



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **“EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LA MODULACIÓN BINARY OFFSET CARRIER SOBRE LA SEÑAL CIVIL GPS.L1 PARA DIFERENTES MODELOS DE CANAL MEDIANTE UN ENTORNO DE SIMULACIÓN.”**

**ANDREA MAGALI LLERENA PINTAG**

Trabajo de titulación modalidad: Proyecto de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

**MAGISTER EN SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES**

Riobamba - Ecuador

Febrero 2019



## ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

### CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, titulado “EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LA MODULACIÓN BINARY OFFSET CARRIER SOBRE LA SEÑAL CIVIL GPS.L1 PARA DIFERENTES MODELOS DE CANAL MEDIANTE UN ENTORNO DE SIMULACIÓN” de responsabilidad de la Srta. Andrea Magali Llerena Pintag, ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

Lic. Pepita Ivonne Alarcón Parra M.Sc.  
**PRESIDENTE**

\_\_\_\_\_

Ing. Jefferson Alexander Ribadeneira Ramírez Ph.D.  
**DIRECTOR**

\_\_\_\_\_

Ing. Mónica Andrea Zabala Haro M.Sc.  
**MIEMBRO**

\_\_\_\_\_

Ing. Fabricio Javier Santacruz Sulca M.Sc  
**MIEMBRO**

\_\_\_\_\_

Riobamba, Febrero 2019

## DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Andrea Magali Llerena Pintag, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

ANDREA MAGALI LLERENA PINTAG

No. Cedula 060422412-1

**©2019, Andrea Magali Llerena Pintag**

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.

## DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Andrea Magali Llerena Pintag, declaro que el presente **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo** es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este proyecto de titulación de Maestría.

---

ANDREA MAGALI LLERENA PINTAG

No. Cedula 060422412-1

## **DEDICATORIA**

Dedico este sueño convertido en realidad a:

### **A mi Madre:**

María, el ser más maravilloso que dios y la vida me regaló, por su sacrificio y esfuerzo, por enseñarme que el camino hacia la superación se lo consigue con esfuerzo y dedicación, brindándome siempre su comprensión, cariño y amor.

### **A mi hermana y mis sobrinitos:**

Mayra, por sus consejos, por sus palabras de aliento que me animaban a seguir adelante y nunca desmayar y ser perseverante para cumplir mis ideales...Sebastián y Danielito, por ser las personitas que me regalan su amor, su cariño y con sus sonrisas me alegran todos los días.

### **A mi amado Orlando:**

Por brindarme siempre su amor, permitiéndome aprender más de la vida a su lado, y sin esperar nada a cambio compartió alegrías y tristezas; por permanecer junto a mí en las buenas y en las malas, apoyándome para que este sueño se haga realidad.

Gracias mis amores.

**Ing. Andrea Magali Llerena Pintag**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios y a mi Virgencita, por brindarme la oportunidad de vivir y por la luz que me ilumina día a día.

Este trabajo de investigación no estaría completo, sin agradecer al Ing. Jefferson Ribadeneira Ph.D. director de este trabajo de titulación; un agradecimiento sincero a los Ingenieros Mónica Andrea Zabala M.Sc. y Fabricio Javier Santacruz M.Sc. como miembros de tribunal y facilitadores de diferentes guías para el desarrollo de la investigación, ya que sin su apoyo no hubiera sido posible la culminación de este trabajo de investigación.

## CONTENIDO

RESUMEN.....	xvi
SUMMARY.....	xvii
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Problema de Investigación .....</b>	<b>1</b>
<i>1.1.1 Planteamiento del problema .....</i>	<i>1</i>
<b>1.2 Formulación del problema .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Preguntas Directrices.....</b>	<b>2</b>
<b>1.4 Justificación de la investigación.....</b>	<b>2</b>
<b>1.5 Objetivos de la investigación.....</b>	<b>3</b>
<i>1.5.1 Objetivo General:.....</i>	<i>3</i>
<i>1.5.2 Objetivos Específicos:.....</i>	<i>3</i>
<b>1.6 Hipótesis General .....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>2 MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Estado del Arte .....</b>	<b>4</b>
<i>2.1.1 Fases del Proyecto .....</i>	<i>5</i>
<i>2.1.1.1 Primeras fases conceptuales y de desarrollo .....</i>	<i>5</i>
<i>2.1.1.2 Capacidades operacionales.....</i>	<i>5</i>
<i>2.1.1.3 Modernización de GPS.....</i>	<i>6</i>
<i>2.1.1.4 Gestión y operación.....</i>	<i>6</i>
<b>2.2 Sistemas de Referencia .....</b>	<b>9</b>
<i>2.2.1 Sistema de Coordenadas .....</i>	<i>9</i>
<i>2.2.2 Sistema de Tiempo .....</i>	<i>10</i>



<b>2.3</b>	<b>Servicios GPS</b> .....	11
<b>2.3.1</b>	<b><i>SPS (Standard Positioning Service)</i></b> .....	12
<b>2.3.2</b>	<b><i>PPS (Precise Positioning Service)</i></b> .....	12
<b>2.3.3</b>	<b><i>Privación de precisión y acceso</i></b> .....	13
<b>2.4</b>	<b>Segmentos de GPS</b> .....	14
<b>2.4.1</b>	<b><i>Segmento Espacial</i></b> .....	14
<b>2.4.1.1</b>	<b><i>Categorías de satélite</i></b> .....	15
<b>2.4.1.2</b>	<b><i>Modernización del segmento espacial</i></b> .....	16
<b>2.4.1.3</b>	<b><i>Desarrollos Recientes</i></b> .....	18
<b>2.4.2</b>	<b><i>Segmento de Control</i></b> .....	18
<b>2.5</b>	<b>Estructura de la Señal</b> .....	24
<b>2.5.1</b>	<b><i>Señales en el Espacio</i></b> .....	24
<b>2.5.2</b>	<b><i>Características de la señal GPS</i></b> .....	25
<b>2.5.2.1</b>	<b><i>Portadora</i></b> .....	25
<b>2.5.2.2</b>	<b><i>Mensaje de Navegación</i></b> .....	25
<b>2.5.2.3</b>	<b><i>Códigos PRN</i></b> .....	26
<b>2.5.3</b>	<b><i>Generación de la señal GPS</i></b> .....	29
<b>2.6</b>	<b>Modulaciones</b> .....	30
<b>2.6.1</b>	<b><i>Modulación BPSK</i></b> .....	31
<b>2.6.1.1</b>	<b><i>DSSS</i></b> .....	32
<b>2.6.2</b>	<b><i>Modulación BOC</i></b> .....	33
<b>2.7</b>	<b>Codificación de Canal</b> .....	36
<b>2.7.1</b>	<b><i>Codificación y Decodificación Convolutional</i></b> .....	37
<b>2.7.1.1</b>	<b><i>Codificación Convolutional</i></b> .....	37
<b>2.7.1.2</b>	<b><i>Codificador Diferencial</i></b> .....	38
<b>2.7.1.3</b>	<b><i>Diagrama de Trellis</i></b> .....	39
<b>2.7.1.4</b>	<b><i>Algoritmo de Viterbi</i></b> .....	40
<b>2.8</b>	<b>Modelos de Canal</b> .....	40

2.8.1	<i>Frecuencia Doppler</i> .....	40
2.8.2	<i>Canal Rayleigh</i> .....	41
2.8.3	<i>Canal Rician</i> .....	41
2.9	Señal Civil GPS L1 y GALILEO E1 .....	42

### CAPÍTULO III

<b>3</b>	<b>DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>45</b>
3.1	Metodología de la Investigación.....	45
3.1.1	<i>Método Documental</i> .....	45
3.1.2	<i>Método Científico</i> .....	45
3.1.3	<i>Método Deductivo</i> .....	45
3.2	Diagrama de Bloques .....	46
3.3	Señal Portadora $f_{L1}$ .....	46
3.4	Generación del mensaje de Navegación NAV.....	48
3.5	Generación del Código PRN – Código C/A .....	49
3.6	Ensanchamiento - Espectro Ensanchado de Secuencia Directa (DSSS) .....	50
3.7	Codificación .....	52
3.8	Modulación .....	54
3.8.1	<i>BPSK y BOC</i> .....	54
3.9	Canal de transmisión .....	57
3.9.1	<i>Canal con desvanecimiento Rayleigh</i> .....	57
3.9.2	<i>Canal con desvanecimiento Rician</i> .....	58
3.10	Demodulación .....	60
3.11	Decodificación.....	61
3.12	Desensanchamiento - Espectro Ensanchado de Secuencia Directa (DSSS) .....	62
3.13	NAV – Mensaje de Navegación.....	63

### CAPÍTULO IV

<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>64</b>
4.1	Análisis de resultados.....	64

<b>4.1.1</b>	<b><i>Parámetros Utilizados en la Simulación</i></b> .....	64
<b>4.1.2</b>	<b><i>Análisis de Espectro de la señal GPS LI</i></b> .....	65
<b>4.1.3</b>	<b><i>Rendimiento del Canal</i></b> .....	66
<b>4.1.3.1</b>	<b><i>Rendimiento del Canal Rayleigh</i></b> .....	66
<b>4.1.3.2</b>	<b><i>Rendimiento del Canal Rician</i></b> .....	75
<b>4.2</b>	<b>Análisis de la Hipótesis</b> .....	83
<b>4.2.1</b>	<b><i>Tamaño de la muestra</i></b> .....	83
<b>4.2.2</b>	<b><i>Comprobación de la Hipótesis</i></b> .....	83
<b>4.2.2.1</b>	<b><i>Prueba de Shapiro-Wilk</i></b> .....	83
<b>4.2.2.2</b>	<b><i>Prueba de Kruskal-Wallis</i></b> .....	85
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	87
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	89
	<b>GLOSARIO</b>	
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Parámetros de elipsoide WGS-84.....	10
Tabla 2-2: Generación de Satélites Actuales y Futuras.....	17
Tabla 3-2: Servicio de posicionamiento sin contacto desde el Segmento de Control.....	20
Tabla 4-2: Léxico de señal de GPS (Departamento de la Fuerza Aérea 2001).....	24
Tabla 5-2: Información de cada trama que forma el mensaje de navegación .....	26
Tabla 6-2: Polinomios Generadores del código C/A .....	27
Tabla 7-2: Polinomios Generadores del código P.....	28
Tabla 8-2: XOR - Tabla de Verdad.....	30
Tabla 1-3: $F_d$ frente a la variación de la velocidad del receptor GPS en m/s .....	57
Tabla 1-4: Parámetros empleados en la simulación.....	64
Tabla 2-4: Errores presentados en un Canal Rayleigh sin y con Modulación BPSK .....	67
Tabla 3-4: Errores presentados en un Canal Rayleigh sin y con Modulación BOC .....	67
Tabla 4-4: BER en un canal Rayleigh con velocidades al azar entre de 0-100 m/s - BPSK.....	69
Tabla 5-4: BER en un canal Rayleigh con velocidades al azar entre de 0-100 m/s - BOC .....	69
Tabla 6-4: Errores presentados en un Canal Rician sin y con Modulación BPSK.....	75
Tabla 7-4: Errores presentados en un Canal Rician sin y con Modulación BOC .....	75
Tabla 8-4: BER en un canal Rician con velocidades al azar entre de 0-100 m/s - BPSK.....	77
Tabla 9-4: BER en un canal Rician con velocidades al azar entre de 0-100 m/s - BOC .....	77
Tabla 10-4: Prueba Shapiro-Wilk de Normalidad de los esquemas de modulación.....	84
Tabla 11-4: Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis .....	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2: Estructura Organizacional del Comité Ejecutivo Nacional del PNT .....	8
Figura 2-2: Disponibilidad Selectiva .....	13
Figura 3-2: Ubicación de estación de control, monitoreo y antenas terrenas.....	18
Figura 4-2: Estructura de NAV – Mensaje de navegación de GPS.....	26
Figura 5-2: Polinomios generadores G1 y G2.....	27
Figura 6-2: Configuración del Generador de Código C/A.....	28
Figura 7-2: Diagrama de Bloques – Generación señal GPS .....	29
Figura 8-2: Señal Resultante de la Operación XOR .....	30
Figura 9-2: Modulación BPSK.....	31
Figura 10-2: Señal modulada DSSS.....	33
Figura 11-2 Estructura de la Señal BOC. a) Seno b) Coseno .....	34
Figura 12-2: Función de ACF y PSD para las señales BPSK y BOC .....	36
Figura 13-2: Estructura de un codificador convolucional (2, 1, 2) .....	38
Figura 14-2: Sistema de Codificación y Decodificación Diferencial.....	39
Figura 15-2: Enrejado de Trellis .....	39
Figura 16-2: Proceso de Decodificación – Diagrama de Trellis .....	40
Figura 17-2: Canal con Desvanecimiento Rayleigh.....	41
Figura 18-2: Canal con Desvanecimiento Rician.....	42
Figura 19-2: Señales Civiles de GPS y GALILEO – L1/E1 .....	43
Figura 20-2: Espectro de la Señal Civil GALILEO E1 .....	43
Figura 21-2: Espectro de la Señal Civil GPS L1.....	44
Figura 1-3: Diagrama de Bloques Generación, Tx y Rx de Señal GPS.....	46
Figura 2-3: Señal Portadora cosenoidal de GPS L1 .....	47
Figura 3-3: Mensaje de Navegación Completo.....	48
Figura 4-3: Vista ampliada del Mensaje de Navegación.....	48
Figura 5-3: Código Coarse/Adquisition .....	49

Figura 6-3: Vista ampliada del Código C/A .....	49
Figura 7-3: Código C/A Extendido.....	50
Figura 8-3: Vista ampliada del Código C/A Extendido .....	50
Figura 9-3: Bits de información ajustados a la Longitud del Código C/A.....	51
Figura 10-3: Vista ampliada de los Bits de información ajustados a la Longitud de C/A .....	51
Figura 11-3: Suma en Módulo dos entre NAV y Código C/A.....	52
Figura 12-3: Vista ampliada de Suma en Módulo 2 entre NAV y Código C/A.....	52
Figura 13-3: Codificador Convolutacional (2, 1, 3).....	53
Figura 14-3: Codificación Convolutacional (2, 1, 3) .....	53
Figura 15-3: Vista ampliada de Codificación Convolutacional (2, 1, 3) .....	54
Figura 16-3: Diagrama de Bloques Modulación BPSK– Codificador NRZ.....	54
Figura 17-3: Modulación BPSK.....	55
Figura 18-3: Diagrama de Bloques Modulación BOC– Codificador NRZ.....	55
Figura 19-3: Modulación BOC .....	55
Figura 20-3: Modulación BOC de la Señal GPS L1 .....	56
Figura 21-3: Vista ampliada de la Modulación BOC de la Señal GPS L1 .....	56
Figura 22-3: Canal Rayleigh en Matlab: rayleighchan .....	58
Figura 23-3: Canal Rician en Matlab: ricianchan .....	58
Figura 24-3: Señal Modulada BOC+AWGN.....	59
Figura 25-3: Vista ampliada de Señal Modulada BOC+AWGN .....	59
Figura 26-3: Demodulación BOC .....	60
Figura 27-3: Vista ampliada de Demodulación BOC .....	60
Figura 28-3: Decodificación Convolutacional (2,1,3) con Viterbi .....	61
Figura 29-3: Vista ampliada de Decodificación Convolutacional (2,1,3) con Viterbi.....	61
Figura 30-3: Diagrama de Bloques de Desensanchamiento DSSS .....	62
Figura 31-3: Desensanchamiento de la Información con códigos C/A.....	62
Figura 32-3: 2 Primeros Bits Recuperados .....	63
Figura 33-3: 1500 Bits Recuperados del mensaje de navegación NAV .....	63

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-4: Espectro del Mensaje de Navegación aplicando Modulación BPSK .....	65
Gráfico 2-4: Espectro de Mensaje de Navegación aplicando Modulación BOC .....	66
Gráfico 3-4: Tabulación de los Errores en el canal Rayleigh para BPSK y BOC .....	68
Gráfico 4-4: SNR vs. BER en un Canal Rayleigh a 0 m/s - (Con Codificación).....	70
Gráfico 5-4: SNR vs. BER en un Canal Rayleigh a 0 m/s-(Sin y Con Codificación).....	70
Gráfico 6-4: SNR vs. BER en un Canal Rayleigh a 20 m/s -(Con Codificación).....	71
Gráfico 7-4: SNR vs. BER en un Canal Rayleigh a 20 m/s-(Sin y Con Codificación).....	71
Gráfico 8-4: SNR vs. BER en un Canal Rayleigh a 60 m/s -(Con Codificación).....	72
Gráfico 9-4: SNR vs. BER en un Canal Rayleigh a 60 m/s-(Sin y Con Codificación).....	72
Gráfico 10-4: SNR vs. BER en un Canal Rayleigh a 100 m/s - (Con Codificación).....	73
Gráfico 11-4: SNR vs. BER en un Canal Rayleigh a 100 m/s-(Sin y Con Codificación).....	73
Gráfico 12-4: Tabulación de los Errores en el canal Rician para BPSK y BOC .....	76
Gráfico 13-4: SNR vs. BER en un Canal Rician a 0 m/s - (Con Codificación).....	78
Gráfico 14-4: SNR vs. BER en un Canal Rician a 0 m/s -(Sin y Con Codificación) .....	78
Gráfico 15-4: SNR vs. BER en un Canal Rician a 20 m/s - (Con Codificación).....	79
Gráfico 16-4: SNR vs. BER en un Canal Rician a 20 m/s-(Sin y Con Codificación).....	79
Gráfico 17-4: SNR vs. BER en un Canal Rician a 60 m/s - (Con Codificación).....	80
Gráfico 18-4: SNR vs. BER en un Canal Rician a 60 m/s-(Sin y Con Codificación).....	80
Gráfico 19-4: SNR vs. BER en un Canal Rician a 100 m/s - (Con Codificación).....	81
Gráfico 20-4: SNR vs. BER en un Canal Rician a 100 m/s (Sin y Con Codificación).....	81

## RESUMEN

En la presente investigación, se realizó la evaluación de dos técnicas de modulación de señales satelitales; Binary Phase Shift Keying o llamada simplemente BPSK y la Binary Offset Carrier o llamada BOC, con el objeto de determinar aquella que presente un mejor rendimiento en el análisis de la señal Satelital civil de GPS L1. El estudio planteado, emplea la metodología analítica, que se basa en el análisis de parámetros específicos como: la frecuencia fundamental en la que se transmite la señal civil de GPS L1, la frecuencia de generación del código pseudorandómico C/A, el número de tramas y de bits que forman el mensaje de navegación (NAV), utilizados para la generación y acondicionamiento de la señal GPS L1; el tipo de codificador de canal para la detección y corrección de errores, la velocidad del receptor y diversos valores de relación señal a ruido, que permitirán determinar el rendimiento del canal de transmisión tipo Rayleigh y Rician, para las técnicas de modulación ya mencionadas. Para la ejecución de las simulaciones se estableció el uso del software matemático Matlab, por ser un simulador idóneo para el procesamiento de los datos requeridos y análisis de parámetros. Los resultados obtenidos luego de las simulaciones determinaron que para la recuperación de la información enviada por el canal de transmisión tipo Rayleigh o Rician, la modulación más adecuada es la Binary Offset Carrier, debido a que la densidad espectral de potencia se divide en dos lóbulos principales de 2MHz cada uno en los cuales se tiene una mayor concentración de potencia y los resultados del análisis de las gráficas de Bit Error Rate vs. la Relación Señal a Ruido para diferentes velocidades del receptor GPS, logrando así una mayor inmunidad al ruido, una mayor capacidad de recuperación de bits garantizando así una mayor eficiencia en los datos de posicionamiento.

**PALABRAS CLAVE:** <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <TELECOMUNICACIONES>, < BINARY OFFSET CARRIER (BOC)>, <CANALES DE DESVANECIMIENTO>, <MODULACION>, <SEÑALES GNSS>, <SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)>.



## SUMMARY

In this research work the evaluation of two modulation techniques for satellite signal were carried out, The Binary Phase Shift Keying, also known as BPSK and Binary Offset Carrier, known as BOC, which object is to determine which one has a better performance at analyzing the civil Satellite signal of GPS L1. The analytical methodology was used in this research work which is based on the analysis of specific parameters such as: Fundamental frequency where the civil signal of GPS L1 is transmitted, the generation frequency of the pseudorandom code C/A, the number of frames and bits that make a navigation message (NAV) and are used to generate and prepare the GPS L1 signal, the type of encoder channel for detecting and correction of errors, the speed of the receiver and different signal noise ratio values which allow determining the performance of the Rayleigh and Rician type transmission channel. To run the simulations, the Matlab software was used because it is an appropriate simulator for processing data and parameter analysis. The results obtained after the simulation established that to retrieve the information sent through the Rayleigh or Rician type transmission channel the Binary Offset Carrier is the most suitable modulation due to the spectral power density is divided in two main lobes of 2MHz each, where there is a higher concentration of power and the test results of the Bit Error Rate vs. Signal Noise ratio for different speeds of the GPS, reaching a higher imperviousness to noise, higher recovery capacity of bits, ensuring this way a more efficiency in the data positioning.

**KEYWORDS.** <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCE>, <TELECOMMUNICATIONS>, <BINARY OFFSET CARRIER (BOC) >, <FADING CHANNEL>, <MODULATION>, <GNSS SIGNALS>, <GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS) >

# CAPÍTULO I

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Problema de Investigación

#### 1.1.1 Planteamiento del problema

El sistema de posicionamiento global GPS, precursor de todos los Sistemas de Posicionamiento en el mundo; que, durante más de 2 décadas desde su aparición, es el sistema más utilizado y conocido tanto para uso civil y como militar, por estar siempre en operación. En la actualidad es innumerable la cantidad de aplicaciones que se han desarrollado lo que lo hace el más popular entre varios sistemas de posicionamiento. Con el paso de los años; países potencias mundiales como Rusia, Europa y China, han ido desarrollando nuevos sistemas de posicionamiento GNSS, los mismos que han tenido inconvenientes por no estar en completa operatividad, dentro de estos nuevos sistemas están: Galileo, Glonass y BeiDou. Esta es la razón por la que la mayoría de personas siguen usando y están muy familiarizadas con el término GPS. Y no con los demás sistemas GNSS como son: Glonass, Galileo, BeiDou. (VALADEZ D. 2015).

Como las investigaciones y desarrollo en los sistemas de posicionamiento GNSS actuales no se detiene, a corto plazo estos otros sistemas se presentarán completos y operativos, listos para competir e incluso superar al sistema de posicionamiento GPS y es por esto que el sistema de posicionamiento GPS debe mejorar para seguir posicionado por encima de los demás sistemas GNSS. Debido a esto; GPS se ha encargado de que en cada generación también llamada bloque de satélites; existan mejoras técnicas en forma regular, aunque no tan evidentes. Cada mejora es el reemplazo de los satélites cuyo tiempo de vida está entre 8 y 20 años.

En sus primeros años de vida del sistema GPS, la mayor cantidad de mejoras estaban relacionadas con el diseño y autonomía de los satélites. Sin embargo, desde el primer satélite del Bloque IIR-M que fue puesto en operación, han surgido nuevas señales que ofrecen una mayor confiabilidad en la precisión de posicionamiento.

Finalmente, a futuro los satélites del bloque III traerán consigo mejoras en la precisión del sistema de geoposicionamiento, además de aumentar la seguridad del mismo para evitar que se pueda bloquear la señal.

## **1.2 Formulación del problema**

¿Permitirá el entorno de simulación evaluar el rendimiento de la técnica de modulación BOC sobre la señal civil GPS.L1 para diferentes modelos de canal?

## **1.3 Preguntas Directrices**

¿Qué necesitamos estudiar para conocer la situación actual del sistema de posicionamiento global?

¿Qué parámetros evalúan el rendimiento de la modulación BOC para señal de GPS L1?

¿Qué puede aportar la modulación BOC?

¿Cuáles son los beneficios de la actualización de la señal de GPS?

## **1.4 Justificación de la investigación**

Es notable en todo ámbito la importancia que tiene el uso del sistema de posicionamiento global, cada día más usuarios tienen acceso a dicho servicio y se proyecta que su demanda seguirá creciendo exponencialmente, requiriendo cada vez mejor precisión y fiabilidad, por lo que los sistemas de posicionamiento global deben estar en constante actualización. Sin embargo, los costes asociados al cambiar todos los satélites de una constelación pueden resultar muy elevados, siendo mucho más viable realizar actualizaciones por etapas. Por tal motivo, el DoD (Departamento de Defensa de los Estados Unidos) tiene como objetivo la actualización de toda la constelación de satélites de GPS llamado Bloque III y con ello las señales de GPS L1, para estar a la par con los nuevos sistemas de posicionamiento global de GNSS.

Con el objetivo de obtener mejorar en los sistemas actuales se pueden aplicar varias técnicas tanto de modulación, demodulación así como también técnicas de codificación y decodificación para la detección y corrección de errores (FEC) en el proceso de transmisión y recepción de la señal GPS.

En este contexto, una de las mejoras propuestas para la evolución del sistema de posicionamiento es la utilización de modulaciones BOC, por lo que es de vital importancia evaluar su rendimiento para diferentes tipos de canal.

La investigación se centra en evaluar y determinar de manera metodológica el rendimiento de la modulación BOC en señales de GPS L1 bajo un entorno simulado, al igual presentar un sustento investigativo acerca de las innovaciones que va a tomar GPS.

La investigación propuesta es de relevancia para empresas y profesionales que se dedican al desarrollo de plataformas de hardware y software para aplicaciones GNSS.

## **1.5 Objetivos de la investigación**

### ***1.5.1 Objetivo General:***

Evaluar el rendimiento de la técnica de modulación BOC sobre la señal civil GPS.L1 para diferentes modelos de canal mediante un entorno de simulación.

### ***1.5.2 Objetivos Específicos:***

- Revisar el estado del arte del sistema de posicionamiento global GPS.
- Simular los algoritmos de generación, modulación BOC y demodulación de la señal GPS L1.
- Analizar los parámetros SNR, BER de la señal GPS L1 de BOC vs BPSK.
- Evaluar el rendimiento de la técnica de modulación BOC para diferentes canales de transmisión.

## **1.6 Hipótesis General**

Al realizar la evaluación del rendimiento de la modulación BOC, permitirá determinar una eficiente transmisión de datos de la señal civil GPS L1

## CAPÍTULO II

### 2 MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Estado del Arte

El Sistema de Posicionamiento Global es responsabilidad del Joint Program Office (JPO), un componente del Centro de Misiles y Espacio en El Segundo, California. En 1973, el JPO fue dirigido por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD) para establecer, desarrollar, probar, adquirir y desplegar un sistema de posicionamiento espacial. El presente sistema de navegación con cronometraje y rango (NAVSTAR) Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es el resultado de esta directiva inicial. (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2008, pág. 309)

El GPS fue concebido como un sistema de rango desde posiciones conocidas de satélites en el espacio a posiciones desconocidas en tierra, mar, aire y espacio. Eficazmente, la señal de satélite se marca continuamente con su tiempo de transmisión para que cuando recibido el período de tránsito de la señal se puede medir con un receptor sincronizado.

Los objetivos originales del GPS eran la determinación instantánea de la posición y velocidad en la navegación, y la coordinación precisa de transferencia en el tiempo.

Una definición detallada dada por W. Wooden en 1985 dice:

"El Sistema de Posicionamiento Global NAVSTAR (GPS) es para todo clima, basado en el sistema de navegación espacial en desarrollo por el Departamento de Defensa (DoD) para satisfacer los requisitos de las fuerzas militares para determinar con precisión su posición, velocidad y tiempo en un sistema de referencia común, en cualquier lugar o cerca de tierra de forma continua" (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2008, pág. 309)

Dado que el DoD es el iniciador del GPS, los objetivos principales fueron los militares. Pero el Congreso de los Estados Unidos, con la orientación del Presidente, ordenó al Departamento de Defensa que promoviera su uso civil. Esto fue acelerado en gran medida por la producción de un "portátil" receptor GPS sin código para topografía geodésica que podría medir líneas de base cortas a precisión milimétrica y líneas base largas a una parte por millón (ppm). Este instrumento desarrollado por C. Counselman y comercializado con el nombre de Macrometer

Interferometric Surveyor™ estaba en uso comercial en el momento en que el ejército todavía estaba probando receptores de navegación para que la primera aplicación productiva del GPS fuera establecer redes geodésicas de alta precisión. (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2008, pág. 309).

## **2.1.1 Fases del Proyecto**

### *2.1.1.1 Primeras fases conceptuales y de desarrollo*

Desde el punto de vista tecnológico, el GPS puede considerarse un sistema "envejecido" pidiendo un lavado de cara. Suena extraño si el desarrollo inicial, que data de 1973, puede considerarse como una historia de GPS y casi se ha desvanecido detrás de la cortina del pasado. Cinco años después, en 1978, comenzó el lanzamiento de satélites de desarrollo.

Luego tomó once largos años reunir experiencia y desarrollar aún más satélites con elementos de carga útil bien probados. En 1989, el primer satélite operacional podría ser lanzado. Entretejido en estas piedras angulares del desarrollo, se tomaron importantes decisiones políticas, entre ellas el desarrollo del GPS como un sistema de doble uso, desviándose así de los objetivos originalmente puramente militares. El doble uso prevé aplicaciones militares para los EE.UU. y las fuerzas aliadas y aplicaciones civiles para un uso mundial.

### *2.1.1.2 Capacidades operacionales*

Hay dos capacidades operativas: capacidad operativa inicial (COI) y plena capacidad operacional (FOC). (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2008, pág. 310)

- La COI se logró en julio de 1993 cuando se utilizaron 24 satélites GPS (Bloque I / II / IIA). operando y estaban disponibles para la navegación. Oficialmente, el COI fue declarado por el DoD el 8 de diciembre de 1993.
- El FOC se logró cuando 24 satélites del Bloque II / IIA estaban operativos en su asignación las órbitas y la constelación se probaron para el funcionamiento militar operacional. A pesar de que 24 satélites del Bloque II y del Bloque IIA estaban disponibles desde marzo de 1994, FOC no fue declarado antes del 17 de julio de 1995.

### 2.1.1.3 Modernización de GPS

De acuerdo con las capacidades operativas anteriores, el GPS está en pleno uso ya que más de una década, por lo tanto, es natural que, por un lado, los avances tecnológicos avancen y, por otro lado, la demanda de un rendimiento aún mejor con respecto a la aplicabilidad y precisión surgió. La necesidad de mejora era impulsada por los intereses y solicitudes militares y civiles. Más allá de estas discusiones también la competencia es un problema ya que los sistemas de otros países como el europeo Galileo o el sistema chino Beidou mostraron contornos, características y horarios de desarrollo. (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2008, pág. 310)

El 25 de enero de 1999, el programa de modernización del GPS fue anunciado oficialmente, apuntando a los objetivos para satisfacer los requisitos mencionados. La modernización impacta el espacio y el segmento de control (Secciones 2.4.1, 2.4.2).

### 2.1.1.4 Gestión y operación

Para usuarios civiles, el impacto real del GPS originalmente militar ocurrió en 1983, cuando el presidente de los Estados Unidos ofreció acceso civil gratuito después del incidente de los coreanos.

La primera política nacional de EE.UU. Sobre GPS fue lanzada en 1996 bajo el título "EE.UU. Política GPS " y cuando se estableció la Junta Ejecutiva de Interinstitucional GPS (IGEB). Las decisiones importantes para los usuarios civiles generalmente se anuncian en la directiva de decisión de la Casa Blanca por el Presidente o el Vicepresidente. Algunos ejemplos se detallan a continuación. (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2008, pág. 311)

- En 1996, la aceptación e integración de GPS en lo civil y comercial; se alentaron las aplicaciones científicas en todo el mundo. Además, el compromiso de los Estados Unidos de suspender el uso de la disponibilidad selectiva (SA).
- El 30 de marzo de 1998, el Vicepresidente de los Estados Unidos anunció que una segunda señal civil será provista por el GPS. *"Esta nueva señal civil significará mejoras significativas en los servicios de navegación, posicionamiento y cronometraje para millones de usuarios en todo el mundo, desde mochileros y pescadores hasta agricultores, pilotos de líneas aéreas y científicos "*, dijo el Vicepresidente.
- El 25 de enero de 1999, el Vicepresidente de los Estados Unidos anunció una nueva iniciativa que modernizará el GPS y agregará dos nuevas señales civiles a futuros

satélites GPS, Mejora significativa del servicio prestado a civiles, comerciales y usuarios científicos de todo el mundo.

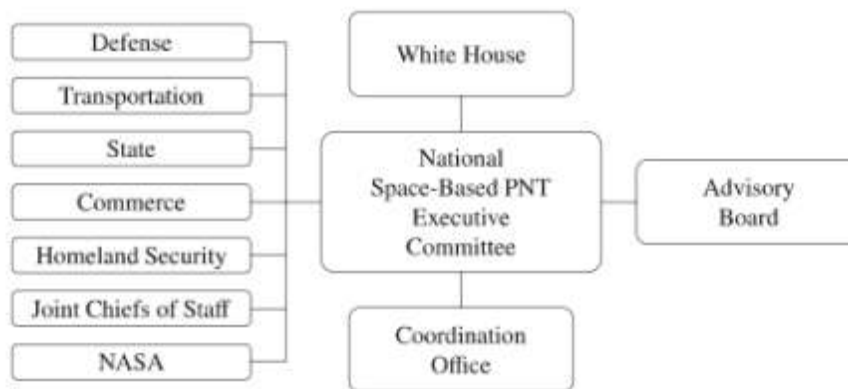
- El 1 de mayo de 2000, la declaración del presidente de los Estados Unidos sobre la decisión de los EE.UU. para detener la degradación de la precisión del GPS fue lanzado. Una cita parcial dice: *"Hoy, me complace anunciar que Estados Unidos detendrá el intento intencional de degradación de las señales del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) disponible para el público comenzando a la medianoche de esta noche. Llamamos a esta característica de degradación Disponibilidad Selectiva (SA). Esto significará que los usuarios civiles de GPS podrán ubicar sitios hasta diez veces más exactas de lo que lo hacen ahora. GPS es un sistema de doble uso basado en satélites que proporciona una ubicación, tiempos precisos e información a usuarios de todo el mundo. Mi Directiva de Decisión Presidencial de marzo de 1996 incluye los objetivos del GPS para: 'fomentar la aceptación y la integración de GPS en aplicaciones pacíficas civiles, comerciales y científicas en todo el mundo; y para alentar la inversión del sector privado y el uso de las tecnologías de GPS de los EE. UU. y servicios'. Para cumplir con estos objetivos, comprometí a los Estados Unidos a suspender el uso de SA para 2006 con una evaluación anual de su uso continuo comenzando este año. "Desde el punto de vista civil, a veces el cambio de SA se considera el primer paso hacia la modernización del GPS.*

La estructura detrás de las decisiones del presidente y vicepresidente de los Estados Unidos se estudia la política de GPS de los EE. UU. Que reemplaza al lanzamiento de 1996 por una nueva política nacional autorizada por el presidente de los Estados Unidos en diciembre 8, 2004. Esta política nacional establece acciones de orientación e implementación para programas de posicionamiento, navegación y temporización basados en el espacio, aumentos y actividades para la seguridad nacional, nacional, civil y comercial de los EE. UU.

También por esta directiva presidencial de diciembre de 2004, el Comité Ejecutivo National SpaceBased de Posicionamiento, Navegación y Temporización (PNT) fue establecido para asesorar y coordinar departamentos y agencias federales en asuntos sobre GPS y sistemas relacionados.

La organización general y la estructura del comité ejecutivo se muestra en la Figura 1-2. se encuentra: el Comité Ejecutivo nacional del PNT basado en el espacio, que está presidido conjuntamente por los Subsecretarios del Departamento de Defensa (DoD) y el Departamento de Transporte (DoT).





