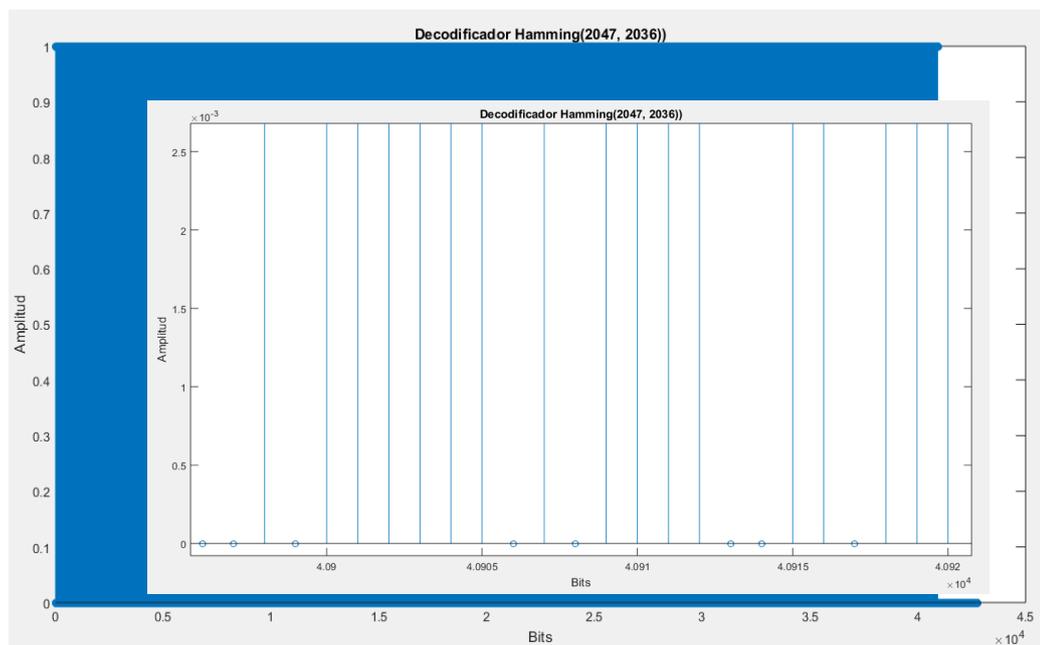


**Figura 37-2.** Decodificación diferencial en el sistema con Convolutacional (3, 2, 3)

Realizado por: Iván Armijo (2017)

### 2.10.2 Decodificación Hamming (2047, 2036)

Los bits recuperados correctamente tras el proceso de decodificación diferencial son sometidos a un decodificador Hamming de tal manera que se corrigen errores con lo que se consigue un mejor rendimiento del sistema (ver **Figura 38-2**).

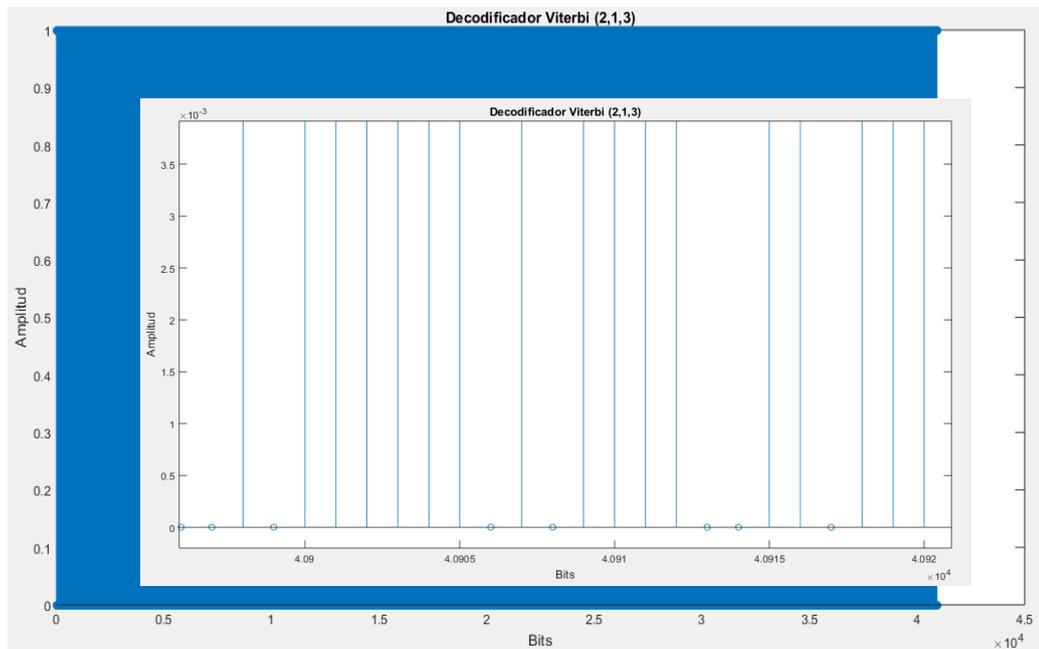


**Figura 38-2.** Decodificación Hamming (2047, 2036)

Realizado por: Iván Armijo (2017)

### 2.10.3 Decodificación Viterbi (2, 1, 3)

El proceso de la decodificación de Viterbi con  $R=1/2$  se basa en la propiedad de recursividad del diagrama de Trellis usado previamente en el codificador convolucional, de tal forma que se determina la ruta óptima y por ende las correcciones posibles de los bits erróneos (ver **Figura 39-2**).

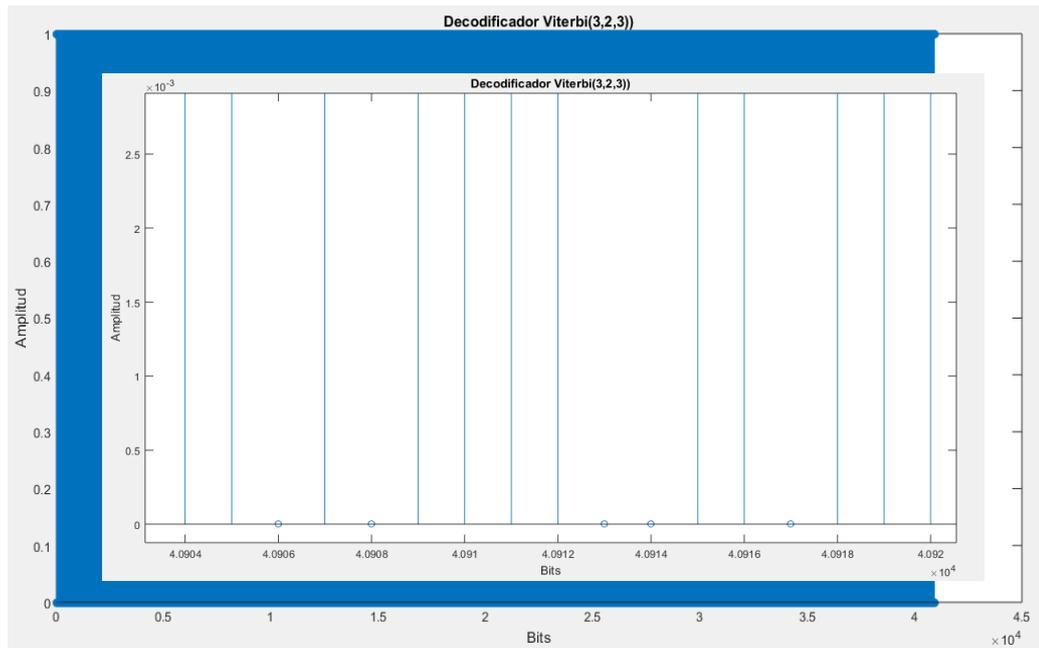


**Figura 39-2.** Decodificación Viterbi (2, 1, 3)

Realizado por: Iván Armijo (2017)

### 2.10.4 Decodificación Viterbi (3, 2, 3)

Para la realización del proceso de decodificación mediante el algoritmo de Viterbi a una tasa de  $2/3$  se toma en cuenta el diagrama de estados de Trellis generado por los polinomios, con esto se obtienen los bits originales y en caso de existir errores se procede a su respectiva corrección (ver **Figura 40-2**).

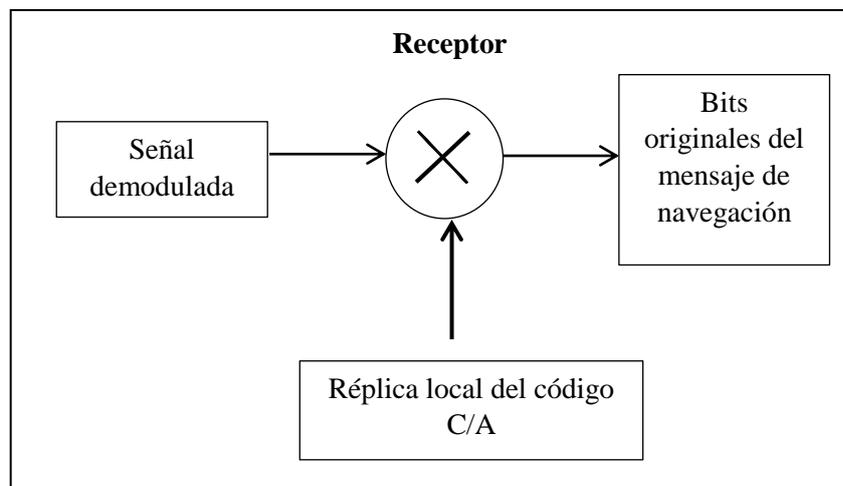


**Figura 40-2.** Decodificación Viterbi (3, 2, 3)

Realizado por: Iván Armijo (2017)

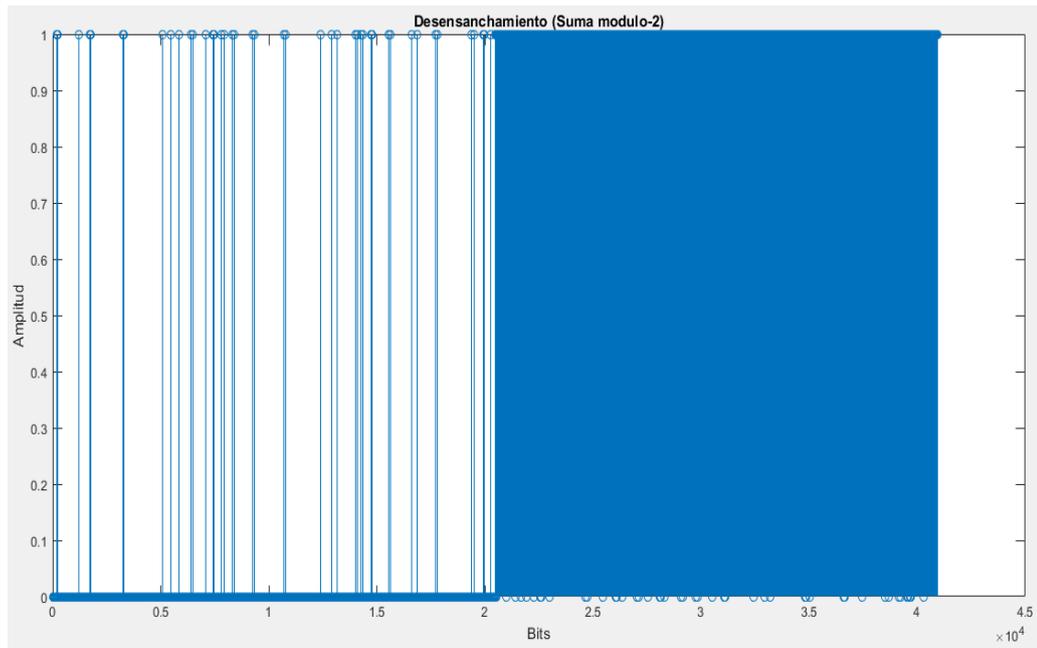
## 2.11 Suma módulo-2 (Desensanchamiento)

Al utilizar la técnica de espectro ensanchado por secuencia directa los bit de información se mezclan previamente con los códigos C/A los cuales funcionan a una mayor frecuencia, para recuperar los bits que conforman el mensaje de navegación original se procede a realizar la suma módulo-2 de la señal demodulada con una réplica local del código C/A generada por el receptor (ver **Figura 41-2**) de tal forma que solo se puede recuperar correctamente los bits de navegación si el código C/A es el mismo que se usó para realizar la transmisión desde el satélite esto se aprecia en la **Figura 42-2**.



**Figura 41-2.** Diagrama de bloques del desensanchamiento de los bits de información

Realizado por: Iván Armijo (2017)

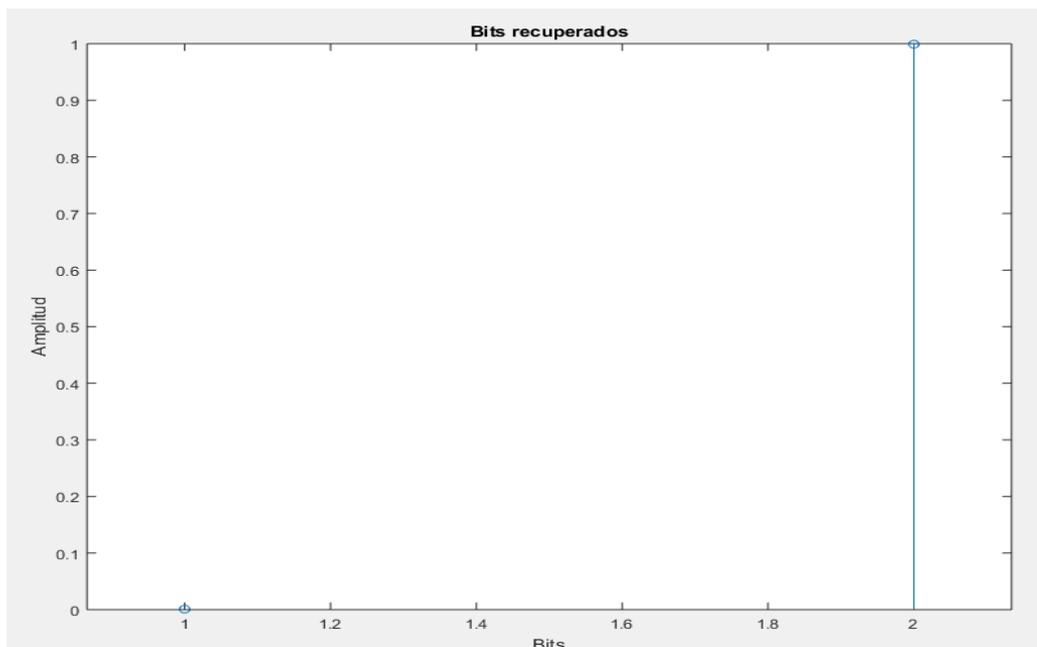


**Figura 42-2.** Desensanchamiento de los bits de información con los códigos C/A

Realizado por: Iván Armijo (2017)

## 2.12 Mensaje de navegación recuperado

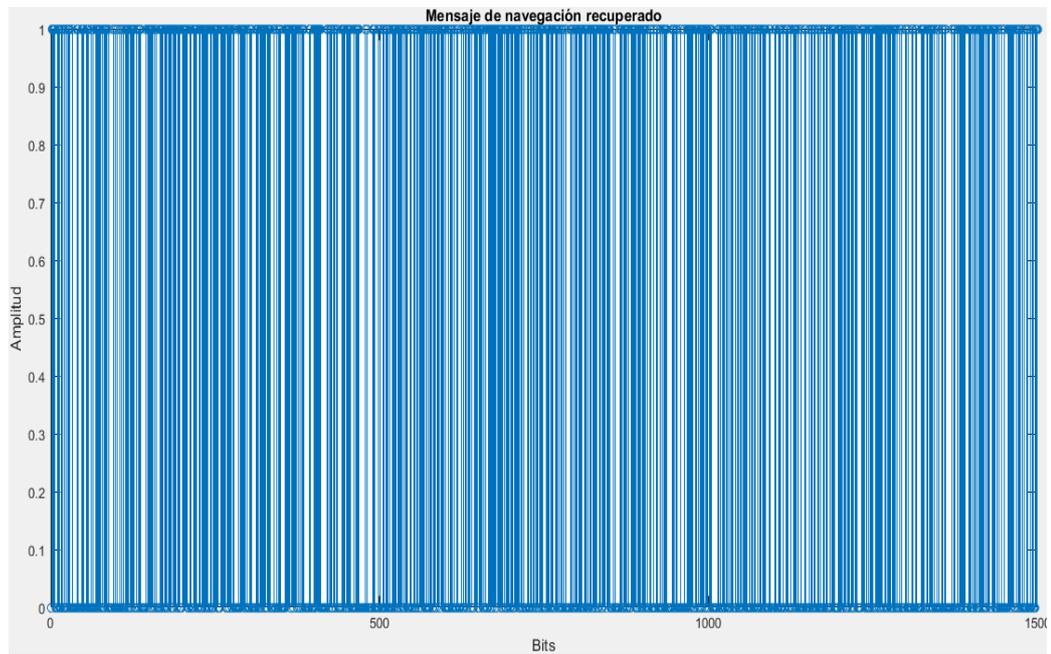
Finalmente se procede a recuperar los bits que se enviaron originalmente tomando en cuenta que los 20460 bits iniciales corresponden al primer bit y desde este límite hasta los 40920 bits corresponden al segundo bit, que al realizar el proceso respectivo se convierten únicamente en los dos bits originales enviados desde el satélite GPS respectivo.



**Figura 43-2.** Bits originales recuperados

Realizado por: Iván Armijo (2017)

El proceso se realizó hasta completar el mensaje es decir se envió y recibió 750 veces para completar los 1500 bits correspondientes al mensaje de navegación como se observa en la **Figura 44-2**.



**Figura 44-2.** Mensaje de navegación completo recuperado

Realizado por: Iván Armijo (2017)

## CAPITULO III

### 3. Simulación y evaluación de transmisión de la señal GPS L1

La señal de GPS L1 se simuló en el software Matlab bajo los parámetros de funcionamiento descritos en el capítulo 1, se realizó el proceso de generación de la señal, su respectiva codificación y transmisión en los diferentes canales esto se describe en el escenario de las siguientes características:

#### Escenario:

##### 1. Sistema de navegación (GPS)

- a. **Satélites:** 24 satélites GPS
- b. **Frecuencia L1:** 1575.42 MHz
- c. **Mensaje navegación:** 50 Hz.
- d. **C/A:** 1.023 MHz

##### 2. Espectro ensanchado por secuencia directa

- a. **PRN:** 1023 chips por cada satélite a una frecuencia de 1.023 MHz.
- b. **Bits de información:** 1500 bits a 50 Hz.

##### 3. Canales de transmisión

- a. **Rayleigh:** Se evalúa tomando en cuenta el movimiento del receptor simulándose el efecto doppler para un solo rayo con este tipo de desvanecimiento.
- b. **Rician:** Se evalúa con el receptor en movimiento dándose lugar el efecto doppler para un solo rayo con el desvanecimiento propio de este canal.
- c. **Velocidades del receptor:** 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 m/s
- d. **AWGN:** Se genera varios niveles de SNR para la evaluación del rendimiento del canal.
- e. **SNR:** 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40 dB

##### 4. Codificaciones de canal(ver tabla 1-2 , tabla 2-2)

- a. Hamming:
  - $n= 2047$
  - $k= 2036$

b. Convolutacional 1/2

- $n= 2$
- $k= 1$
- $m= 3$

c. Convolutacional 2/3

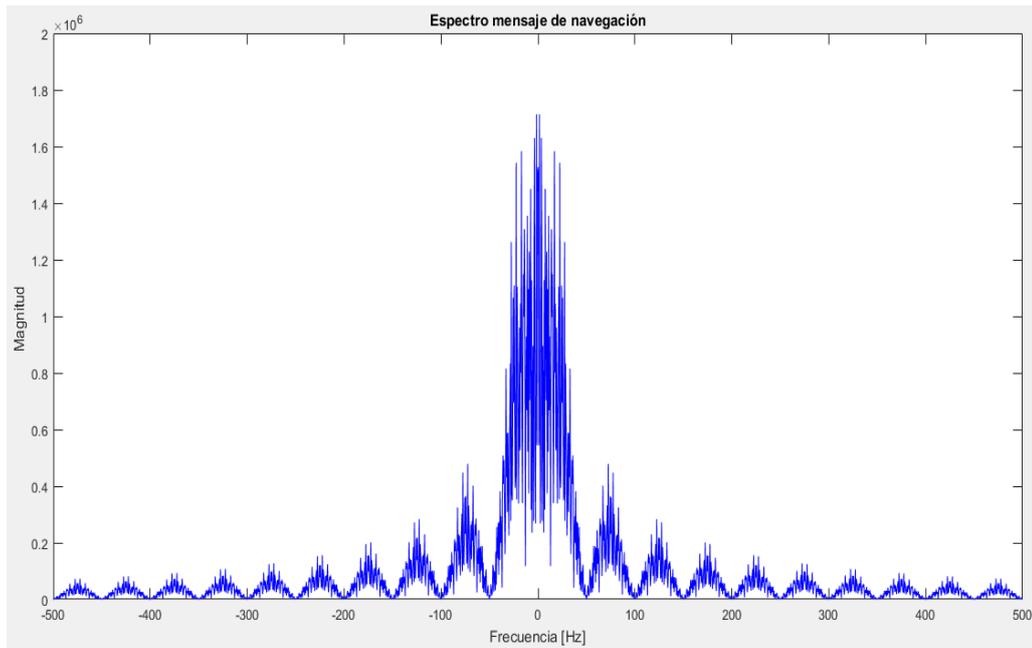
- $n= 3$
- $k= 2$
- $m= 3$

### 3.1 Análisis de la técnica de espectro ensanchado en GPS L1

Para llevar a cabo el análisis de la técnica de espectro ensanchado por secuencia directa se tomó en cuenta su funcionamiento y su script desarrollado respectivamente en Matlab, el proceso de ensanchamiento comenzó con la secuencia de bits de información, que se identifican con una frecuencia de 50 Hz generada por el reloj del sistema GPS, por consiguiente su tiempo de bit se encuentra dado por  $T_b=1/f_b$  lo que resultó en un periodo de bit de 0.02 s, el espectro del mensaje de navegación en magnitud se visualiza en el **Gráfico 1-3** mientras que en el **Gráfico 2-3** se muestra su espectro en dB característico en donde sus cortes por cero se encuentran cada 50Hz.

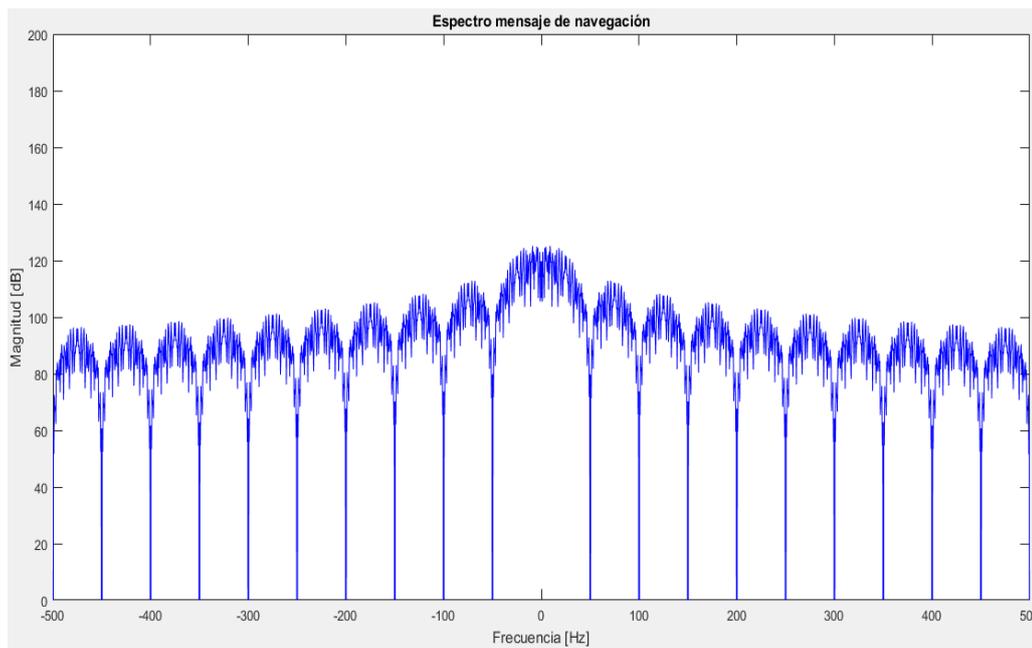
La información se caracterizó por pulsos rectangulares por lo que su espectro básicamente tuvo la forma de  $\text{sinc}^2$ , con los datos recopilados se demostró que los bits de información ocuparon un ancho de banda dado por la **Ecuación. 1-3**.

$$B_i = \frac{2}{T_b} = \frac{2}{0.02 \text{ s}} = 100 \text{ Hz} \quad \text{Ecuación. 1-3}$$



**Gráfico 1-3.** Espectro en magnitud del mensaje de navegación

Realizado por: Iván Armijo (2017)



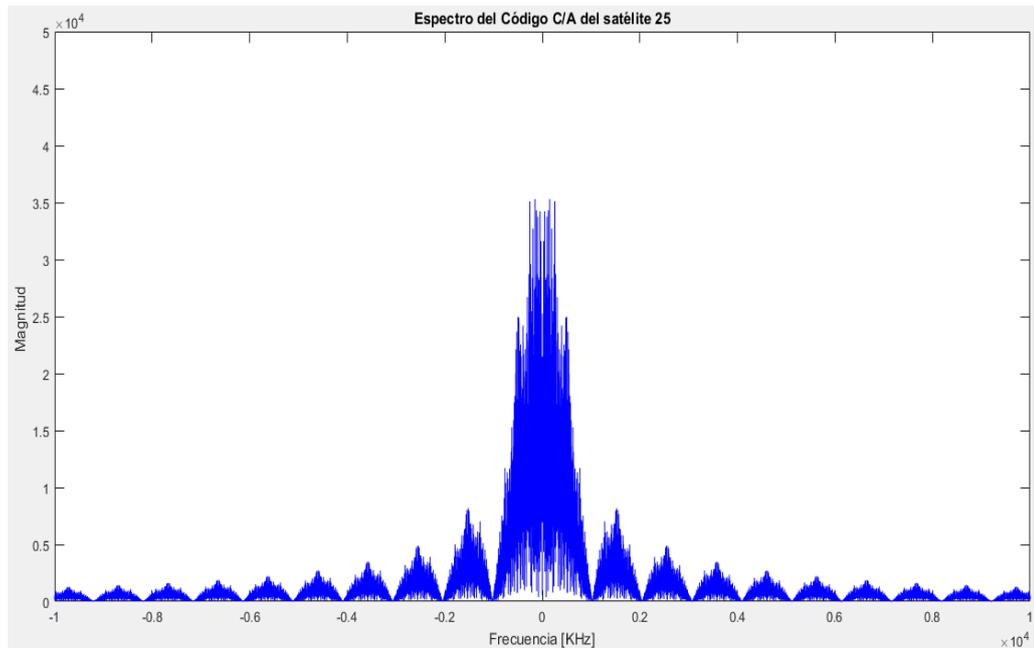
**Gráfico 2-3.** Espectro en dB del mensaje de navegación