**Figura 1-2:** Estructura Organizacional del Comité Ejecutivo Nacional del PNT  
 Fuente: (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2008, pág. 312)

El Comité Ejecutivo Nacional del PNT basado en el espacio ha reemplazado al IGEB, que ha estado activo de 1996 a 2004. Como se describe en (Hothem, 2006), los objetivos de la política son:

- Brindar servicios PNT civiles basados en el espacio sin tarifas directas a los usuarios sobre una base continua en todo el mundo.
- Compromiso para continuar con la modernización del GPS y sus mejoras y, por lo tanto, mejorar los servicios globales.
- Mejorar la resistencia a la interferencia para la seguridad civil, comercial, nacional, y usuarios científicos.
- Acceso abierto y gratuito a la información necesaria para usar GPS civil y sus mejoras.
- Mejorar las capacidades para negar el uso hostil de PNT sin alterar indebidamente el acceso civil y comercial.
- Mantener el GPS como un componente de la infraestructura crítica de EE. UU. e investigar el plan para capacidades y servicios de respaldo.
- Asegurar que otros sistemas internacionales de PNT sean interoperables (o al menos compatible) con GPS y sus mejoras.

## 2.2 Sistemas de Referencia

### 2.2.1 Sistema de Coordenadas

En referencia a las coordenadas, el sistema de referencia terrestre del GPS es el World Geodetic System 1984 (WGS-84). Este sistema geocéntrico fue realizado originalmente por las coordenadas de alrededor de 1 500 sitios terrestres que se han derivado de las observaciones de tránsito. Asociado a este marco está el elipsoide de revolución geocéntrico, originalmente definido por los cuatro parámetros: semieje mayor  $a$ , coeficiente gravitacional zonal de segundo grado normalizado  $\bar{C}_{2,0}$ , velocidad angular truncada de la tierra  $\omega$  y constante gravitacional de la tierra  $\mu$ . Este cuadro se ha usado para GPS desde 1987. El coeficiente de gravitación  $\bar{C}_{2,0}$  se puede expresar mediante el parámetro  $f$ , que se define por los semiejes del elipsoide:  $f = (a-b) / a$ .

La comparación del WGS-84 original y el International Terrestrial Reference Frame (ITRF) reveló diferencias notables (Malys & Slater, 1994).

1. El WGS-84 se estableció a través de observaciones Doppler del sistema satelital de tránsito, mientras que ITRF se basa en observaciones SLR y VLBI. La precisión de las estaciones de referencia de tránsito se estimó en el rango de 1 a 2 metros, mientras que la precisión de las estaciones de referencia ITRF está en el nivel de centímetro.
2. Los valores numéricos para los parámetros de definición originales difieren de aquellos en el ITRF. La única diferencia significativa, sin embargo, estaba en la gravitación de la tierra constante  $d\mu = \mu_{WGS} - \mu_{ITRF} = 0.582 \cdot 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ , que resultó en diferencias mensurables en las órbitas de los satélites.

Sobre la base de esta información, la antigua Agencia de Cartografía de la Defensa (DMA) ha propuesto reemplazar el valor de  $\mu$  en el WGS-84 por el valor estándar del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS) y para refinar las coordenadas de las estaciones de rastreo de GPS. El WGS-84 revisado, válido desde 1994, recibió la designación WGS-84 (G730), donde el número 730 denota el número de semana GPS cuando DMA ha implementado el sistema refinado.

En 1996, la Agencia Nacional de Imágenes y Cartografía (NIMA), la sucesora de DMA, ha implementado una versión revisada del marco denotado como WGS-84 (G873). El marco se realiza por estaciones de monitoreo con coordenadas refinadas. El asociado elipsoide ahora se define por los cuatro parámetros enumerados en la Tabla 1-2, que son ligeramente diferentes de los valores ITRF respectivos. El marco refinado WGS-84 (G1150) era introducido en 2002. Con

respecto a ITRF 2005, el marco actual WGS-84 muestra diferencias sistemáticas no significativas del orden de 1 cm. Por lo tanto, ambos marcos son virtualmente idénticos. Para obtener más detalles sobre el marco WGS-84 (G1150), el lector está referido a (Merrigan, Swift, Wong, & JT, 2002). La información detallada sobre el marco WGS también fue publicada por la Agencia Nacional de Imágenes y Mapas (2004).

**Tabla 1-2:** Parámetros de elipsoide WGS-84

PARÁMETRO Y VALOR	DESCRIPCIÓN
$a = 6378137.0 \text{ m}$	Eje semi mayor del elipsoide
$f = 1/298.257223563$	Aplanamiento del elipsoide
$\omega_e = 7\,292\,115 \cdot 10^{-11} \text{ rad s}^{-1}$	Velocidad angular de la tierra
$\mu = 3\,986\,004.418 \cdot 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$	Constante gravitatoria de la Tierra

Fuente: (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2008, pág. 315)

### 2.2.2 Sistema de Tiempo

Con respecto al tiempo, la hora del sistema de GPS está relacionada con el sistema de tiempo atómico y se hace referencia al tiempo universal coordinado (UTC) como lo mantiene el Observatorio Naval US (USNO). Nominalmente, el tiempo del GPS tiene un tiempo constante de 19 segundos con TAI, el tiempo atómico internacional,

$$TAI = GPS \text{ time} + 19.000^S \quad \text{Ecuación 1.2}$$

y fue coincidente con UTC en la época estándar de GPS del 6 de enero de 1980. Según la Ecuación 2.2 TAI y UTC difieren en un número entero  $n$  de segundos. En enero de 2007, el valor entero era  $n = 33$  y, por lo tanto, el tiempo del GPS es exactamente 14 segundos por delante de UTC.

$$TAI = TDT - 32.184^S \quad \text{offset constante} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

$$TAI = UTC + 1.000^S n \quad \text{offset variable como seg. intercalares están Sustituidos}$$

Comenzando en la época estándar de GPS, la hora del sistema del GPS se cuenta en términos de semanas y segundos de GPS dentro de la semana actual. Para el cálculo del GPS semana usa la relación donde JD indica la fecha juliana e INT es un operador entero.

$$WEEK = INT\lceil (JD - 2444244.5)/7 \rceil \quad \text{Ecuación 3.2}$$

## 2.3 Servicios GPS

Para el posicionamiento de puntos y el tiempo, el GPS proporciona dos niveles de servicio: el servicio de posicionamiento estándar (SPS) con acceso para usuarios civiles (Ver Sección 2.3.1) y el servicio de posicionamiento preciso (PPS) con acceso para usuarios autorizados (Ver Sección 2.3.2).

Los servicios de información GPS proporcionan información del estado del GPS, datos orbitales y de otro tipo a los usuarios civiles. El usuario puede beneficiarse de los diferentes servicios de información GPS. (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2008, pág. 315)

Para comprender las secciones siguientes, se requiere la información básica sobre la señal satelital GPS. Los relojes atómicos encargados de controlar con precisión los componentes de la señal, por lo tanto, son el elemento principal de la precisión de GPS. Los relojes satelitales GPS típicos son relojes de rubidio o cesio. La estabilidad de frecuencia a largo plazo de estos relojes alcanza algunas partes en  $10^{-13}$  y  $10^{-14}$  más de un día. Los futuros másers de hidrógeno tendrán una estabilidad aún mejor de  $10^{-14}$  a  $10^{-15}$  más de un día. Estos relojes de alta precisión, también denominados como estándares de frecuencia, son el elemento principal de los satélites de GPS, puesto que son los encargados de generar la frecuencia fundamental de 10,23 MHz. A partir de esta frecuencia surgen dos señales portadoras denominadas L1 y L2 generadas multiplicando la frecuencia fundamental ( $f_0$ ) por 154 y 120, respectivamente, produciendo

$$L1 = 154 \times f_0 = 1575.42 \text{ MHz}$$

$$L2 = 120 \times f_0 = 1227.60 \text{ MHz}$$

Estas frecuencias duales son esenciales para eliminar la principal fuente de error, es decir, la refracción ionosférica. A partir de la duración del tiempo entre el vehículo satelital hasta el receptor mediante el uso de dos códigos pseudorandómicos se obtiene los llamados pseudorangos, que son modulados (superpuestos) sobre las dos portadoras.

El primer código es el coarse/acquisition(C/A), que está disponible para usuarios civiles. El código C/A, designado como el servicio de posicionamiento estándar (SPS), tiene una longitud de onda efectiva de aproximadamente 300 m. El código C/A está actualmente modulado sobre L1 solamente y se omite intencionalmente de L2. Esta omisión permite negar precisión completa del sistema para usuarios no militares.

El segundo código es el código de precisión (P), que ha sido reservado para el ejército de los EE.UU. y otros usuarios autorizados. El código P, designado como el posicionamiento preciso servicio (PPS), tiene una longitud de onda efectiva de aproximadamente 30 m. El código P es modulado en ambas portadoras L1 y L2. Se permitió el acceso ilimitado al código P hasta que el sistema se declaró completamente operativo. Hoy, el código P está encriptado al código Y para que esté disponible solo para usuarios autorizados. (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2008, pág. 316)

### ***2.3.1 SPS (Standard Positioning Service)***

El SPS es un servicio de posicionamiento y cronometraje. Utiliza el código C/A y está destinado al uso de los usuarios civiles solamente en la frecuencia L1; la frecuencia L2 no es parte del SPS (Defense, Security, & Transportation, 2005). El rendimiento de SPS se refiere a la señal en el espacio (SIS).

El SPS está disponible gratuitamente para todo tipo de usuarios de forma continua y mundial. Tenga en cuenta que estos valores oficiales del SPS dependen de muchos otros factores aparte de las condiciones y restricciones dadas.

### ***2.3.2 PPS (Precise Positioning Service)***

El PPS utiliza el código P (código Y, respectivamente) en la señal L1 y L2. El uso del PPS está restringido solamente para las fuerzas armadas de los EE. UU., agencias federales de EE. UU. y algunos seleccionados de fuerzas armadas y gobiernos aliados.

El servicio se restringe a los usuarios civiles con el uso de dos sistemas: Antispoofing (AS) y Selective Availability (SA) o Disponibilidad Selectiva. El primero AS se encarga de evitar las réplicas mal intencionadas de los verdaderos datos y así evitar la información falsa. El segundo sistema el SA se encarga de la variación del registro obtenido de reloj satelital, produciendo variación del tiempo que dura la transmisión hasta llegar al receptor, lo que genera errores en los datos que forman parte del mensaje de navegación NAV. (Kaplan & Hegarty, 2006).

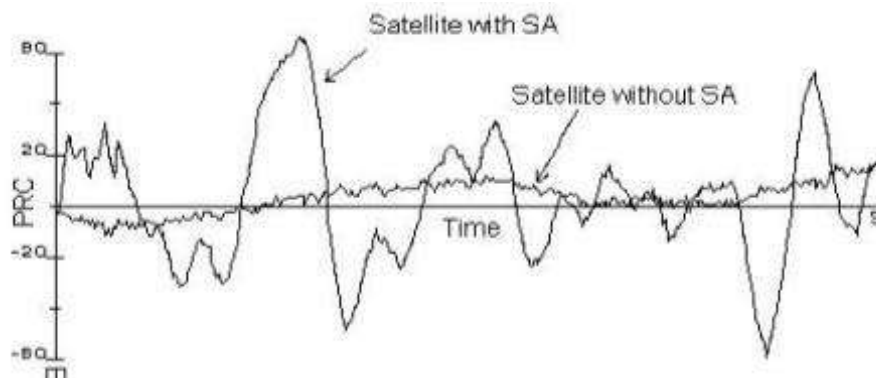
### 2.3.3 Privación de precisión y acceso

Se conocen dos técnicas para negar a los usuarios civiles el uso completo del sistema. El primero es la disponibilidad selectiva (SA) y el segundo es anti-spoofing (AS).

#### Disponibilidad selectiva (SA)

SA es un proceso aplicado por el Departamento de Defensa de los EE.UU. a la señal GPS. Durante el diseño del GPS, la precisión esperada de pseudodistancia del código C/A posibilita en un rango de unos 400 m. El objetivo de SA era negar esta precisión de navegación tanto a usuarios civiles como a las potencias hostiles al oscurecer el reloj del satélite sometiendo a los relojes del satélite a un proceso conocido como "dithering" (dispersión), el cual altera el tiempo ligeramente; manipular las efemérides que son transmitidas ligeramente alteradas respecto a las verdaderas. (Campillo, 2012)

El resultado final es una degradación en la precisión de la posición. Esta medida solo afectaba a aquellos usuarios que trabajaban de manera autónoma. SA se desactivó en su totalidad el 2 de mayo del 2000.



**Figura 2-2:** Disponibilidad Selectiva  
Fuente: (Prieto & Velasco, 2014)

#### Anti-Spoofing (AS)

El diseño de GPS incluye la capacidad de esencialmente "desactivar" el código P o invocar un código encriptado como un medio para denegar el acceso al código P a todos usuarios no autorizados. El efecto Anti-Spoofing es similar al efecto SA, pues su objetivo era no permitir que los usuarios civiles y las fuerzas hostiles tengan acceso al código P de la señal GPS, obligándolos a emplear el código C/A, al cual se aplica el efecto SA. El efecto AS encripta el código P en una señal conocida como código Y. Sólo los usuarios con receptores GPS militares (EEUU y sus aliados) pueden descifrar el código Y. (Campillo, 2012)

El código P modula a la portadora con una frecuencia de 10.23 Hz., mientras que el código C/A lo hace a 1.023 Hz, resultando más preciso, de manera que las distancias se pueden calcular mejor, ya que se trasmite 10 veces más por el código P. Por todas estas razones, los usuarios de receptores GPS militares generalmente obtendrán precisiones del orden de 5 metros, mientras que los usuarios de equipos GPS civiles equivalentes únicamente alcanzarán precisiones de 15 a 100 metros.

## **2.4 Segmentos de GPS**

### **2.4.1 Segmento Espacial**

Los satélites GPS tienen órbitas casi circulares con una altitud de unos 20 200 km sobre la tierra y un período de aproximadamente 12 horas siderales. La constelación y la cantidad de satélites utilizados han evolucionado a una constelación de plano de 24 satélites y 3 orbitales, inclinada  $63^\circ$  al ecuador. Más tarde, por razones presupuestarias, el segmento espacial se redujo a 18 satélites, con 3 satélites en cada uno de los seis planos orbitales. Este esquema finalmente fue rechazado, ya que no proporcionó la cobertura mundial deseada las 24 horas. Alrededor de 1986, el número de satélites planificados se incrementaron a 21, nuevamente 3 en cada uno de los seis planos orbitales y 3 repuestos activos adicionales.

Los satélites de repuesto fueron designados para reemplazar el mal funcionamiento de los satélites activos. La presente constelación nominal consta de 24 satélites operacionales desplegados en seis planos espaciados uniformemente (de la A a la F) con una inclinación de  $55^\circ$  y con cuatro satélites por plano. Además, varios satélites de repuesto activos para el reabastecimiento suelen ser operativos.

Con la constelación completa, el segmento espacial proporciona cobertura global con cuatro a ocho satélites observables simultáneamente por encima de  $15^\circ$  de elevación en cualquier momento del día. Si la máscara de elevación se reduce a  $10^\circ$ , ocasionalmente se podrán ver hasta 10 satélites; y si la máscara de elevación se reduce aún más a  $5^\circ$ , ocasionalmente 12 los satélites serán visibles. (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2008, pág. 323)

#### 2.4.1.1 Categorías de satélite

La evolución del sistema de posicionamiento global GPS está direccionado a un sistema que brinda mayor disponibilidad y simplicidad, pero a la vez muy sólido llamado GPS III. El garantizar una operatividad que satisfaga todos los requerimientos para todo tipo de usuarios es el objetivo principal del sistema GPS III. El desarrollo del sistema GPS II se basa principalmente en la flexibilidad, reducción de riesgos y la característica de estar abierto a cambios futuros para el proceso de transición del Bloque II al Bloque III.

Tras diferentes misiones, se han puesto para GPS alrededor de 50 satélites en órbita, agrupados en diferentes bloques: I, IIA, IIR, IIR-M y el último de ellos, IIF, cuyo último satélite está ya en funcionamiento y que termina por tanto con esta parte de su expansión, para dar paso al nuevo bloque III.

Once satélites del Bloque I (que pesan 845 kg) se lanzaron en el período comprendido entre 1978 y 1985 desde la base aérea de Vandenberg (AFB), California, con vehículos de lanzamiento Atlas F. Con la excepción de una falla de refuerzo en 1981, todos los lanzamientos tuvieron éxito. Hoy, ninguno de los satélites originales del Bloque I está en funcionamiento. Teniendo en cuenta la vida de diseño de estos satélites de 4,5 años, sin embargo, es notable que algunos de los satélites del Bloque I estuvieran operativos durante más de 10 años.

La constelación del Bloque II es ligeramente diferente de la constelación del Bloque I ya que la inclinación de sus planos orbitales es de 55° en comparación con la inclinación del anterior 63°. Además de la inclinación orbital, existe una diferencia esencial entre los satélites del Bloque I y del Bloque II relacionados con la seguridad nacional de los EE. UU. Señales de satélite del bloque I estaban completamente disponibles para usuarios civiles, mientras que algunas señales de satélite del Bloque II están restringidas. El primer satélite del Bloque II, con un costo aproximado de USD 50 millones y un peso de más de 1 500 kg, se lanzó el 14 de febrero de 1989 desde el Kennedy, Cabo Cañaveral en Florida, utilizando un cohete Delta II. La vida útil de los satélites del Bloque II es de 7,5 años. Los satélites individuales, sin embargo, permanecieron operativos más de 10 años.

Los satélites del Bloque IIA ("A" denota avanzado) están equipados con capacidad de comunicación mutua. Algunos de ellos llevan retro reflectores y pueden ser rastreados por rango de láser. El primer satélite Block IIA se lanzó el 26 de noviembre de 1990.



Hoy en día, no se hace distinción entre los satélites del Bloque II y del Bloque IIA. Los satélites Block IIR ("R" denota reposición o reemplazo) pesan más de 2 000 kg y el costo de USD 42 millones son aproximadamente los mismos que para el Bloque II. El primer satélite Block IIR se lanzó con éxito el 23 de julio de 1997. Estos satélites tienen una vida útil de diseño de 10 años. Están equipados con instalaciones mejoradas para la comunicación y el seguimiento entre satélites.

El primer bloque IIR-M ("M" denota modernizado) se lanzó el 25 de septiembre de 2005. Las características de esta clase de satélite son el nuevo código civil L2C en la frecuencia L2, que permite la corrección de los efectos ionosféricos, y el nuevo código M militar en L1 y L2. (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2008, pág. 324)

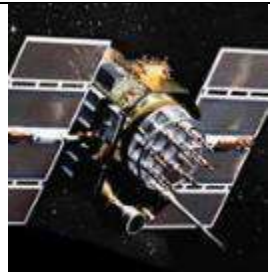

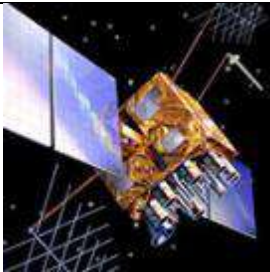
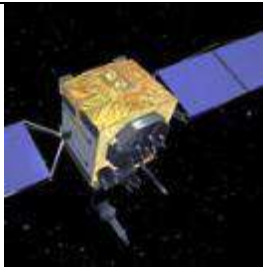
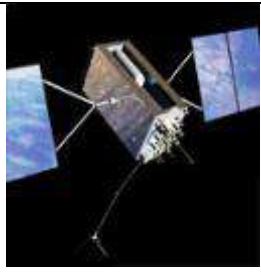
#### *2.4.1.2 Modernización del segmento espacial*

La vida de diseño limitada de los satélites junto con la duración media de la misión ofrece la opción para modernizar los vehículos espaciales. Este proceso de modernización comenzó con el lanzamiento del primer satélite Block IIR-M. (Prasad & Ruggieri, 2005, pág. 120). El lapso de tiempo de los lanzamientos de los satélites comprende desde el año 2005 hasta el año 2009. Actualmente se encuentran 7 satélites operaciones hasta la presente fecha. La próxima generación después de los satélites Block IIR-M es el bloque IIF ("F" denota follow on). Lo más destacado de esta nueva generación es la adición (en comparación con la generación anterior) de una tercera señal civil designada como L5 entre otras características que se mencionan en la Tabla 2-2.

Los satélites del bloque IIF pesan aproximadamente 2 000 kg y está diseñado para 15 años de vida. Están equipados con capacidades mejoradas a bordo, como sistemas de navegación inercial. (Prasad & Ruggieri, 2005, pág. 121) Suponían que el COI de los satélites del Bloque IIF sería en el año 2016 y FOC en 2019. El lapso de tiempo de los lanzamientos de los satélites comprende desde el año 2010 hasta el año 2016. Actualmente se encuentran 12 satélites operaciones hasta la presente fecha. (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2008, pág. 324)

En la actualidad, el DoD lleva a cabo estudios para la próxima generación de satélites de GPS, llamado Bloque III/IIIF. Se espera que estos satélites lleven el GPS hasta 2030 y más allá.

**Tabla 2-2:** Generación de Satélites Actuales y Futuras

SATÉLITES HEREDADOS		SATÉLITES MODERNIZADOS		
				
<b>BLOQUE IIA</b>	<b>BLOQUE IIR</b>	<b>BLOQUE IIR-M</b>	<b>BLOQUE IIF</b>	<b>GPS III / IIIF</b>
0 operacional	12 operacionales	7 operacionales	12 operacionales	En producción
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Código de Adquisición Coarse (C / A) en la frecuencia L1 para usuarios civiles</li> <li>▪ Código P (Y) preciso en frecuencias L1 y L2 para usuarios militares</li> <li>▪ Vida útil de diseño de 7.5 años</li> <li>▪ Lanzado en 1990-1997</li> <li>▪ Último desmantelado en 2016</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ C / A código en L1</li> <li>▪ Código P (Y) en L1 y L2</li> <li>▪ Monitoreo del reloj a bordo</li> <li>▪ Vida útil de diseño de 7.5 años</li> <li>▪ Lanzado en 1997-2004</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Todas las señales heredadas</li> <li>▪ 2da señal civil en L2 (L2C)</li> <li>▪ Nuevas señales de código M militares para mejorar la resistencia al atasco</li> <li>▪ Niveles de potencia flexibles para señales militares</li> <li>▪ Vida útil de diseño de 7.5 años</li> <li>▪ Lanzado en 2005-2009</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Todas las señales del bloque IIR-M</li> <li>▪ 3.ª señal civil en frecuencia L5 (L5)</li> <li>▪ Relojes atómicos avanzados</li> <li>▪ Mejora en la precisión, potencia de la señal y calidad</li> <li>▪ Vida útil de diseño de 12 años</li> <li>▪ Lanzado en 2010-2016</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Todas las señales del bloque IIF</li> <li>▪ 4ª señal civil en L1 (L1C)</li> <li>▪ Fiabilidad, precisión e integridad mejoradas de la señal</li> <li>▪ Sin disponibilidad selectiva.</li> <li>▪ Vida útil de diseño de 15 años</li> <li>▪ IIIF: reflectores láser; búsqueda y rescate de carga útil</li> <li>▪ Primer lanzamiento en 2018.</li> </ul>

Realizado por: Andrea Llerena. 2019.

### 2.4.1.3 Desarrollos Recientes

#### GPS III

**Enero de 2016:** El Centro de Sistemas de Misiles y Espacio de la Fuerza Aérea publicó una licitación que busca propuestas para el contrato de evaluación de viabilidad de preparación de producción de la Fase 1 de GPS Vehículos Espaciales 11+.

**Mayo de 2016:** la Fuerza Aérea otorgó los contratos de GPS III Vehículos Espaciales 11+ a Boeing, Lockheed Martin y Northrop Grumman.

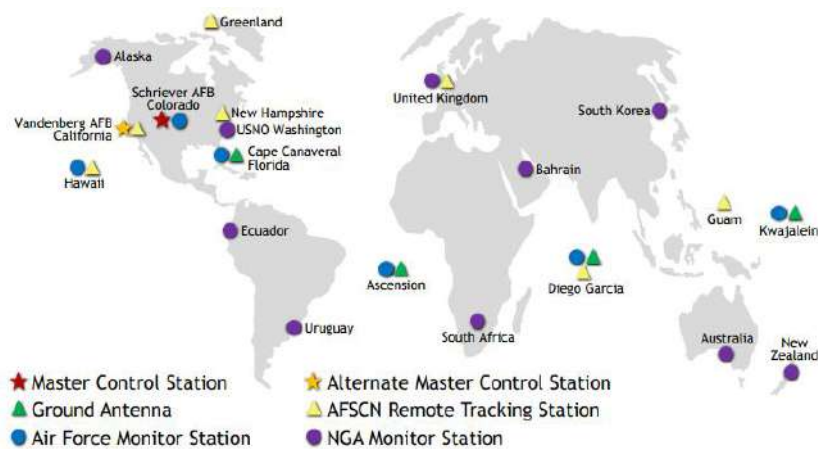
**Sep 2016:** La Fuerza Aérea se encuentra en adquisición de productos para la producción del noveno y décimo satélite GPS III.

#### GPS IIIF ("Follow-On")

**Feb 2018:** La Fuerza Aérea lanzó la Solicitud de Propuestas (RFP) para los satélites GPS IIIF.

### 2.4.2 Segmento de Control

El segmento de control operacional (OCS) consiste en una estación de control principal, una estación de control principal alternativa, 16 estaciones de monitoreo y 11 antenas de comando y control en tierra, Figura 3-2. Las principales tareas operativas del OCS son las siguientes: seguimiento de los satélites para la determinación y predicción de la órbita y el reloj, sincronización de tiempo de los satélites y carga del mensaje de datos de navegación a los satélites. El OCS también fue responsable de imponer SA en las señales de difusión.



**Figura 3-2:** Ubicación de estación de control, monitoreo y antenas terrenas.

Fuente: (www.GPS.gov, 2018)

### **Estación de control principal**

La ubicación de la estación de control principal fue la primera en Vandenberg AFB, California, pero ha sido trasladado al Consolidated Space Operations Center (CSOC) en Schriever AFB, Colorado Springs, Colorado. El CSOC recopila los datos de seguimiento de las estaciones de monitoreo y calcula los parámetros de la órbita y el reloj del satélite utilizando un estimador de Kalman. Estos resultados se pasan luego a una de las antenas de tierra para su eventual carga a los satélites. El control del satélite y la operación del sistema también son responsabilidad de la estación de control principal. (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2008, pág. 325)

### **Estación de Monitoreo**

Antes de la modernización del GPS, había cinco estaciones de monitoreo ubicadas en Hawái, Colorado Springs, Isla Ascensión en el Océano Atlántico Sur, Diego García en el Océano Índico y Kwajalein en el Océano Pacífico Norte. Más tarde, apareció Cabo Cañaveral en Florida. Cada una de estas estaciones está equipada con un estándar de tiempo atómico preciso y receptores que miden continuamente pseudorrangos a todos los satélites. Los pseudorrangos se miden cada 1,5 segundos y, utilizando la ionosfera y datos meteorológicos, se suavizan para producir datos de intervalo de 15 minutos que se transmiten a la estación de control principal. (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2008, pág. 325)

### **Antenas de tierra**

Las cuatro antenas de tierra dedicadas están en el mismo sitio que las estaciones de monitoreo en la Isla Ascensión, Diego García, Kwajalein, y el cuarto se encuentra en Cabo Cañaveral, Florida. Las antenas de tierra están equipadas para transmitir comandos y datos a los satélites y para recibir telemetría y datos de medición desde los satélites. Todas las operaciones de las antenas de tierra están bajo el control de la estación de control maestra.

Las efemérides de satélite y la información del reloj, calculada en la estación de control principal y recibida en la antena de tierra a través de enlaces de comunicación, están cargados a cada satélite de GPS a través de enlaces de radio de banda S. Anteriormente, la carga en cada satélite se realizaba cada ocho horas; entonces la tasa se ha reducido a una vez (o dos veces) por día (Remondi, 1991). Ahora la nueva estrategia de carga ha vuelto a tres cargas por día para cada satélite. Si una antena de tierra se desactiva, los mensajes de navegación pre almacenados están disponibles en cada satélite para admitir un lapso de predicción, de modo que la precisión de posicionamiento se degrade bastante en forma gradual. Las duraciones del servicio de posicionamiento de los satélites sin contacto del OCS se muestran en la Tabla 3-2. (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2008, pág. 325)

**Tabla 3-2: Servicio de posicionamiento sin contacto desde el Segmento de Control**

<b>BLOQUE</b>	<b>DURACIÓN</b>
I	3-4 Días
II	14 Días
IIA	180 Días
IIR	> 180 Días

Fuente: (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2008, pág. 325)

## **Modernización del Segmento de Control**

Como parte del programa de modernización del GPS, la Fuerza Aérea ha actualizado continuamente el segmento de control del GPS durante muchos años. Las actualizaciones en tierra son necesarias para controlar y controlar los satélites GPS más nuevos y para mejorar la ciberseguridad.

### **Actualizaciones pasadas**

#### **1. AEP: Plan de evolución de la arquitectura**

La Fuerza Aérea actualmente manda y controla la constelación GPS operacional a través de un sistema llamado AEP. El sistema es capaz de administrar todos los satélites GPS actuales. AEP se refiere al Plan de Evolución de la Arquitectura implementado en 2007. Bajo este plan, la Fuerza Aérea reemplazó su estación maestra original de control de GPS basada en mainframe con una totalmente nueva basada en tecnologías de TI modernas.

El sistema AEP mejoró la flexibilidad y capacidad de respuesta de las operaciones de GPS y allanó el camino para la próxima generación de capacidades de espacio y control de GPS. Utilizando productos comerciales listos para usar (COTS), AEP también mejoró las estaciones de monitoreo GPS y antenas de tierra, mejorando sustancialmente la sostenibilidad y la precisión. AEP presenta una estación de control maestro alternativa: una copia de seguridad totalmente operativa para la estación de control principal. AEP ha recibido varias actualizaciones desde 2007.

- En 2014, AEP se actualizó para admitir capacidades modernizadas de navegación civil (CNAV), permitiendo que los satélites GPS Block IIR-M y IIF transmitan mensajes de navegación pre operativos en las señales L2C y L5.
- En 2016, las líneas de base de hardware y software de AEP COTS se actualizaron con seguridad cibernética mejorada y compatibilidad mejorada, para respaldar las operaciones en los años 2020.

- En 2019, AEP se actualizará para comandar y controlar los satélites GPS III con el programa de Operaciones de Contingencia GPS (COPs).
- En 2020, AEP se actualizará para proporcionar capacidades básicas de la señal de GPS militar modernizada, conocida como M-Code, a la comunidad militar de usuarios de GPS en virtud del programa M-Code Early Use (MCEU).

En el futuro, AEP y todo el segmento de control GPS serán reemplazados por el Sistema de Control Operacional de Siguiete Generación (OCX). Lockheed Martin estará bajo contrato para mantener el segmento de control terrestre del GPS, incluido AEP, hasta que OCX entre en funcionamiento. (www.GPS.gov, 2018)

## **2. LADO: Operaciones de Lanzamiento / Órbita Temprana, Resolución de Anomalías y Eliminación**

En 2007, la Fuerza Aérea desplegó el sistema Launch / early orbit, Anomaly resolution y Disposal Operations para gestionar satélites GPS no operativos (Bloque IIA / IIR / IIR-M, IIF). Éstas incluyen:

- Satélites recién lanzados en proceso de pago;
- Satélites fuera de servicio para la resolución de anomalías;
- Satélites residuales almacenados en órbita; y
- Satélites que requieren eliminación al final de su vida útil.

El sistema LADO cumple tres funciones principales:

- Telemetría, rastreo y control;
- Planificación y ejecución de movimientos de satélites; y
- Simulación de diferentes tareas de telemetría para cargas y subsistemas de GPS.

El sistema LADO es parte del segmento de control operacional (OCS) del GPS, pero está separado del sistema AEP que controla la constelación de satélites GPS operacionales. El sistema LADO utiliza las estaciones de seguimiento remotas de la Red de control de satélites de la Fuerza Aérea (AFSCN) solamente, no las antenas de tierra dedicadas GPS. El sistema LADO se ha actualizado varias veces desde 2007. En octubre de 2010, la Fuerza Aérea aceptó operativamente una nueva versión que agregaba la capacidad de GPS Block IIF.

En el futuro, LADO y todo el segmento de control de GPS será reemplazado por el Sistema de Control Operacional de Siguiete Generación (OCX). (www.GPS.gov, 2018)

### **3. L-AII: Legacy Accuracy Improvement Initiative / Iniciativa de mejora de precisión**

L-AII, finalizada en 2008, amplió el número de estaciones de monitoreo en el segmento de control operativo GPS de seis a 16. Esto triplicó la cantidad de datos recopilados en las órbitas de los satélites GPS, permitiendo una mejora del 10% al 15% en la precisión de la información transmitida desde la constelación GPS. El esfuerzo de L-AII agregó 10 estaciones de monitoreo de GPS operacionales que pertenecen y son operadas por la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA). NGA originalmente envió estos sitios para ayudarlo a definir el marco de referencia de la Tierra utilizado por el GPS. (www.GPS.gov, 2018)

#### **Actualizaciones en Curso**

##### **1. OCX: Sistema de Control operacional de Nueva Generación**

El Sistema de control operacional de próxima generación (OCX) es la versión futura del segmento de control GPS. OCX controlará todos los satélites GPS modernizados y heredados, gestionará todas las señales de navegación civiles y militares, y proporcionará seguridad cibernética mejorada y resistencia para la próxima generación de operaciones de GPS. Consistirá en:

- Una estación de control principal y una estación de control maestro alternativa
- Estaciones de monitoreo dedicadas
- Antenas de tierra
- Simulador de sistema GPS y
- Entrenador espacial estandarizado.

El desarrollo de OCX sigue un enfoque incremental.

El **Bloque 0** es el Sistema de Lanzamiento y Control (LCS) destinado a controlar las operaciones de Lanzamiento y Órbita Temprana (LEO) y el pago en órbita de todos los satélites GPS III. OCX Block 0 es un subconjunto de OCX Block 1 que proporciona el hardware, el software y la base de ciberseguridad para el Bloque 1.

El **bloque 1** coloca la capacidad operativa para controlar todos los satélites heredados y señales civiles (L1 C/A), señales militares (L1P(Y), L2P(Y)) así como los satélites GPS III y la señal civil modernizada (L2C) y la señal de seguridad de vuelo de la aviación (L5). Además, el Bloque 1 desplegará la capacidad operativa básica para controlar las señales militares modernizadas (L1M y L2M (código M)) y la señal compatible globalmente (L1C). También

cumple completamente con los requisitos de aseguramiento de la información / defensa cibernética.

El **bloque 2** coloca la capacidad operacional avanzada para controlar las características avanzadas de las señales militares modernizadas (L1M y L2M (código M)). El bloque 2 se entregará al mismo tiempo que el bloque 1.

#### **Desarrollos recientes:**

Nov 2017: la Fuerza Aérea aceptó la entrega de OCX Block 0.

### **2. COps: Operaciones de Contingencia GPS III**

Los CO volarán vehículos espaciales GPS III para ser llevados a la constelación operacional, manteniendo los niveles actuales de rendimiento y evitando la degradación. El programa de adquisición actual del Bloque OCX 1 (capacidad para operar satélites GPS III) pone en peligro el mantenimiento de la constelación de GPS ya que el segmento de control actual no puede operar satélites GPS III.

GPS III COps es una modificación del segmento de control de corriente para operar los satélites GPS III de posicionamiento, navegación y temporización (PNT) y las cargas útiles del Sistema de Detección de Detonación Nuclear (NDS) y mantener la capacidad limitada de M-Code de prueba hasta que se entregue el OCX Bloque 1.