Realizado por: Iván Armijo (2017)

En los códigos C/A se determinó que están formados por 1023 chips únicos por cada satélite, con una frecuencia de  $f_c=1.023$  MHz por lo que su periodo de chip se estableció en  $T_c=1/f_c$  que aproximadamente es  $1\mu s$ , el espectro en magnitud del código C/A se observa en el **Gráfico 3-3** y en dB se aprecia en el **Gráfico 4-3** con lo que se comprobó que sus ceros se establecieron

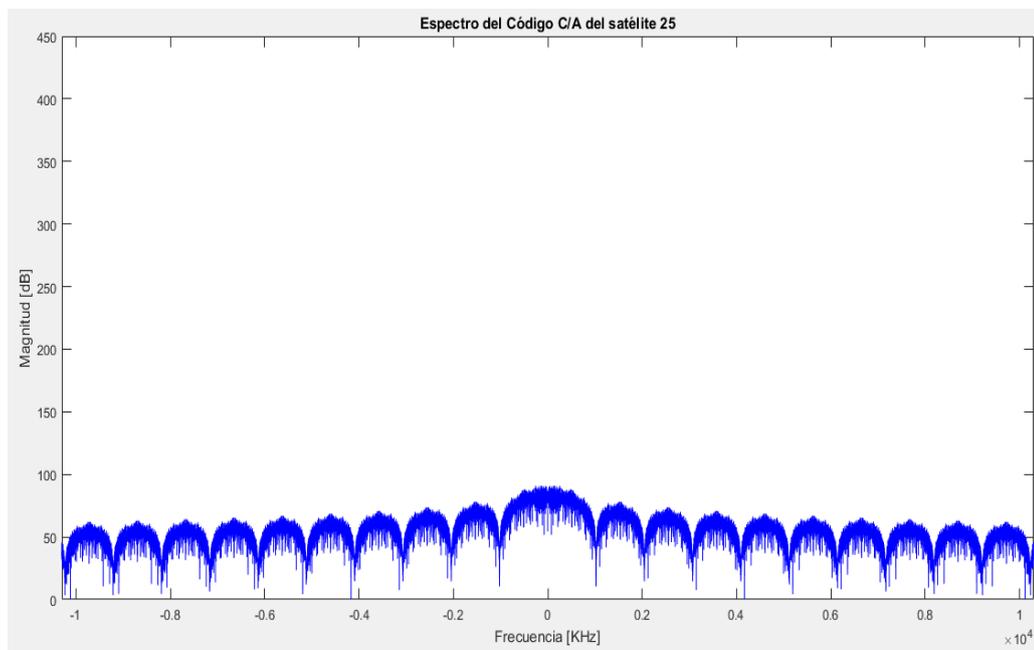
aproximadamente cada 1MHz, con esto se consiguió un ancho de banda dada por la **Ecuación. 2-3.**

$$B_c = \frac{2}{T_c} = \frac{2}{1\mu s} = 2MHz \quad \text{Ecuación. 2-3}$$



**Gráfico 3-3.** Espectro en magnitud del código C/A asociado al satélite 25

Realizado por: Iván Armijo (2017)



**Gráfico 4-3.** Espectro en dB del código C/A asociado al satélite 25

Realizado por: Iván Armijo (2017)

La expansión por secuencia directa se generó en definitiva al aplicar los códigos C/A (ver **ANEXO C**) sobre los bits de información, como se trabajó con niveles de 1 y 0 el ensanchamiento se consiguió mediante la suma módulo 2.

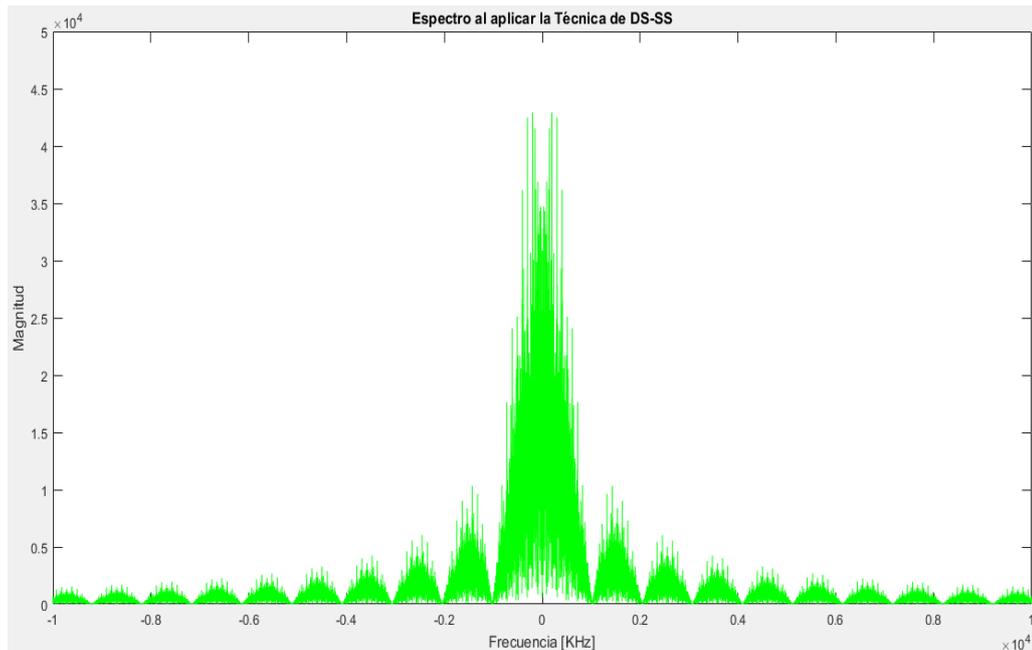
Se comprobó que cuando el  $T_b \gg T_c$  da lugar a la expansión del ancho de banda de la señal, usando una banda del espectro mucho mayor para la realización de la transmisión de información.

El factor de ensanchamiento se evaluó a través de la **Ecuación. 3-3** la cual también se la conoce como la ganancia de procesamiento del sistema GPS el cual relaciona la tasa de bits de información con la tasa usada por el código C/A.

$$G_p = 10 \log_{10} \left( \frac{T_b}{T_c} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{f_c}{f_b} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{0.02 \text{ s}}{1 \mu\text{s}} \right) = 43 \text{ dB} \quad \text{Ecuación. 3-3}$$

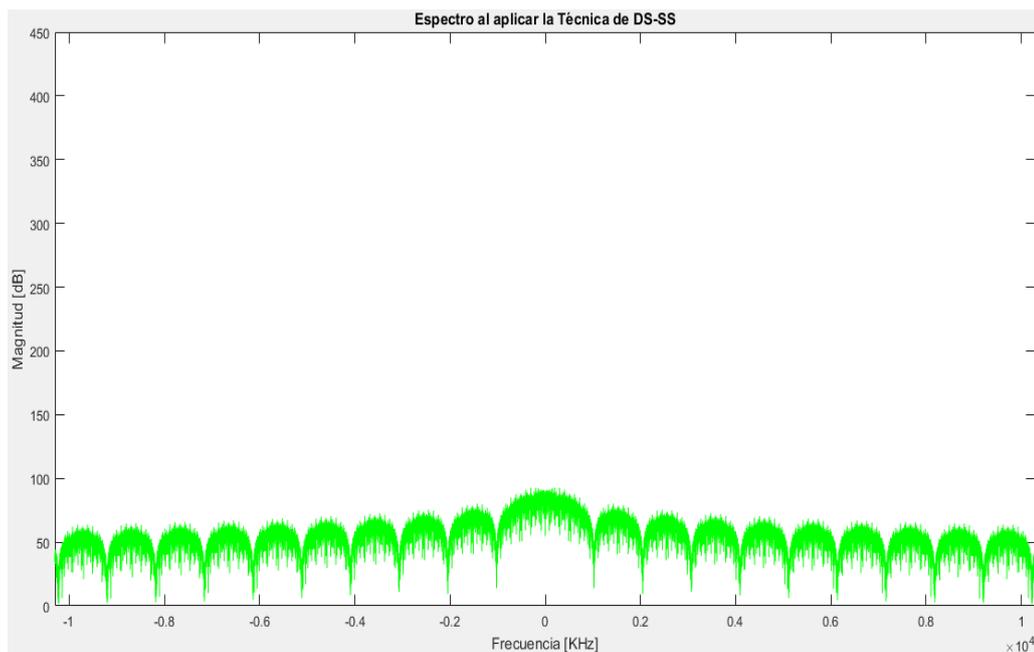
Con la técnica de DS-SS, el espectro de la señal del mensaje de navegación sufrió una modificación, con lo que se produjo un espectro expandido como se observa en el **Gráfico 5-3** y en dB se aprecia en el **Gráfico 6-3**.

El lóbulo principal del espectro que se desarrolló ocupó un ancho de banda dado por  $2R_c$  en donde  $R_c=1000000$  representa la tasa binaria de cambios de fase por segundo con lo que se dispuso de un ancho de banda de  $B=2$  MHz lo que demuestra que al aplicar la técnica sobre los bits de información el ancho de banda resultante es aproximadamente igual al de la señal ensanchadora del sistema GPS L1.



**Gráfico 5-3.** Espectro en magnitud del resultado de aplicar DS-SS

Realizado por: Iván Armijo (2017)



**Gráfico 6-3.** Espectro en magnitud del resultado al aplicar DS-SS

Realizado por: Iván Armijo (2017)

Como se observa en el **Gráfico 6-3** la densidad de potencia disminuyó al aplicar el ensanchamiento en los bits de información esto permite una mayor resistencia a los diferentes tipos de interferencias ya sean las mal intencionadas como las no intencionadas además de disponer del uso de la misma frecuencia portadora mediante la aplicación de diferentes códigos C/A únicos para cada satélite logrando así una utilización óptima del espectro.

La transmisión de esta señal mediante DS-SS dispuso de una alta dispersión espectral, esto se produjo porque al llevar a cabo el proceso de ensanchamiento de la señal esta conservó su energía, y se repartió entre una banda de frecuencias mucho mayor esto hizo que la densidad espectral de potencia llegue a ser inferior a la potencia de ruido térmico propio del canal.

Los procesadores GPS comerciales de banda base usan un BER mínimo de  $10^{-5}$ , esto significa que su mínima SNR en este sistema con modulación BPSK se establece en 9.6 dB que para la práctica se aproximó a 10dB.

Para efectuar el análisis respectivo se calculó la potencia de ruido mediante la **Ecuación. 4-3** lo cual resultó en un valor de -127 dBW. Una señal garantizada de GPS tiene un valor de -158 dBW que al relacionarlo con la potencia de ruido dio lugar a un SNR negativo de -31 dB pero a esto se le agregó la ganancia de procesado de 43 dB resultante de aplicar DS-SS en el sistema GPS lo cual dejó finalmente un SNR de 12 dB.

$$N_0 = kTB \quad \text{Ecuación. 4-3}$$

En donde:

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  (Constante de Boltzman)

$T = 290^\circ$  (Temperatura ambiente)

$B = 51,15$  MHz (ancho para la banda más restrictiva)

Como el umbral mínimo fue de 10dB y el resultado de agregar la ganancia de procesado por la aplicación de DS-SS se estableció en 12 dB, se llegó finalmente a un margen de 2dB es decir que en el receptor puede ser introducido esta cantidad de ruido.

### **3.2 Rendimiento del canal con y sin codificación Hamming (2047,2036)**

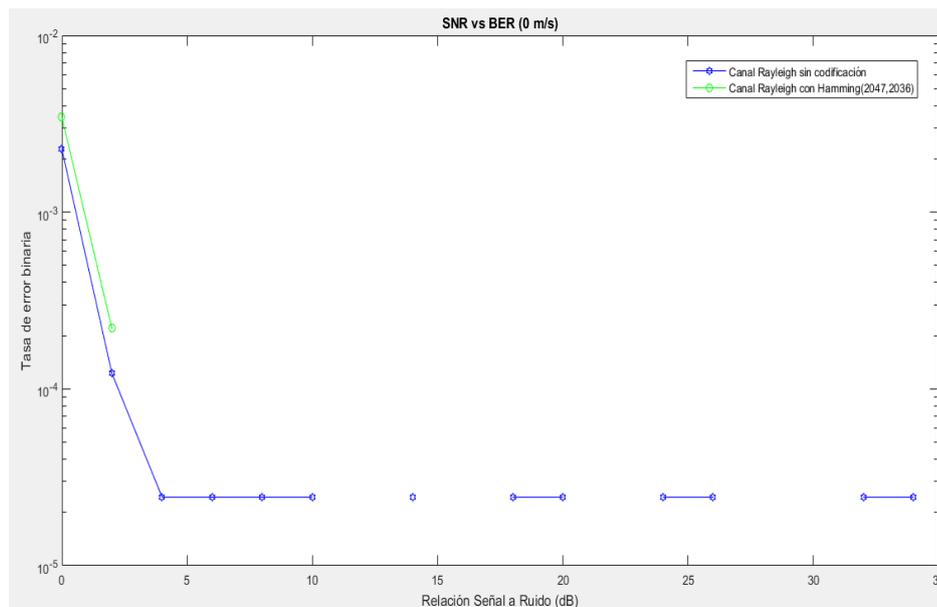
La implementación del codificador Hamming (2047, 2036) tuvo como finalidad lograr la detección y corrección de errores que se produjeron en el canal de transmisión, originados por el canal AWGN con diferentes niveles de SNR, además de mitigar los errores que se presentan cuando en el receptor se asumió distintas velocidades causando el efecto Doppler en el canal Rayleigh y Rician.

### 3.2.1 Canal Rayleigh

En el ANEXO D se aprecia una comparación de errores que se tuvieron en un canal AWGN con SNR variantes de 0 a 40 dB con un desvanecimiento tipo Rayleigh en donde el receptor experimento una variación de velocidad de 0 a 100 m/s con cambios de 10 m/s y los errores producidos después de la implementación de un codificador Hamming (2047, 2036).

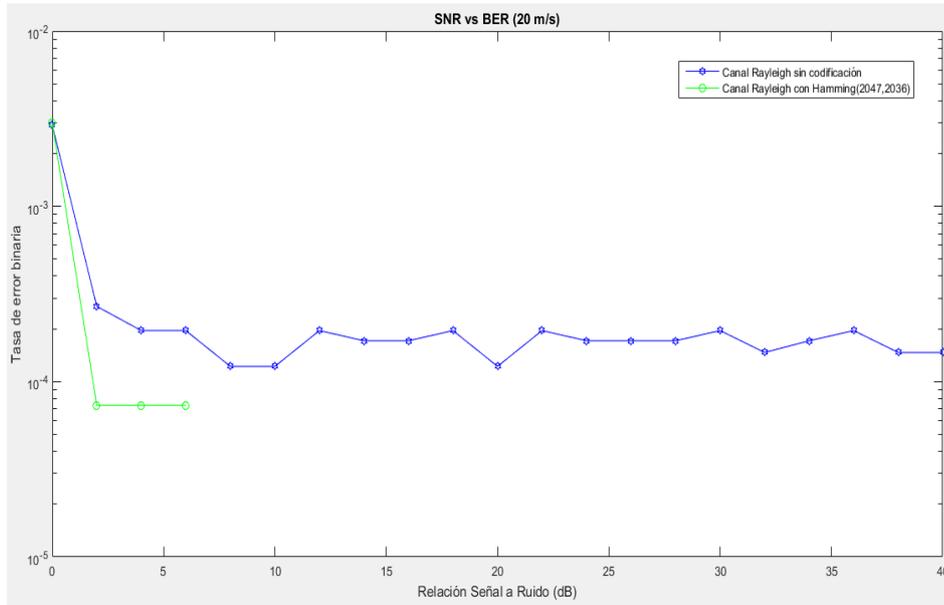
Se realizaron las tablas del ANEXO E y ANEXO F, en donde se muestra la tasa de error de bit (BER) producido en un canal Rayleigh con diferentes escenarios de velocidad y SNR.

Se relacionó el BER con el SNR en un canal Rayleigh para la evaluación de su comportamiento cuando en el receptor se aplicó diferentes velocidades a distintos niveles de SNR de tal forma que resultaron las curvas del Gráfico 7-3, Gráfico 8-3, Gráfico 9-3, Gráfico 10-3, Gráfico 11-3 y Gráfico 12-3.



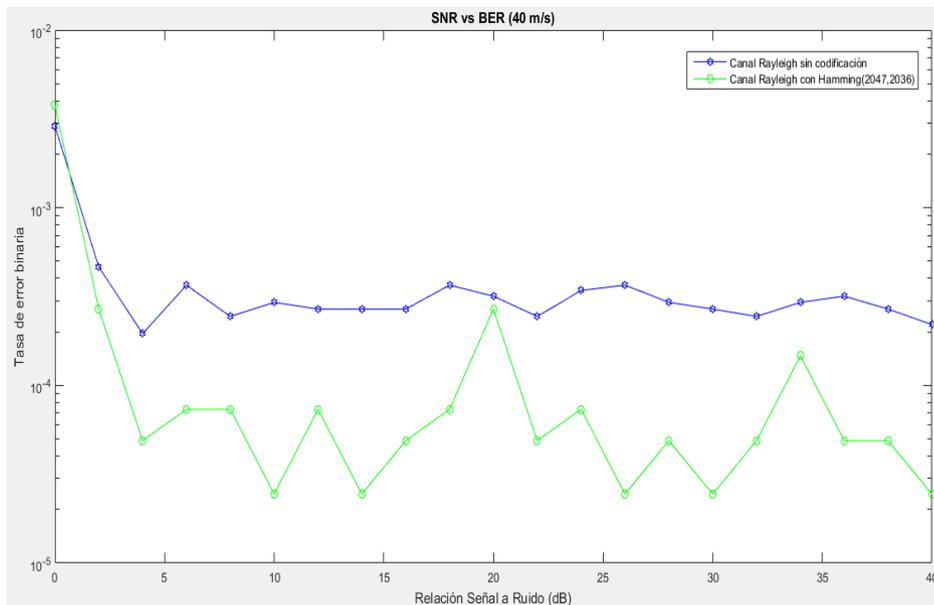
**Gráfico 7-3.** SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 0 m/s en un canal Rayleigh

**Realizado por:** Iván Armijo (2017)



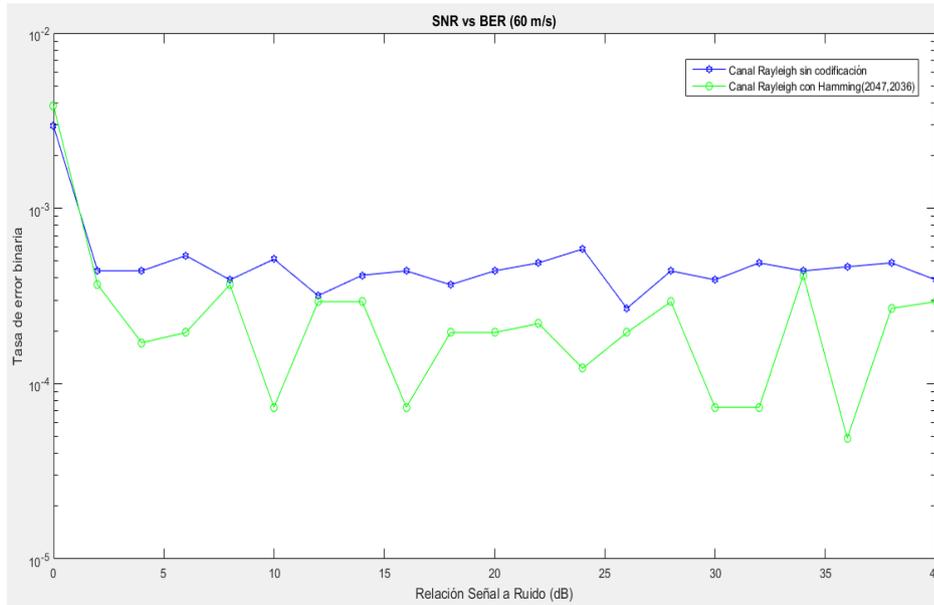
**Gráfico 8-3.** SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 20 m/s en un canal Rayleigh

Realizado por: Iván Armijo (2017)



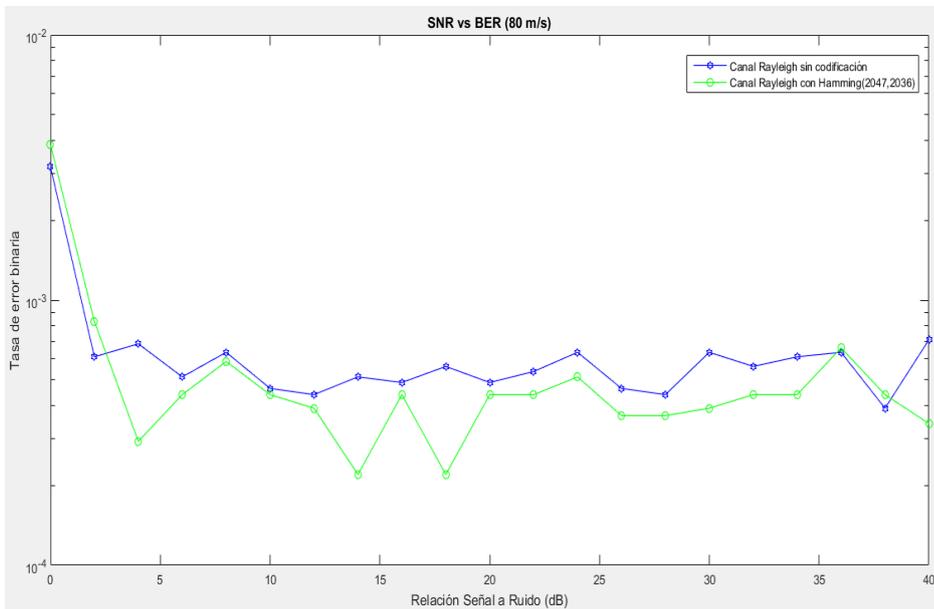
**Gráfico 9-3.** SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 40 m/s en un canal Rayleigh

Realizado por: Iván Armijo (2017)



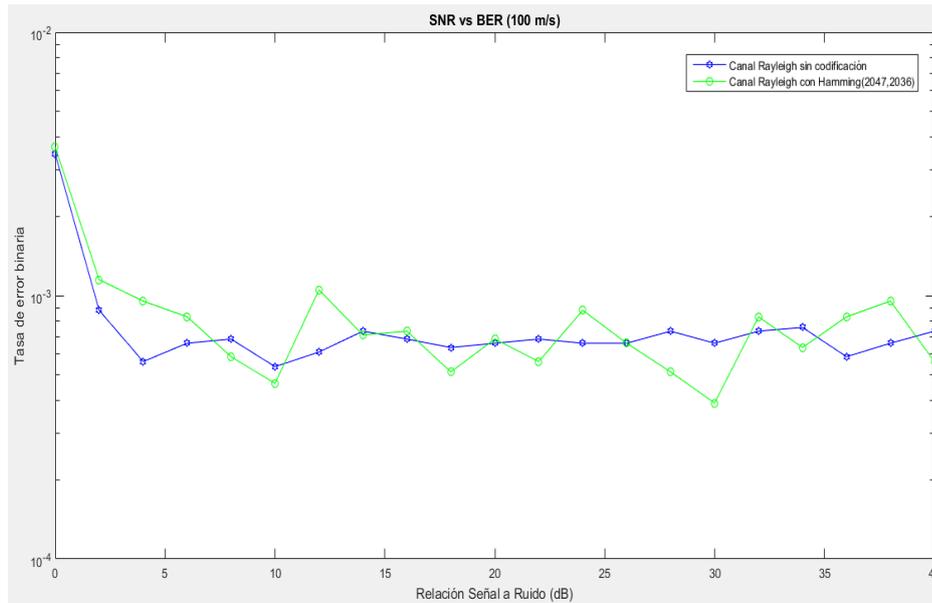
**Gráfico 10-3.** SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 60 m/s en un canal Rayleigh

Realizado por: Iván Armijo (2017)



**Gráfico 11-3.** SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 80 m/s en un canal Rayleigh

Realizado por: Iván Armijo (2017)



**Gráfico 12-3.** SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 100 m/s en un canal Rayleigh

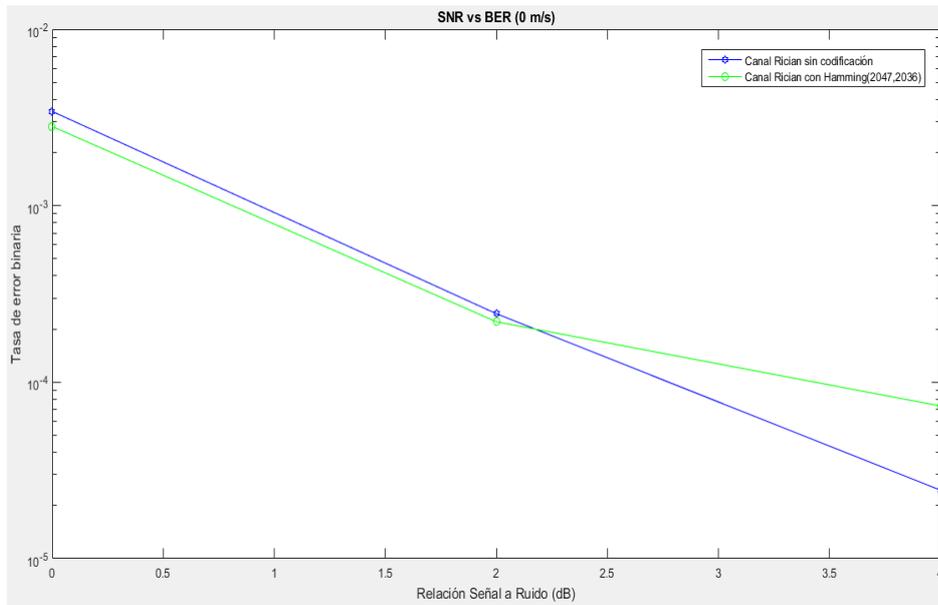
Realizado por: Iván Armijo (2017)

### 3.2.2 Canal Rician

La señal ensanchada se envió a través de un canal tipo Rician esto permitió el análisis de la onda cuando se tiene este modelo de desvanecimiento en donde el receptor presentó una variación en su velocidad con una línea de vista directa entre el transmisor y el receptor.