COps se basa en OCX Block 0 para el lanzamiento de GPS III, gran anomalía y capacidad de eliminación.

#### **Desarrollos recientes:**

Feb 2016: La Fuerza Aérea anunció una modificación al contrato de desarrollo GPS III para implementar COps.

Mayo de 2016: los CO aprobaron su revisión preliminar del diseño.

Dic 2016: COps aprobó su crítica de diseño.

### **3. MCEU: Uso Temprano de M-Code**

MCEU es necesario para proporcionar capacidades básicas de la señal de GPS militar modernizada, conocida como M-Code, a la comunidad militar de usuarios de GPS. Sin M-Code, los usuarios militares de GPS seguirán estando amenazados por el atasco y el spoofing del GPS. Por lo tanto, al proporcionar la señal M-Code, MCEU proporcionará mayores protecciones



contra esas amenazas antes de la entrega del OCX Block 1. Además, cuando MCEU se vuelva operativo, puede soportar las pruebas operacionales del Equipo Militar de Usuario GPS.

**Desarrollos recientes:**

Agosto de 2017: la Fuerza Aérea anunció la adjudicación del contrato principal para desarrollar e instalar MCEU en el segmento de control operacional (OCS) del GPS.

**2.5 Estructura de la Señal**

**2.5.1 Señales en el Espacio**

La terminología de la Tabla 4-2 sigue el léxico aprobado por el JPO’s de GPS de las abreviaturas de señal, se ha adaptado para tener en cuenta las señales civiles actuales y futuras en L1 y L5. No figuran en la lista las frecuencias de banda S utilizadas para la comunicación entre la estación de control y el satélite, y todas las demás frecuencias.

Las señales militares están encriptadas para restringir su uso a usuarios autorizados. Las señales civiles, tal como enfatizó el gobierno de EE. UU., se brindan de forma gratuita a todos los usuarios de todo el mundo (Hudnut & Titus, 2004).

**Tabla 4-2:** Léxico de señal de GPS (Departamento de la Fuerza Aérea 2001)

L1	Enlace 1, Frecuencia Portadora = 1 575.420 MHz
L2	Enlace 2, Frecuencia Portadora = 1 227.600 MHz
L3	Enlace 3, Frecuencia Portadora = 1 381.050 MHz
L4	Enlace 4, Frecuencia Portadora = 1 379.913 MHz
L5	Enlace 5, Frecuencia Portadora = 1 176.450 MHz
C/A	Coarse/adquisition Code
P(Y)	Código de precisión; El código Y reemplaza el código P en modo anti-spoofing
M	Código militar
L1C	Código civil en L1
L2C	Código civil en L2; referencia general a la señal de código en L2,
L2CM	Código de longitud moderada en L2C
L2CL	Código de larga duración en L2C
L5C	Código civil en L5; referencia general al código civil en L5,
L5I	Código en fase en L5
L5Q	Código de cuadratura en L5
NS	Códigos no estándar

Realizado por: Andrea Llerena. 2019

Cuando el GPS entró en pleno funcionamiento en 1995, el sistema comenzó a emitir señales de navegación en las frecuencias portadoras L1 y L2. Los portadores L3 y L4 se han utilizado para el sistema de detección nuclear (NDS) y el paquete de análisis NDS (NAP), que son dos servicios militares. Los desarrollos en curso, los crecientes requisitos del usuario, y la competencia resultante del sistema de navegación por satélite europeo conduce al programa de modernización del GPS.

Las nuevas señales proporcionarán mejores propiedades de correlación, más potencia de señal, estructura de mensaje mejorada, mayor precisión y protección de interferencia mejorada (Hudnut & Titus, 2004). La modernización abarca el enlace adicional L5 y varias señales de navegación adicionales en todas las frecuencias portadoras, incluidas las civiles y militares.

## **2.5.2 Características de la señal GPS**

### *2.5.2.1 Portadora*

Se refiere a la onda portadora con una frecuencia fundamental  $f_{L1}$  o  $f_{L2}$

### *2.5.2.2 Mensaje de Navegación*

Los datos del mensaje de navegación NAV,  $D(t)$ ; contienen parámetros orbitales, efemérides del vehículo espacial (SV), hora del sistema, datos de comportamiento del reloj SV, mensajes de estado, etc.

El mensaje de navegación original NAV se compone de un marco maestro con 37500 bits. Considerando una velocidad de datos de 50 bps, la transmisión del mensaje lleva 12.5 minutos. El marco maestro se subdivide en 25 cuadros, cada uno con 1500 bits con un mensaje de duración de 30 segundos. Un cuadro consta de cinco subtramas como se observa en la Tabla 5-2, mientras que un marco secundario toma 6 segundos y contiene 10 palabras con 30 bits cada una.

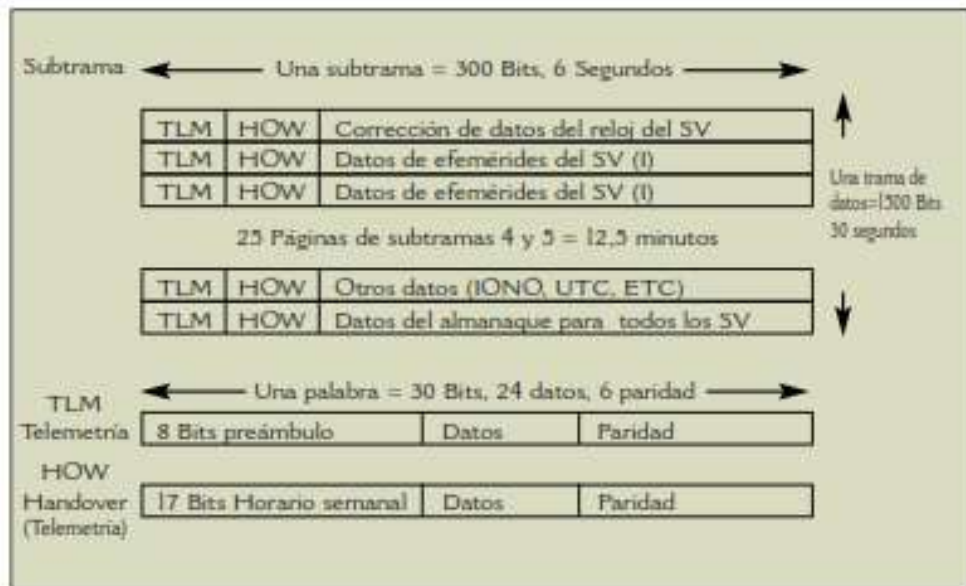
El tiempo necesario para la transmisión para una palabra es, por lo tanto, de 0,6 segundos. Un chip de datos, además, consta de 20460 chips de código C/A, 204600 chips de código P o 31508400 ciclos de la portadora L1. (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2008, pág. 337).

**Tabla 5-2:** Información de cada trama que forma el mensaje de navegación

Subtrama	Detalle
Subtrama 1	Esta Subtrama contiene la información del estado del reloj del vehículo espacial, el estado del mismo y la información de antigüedad del mensaje.
Subtrama 2 y 3	Estas Subtramas contienen la información de las efemérides del vehículo espacial.
Subtrama 4	Esta Subtrama es la encargada de encriptar el código P, además de contener la información ionosférica, UTC, etc.
Subtrama 5	Esta Subtrama contiene la información de las condiciones de la constelación y datos de almanaque.

Realizado por: Andrea Llerena. 2019

Cada subtrama comienza con la palabra de telemetría (TLM) que contiene una sincronización de 8 bits patrón (10001011) y algunos mensajes de diagnóstico. La sincronización no es una secuencia única en el mensaje de datos, lo que aumenta la probabilidad de detección falsa. La segunda palabra en cada subtrama es HOW, además de una identificación de subtrama y algunas letras, esta palabra contiene el tiempo de la semana (TOW); que es el recuento del tiempo de inicio del siguiente Subtrama.



**Figura 4-2:** Estructura de NAV – Mensaje de navegación de GPS

Fuente: (Berrocoso, 2004, pág. 14)

### 2.5.2.3 Códigos PRN

Existen dos códigos PRN o Códigos de Ruido Pseudo-aleatorio: el código de adquisición aproximado (C/A) y el código de precisión encriptado P(Y).

## Código C/A

El código de adquisición aproximado (Coarse/Adquisition en inglés) es un código PRN no clasificado, para uso civil. El código C/A está formado por 1023 chips de largo con una frecuencia de código de 1.023 megachips por segundo (Mcps). Por lo tanto, la duración del código es 1 ms y la longitud del chip corresponde a aproximadamente 300m. La duración relativamente corta del código permite una adquisición rápida de señal, pero considerando el nivel máximo de correlación cruzada de -24 dB de dos códigos C/A, el código es más susceptible a la interferencia.

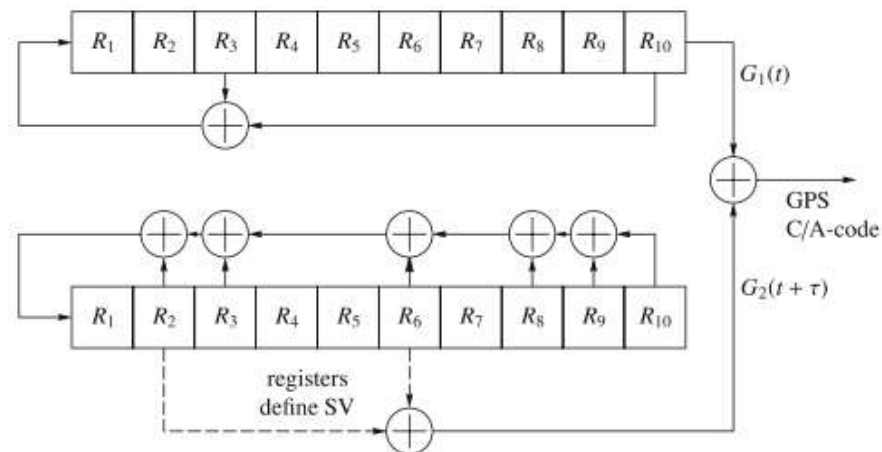
El código C/A es un código Gold generado por dos registros de desplazamiento de retroalimentación lineal (LFSR) de 10 bits. En la Tabla 6-2, se detallan los polinomios característicos G1 y G2 son:

**Tabla 6-2:** Polinomios Generadores del código C/A

Número del Registro de Desplazamiento	Polinomio Generador	Estado Inicial de los Bits
$G_1(t)$	$G_1(t)=X^{10}+X^3+1$	10 Bits iniciado en "1"
$G_2(t+\tau)$	$G_2(t+\tau)=X^{10}+X^9+ X^8+ X^6+X^3+ X^2$	10 Bits iniciado en "1"

Realizado por: Andrea Llerena. 2019

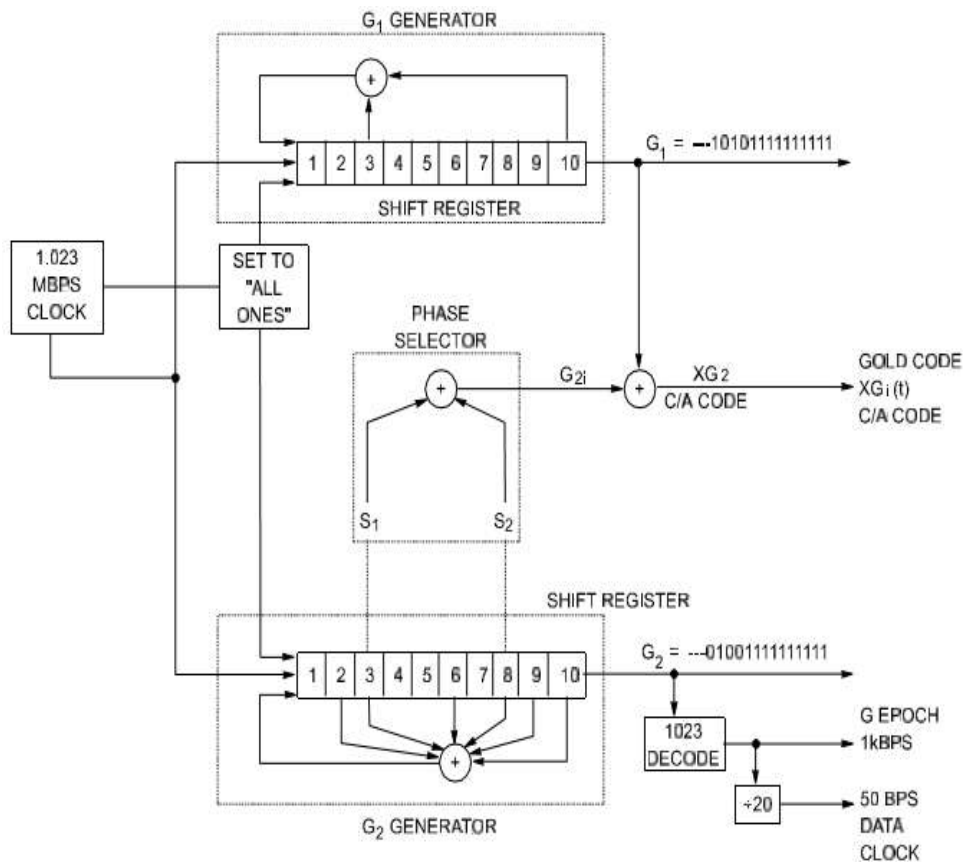
y su estado inicial corresponde a 1 en cada registro. El código C/A resulta de realizar la suma en módulo 2 de las dos secuencias de código.



**Figura 5-2:** Polinomios generadores G1 y G2

Fuente: (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2008, pág. 333)

Al combinar las celdas R de  $G_2$ , se puede formar diversos códigos C/A (32 de estos códigos se toman para satélites y el resto para estaciones en tierra).



**Figura 6-2:** Configuración del Generador de Código C/A  
Fuente: (Navstar, 2015, pág. 24)

## Código P

El código de precisión encriptado es un código PRN clasificado, para uso militar. El código P es un código formado por cuatro registros de desplazamiento de retroalimentación lineal (LFSR) de 12 bits cada uno. Los polinomios característicos  $X_{1A}$ ,  $X_{1B}$ ,  $X_{2A}$  y  $X_{2B}$  son:

**Tabla 7-2:** Polinomios Generadores del código P

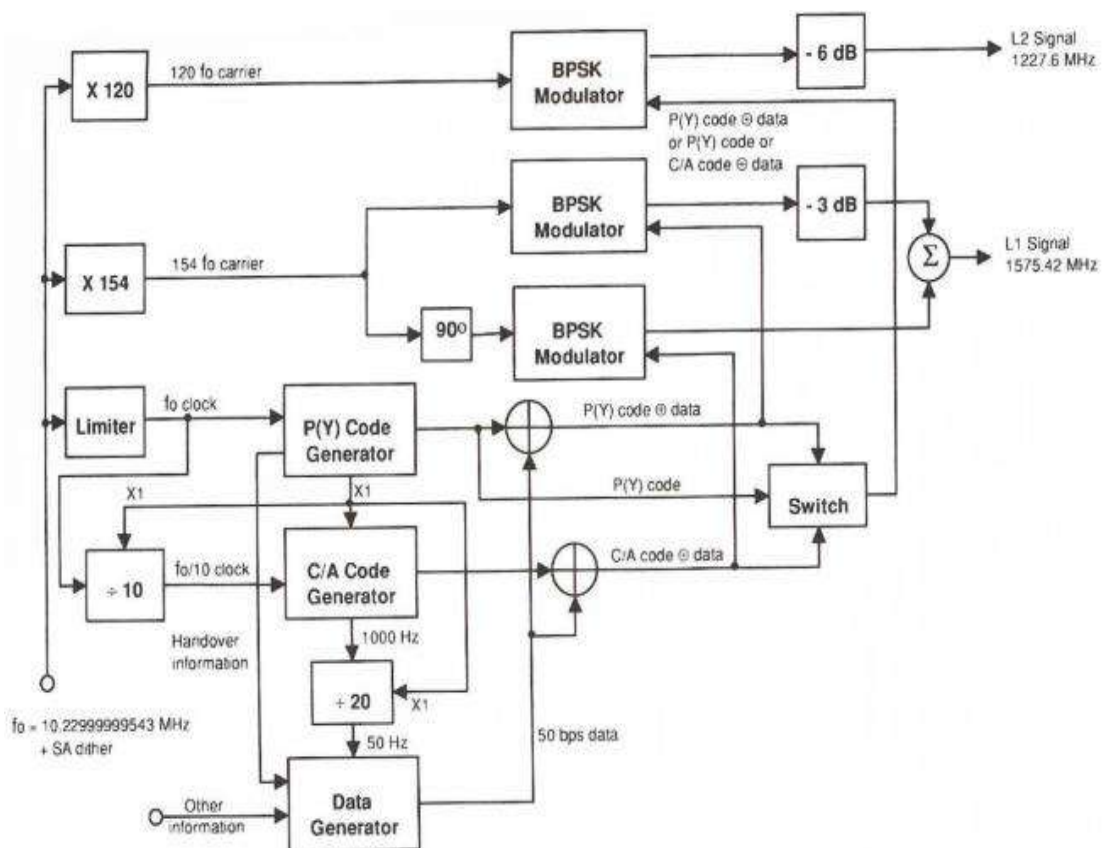
Número del Registro de Desplazamiento	Polinomio Generador	Estado Inicial de los Bits
$X_{1A}$	$X_{1A} = 1 + X^6 + X^6 + X^{11} + X^{12}$	001001001000
$X_{1B}$	$X_{1B} = 1 + X^1 + X^2 + X^3 + X^8 + X^9 + X^{10} + X^{11} + X^{12}$	010101010100
$X_{2A}$	$X_{2A} = 1 + X^1 + X^3 + X^4 + X^5 + X^7 + X^8 + X^9 + X^{10} + X^{11} + X^{12}$	100100100101
$X_{2B}$	$X_{2B} = 1 + X^2 + X^3 + X^4 + X^8 + X^9 + X^{12}$	010101010100

Realizado por: Andrea Llerena. 2019

### 2.5.3 Generación de la señal GPS

En la Figura 7-2, se observa en forma detallada el diagrama de bloques usado en la generación de la señal GPS:

- La frecuencia fundamental de 1575.42 MHz obtenida del reloj atómico del vehículo satelital es multiplicada por 154, para tener como resultado la frecuencia portadora L1 ( $f_{L1}$ ).
- La frecuencia fundamental de 1575.42 MHz obtenida del reloj atómico del vehículo satelital es multiplicada por 120, para tener como resultado la frecuencia portadora L2 ( $f_{L2}$ ).
- Los códigos C/A y P en L1 van modulados en cuadratura (desfasados  $90^\circ$ ) para que no interfieran. Existe un Switch que desde el segmento de control permite elegir los códigos enviados por L2.



**Figura 7-2:** Diagrama de Bloques – Generación señal GPS

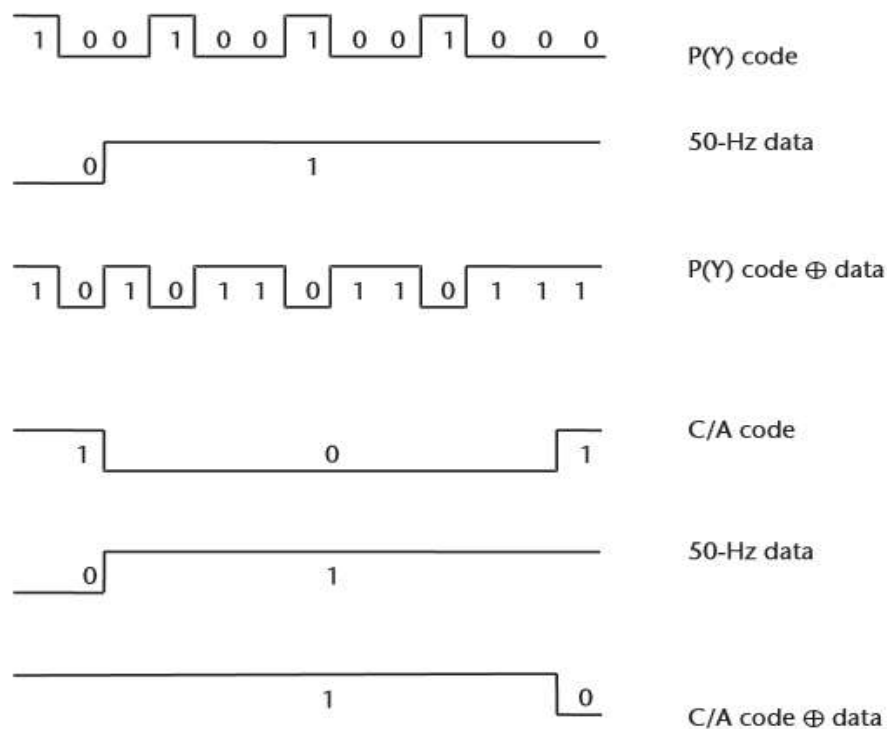
Fuente: (Kaplan & Hegarty, 2006, pág. 124)

A los códigos C/A y P, se los adiciona mediante una suma en módulo 2, mediante la operación lógica XOR, como se muestra en la Tabla 8-2. A esta señal de salida se la aplica la modulación BPSK y BOC. (Kaplan & Hegarty, 2006, págs. 123-127).

**Tabla 8-2: XOR - Tabla de Verdad**

a	b	a XOR b
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Realizado por: Andrea Llerena. 2019



**Figura 8-2: Señal Resultante de la Operación XOR**

Fuente: (Kaplan & Hegarty, 2006, pág. 125)

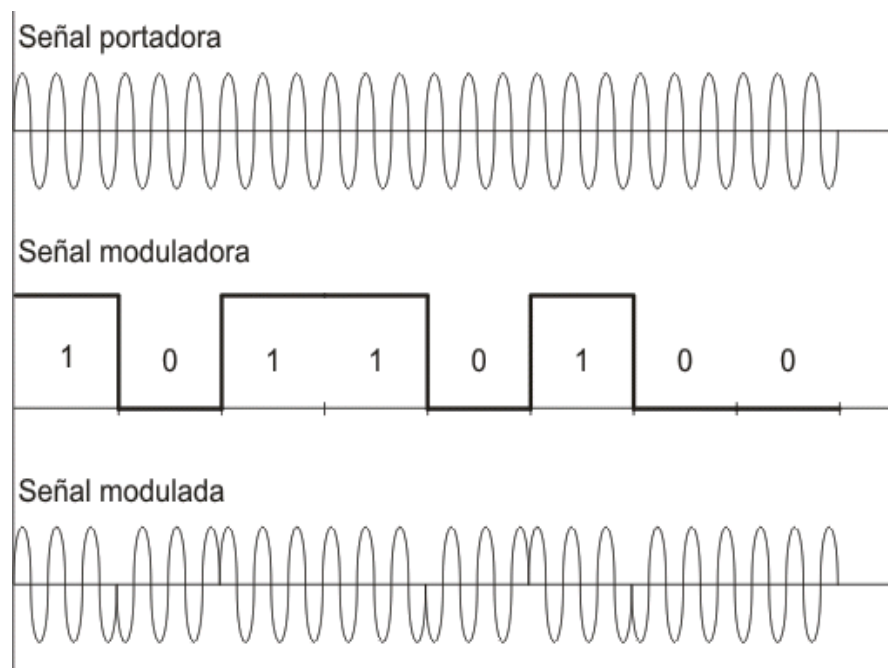
## 2.6 Modulaciones

La modulación utilizada por el sistema GPS para la señal civil en 1575,42 MHz es BPSK de espectro ensanchado, conformador con un pulso rectangular y una velocidad de chip de 1.023 MHz, denominada BPSK-R(1). Sin embargo, se ha demostrado que es posible obtener un mejor funcionamiento del sistema utilizando modulaciones de espectro ensanchado que concentren más potencia en frecuencias alejadas de la portadora central.

Por este motivo, el acuerdo estableció la modulación BOC (1,1) (Binary Offset Carrier) como señal básica para las futuras nuevas señales GPS L1.

### 2.6.1 Modulación BPSK

La modulación Binaria por Desplazamiento de Fase o también llamada BPSK por sus siglas en inglés, se define por una portadora de Radio Frecuencia que se transmite desplazada 180°, dependiendo si el bit que se transmite corresponde a un 1 lógico o un 0 lógico.



**Figura 9-2:** Modulación BPSK  
Fuente: (Reyes, 2012, pág. 06)

Como se observa en la Figura 9-2, la modulación BPSK es el resultado de multiplicar una forma de onda llamada Portadora con una forma de onda llamada moduladora, y está caracterizada por tener únicamente dos símbolos +1 y -1 para 0 y 1 respectivamente. La Ecuación 4.2 corresponde a la señal BPSK utilizada para GPS. (Serna, 2015)

$$S^k = A_c(C(t) XOR D(t)) \cos(2\pi f_c t + \phi) \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Dónde:

$S^k$ :  $k^{th}$  Satélite GPS

$A_c$ : Amplitud del código C/A



$C(t)$ :  $\pm 1$  indica la fase del código C/A

$D(t)$ :  $\pm 1$  indica la fase de la señal de datos

$f_l$ : Frecuencia L1=1575.42 MHz

$\emptyset$ : Fase inicial

### 2.6.1.1 DSSS

El Espectro Ensanchado por Secuencia Directa o DSSS por sus siglas en inglés, es una extensión de cualquier modulación por desplazamiento de fase como la BPSK. Se denomina espectro ensanchado, debido a que se aumenta el ancho de banda que ocupa la señal luego de ser modulada por la elevada velocidad de la onda PRN, a esto se lo conoce como *chipping*. El ancho de banda de la señal de espectro ensanchado es proporcional a la razón de *chipping*.

Existen sistemas de navegación como el sistema GPS que utilizan esta técnica, debido a sus beneficios ante la presencia de interferencias y efectos de multicamino, la inversión constante del código PRN que permite una mejor precisión en el receptor, además del uso de varias y diversas secuencias PRN permite la transmisión simultánea de diversos satélites en la misma frecuencia.

#### Características de la técnica DSSS

Los sistemas que usan la técnica DSSS cumplen características como: El AB (ancho de banda) de la señal  $m(t)$  que corresponde al mensaje de navegación es menor que el AB de la señal  $s(t)$  que corresponde a la señal enviada. La Ecuación 5.2 corresponde a la señal DSSS con corrimiento de fase binaria BPSK. (Armijo, 2017)

$$s(t) = Re * [A_c m(t) * c(t) * e^{jw_c t}] \quad \text{Ecuación 5.2}$$

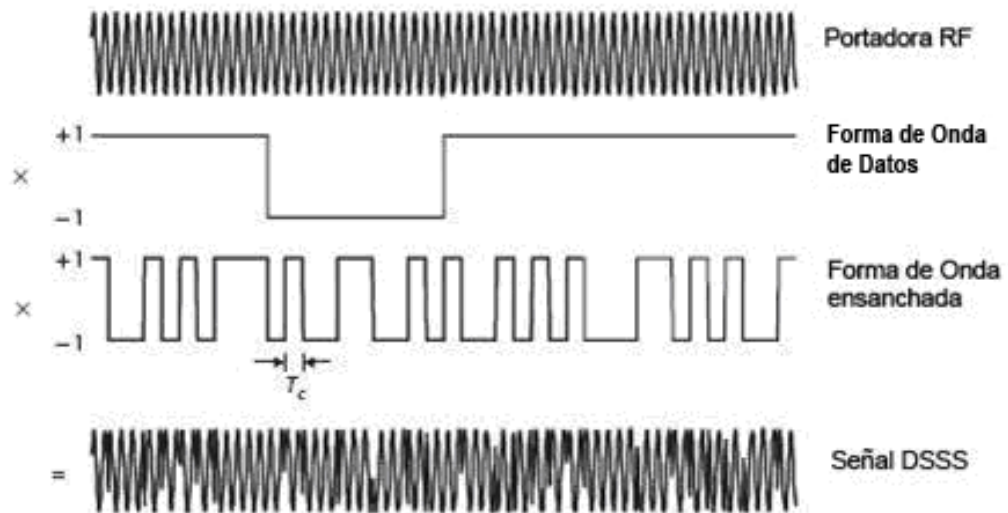
Dónde:

$A_c m(t)$  : Envoltente Compleja

$c(t)$ : Señal Ensanchadora

El AB de la señal  $s(t)$  se forma por una señal ensanchadora  $c(t)$  y esta señal debe ser conocida por el receptor para la recuperación de los bits transmitidos.

La señal ensanchadora  $c(t)$  o también llamada PRN o código PRN es similar a la forma de onda de la señal de datos, lo que las diferencia es la razón de símbolo mucho mayor, su forma de onda es periódica y finita.



**Figura 10-2:** Señal modulada DSSS

Fuente: (Reyes, 2012, pág. 07)

- $T_c$ : se conoce como periodo de chip y corresponde al tiempo mínimo entre las transiciones de la forma de onda PRN.
- El recíproco de  $T_c$  se lo conoce como razón de *chipping*.
- La porción de forma de onda PRN sobre  $T_c$  se lo conoce como *chip*.

### 2.6.2 Modulación BOC

La modulación Binary Offset Carrier (BOC) surge por la necesidad de añadir una nueva señal DSSS dentro de las bandas de frecuencias que están en funcionamiento, además de mejorar las propiedades tradicionales de las señales GNSS como: resistencia al multitrayecto, interferencias de todo tipo de ruido y básicamente para una mejor compartición espectral del ancho de banda con las señales existentes o futuras; es decir describe una clase de modulación de espectro ensanchado introducidas recientemente para la nueva generación de sistemas satelitales (GNSS). El sistema modernizado GPS utilizará estas señales BOC.

La modulación BOC, se define, como el producto en el dominio del tiempo de: una señal portadora sinusoidal, una subportadora, un código de expansión PRN y una señal de datos. Tanto la frecuencia de subportadora  $f_s$  como la tasa del código PRN son dos parámetros de diseño independientes en la modulación. Estos dos componentes son los que proporcionan independencia para concentrar la potencia de la señal dentro de cualquier lugar de la banda asignada y reducir la interferencia con otras señales.

Los vehículos espaciales tienen un reloj atómico con una frecuencia nominal referencial de 1.023 MHz ( $f_o$ ), de este se generan las componentes de la señal de navegación. Para la señal BOC sus componentes se eligen como múltiplos de  $f_o$ .

$$f_s = m * f_o = \frac{1}{2T_s} \quad \text{Ecuación 6.2}$$

$$f_c = n * f_o = \frac{1}{nT_s} = \frac{2}{n} f_s \quad \text{Ecuación 7.2}$$

Dónde:

$m$ : Define la frecuencia de subportadora

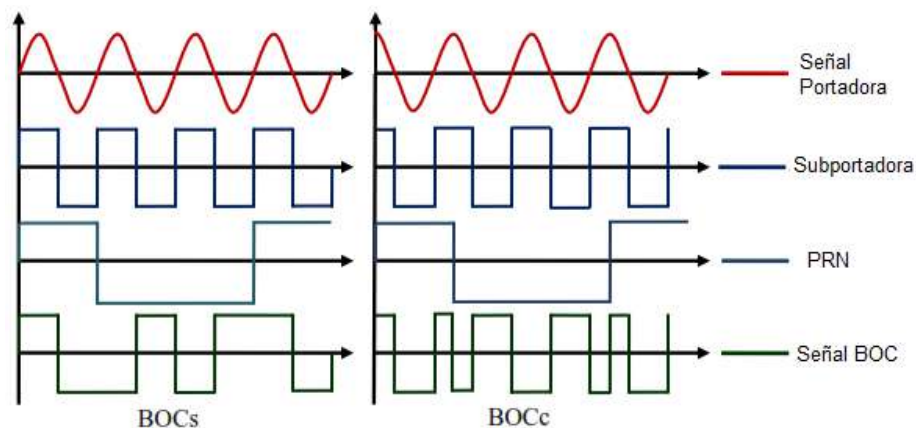
$n$ : Define la tasa de código PRN

$r = 2 \frac{f_s}{f_c} = 2 \frac{m}{n}$ :  $r$  es el número de períodos de la subportadora durante un código de chip.

Se denomina modulación *BOC* ( $m, n$ ), donde  $m$  y  $n$  siempre serán números enteros naturales. Como la modulación BOC es una modulación de onda subportadora cuadrada; donde una señal  $s(t)$  se multiplica por una subportadora rectangular de frecuencia  $f_{sc}$ , que divide el espectro de la señal en dos partes, por lo tanto, la Ecuación 8.2 y la Ecuación 9.2 corresponden a la señal BOC. (Usha, Surya-Prabha, & Dr.V.B.S.Srilatha-Indira, 2012).

$$S_{boc}(t) = s(t) * \text{sign}(\sin(2\pi f_{sc} t)) \quad \text{Ecuación 8.2}$$

$$S_{boc}(t) = s(t) * \text{sign}(\cos(2\pi f_{sc} t)) \quad \text{Ecuación 9.2}$$



**Figura 11-2** Estructura de la Señal BOC. a) Seno b) Coseno  
Fuente: (Anantharamu, 2011, pág. 26)

### Características de la señal BOC

Una de las características que proporciona la presencia de la subportadora es la función de autocorrelación (ACF) de múltiples picos que divide la densidad espectral de potencia (PSD) en dos lóbulos simétricos separados de la frecuencia central de la señal. (Betz, 1999).

La ACF y PSD de BPSK y BOC (1,1) se muestran en la figura 12-2, en el caso de BOC (1,1) la pendiente es más pronunciada en comparación con el ACF de BPSK, lo que proporciona una mayor capacidad de recuperación de datos frente a efectos de multicamino. Sin embargo, el ACF de las señales BOC tiene múltiples picos; uno primario y varios secundarios que pueden conducir a un seguimiento ambiguo. El número de picos secundarios  $N_{sp}$  en la señal modulada BOC se obtiene con la Ecuación 10.2.

$$N_{sp} = \begin{cases} 4 \left(\frac{m}{n}\right) - 2 & \text{BOCs} \\ 4 \left(\frac{m}{n}\right) & \text{BOCs} \end{cases} \quad \text{Ecuación 10.2}$$

La expresión teórica de la densidad espectral de potencia, asumiendo una secuencia PRN infinita corresponde a:

Seno – BOC (m, n):

$$G_{\sin-BOC}(f) = f_c \left[ \frac{\tan\left(\frac{\pi f}{f_c} \frac{n}{2m}\right) \sin\left(\frac{\pi f}{f_c}\right)}{\pi f} \right]^2 \quad \text{si } \frac{2m}{n} \text{ es par} \quad \text{Ecuación 11.2}$$

$$G_{\sin-BOC}(f) = f_c \left[ \frac{\tan\left(\frac{\pi f}{f_c} \frac{n}{2m}\right) \cos\left(\frac{\pi f}{f_c}\right)}{\pi f} \right]^2 \quad \text{si } \frac{2m}{n} \text{ es impar} \quad \text{Ecuación 12.2}$$

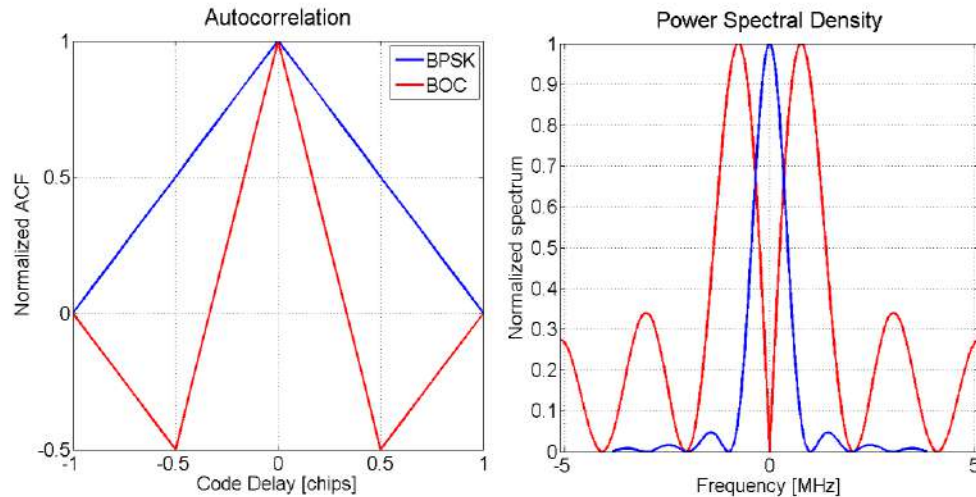
Coseno – BOC (m, n):

$$G_{\cos-BOC}(f) = f_c \left[ \frac{\left(\cos\left(\frac{\pi f}{f_c} \frac{n}{2m}\right) - 1\right) \sin\left(\frac{\pi f}{f_c}\right)}{\pi f \cos\left(\frac{\pi f}{f_c} \frac{n}{2m}\right)} \right]^2 \quad \text{si } \frac{2m}{n} \text{ es par} \quad \text{Ecuación 13.2}$$

$$G_{\cos-BOC}(f) = f_c \left[ \frac{\left(\cos\left(\frac{\pi f}{f_c} \frac{n}{2m}\right) - 1\right) \cos\left(\frac{\pi f}{f_c}\right)}{\pi f \cos\left(\frac{\pi f}{f_c} \frac{n}{2m}\right)} \right]^2 \quad \text{si } \frac{2m}{n} \text{ es impar} \quad \text{Ecuación 14.2}$$

Las diferencias en las funciones de PSD implican que las funciones de autocorrelación asociadas tienen diferentes formas. (Julien, Future GNSS Signals, 2014)

La Figura 12-2, muestra el espectro de potencia simétrico con dos lóbulos principales desplazados de la frecuencia principal permite procesar señales BPSK y BOC simultáneamente con mínimas interferencias.