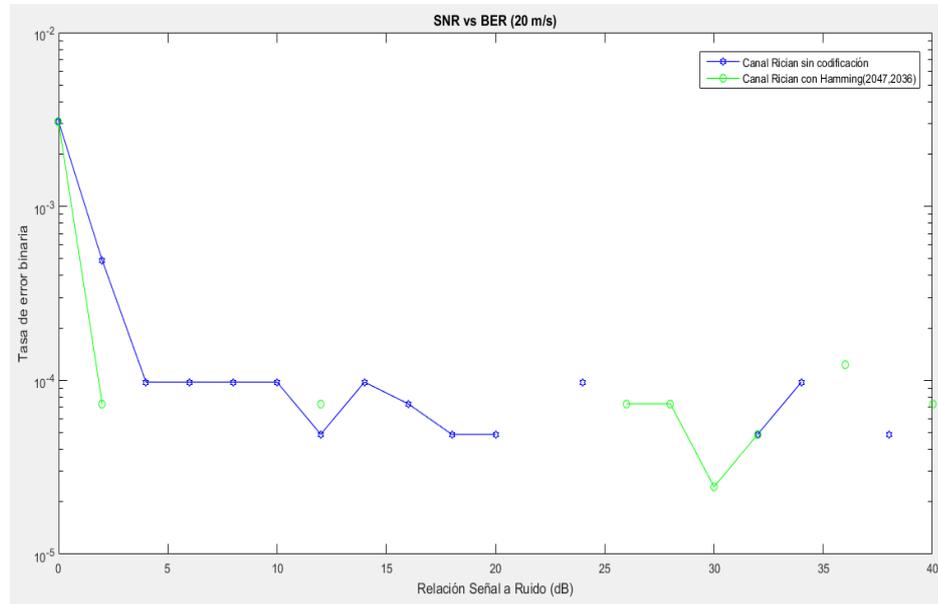
En la tabla del **ANEXO G** se aprecia la diferencia en los errores que se capturaron en un canal AWGN a diferentes SNR y los errores producidos después de la implementación de un codificador Hamming (2047, 2036) ambos dispuestos sobre el canal Rician.

Para una mejor comprensión se diseñaron las tablas del **ANEXO H** y **ANEXO I** que exponen el BER que se calculó cuando se implementó el codificador en el canal Rician además de la creación de las curvas del **Gráfico 13-3**, **Gráfico 14-3**, **Gráfico 15-3**, **Gráfico 16-3**, **Gráfico 17-3** y **Gráfico 18-3**, en donde se observan la relación existente entre el SNR y BER.



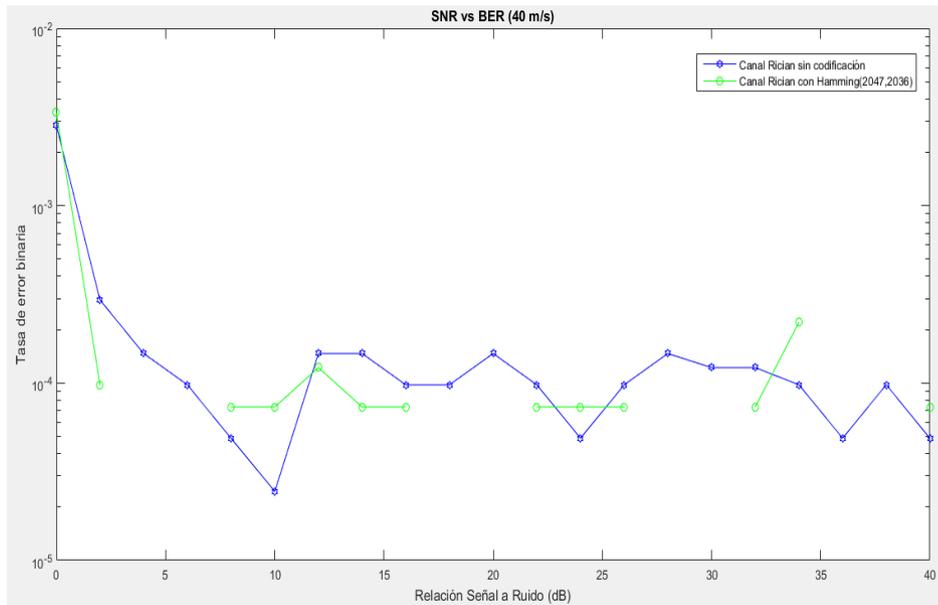
**Gráfico 13-3** SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 0 m/s en un canal Rician

Realizado por: Iván Armijo (2017)



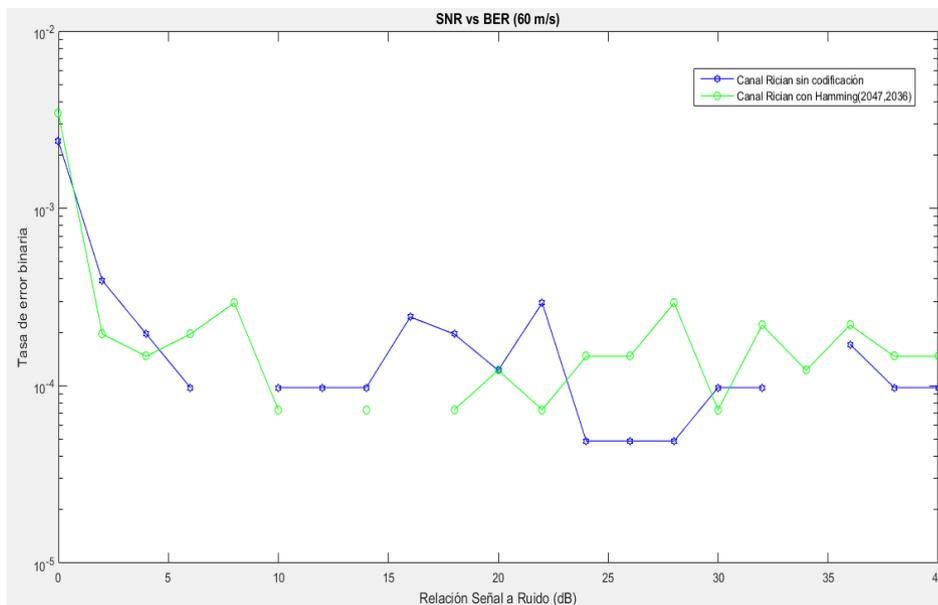
**Gráfico 14-3.** SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 20 m/s en un canal Rician

Realizado por: Iván Armijo (2017)



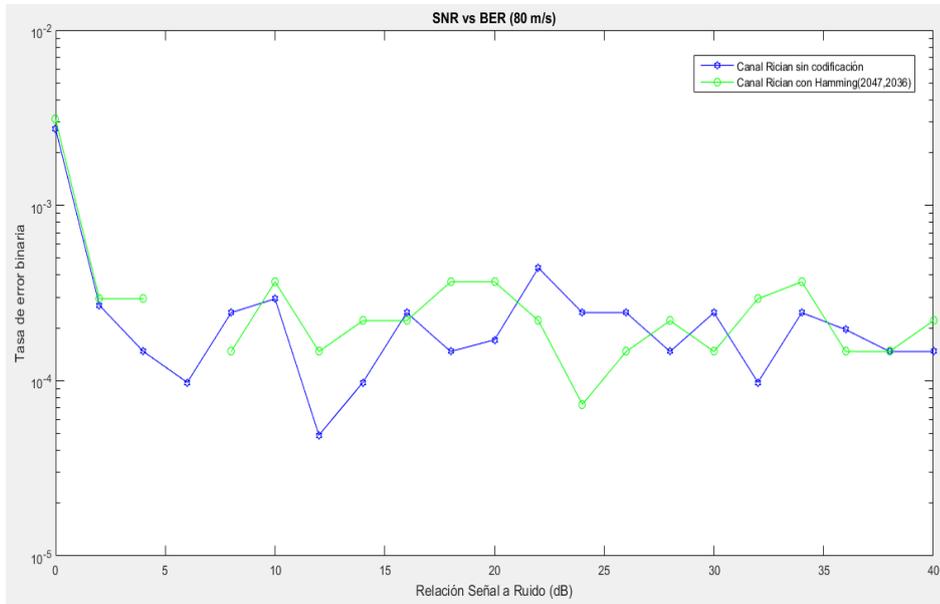
**Gráfico 15-3.** SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 40 m/s en un canal Rician

Realizado por: Iván Armijo (2017)



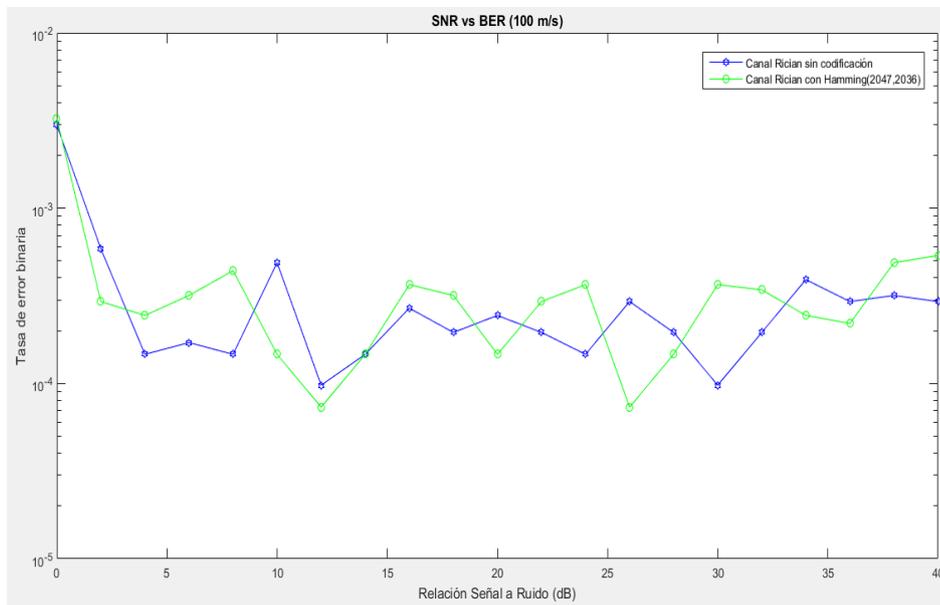
**Gráfico 16-3.** SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 60 m/s en un canal Rician

Realizado por: Iván Armijo (2017)



**Gráfico 17-3.** SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 80 m/s en un canal Rician

Realizado por: Iván Armijo (2017)



**Gráfico 18-3.** SNR vs BER con y sin codificación Hamming, a una velocidad de 100 m/s en un canal Rician

Realizado por: Iván Armijo (2017)

### 3.3 Rendimiento del canal con y sin codificación Convolutacional (2, 1, 3)

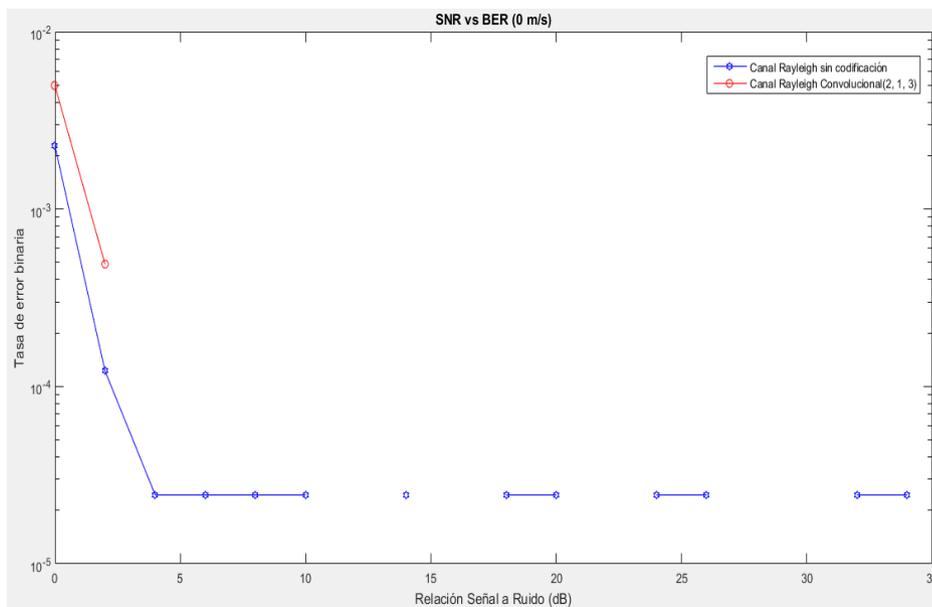
La implementación del codificador Convolutacional a una tasa de 1/2 así como su decodificador Viterbi respectivo permitió la detección y corrección de errores que se produjeron en los diferentes canales simulados en donde se incluyeron los efectos causados por el movimiento del receptor a diferentes velocidades.

#### 3.3.1 Canal Rayleigh

Los errores producidos en el canal Rayleigh y canal AWGN se visualizan en la tabla del ANEXO J en donde el receptor varia su velocidad hasta que llegó a una velocidad de 100 m/s a esto se le añadió distintos niveles de SNR.

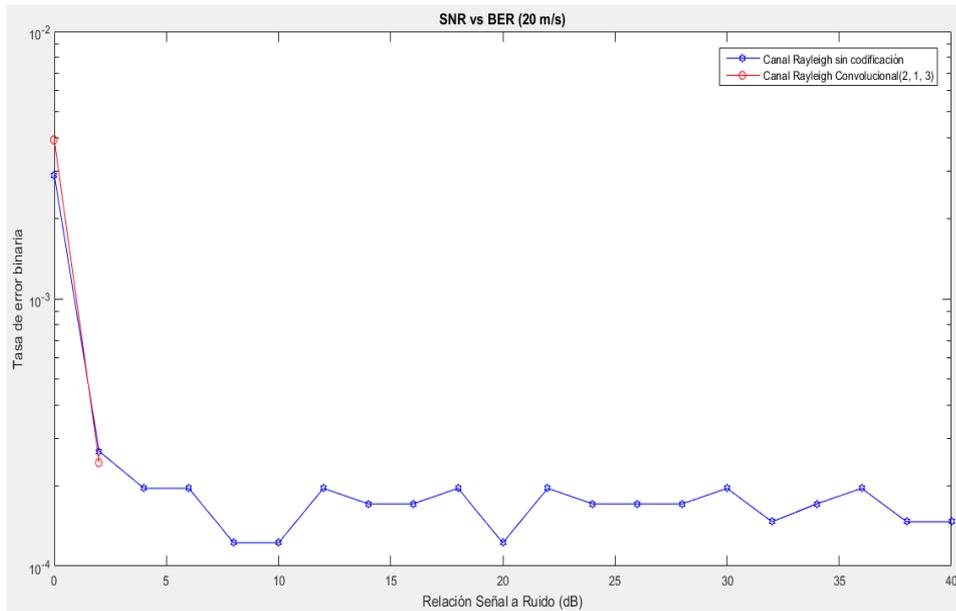
El paso de la señal GPS L1 a través de los diferentes canales de desvanecimiento implementados arrojó los diferentes valores de BER mostrados en las tablas del ANEXO K y ANEXO L en donde se incluye variaciones en la velocidad.

Con los valores que resultaron de aplicar la codificación Convolutacional a una tasa de 1/2 se realizaron los esquemas del Gráfico 19-3, Gráfico 20-3, Gráfico 21-3, Gráfico 22-3, Gráfico 23-3 y Gráfico 24-3 que comprenden el BER vs SNR, en estas se tomaron en cuenta las velocidades en el receptor de 0, 20, 40, 60, 80 y 100 m/s.



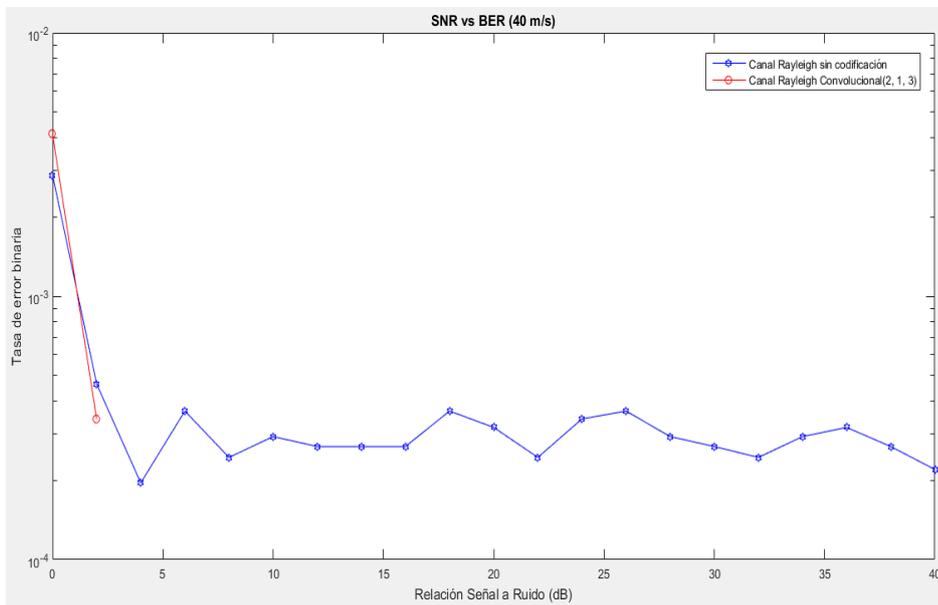
**Gráfico 19-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 1/2, a una velocidad de 0 m/s en un canal Rayleigh

Realizado por: Iván Armijo (2017)



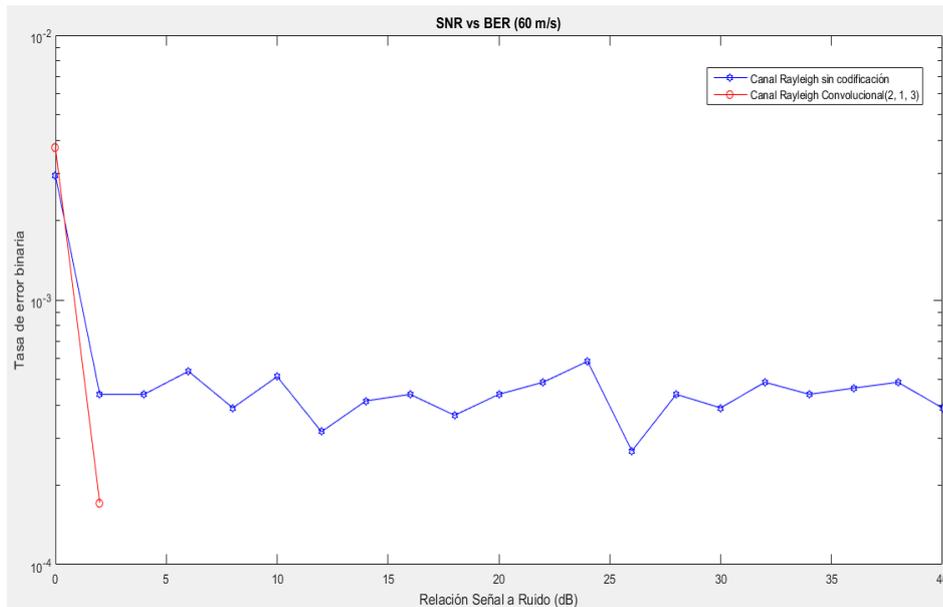
**Gráfico 20-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convulsional 1/2, a una velocidad de 20 m/s en un canal Rayleigh

Realizado por: Iván Armijo (2017)



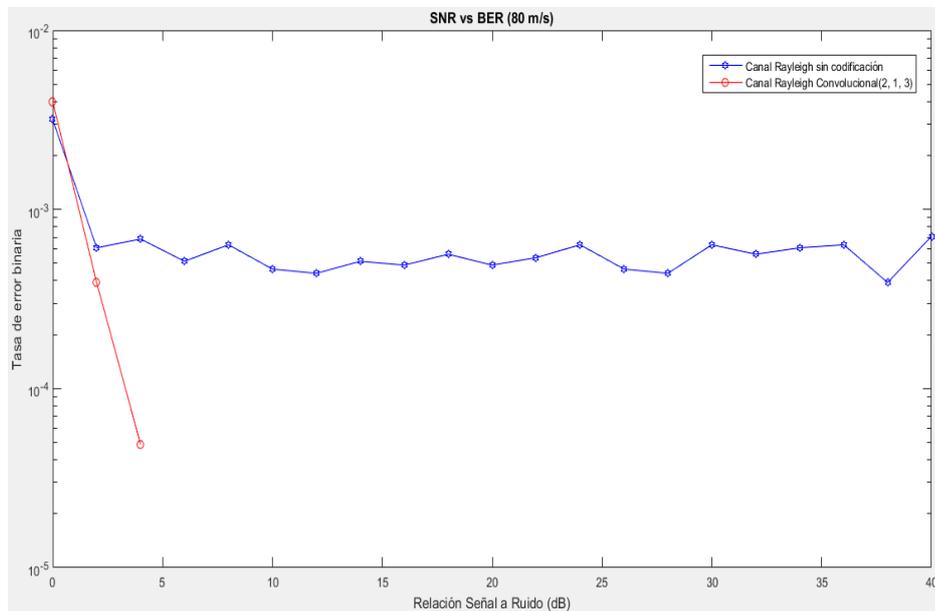
**Gráfico 21-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convulsional 1/2, a una velocidad de 40 m/s en un canal Rayleigh

Realizado por: Iván Armijo (2017)



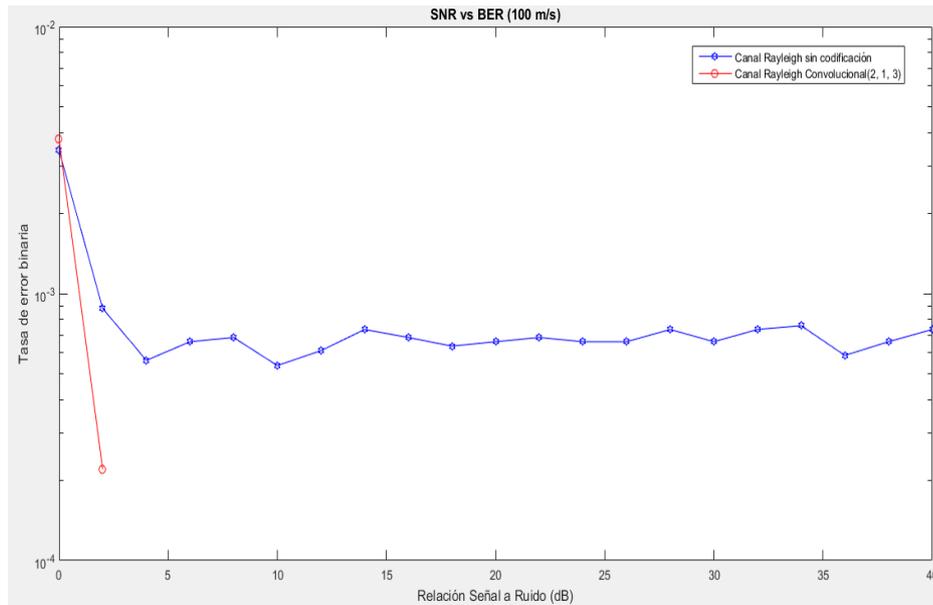
**Gráfico 22-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convolutional 1/2, a una velocidad de 60 m/s en un canal Rayleigh

**Realizado por:** Iván Armijo (2017)



**Gráfico 23-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convolutional 1/2, a una velocidad de 80 m/s en un canal Rayleigh

**Realizado por:** Iván Armijo (2017)



**Gráfico 24-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 1/2, a una velocidad de 100 m/s en un canal Rayleigh

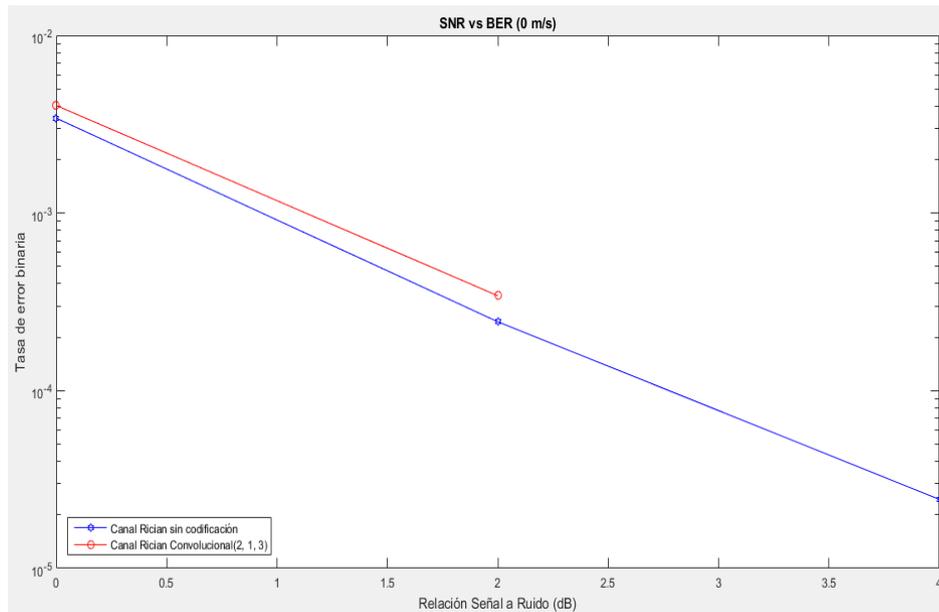
Realizado por: Iván Armijo (2017)

### 3.3.2 Canal Rician

El rendimiento del canal con desvanecimiento Rician presenta un determinado comportamiento al adicionarle la codificación Convolutacional a una tasa de 1/2, la información obtenida se presenta en la tabla del ANEXO M en donde se muestran los errores producidos y corregidos.

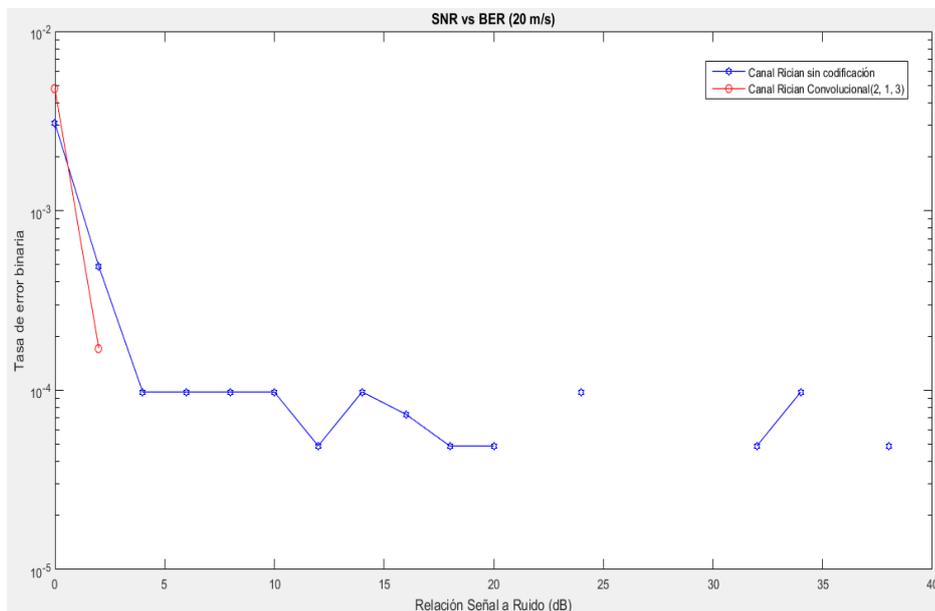
La tabla del ANEXO N y ANEXO O proporcionan el BER que se presentaron en el canal Rician al tomar como punto de partida 0 dB hasta los 40 dB durante ciertas velocidades del receptor.

El Gráfico 25-3, Gráfico 26-3, Gráfico 27-3, Gráfico 28-3, Gráfico 29-3 y Gráfico 30-3 muestran los resultados de un antes y después de que se aplicó el codificador convolutacional en este tipo de canal.



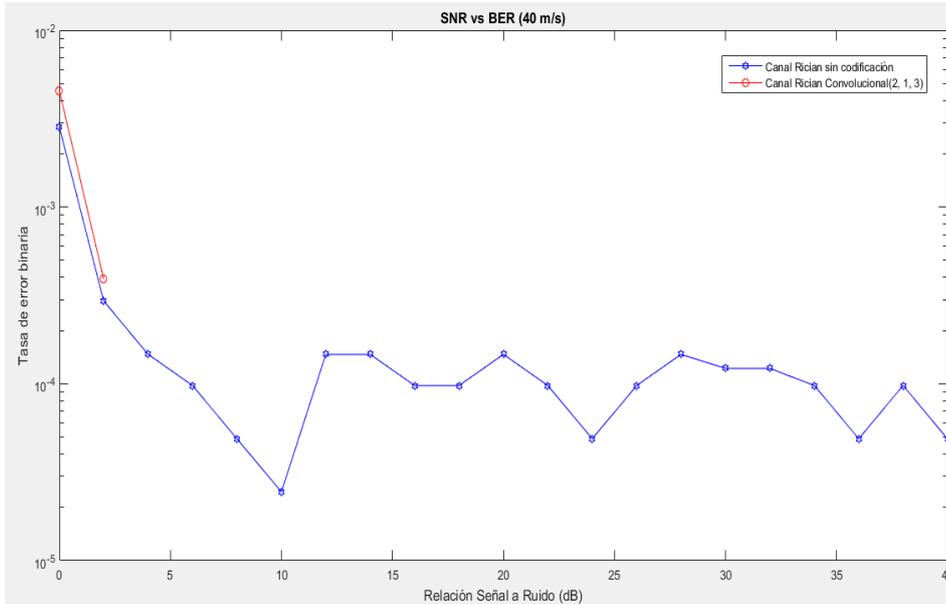
**Gráfico 25-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convulsional 1/2, a una velocidad de 0 m/s en un canal Rician

**Realizado por:** Iván Armijo (2017)



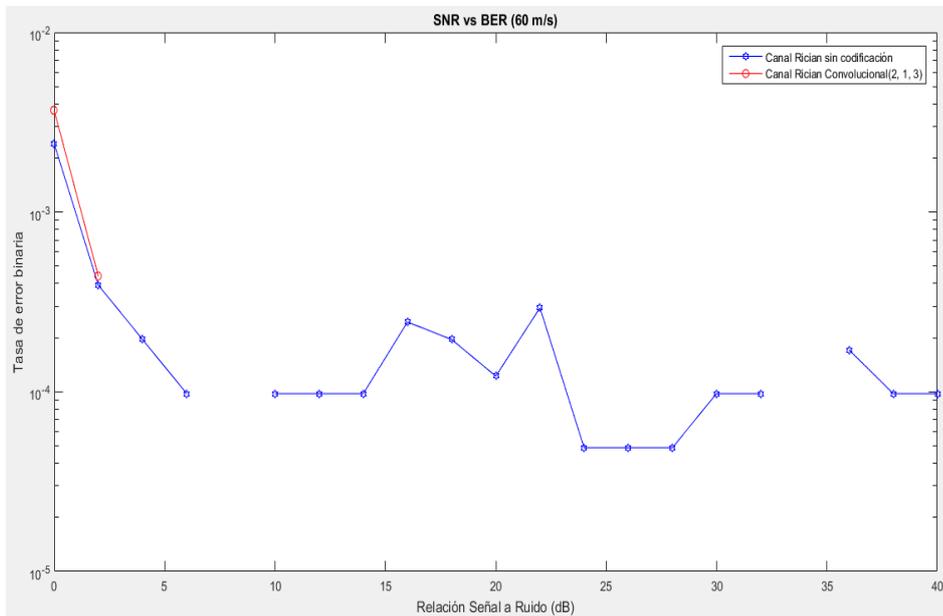
**Gráfico 26-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convulsional 1/2, a una velocidad de 20 m/s en un canal Rician

**Realizado por:** Iván Armijo (2017)



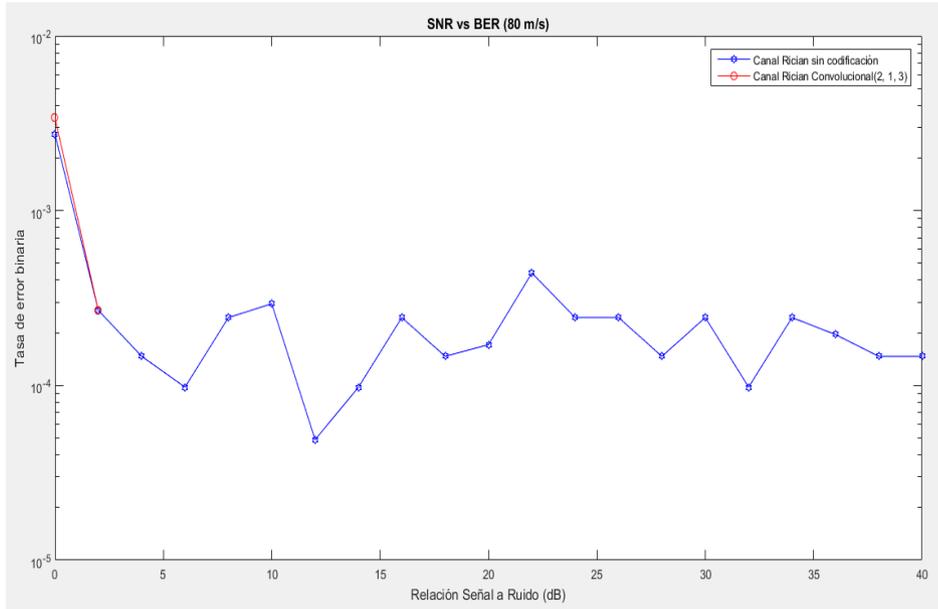
**Gráfico 27-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convolutivo 1/2, a una velocidad de 40 m/s en un canal Rician

Realizado por: Iván Armijo (2017)



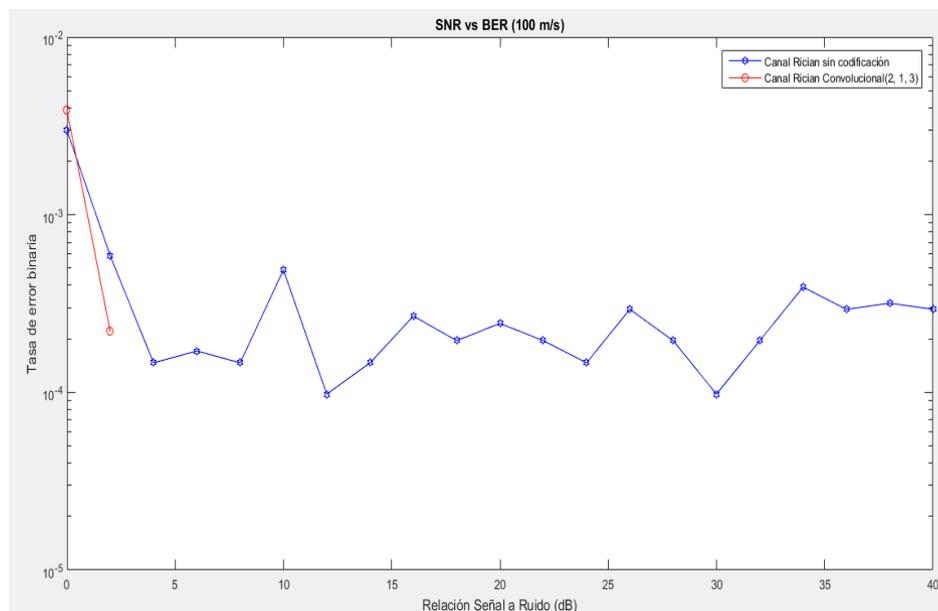
**Gráfico 28-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convolutivo 1/2, a una velocidad de 60 m/s en un canal Rician

Realizado por: Iván Armijo (2017)



**Gráfico 29-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 1/2, a una velocidad de 80 m/s en un canal Rician

**Realizado por:** Iván Armijo (2017)



**Gráfico 30-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 1/2, a una velocidad de 100 m/s en un canal Rician

**Realizado por:** Iván Armijo (2017)

### 3.4 Rendimiento del canal con y sin codificación Convolutacional (3, 2, 3)

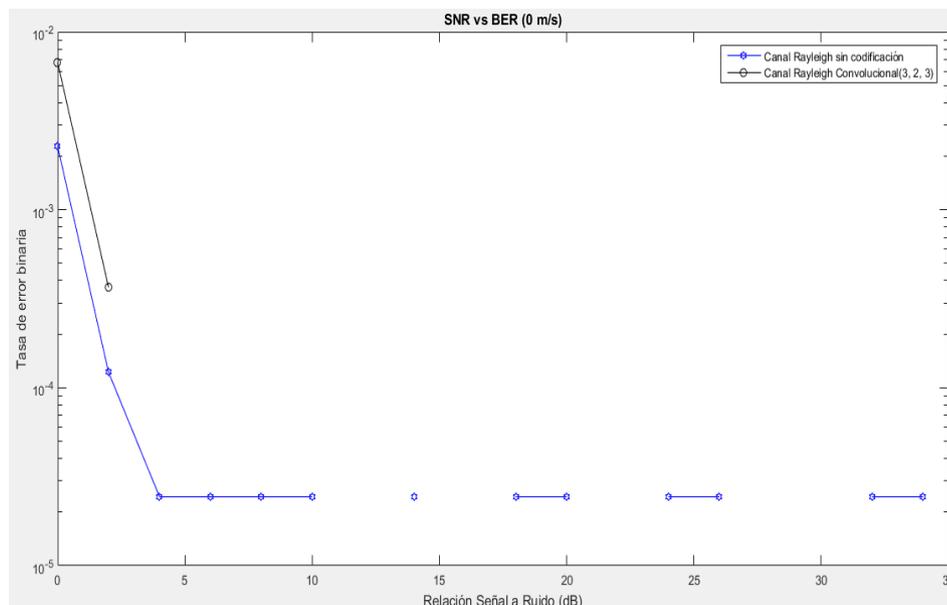
Al implementar el codificador Convolutacional con la característica de que por cada 2 bits que ingresaron se obtuvieron 3 bits a la salida, permitió la detección y corrección de errores establecidos en los canales Rayleigh y Rician los cuales experimentaron diferentes velocidades.

#### 3.4.1 Canal Rayleigh

Los errores que se originaron cuando se implementó este tipo de canal se observan en la tabla del ANEXO P en la cual se muestra una comparación del rendimiento en base a los errores con la aplicación del codificador convolutacional a una tasa de 2/3.

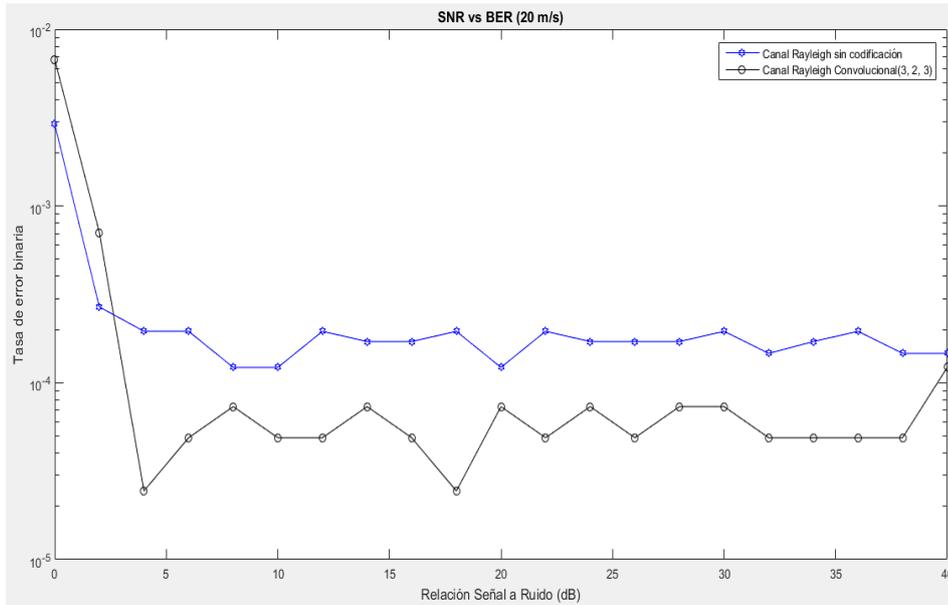
En las tablas del ANEXO Q y ANEXO R se distinguen los errores en base al BER, originados por el canal Rayleigh cuando en el receptor se asumió distintas velocidades que fueron de 0 a 100 m/s.

Las curvas producidas por el BER en función del SNR se observan en el Gráfico 31-3, Gráfico 32-3, Gráfico 33-3, Gráfico 34-3, Gráfico 35-3 y Gráfico 36-3 en donde se muestra el impacto que tuvo al usar el codificador convolutacional.



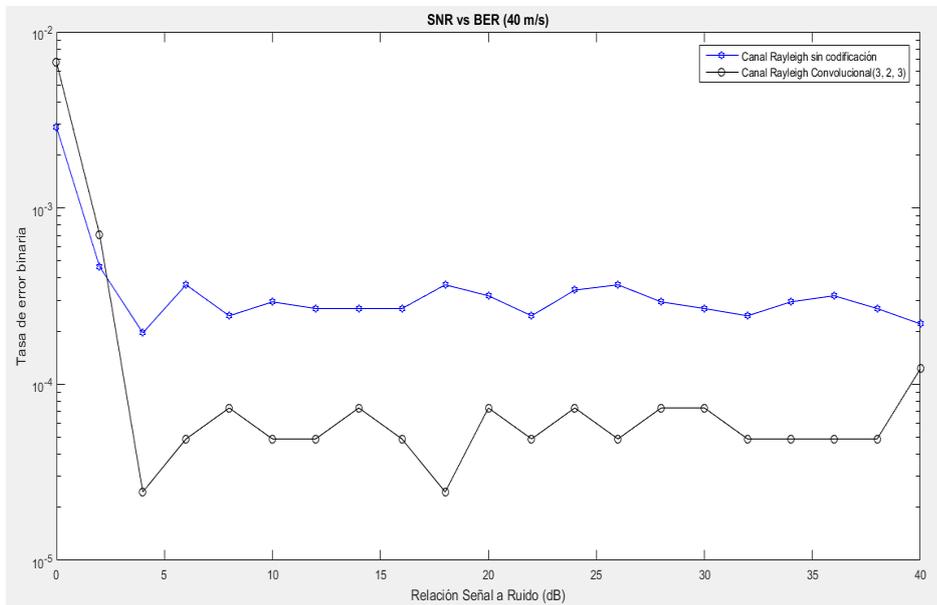
**Gráfico 31-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 2/3, a una velocidad de 0 m/s en un canal Rayleigh

**Realizado por:** Iván Armijo (2017)



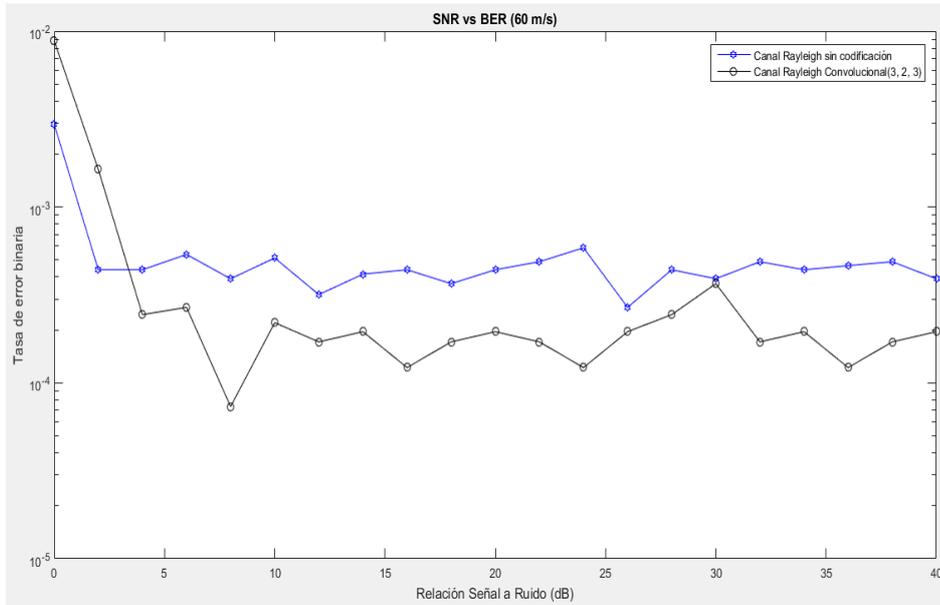
**Gráfico 32-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convulsional 2/3, a una velocidad de 20 m/s en un canal Rayleigh

Realizado por: Iván Armijo (2017)



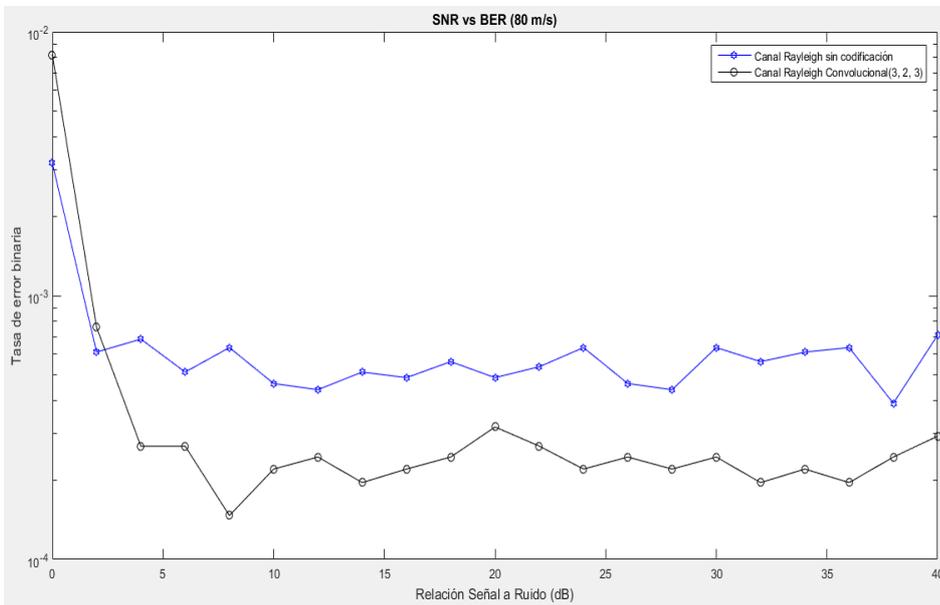
**Gráfico 33-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convulsional 2/3, a una velocidad de 40 m/s en un canal Rayleigh

Realizado por: Iván Armijo (2017)



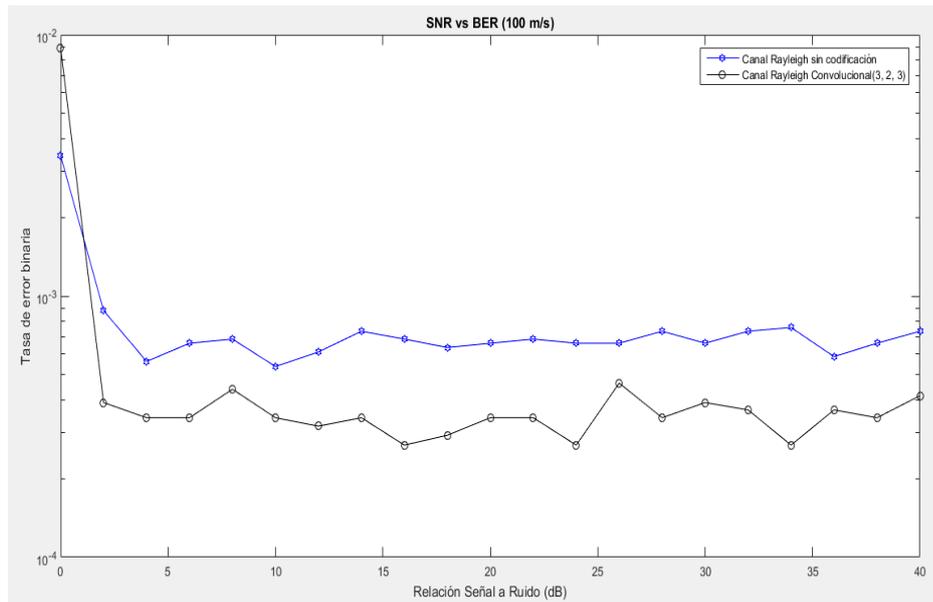
**Gráfico 34-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 2/3, a una velocidad de 60 m/s en un canal Rayleigh

Realizado por: Iván Armijo (2017)



**Gráfico 35-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 2/3, a una velocidad de 80 m/s en un canal Rayleigh

Realizado por: Iván Armijo (2017)



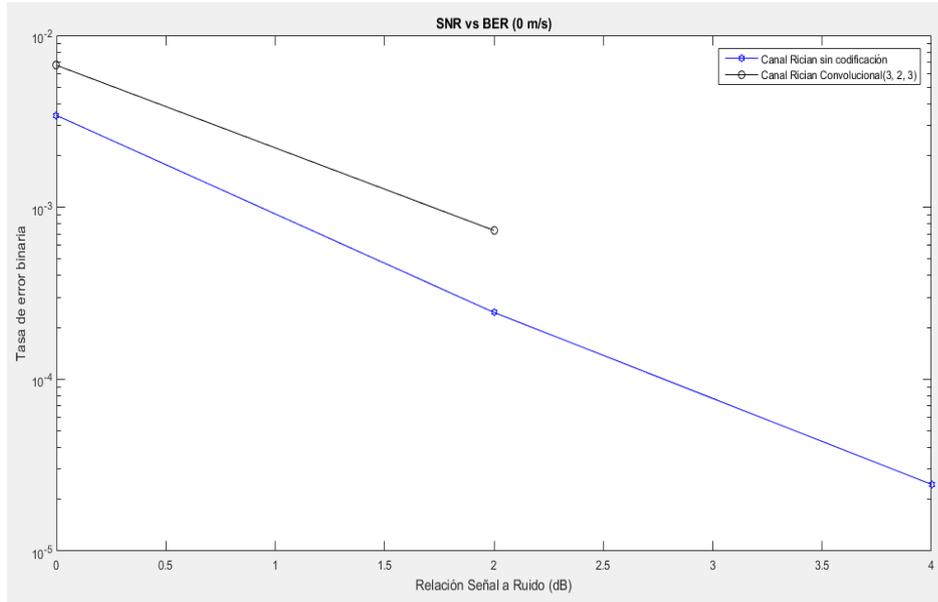
**Gráfico 36-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convolutonal 2/3, a una velocidad de 100 m/s en un canal Rayleigh

Realizado por: Iván Armijo (2017)

### 3.4.2 Canal Rician

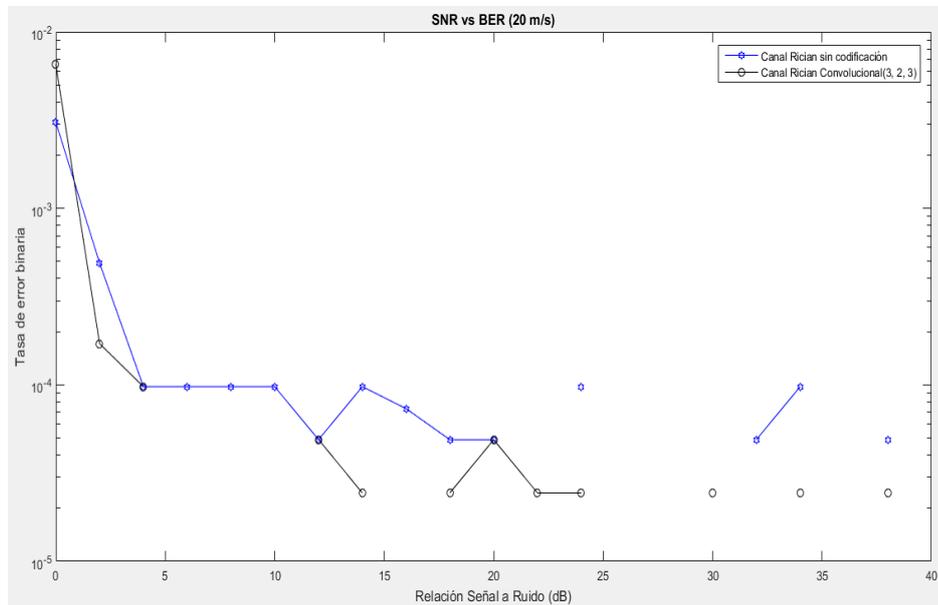
El canal tipo Rician se formó en base a la línea de vista directa entre el transmisor y el receptor a esto se le añadió los efectos cuando el receptor se trasladó a ciertas velocidades, en la tabla del ANEXO S se observan los diferentes errores producidos.