**Figura 12-2:** Función de ACF y PSD para las señales BPSK y BOC  
**Fuente:** (Anantharamu, 2011, pág. 27)

## 2.7 Codificación de Canal

La codificación de canal se encarga de transformar los bits, como una forma de protección de la información transmitida ante la presencia de degradaciones en el canal de transmisión, la estrategia para proteger esta información es introducir bits de redundancia a la señal, lo que conlleva a una cantidad de bits mucho mayor a la salida que a la entrada; es decir se encarga de la detección y corrección de los errores FEC.

En la detección de errores, el receptor debe estar en la capacidad de identificar que la señal recibida es errónea, por lo que puede solicitar que la señal sea transmitida nuevamente por el transmisor, esto es lo más adecuado para sistemas en los que la transmisión en tiempo real no es muy crítica, para este proceso es necesario solamente de la introducción de pocos bits de redundancia en la secuencia antes de la transmisión.

En la corrección de errores, el receptor debe estar en la capacidad de identificar que la señal recibida es errónea y además saber que bits son los errados y corregirlos, para este proceso es necesario que se introduzca una cantidad mucho mayor de bits de redundancia en la secuencia antes de la transmisión.

Un sistema de codificación de canal debe estar en la capacidad de corregir otras fallas presentes en la degradación del canal como: el ruido térmico, limitaciones de potencia, el efecto multicamino que influye en el desvanecimiento de la señal lo que provoca, distorsión frecuencial y temporal; además de contribuir al retardo y atenuación de la señal transmitida.

## 2.7.1 Codificación y Decodificación Convolutional

### 2.7.1.1 Codificación Convolutional

En la codificación Convolutional se desarrolla un decodificador que corrige múltiples datos erróneos; para ello se llevan los bits uno por uno en forma secuencial a través de registros de desplazamientos formado por  $n$  registros.

Los códigos convolucionales están especificados por tres parámetros  $(n, k, m)$ :  $n$  que representa el número de bits de salida,  $k$  que es el número de bits de entrada y  $m$  que representa el número de registros de memoria.

La tasa de código está representada por  $R$  que es una medida de la eficiencia del código.

$$R = \frac{k}{n} \quad \text{Ecuación 15.2}$$

Dónde:

$k$  y  $n$ : parámetros con valores entre 1 a 8

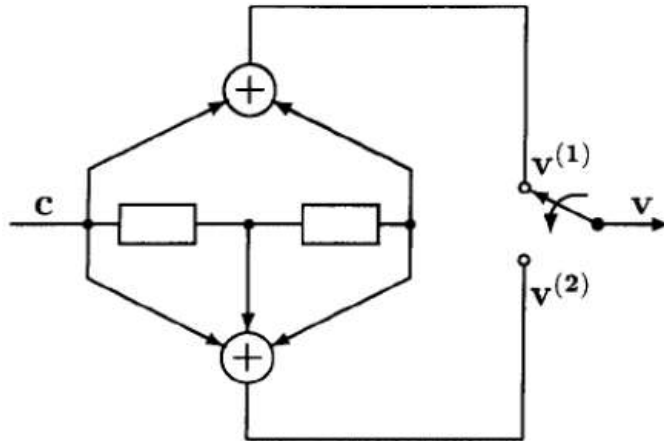
$m$ : parámetros con valores entre 2 a 10

Existe otro parámetro  $K$  llamado Constraint Length o Constante de Restricción, que representa el número de bits en la memoria del codificado, este parámetro influye en la generación de  $n$  bits de salida, puesto que la salida depende de los eventos anteriores guardados en la memoria del codificador.

$$\text{Constraint Length: } K = m + 1 \quad \text{Ecuación 16.2}$$

Un código convolutional se estructura teniendo en cuenta:

1. Se dibuja  $m + 1$  cuadros que representan los  $m$  registros de memoria y el cuadro adicional representará al bit de la secuencia de información a codificar.
2. Se dibuja  $n$  sumadores en módulo-2 para representar los bits de salida  $n$ . Luego se conectan los registros de memoria a los sumadores con el polinomio generador.
  - La Figura 13-2, muestra el ejemplo de un codificador convolutional  $(2,1,2)$  con polinomios generadores  $g_0 = (1 \ 0 \ 1)$  y  $g_1 = (1 \ 1 \ 1)$ .



**Figura 13-2:** Estructura de un codificador convolucional (2, 1, 2)  
**Fuente:** (Ribadeneira, 2015)

En este código de tasa  $\frac{1}{2}$  tenemos: que cada bit de entrada se codifica con 2 bits de salida. La constante de restricción es 3 y los 2 bits de salida son producidos por los 2 sumadores módulo 2.

Se denomina polinomio generador  $g$  a la selección de que bits van a ser sumados para obtener el bit de salida. El polinomio generador es aquel que da la calidad de protección frente a errores al código. (Ribadeneira, 2015).

#### 2.7.1.2 Codificador Diferencial

La codificación diferencial es muy usada en modulaciones, consiste en hacer que los datos no dependan solo del bit actual sino también del bit anterior, la Ecuación 17.2 y la Ecuación 18.2 muestran la codificación y decodificación diferencial respectivamente.

$$e_n = d_k \text{ XOR } e_{k-1} \quad \text{Ecuación 17.2}$$

$$\tilde{d}_k = \tilde{e}_k \text{ XOR } \tilde{e}_{k-1} \quad \text{Ecuación 18.2}$$

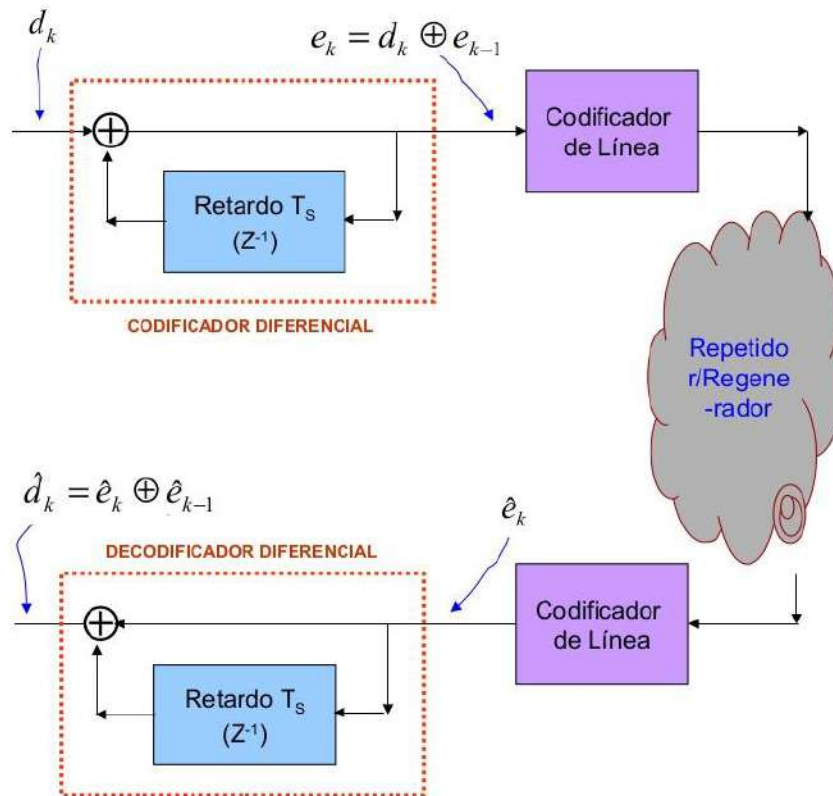
Dónde:

$d_k$ : Entrada actual del codificador

$e_{k-1}$ : Entrada anterior del codificador

$\tilde{e}_k$  : Entrada actual del decodificador

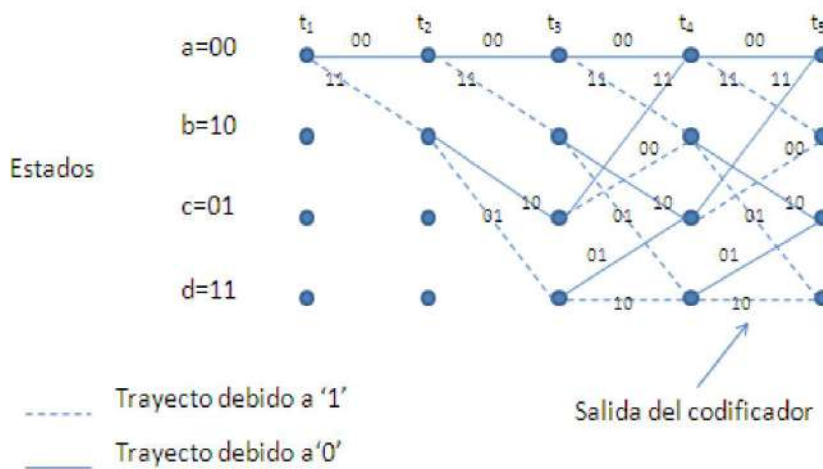
$\tilde{e}_{k-1}$ : Entrada anterior del decodificador



**Figura 14-2:** Sistema de Codificación y Decodificación Diferencial  
Fuente: (Zamora, 2009)

### 2.7.1.3 Diagrama de Trellis

Un diagrama de Trellis se forma con los estados y caminos posibles del codificador, pudiendo así representar en forma secuencial lineal los eventos. La Figura 15-2, muestra el enrejado que se forma, cada transición significa la llegada de nuevos bits, en eje horizontal  $x$  se encuentra en tiempo discreto y en el eje vertical y se muestran los posibles estados.



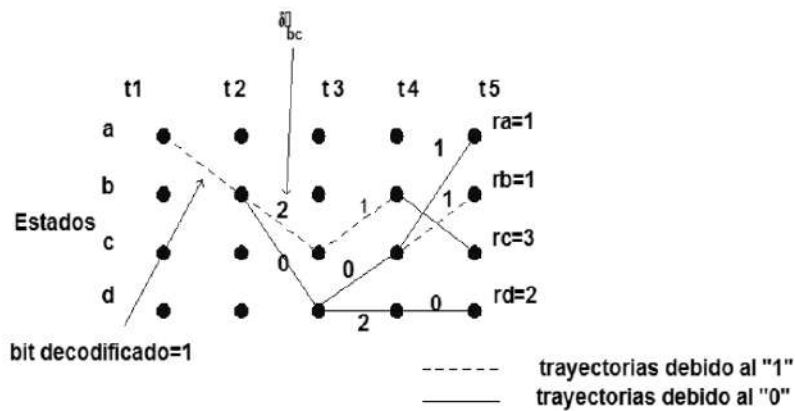
**Figura 15-2:** Enrejado de Trellis  
Fuente: (Luna, 2014, pág. 302)



### 2.7.1.4 Algoritmo de Viterbi

La codificación convolucional se decodifica con el algoritmo de Viterbi, hace uso de la estructura altamente recursiva del diagrama de Trellis, para reducir la cantidad de operaciones que son requeridas para la búsqueda del código. Este algoritmo, selecciona el camino en el enrejado de Trellis que difiere en menor cantidad de bits de la secuencia recibida.

En el proceso de decodificación en cada estado se realiza una comparación entre los caminos que llegan al nodo, y se selecciona aquel que tenga la mayor métrica, mientras que el otro camino se elimina. Este proceso se repite para todos los tiempos siguientes, hasta converger en un origen similar para finalmente extraer los datos que fueron codificados.



**Figura 16-2:** Proceso de Decodificación – Diagrama de Trellis  
 Fuente: (Luna, 2014)

## 2.8 Modelos de Canal

### 2.8.1 Frecuencia Doppler

La frecuencia Doppler o conocido como efecto Doppler, se define como una variación de frecuencia de la señal producida por el movimiento del receptor. Dicha variación de frecuencia depende de la velocidad de desplazamiento como de la longitud de onda que se recibe.

$$F_d = \frac{v}{\lambda} \quad \text{Ecuación 19.2}$$

Dónde

$F_d$ : Frecuencia Doppler

$v$ : Velocidad de desplazamiento del receptor

$\lambda$ : Longitud de onda

### 2.8.2 Canal Rayleigh

El modelo del canal de desvanecimiento Rayleigh se produce cuando la línea de visión directa entre el emisor y receptor, se interrumpe debido a la presencia de obstáculos o porque el nivel de potencia es muy inferior al nivel del ruido, en efecto la suma de las contribuciones multitrayecto permite la existencia del enlace. (Yáñez, 2009, pág. 51)

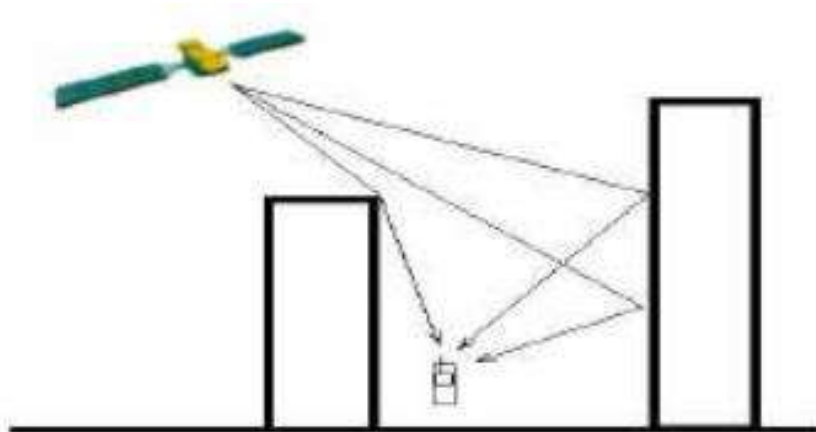
La Ecuación 20.2 representa el desvanecimiento multitrayectoria Rayleigh.

$$p(R) = \begin{cases} \frac{R}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right] \\ 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 20.2}$$

Dónde

$\sigma$ : Desviación Típica

$R$ : Envoltente de la Señal



**Figura 17-2:** Canal con Desvanecimiento Rayleigh  
Fuente: (Yáñez, 2009, pág. 52)

### 2.8.3 Canal Rician

El modelo del canal de desvanecimiento Rician se produce cuando existe una línea de visión directa, más la suma de múltiples ondas reflejo entre el emisor y receptor, y porque el nivel de potencia está sobre el nivel de las señales multitrayecto que son recibidas.

La Ecuación 21.2 representa el desvanecimiento Rician en términos del parámetro  $k$ . Este parámetro define la tasa entre la potencia de la señal determinística y la varianza del multitrayecto.

$$k = \frac{\text{Potencia de Línea de Visión Directa}}{\text{Potencia Difractada}} = \frac{r_s}{2\sigma^2}$$

**Ecuación 21.2**

O expresada en dB:

$$k = 20 \log \frac{r_s}{2\sigma^2}$$

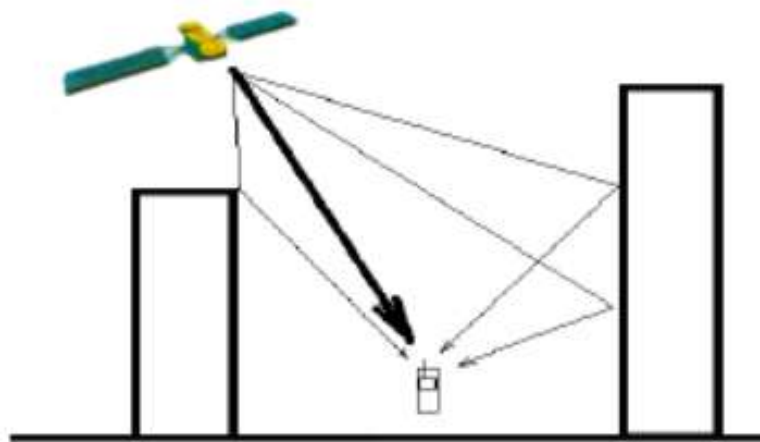
**Ecuación 22.2**

Dónde:

$k$ : Factor Rician

$r_s$ : Potencia de la señal Determinística

$\sigma$ : Varianza del multitrayecto.

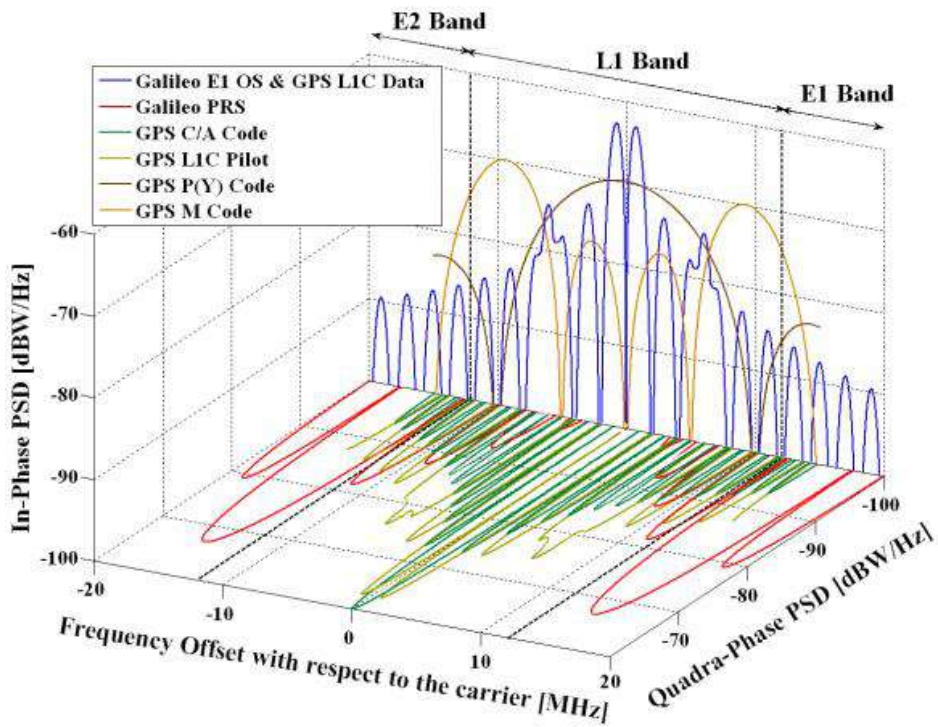


**Figura 18-2:** Canal con Desvanecimiento Rician

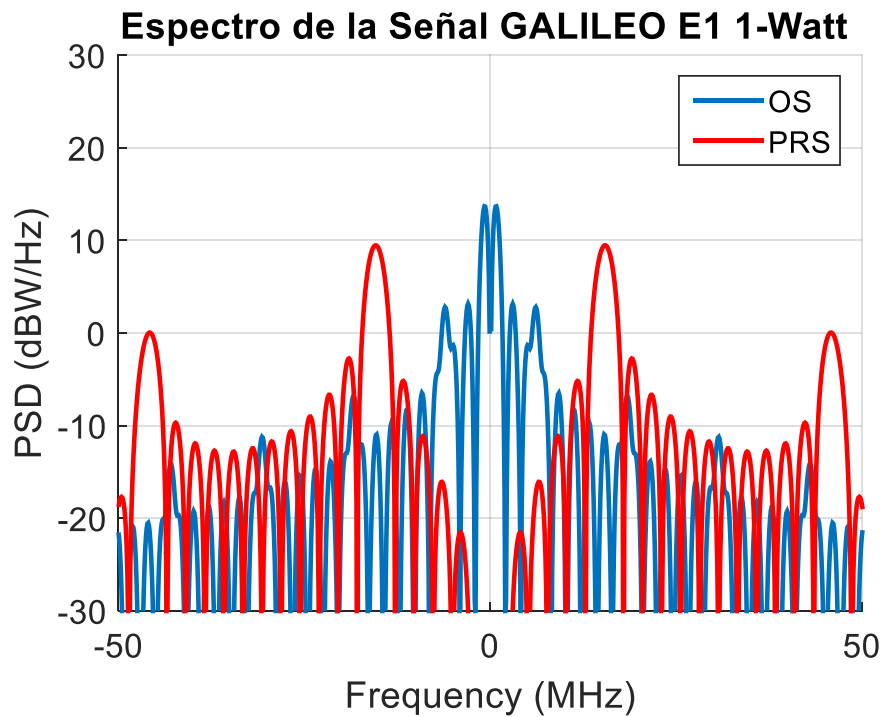
Fuente: (Yáñez, 2009, pág. 54)

## 2.9 Señal Civil GPS L1 y GALILEO E1

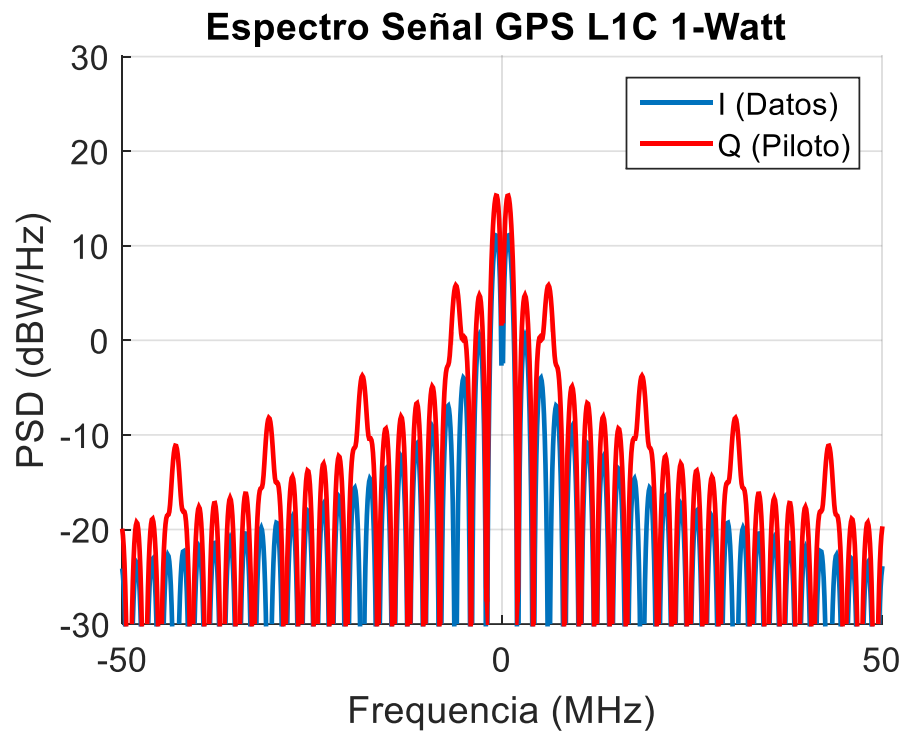
Los sistemas GPS y GALILEO emiten su código abierto L1 y E1 respectivamente; en frecuencias que se superponen para que ambos sistemas sean compatibles e interoperables. El uso combinado de ambos sistemas permite mejorar la precisión, integridad de la señal, disponibilidad y fiabilidad. La interoperabilidad se consigue mediante un solape parcial de frecuencias y/o diferentes secuencias de código.



**Figura 19-2:** Señales Civiles de GPS y GALILEO – L1/E1  
 Fuente: (Julien, Future GNSS Signals, 2014)



**Figura 20-2:** Espectro de la Señal Civil GALILEO E1  
 Realizado por: Andrea Llerena. 2019



**Figura 21-2:** Espectro de la Señal Civil GPS L1  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019

## CAPÍTULO III

### 3 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1 Metodología de la Investigación

##### 3.1.1 *Método Documental*

Para el desarrollo de este trabajo de investigación, se apoyó en fuentes documentales de la IEEE, libros, artículos científicos, tesis desarrolladas y más fuentes bibliográficas con los cuales se sustentó el trabajo, mismos que se detallan en la sección Bibliográfica.

##### 3.1.2 *Método Científico*

Se empleó para la formulación del problema, permitiendo delimitar el tema y plantear posibles soluciones.

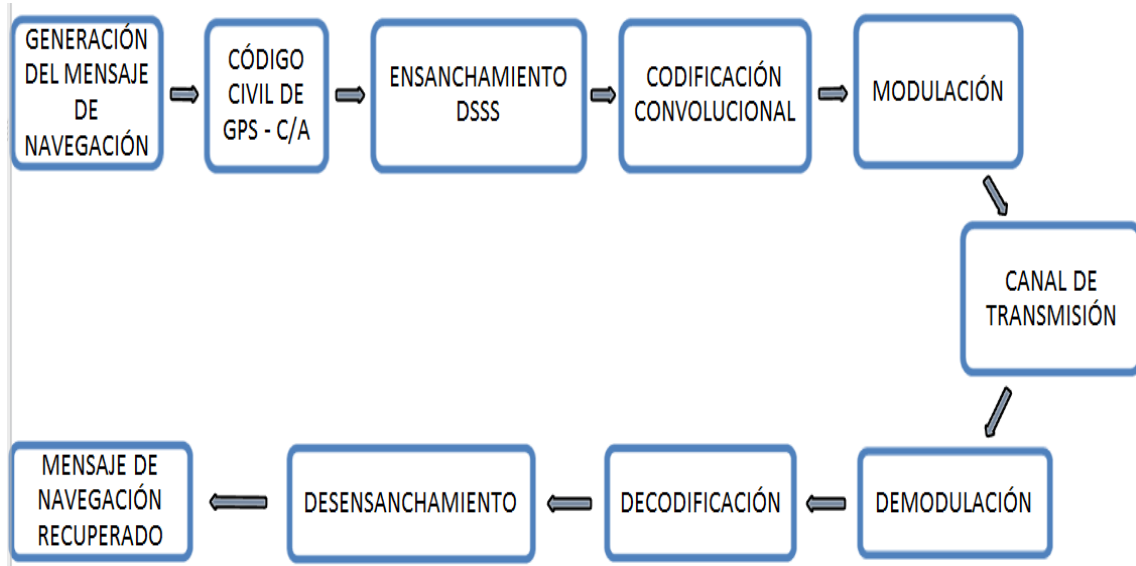
Los diferentes conceptos expuestos en el desarrollo del trabajo de investigación son verificables y sirvieron como base para las pruebas de funcionalidad de los esquemas de modulación. Se apoyó en scripts desarrollados en el entorno matemático Matlab, que permite la simulación de la generación y acondicionamiento de la señal del sistema satelital GPS L1; para establecer los resultados de la investigación y ser posteriormente analizados e interpretados, mediante el uso de tablas y gráficas.

##### 3.1.3 *Método Deductivo*

Se procedió a estudiar los resultados de las simulaciones para los esquemas de modulación BPSK y BOC, con la finalidad de determinar mediante el análisis de los parámetros BER y SNR el esquema más adecuado para la transmisión eficiente de la información satelital.

### 3.2 Diagrama de Bloques

La metodología a seguir se plasma en el diagrama de bloques tomado de (Armijo, 2017) y presentado en la Figura 1-3. Dichas etapas fueron implementadas y evaluadas en MATLAB.



**Figura 1-3:** Diagrama de Bloques Generación, Tx y Rx de Señal GPS  
Realizado por: (Armijo, 2017)

### 3.3 Señal Portadora $f_{L1}$

La señal portadora, se forma de la multiplicación de la frecuencia fundamental  $f_o$ , que se toma del reloj atómico del vehículo espacial o también llamado satélite, la cual es 10.23Mhz con el valor 154, Ecuación 1.3.

$$f_{L1} = 10.23 \text{ MHz} \times 154 \quad \text{Ecuación 1.3}$$

$$f_{L1} = 1575.42 \text{ MHz}$$

El mensaje de navegación se transmite a 50Hz, lo que permite calcular el período del bit del mensaje de navegación NAV, Ecuación 2.3.

$$T_{bit-NAV} = \frac{1}{50\text{Hz}} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

$$T_{bit-NAV} = 0.02 \text{ s}$$

$$T_{bit} = 20 \text{ ms}$$

Con el período del bit, se procedió al cálculo de la cantidad de chips que conforman el código C/A a 1.023Mhz, Ecuación 3.3.

$$\text{chips } x \text{ bit de navegación} = 20 \times 1023 \text{ chips} = 20460 \text{ chips} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

$$\text{chips } x \text{ bit de navegación} = 20460 \text{ chips}$$

Determinado el número de chips, procedemos al cálculo del período de bit de la portadora, Ecuación 4.3.

$$T_{\text{bit-portadora}} = \frac{0.02 \text{ s}}{20460 \text{ chips}} = 0.977 \mu\text{s} \cong 1 \mu\text{s} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

$$T_{\text{bit-portadora}} = 0.977 \mu\text{s}$$

$$T_{\text{bit-portadora}} \cong 1 \mu\text{s}$$

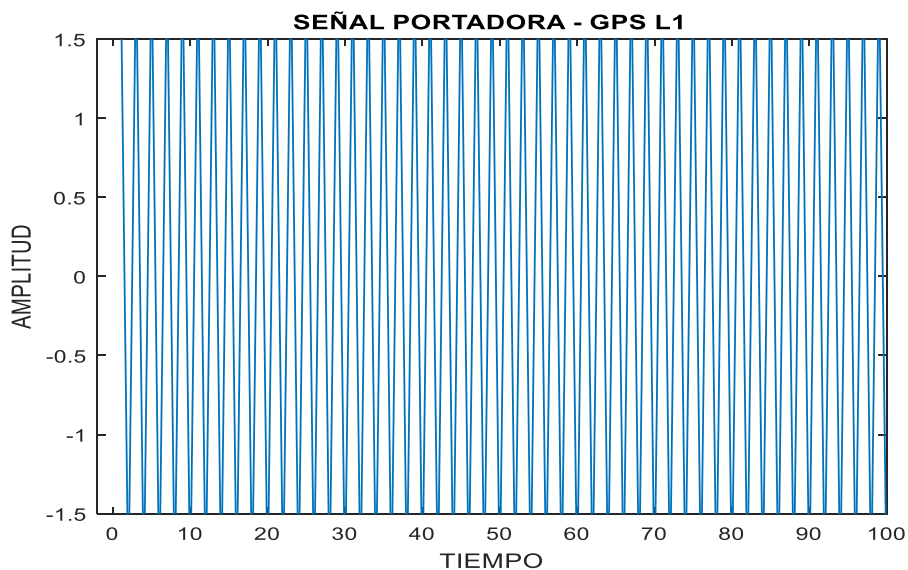
Para determinar la frecuencia de muestreo de  $f_s$  se aplica el Teorema de Nyquist, Ecuación 5.3.

$$f_s = 2 \times f_{L1} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

$$f_s = 2 \times 1575.42 \text{ MHz}$$

$$f_s = 3150.84 \text{ MHz}$$

Determinada la frecuencia de muestreo, en la Figura 2-3, se muestra la onda portadora, solamente hasta los 100ms de los 308001ms, debido a que no es visible la forma de onda portadora en todo el tiempo.



**Figura 2-3:** Señal Portadora cosenoidal de GPS L1

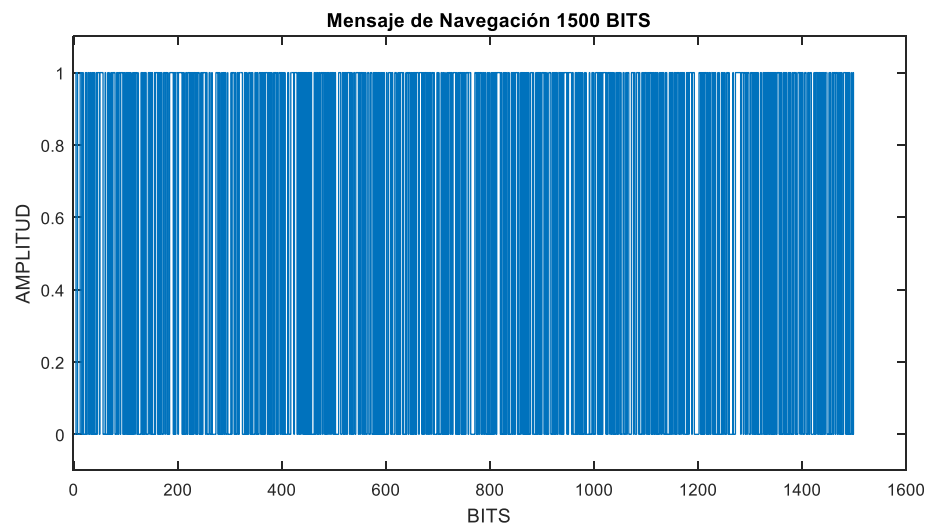
Realizado por: Andrea Llerena. 2019



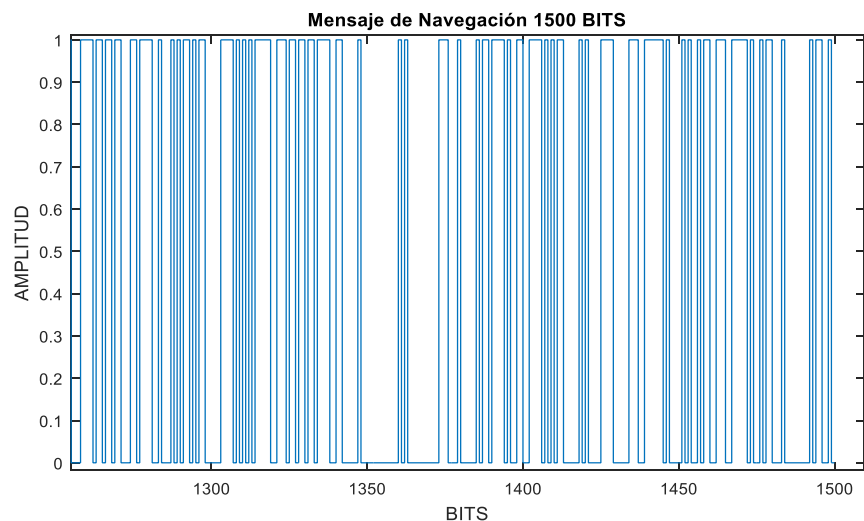
### 3.4 Generación del mensaje de Navegación NAV

Para la generación del mensaje de navegación, se considera el período de 20ms, anteriormente calculado en la Ecuación 2.3. Este mensaje de navegación está formado por 5 subtramas de 300 bits cada uno, que representan la información del vehículo espacial.