Se crearon las tablas del ANEXO T y ANEXO U en donde se muestra el BER correspondiente al canal con codificación convolutonal 2/3 y con estos valores se procedió a formar las curvas del Gráfico 37-3, Gráfico 38-3, Gráfico 39-3, Gráfico 40-3, Gráfico 41-3 y Gráfico 42-3 que se desarrollaron en base al SNR y el BER.



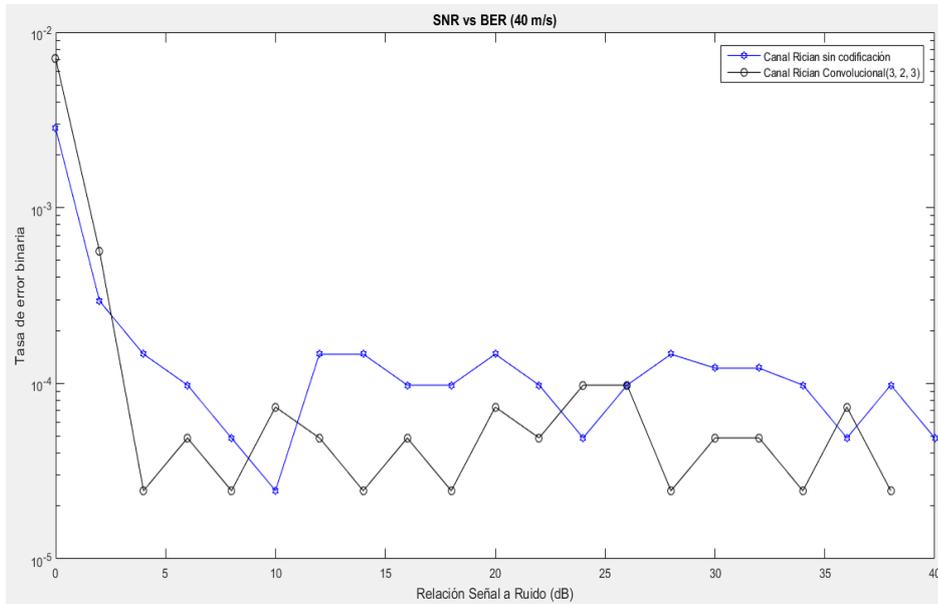
**Gráfico 37-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convulsional 2/3, a una velocidad de 0 m/s en un canal Rician

**Realizado por:** Iván Armijo (2017)



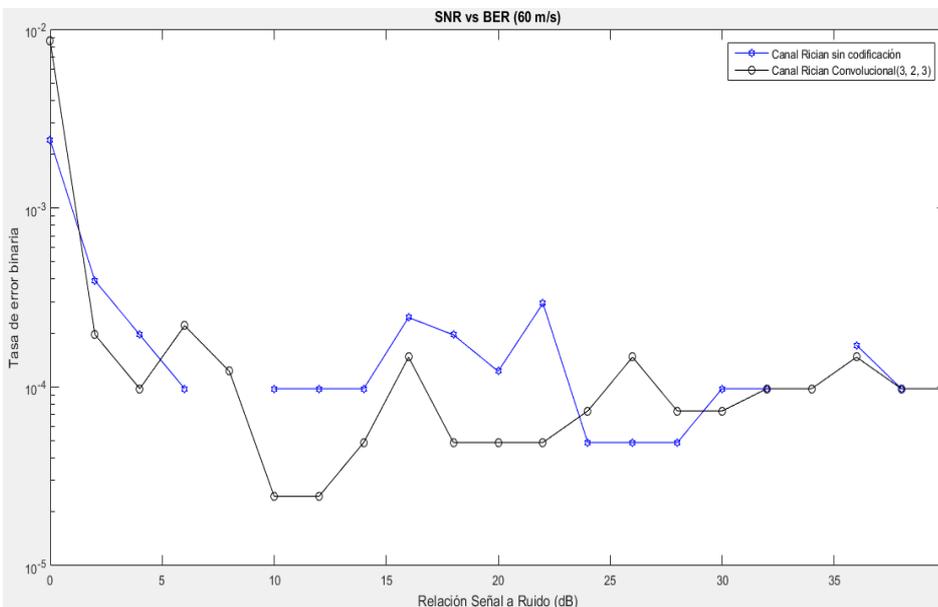
**Gráfico 38-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convulsional 2/3, a una velocidad de 20 m/s en un canal Rician

**Realizado por:** Iván Armijo (2017)



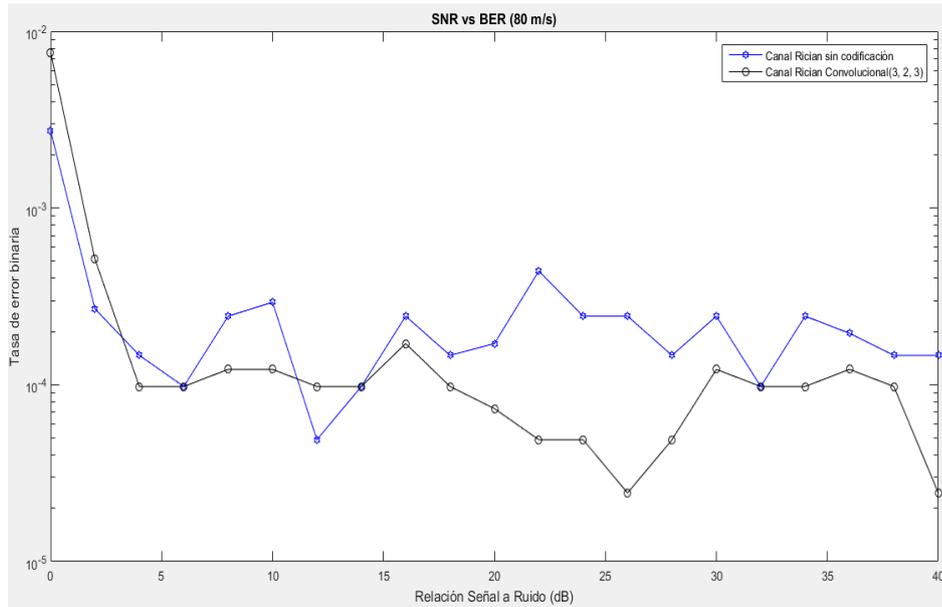
**Gráfico 39-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 2/3, a una velocidad de 40 m/s en un canal Rician

Realizado por: Iván Armijo (2017)



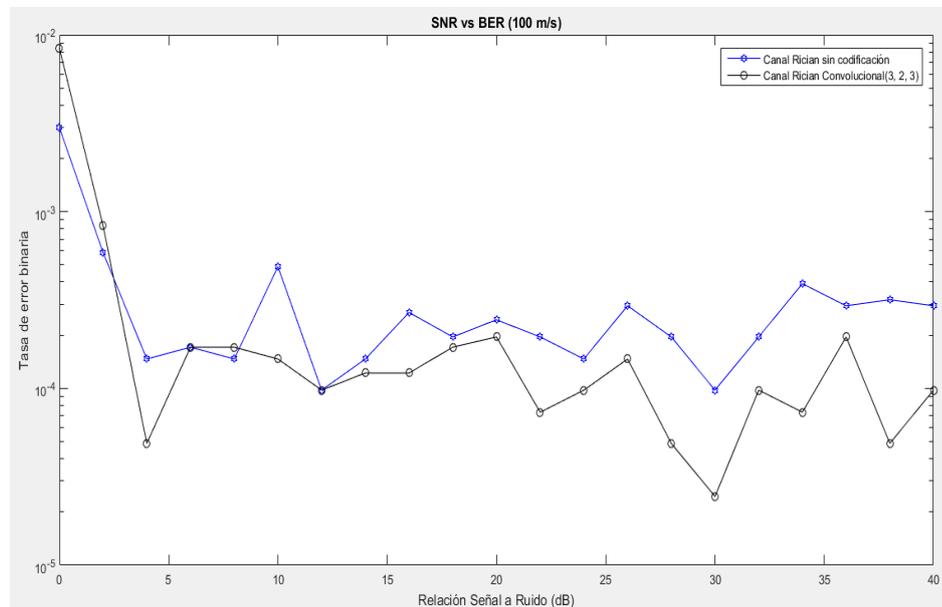
**Gráfico 40-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 2/3, a una velocidad de 60 m/s en un canal Rician

Realizado por: Iván Armijo (2017)



**Gráfico 41-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 2/3, a una velocidad de 80 m/s en un canal Rician

Realizado por: Iván Armijo (2017)



**Gráfico 42-3.** SNR vs BER con y sin codificación Convolutacional 2/3, a una velocidad de 100 m/s en un canal Rician

Realizado por: Iván Armijo (2017)

## CONCLUSIONES

El algoritmo desarrollado en Matlab, permite simular los bloques necesarios para generar la señal GPS en la frecuencia L1, así como la representación de los canales necesarios para su transmisión y los diferentes algoritmos de detección y corrección de errores para la obtención de una alta fiabilidad de datos en el receptor.

De los tres algoritmos de detección y corrección de errores implementados, el que representa una mayor fiabilidad y robustez en este tipo de sistema es el convolucional (2,1,3) a una tasa de 1/2 que demostró que a partir de los 4 dB en la relación señal a ruido corrige los errores de forma eficaz en comparación a los otros dos implementados.

Se determinó que la técnica de espectro ensanchado por secuencia directa (DS-SS) aplicado en el sistema GPS L1, disminuyó de forma considerable la densidad espectral de potencia en comparación a la que se obtuvo con la información original, esto se produjo a expensas de un requerimiento del ancho de banda de 2 MHz.

La técnica implementada permite usar diferentes códigos de ensanchamiento lo que significa la utilización óptima del espectro de frecuencias y la correcta manera de compartir el limitado medio de transmisión, esto cumple con los requerimientos de las comunicaciones actuales en donde la seguridad de la información y el ancho de banda representan una gran importancia.

La técnica de DS-SS permitió que la información transmitida sea más robusta debido a la ganancia de procesamiento de 43 dB lo que implica protección ante diferentes tipos de interferencias (canal adyacente, cocanal, multitrayecto, etc.), además la información se encuentra reservada por un código que solo lo conoce el transmisor y el receptor.

La utilización de diferentes canales de transmisión y las variaciones en la velocidad de receptor provocaron un aumento considerable en los errores que fueron corregidos con los codificadores implementados mejorando el rendimiento del sistema.

La frecuencia L1 utilizada en este sistema significó un gran número de muestras a procesar en Matlab lo cual representa un elevado tiempo de procesamiento, resultando así el envío de trenes de dos bits hasta que se completó el mensaje de navegación.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda, para futuras investigaciones, utilizar computadoras de alta capacidad para el procesamiento de este tipo de señales en Matlab debido a que son sistemas que trabajan a una alta frecuencia de operación, por lo que se necesitan muchos datos a procesar debido al número de muestras generadas.

Tomar para el análisis del canal el comportamiento de más de dos rayos con diferentes ganancias y tiempos de retardo para asemejarse más a la realidad en los canales Rayleigh y Rician y con esto variar las velocidades del receptor más allá del límite estudiado en el presente trabajo.

Se recomienda realizar la simulación en la frecuencia L2 y L5 con la implementación de diferentes codificadores de canal utilizados en el presente proyecto, para su evaluación y comparación con la frecuencia L1.

Se recomienda usar otros tipos de codificadores en el script desarrollado para realizar un análisis más exhaustivo y comparativo del rendimiento del canal en función del SNR y BER.

Se recomienda usar una interpolación para suavizar las curvas y de esta forma obtener una mejor representación del comportamiento del canal referente al SNR y BER con los diferentes tipos de codificadores.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **ALVARADO, Raúl.** “Códigos para detención y corrección de errores en comunicaciones digitales”. *cienciauanl* [en línea], 2004, México vol. 7, no 25, pp. 52-54. [Consulta: 10 febrero 2017]. Disponible en: [http://eprints.uanl.mx/10151/1/25\\_codigos.pdf](http://eprints.uanl.mx/10151/1/25_codigos.pdf)
2. **BERROCOSO, Manuel, et al.** El sistema de posicionamiento global. Puerto Real: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz, 2004, pp.12-16
3. **CASANOVA MATERA, Leonardo.** Topografía plana. Mérida-Venezuela: Taller de Publicaciones de Ingeniería ULA, 2002, pp.10-2:10-5
4. **CIOCE, Víctor; et al.** “Determinación del vapor de agua troposférico a través de observaciones GPS: primeros ensayos en Venezuela”. *Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América* [en línea], 2011, Venezuela vol. 36, no 10, pp. 721-730. [Consulta: 30 enero 2017]. ISSN 0378-1844. Disponible en: [http://www.interciencia.org/v36\\_10/721.pdf](http://www.interciencia.org/v36_10/721.pdf)
5. **CORREIA, PAUL.** Guía práctica del GPS. Barcelona-España: Marcombo, 2000, pp. 11-12
6. **COUCH, León W.** Sistemas de comunicación digitales y analógicos. México-Monterrey: Pearson Educación, 2008, pp.169-170, 372-375.
7. **FALLAS, Jorge.** Sistema de Posicionamiento Global. Costa Rica: Universidad Nacional Heredia, 2010. p. 10
8. **HERNÁNDEZ PAJARES, J.M; et al.** *Procesado de Datos GPS: código y fase Algoritmos, Técnicas y Recetas* [en línea].Barcelona-España: Centre de Publicacions del Campus Nord, 2001. [Consulta: 5 enero 2017]. Disponible en: <http://www.gage.es/forum/gps-data-processing-code-and-phase-algorithms-techniques-and-recipes>
9. **HERRADA, Alfredo, et al.** “Monitoreo de la calidad de datos GPS continuo: la estación UNSJ (San Juan, Argentina)”. *SciELO* [en línea], 2010, Argentina vol. 35, no 1, p. 57. [Consulta: 2 febrero 2017]. ISSN 1852-7744. Disponible en: <http://www.scielo.org.ar/pdf/geoacta/v35n1/v35n1a06.pdf>

10. **HUERTA, Eduardo; et al.** GPS Posicionamiento satelital. Rosario: UNR Editora, Universidad Nacional de Rosario, 2005, pp. I9-I11
  
11. **KAPLAN, Elliott D.; & HEGARTY, Christopher J.** Understanding GPS Principles and Applications. 2ª ed. Boston: Norwood Artech House. 2006. pp.123-132,4
  
12. **LETHAM, L.** GPS fácil. Uso del sistema de posicionamiento global. Barcelona-España: Paidotribo, 2001, p 5
  
13. **LUNA, Alberto; et al.** “IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA DE LA ETAPA DE CODIFICACION DE CANAL DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES”. Congreso Internacional en Ingeniería Electrónica, Mem. Electro [en línea], 2014, México- Chihuahua Vol. 36, pp. 301-305. [Consulta: 10 febrero 2017]. Disponible en: [http://depi.itchihuahua.edu.mx/display/memorias\\_electro/MemoriaElectro2014](http://depi.itchihuahua.edu.mx/display/memorias_electro/MemoriaElectro2014) ISSN 1405-2172
  
14. **LUNA, Alberto; et al.** “Uso de Matlab para la Síntesis en Lenguaje VHDL de Decodificadores Viterbi”. DIFU100ci@ [en línea], 2013, Mexico-Ensenada vol. 7, no 2, p. 84-87. [Consulta: 15 febrero 2017]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Juan\\_Nieto6/publication/264120653\\_Uso\\_de\\_Matlab\\_para\\_la\\_Sintesis\\_en\\_Lenguaje\\_VHDL\\_de\\_Decodificadores\\_Viterbi/links/53cec830cf25dc05cfacbe4/Usode-Matlab-para-la-Sintesis-en-Lenguaje-VHDL-de-Decodificadores-Viterbi.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Juan_Nieto6/publication/264120653_Uso_de_Matlab_para_la_Sintesis_en_Lenguaje_VHDL_de_Decodificadores_Viterbi/links/53cec830cf25dc05cfacbe4/Usode-Matlab-para-la-Sintesis-en-Lenguaje-VHDL-de-Decodificadores-Viterbi.pdf)
  
15. **MONCLOU, Alex; et al.** “Aplicación de modelos markovianos en sistemas de comunicación móvil celular GSM900”.Sistemas & Telemática [en línea], 2003, Colombia. pp. 42-43. [Consulta: 27 Febrero 2017]. Disponible en: [http://www.icesi.edu.co/contenido/pdfs/amonclou-jmantilla-anavarro-rcamerano-modelos\\_mercovianos.pdf](http://www.icesi.edu.co/contenido/pdfs/amonclou-jmantilla-anavarro-rcamerano-modelos_mercovianos.pdf)
  
16. **NAVSTAR, G. P. S.** Global positioning system standard positioning service signal specification. 1995. vol. 2, [Consulta: 9 enero 2017]. Disponible en: <http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/sigspec/gpsps1.pdf>. p. 14
  
17. **PACHAS, Raquel.** “Posicionamiento estático diferencial: errores y postproceso”. *Academia* [en línea], 2010, Venezuela vol. 9, no 17, p. 8. [ Consulta: 5

febrero 2017]. 1690-3226. Disponible en:  
<https://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/31823/1/articulo%201.pdf>

18. **PEÑAFIEL, Javier; & ZAYAS, Jorge.** Fundamentos del sistema GPS y aplicaciones en la topografía [en línea]. Madrid-Castilla-La Mancha: Colegio oficial de ingenieros técnicos en topografía delegación territorial de Madrid-Castilla-La Mancha, 2001. [Consulta: 7 febrero 2017]. Disponible en:  
<http://kimerius.com/app/download/5784853529/Fundamentos+del+sistema+GPS+y+aplicaciones+en+la+topograf%C3%ADa.pdf>
19. **PÉREZ, Constantino; et al.** Sistemas de telecomunicación. España: Ed. Universidad de Cantabria, 2007, p.313
20. **PÉREZ, Manuel; et al.** Electrónica de comunicaciones. Madrid-España: Pearson Education, 2003, pp. 267-268
21. **REY, Jorge Franco.** Nociones de topografía, geodesia y cartografía. España: Universidad de Extremadura, 1999, pp. 80-81
22. **SALLENT, Oriol; et al.** Principios de comunicaciones móviles. Barcelona-España: Univ. Politècnica de Catalunya, 2003, pp. 63-64
23. **SARDÓN, E, et al.** “Estimación del contenido total de electrones en la ionosfera usando datos del Sistema de Posicionamiento Global”. Instituto de Astronomía y Geodesia (UCM-CSIC). Facultad de Ciencias Matemáticas, Universidad Complutense, 1993, vol. 28040, pp. 171-172. [Consulta: 15 enero 2017]. Disponible en:  
[https://www.researchgate.net/profile/Esther\\_Sardon/publication/39389660\\_Estimacion\\_del\\_contenido\\_total\\_de\\_electrones\\_en\\_la\\_ionosfera\\_usando\\_datos\\_del\\_sistema\\_de\\_posicionamiento\\_global/links/54db4d260cf2ba88a68fb8f9.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Esther_Sardon/publication/39389660_Estimacion_del_contenido_total_de_electrones_en_la_ionosfera_usando_datos_del_sistema_de_posicionamiento_global/links/54db4d260cf2ba88a68fb8f9.pdf)
24. **SKLAR, Bernard.** “Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems. I. Characterization”. *IEEE Communications magazine* [en línea], 1997, United States vol. 35, no 9, p. 93. [Consulta: 5 marzo 2017]. ISSN 163-6804. Disponible en:  
<http://ieeexplore.ieee.org/document/601747/>
25. **STREMLER, Ferrel G.** Introducción a los sistemas de comunicación. 3<sup>ra</sup> edición. Wisconsin-Madison: Addison-Wesley, 1990, pp.655-657

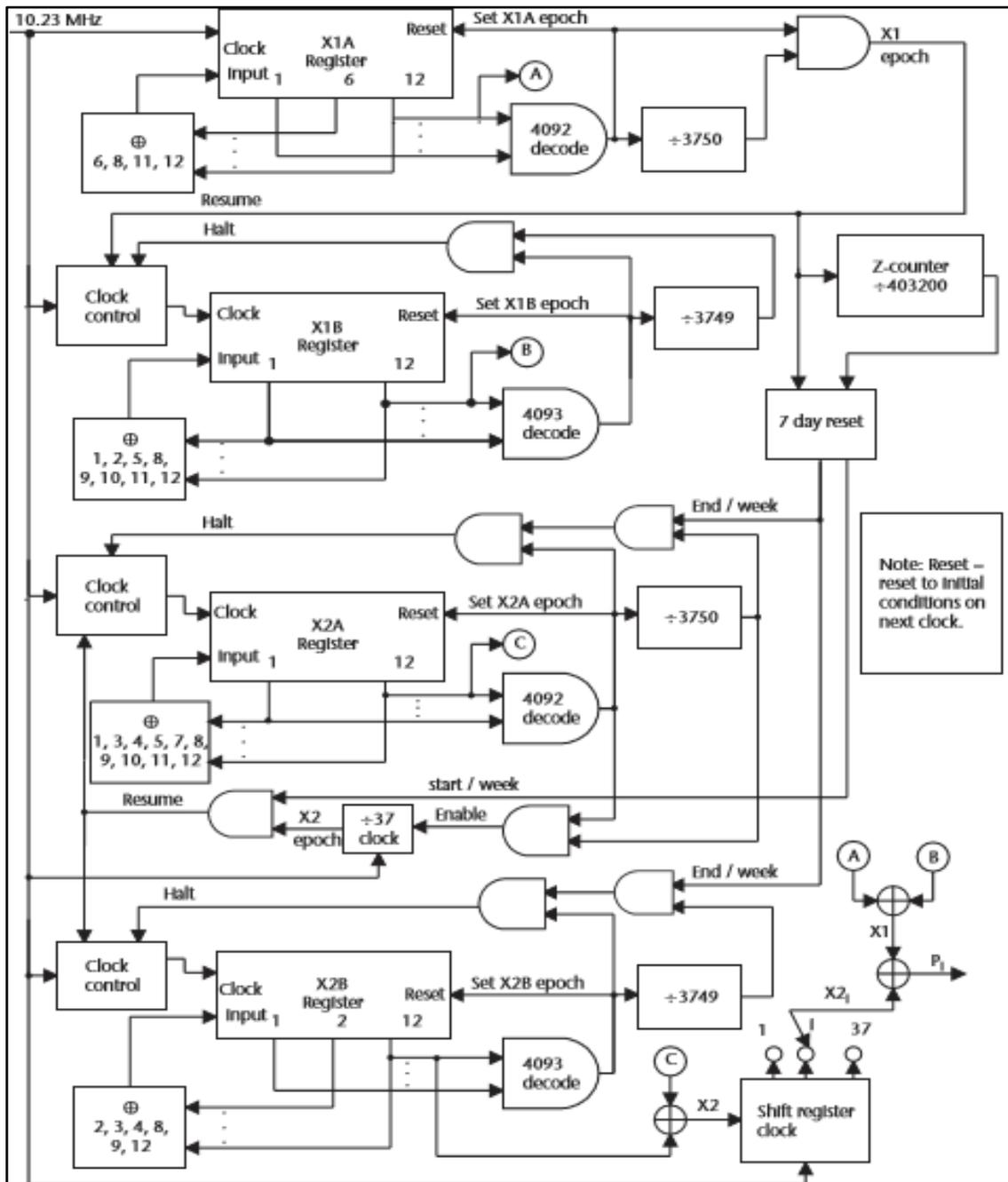
## ANEXOS

### ANEXO A FASES DEL POLINOMIO G2 PARA CADA SATÉLITE

Satellite ID Number	GPS PRN Signal Number	Code Phase Selection	Code Delay Chips	First 10 Chips Octal* C/A
		C/A (G <sub>2</sub> )	C/A	
1	1	2 ⊕ 6	5	1440
2	2	3 ⊕ 7	6	1620
3	3	4 ⊕ 8	7	1710
4	4	5 ⊕ 9	8	1744
5	5	1 ⊕ 9	17	1133
6	6	2 ⊕ 10	18	1455
7	7	1 ⊕ 8	139	1131
8	8	2 ⊕ 9	140	1454
9	9	3 ⊕ 10	141	1626
10	10	2 ⊕ 3	251	1504
11	11	3 ⊕ 4	252	1642
12	12	5 ⊕ 6	254	1750
13	13	6 ⊕ 7	255	1764
14	14	7 ⊕ 8	256	1772
15	15	8 ⊕ 9	257	1775
16	16	9 ⊕ 10	258	1776
17	17	1 ⊕ 4	469	1156
18	18	2 ⊕ 5	470	1467
19	19	3 ⊕ 6	471	1633
20	20	4 ⊕ 7	472	1715
21	21	5 ⊕ 8	473	1746
22	22	6 ⊕ 9	474	1763
23	23	1 ⊕ 3	509	1063
24	24	4 ⊕ 6	512	1706
25	25	5 ⊕ 7	513	1743
26	26	6 ⊕ 8	514	1761
27	27	7 ⊕ 9	515	1770
28	28	8 ⊕ 10	516	1774
29	29	1 ⊕ 6	859	1127
30	30	2 ⊕ 7	860	1453
31	31	3 ⊕ 8	861	1625
32	32	4 ⊕ 9	862	1712
***	33	5 ⊕ 10	863	1745
***	34**	4 ⊕ 10	950	1713
***	35	1 ⊕ 7	947	1134
***	36	2 ⊕ 8	948	1456
***	37**	4 ⊕ 10	950	1713

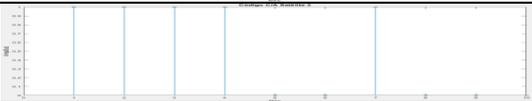
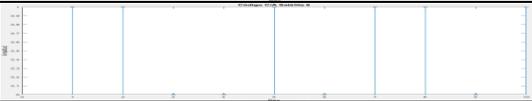
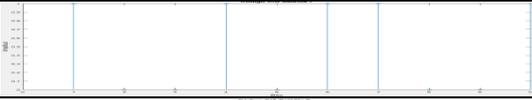
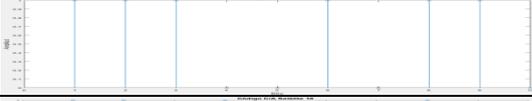
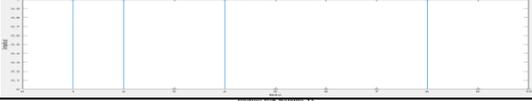
Fuente: (NAVSTAR, 1995, p.15)