Las 5 subtramas concatenadas forman el mensaje de navegación de 1500bits, como se muestra en la Figura 3-3 y Figura 4-3.



**Figura 3-3:** Mensaje de Navegación Completo  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019



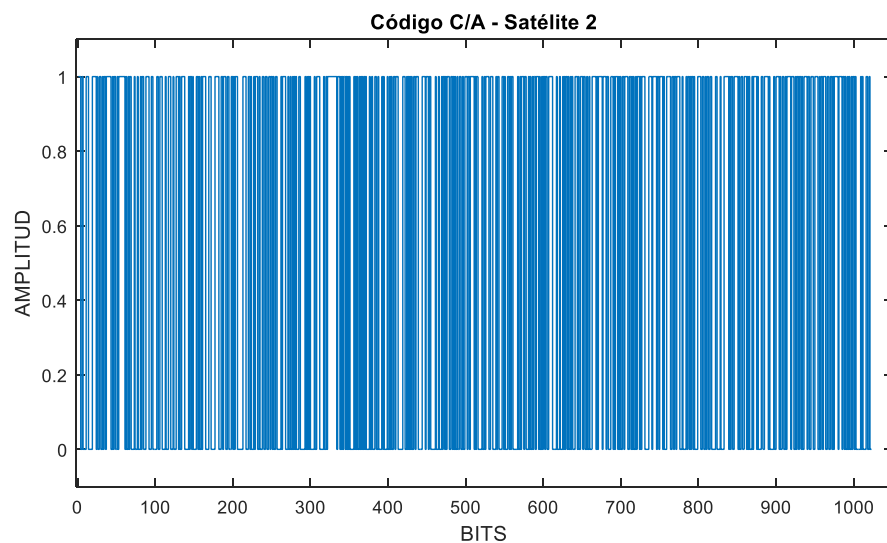
**Figura 4-3:** Vista ampliada del Mensaje de Navegación  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019

### 3.5 Generación del Código PRN – Código C/A

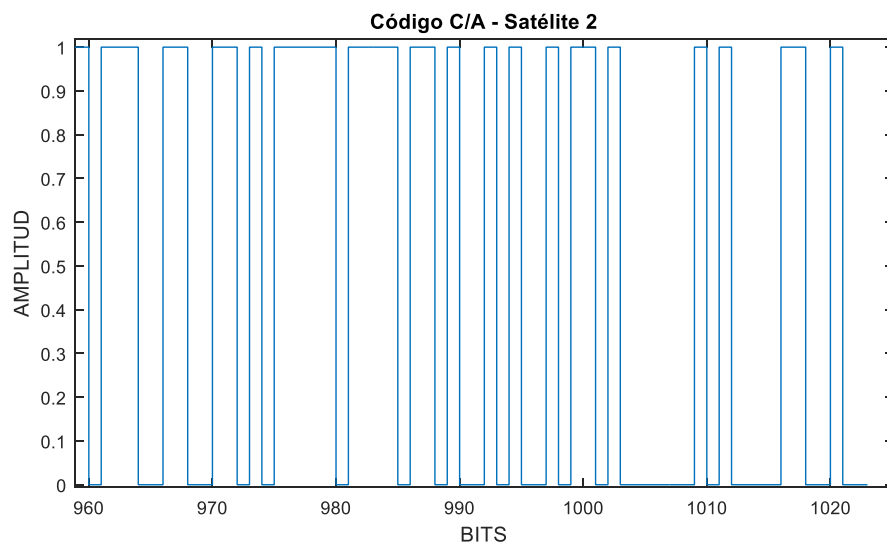
En la sección 2.5.2. se explica la generación del código Coarse/Adquisition, al que se le aplica la técnica de ensanchamiento DSSS.

Realizando el proceso de registro de desplazamiento de retroalimentación lineal de los polinomios generadores G1 y G2, se obtiene 36 combinaciones de código, de los cuales 32 se utilizan para los vehículos satelitales y los restantes son usados para estaciones terrenas.

El código C/A correspondiente al satélite 2, se puede observar en la Figura 5-3 y Figura 6-3.



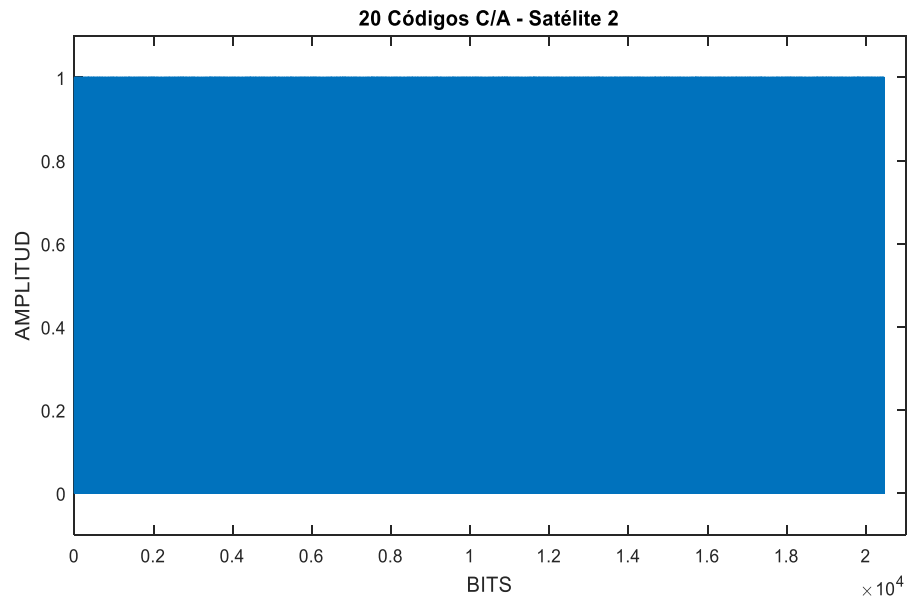
**Figura 5-3:** Código Coarse/Adquisition  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019



**Figura 6-3:** Vista ampliada del Código C/A  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019

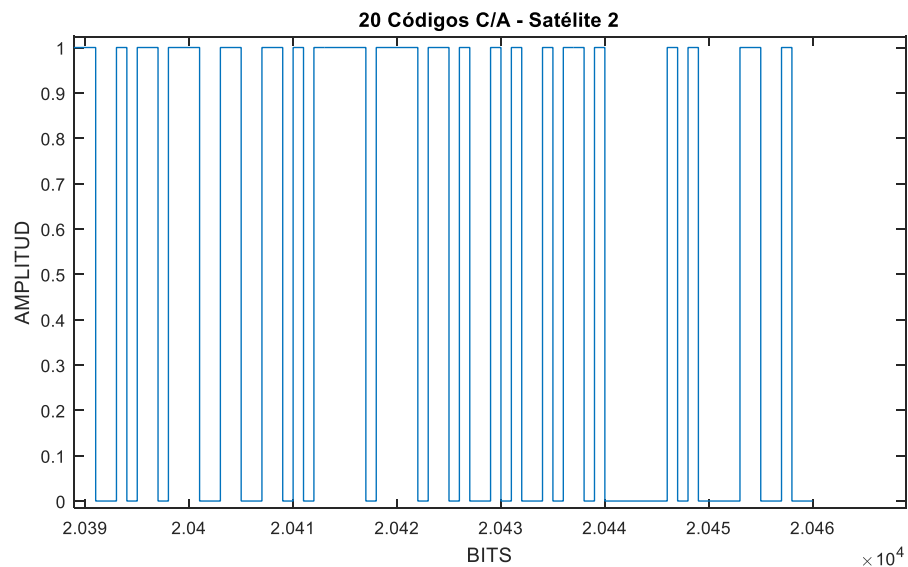
### 3.6 Ensanchamiento - Espectro Ensanchado de Secuencia Directa (DSSS)

Para la aplicación de la técnica de ensanchamiento de la señal, se considera los resultados obtenidos en la Ecuación 3.3, cuyo cálculo nos indica que se asignan 20460 chips a cada bit del mensaje de navegación, lo mencionado se observa en la Figura 7-3 y Figura 8-3.



**Figura 7-3:** Código C/A Extendido

Realizado por: Andrea Llerena. 2019



**Figura 8-3:** Vista ampliada del Código C/A Extendido

Realizado por: Andrea Llerena. 2019

Para determinar el periodo de chip y el período del código C/A, se considera la frecuencia a la que funciona NAV y el código C/A, que es una tasa mucho más alta a 1023Mhz.

$$T_c = \frac{1}{1023\text{MHz}}$$

**Ecuación 6.3**

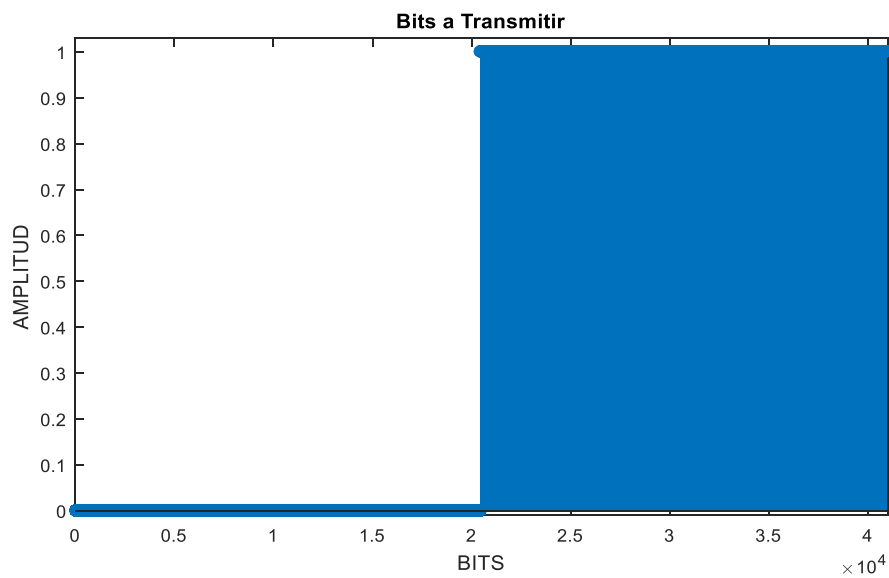
$$T_c = 0.977\mu\text{s}$$

$$T_{C/A} \approx 1\mu\text{s} \times 1023\text{chips}$$

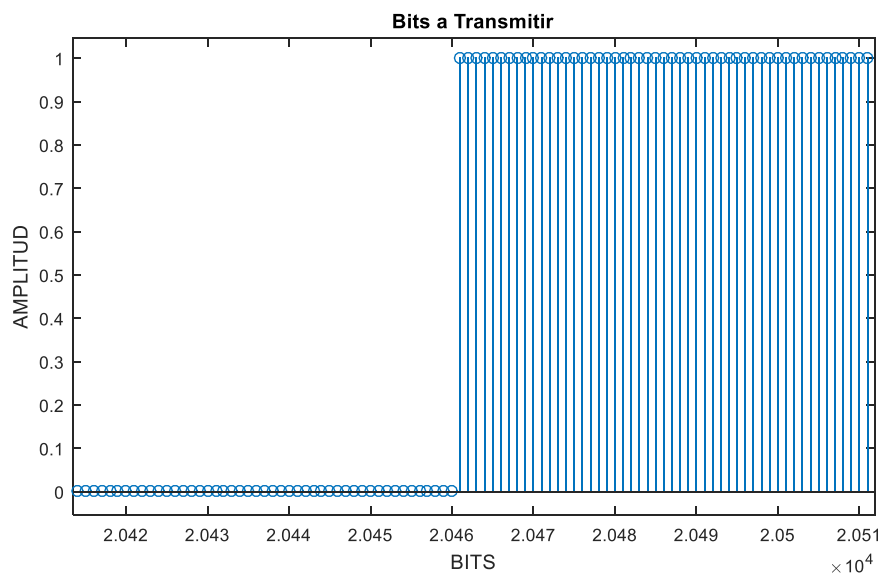
**Ecuación 7.3**

$$T_{C/A} = 1\text{ms}$$

El ensanchamiento es básicamente la suma en módulo2 entre el código C/A y los bits de información, es por ello que se expandió los bits de información, para igualarlos a tamaño del código C/A de 20460 bits, como se muestra en la Figura 9-3 y Figura 10-3.

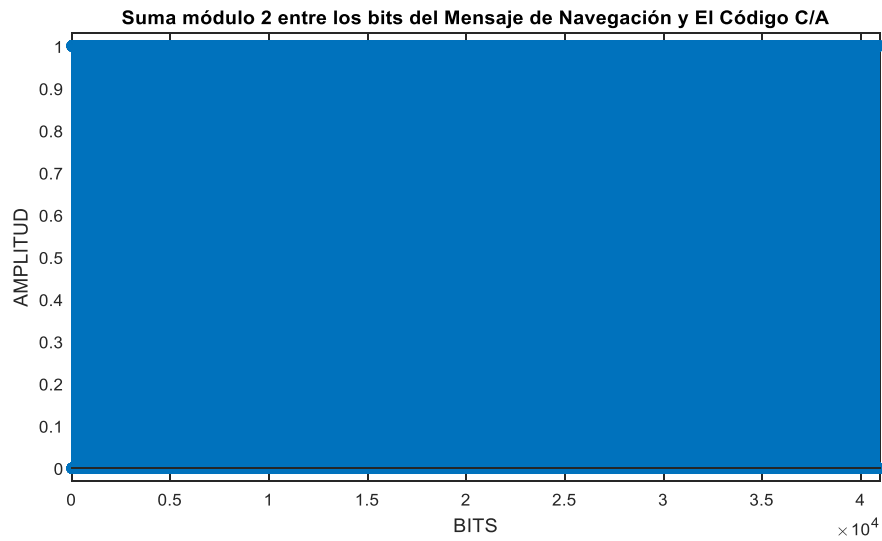


**Figura 9-3:** Bits de información ajustados a la Longitud del Código C/A  
**Realizado por:** Andrea Llerena. 2019

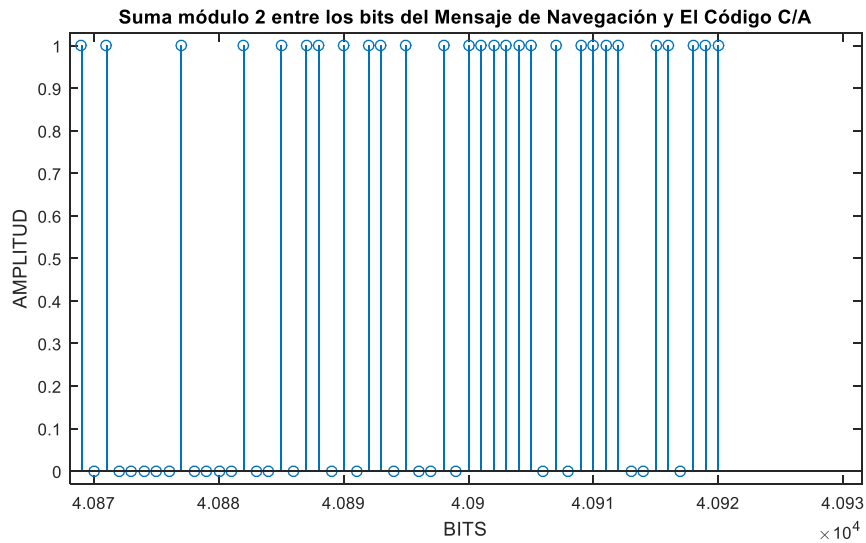


**Figura 10-3:** Vista ampliada de los Bits de información ajustados a la Longitud de C/A  
**Realizado por:** Andrea Llerena. 2019

Como resultado de la suma en módulo 2 entre los bits de información y el código C/A, se obtiene la Figura 11-3, en la que se observa que se incrementó el ancho de banda de la señal.



**Figura 11-3:** Suma en Módulo dos entre NAV y Código C/A  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019



**Figura 12-3:** Vista ampliada de Suma en Módulo 2 entre NAV y Código C/A  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019

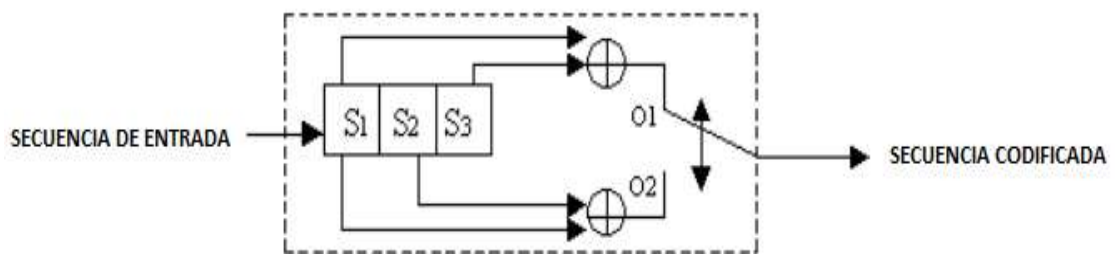
### 3.7 Codificación

La codificación del canal se lo realizo con el codificador convolucional (2, 1, 3), tasa de codificación de  $\frac{1}{2}$ , es decir que por cada bit de entrada se obtienen dos bits a la salida de codificador.

Datos del Codificador Convolutacional:

- k: 1 Bit
- n: 2 bits
- R:  $\frac{1}{2}$
- m: 3
- c: Ciclos por Bit = 4

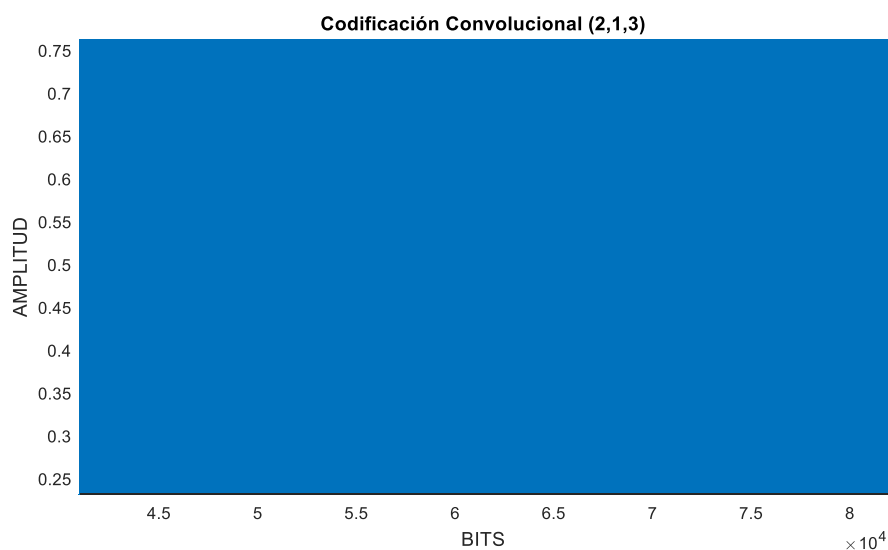
Se realiza el diagrama de estados y el enrejado de Trellis, mediante la función disponible en Matlab para Trellis.: `trellis=poly2trellis(3,[g1 g2]);`



**Figura 13-3:** Codificador Convolutacional (2, 1, 3)

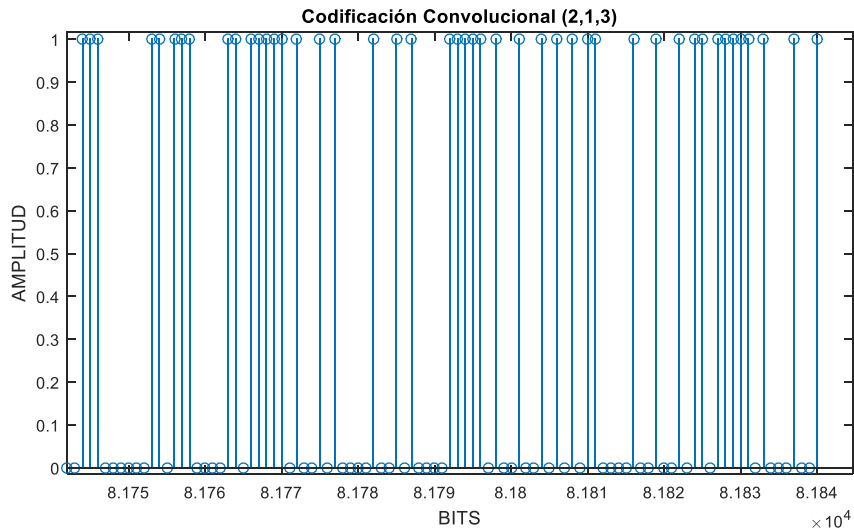
Fuente: (López, 1999)

La cantidad de bits a codificar son 40920, con el codificador ya mencionado y con los parámetros descritos, se determina que la nueva cantidad de bits a la salida del codificador es de 81840 bits, la Figura 14-3 y Figura 15-3 muestran los bits codificados.



**Figura 14-3:** Codificación Convolutacional (2, 1, 3)

Realizado por: Andrea Llerena. 2019



**Figura 15-3:** Vista ampliada de Codificación Convolutiva (2, 1, 3)  
**Realizado por:** Andrea Llerena. 2019

Antes de enviar al canal de transmisión la información, se requiere aplicar el decodificador diferencial, el mismo que se encarga de realizar una comparación.

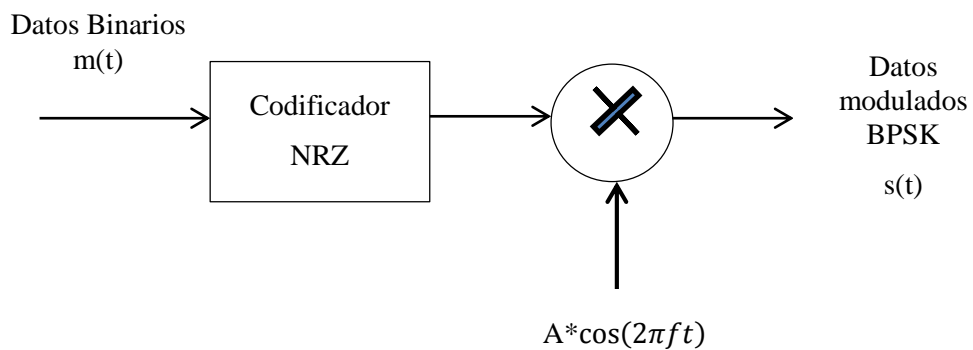
### 3.8 Modulación

#### 3.8.1 BPSK y BOC

La simulación de la modulación BPSK y BOC, sigue el diagrama de la figura 16-3. En este diagrama ingresa la señal codificada, cuyos valores son transformados en  $\pm 1$ , mediante el codificador No Return to Zero (NRZ), y finalmente ser multiplicada por la señal portadora cosenoidal, como se muestra en la Ecuación 8.3.

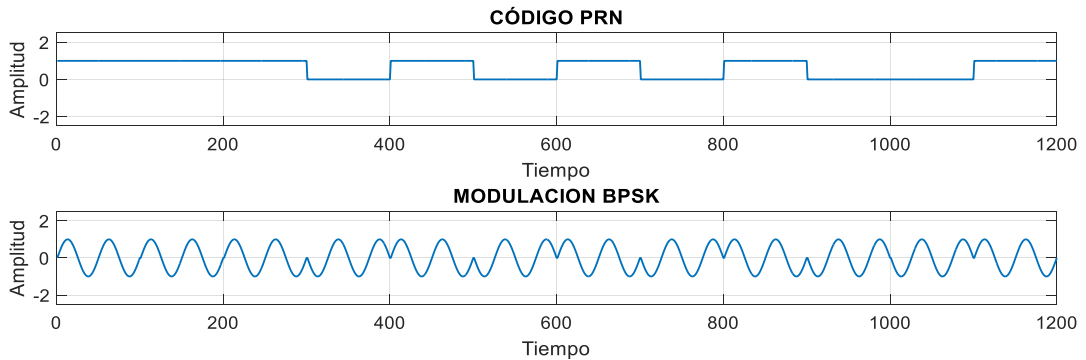
$$s(t) = A * \cos(2\pi ft)$$

**Ecuación 8.3**



**Figura 16-3:** Diagrama de Bloques Modulación BPSK– Codificador NRZ  
**Fuente:** (Armijo, 2017)

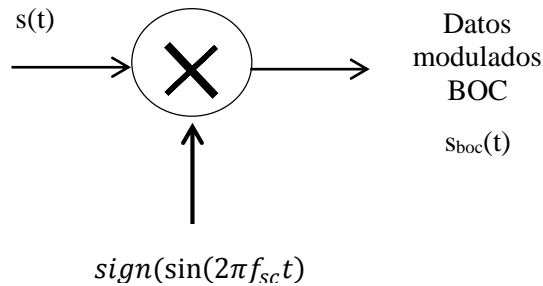
En la Figura 17-3, se muestra el resultado del script de modulación BPSK, con codificador NRZ.



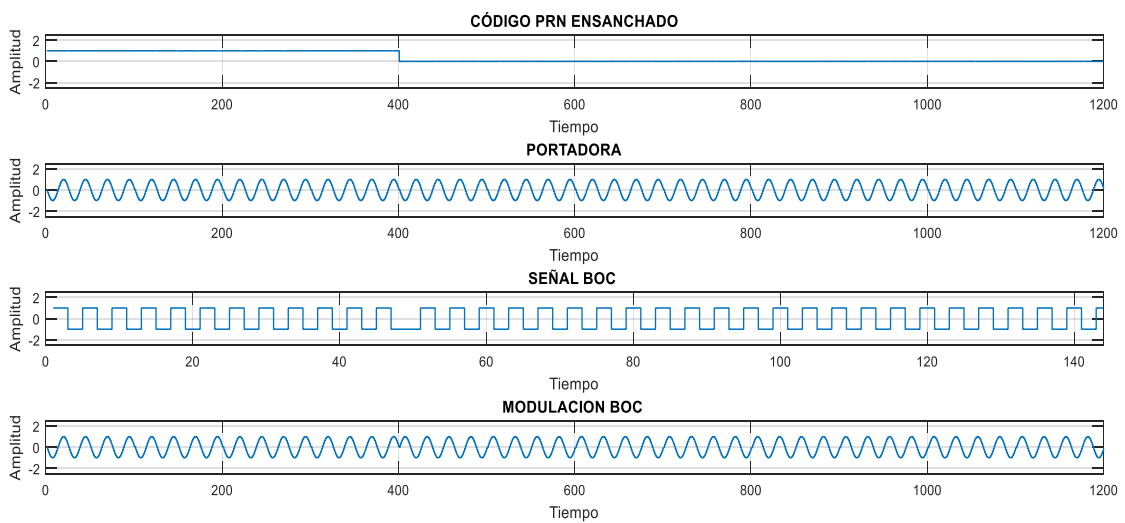
**Figura 17-3: Modulación BPSK**  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019

La modulación BOC es una extensión de la modulación BPSK, es por ello que se incrementó una subportadora cuadrada seno o coseno, para ser multiplicada por la señal  $s(t)$ , siguiendo el diagrama de bloques de la Figura 18-3. La Ecuación 9.3 que sigue el modulador BOC es:

$$S_{boc}(t) = s(t) * \text{sign}(\sin(2\pi f_{sc}t)) \quad \text{Ecuación 9.3}$$



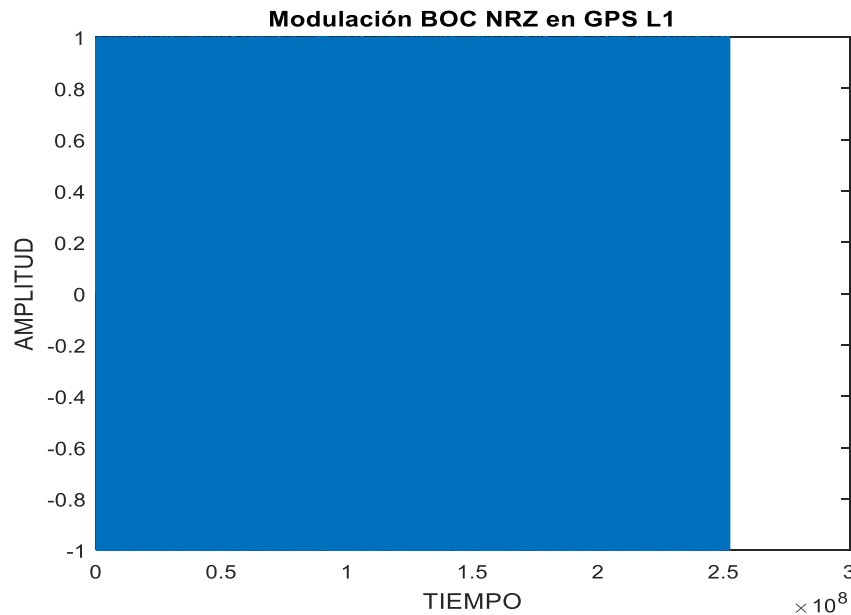
**Figura 18-3: Diagrama de Bloques Modulación BOC– Codificador NRZ**  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019



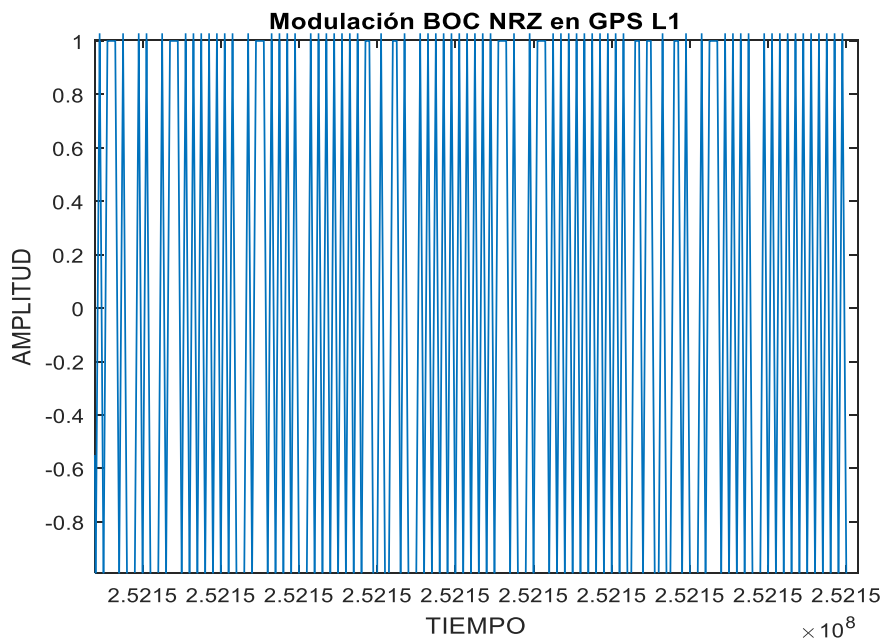
**Figura 19-3: Modulación BOC**  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019



Para realizar la modulación BOC, como ya se mencionó, se generó la portadora que se muestra en la Figura 2-3 con una frecuencia de 1575.42Mhz, muestreada al doble de esta frecuencia para evitar el problema del aliasig, por lo tanto, se muestreo a una frecuencia de 3150.84Mhz; para posteriormente multiplicarla con los bits codificados NRZ. Las Figuras 20-3 y 21-3, muestran la modulación BOC para el sistema GPS L1.



**Figura 20-3:** Modulación BOC de la Señal GPS L1  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019



**Figura 21-3:** Vista ampliada de la Modulación BOC de la Señal GPS L1  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019

### 3.9 Canal de transmisión

El canal de transmisión cuenta con el tiempo de muestreo de la señal y la frecuencia Doppler originada por la variación del parámetro de velocidad del receptor, la Tabla 1-3 muestra las diferentes velocidades con las que se calcula la frecuencia Doppler utilizando la Ecuación 10.3.

$$F_d = F_c * \frac{V_{rx}}{c} \quad \text{Ecuación 10.3}$$

Dónde:

$F_c$ : Frecuencia fundamental

$V_{rx}$ : Velocidad en m/s

$c = 3 \times 10^8$  m/s - Velocidad de la luz

**Tabla 1-3:**  $F_d$  frente a la variación de la velocidad del receptor GPS en m/s

Vel. Receptor (m/s)	$F_d$ (Hz)
0 m/s	$F_d = 1575.42 \text{MHz} * \frac{0 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3 \times 10^8} = 0 \text{Hz}$
20 m/s	$F_d = 1575.42 \text{MHz} * \frac{20 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3 \times 10^8} = 105.03 \text{Hz}$
60 m/s	$F_d = 1575.42 \text{MHz} * \frac{60 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3 \times 10^8} = 315.08 \text{Hz}$
100 m/s	$F_d = 1575.42 \text{MHz} * \frac{100 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3 \times 10^8} = 525.14 \text{Hz}$

Realizado por: Andrea Llerena. 2019

#### 3.9.1 Canal con desvanecimiento Rayleigh

La señal GPS civil L1, generada por el vehículo espacial se encuentra a aproximadamente 20.200Km de distancia del receptor, es por ello que es necesario la suma de contribuciones multitrayecto generadas por la reflexión de esta señal GPS frente a obstáculos como edificios, montañas, etc.; generalmente no existe línea de vista entre el emisor y el receptor. Este resultado de la sumatoria se denomina desvanecimiento Rayleigh.

Para generar el canal Rayleigh, se utilizará solo un trayecto, debido a la gran capacidad de procesamiento que requiere un computador para poder realizar dicha simulación.

Matlab dispone de funciones ya listas para el usuario, por ello se empleó la función: rayleighchan.

```

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

```

**Figura 22-3:** Canal Rayleigh en Matlab: `rayleighchan`  
Fuente: (Armijo, 2017)

### 3.9.2 Canal con desvanecimiento Rician

Hay situaciones en la que la señal transmitida por el vehículo espacial llega directamente al receptor, es decir que hay línea de vista directa, por lo tanto, esta trayectoria es la mejor porque dispone de una elevada potencia en comparación con las otras trayectorias. Para este caso se utiliza el desvanecimiento Rician.

Matlab dispone de funciones ya listas para el usuario, por ello se empleó la función: `ricianchan`.

```

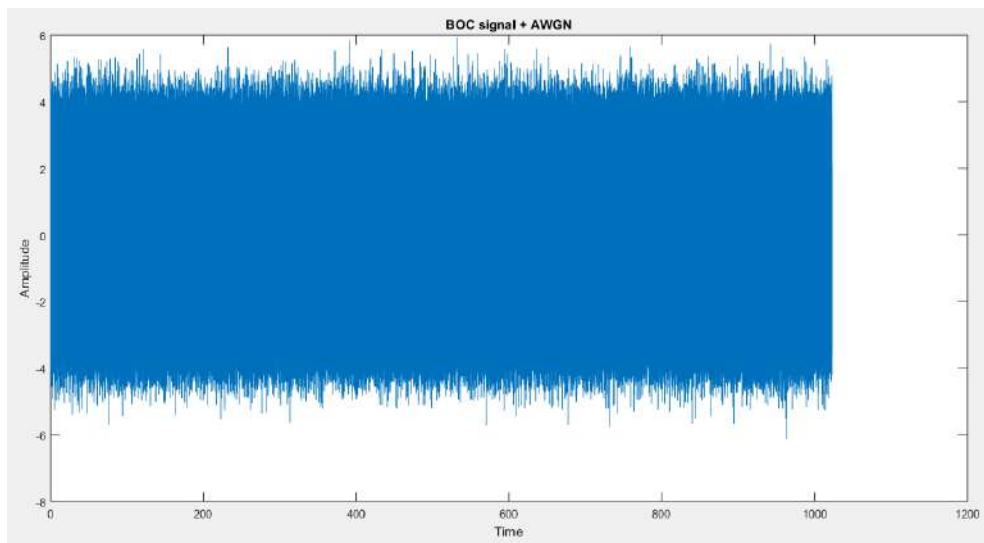
ChannelType: 'Rician'
InputSamplePeriod: 3.1738e-10
DopplerSpectrum: [1x1 doppler.jakes]
MaxDopplerShift: 5.2514
PathDelays: 0
AvgPathGaindB: 0
KFactor: 1
DirectPathDopplerShift: 0
DirectPathInitPhase: 0
DirectPathDopplerShift: 0
DirectPathInitPhase: 0
NormalizePathGains: 1
StoreHistory: 0
StorePathGains: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

```

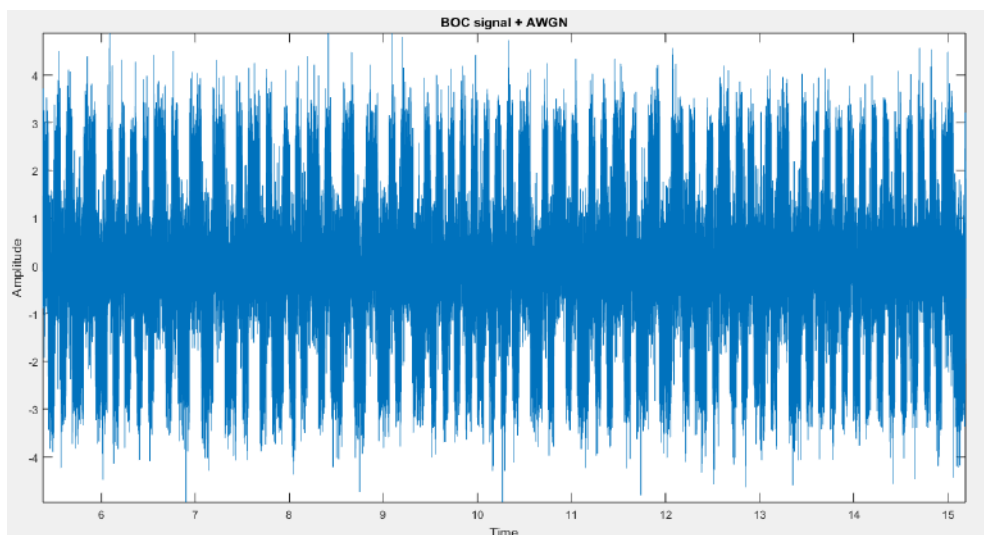
**Figura 23-3:** Canal Rician en Matlab: `ricianchan`  
Fuente: (Armijo, 2017)

Se considera además en la simulación el ruido AWGN, para simular las pérdidas producidas por factores que afectan el rendimiento del sistema de posicionamiento GPS, debido a que el ruido siempre está presente en cualquier transmisión de información por el canal de transmisión, por elementos como: la multitrayectoria, las capas de la tierra como la ionósfera, etc.

Para realizar la comparación entre las modulaciones BPSK y BOC, se toman los valores de relación señal a ruido SNR para evaluar el canal de transmisión considerados en (Armijo, 2017) cuyos resultados permitirán dicha comparación. Los valores SNR corresponden a: 0dB, 2dB, 4dB, 10dB y 40dB. Las Figuras 24-3 y 25-3 muestran la señal modulada BOC con ruido AWGN.



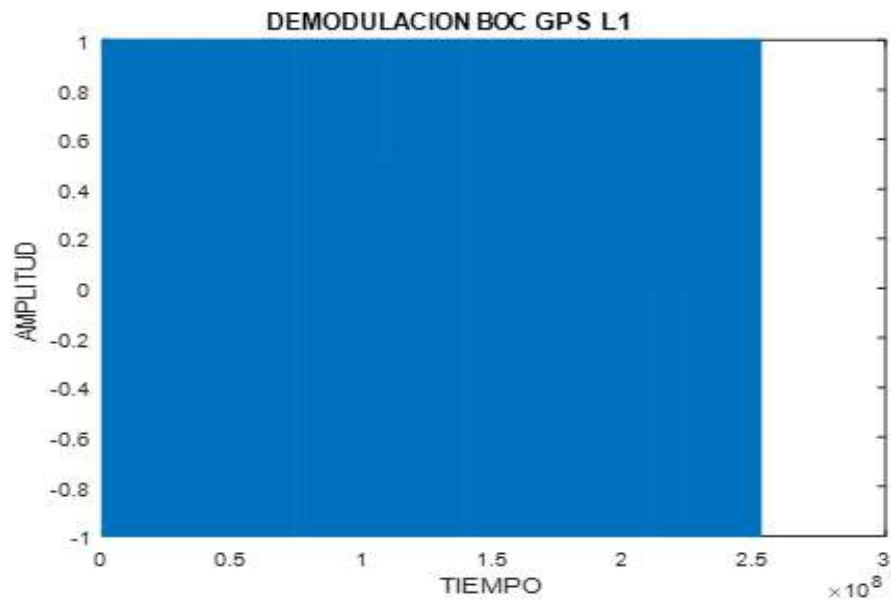
**Figura 24-3:** Señal Modulada BOC+AWGN  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019



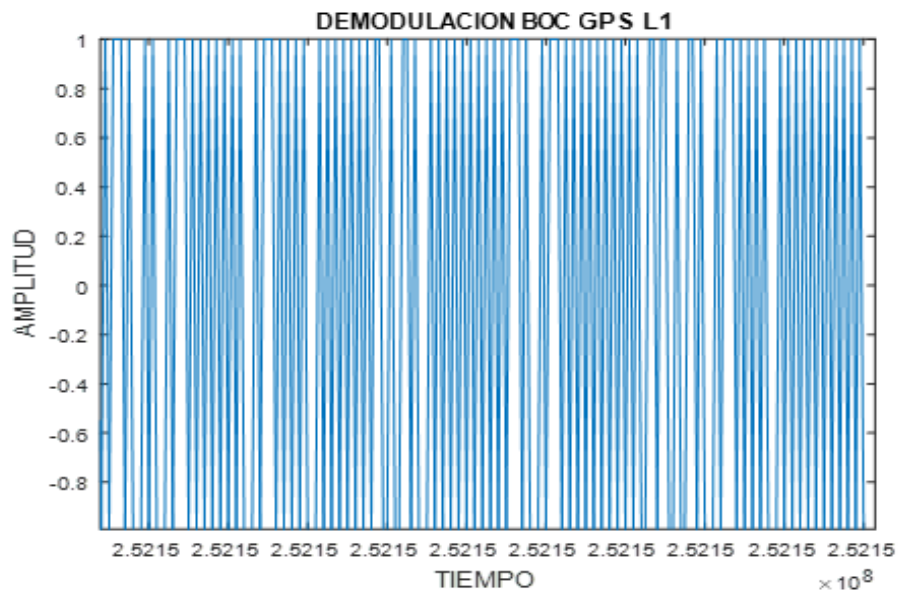
**Figura 25-3:** Vista ampliada de Señal Modulada BOC+AWGN  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019

### 3.10 Demodulación

Para el proceso de demodulación a la señal recibida a la salida del canal de transmisión lo multiplicamos por una réplica de la señal portadora cosenoidal, dicha operación genera componentes espectrales en banda base.



**Figura 26-3:** Demodulación BOC  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019

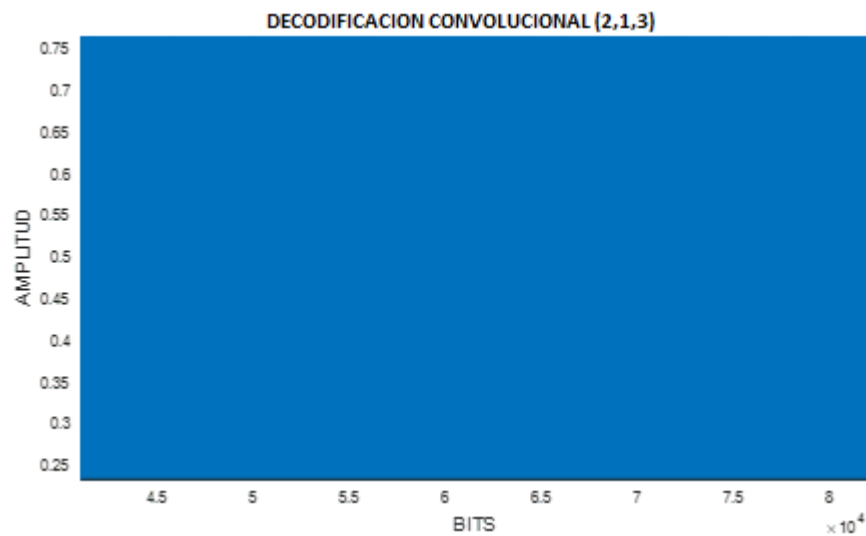


**Figura 27-3:** Vista ampliada de Demodulación BOC  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019

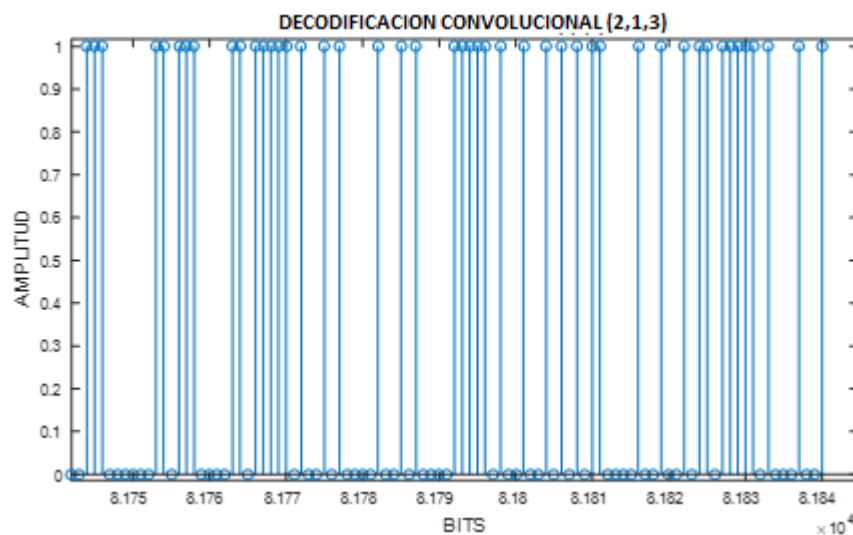
### 3.11 Decodificación

Los bits recuperados, pasan al proceso de decodificación del canal, primero pasan por el proceso de decodificación diferencial, que determina la existencia de un 1 o 0 lógico, esto lo realiza con la operación XOR entre los bits adyacentes.

El siguiente paso es la decodificación convolucional, esto se realizó con el algoritmo de Viterbi. Al igual que otras funciones Matlab ofrece la función Viterbi lista para su uso.: `vitdec(datos,trellis,2,'trunc','hard')`.



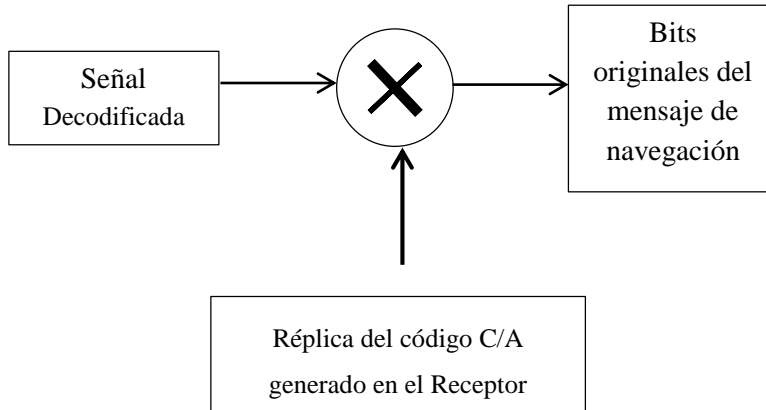
**Figura 28-3:** Decodificación Convolucional (2,1,3) con Viterbi  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019



**Figura 29-3:** Vista ampliada de Decodificación Convolucional (2,1,3) con Viterbi  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019

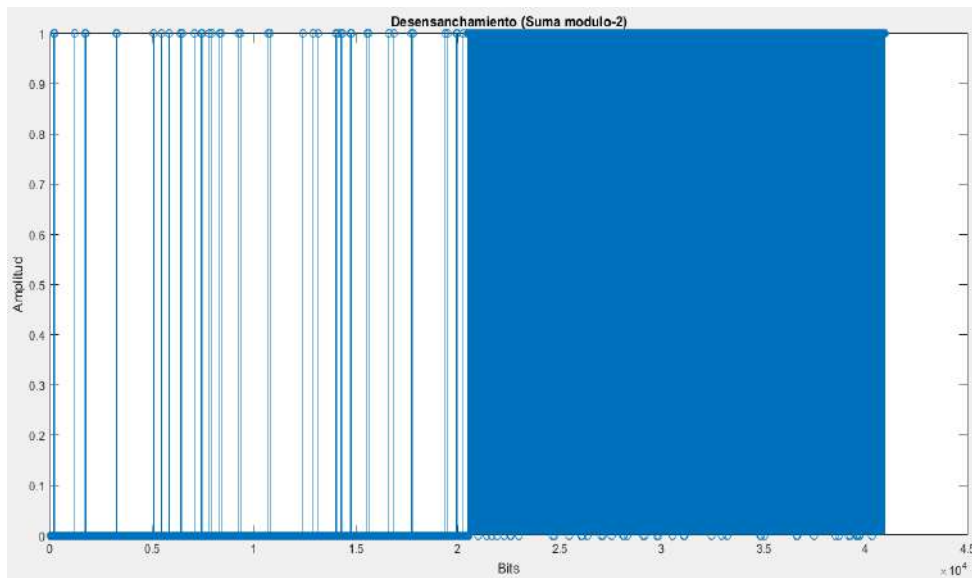
### 3.12 Desensanchamiento - Espectro Ensanchado de Secuencia Directa (DSSS)

Para el proceso de Desensanchamiento, se utiliza la suma en módulo 2 de la señal decodificada con una réplica de la señal pseudorandómica C/A que genera el receptor. En este caso si el código replica C/A es similar al código C/A original se podrá recuperar el mensaje de navegación original.



**Figura 30-3:** Diagrama de Bloques de Desensanchamiento DSSS  
Fuente: (Armijo, 2017)

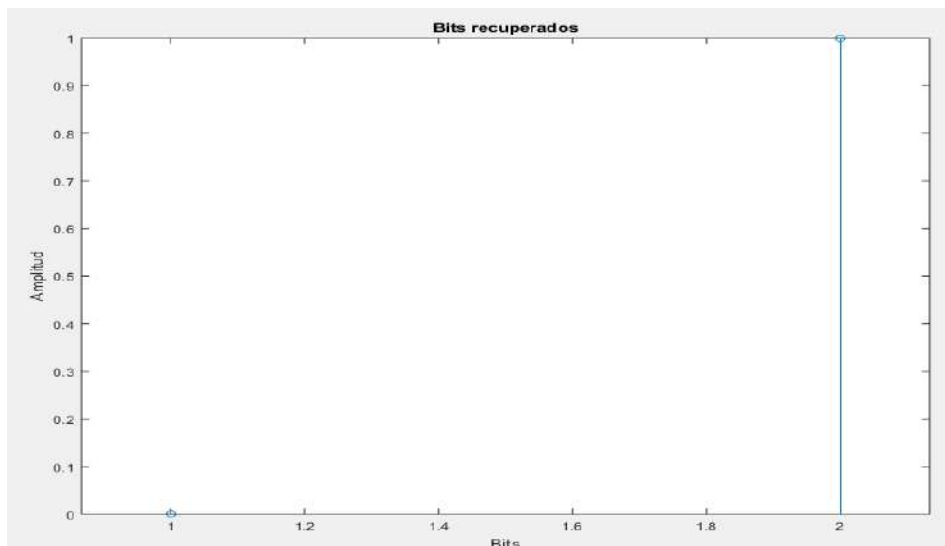
La Figura 31-3, muestra la información desensanchada.



**Figura 31-3:** Desensanchamiento de la Información con códigos C/A.  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019

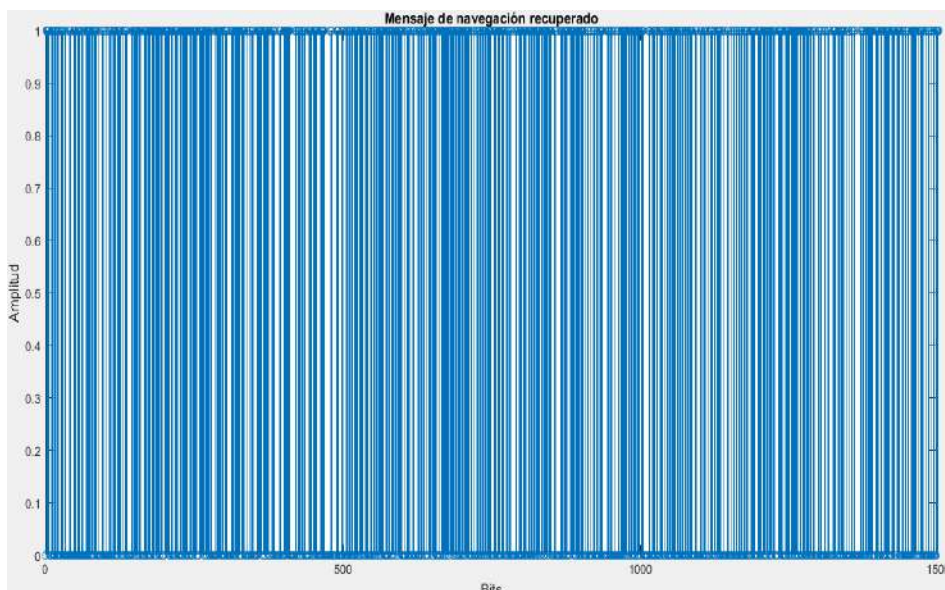
### 3.13 NAV – Mensaje de Navegación

Como último punto se procede al recuperar el mensaje de navegación, para ello se tiene presente la cantidad de bits que se enviaron para los bits a transmitidos, es decir que los bits comprendidos entre 0 y 20460 bits del mensaje corresponden a un primer bit, y los restantes bits comprendidos entre 20460 y 40920 corresponden a un segundo bits transmitido.



**Figura 32-3:** 2 Primeros Bits Recuperados  
Realizado por: Andrea Llerena, 2019

Este proceso se realiza en un clico de 750 repeticiones, hasta formar el mensaje completo de navegación que está formado de 1500 bits.



**Figura 33-3:** 1500 Bits Recuperados del mensaje de navegación NAV  
Realizado por: Andrea Llerena, 2019



## CAPÍTULO IV

### 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Análisis de resultados

##### 4.1.1 Parámetros Utilizados en la Simulación

Para la simulación del proceso de generación, transmisión y recepción de la señal GPS L1, se utilizó el Software Matemático MATLAB, con varios scripts configurados con los siguientes parámetros:

**Tabla 1-4:** Parámetros empleados en la simulación.

<b>Generación de Señal GPS L1</b>	
<b>Numero de Satélites GPS:</b>	1
<b>Frecuencia Fundamental:</b>	L1= 1575.42Mhz
<b>Mensaje de Navegación NAV</b>	50 Hz
<b>Frecuencia del código C/A:</b>	1.023Mhz
<b>Técnica DSSS</b>	
<b>Código Pseudorandómico - PRN</b>	1.023 chips
<b>Bits del Mensaje de Navegación</b>	1500 bits
<b>Codificación de Canal</b>	
<b>Codificación Convolutacional (2,1,3)</b>	k=1, n=2, m=3. Razón = 1/2
<b>Canal</b>	
<b>Velocidad del Receptor</b>	0 m/s, 20m/s, 60m/s, y 100m/s
<b>Relación Señal a Ruido</b>	0 dB, 2 dB, 4 dB, 10dB y 40dB

Realizado por: Andrea Llerena. 2019

Los parámetros Velocidad de Receptor y Relación señal a Ruido, se tomaron de (Armijo, 2017), para que poder realizar la comparación de resultados y determinar el rendimiento de la modulación BOC vs BPSK para cada modelo de canal.

#### 4.1.2 Análisis de Espectro de la señal GPS L1

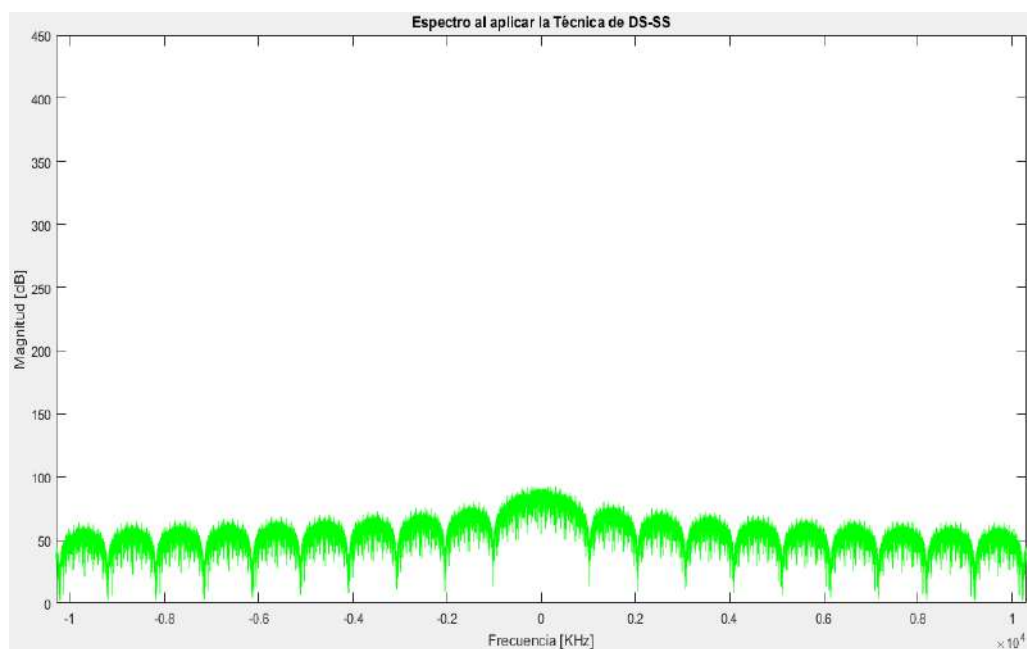
El análisis del espectro del mensaje de navegación en dB, al que se le ha aplicado la modulación BPSK se puede observar en el gráfico 1-4, mientras que en el gráfico 2-4 se observa el mensaje de navegación aplicado la modulación BOC.

El mensaje de navegación ensanchado, se logró con la suma en módulo 2 del código pseudorandómico C/A con los bits de información del mensaje. Con el uso de ecuaciones vistas en la sección: 3.5, se tiene el período de chip:

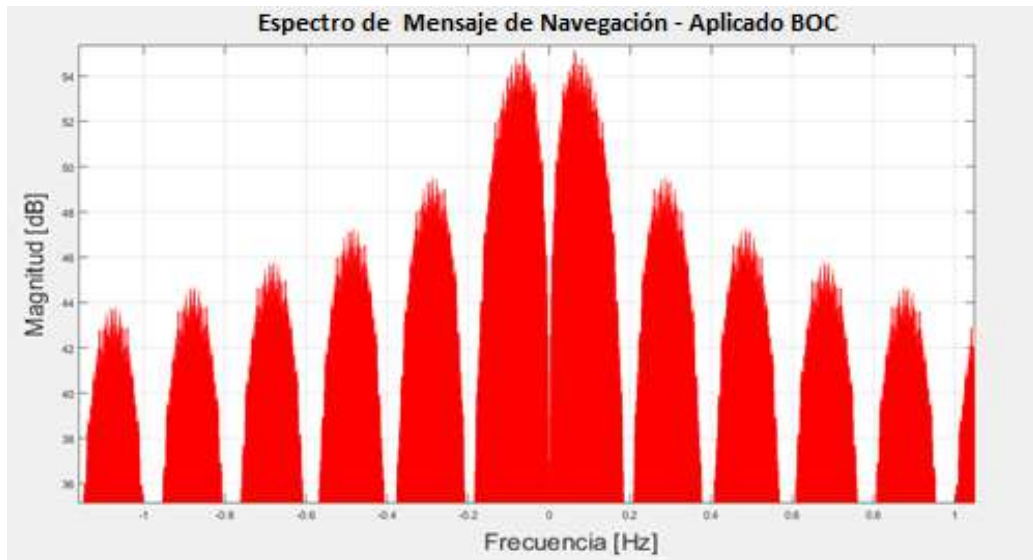
$$T_c = \frac{1}{1023\text{Mhz}} = 0.977\mu\text{s} \cong 1\mu\text{s}$$

Con este dato, procedemos al cálculo del ancho de banda.

$$AB_c = \frac{2}{T_c} = \frac{2}{1\mu\text{s}} = 2\text{MHz} \quad \text{Ecuación 1.4}$$



**Gráfico 1-4:** Espectro del Mensaje de Navegación aplicando Modulación BPSK  
**Fuente:** (Armijo, 2017)



**Gráfico 2-4:** Espectro de Mensaje de Navegación aplicando Modulación BOC  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019

Como se observa en los gráficos 1-4 y 2-4, el ancho de banda ocupado por el espectro al que se le aplicó la modulación BPSK es de 2MHz en su único lóbulo principal, mientras que el ancho de banda ocupado por el espectro aplicado modulación BOC ocupa los mismos 2MHz en sus dos lóbulos principales simétricos debido a la onda subportadora cuadrada característica de esta modulación BOC.

La separación del espectro en dos lóbulos principales, permite una mejor compartición del espectro con señales existentes y futuras GNSS.

#### **4.1.3 Rendimiento del Canal**

Para el análisis del rendimiento de los canales simulados se utilizó un codificador convolucional (2, 1, 3).

##### **4.1.3.1 Rendimiento del Canal Rayleigh**

En la Tabla 2-4, se muestra los errores producidos dentro del canal con desvanecimiento tipo Rayleigh sin y con codificación Convolucional (2, 1, 3) al que se le aplicó la modulación BPSK. En esta tabla se muestran la variación de la velocidad de recepción y varios niveles SNR.

**Tabla 2-4:** Errores presentados en un Canal Rayleigh sin y con Modulación BPSK

Errores presentes en un canal Rayleigh sin y con modulación BPSK								
SNR	0 m/s		20 m/s		60 m/s		100 m/s	
	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C
<b>0 dB</b>	93	203	119	161	121	154	141	155
<b>2 dB</b>	5	20	11	10	18	7	36	9
<b>4 dB</b>	0	0	8	0	18	0	23	0
<b>10 dB</b>	1	0	5	0	21	0	22	0
<b>40 dB</b>	0	0	6	0	16	0	30	0

Fuente: (Armijo, 2017)

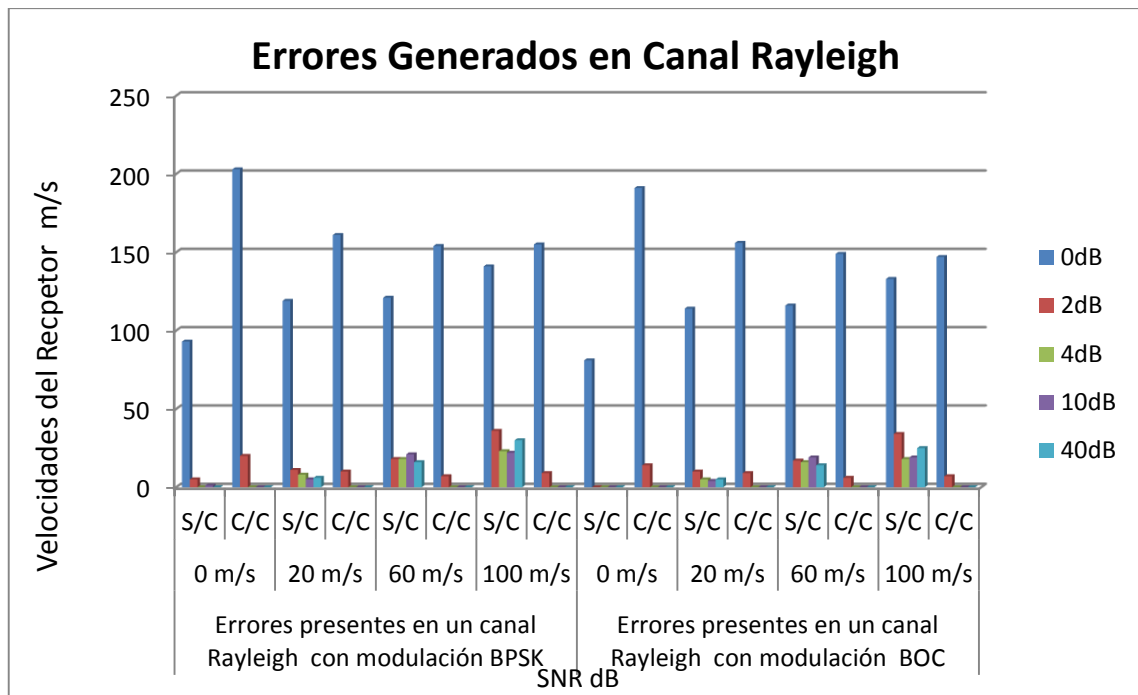
En la Tabla 3-4, se muestra los errores producidos dentro del canal con desvanecimiento tipo Rayleigh sin y con codificación Convolutiva (2, 1, 3); al que se le aplico la modulación BOC. En esta tabla se muestran la variación de la velocidad de recepción y varios niveles SNR.

Las diferentes velocidades de receptor utilizadas para la simulación son debido al Efecto Doppler, ya que el desplazamiento de frecuencia con respecto a la portadora del satélite es simétrico, lo que significa que el máximo desplazamiento por encima de la portadora cuando el satélite se acerca, coincide con el máximo desplazamiento cuando este se aleja. El desplazamiento está determinado por la frecuencia de portadora del satélite y por la velocidad a que este se mueva, y será mayor cuanto mayor sean estas dos variables.

**Tabla 3-4:** Errores presentados en un Canal Rayleigh sin y con Modulación BOC

Errores presentes en un canal Rayleigh sin y con modulación BOC								
SNR	0 m/s		20 m/s		60 m/s		100 m/s	
	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C
<b>0 dB</b>	81	191	114	156	116	149	133	147
<b>2 dB</b>	0	14	10	9	17	6	34	7
<b>4 dB</b>	0	0	5	0	16	0	18	0
<b>10 dB</b>	0	0	4	0	19	0	19	0
<b>40 dB</b>	0	0	5	0	14	0	25	0

Realizado por: Andrea Llerena. 2019



**Gráfico 3-4:** Tabulación de los Errores en el canal Rayleigh para BPSK y BOC  
 Realizado por: Andrea Llerena. 2019

En el peor de los casos en el canal Rayleigh:

- A un SNR de 0dB y a una velocidad de recepción de 0m/s se tiene 93 errores sin el uso del codificador y con modulación BPSK, mientras tanto se tiene 81 errores sin el uso del codificador convolucional (2, 1, 3) y con modulación BOC.
- A un SNR de 0dB y a una velocidad de recepción de 0m/s se tiene 203 errores con el uso del codificador y con modulación BPSK, en tanto que se tiene 191 errores con el uso del codificador convolucional (2, 1, 3) y con modulación BOC.
- A un SNR de 0dB y a una velocidad de recepción de 100m/s se tiene 141 errores sin el uso del codificador y con modulación BPSK, mientras tanto se tiene 133 errores sin el uso del codificador convolucional (2, 1, 3) y con modulación BOC.
- A un SNR de 0dB y a una velocidad de recepción de 100m/s se tiene 155 errores con el uso del codificador y con modulación BPSK, en tanto que se tiene 147 errores con el uso del codificador convolucional (2, 1, 3) y con modulación BOC.

En el mejor de los casos en el canal Rayleigh:

- En valores a partir de 4dB de SNR y a una velocidad de recepción de 20m/s se tiene 8 errores sin el uso del codificador y con modulación BPSK, mientras tanto se tiene mínimo 5 errores sin el uso del codificador convolucional (2, 1, 3) y con modulación BOC.

- En valores a partir de 4dB de SNR y a una velocidad de recepción de 20m/s se tiene 0 errores con el uso del codificador y con modulación BPSK, en tanto que se tiene 0 errores con el uso del codificador convolucional (2, 1, 3) y con modulación BOC.
- Lo que demostró que en el canal Rayleigh el uso del codificador convolucional (2, 1, 3) a partir de 4dB de SNR tanto en la modulación BPSK como en la modulación BOC corrige los errores en forma eficaz, con la diferencia que en la modulación BOC es más notorio esta corrección de errores como se muestra en el gráfico 3-4.

Las Tablas 4-4 y 5-4, muestran los resultados obtenidos cuando la señal GPS L1, atraviesa el canal de transmisión Rayleigh, a diferentes velocidades.

**Tabla 4-4:** BER en un canal Rayleigh con velocidades al azar entre de 0-100 m/s - BPSK

<b>BER codificación Convolucional - Canal Rayleigh con velocidades al azar entre de 0-100 m/s - BPSK</b>								
<b>SNR</b>	<b>0 m/s</b>		<b>20 m/s</b>		<b>60 m/s</b>		<b>100 m/s</b>	
	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C
<b>0 dB</b>	2.27E-03	4.96E-03	2.91E-03	3.93E-03	2.96E-03	3.76E-03	3.45E-03	3.79E-03
<b>2 dB</b>	1.22E-04	4.89E-04	2.69E-04	2.44E-04	4.40E-04	1.71E-04	8.80E-04	2.20E-04
<b>4 dB</b>	0	0	1.96E-04	0	4.40E-04	0	5.62E-04	0
<b>10 dB</b>	2.44E-05	0	1.22E-04	0	5.13E-04	0	5.38E-04	0
<b>40 dB</b>	0	0	1.47E-04	0	3.91E-04	0	7.33E-04	0

Fuente: (Armijo, 2017)

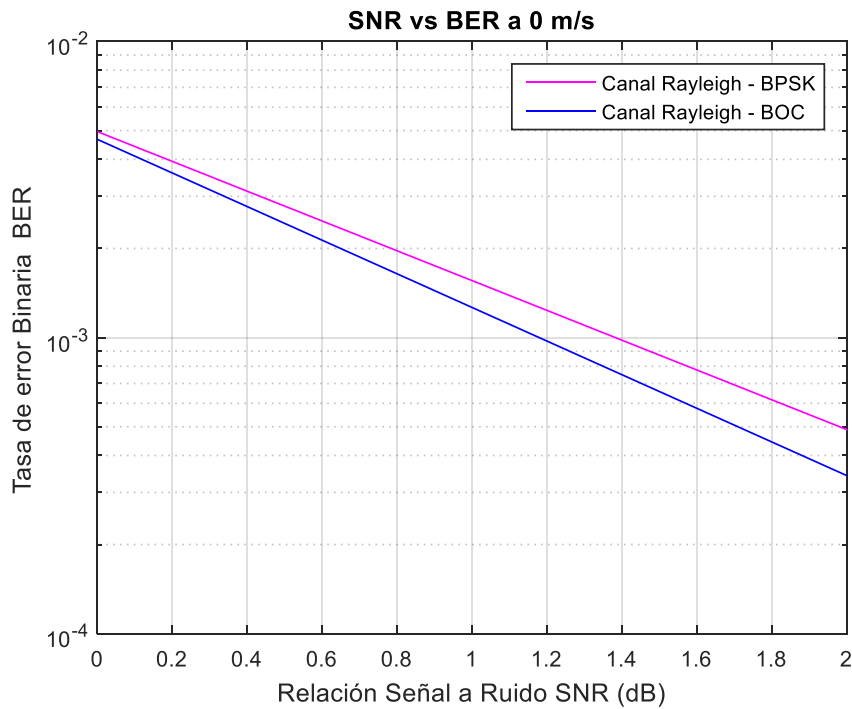
**Tabla 5-4:** BER en un canal Rayleigh con velocidades al azar entre de 0-100 m/s - BOC

<b>BER codificación Convolucional - Canal Rayleigh con velocidades al azar entre de 0-100 m/s - BOC</b>								
<b>SNR</b>	<b>0 m/s</b>		<b>20 m/s</b>		<b>60 m/s</b>		<b>100 m/s</b>	
	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C
<b>0 dB</b>	1.98E-03	4.67E-03	2.79E-03	3.81E-03	2.83E-03	3.64E-03	3.25E-03	3.59E-03
<b>2 dB</b>	0	3.42E-04	2.44E-04	2.20E-04	4.15E-04	1.47E-04	8.31E-04	1.71E-04
<b>4 dB</b>	0	0	1.22E-04	0	3.91E-04	0	4.40E-04	0
<b>10 dB</b>	0	0	9.78E-05	0	4.64E-04	0	4.64E-04	0
<b>40 dB</b>	0	0	1.22E-04	0	3.42E-04	0	6.11E-04	0

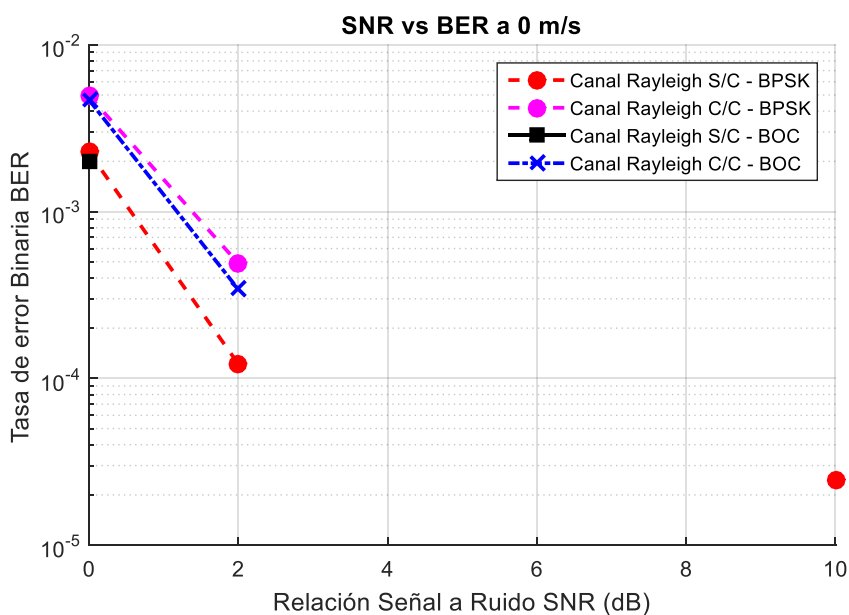
Realizado por: Andrea Llerena. 2019

Los gráficos 4-4, 6-4, 8-4 y 10-4, muestran los resultados en forma gráfica de la Tasa de Error Binaria (BER) frente a la Relación Señal a Ruido (SNR) para una modulación BPSK vs. la modulación BOC, con el uso del codificador convolucional (2,1,3).