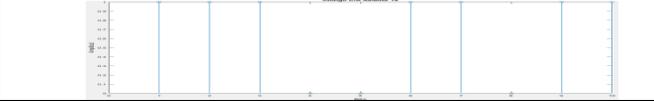
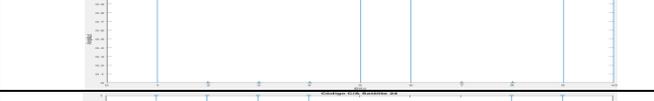
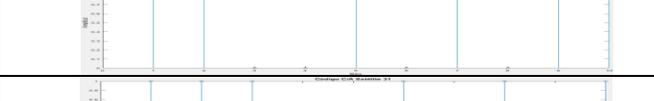
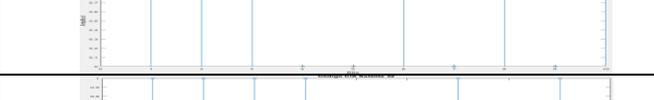
## ANEXO B ESTRUCTURA DEL CÓDIGO P



Fuente: (Elliott et al., 2011, p.131)

## ANEXO C 10 PRIMEROS CHIPS DE LOS CÓDIGOS C/A

ID del Satélite	Primeros 10 chips	Gráficas de chips
1	1100100000	
2	1110010000	
3	1111001000	
4	1111100100	
5	1001011011	
6	1100101101	
7	1001011001	
8	1100101100	
9	1110010110	
10	1101000100	
11	1110100010	
12	1111101000	
13	1111110100	
14	1111111010	
15	1111111101	
16	1111111110	
17	1001101110	

18	1100110111	
19	1110011011	
20	1111001101	
21	1111100110	
22	1111110011	
23	1000110011	
24	1111000110	
25	1111100011	
26	1111110001	
27	1111111000	
28	1111111100	
29	1001010111	
30	1100101011	
31	1110010101	
32	1111001010	

Realizado por: Iván Armijo (2017)

**ANEXO D ERRORES PRESENTADOS EN UN CANAL RAYLEIGH (0-100 m/s) A DIFERENTES SNR, CON Y SIN CODIFICACIÓN HAMMING**

SNR	Errores en codificación Hamming (2047, 2036) en un canal Rayleigh																							
	0 m/s		10 m/s		20 m/s		30 m/s		40 m/s		50 m/s		60 m/s		70 m/s		80 m/s		90 m/s		100 m/s			
	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H		
0 dB	93	141	132	127	119	122	136	124	118	155	129	136	121	158	149	137	130	158	118	149	141	150		
2 dB	5	9	18	14	11	3	10	10	19	11	15	13	18	15	36	14	25	34	33	32	36	47		
4 dB	0	0	4	2	8	3	9	0	8	2	15	0	18	7	24	15	28	12	22	21	23	39		
6 dB	1	0	2	0	8	3	12	0	15	3	16	0	22	8	21	15	21	18	30	30	27	34		
8 dB	1	0	4	0	5	0	9	0	10	3	15	3	16	15	23	15	26	24	27	22	28	24		
10 dB	1	0	3	0	5	0	10	0	12	0	13	6	21	3	22	12	19	18	24	30	22	19		
12 dB	0	0	6	0	8	0	10	0	11	3	12	6	13	12	26	12	18	16	26	19	25	43		
14 dB	1	0	5	2	7	0	7	0	11	0	17	3	17	12	16	15	21	9	21	32	30	29		
16 dB	0	0	2	0	7	0	4	0	11	2	14	3	18	3	19	10	20	18	26	18	28	30		
18 dB	1	0	2	0	8	0	9	0	15	0	18	3	15	8	22	8	23	9	20	22	26	21		
20 dB	1	0	3	0	5	0	12	0	13	11	11	3	18	8	13	15	20	18	28	22	27	28		
22 dB	0	0	4	0	8	0	8	0	10	2	17	3	20	9	18	18	22	18	25	26	28	23		
24 dB	1	0	3	0	7	2	11	2	14	3	13	0	24	5	18	13	26	21	24	24	27	36		
26 dB	1	0	1	0	7	0	10	3	15	0	14	2	11	8	16	9	19	15	23	39	27	27		
28 dB	0	0	3	0	7	0	7	0	12	0	17	9	18	12	22	15	18	15	23	22	30	21		
30 dB	0	0	3	0	8	0	12	0	11	0	14	8	16	3	19	6	26	16	31	15	27	16		
32 dB	1	0	3	0	6	0	9	0	10	2	18	5	20	3	18	11	23	18	23	18	30	34		
34 dB	1	0	5	0	7	0	8	0	12	6	16	8	18	17	19	15	25	18	22	17	31	26		
36 dB	0	0	5	0	8	0	8	0	13	0	11	5	19	0	18	15	26	27	17	19	24	34		
38 dB	0	0	4	0	6	0	7	0	11	2	9	3	20	11	19	18	16	18	25	16	27	39		
40 dB	0	0	4	0	6	0	11	5	9	0	17	0	16	12	19	8	29	14	28	21	30	23		

**ANEXO E      COMPARACIÓN DEL BER EN UN CANAL RAYLEIGH (0-50 m/s)  
CON Y SIN CODIFICACIÓN HAMMING**

SNR	BER codificación Hamming (2047, 2036) en un canal Rayleigh con velocidades de 0-50 m/s																		
	0 m/s			10 m/s			20 m/s			30 m/s			40 m/s			50 m/s			
	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	
<b>0 dB</b>	2,27e-03	3,45e-03	3,23e-03	3,10e-03	2,91e-03	2,98e-03	3,03e-03	3,32e-03	2,44e-04										
<b>2 dB</b>	1,22e-04	2,20e-04	4,40e-04	3,42e-04	2,69e-04	7,33e-05	2,44e-04												
<b>4 dB</b>	0	0	9,78e-05	4,89e-05	1,96e-04	7,33e-05	2,20e-04												
<b>6 dB</b>	2,44e-05	0	4,89e-05	0	1,96e-04	7,33e-05	2,93e-04												
<b>8 dB</b>	2,44e-05	0	9,78e-05	0	1,22e-04	0	2,20e-04												
<b>10 dB</b>	2,44e-05	0	7,33e-05	0	1,22e-04	0	2,44e-04												
<b>12 dB</b>	0	0	1,47e-04	0	1,96e-04	0	2,44e-04												
<b>14 dB</b>	2,44e-05	0	1,22e-04	4,89e-05	1,71e-04	0	1,71e-04												
<b>16 dB</b>	0	0	4,89e-05	0	1,71e-04	0	9,78e-05												
<b>18 dB</b>	2,44e-05	0	4,89e-05	0	1,96e-04	0	2,20e-04												
<b>20 dB</b>	2,44e-05	0	7,33e-05	0	1,22e-04	0	2,93e-04												
<b>22 dB</b>	0	0	9,78e-05	0	1,96e-04	0	1,96e-04												
<b>24 dB</b>	2,44e-05	0	7,33e-05	0	1,71e-04	4,89e-05	2,69e-04												
<b>26 dB</b>	2,44e-05	0	2,44e-05	0	1,71e-04	0	2,44e-04												
<b>28 dB</b>	0	0	7,33e-05	0	1,71e-04	0	1,71e-04												
<b>30 dB</b>	0	0	7,33e-05	0	1,96e-04	0	2,93e-04												
<b>32 dB</b>	2,44e-05	0	7,33e-05	0	1,47e-04	0	2,20e-04												
<b>34 dB</b>	2,44e-05	0	1,22e-04	0	1,71e-04	0	1,96e-04												
<b>36 dB</b>	0	0	1,22e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04												
<b>38 dB</b>	0	0	9,78e-05	0	1,47e-04	0	1,71e-04												
<b>40 dB</b>	0	0	9,78e-05	0	1,47e-04	0	2,69e-04												

**ANEXO F COMPARACIÓN DEL BER EN UN CANAL RAYLEIGH (60-100 m/s)  
CON Y SIN CODIFICACIÓN HAMMING**

<b>BER en codificación Hamming (2047, 2036) en un canal Rayleigh con velocidades de 60-100 m/s</b>															
<b>SNR</b>	<b>60 m/s</b>			<b>70 m/s</b>			<b>80 m/s</b>			<b>90 m/s</b>			<b>100 m/s</b>		
	<b>S/H</b>	<b>C/H</b>	<b>S/H</b>	<b>C/H</b>	<b>S/H</b>	<b>C/H</b>	<b>S/H</b>	<b>C/H</b>	<b>S/H</b>	<b>C/H</b>	<b>S/H</b>	<b>C/H</b>	<b>S/H</b>	<b>C/H</b>	
<b>0 dB</b>	2,96e-03	3,86e-03	3,64e-03	3,35e-03	3,18e-03	3,86e-03	3,18e-03	3,86e-03	2,88e-03	2,88e-03	3,64e-03	3,64e-03	3,45e-03	3,67e-03	
<b>2 dB</b>	4,40e-04	3,67e-04	8,80e-04	3,42e-04	6,11e-04	8,31e-04	6,11e-04	8,31e-04	8,06e-04	8,06e-04	7,82e-04	7,82e-04	8,80e-04	1,15e-03	
<b>4 dB</b>	4,40e-04	1,71e-04	5,87e-04	3,67e-04	6,84e-04	2,93e-04	6,84e-04	2,93e-04	5,38e-04	5,38e-04	5,13e-04	5,13e-04	5,62e-04	9,53e-04	
<b>6 dB</b>	5,38e-04	1,96e-04	5,13e-04	3,67e-04	5,13e-04	4,40e-04	5,13e-04	4,40e-04	7,33e-04	7,33e-04	7,33e-04	7,33e-04	6,60e-04	8,31e-04	
<b>8 dB</b>	3,91e-04	3,67e-04	5,62e-04	3,67e-04	6,35e-04	5,87e-04	6,35e-04	5,87e-04	6,60e-04	6,60e-04	5,38e-04	5,38e-04	6,84e-04	5,87e-04	
<b>10 dB</b>	5,13e-04	7,33e-05	5,38e-04	2,93e-04	4,64e-04	4,40e-04	4,64e-04	4,40e-04	5,87e-04	5,87e-04	7,33e-04	7,33e-04	5,38e-04	4,64e-04	
<b>12 dB</b>	3,18e-04	2,93e-04	6,35e-04	2,93e-04	4,40e-04	3,91e-04	4,40e-04	3,91e-04	6,35e-04	6,35e-04	4,64e-04	4,64e-04	6,11e-04	1,05e-03	
<b>14 dB</b>	4,15e-04	2,93e-04	3,91e-04	3,67e-04	5,13e-04	2,20e-04	5,13e-04	2,20e-04	5,13e-04	5,13e-04	7,82e-04	7,82e-04	7,33e-04	7,09e-04	
<b>16 dB</b>	4,40e-04	7,33e-05	4,64e-04	2,44e-04	4,89e-04	4,40e-04	4,89e-04	4,40e-04	6,35e-04	6,35e-04	4,40e-04	4,40e-04	6,84e-04	7,33e-04	
<b>18 dB</b>	3,67e-04	1,96e-04	5,38e-04	1,96e-04	5,62e-04	2,20e-04	5,62e-04	2,20e-04	4,89e-04	4,89e-04	5,38e-04	5,38e-04	6,35e-04	5,13e-04	
<b>20 dB</b>	4,40e-04	1,96e-04	3,18e-04	3,67e-04	3,18e-04	4,40e-04	3,67e-04	4,40e-04	6,84e-04	6,84e-04	5,38e-04	5,38e-04	6,60e-04	6,84e-04	
<b>22 dB</b>	4,89e-04	2,20e-04	4,40e-04	4,40e-04	5,38e-04	4,40e-04	5,38e-04	4,40e-04	6,11e-04	6,11e-04	6,35e-04	6,35e-04	6,84e-04	5,62e-04	
<b>24 dB</b>	5,87e-04	1,22e-04	4,40e-04	3,18e-04	6,35e-04	5,13e-04	6,35e-04	5,13e-04	5,87e-04	5,87e-04	5,87e-04	5,87e-04	6,60e-04	8,80e-04	
<b>26 dB</b>	2,69e-04	1,96e-04	3,91e-04	2,20e-04	4,64e-04	3,67e-04	4,64e-04	3,67e-04	5,62e-04	5,62e-04	9,53e-04	9,53e-04	6,60e-04	6,60e-04	
<b>28 dB</b>	4,40e-04	2,93e-04	5,38e-04	3,67e-04	4,40e-04	4,40e-04	4,40e-04	3,67e-04	5,62e-04	5,62e-04	5,38e-04	5,38e-04	7,33e-04	5,13e-04	
<b>30 dB</b>	3,91e-04	7,33e-05	4,64e-04	1,47e-04	6,35e-04	3,91e-04	6,35e-04	3,91e-04	7,58e-04	7,58e-04	3,67e-04	3,67e-04	6,60e-04	3,91e-04	
<b>32 dB</b>	4,89e-04	7,33e-05	4,40e-04	2,69e-04	5,62e-04	4,40e-04	5,62e-04	4,40e-04	5,62e-04	5,62e-04	4,40e-04	4,40e-04	7,33e-04	8,31e-04	
<b>34 dB</b>	4,40e-04	4,15e-04	4,64e-04	3,67e-04	6,11e-04	4,40e-04	6,11e-04	4,40e-04	5,38e-04	5,38e-04	4,15e-04	4,15e-04	7,58e-04	6,35e-04	
<b>36 dB</b>	4,64e-04	0	4,40e-04	3,67e-04	6,35e-04	6,60e-04	6,35e-04	6,60e-04	4,15e-04	4,15e-04	4,64e-04	4,64e-04	5,87e-04	8,31e-04	
<b>38 dB</b>	4,89e-04	2,69e-04	4,64e-04	4,40e-04	4,40e-04	4,40e-04	4,40e-04	4,40e-04	6,11e-04	6,11e-04	3,91e-04	3,91e-04	6,60e-04	9,53e-04	
<b>40 dB</b>	3,91e-04	2,93e-04	4,64e-04	1,96e-04	7,09e-04	3,42e-04	7,09e-04	3,42e-04	6,84e-04	6,84e-04	5,13e-04	5,13e-04	7,33e-04	5,62e-04	

**ANEXO G ERRORES PRESENTADOS EN UN CANAL RÍCIAN (0-100 m/s) A DIFERENTES SNR, CON Y SIN CODIFICACIÓN HAMMING**

SNR		Errores codificación Hamming (2047, 2036) en un canal Rician																				
		0 m/s		10 m/s		20 m/s		30 m/s		40 m/s		50 m/s		60 m/s		70 m/s		80 m/s		90 m/s		100 m/s
	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H	S/H	C/H
0 dB	140	115	100	133	126	125	106	124	116	137	114	112	98	141	108	126	112	127	94	149	122	133
2 dB	10	9	0	9	20	3	6	6	12	4	14	18	16	8	11	20	11	12	14	6	24	12
4 dB	1	3	0	0	4	0	4	0	6	0	2	3	8	6	8	3	6	12	12	9	6	10
6 dB	0	0	0	0	4	0	6	0	4	0	4	3	4	8	8	6	4	0	8	6	7	13
8 dB	0	0	0	0	4	0	4	6	2	3	6	0	0	12	11	6	10	6	10	12	6	18
10 dB	0	0	2	0	4	0	4	3	0	3	10	3	4	3	6	3	12	15	6	7	20	6
12 dB	0	0	0	0	2	3	0	0	6	5	8	6	4	0	10	3	2	6	8	9	4	3
14 dB	0	0	0	0	4	0	4	2	6	3	4	3	4	3	8	3	4	9	6	18	6	6
16 dB	0	0	0	0	3	0	4	3	4	3	4	0	10	0	8	6	10	9	6	15	11	15
18 dB	0	0	0	0	2	0	2	0	4	0	4	3	8	3	6	5	6	15	14	12	8	13
20 dB	0	0	0	0	2	0	4	0	6	0	10	0	5	5	8	5	7	15	6	3	10	6
22 dB	0	0	1	0	0	0	4	0	4	3	2	2	12	3	4	6	18	9	6	0	8	12
24 dB	0	0	2	3	4	0	2	0	0	3	6	12	2	6	4	9	10	3	13	24	6	15
26 dB	0	0	2	0	0	3	2	3	4	3	8	3	2	6	8	0	10	6	9	0	12	3
28 dB	0	0	0	0	0	3	2	0	6	0	6	15	2	12	6	3	6	9	15	12	8	6
30 dB	0	0	0	0	0	1	6	0	5	0	8	8	4	3	10	6	10	6	9	6	4	15
32 dB	0	0	2	0	2	2	6	0	5	3	2	6	4	9	2	9	4	12	6	6	8	14
34 dB	0	0	2	0	4	0	8	0	4	9	4	3	0	5	4	3	10	15	2	6	16	10
36 dB	0	0	0	0	0	5	2	3	2	0	10	3	7	9	5	11	8	6	8	6	12	9
38 dB	0	0	0	0	2	0	4	2	4	0	4	3	4	6	6	3	6	6	6	21	13	20
40 dB	0	0	3	0	0	3	2	2	2	3	4	3	4	6	6	9	6	9	12	6	12	22

**ANEXO H COMPARACIÓN DEL BER EN UN CANAL RCIAN (0-50 m/s) CON Y SIN CODIFICACIÓN HAMMING**

SNR	BER codificación Hamming (2047, 2036) en un canal Rician con velocidades de 0-50 m/s																	
	0 m/s			10 m/s			20 m/s			30 m/s			40 m/s			50 m/s		
	S/H	C/H	C/H	S/H	C/H	C/H	S/H	C/H	C/H	S/H	C/H	C/H	S/H	C/H	C/H	S/H	C/H	C/H
0 dB	3,42e-03	2,81e-03	3,25e-03	2,44e-03	3,08e-03	3,05e-03	2,59e-03	3,03e-03	2,83e-03	3,35e-03	3,35e-03	2,79e-03	3,35e-03	2,79e-03	3,35e-03	2,79e-03	3,35e-03	2,74e-03
2 dB	2,44e-04	2,20e-04	2,20e-04	0	4,89e-04	7,33e-05	1,47e-04	1,47e-04	2,93e-04	9,78e-05	9,78e-05	3,42e-04	9,78e-05	3,42e-04	9,78e-05	3,42e-04	9,78e-05	4,40e-04
4 dB	2,44e-05	7,33e-05	0	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	1,47e-04	0	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	7,33e-05
6 dB	0	0	0	0	9,78e-05	0	1,47e-04	0	9,78e-05	0	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	7,33e-05
8 dB	0	0	0	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	0
10 dB	0	0	4,89e-05	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	0	0,00e+00	0	7,33e-05	0	2,44e-04	0	7,33e-05
12 dB	0	0	0	0	4,89e-05	7,33e-05	0	0	1,47e-04	0	0	1,47e-04	0	1,22e-04	0	1,96e-04	0	1,47e-04
14 dB	0	0	0	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	9,78e-05	4,89e-05	0	1,47e-04	0	7,33e-05	0	9,78e-05	0	7,33e-05
16 dB	0	0	0	0	7,33e-05	0	9,78e-05	0	9,78e-05	7,33e-05	0	9,78e-05	0	7,33e-05	0	9,78e-05	0	0
18 dB	0	0	0	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	7,33e-05
20 dB	0	0	0	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	9,78e-05	0	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	2,44e-04	0	0
22 dB	0	0	2,44e-05	0	0	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	0	9,78e-05	0	7,33e-05	0	4,89e-05	0	4,89e-05
24 dB	0	0	4,89e-05	7,33e-05	9,78e-05	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	0	0	0	7,33e-05	0	1,47e-04	0	2,93e-04
26 dB	0	0	4,89e-05	0	0	7,33e-05	4,89e-05	7,33e-05	9,78e-05	7,33e-05	0	9,78e-05	0	7,33e-05	0	1,96e-04	0	7,33e-05
28 dB	0	0	0	0	0	7,33e-05	4,89e-05	7,33e-05	4,89e-05	0	0	1,47e-04	0	0	0	1,47e-04	0	3,67e-04
30 dB	0	0	0	0	0	2,44e-05	1,47e-04	0	1,47e-04	0	0	1,22e-04	0	0	0	1,96e-04	0	1,96e-04
32 dB	0	0	4,89e-05	0	4,89e-05	4,89e-05	1,47e-04	0	1,22e-04	0	0	1,22e-04	0	7,33e-05	0	4,89e-05	0	1,47e-04
34 dB	0	0	4,89e-05	0	9,78e-05	0	1,96e-04	0	9,78e-05	0	0	9,78e-05	0	2,20e-04	0	9,78e-05	0	7,33e-05
36 dB	0	0	0	0	0	1,22e-04	4,89e-05	7,33e-05	4,89e-05	0	0	4,89e-05	0	0	0	2,44e-04	0	7,33e-05
38 dB	0	0	0	0	4,89e-05	0	9,78e-05	4,89e-05	9,78e-05	0	0	9,78e-05	0	0	0	9,78e-05	0	7,33e-05
40 dB	0	0	7,33e-05	0	0	7,33e-05	4,89e-05	4,89e-05	4,89e-05	0	0	4,89e-05	0	7,33e-05	0	9,78e-05	0	7,33e-05

**ANEXO I COMPARACIÓN DEL BER EN UN CANAL RICIÁN (60-100 m/s) CON Y SIN CODIFICACIÓN HAMMING**

<b>BER codificación Hamming (2047, 2036) en un canal Ricián con velocidades de 60-100 m/s</b>															
SNR	60 m/s			70 m/s			80 m/s			90 m/s			100 m/s		
	S/H	C/H	S/H	C/H											
0 dB	2,39e-03	3,45e-03	2,64e-03	3,08e-03	2,74e-03	3,10e-03	2,30e-03	3,64e-03	2,30e-03	3,64e-03	2,98e-03	3,25e-03			
2 dB	3,91e-04	1,96e-04	2,69e-04	4,89e-04	2,69e-04	2,93e-04	3,42e-04	1,47e-04	2,93e-04	1,47e-04	5,87e-04	2,93e-04			
4 dB	1,96e-04	1,47e-04	1,96e-04	7,33e-05	1,47e-04	2,93e-04	2,93e-04	2,20e-04	2,93e-04	2,20e-04	1,47e-04	2,44e-04			
6 dB	9,78e-05	1,96e-04	1,96e-04	1,47e-04	9,78e-05	0	1,96e-04	1,47e-04	1,96e-04	1,47e-04	1,71e-04	3,18e-04			
8 dB	0	2,93e-04	2,69e-04	1,47e-04	2,44e-04	1,47e-04	2,44e-04	2,93e-04	2,44e-04	2,93e-04	1,47e-04	4,40e-04			
10 dB	9,78e-05	7,33e-05	1,47e-04	7,33e-05	2,93e-04	3,67e-04	1,47e-04	1,71e-04	1,47e-04	1,71e-04	4,89e-04	1,47e-04			
12 dB	9,78e-05	0	2,44e-04	7,33e-05	4,89e-05	1,47e-04	1,96e-04	2,20e-04	1,96e-04	2,20e-04	9,78e-05	7,33e-05			
14 dB	9,78e-05	7,33e-05	1,96e-04	7,33e-05	9,78e-05	2,20e-04	1,47e-04	4,40e-04	1,47e-04	4,40e-04	1,47e-04	1,47e-04			
16 dB	2,44e-04	0	1,96e-04	1,47e-04	2,44e-04	2,20e-04	1,47e-04	3,67e-04	1,47e-04	3,67e-04	2,69e-04	3,67e-04			
18 dB	1,96e-04	7,33e-05	1,47e-04	1,22e-04	1,47e-04	3,67e-04	3,42e-04	2,93e-04	3,42e-04	2,93e-04	1,96e-04	3,18e-04			
20 dB	1,22e-04	1,22e-04	1,96e-04	1,22e-04	1,71e-04	3,67e-04	1,47e-04	7,33e-05	1,47e-04	7,33e-05	2,44e-04	1,47e-04			
22 dB	2,93e-04	7,33e-05	9,78e-05	1,47e-04	4,40e-04	2,20e-04	1,47e-04	0	1,47e-04	0	1,96e-04	2,93e-04			
24 dB	4,89e-05	1,47e-04	9,78e-05	2,20e-04	2,44e-04	7,33e-05	3,18e-04	5,87e-04	3,18e-04	5,87e-04	1,47e-04	3,67e-04			
26 dB	4,89e-05	1,47e-04	1,96e-04	0	2,44e-04	1,47e-04	2,20e-04	0	2,20e-04	0	2,93e-04	7,33e-05			
28 dB	4,89e-05	2,93e-04	1,47e-04	7,33e-05	1,47e-04	2,20e-04	3,67e-04	2,93e-04	3,67e-04	2,93e-04	1,96e-04	1,47e-04			
30 dB	9,78e-05	7,33e-05	2,44e-04	1,47e-04	2,44e-04	1,47e-04	2,20e-04	1,47e-04	2,20e-04	1,47e-04	9,78e-05	3,67e-04			
32 dB	9,78e-05	2,20e-04	4,89e-05	2,20e-04	9,78e-05	2,93e-04	1,47e-04	1,47e-04	1,47e-04	1,47e-04	1,96e-04	3,42e-04			
34 dB	0	1,22e-04	9,78e-05	7,33e-05	2,44e-04	3,67e-04	4,89e-05	1,47e-04	4,89e-05	1,47e-04	3,91e-04	2,44e-04			
36 dB	1,71e-04	2,20e-04	1,22e-04	2,69e-04	1,96e-04	1,47e-04	1,96e-04	1,47e-04	1,96e-04	1,47e-04	2,93e-04	2,20e-04			
38 dB	9,78e-05	1,47e-04	1,47e-04	7,33e-05	1,47e-04	1,47e-04	1,47e-04	5,13e-04	1,47e-04	5,13e-04	3,18e-04	4,89e-04			
40 dB	9,78e-05	1,47e-04	1,47e-04	2,20e-04	1,47e-04	2,20e-04	2,93e-04	1,47e-04	2,93e-04	1,47e-04	2,93e-04	5,38e-04			

**ANEXO J ERRORES PRESENTADOS EN UN CANAL RAYLEIGH (0-100 m/s) A DIFERENTES SNR, CON Y SIN CODIFICACIÓN CONVOLUCIONAL (2, 1, 3)**