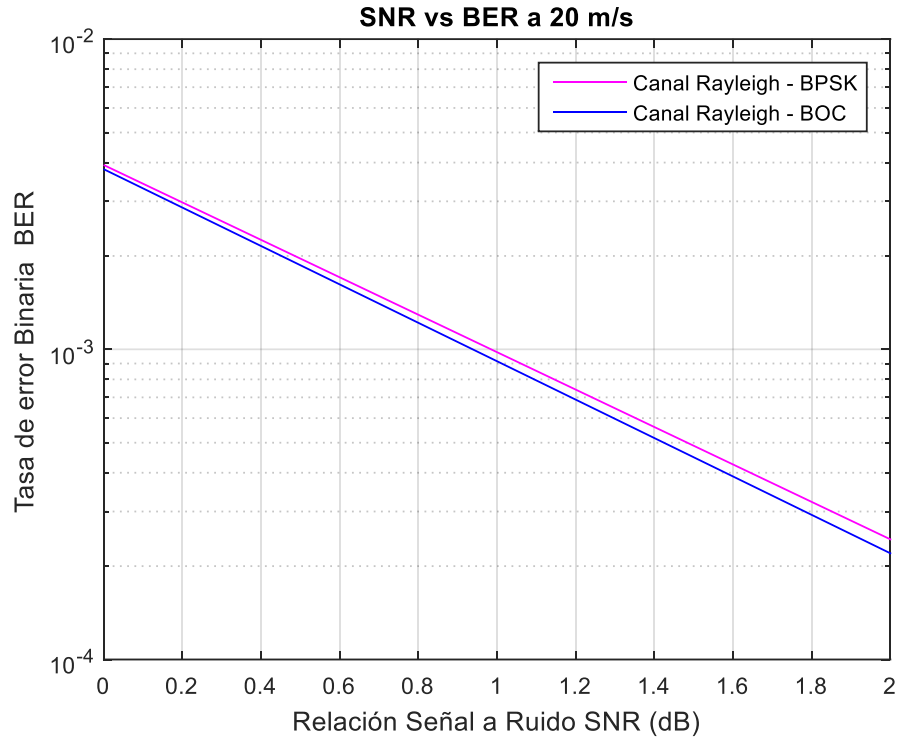
Los gráficos 5-4, 7-4, 9-4 y 11-4, muestran los resultados en forma gráfica de la Tasa de Error Binaria (BER) frente a la Relación Señal a Ruido (SNR) para una modulación BPSK vs. la modulación BOC, sin y con el uso del codificador convolucional (2,1,3).



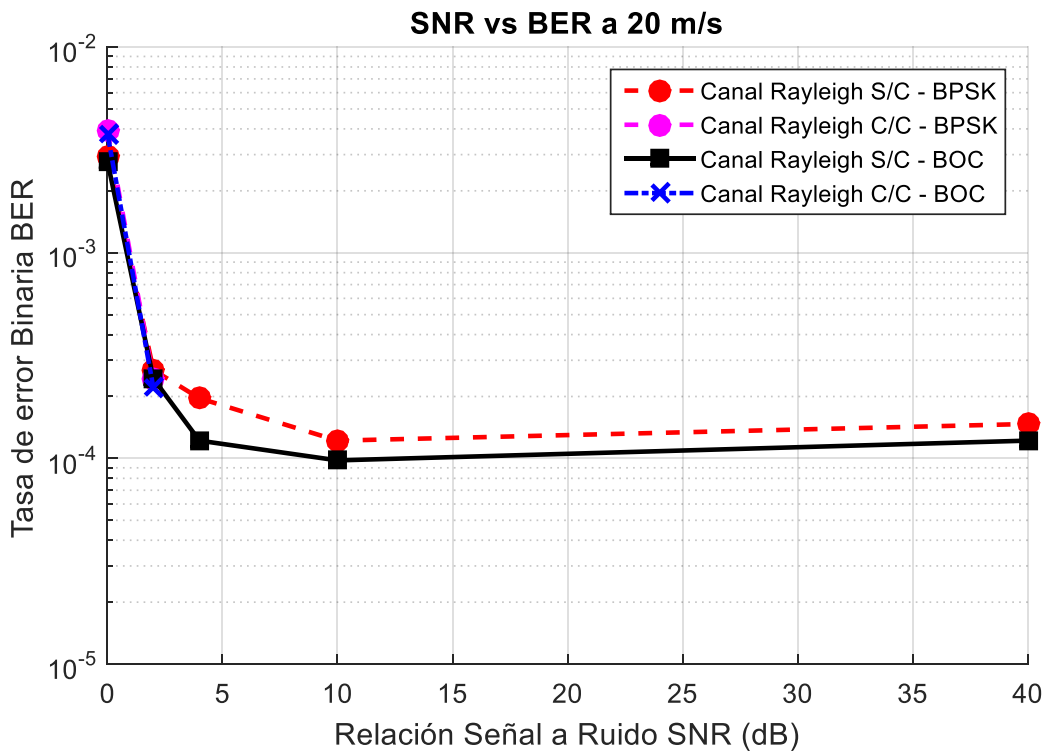
**Gráfico 4-4:** SNR vs. BER en un Canal Rayleigh a 0 m/s - (Con Codificación)  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019



**Gráfico 5-4:** SNR vs. BER en un Canal Rayleigh a 0 m/s - (Sin y Con Codificación)  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019

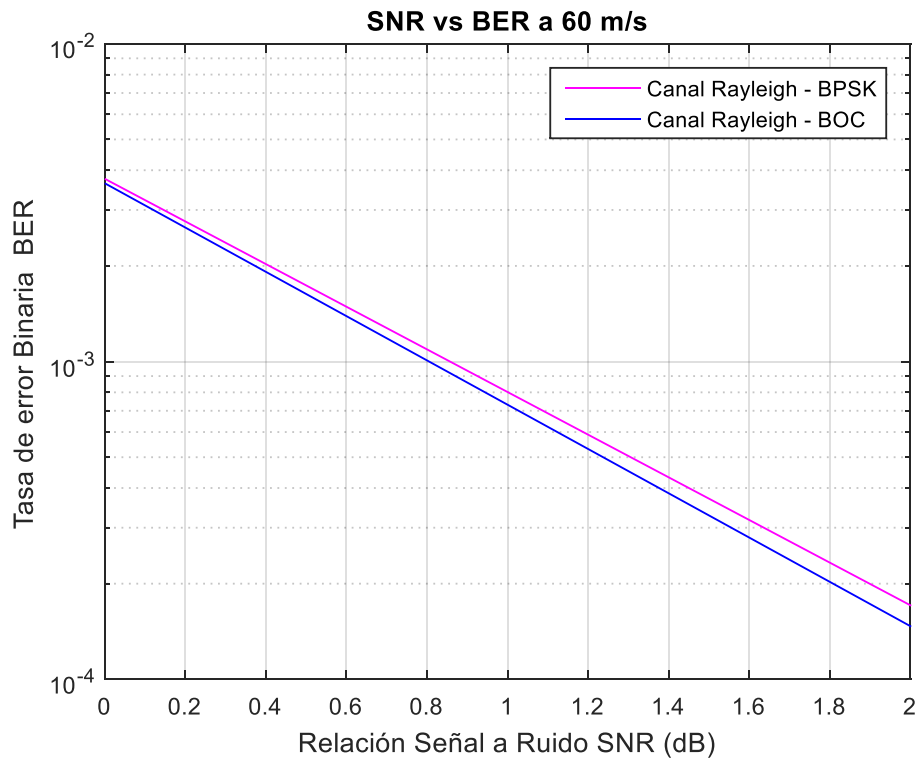


**Gráfico 6-4:** SNR vs. BER en un Canal Rayleigh a 20 m/s -(Con Codificación)  
 Realizado por: Andrea Llerena. 2019

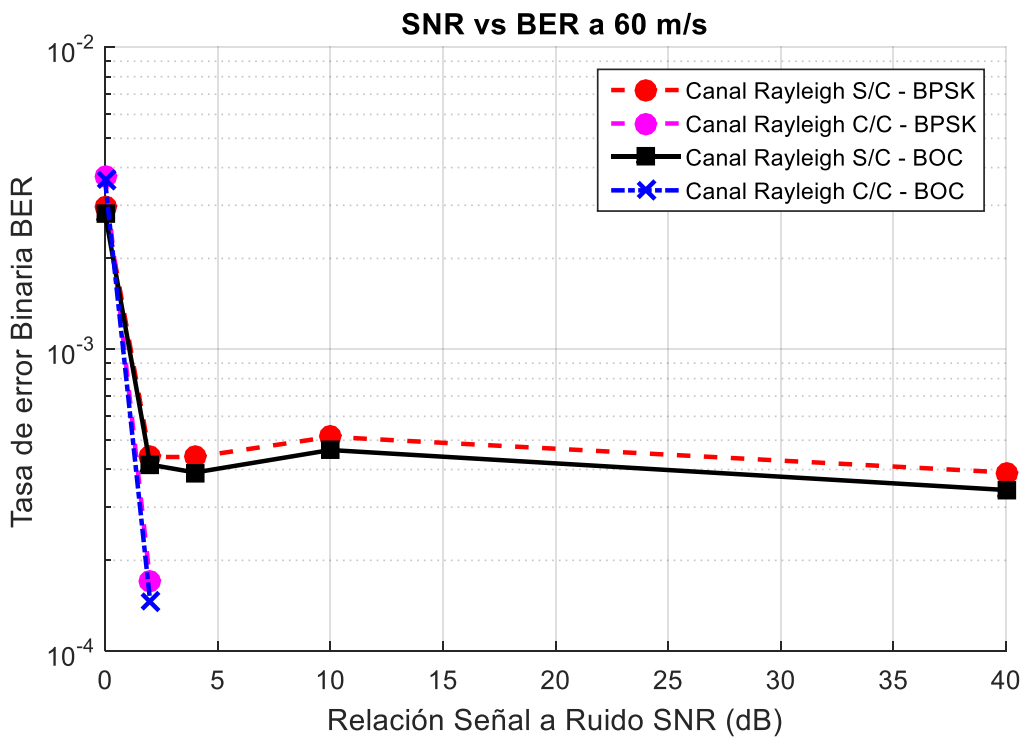


**Gráfico 7-4:** SNR vs. BER en un Canal Rayleigh a 20 m/s-(Sin y Con Codificación)  
 Realizado por: Andrea Llerena. 2019

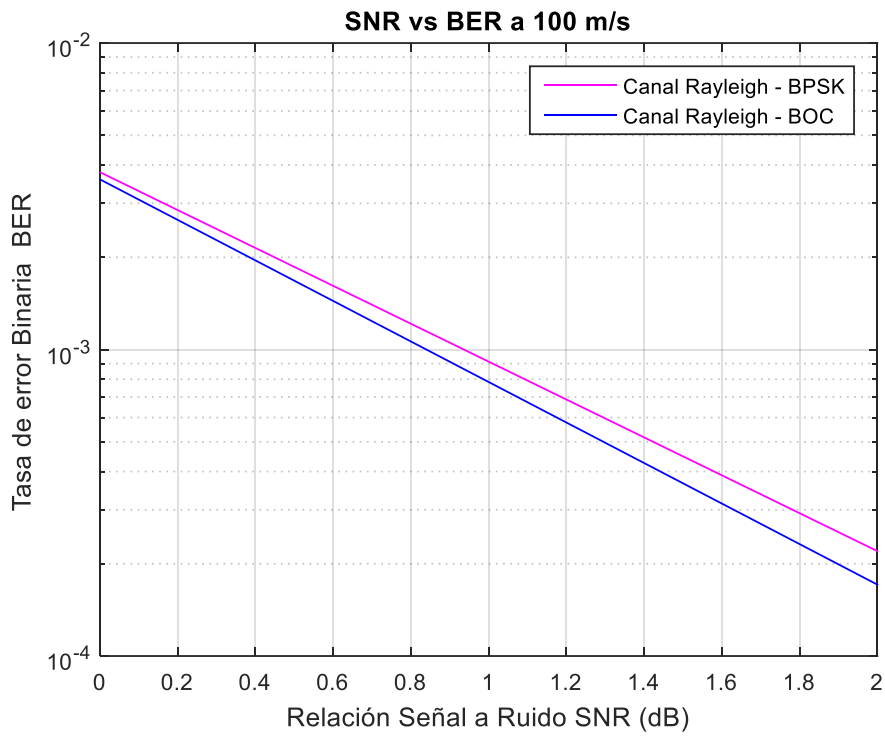




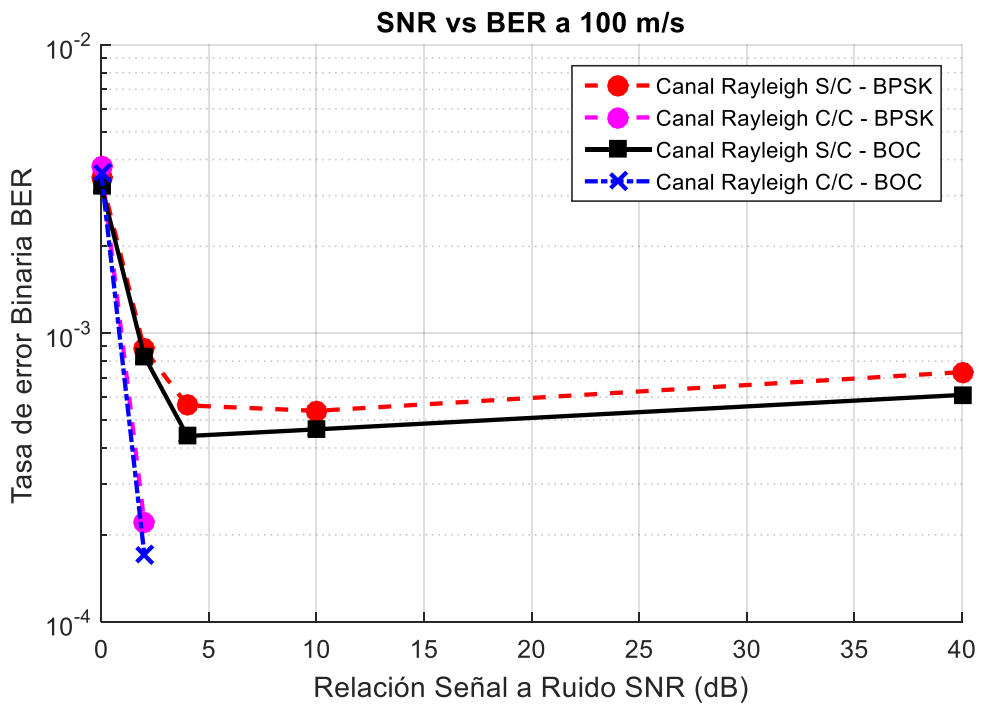
**Gráfico 8-4:** SNR vs. BER en un Canal Rayleigh a 60 m/s -(Con Codificación)  
 Realizado por: Andrea Llerena. 2019



**Gráfico 9-4:** SNR vs. BER en un Canal Rayleigh a 60 m/s-(Sin y Con Codificación)  
 Realizado por: Andrea Llerena. 2019



**Gráfico 10-4:** SNR vs. BER en un Canal Rayleigh a 100 m/s - (Con Codificación)  
 Realizado por: Andrea Llerena, 2019



**Gráfico 11-4:** SNR vs. BER en un Canal Rayleigh a 100 m/s - (Sin y Con Codificación)  
 Realizado por: Andrea Llerena, 2019

En el peor de los casos

- En un canal Rayleigh sin codificación convolucional (2,1,3) a una velocidad de 0m/s para tener una probabilidad de error de  $10^{-3}$  para el esquema de modulación BPSK el SNR corresponde a 0.6dB, mientras que para el esquema de modulación BOC el SNR corresponde a 0dB.
- En un canal Rayleigh con codificación convolucional (2,1,3) a una velocidad de 0m/s para tener una probabilidad de error de  $10^{-3}$  para el esquema de modulación BPSK el SNR corresponde a 1.4dB, mientras que para el esquema de modulación BOC el SNR corresponde a 1.2dB.
- En un canal Rayleigh sin codificación convolucional (2,1,3) a una velocidad de 20m/s para tener una probabilidad de error de  $10^{-3}$  para el esquema de modulación BPSK el SNR corresponde a 0.82dB, mientras que para el esquema de modulación BOC el SNR corresponde a 0.815dB.
- En un canal Rayleigh con codificación convolucional (2,1,3) a una velocidad de 20m/s para tener una probabilidad de error de  $10^{-3}$  para el esquema de modulación BPSK el SNR corresponde a 0.895dB, mientras que para el esquema de modulación BOC el SNR corresponde a 0.87dB.

En el mejor de los casos

- En un canal Rayleigh sin codificación convolucional (2,1,3) a una velocidad de 100m/s para tener una probabilidad de error de  $10^{-3}$  para el esquema de modulación BPSK el SNR corresponde a 1.98dB, mientras que para el esquema de modulación BOC el SNR corresponde a 1.95dB.
- En un canal Rayleigh con codificación convolucional (2,1,3) a una velocidad de 100m/s para tener una probabilidad de error de  $10^{-3}$  para el esquema de modulación BPSK el SNR corresponde a 0.825dB, mientras que para el esquema de modulación BOC el SNR corresponde a 0.81dB.
- En el canal Rayleigh la curva del BER vs. SNR, permite determinar que el esquema de modulación BPSK ofrece menor robustez frente a la presencia de ruido. Mientras que el esquema de modulación BOC es considerablemente más resistente al ruido y la interferencia, y por tanto menor cantidad de bits errados.

#### 4.1.3.2 Rendimiento del Canal Rician

En la Tabla 6-4, se muestra los errores producidos dentro del canal con desvanecimiento tipo Rician sin y con codificación Convolutacional (2,1,3); al que se le aplico la modulación BPSK. En esta tabla se muestran la variación de la velocidad de recepción y varios niveles SNR.

**Tabla 6-4:** Errores presentados en un Canal Rician sin y con Modulación BPSK

Errores presentes en un canal Rician sin y con modulación BPSK								
SNR	0 m/s		20 m/s		60 m/s		100 m/s	
	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C
<b>0 dB</b>	140	165	126	196	98	150	122	159
<b>2 dB</b>	10	14	20	7	16	18	24	9
<b>4 dB</b>	1	0	4	0	8	0	6	0
<b>10 dB</b>	0	0	4	0	4	0	20	0
<b>40 dB</b>	0	0	0	0	4	0	12	0

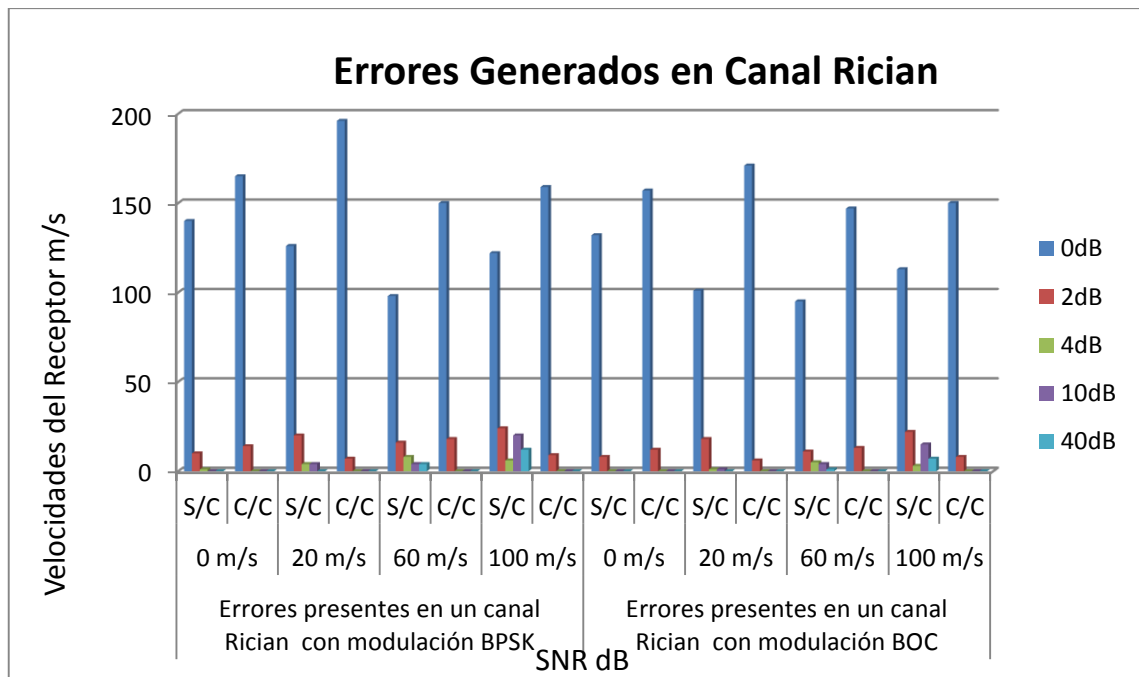
Fuente: (Armijo, 2017)

En la Tabla 7-4, se muestra los errores producidos dentro del canal con desvanecimiento tipo Rician sin y con codificación Convolutacional (2, 1, 3); al que se le aplico la modulación BOC. En esta tabla se muestran la variación de la velocidad de recepción y varios niveles SNR.

**Tabla 7-4:** Errores presentados en un Canal Rician sin y con Modulación BOC

Errores presentes en un canal Rician sin y con modulación BOC								
SNR	0 m/s		20 m/s		60 m/s		100 m/s	
	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C
<b>0 dB</b>	132	157	101	171	95	147	113	150
<b>2 dB</b>	8	12	18	6	11	13	22	8
<b>4 dB</b>	0	0	1	0	5	0	3	0
<b>10 dB</b>	0	0	1	0	4	0	15	0
<b>40 dB</b>	0	0	0	0	1	0	7	0

Realizado por: Andrea Llerena. 2019



**Gráfico 12-4:** Tabulación de los Errores en el canal Rician para BPSK y BOC  
 Realizado por: Andrea Llerena. 2019

En el peor de los casos en el canal Rician:

- A un SNR de 0dB y a una velocidad de recepción de 0m/s se tiene 140 errores sin el uso del codificador y con modulación BPSK, mientras tanto se tiene 132 errores sin el uso del codificador convolucional (2, 1, 3) y con modulación BOC.
- A un SNR de 0dB y a una velocidad de recepción de 0m/s se tiene 165 errores con el uso del codificador y con modulación BPSK, en tanto que se tiene 157 errores con el uso del codificador convolucional (2, 1, 3) y con modulación BOC.
- A un SNR de 0dB y a una velocidad de recepción de 100m/s se tiene 122 errores sin el uso del codificador y con modulación BPSK, mientras tanto se tiene 113 errores sin el uso del codificador convolucional (2, 1, 3) y con modulación BOC.
- A un SNR de 0dB y a una velocidad de recepción de 100m/s se tiene 159 errores con el uso del codificador y con modulación BPSK, en tanto que se tiene 150 errores con el uso del codificador convolucional (2, 1, 3) y con modulación BOC.

En el mejor de los casos en el canal Rician:

- En valores a partir de 4dB de SNR y a una velocidad de recepción de 60m/s se tiene 8 errores sin el uso del codificador y con modulación BPSK, mientras tanto se tiene mínimo 5 errores sin el uso del codificador convolucional (2, 1, 3) y con modulación BOC.

- En valores a partir de 4dB de SNR y a una velocidad de recepción de 60m/s se tiene 0 errores con el uso del codificador y con modulación BPSK, en tanto que se tiene 0 errores con el uso del codificador convolucional (2, 1, 3) y con modulación BOC.
- Lo que demostró que en el canal Rician el uso del codificador convolucional (2, 1, 3) a partir de 4dB de SNR tanto en la modulación BPSK como en la modulación BOC corrige los errores en forma eficaz, con la diferencia que en la modulación BOC es más notorio esta corrección de errores como se muestra en el gráfico 12-4.

Las Tablas 8-4 y 9-4, muestran los resultados obtenidos cuando la señal GPS L1, atraviesa el canal de transmisión Rician, a diferentes velocidades.

**Tabla 8-4:** BER en un canal Rician con velocidades al azar entre de 0-100 m/s - BPSK

<b>BER codificación Convolucional - Canal Rician con velocidades al azar entre de 0-100 m/s - BPSK</b>								
<b>SNR</b>	<b>0 m/s</b>		<b>20 m/s</b>		<b>60 m/s</b>		<b>100 m/s</b>	
	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C
<b>0 dB</b>	3.42E-03	4.03E-03	3.08E-03	4.79E-03	2.39E-03	3.67E-03	2.98E-03	3.89E-03
<b>2 dB</b>	2.44E-04	3.42E-04	4.89E-04	1.71E-04	3.91E-04	4.40E-04	5.87E-04	2.20E-04
<b>4 dB</b>	2.44E-05	0	9.78E-05	0	1.96E-04	0	1.47E-04	0
<b>10 dB</b>	0	0	9.78E-05	0	9.78E-05	0	4.89E-04	0
<b>40 dB</b>	0	0	0	0	9.78E-05	0	2.93E-04	0

Fuente: (Armijo, 2017)

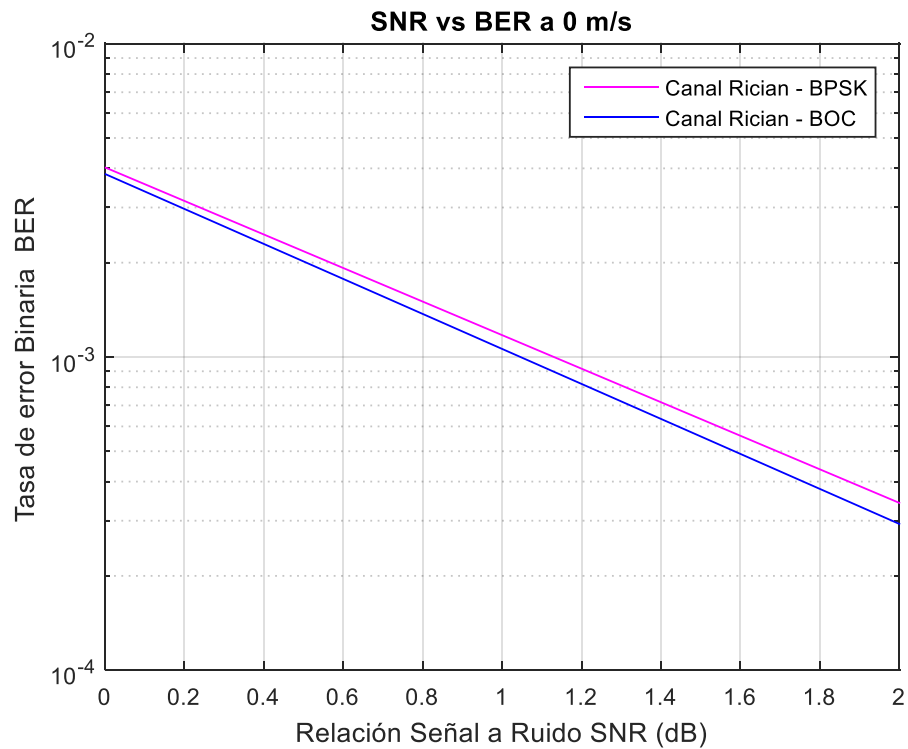
**Tabla 9-4:** BER en un canal Rician con velocidades al azar entre de 0-100 m/s - BOC

<b>BER codificación Convolucional - Canal Rician con velocidades al azar entre de 0-100 m/s - BOC</b>								
<b>SNR</b>	<b>0 m/s</b>		<b>20 m/s</b>		<b>60 m/s</b>		<b>100 m/s</b>	
	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C	S/C	C/C
<b>0 dB</b>	3.23E-03	3.84E-03	2.47E-03	4.18E-03	2.32E-03	3.59E-03	2.76E-03	3.67E-03
<b>2 dB</b>	1.96E-04	2.93E-04	4.40E-04	1.47E-04	2.69E-04	3.18E-04	5.38E-04	1.96E-04
<b>4 dB</b>	0	0	2.44E-05	0	1.22E-04	0	7.33E-05	0
<b>10 dB</b>	0	0	2.44E-05	0	9.78E-05	0	3.67E-04	0
<b>40 dB</b>	0	0	0	0	2.44E-05	0	1.71E-04	0

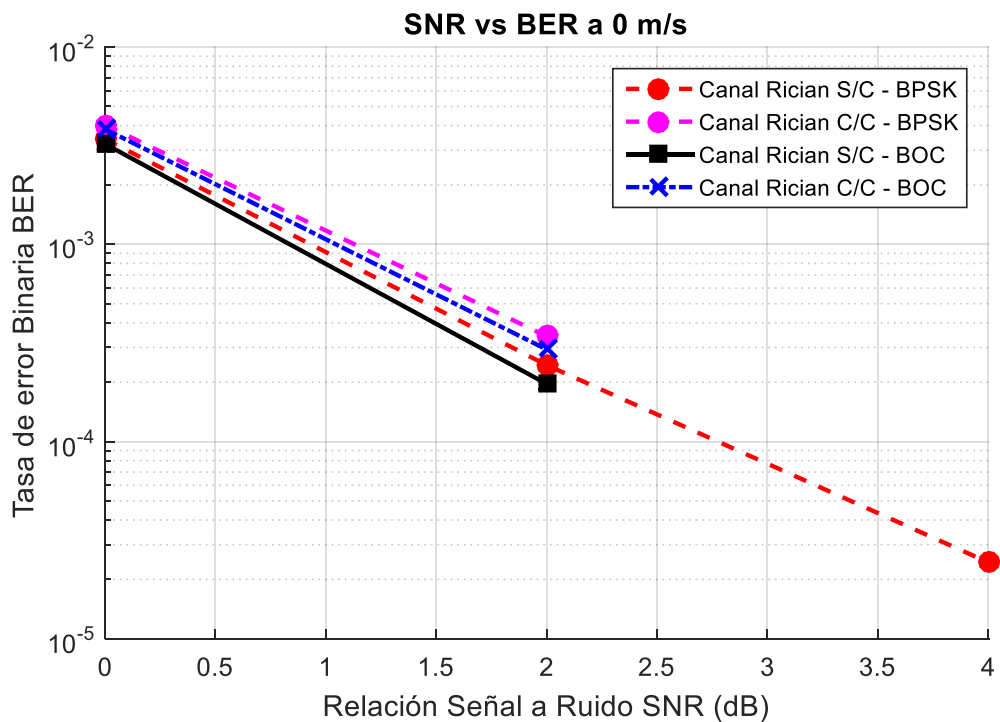
Realizado por: Andrea Llerena. 2019

Los gráficos 13-4, 15-4, 17-4 y 19-4, muestran los resultados en forma gráfica de la Tasa de Error Binaria (BER) frente a la Relación Señal a Ruido (SNR) para una modulación BPSK vs. la modulación BOC, con el uso del codificador convolucional (2,1,3), en el canal Rician.

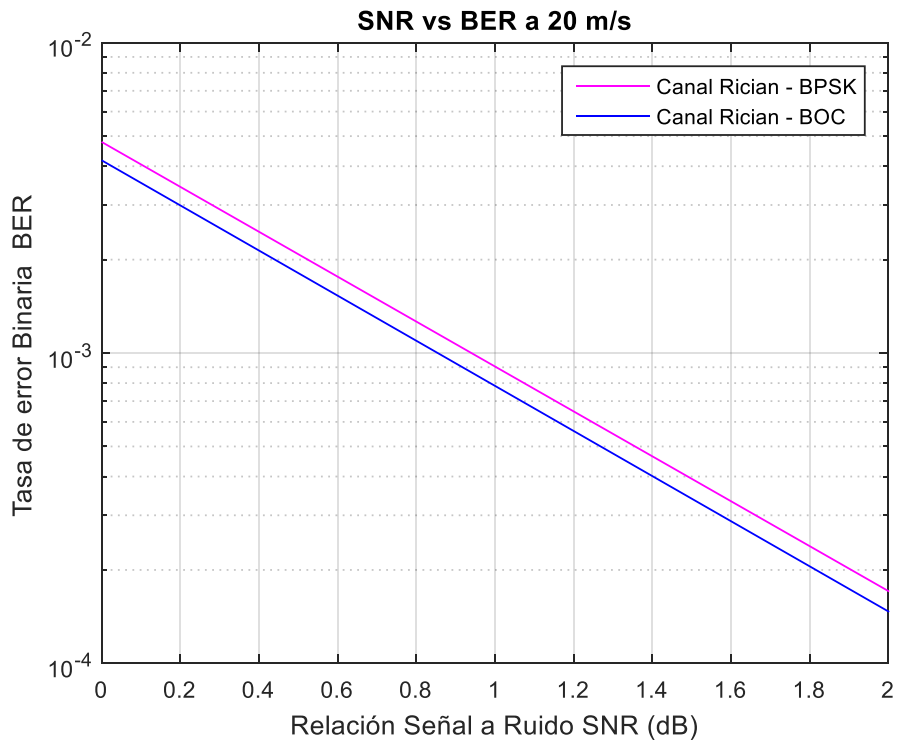
Los gráficos 14-4, 16-4, 18-4 y 20-4, muestran los resultados en forma gráfica de la Tasa de Error Binaria (BER) frente a la Relación Señal a Ruido (SNR) para una modulación BPSK vs. la modulación BOC, sin y con el uso del codificador convolucional (2,1,3).