SNR		Errores codificación Convolutiva (2, 1, 3) en un canal Rayleigh																				
		0 m/s		10 m/s		20 m/s		30 m/s		40 m/s		50 m/s		60 m/s		70 m/s		80 m/s		90 m/s		100 m/s
	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C
0 dB	93	203	132	172	119	161	136	157	118	169	129	171	121	154	149	198	130	164	118	165	141	155
2 dB	5	20	18	11	11	10	10	16	19	14	15	7	18	7	36	3	25	16	33	10	36	9
4 dB	0	0	4	0	8	0	9	0	8	0	15	0	18	0	24	2	28	2	22	0	23	0
6 dB	1	0	2	0	8	0	12	0	15	0	16	0	22	0	21	0	21	0	30	0	27	0
8 dB	1	0	4	0	5	0	9	0	10	0	15	0	16	0	23	0	26	0	27	0	28	0
10 dB	1	0	3	0	5	0	10	0	12	0	13	0	21	0	22	0	19	0	24	0	22	0
12 dB	0	0	6	0	8	0	10	0	11	0	12	0	13	0	26	0	18	0	26	0	25	0
14 dB	1	0	5	0	7	0	7	0	11	0	17	0	17	0	16	0	21	0	21	0	30	0
16 dB	0	0	2	0	7	0	4	0	11	0	14	0	18	0	19	0	20	0	26	0	28	0
18 dB	1	0	2	0	8	0	9	0	15	0	18	0	15	0	22	0	23	0	20	0	26	0
20 dB	1	0	3	0	5	0	12	0	13	0	11	0	18	0	13	0	20	0	28	0	27	0
22 dB	0	0	4	0	8	0	8	0	10	0	17	0	20	0	18	0	22	0	25	0	28	0
24 dB	1	0	3	0	7	0	11	0	14	0	13	0	24	0	18	0	26	0	24	0	27	0
26 dB	1	0	1	0	7	0	10	0	15	0	14	0	11	0	16	0	19	0	23	0	27	0
28 dB	0	0	3	0	7	0	7	0	12	0	17	0	18	0	22	0	18	0	23	0	30	0
30 dB	0	0	3	0	8	0	12	0	11	0	14	0	16	0	19	0	26	0	31	0	27	0
32 dB	1	0	3	0	6	0	9	0	10	0	18	0	20	0	18	0	23	0	23	0	30	0
34 dB	1	0	5	0	7	0	8	0	12	0	16	0	18	0	19	0	25	0	22	0	31	0
36 dB	0	0	5	0	8	0	8	0	13	0	11	0	19	0	18	0	26	0	17	0	24	0
38 dB	0	0	4	0	6	0	7	0	11	0	9	0	20	0	19	0	16	0	25	0	27	0
40 dB	0	0	4	0	6	0	11	0	9	0	17	0	16	0	19	0	29	0	28	0	30	0

**ANEXO K COMPARACIÓN DEL BER EN UN CANAL RAYLEIGH (0-50 m/s)  
CON Y SIN CODIFICACIÓN CONVOLUCIONAL (2, 1, 3)**

SNR	BER codificación Convolutcional (2, 1, 3) en un canal Rayleigh con velocidades de 0-50 m/s											
	0 m/s		10 m/s		20 m/s		30 m/s		40 m/s		50 m/s	
	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C
0 dB	2,27e-03	4,96e-03	3,23e-03	4,20e-03	2,91e-03	3,93e-03	3,32e-03	3,84e-03	2,88e-03	4,13e-03	3,15e-03	4,18e-03
2 dB	1,22e-04	4,89e-04	4,40e-04	2,69e-04	2,69e-04	2,44e-04	2,44e-04	3,91e-04	4,64e-04	3,42e-04	3,67e-04	1,71e-04
4 dB	0	0	9,78e-05	0	1,96e-04	0	2,20e-04	0	1,96e-04	0	3,67e-04	0
6 dB	2,44e-05	0	4,89e-05	0	1,96e-04	0	2,93e-04	0	3,67e-04	0	3,91e-04	0
8 dB	2,44e-05	0	9,78e-05	0	1,22e-04	0	2,20e-04	0	2,44e-04	0	3,67e-04	0
10 dB	2,44e-05	0	7,33e-05	0	1,22e-04	0	2,44e-04	0	2,93e-04	0	3,18e-04	0
12 dB	0	0	1,47e-04	0	1,96e-04	0	2,44e-04	0	2,69e-04	0	2,93e-04	0
14 dB	2,44e-05	0	1,22e-04	0	1,71e-04	0	1,71e-04	0	2,69e-04	0	4,15e-04	0
16 dB	0	0	4,89e-05	0	1,71e-04	0	9,78e-05	0	2,69e-04	0	3,42e-04	0
18 dB	2,44e-05	0	4,89e-05	0	1,96e-04	0	2,20e-04	0	3,67e-04	0	4,40e-04	0
20 dB	2,44e-05	0	7,33e-05	0	1,22e-04	0	2,93e-04	0	3,18e-04	0	2,69e-04	0
22 dB	0	0	9,78e-05	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	2,44e-04	0	4,15e-04	0
24 dB	2,44e-05	0	7,33e-05	0	1,71e-04	0	2,69e-04	0	3,42e-04	0	3,18e-04	0
26 dB	2,44e-05	0	2,44e-05	0	1,71e-04	0	2,44e-04	0	3,67e-04	0	3,42e-04	0
28 dB	0	0	7,33e-05	0	1,71e-04	0	1,71e-04	0	2,93e-04	0	4,15e-04	0
30 dB	0	0	7,33e-05	0	1,96e-04	0	2,93e-04	0	2,69e-04	0	3,42e-04	0
32 dB	2,44e-05	0	7,33e-05	0	1,47e-04	0	2,20e-04	0	2,44e-04	0	4,40e-04	0
34 dB	2,44e-05	0	1,22e-04	0	1,71e-04	0	1,96e-04	0	2,93e-04	0	3,91e-04	0
36 dB	0	0	1,22e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	3,18e-04	0	2,69e-04	0
38 dB	0	0	9,78e-05	0	1,47e-04	0	1,71e-04	0	2,69e-04	0	2,20e-04	0
40 dB	0	0	9,78e-05	0	1,47e-04	0	2,69e-04	0	2,20e-04	0	4,15e-04	0

**ANEXO L COMPARACIÓN DEL BER EN UN CANAL RAYLEIGH (60-100 m/s)  
CON Y SIN CODIFICACIÓN CONVOLUCIONAL (2, 1, 3)**

SNR	BER codificación Convolutacional (2, 1, 3) en un canal Rayleigh con velocidades de 60-100 m/s														
	60 m/s			70 m/s			80 m/s			90 m/s			100 m/s		
	S/C	C/C	C/C	S/C	C/C	C/C	S/C	C/C	C/C	S/C	C/C	C/C	S/C	C/C	C/C
0 dB	2,96e-03	3,76e-03	4,84e-03	3,64e-03	4,84e-03	4,01e-03	3,18e-03	4,01e-03	2,88e-03	4,03e-03	4,03e-03	2,88e-03	3,45e-03	3,79e-03	3,79e-03
2 dB	4,40e-04	1,71e-04	7,33e-05	8,80e-04	7,33e-05	3,91e-04	6,11e-04	3,91e-04	8,06e-04	2,44e-04	2,44e-04	8,06e-04	8,80e-04	2,20e-04	2,20e-04
4 dB	4,40e-04	0	4,89e-05	5,87e-04	4,89e-05	4,89e-05	6,84e-04	4,89e-05	5,38e-04	0	0	5,38e-04	5,62e-04	0	0
6 dB	5,38e-04	0	0	5,13e-04	0	0	5,13e-04	0	7,33e-04	0	0	7,33e-04	6,60e-04	0	0
8 dB	3,91e-04	0	0	5,62e-04	0	0	6,35e-04	0	6,60e-04	0	0	6,60e-04	6,84e-04	0	0
10 dB	5,13e-04	0	0	5,38e-04	0	0	4,64e-04	0	5,87e-04	0	0	5,87e-04	5,38e-04	0	0
12 dB	3,18e-04	0	0	6,35e-04	0	0	4,40e-04	0	6,35e-04	0	0	6,35e-04	6,11e-04	0	0
14 dB	4,15e-04	0	0	3,91e-04	0	0	5,13e-04	0	5,13e-04	0	0	5,13e-04	7,33e-04	0	0
16 dB	4,40e-04	0	0	4,64e-04	0	0	4,89e-04	0	6,35e-04	0	0	6,35e-04	6,84e-04	0	0
18 dB	3,67e-04	0	0	5,38e-04	0	0	5,62e-04	0	4,89e-04	0	0	4,89e-04	6,35e-04	0	0
20 dB	4,40e-04	0	0	3,18e-04	0	0	4,89e-04	0	6,84e-04	0	0	6,84e-04	6,60e-04	0	0
22 dB	4,89e-04	0	0	4,40e-04	0	0	5,38e-04	0	6,11e-04	0	0	6,11e-04	6,84e-04	0	0
24 dB	5,87e-04	0	0	4,40e-04	0	0	6,35e-04	0	5,87e-04	0	0	5,87e-04	6,60e-04	0	0
26 dB	2,69e-04	0	0	3,91e-04	0	0	4,64e-04	0	5,62e-04	0	0	5,62e-04	6,60e-04	0	0
28 dB	4,40e-04	0	0	5,38e-04	0	0	4,40e-04	0	5,62e-04	0	0	5,62e-04	7,33e-04	0	0
30 dB	3,91e-04	0	0	4,64e-04	0	0	6,35e-04	0	7,58e-04	0	0	7,58e-04	6,60e-04	0	0
32 dB	4,89e-04	0	0	4,40e-04	0	0	5,62e-04	0	5,62e-04	0	0	5,62e-04	7,33e-04	0	0
34 dB	4,40e-04	0	0	4,64e-04	0	0	6,11e-04	0	5,38e-04	0	0	5,38e-04	7,58e-04	0	0
36 dB	4,64e-04	0	0	4,40e-04	0	0	6,35e-04	0	4,15e-04	0	0	4,15e-04	5,87e-04	0	0
38 dB	4,89e-04	0	0	4,64e-04	0	0	3,91e-04	0	6,11e-04	0	0	6,11e-04	6,60e-04	0	0
40 dB	3,91e-04	0	0	4,64e-04	0	0	7,09e-04	0	6,84e-04	0	0	6,84e-04	7,33e-04	0	0

**ANEXO M ERRORES PRESENTADOS EN UN CANAL RICIAN (0-100 m/s) A DIFERENTES SNR, CON Y SIN CODIFICACIÓN CONVOLUCIONAL (2, 1, 3)**

SNR	Errores codificación Convolutiva (2, 1, 3) en un canal Rician																							
	0 m/s		10 m/s		20 m/s		30 m/s		40 m/s		50 m/s		60 m/s		70 m/s		80 m/s		90 m/s		100 m/s			
	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C		
0 dB	140	165	100	152	126	196	106	152	116	186	114	171	98	150	108	152	112	139	94	183	122	159		
2 dB	10	14	0	10	20	7	6	16	12	16	14	7	16	18	11	7	11	11	14	9	24	9		
4 dB	1	0	0	0	4	0	4	0	6	0	2	0	8	0	8	0	6	0	12	0	6	0		
6 dB	0	0	0	0	4	0	6	0	4	0	4	0	4	0	8	0	4	0	8	0	7	0		
8 dB	0	0	0	0	4	0	4	0	2	0	6	0	0	0	11	0	10	0	10	0	6	0		
10 dB	0	0	2	0	4	0	4	0	0	0	10	0	4	0	6	0	12	0	6	0	20	0		
12 dB	0	0	0	0	2	0	0	0	6	0	8	0	4	0	10	0	2	0	8	0	4	0		
14 dB	0	0	0	0	4	0	4	0	6	0	4	0	4	0	8	0	4	0	6	0	6	0		
16 dB	0	0	0	0	3	0	4	0	4	0	4	0	10	0	8	0	10	0	6	0	11	0		
18 dB	0	0	0	0	2	0	2	0	4	0	4	0	8	0	6	0	6	0	14	0	8	0		
20 dB	0	0	0	0	2	0	4	0	6	0	10	0	5	0	8	0	7	0	6	0	10	0		
22 dB	0	0	1	0	0	0	4	0	4	0	2	0	12	0	4	0	18	0	6	0	8	0		
24 dB	0	0	2	0	4	0	2	0	0	0	6	0	2	0	4	0	10	0	13	0	6	0		
26 dB	0	0	2	0	0	0	2	0	4	0	8	0	2	0	8	0	10	0	9	0	12	0		
28 dB	0	0	0	0	0	0	2	0	6	0	6	0	2	0	6	0	6	0	15	0	8	0		
30 dB	0	0	0	0	0	0	6	0	5	0	8	0	4	0	10	0	10	0	9	0	4	0		
32 dB	0	0	2	0	2	0	6	0	5	0	2	0	4	0	2	0	4	0	6	0	8	0		
34 dB	0	0	2	0	4	0	8	0	4	0	4	0	0	0	4	0	10	0	2	0	16	0		
36 dB	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	10	0	7	0	5	0	8	0	8	0	12	0		
38 dB	0	0	0	0	2	0	4	0	4	0	4	0	4	0	6	0	6	0	6	0	13	0		
40 dB	0	0	3	0	0	0	2	0	2	0	4	0	4	0	6	0	6	0	12	0	12	0		

**ANEXO N COMPARACIÓN DEL BER EN UN CANAL RICIAN (0-50 m/s) CON Y SIN CODIFICACIÓN CONVOLUCIONAL (2, 1, 3)**

SNR	BER codificación Convolutacional (2, 1, 3) en un canal Rician con velocidades de 0-50 m/s																		
	0 m/s			10 m/s			20 m/s			30 m/s			40 m/s			50 m/s			
	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	
0 dB	3,42e-03	4,03e-03	2,44e-03	3,71e-03	3,08e-03	4,79e-03	3,71e-03	2,59e-03	3,71e-03	2,83e-03	4,55e-03	2,79e-03	4,18e-03	2,44e-03	3,42e-04	3,42e-04	3,42e-04	1,71e-04	1,71e-04
2 dB	2,44e-04	3,42e-04	0	2,44e-04	4,89e-04	1,71e-04	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	1,47e-04	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0
4 dB	2,44e-05	0	0	0	9,78e-05	0	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0
6 dB	0	0	0	0	9,78e-05	0	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	4,89e-05	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0
8 dB	0	0	0	0	9,78e-05	0	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0
10 dB	0	0	4,89e-05	0	9,78e-05	0	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	0	0	2,44e-04	0	2,44e-04	0	2,44e-04	0
12 dB	0	0	0	0	4,89e-05	0	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	0	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0
14 dB	0	0	0	0	9,78e-05	0	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	1,47e-04	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0
16 dB	0	0	0	0	7,33e-05	0	0	9,78e-05	0										
18 dB	0	0	0	0	4,89e-05	0	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0
20 dB	0	0	0	0	4,89e-05	0	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	9,78e-05	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	2,44e-04	0
22 dB	0	0	2,44e-05	0	0	0	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0
24 dB	0	0	4,89e-05	0	9,78e-05	0	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	0	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0
26 dB	0	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	9,78e-05	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0
28 dB	0	0	0	0	0	0	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0
30 dB	0	0	0	0	0	0	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	1,22e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0
32 dB	0	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	1,22e-04	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0
34 dB	0	0	4,89e-05	0	9,78e-05	0	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0
36 dB	0	0	0	0	0	0	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	2,44e-04	0	2,44e-04	0	2,44e-04	0
38 dB	0	0	0	0	4,89e-05	0	0	9,78e-05	0										
40 dB	0	0	7,33e-05	0	0	0	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0

**ANEXO O COMPARACIÓN DEL BER EN UN CANAL Rician (60-100 m/s) CON Y SIN CODIFICACIÓN CONVOLUCIONAL (2, 1, 3)**

SNR	BER codificación Convolutcional (2, 1, 3) en un canal Rician con velocidades de 60-100 m/s															
	60 m/s			70 m/s			80 m/s			90 m/s			100 m/s			
	S/C	C/C	C/C	S/C	C/C	C/C	S/C	C/C	C/C	S/C	C/C	C/C	S/C	C/C	C/C	
0 dB	2,39e-03	3,67e-03	2,64e-03	3,71e-03	2,74e-03	3,40e-03	2,30e-03	4,47e-03	2,98e-03	3,89e-03	2,98e-03	4,47e-03	2,98e-03	3,89e-03	2,98e-03	3,89e-03
2 dB	3,91e-04	4,40e-04	2,69e-04	1,71e-04	2,69e-04	2,69e-04	3,42e-04	2,20e-04	5,87e-04	2,20e-04	2,20e-04	2,20e-04	5,87e-04	2,20e-04	2,20e-04	2,20e-04
4 dB	1,96e-04	0	1,96e-04	0	1,47e-04	0	2,93e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0
6 dB	9,78e-05	0	1,96e-04	0	9,78e-05	0	1,96e-04	0	1,71e-04	0	1,71e-04	0	1,71e-04	0	1,71e-04	0
8 dB	0	0	2,69e-04	0	2,44e-04	0										
10 dB	9,78e-05	0	1,47e-04	0	2,93e-04	0	1,47e-04	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0
12 dB	9,78e-05	0	2,44e-04	0	4,89e-05	0	1,96e-04	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0
14 dB	9,78e-05	0	1,96e-04	0	9,78e-05	0	1,47e-04	0								
16 dB	2,44e-04	0	1,96e-04	0	2,44e-04	0	1,47e-04	0	2,69e-04	0	2,69e-04	0	2,69e-04	0	2,69e-04	0
18 dB	1,96e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	3,42e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0
20 dB	1,22e-04	0	1,96e-04	0	1,71e-04	0	1,47e-04	0	2,44e-04	0	2,44e-04	0	2,44e-04	0	2,44e-04	0
22 dB	2,93e-04	0	9,78e-05	0	4,40e-04	0	1,47e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0
24 dB	4,89e-05	0	9,78e-05	0	2,44e-04	0	3,18e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0
26 dB	4,89e-05	0	1,96e-04	0	2,44e-04	0	2,20e-04	0	2,93e-04	0	2,93e-04	0	2,93e-04	0	2,93e-04	0
28 dB	4,89e-05	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	3,67e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0
30 dB	9,78e-05	0	2,44e-04	0	2,44e-04	0	2,20e-04	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0
32 dB	9,78e-05	0	4,89e-05	0	9,78e-05	0	1,47e-04	0								
34 dB	0	0	9,78e-05	0	2,44e-04	0	4,89e-05	0	3,91e-04	0	3,91e-04	0	3,91e-04	0	3,91e-04	0
36 dB	1,71e-04	0	1,22e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	2,93e-04	0	2,93e-04	0	2,93e-04	0	2,93e-04	0
38 dB	9,78e-05	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	3,18e-04	0	3,18e-04	0	3,18e-04	0	3,18e-04	0
40 dB	9,78e-05	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	2,93e-04	0								

**ANEXO P ERRORES PRESENTADOS EN UN CANAL RAYLEIGH (0-100 m/s) A DIFERENTES SNR, CON Y SIN CODIFICACIÓN CONVOLUCIONAL (3, 2, 3)**

SNR	Errores codificación Convolutiva (3, 2, 3) en un canal Rayleigh																					
	0 m/s		10 m/s		20 m/s		30 m/s		40 m/s		50 m/s		60 m/s		70 m/s		80 m/s		90 m/s		100 m/s	
	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C
0 dB	93	275	132	275	119	276	136	279	118	279	129	391	121	361	149	297	130	335	118	336	141	365
2 dB	5	15	18	14	11	29	10	24	19	33	15	26	18	67	36	49	25	31	33	19	36	16
4 dB	0	0	4	3	8	1	9	6	8	3	15	6	18	10	24	9	28	11	22	8	23	14
6 dB	1	0	2	1	8	2	12	5	15	6	16	7	22	11	21	11	21	11	30	9	27	14
8 dB	1	0	4	1	5	3	9	4	10	3	15	6	16	3	23	9	26	6	27	15	28	18
10 dB	1	0	3	2	5	2	10	5	12	7	13	6	21	9	22	6	19	9	24	14	22	14
12 dB	0	0	6	1	8	2	10	3	11	4	12	5	13	7	26	8	18	10	26	13	25	13
14 dB	1	0	5	2	7	3	7	4	11	5	17	6	17	8	16	7	21	8	21	10	30	14
16 dB	0	0	2	0	7	2	4	3	11	4	14	8	18	5	19	6	20	9	26	11	28	11
18 dB	1	0	2	2	8	1	9	5	15	5	18	5	15	7	22	8	23	10	20	12	26	12
20 dB	1	0	3	1	5	3	12	5	13	4	11	6	18	8	13	7	20	13	28	14	27	14
22 dB	0	0	4	1	8	2	8	4	10	3	17	5	20	7	18	6	22	11	25	12	28	14
24 dB	1	0	3	2	7	3	11	2	14	3	13	6	24	5	18	5	26	9	24	11	27	11
26 dB	1	0	1	1	7	2	10	6	15	3	14	9	11	8	16	5	19	10	23	16	27	19
28 dB	0	0	3	1	7	3	7	3	12	3	17	7	18	10	22	7	18	9	23	11	30	14
30 dB	0	0	3	3	8	3	12	4	11	6	14	9	16	15	19	8	26	10	31	11	27	16
32 dB	1	0	3	1	6	2	9	2	10	2	18	6	20	7	18	7	23	8	23	13	30	15
34 dB	1	0	5	2	7	2	8	6	12	3	16	5	18	8	19	5	25	9	22	10	31	11
36 dB	0	0	5	0	8	2	8	4	13	10	11	11	19	5	18	6	26	8	17	17	24	15
38 dB	0	0	4	0	6	2	7	2	11	5	9	7	20	7	19	10	16	10	25	11	27	14
40 dB	0	0	4	0	6	5	11	6	9	4	17	10	16	8	19	16	29	12	28	14	30	17

**ANEXO Q COMPARACIÓN DEL BER EN UN CANAL RAYLEIGH (0-50 m/s)  
CON Y SIN CODIFICACIÓN CONVOLUCIONAL (3, 2, 3)**

BER codificación Convolutacional (3, 2, 3) en un canal Rayleigh con velocidades de 0-50 m/s																		
SNR	0 m/s			10 m/s			20 m/s			30 m/s			40 m/s			50 m/s		
	S/C	C/C																
0 dB	2,27e-03	6,72e-03	3,23e-03	6,72e-03	2,91e-03	6,74e-03	3,32e-03	6,82e-03	2,88e-03	6,82e-03	2,88e-03	6,82e-03	2,88e-03	6,82e-03	3,15e-03	9,56e-03	3,15e-03	9,56e-03
2 dB	1,22e-04	3,67e-04	4,40e-04	3,42e-04	2,69e-04	7,09e-04	2,44e-04	5,87e-04	4,64e-04	1,96e-04	1,47e-04	1,96e-04	1,96e-04	1,96e-04	3,67e-04	6,35e-04	3,67e-04	6,35e-04
4 dB	0	0	9,78e-05	7,33e-05	1,96e-04	2,44e-05	2,20e-04	1,47e-04	1,96e-04	1,96e-04	1,22e-04	1,22e-04	1,22e-04	1,22e-04	3,91e-04	1,47e-04	3,91e-04	1,47e-04
6 dB	2,44e-05	0	4,89e-05	2,44e-05	1,96e-04	4,89e-05	2,93e-04	1,22e-04	1,22e-04	1,22e-04	0	2,20e-04	2,44e-04	1,47e-04	3,67e-04	1,71e-04	3,67e-04	1,71e-04
8 dB	2,44e-05	0	9,78e-05	2,44e-05	1,22e-04	4,89e-05	2,44e-04	1,22e-04	1,22e-04	1,22e-04	4,89e-05	2,44e-04	2,93e-04	1,71e-04	3,18e-04	1,47e-04	3,18e-04	1,47e-04
10 dB	2,44e-05	0	7,33e-05	4,89e-05	1,22e-04	4,89e-05	2,44e-04	1,22e-04	1,22e-04	1,22e-04	4,89e-05	2,44e-04	2,93e-04	1,71e-04	2,93e-04	1,22e-04	2,93e-04	1,22e-04
12 dB	0	0	1,47e-04	2,44e-05	1,96e-04	4,89e-05	2,44e-04	1,22e-04	1,22e-04	1,22e-04	4,89e-05	2,44e-04	2,93e-04	1,71e-04	4,15e-04	1,47e-04	4,15e-04	1,47e-04
14 dB	2,44e-05	0	1,22e-04	4,89e-05	1,71e-04	7,33e-05	1,71e-04	7,33e-05	1,71e-04	7,33e-05	1,71e-04	7,33e-05	1,71e-04	1,22e-04	4,15e-04	1,47e-04	4,15e-04	1,47e-04
16 dB	0	0	4,89e-05	0	1,71e-04	4,89e-05	9,78e-05	7,33e-05	9,78e-05	9,78e-05	7,33e-05	9,78e-05	7,33e-05	9,78e-05	3,42e-04	1,96e-04	3,42e-04	1,96e-04
18 dB	2,44e-05	0	4,89e-05	4,89e-05	1,96e-04	2,44e-05	2,20e-04	1,22e-04	1,22e-04	1,22e-04	2,20e-04	1,22e-04	1,22e-04	1,22e-04	4,40e-04	1,22e-04	4,40e-04	1,22e-04
20 dB	2,44e-05	0	7,33e-05	2,44e-05	1,22e-04	7,33e-05	2,93e-04	1,22e-04	1,22e-04	1,22e-04	7,33e-05	2,93e-04	1,22e-04	1,22e-04	2,69e-04	1,47e-04	2,69e-04	1,47e-04
22 dB	0	0	9,78e-05	2,44e-05	1,96e-04	4,89e-05	4,15e-04	1,22e-04	4,15e-04	1,22e-04								
24 dB	2,44e-05	0	7,33e-05	4,89e-05	1,71e-04	7,33e-05	2,69e-04	4,89e-05	4,89e-05	4,89e-05	2,69e-04	4,89e-05	3,42e-04	7,33e-05	3,18e-04	1,47e-04	3,18e-04	1,47e-04
26 dB	2,44e-05	0	2,44e-05	2,44e-05	1,71e-04	4,89e-05	2,44e-04	1,47e-04	1,47e-04	1,47e-04	2,44e-04	1,47e-04	3,67e-04	7,33e-05	3,42e-04	2,20e-04	3,42e-04	2,20e-04
28 dB	0	0	7,33e-05	2,44e-05	1,71e-04	7,33e-05	4,15e-04	1,71e-04	4,15e-04	1,71e-04								
30 dB	0	0	7,33e-05	7,33e-05	1,96e-04	7,33e-05	2,93e-04	1,22e-04	1,22e-04	1,22e-04	2,93e-04	1,22e-04	2,93e-04	1,47e-04	3,42e-04	2,20e-04	3,42e-04	2,20e-04
32 dB	2,44e-05	0	7,33e-05	2,44e-05	1,47e-04	4,89e-05	2,20e-04	4,89e-05	4,89e-05	4,89e-05	2,20e-04	4,89e-05	2,44e-04	4,89e-05	4,40e-04	1,47e-04	4,40e-04	1,47e-04
34 dB	2,44e-05	0	1,22e-04	4,89e-05	1,71e-04	4,89e-05	1,96e-04	1,47e-04	1,47e-04	1,47e-04	1,96e-04	1,47e-04	2,93e-04	7,33e-05	3,91e-04	1,22e-04	3,91e-04	1,22e-04
36 dB	0	0	1,22e-04	0	1,96e-04	4,89e-05	1,96e-04	4,89e-05	4,89e-05	4,89e-05	1,96e-04	4,89e-05	3,18e-04	2,44e-04	2,69e-04	2,69e-04	2,69e-04	2,69e-04
38 dB	0	0	9,78e-05	0	1,47e-04	4,89e-05	1,71e-04	4,89e-05	4,89e-05	4,89e-05	1,71e-04	4,89e-05	2,69e-04	1,22e-04	2,20e-04	1,71e-04	2,20e-04	1,71e-04
40 dB	0	0	9,78e-05	2,44e-05	1,47e-04	1,22e-04	2,69e-04	1,47e-04	1,47e-04	1,47e-04	2,69e-04	1,47e-04	2,20e-04	9,78e-05	4,15e-04	2,44e-04	4,15e-04	2,44e-04

**ANEXO R COMPARACIÓN DEL BER EN UN CANAL RAYLEIGH (60-100 m/s)  
CON Y SIN CODIFICACIÓN CONVOLUCIONAL (3, 2, 3)**

BER codificación Convolutional (2, 1, 3) en un canal Rayleigh con velocidades de 60-100 m/s													
SNR	60 m/s		70 m/s		80 m/s		90 m/s		100 m/s		S/C	C/C	C/C
	S/C	C/C											
0 dB	2,96e-03	8,82e-03	3,64e-03	7,26e-03	3,18e-03	8,19E-03	2,88e-03	8,21e-03	2,88e-03	8,21e-03	3,45e-03	8,92e-03	8,92e-03
2 dB	4,40e-04	1,64e-03	8,80e-04	1,20e-03	6,11e-04	7,58E-04	8,06e-04	4,64e-04	8,06e-04	4,64e-04	8,80e-04	3,91e-04	3,91e-04
4 dB	4,40e-04	2,44e-04	5,87e-04	2,20e-04	6,84e-04	2,69E-04	5,38e-04	1,96e-04	5,38e-04	1,96e-04	5,62e-04	3,42e-04	3,42e-04
6 dB	5,38e-04	2,69e-04	5,13e-04	2,69e-04	5,13e-04	2,69E-04	7,33e-04	2,20e-04	7,33e-04	2,20e-04	6,60e-04	3,42e-04	3,42e-04
8 dB	3,91e-04	7,33e-05	5,62e-04	2,20e-04	6,35e-04	1,47E-04	6,60e-04	3,67e-04	6,60e-04	3,67e-04	6,84e-04	4,40e-04	4,40e-04
10 dB	5,13e-04	2,20e-04	5,38e-04	1,47e-04	4,64e-04	2,20E-04	5,87e-04	3,42e-04	5,87e-04	3,42e-04	5,38e-04	3,42e-04	3,42e-04
12 dB	3,18e-04	1,71e-04	6,35e-04	1,96e-04	4,40e-04	2,44E-04	6,35e-04	3,18e-04	6,35e-04	3,18e-04	6,11e-04	3,18e-04	3,18e-04
14 dB	4,15e-04	1,96e-04	3,91e-04	1,71e-04	5,13e-04	1,96E-04	5,13e-04	2,44e-04	5,13e-04	2,44e-04	7,33e-04	3,42e-04	3,42e-04
16 dB	4,40e-04	1,22e-04	4,64e-04	1,47e-04	4,89e-04	2,20E-04	6,35e-04	2,69e-04	6,35e-04	2,69e-04	6,84e-04	2,69e-04	2,69e-04
18 dB	3,67e-04	1,71e-04	5,38e-04	1,96e-04	5,62e-04	2,44E-04	4,89e-04	2,93e-04	4,89e-04	2,93e-04	6,35e-04	2,93e-04	2,93e-04
20 dB	4,40e-04	1,96e-04	3,18e-04	1,71e-04	4,89e-04	3,18E-04	6,84e-04	3,42e-04	6,84e-04	3,42e-04	6,60e-04	3,42e-04	3,42e-04
22 dB	4,89e-04	1,71e-04	4,40e-04	1,47e-04	5,38e-04	2,69E-04	6,11e-04	2,93e-04	6,11e-04	2,93e-04	6,84e-04	3,42e-04	3,42e-04
24 dB	5,87e-04	1,22e-04	4,40e-04	1,22e-04	6,35e-04	2,20E-04	5,87e-04	2,69e-04	5,87e-04	2,69e-04	6,60e-04	2,69e-04	2,69e-04
26 dB	2,69e-04	1,96e-04	3,91e-04	1,22e-04	4,64e-04	2,44E-04	5,62e-04	3,91e-04	5,62e-04	3,91e-04	6,60e-04	4,64e-04	4,64e-04
28 dB	4,40e-04	2,44e-04	5,38e-04	1,71e-04	4,40e-04	2,20E-04	5,62e-04	2,69e-04	5,62e-04	2,69e-04	7,33e-04	3,42e-04	3,42e-04
30 dB	3,91e-04	3,67e-04	4,64e-04	1,96e-04	6,35e-04	2,44E-04	7,58e-04	2,69e-04	7,58e-04	2,69e-04	6,60e-04	3,91e-04	3,91e-04
32 dB	4,89e-04	1,71e-04	4,40e-04	1,71e-04	5,62e-04	1,96E-04	5,62e-04	3,18e-04	5,62e-04	3,18e-04	7,33e-04	3,67e-04	3,67e-04
34 dB	4,40e-04	1,96e-04	4,64e-04	1,22e-04	6,11e-04	2,20E-04	5,38e-04	2,44e-04	5,38e-04	2,44e-04	7,58e-04	2,69e-04	2,69e-04
36 dB	4,64e-04	1,22e-04	4,40e-04	1,47e-04	6,35e-04	1,96E-04	4,15e-04	4,15e-04	4,15e-04	4,15e-04	5,87e-04	3,67e-04	3,67e-04
38 dB	4,89e-04	1,71e-04	4,64e-04	2,44e-04	3,91e-04	2,44E-04	6,11e-04	2,69e-04	6,11e-04	2,69e-04	6,60e-04	3,42e-04	3,42e-04
40 dB	3,91e-04	1,96e-04	4,64e-04	3,91e-04	7,09e-04	2,93E-04	6,84e-04	3,42e-04	6,84e-04	3,42e-04	7,33e-04	4,15e-04	4,15e-04

**ANEXO S ERRORES PRESENTADOS EN UN CANAL RÍCIAN (0-100 m/s) A DIFERENTES SNR, CON Y SIN CODIFICACIÓN CONVOLUCIONAL (3, 2, 3)**

SNR		Errores codificación Convolutiva (3, 2, 3) en un canal Rician																							
		0 m/s		10 m/s		20 m/s		30 m/s		40 m/s		50 m/s		60 m/s		70 m/s		80 m/s		90 m/s		100 m/s			
		S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C		
0 dB		140	274	100	393	126	268	106	293	116	290	114	334	98	350	108	318	112	311	94	367	122	344		
2 dB		10	30	0	25	20	7	6	13	12	23	14	20	16	8	11	11	11	21	14	16	24	34		
4 dB		1	0	0	0	4	4	4	2	6	1	2	8	8	4	8	5	6	4	12	7	6	2		
6 dB		0	0	0	0	4	0	6	1	4	2	4	2	4	9	8	7	4	4	8	9	7	7		
8 dB		0	0	0	0	4	0	4	1	2	1	6	1	0	5	11	1	10	5	10	2	6	7		
10 dB		0	0	2	0	4	0	4	2	0	3	10	4	4	1	6	4	12	5	6	3	20	6		
12 dB		0	0	0	0	2	2	0	1	6	2	8	3	4	1	10	3	2	4	8	4	4	4		
14 dB		0	0	0	1	4	1	4	0	6	1	4	2	4	2	8	3	4	4	6	3	6	5		
16 dB		0	0	0	0	3	0	4	2	4	2	4	5	10	6	8	4	10	7	6	3	11	5		
18 dB		0	0	0	0	2	1	2	0	4	1	4	2	8	2	6	7	6	4	14	3	8	7		
20 dB		0	0	0	0	2	2	4	1	6	3	10	3	5	2	8	8	7	3	6	4	10	8		
22 dB		0	0	1	0	0	1	4	0	4	2	2	1	12	2	4	4	18	2	6	5	8	3		
24 dB		0	0	2	1	4	1	2	0	0	4	6	1	2	3	4	5	10	2	13	4	6	4		
26 dB		0	0	2	0	0	0	2	0	4	4	8	0	2	6	8	5	10	1	9	6	12	6		
28 dB		0	0	0	0	0	0	2	1	6	1	6	2	2	3	6	2	6	2	15	5	8	2		
30 dB		0	0	0	0	0	1	6	1	5	2	8	3	4	3	10	3	10	5	9	1	4	1		
32 dB		0	0	2	1	2	0	6	0	5	2	2	2	4	4	2	2	4	4	6	3	8	4		
34 dB		0	0	2	1	4	1	8	0	4	1	4	1	0	4	4	3	10	4	2	4	16	3		
36 dB		0	0	0	0	0	0	2	1	2	3	10	1	7	6	5	2	8	5	8	6	12	8		
38 dB		0	0	0	0	2	1	4	0	4	1	4	2	4	4	6	2	6	4	6	6	13	2		
40 dB		0	0	3	0	0	0	2	1	2	0	4	0	4	4	6	7	6	1	12	5	12	4		



**ANEXO U COMPARACIÓN DEL BER EN UN CANAL RICIÁN (60-100 m/s) CON Y SIN CODIFICACIÓN CONVOLUCIONAL (3, 2, 3)**

BER codificación Convolutacional (2, 1, 3) en un canal Ricián con velocidades de 60-100 m/s															
SNR	60 m/s			70 m/s			80 m/s			90 m/s			100 m/s		
	S/C	C/C													
0 dB	2,39e-03	3,67e-03	2,64e-03	3,71e-03	2,74e-03	3,40e-03	2,30e-03	4,47e-03	2,98e-03	4,47e-03	2,98e-03	4,47e-03	2,98e-03	3,89e-03	
2 dB	3,91e-04	4,40e-04	2,69e-04	1,71e-04	2,69e-04	2,69e-04	3,42e-04	2,20e-04	3,42e-04	2,20e-04	3,42e-04	2,20e-04	5,87e-04	2,20e-04	
4 dB	1,96e-04	0	1,96e-04	0	1,47e-04	0	2,93e-04	0	1,47e-04	0	2,93e-04	0	1,47e-04	0	
6 dB	9,78e-05	0	1,96e-04	0	9,78e-05	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	1,71e-04	0	
8 dB	0	0	2,69e-04	0	2,44e-04	0	2,44e-04	0	2,44e-04	0	2,44e-04	0	1,47e-04	0	
10 dB	9,78e-05	0	1,47e-04	0	2,93e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	4,89e-04	0	
12 dB	9,78e-05	0	2,44e-04	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	9,78e-05	0	
14 dB	9,78e-05	0	1,96e-04	0	9,78e-05	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	
16 dB	2,44e-04	0	1,96e-04	0	2,44e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	2,69e-04	0	
18 dB	1,96e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	3,42e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	
20 dB	1,22e-04	0	1,96e-04	0	1,71e-04	0	1,47e-04	0	2,44e-04	0	2,44e-04	0	2,44e-04	0	
22 dB	2,93e-04	0	9,78e-05	0	4,40e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	
24 dB	4,89e-05	0	9,78e-05	0	2,44e-04	0	3,18e-04	0	3,18e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	
26 dB	4,89e-05	0	1,96e-04	0	2,44e-04	0	2,20e-04	0	2,20e-04	0	2,93e-04	0	2,93e-04	0	
28 dB	4,89e-05	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	3,67e-04	0	3,67e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	
30 dB	9,78e-05	0	2,44e-04	0	2,44e-04	0	2,20e-04	0	2,20e-04	0	9,78e-05	0	9,78e-05	0	
32 dB	9,78e-05	0	4,89e-05	0	9,78e-05	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	
34 dB	0	0	9,78e-05	0	2,44e-04	0	4,89e-05	0	4,89e-05	0	3,91e-04	0	3,91e-04	0	
36 dB	1,71e-04	0	1,22e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	1,96e-04	0	2,93e-04	0	2,93e-04	0	
38 dB	9,78e-05	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	3,18e-04	0	3,18e-04	0	
40 dB	9,78e-05	0	1,47e-04	0	1,47e-04	0	2,93e-04	0	2,93e-04	0	2,93e-04	0	2,93e-04	0	



```

bits_enviados=[]; %Bits que se envían actualmente
for j=1: sizemsg /2 %Se genera un ciclo que envíe los trenes de dos bits hasta completar el
                    mensaje de navegación
separado=sep(bitmsg,d1,d2); %Se almacena de 2 en 2 los bits de información
bits_enviados=[bits_enviados separado];%Se almacenan los bits que se enviaron por el canal de
                    transmisión
newb=bits(separado,bitx);%Bits de información acondicionados a los bits del código C/A
codeSAT= codeca(faseSAT,bitx);%Se genera el código C/A de acuerdo a la fase del satélite
sumaM2=double(xor(newb,codeSAT));%Suma módulo 2(ensanchamiento) entre los bits del
                    mensaje de navegación y el código C/A

%Se escoge el tipo de codificador a usar
%////////////////////////////////////Hamming(2047, 2036)////////////////////////////////////
BITencode=encode(sumaM2,n,k,'hamming/binary'); %Codificación Hamming (2047,2036)

%////////////////////////////////////Convolutacional(2, 1, 3)////////////////////////////////////
BITencode= convenc(sumaM2,trellis);

%////////////////////////////////////Convolutacional(3, 2, 3)////////////////////////////////////
BITencode= convenc(sumaM2,trellis);

////////////////////////////////////

CodeDiff=codiff(BITencode);%Codificador diferencial para correcciones en transmisión
                    satelital
lcodeH=length(CodeDiff);%Longitud de mensaje con diferencial
signalBPSK=modeBPSK(CodeDiff); %Modulación BPSK de la señal codificada
sigAWGN=awgn(signalBPSK,SNR); %Se escoge el nivel de SNR a usar
%Se escoge el canal de transmisión a usar

%////////////////////////////////////Canal Rayleigh////////////////////////////////////
sigMoRay=Canal(sigAWGN);%La señal modulada atraviesa el canal de Rayleigh
%////////////////////////////////////Canal Rician////////////////////////////////////
sigMoRay=Canal(sigAWGN);%La señal modulada atraviesa el canal de Rician
SigRX=demoBPSK(sigMoRay,lcodeH);%Se realiza el proceso de Demodulación BPSK
lsignalBPSK=length(signalBPSK);%Longitud de la señal modulada BPSK
dat=datafinal(SigRX,lsignalBPSK);%Obtención de datos binarios

```

```

bdiff=enctdiff(dat);% Se aplica el decodificador diferencial

% Se escoge el tipo de codificador a usar
%////////////////////Hamming(2047, 2036)////////////////////
dec=decode(bdiff,n,k,'hamming');% Decodificación Hamming

%////////////////////Viterbi (2, 1, 3)////////////////////
dec=vitdec(bdiff,trellis,2,'trunc','hard');% Decodificación Convolutiva(2,1,3)
%////////////////////Viterbi (3, 2, 3)////////////////////
dec=vitdec(bdiff,trellis,2,'trunc','hard');% Decodificación convolutiva(3,2,3)
////////////////////////////////////

x=dec(1:40920);% Rango de bits válidos
h=xor(x,codeSAT); % Recuperación del mensaje de navegación aplicando el mismo código
                    C/A que se usó en el transmisor
%%%%%%%%%%%%% Cálculo del BER%%%%%%%%%%%%%
Diff = sumaM2-x;
T_Errores = sum(abs(diff));
BER=T_Errores/length(sumaM2);
disp( T_Errores);% Visualizar el número total de errores
disp(BER); % Visualizar el BER
%%%%%%%%%%%%%

d1=d1+2; % Siguiente posición del límite inferior
d2=d2+2; % Siguiente posición del límite superior
dato_final=[dato_final data(h)];% Bits recuperados
end

%////////////////////Visualización de Espectro Mensaje de navegación////////////////////////////////////

clc
clear all
tiempo=2000; % ms
Numchips=1023;
fmuestra=5.456e6; % frecuencia de muestro muestras/s
frechip=1.023e6;

```

```

Periodochip=1/frechip; %s/chip
muestrasChip=fmuestra*Periodochip;
muestreo1msCA=round(Numchips*1*muestrasChip); %muestras de 1ms del CAlocal
Long1msCA=Numchips*muestrasChip;
L20msCA=20*Long1msCA;
% Mensaje de navegación
for i=0:99
x(i+1)=randi([0,1],1,1); % x=[0,1]
b20ms=floor(x(i+1) +(x(i+1)-x(i+1))*rand(1,L20msCA));
b20ms=2*b20ms-1; %Para pasar de [0,1] a [-1,1]
nav(L20msCA*i+1:L20msCA*(i+1))=b20ms;
end
Fourier1=fftshift(fft(nav));
%Modulo1=mag2db(abs(Fourier1)); %Formato dB
Modulo1=(abs(Fourier1)); %Formato Magnitud
frec=(-muestreo1msCA*1000:muestreo1msCA*1000-1)*1/2;
plot(frec,Modulo1,'b'); %Espectro del mensaje de navegación
%axis([-500 500 0 200]) %para db
axis([-500 500 0 2e6]) %para magnitud
title('Espectro mensaje de navegación')
xlabel('Frecuencia [Hz]')
ylabel('Magnitud [dB]')

%//////////Visualización de Espectro Código C/A //////////

clc
clear all
fsatelite=3;
fase = [2 6; 3 7; 4 8; 5 9; 1 9; 2 10; 1 8; 2 9; 3 10; 2 3; 3 4; 5 6; 6 7; 7 8; 8 9; 9 10; 1 4; 2 5; 3 6;
4 7; 5 8; 6 9; 1 3; 4 6; 5 7; 6 8; 7 9; 8 10; 1 6; 2 7; 3 8; 4 9];%Fase correspondiente a los 32
satélites
G1=-1*ones(1,10); %Se inicializa G2 y G1 con todos los valores en 1
G2=G1; %G1 y G2 inician con los mismo valores
s1=fase(fsatelite,1);%Selección de la posición de la primera salida G2
s2=fase(fsatelite,2);%Selección de la posición de la segunda salida G2
temp=0;

```

```

for i=1:1023
G(i)=G2(s1)*G2(s2)*G1(10);%OR entre 2do OR de G2 y la salida de G1
temp=G1(1);
G1(1)=G1(3)*G1(10);%OR G1, su resultado alimenta la entrada de G1
G1(2:10)=[temp G1(2:9)];%Se hace el desplazamiento de los registros de G1
temp=G2(1);
G2(1)=G2(2)*G2(3)*G2(6)*G2(8)*G2(9)*G2(10);%operación de la G2, su resultado alimenta
la entrada de G2(1)
G2(2:10)=[temp G2(2:9)];%desplaza los registros de G2
end
%%%%%%%%%% Se convierten los valores +1 y -1 en datos binarios%%%%%%%%%
i=1:1023;
if G(i)==1
    CA(i)=0;
else G(i)==(-1)
    CA(i)=1;
end
end
CA=2*ans-1;
Numchips=1023;
fmuestreo=5.456e6; %frecuencia de muestro muestras/s
frchip=1.023e6;
periodochip=1/frchip; %s/chip
muestraChip=fmuestreo*periodochip;
a1=(0:muestraChip*Numchips*1-1)*(1/muestraChip);
b1=floor(a1);
CAloc=CA(mod(b1,Numchips)+1);
Fourier1=fftshift(fft(CAloc));
Modulo1=(abs(Fourier1)); %en Magnitud
%Modulo1=mag2db(abs(Fourier1)); %en dB
f=(-Numchips*muestraChip/2:Numchips*muestraChip/2-1);
plot(f,Modulo1,'b');
title('Espectro del Código C/A ')
xlabel('Frecuencia [KHz]')
ylabel('Magnitud')
%axis([-10300 10300 0 450])%para dB
axis([-1e4 1e4 0 5e4]) %en magnitud

```

////////////////////////////////////Funciones////////////////////////////////////

**Función para generar el mensaje de navegación 1500 bits**

```
function [ msgcp ] = msg( subtramas )
msgcp=[]; %mensaje de navegación
for i=1:subtramas %Bucle para generar las 5 subtramas del mensaje de navegación
dat=round(rand(1,300)); %Genera 300 bits por cada subtrama
msgcp=[msgcp dat]; %concatenación de las 5 subtramas
end
end
```

**Función para separar 2 bits del mensaje de navegación**

```
function [ separado ] = sep( bitmsg,a,d )
%%%%%%%%%%%% 2 bits de información %%%%%%%%%%%%%
separado=bitmsg(a:d); %separa un par de bits del mensaje de navegación
end
```

**Función para acondicionar los bits del mensaje de navegación con el código C/A**

```
function [ newb ] = bits( separado,tipocode )
vec=ones(1,1023*20); %vector formado por 20460 bits de 1 que expande el bit del mensaje
newb=[];
for i=1:tipocode %recorre bit a bit
newb=[newb separado(i)*vec];%toma cada bit del mensaje para acondicionarlo con el código
C/A
end
end
```

**Función para generar los Códigos C/A de cada satélite**

```
function [ codet ] = codeca(fsatelite,tipocode)
fase = [2 6; 3 7; 4 8; 5 9; 1 9; 2 10; 1 8; 2 9; 3 10; 2 3; 3 4; 5 6; 6 7; 7 8; 8 9; 9 10; 1 4; 2 5; 3 6;
4 7; 5 8; 6 9; 1 3; 4 6; 5 7; 6 8; 7 9; 8 10; 1 6; 2 7; 3 8; 4 9];%Fase correspondiente a los 32
satélites
G1=-1*ones(1,10); %Se inicializa G2 y G1 con todos los valores en 1
```

```

G2=G1; %G1 y G2 inician con los mismo valores
s1=fase(fsatelite,1);%Selección de la posición de la primera salida G2
s2=fase(fsatelite,2);%Selección de la posición de la segunda salida G2
temp=0;
for i=1:1023
G(i)=G2(s1)*G2(s2)*G1(10);%OR entre 2do OR de G2 y la salida de G1
temp=G1(1);
G1(1)=G1(3)*G1(10);%OR G1, su resultado alimenta la entrada de G1
G1(2:10)=[temp G1(2:9)]%Se hace el desplazamiento de los registros de G1
temp=G2(1);
G2(1)=G2(2)*G2(3)*G2(6)*G2(8)*G2(9)*G2(10);%operación de la G2, su resultado alimenta
la entrada de G2(1)
G2(2:10)=[temp G2(2:9)];%desplaza los registros de G2
end
%%%%%%%%%%%% Se convierten los valores +1 y -1 en datos binarios%%%%%%%%
i=1:1023;
if G(i)==1
    CA(i)=0;
else G(i)==(-1)
    CA(i)=1;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
codet=[];
for i=1:20*tipocode    % 20 códigos C/A completos por cada bit de información
    codet=[codet ans]; % 40 códigos C/A uno tras otro
end
end

```

### **Función para implementar el codificador diferencial**

```

function [ sigdiff ] = codiff( code )
sigdiff = mod(filter(1,[1 -1],code),2);%Codificación diferencial para corrección de errores en
transmisiones satelitales
end

```

### **Función para realizar la modulación BPSK en GPS L1**

```
function [ m ] = modeBPSK( sum )
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Modulación BPSK%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
codenrz=(sum-0.5)*2; %transforma la señal binaria en una señal NRZ con valores de +1 y -1
A=5; % Amplitud de la señal portadora
bp=0.02/20460; % período de bit
fs=(1575.42*(10^6))*2;%Frecuencia de muestreo
f=1575.42*(10^6); %Frecuencia de la señal portadora
t=0:1/fs:bp; % Vector tiempo de la señal portadora
S=A*cos(2*pi*f*t); % Señal portadora
m=[]; %Bits modulados BPSK
for i=1:length(sum)
m=[m codenrz(i)*(S)]; %Multiplica el dato +1 o -1 en la posición (i) por la señal portadora
end
end
```

### **Función para la implementación de los canales de desvanecimiento tipo Rayleigh y Rician con diferentes velocidades en el receptor**

```
function [ y ] = Canal( m )
Cv=3*(10^8);%Velocidad de la luz
Vrx=10; %Se escoge la velocidad del receptor GPS en m/s
Fdoppler=((1575.42*(10^6))*(Vrx /Cv)); %Frecuencia Doppler
c = rayleighchan(1/((1575.42*(10^6))*2),Fdoppler); %Genera el canal de desvanecimiento Rayleigh
%c = ricianchan(1/((1575.42*(10^6))*2),Fdoppler,1); %Genera el canal de desvanecimiento Rician
y = filter(c,m); %Señal atraviesa el canal de desvanecimiento tipo Rayleigh
end
```

### **Función para realizar el proceso de demodulación BPSK en GPS L1**

```
function [ rx ] = demoBPSK( y,lcodeH)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Demodulación BPSK%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
f=1.5754e+09; % Frecuencia de la señal portadora
bp=0.02/20460;%Período de bit
```

```

fs=(1575.42*(10^6))*2;%Frecuencia de muestreo
t=0:1/fs:bp; % Vector tiempo de la señal portadora
carrier=5*cos(2*pi*f*t); %Replica de la señal portadora
carrier= repmat(carrier,1,lcodeH); %Señal portadora concatenada hasta la longitud de
mensaje codificado
rxsig=y.*carrier; %Demodulación
rx=real(rxsig);%Se obtiene la parte real de la señal compleja demodulada
end

```

### **Función para obtener los datos binarios**

```

function [ de_sig ] = datafinal( xr,ls )
de_sig=[];
%Se emplea un umbral de recepción para la recuperación de los datos
binarios%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for i=1:3081:ls
if xr(i)>0
rxs =1;
else
rxs =0;
end
de_sig=[de_sig rxs]; %Concatenación de datos binarios recuperados
end
end

```

### **Función para aplicar el decodificador diferencial**

```

function [ ipHat_coh ] = decodiff( dat )
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Decodificador diferencial %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ipHat_coh = mod(filter([1 -1],1,dat),2); %Decodificador diferencial para obtener los datos
correctos
end

```

### **Función para recuperar los bits originales**

```

function [ dat_sig ] = data( h )
dat_sig=[];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Detección de datos binarios finales %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```
for i=1:20460:40920
if h(i)>0
rxs =1;
else
rxs =0;
end
dat_sig=[dat_sig rxs]; %concatenación de bits recuperados
end
end
```