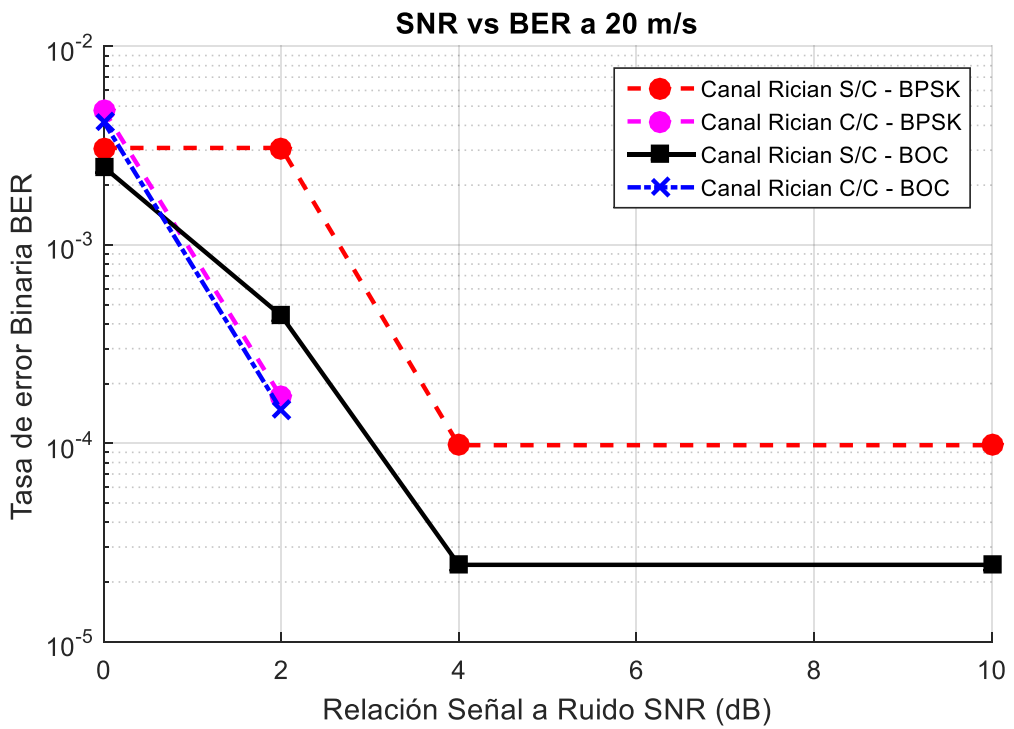
**Gráfico 13-4:** SNR vs. BER en un Canal Rician a 0 m/s - (Con Codificación)  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019



**Gráfico 14-4:** SNR vs. BER en un Canal Rician a 0 m/s -(Sin y Con Codificación)  
Realizado por: Andrea Llerena. 2019

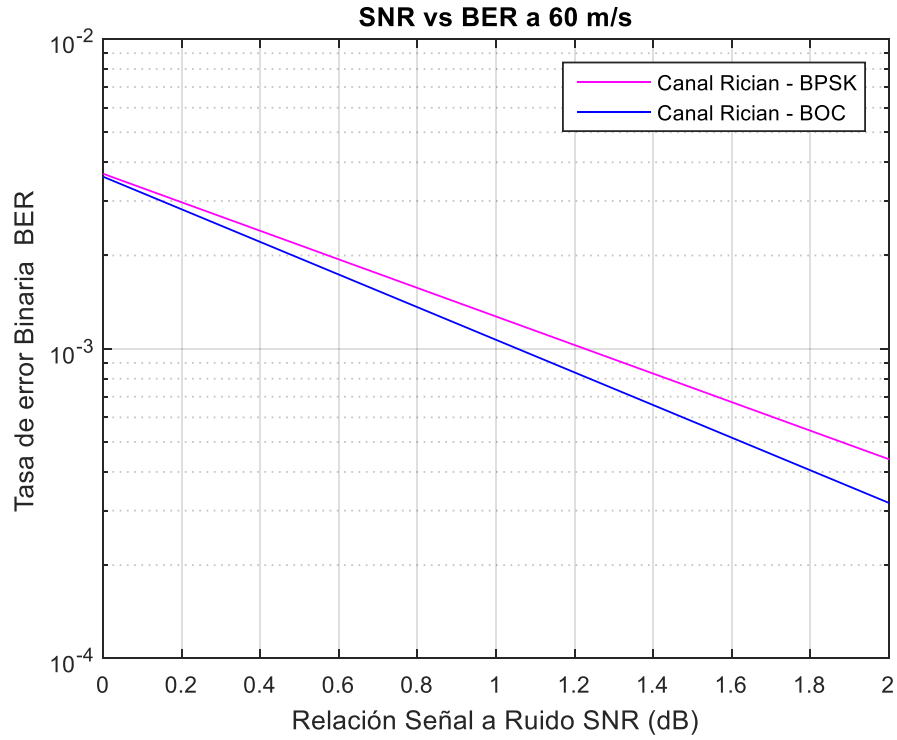


**Gráfico 15-4:** SNR vs. BER en un Canal Rician a 20 m/s - (Con Codificación)  
 Realizado por: Andrea Llerena, 2019

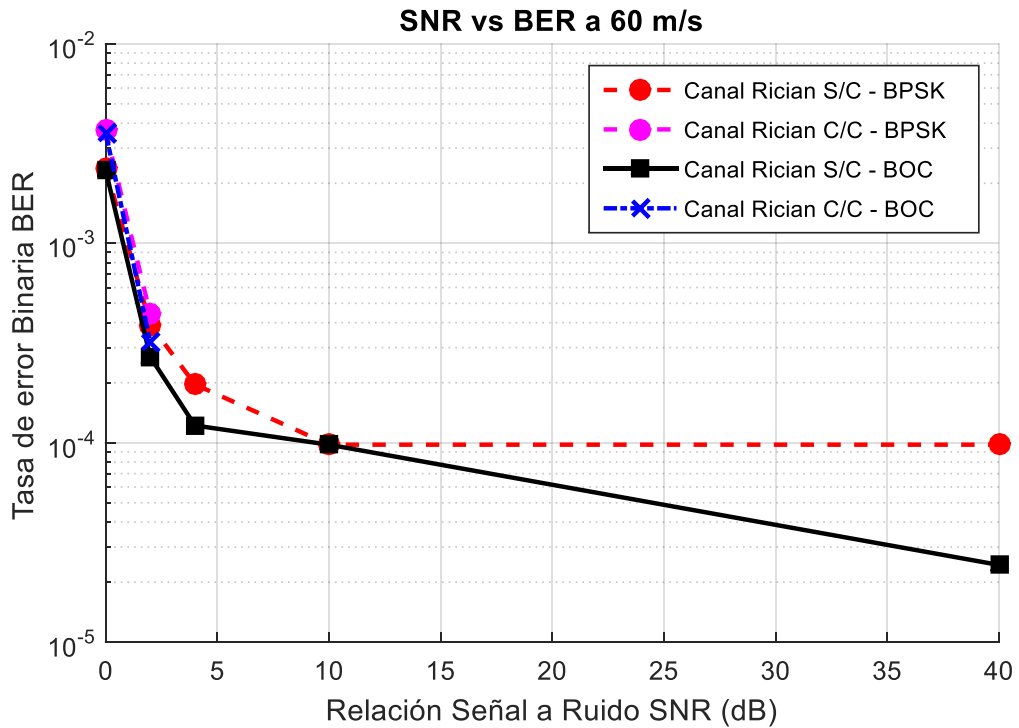


**Gráfico 16-4:** SNR vs. BER en un Canal Rician a 20 m/s-(Sin y Con Codificación)  
 Realizado por: Andrea Llerena, 2019

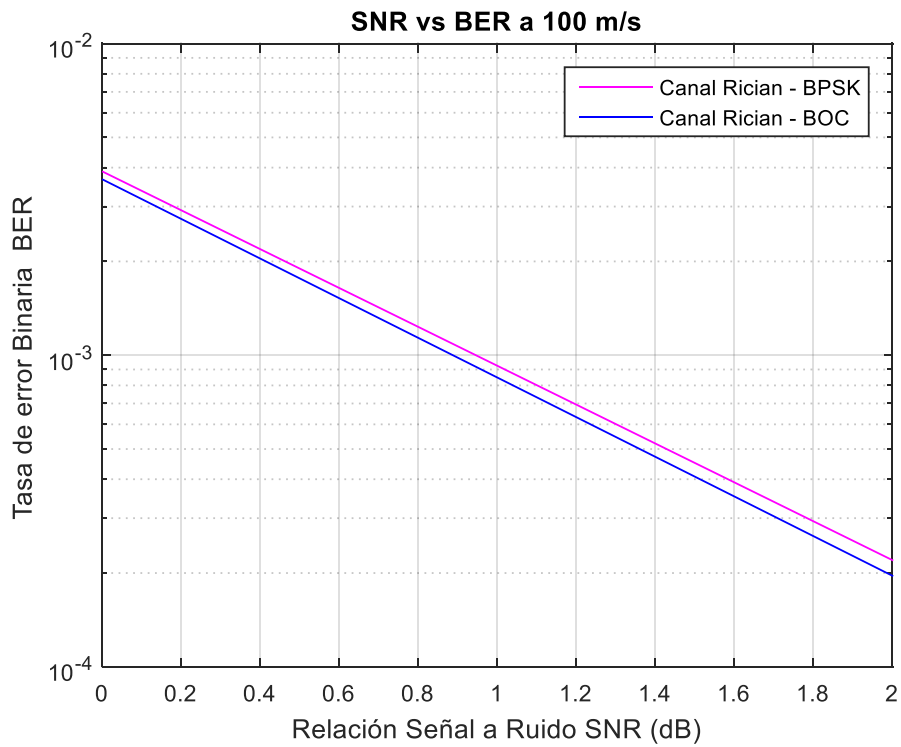




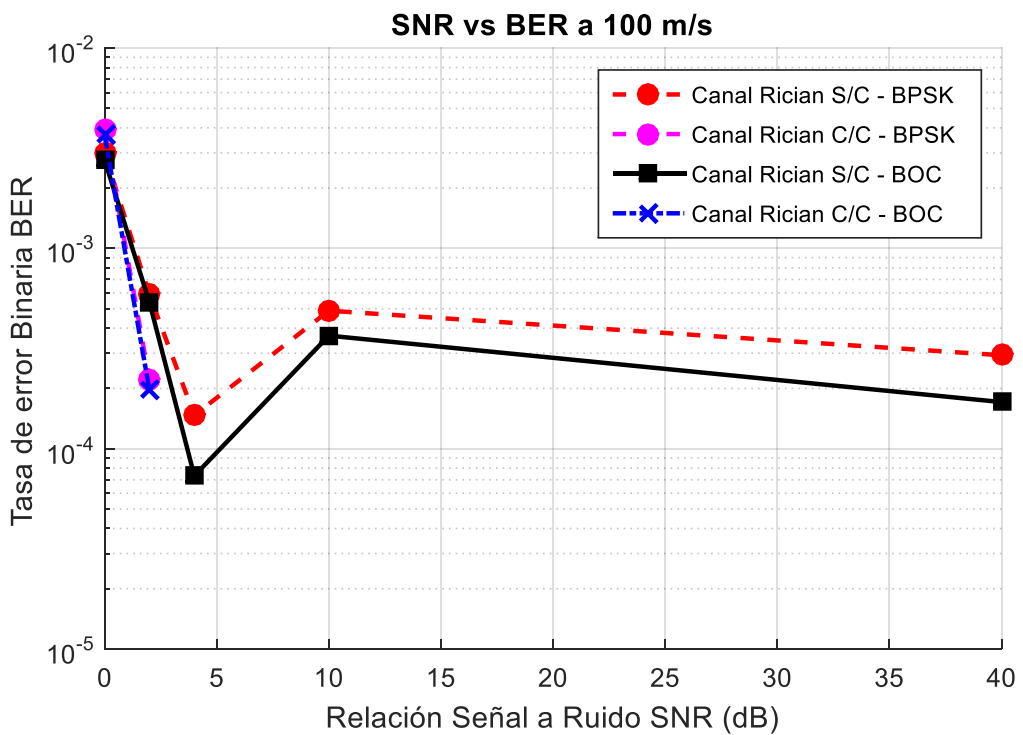
**Gráfico 17-4:** SNR vs. BER en un Canal Rician a 60 m/s - (Con Codificación)  
 Realizado por: Andrea Llerena. 2019



**Gráfico 18-4:** SNR vs. BER en un Canal Rician a 60 m/s-(Sin y Con Codificación)  
 Realizado por: Andrea Llerena. 2019



**Gráfico 19-4:** SNR vs. BER en un Canal Rician a 100 m/s - (Con Codificación)  
 Realizado por: Andrea Llerena. 2019



**Gráfico 20-4:** SNR vs. BER en un Canal Rician a 100 m/s (Sin y Con Codificación)  
 Realizado por: Andrea Llerena. 2019

En el peor de los casos

- En un canal Rician sin codificación convolucional (2,1,3) a una velocidad de 0m/s para tener una probabilidad de error de  $10^{-3}$  para el esquema de modulación BPSK el SNR corresponde a 0.95 dB, mientras que para el esquema de modulación BOC el SNR corresponde a 0.88dB.
- En un canal Rician con codificación convolucional (2,1,3) a una velocidad de 0m/s para tener una probabilidad de error de  $10^{-3}$  para el esquema de modulación BPSK el SNR corresponde a 1.17dB, mientras que para el esquema de modulación BOC el SNR corresponde a 1.12dB.
- En un canal Rician sin codificación convolucional (2,1,3) a una velocidad de 20m/s para tener una probabilidad de error de  $10^{-3}$  para el esquema de modulación BPSK el SNR corresponde a 2.75B, mientras que para el esquema de modulación BOC el SNR corresponde a 1.10dB.
- En un canal Rician con codificación convolucional (2,1,3) a una velocidad de 20m/s para tener una probabilidad de error de  $10^{-3}$  para el esquema de modulación BPSK el SNR corresponde a 0.96dB, mientras que para el esquema de modulación BOC el SNR corresponde a 0.85dB.

En el mejor de los casos

- En un canal Rician sin codificación convolucional (2,1,3) a una velocidad de 100m/s para tener una probabilidad de error de  $10^{-3}$  para el esquema de modulación BPSK el SNR corresponde a 1.40dB, mientras que para el esquema de modulación BOC el SNR corresponde a 1.20dB.
- En un canal Rician con codificación convolucional (2,1,3) a una velocidad de 100m/s para tener una probabilidad de error de  $10^{-3}$  para el esquema de modulación BPSK el SNR corresponde a 0.96dB, mientras que para el esquema de modulación BOC el SNR corresponde a 0.84dB.
- En el canal Rician la curva del BER vs. SNR, permite determinar que el esquema de modulación BPSK es capaz de ofrecer velocidades de datos mayores, pero esto tiene un precio, menor robustez frente a la presencia de ruido. Mientras que el esquema de modulación BOC es considerablemente más resistente al ruido y la interferencia, y por tanto menor cantidad de bits errados.

## 4.2 Análisis de la Hipótesis

### 4.2.1 Tamaño de la muestra

Como se va a realizar una comparativa de esquemas de modulación entre un trabajo de titulación realizado por (Armijo, 2017) y el esquema de modulación desarrollado de este trabajo, se utiliza la misma muestra y población planteada en el trabajo de titulación mencionado.

En este caso una medición por cada velocidad de recepción a cuatro SNR distintas. Para la comparativa se utilizó una parte del escenario planteado en (Armijo, 2017), y el escenario definido en este trabajo.

### 4.2.2 Comprobación de la Hipótesis.

La hipótesis planteada: El entorno de simulación para la evaluación de las técnicas de modulación, permitirá determinar la técnica más adecuada para la transmisión eficiente de datos de la señal civil GPS.L1

Por lo tanto, para la comprobación de la hipótesis se utilizaron los resultados obtenidos en las simulaciones; configuradas con los parámetros que se mencionan en la sección 4.1.1. y mediante el programa SPSS se analiza los datos para poder aceptar o rechazar la hipótesis planteada.

Se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk, mismo que permite contrastar la normalidad de los datos.

#### 4.2.2.1 Prueba de Shapiro-Wilk

En la Tabla 10-4, se muestra el resultado de la Prueba Shapiro-Wilk, usada para verificar la normalidad de los datos. En la columna **Sig** se determina si existe o no normalidad.

Se establece:

Nivel de significancia  $\alpha=0,05$ .

Si el valor  $\text{Sig} > \alpha$  existe normalidad o  $\text{Sig} < \alpha$  No existe normalidad.

**Tabla 10-4:** Prueba Shapiro-Wilk de Normalidad de los esquemas de modulación.

<b>BER en un canal Rayleigh sin codificación Convolutacional y velocidad de receptor de 0m/s</b>				<b>BER en un canal Rician sin codificación Convolutacional y velocidad de receptor de 0m/s</b>			
	<b>Estadístico</b>	<b>gl</b>	<b>Sig.</b>		<b>Estadístico</b>	<b>gl</b>	<b>Sig.</b>
<b>BPSK</b>	0.668	4	0.005	<b>BPSK</b>	0.682	4	0.007
<b>BOC</b>	0.630	4	0.001	<b>BOC</b>	0.673	4	0.005
<b>BER en un canal Rayleigh sin codificación Convolutacional y velocidad de receptor de 20m/s</b>				<b>BER en un canal Rician sin codificación Convolutacional y velocidad de receptor de 20m/s</b>			
	<b>Estadístico</b>	<b>gl</b>	<b>Sig.</b>		<b>Estadístico</b>	<b>gl</b>	<b>Sig.</b>
<b>BPSK</b>	0.664	4	0.004	<b>BPSK</b>	0.747	4	0.036
<b>BOC</b>	0.663	4	0.004	<b>BOC</b>	0.753	4	0.042
<b>BER en un canal Rayleigh sin codificación Convolutacional y velocidad de receptor de 60m/s</b>				<b>BER en un canal Rician sin codificación Convolutacional y velocidad de receptor de 60m/s</b>			
	<b>Estadístico</b>	<b>gl</b>	<b>Sig.</b>		<b>Estadístico</b>	<b>gl</b>	<b>Sig.</b>
<b>BPSK</b>	0.646	4	0.002	<b>BPSK</b>	0.728	4	0.024
<b>BOC</b>	0.654	4	0.003	<b>BOC</b>	0.713	4	0.016
<b>BER en un canal Rayleigh sin codificación Convolutacional y velocidad de receptor de 100m/s</b>				<b>BER en un canal Rician sin codificación Convolutacional y velocidad de receptor de 100m/s</b>			
	<b>Estadístico</b>	<b>gl</b>	<b>Sig.</b>		<b>Estadístico</b>	<b>gl</b>	<b>Sig.</b>
<b>BPSK</b>	0.718	4	0.019	<b>BPSK</b>	0.749	4	0.038
<b>BOC</b>	0.740	4	0.031	<b>BOC</b>	0.757	4	0.045
<b>BER en un canal Rayleigh con codificación Convolutacional y velocidad de receptor de 0m/s</b>				<b>BER en un canal Rician con codificación Convolutacional y velocidad de receptor de 0m/s</b>			
	<b>Estadístico</b>	<b>gl</b>	<b>Sig.</b>		<b>Estadístico</b>	<b>gl</b>	<b>Sig.</b>
<b>BPSK</b>	0.699	4	0.011	<b>BPSK</b>	0.690	4	0.009
<b>BOC</b>	0.682	4	0.007	<b>BOC</b>	0.684	4	0.007
<b>BER en un canal Rayleigh con codificación Convolutacional y velocidad de receptor de 20m/s</b>				<b>BER en un canal Rician con codificación Convolutacional y velocidad de receptor de 20m/s</b>			
	<b>Estadístico</b>	<b>gl</b>	<b>Sig.</b>		<b>Estadístico</b>	<b>gl</b>	<b>Sig.</b>
<b>BPSK</b>	0.674	4	0.006	<b>BPSK</b>	0.655	4	0.003
<b>BOC</b>	0.671	4	0.005	<b>BOC</b>	0.655	4	0.003
<b>BER en un canal Rayleigh con codificación Convolutacional y velocidad de receptor de 60m/s</b>				<b>BER en un canal Rician con codificación Convolutacional y velocidad de receptor de 60m/s</b>			
	<b>Estadístico</b>	<b>gl</b>	<b>Sig.</b>		<b>Estadístico</b>	<b>gl</b>	<b>Sig.</b>
<b>BPSK</b>	0.662	4	0.004	<b>BPSK</b>	0.714	4	0.017
<b>BOC</b>	0.659	4	0.003	<b>BOC</b>	0.693	4	0.009
<b>BER en un canal Rayleigh con codificación Convolutacional y velocidad de receptor de 100m/s</b>				<b>BER en un canal Rician con codificación Convolutacional y velocidad de receptor de 100m/s</b>			
	<b>Estadístico</b>	<b>gl</b>	<b>Sig.</b>		<b>Estadístico</b>	<b>gl</b>	<b>Sig.</b>
<b>BPSK</b>	0.671	4	0.005	<b>BPSK</b>	0.670	4	0.005
<b>BOC</b>	0.664	4	0.004	<b>BOC</b>	0.668	4	0.005

Realizado por: Andrea Llerena. 2019

Basándonos en los resultados de la tabla 10-4, se observa que el valor **Sig** para los dos esquemas de modulación es menor a 0,05, por tanto, se establece que todos los datos no se distribuyen normalmente, es así que se para el presente caso se utiliza para la comprobación de la hipótesis la prueba de Kruskal-Wallis para k muestras, con la finalidad de comprobar la hipótesis general, esta hipótesis se define en dos hipótesis una nula y una alternativa.

**Ho (Hipótesis Nula).** - “El entorno de simulación para la evaluación de las técnicas de modulación, permitirá determinar la técnica más adecuada para la transmisión eficiente de datos de la señal civil GPS.L1”

**Hi (Hipótesis Alternativa).** - “El entorno de simulación para la evaluación de las técnicas de modulación, no permitirá determinar la técnica más adecuada para la transmisión eficiente de datos de la señal civil GPS.L1”

#### 4.2.2.2 Prueba de Kruskal-Wallis

En la tabla 11-4, se muestra los datos obtenidos de la prueba Kruskal-Wallis para muestras independientes, realizado con el Software SPSS de IBM, para los dos esquemas de modulación planteados; a diferentes velocidades de recepción y determinados valores de relación Señal a Ruido. En la columna Sig. se muestra el valor que determina si la hipótesis es aceptada.

**Tabla 11-4:** Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis

Velocidad de receptor de 0m/s		Rayleigh sin codificación Convolutional	Rician sin codificación Convolutional
	N	Sig.	Sig.
BPSK-BOC	4	0.508	0.554
Velocidad de receptor de 20m/s		Rayleigh sin codificación Convolutional	Rician sin codificación Convolutional
	N	Sig.	Sig.
BPSK-BOC	4	0.384	0.663
Velocidad de receptor de 60m/s		Rayleigh sin codificación Convolutional	Rician sin codificación Convolutional
	N	Sig.	Sig.
BPSK-BOC	4	0.306	0.564
Velocidad de receptor de 100m/s		Rayleigh sin codificación Convolutional	Rician sin codificación Convolutional
	N	Sig.	Sig.
BPSK-BOC	4	0.564	0.564
Velocidad de receptor de 0m/s		Rayleigh con codificación Convolutional	Rician con codificación Convolutional
	N	Sig.	Sig.
BPSK-BOC	4	0.758	0.758

Velocidad de receptor de 20m/s		Rayleigh con codificación Convolutacional	Rician con codificación Convolutacional
	N	Sig.	Sig.
BPSK-BOC	4	0.758	0.758
Velocidad de receptor de 60m/s		Rayleigh con codificación Convolutacional	Rician con codificación Convolutacional
	N	Sig.	Sig.
BPSK-BOC	4	0.758	0.758
Velocidad de receptor de 100m/s		Rayleigh con codificación Convolutacional	Rician con codificación Convolutacional
	N	Sig.	Sig.
BPSK-BOC	4	0.758	0.758

Realizado por: Andrea Llerena. 2019

Como se observa en la tabla 11-4, los valores de las columnas de significancia son mayores a 0.05.

Dónde:

Si el p-valor Sig. > 0.05: Se acepta la Hipótesis Nula (**H<sub>0</sub>**)

Si el p-valor Sig. < 0.05: Se acepta la Hipótesis Alternativa (**H<sub>i</sub>**)

Por lo tanto:

Tomando el mayor y menor valor de significancia de la tabla 11-4:  $0.306 > 0.05$  y  $0.758 > 0.05$ . Se cumple la hipótesis Nula.

**H<sub>0</sub>**: El entorno de simulación para la evaluación de las técnicas de modulación, permitirá determinar la técnica más adecuada para la transmisión eficiente de datos de la señal civil GPS.L1.

## CONCLUSIONES

- La revisión del estado de arte ha permitido dar cuenta que el desarrollo de los sistemas de posicionamiento GNSS no se detiene, por tanto, requieren mejoras en la precisión y confiabilidad de la posición, lo que ofrece este tipo de modulación Binary Offset Carrier BOC.
- La técnica de modulación Binary Offset Carrier, separa el espectro de frecuencia de la señal GPS civil en dos lóbulos principales simétricos con ancho de banda de 2MHz, debido a la presencia de la función de autocorrelación de múltiples picos que divide la densidad espectral de potencia lo que proporciona una mayor capacidad de recuperación de bits.
- El algoritmo de detección y corrección de errores implementado; Convolutional (2, 1, 3) permitió detectar y corregir errores de transmisión en forma eficaz a partir de los 4 decibeles de relación señal a ruido. Antes de 4 decibeles se obtuvieron mayor cantidad de bits erróneos, esto debido que el ruido es mayor que la relación SNR, en estos casos la codificación Convolutional en lugar de corregir empeora la recepción de los datos.
- Para una probabilidad de error de  $10^{-3}$  para el esquema de modulación BOC en un canal Rayleigh con codificación convolutional (2,1,3) a una velocidad de recepción de 100m/s la relación señal a ruido SNR corresponde a 0.81dB, que es menor en 0.015 dB con relación al esquema de modulación BPSK. Por lo tanto, se comprueba que la modulación BOC es más robusta frente a la presencia de ruido lo que permite obtener una menor cantidad de bits erróneos.
- Para una probabilidad de error de  $10^{-3}$  para el esquema de modulación BOC en un canal Rician con codificación convolutional (2,1,3) a una velocidad de 100m/s la relación señal a ruido SNR corresponde a 0.84dB, que es menor en 0.12 dB con relación al esquema de modulación BPSK. Permitiendo determinar que la modulación BPSK es menos robusta frente a la presencia de ruido y la modulación BOC es más resistente al ruido y la interferencia, y por tanto presenta menor cantidad de bits errados.
- En términos estadísticos las distribuciones de los esquemas de modulación BPSK y BOC son iguales, en otras palabras, no existe una mejora significativa.



- Los resultados que se generan en el presente trabajo muestran una comparación de dos técnicas de modulación BPSK y BOC, para determinar el esquema más adecuado para transmitir una señal satelital GPS civil, mediante el análisis del comportamiento de los parámetros BER vs. SNR bajo un entorno de simulación. Obteniendo que la modulación BOC es la más eficiente porque presenta menor cantidad de errores después del proceso de recuperación de la señal.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un análisis similar al planteado en este trabajo de investigación; para las modulaciones: BOC (6, 1, 1/11) y TMBOC (6, 1, 4/33) y así determinar qué beneficios, ventajas y mejoras de BER vs. SNR nos ofrecen estas técnicas de modulación basadas en Binary Offset Carrier.
- Se recomienda realizar un análisis similar para las frecuencias 1227.6MHz que corresponde a la señal GPS L2C, así como también para la frecuencia 1176.45MHz de la señal L5C.
- Se recomienda para investigaciones futuras el uso de técnicas de codificación no mencionadas en este trabajo como Hamming, Reed Solomon (RS), etc.
- Se recomienda el uso de computadores con gran capacidad de memoria RAM y capacidad en disco, además de un procesador de última generación, adecuados para el procesamiento de la gran cantidad de datos generados por las señales analizadas.

## **GLOSARIO**

<b>BEIDOU</b>	Chinese Satellite Navigation System
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>BOC</b>	Binary Offset Carrier.
<b>BPSK</b>	Binary Phase Shift Keying
<b>C/A</b>	Coarse/Adquisition
<b>C/NAV</b>	Commercial Navigation Message
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access
<b>DoD</b>	Departamento de Defensa
<b>DSSS</b>	Direct Sequence Spread Spectrum
<b>FHSS</b>	Frecuency Hopping Spread Spectrum
<b>GALILEO</b>	European Satellite Navigation System
<b>GLONASS</b>	Global Navigation Satellite System.
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System.
<b>GPS</b>	Global Positioning System. Sistema de posicionamiento global.
<b>GUI</b>	Graphic User Interface. Interfaz gráfica de usuario.
<b>I/Q</b>	In-phase/quadrature phase
<b>L1</b>	GNSS frequency band. For GPS
<b>MATLAB</b>	Matrix Laboratory.
<b>MBOC</b>	Multiplexed Binary Offset Carrier
<b>PRN</b>	Pseudo Random Noise.
<b>SNR</b>	Relación Señal a Ruido

## BIBLIOGRAFÍA

- Anantharamu, P. B.** (2011). *Space-Time Equalization Techniques for New GNSS Signals*.  
Obtenido de <http://www.geomatics.ucalgary.ca/graduatetheses>
- Armijo, I.** (2017). Desarrollo de un algoritmo de la técnica de espectro ensanchado en matlab para evaluar el rendimiento del canal de transmisión en GPS L1. *Tesis de Ingeniería*.  
Riobamba, Ecuador.
- Astudillo León, J. P., & Delgado Tello, E.** (Abril de 2012). SISTEMA DE LOCALIZACIÓN MONITOREO Y CONTROL VEHICULAR BASADO EN LOS PROTOCOLOS GPS/GSM/GPRS. Cuenca, Azuay, Ecuador.
- Berrocoso, M. e.** (2004). El sistema de posicionamiento global. *Puerto Real: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cadiz*, pp.12-16.
- Betz, J. W.** (25-27 de Enero de 1999). The Offset Carrier Modulation for GPS Modernization. 639-648. The Institute of Navigation, San Diego, California.
- Campillo, J.** (2012). “Revisión de los Sistemas de Microondas para Aplicaciones Militares”. *Escuela Superior de Ingeniería en Telecomunicaciones*. Cartagena.
- Casanova, L.** (2002). Sistemas de Posicionamiento Global por satélites G.P.S . En C. Leonardo, *Topografía Plana* (págs. 10-1). Merida, Venezuela: NE.
- Defense, D. o., Security, D. o., & Transportation, D. o.** (2005). Federal radionavigation plan. US National Technical Information Service. DOT-VNTSC-RITA-05-12/DoD-4650.5. Springfield, Virginia.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E.** (2008). “GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo and more”. Austria: SpringerWienNewYork.
- Hothem, L.** (8-13 de October de 2006). The GPS modernization program and policy update. *XXIII International FIG Congress*.
- Hudnut, K., & Titus, B.** (2004). *GPS L1 civil signal modernization (LIC)*. . Obtenido de The Interagency GPS Executive Board. : [www.navcen.uscg.gov/gps](http://www.navcen.uscg.gov/gps).

- Iglesias, P.** (2017). *www.pabloylesias.com*. Obtenido de <http://www.pabloylesias.com/adentrando-en-el-mundo-del-gps-arquitectura-ii/amp>
- Julien, O.** (2014). Future GNSS Signals. *ENAC - Ecole Nationale de L'Aviation Civile*. Francia.
- Kaplan, E., & Hegarty, C.** (2006). *Understanding GPS – principles and applications 2nd edition*. Norwood: Artech House.
- Logic, Position. (20 de junio de 2013). *www.positionlogic.com*. Obtenido de <https://www.positionlogic.com/es/el-blog-news/es/manejando-su-negocio-de-rastreo-de-gps/seleccion-de-hardware-rastreo-gps/>
- López, L.** (1999). *ceres.ugr.es*. Obtenido de Implementación y Simulación del Procesamiento de la Señal de Voz en la Interfaz de Radio del Sistema de Telefonía Móvil GSM: <http://ceres.ugr.es/~alumnos/alonso/p3.html>
- Luna, A.** (2014). *Implementación Práctica de la Etapa de Codificación de Canal de un Sistema de Comunicaciones. Congreso Internacional en Ingeniería Electrónica*. Obtenido de [http://depi.itchihuahua.edu.mx/display/memorias\\_electro/MemoriaElectro2014](http://depi.itchihuahua.edu.mx/display/memorias_electro/MemoriaElectro2014) ISSN 1405-2172
- Malys, S., & Slater, J.** (1994). Maintenance and enhancement of the World Geodetic System 1984. *Proceedings of ION GPS-94, 7th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, : 17–24. Salt Lake City, Utah.
- Merrigan, M., Swift, E., Wong, R., & JT, S.** (2002). A refinement to the World Geodetic System 1984. . *Proceedings of ION GPS 2002, 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*. Portland , Orego.
- Navstar.** (2015). *GPS Space Segment Navigation User Segment Interfaces, Interface Specification IS-GPS-200G*.
- Prasad, R.** (2005). “Applied Satellite Navigation Using GPS, GALILEO, and Augmentation systems. En *Artech House, Incorporated*. Estados Unidos.
- Prasad, R., & Ruggieri, M.** (2005). *Applied satellite navigation using GPS, Galileo, and augmentation systems*. Boston, London: Artech House.

- Prieto, J., & Velasco, J.** (2014). “Errores y precisión de las observaciones GNSS”. UPM. *Notas y gráficos de apoyo para a la asignatura Aplicación del GNSS en la geomática.* , 80. Madrid.
- Rastreos. (2017). *www.rastreos.com*. Obtenido de <http://rastreos.com/d/rastreo-satelital-tracking/index.php>
- Remondi, B.** (11–24 de August de 1991). NGS second generation ASCII and binary orbit formats and associated interpolation studies. *Paper presented at the XX General Assembly of the IUGG at Vienna.*
- Reyes, J.** (2012). Detección de señales del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) usando MATLAB. *Trabajo de Diplomado*. Santa Clara, Cuba.
- Ribadeneira, J.** (2015). Canal AWGN. Riobamba.
- Serna, M.** (2015). Simulación del Enlace Descendiente de Galileo. *Trabajo de Fin de Grado*. Lérganes, Madrid.
- Shimabuko , S.** (2010). *Implementación de un sistema de ubicación y discernimiento entre tecnología celular GSM y satelital para el seguimiento de unidades móviles*. Lima.
- Usha, G., Surya-Prabha, C., & Dr.V.B.S.Srilatha-Indira, D.** (2012). Simulation and Analysis of Binary Offset Carrier Modulation for Modernized Global Navigation Satellite Systems. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2298-2304 .
- www.GPS.gov*. (2018). Obtenido de <http://www.gps.gov/systems/gps/spanish.php>
- Yáñez, P.** (2009). Estudio de los Canales con Desvanecimiento sobre Redes Fijas y Móviles en Sistemas de Radio Comunicación. *Tesis Ingeniería ene Electrónica y telecomunicaciones. Escuela Politécnica Nacional*. Quito.
- Zamora, M.** (2009). *Conferencia 11: Precodificación y Ecuilización*. Obtenido de Unidad III: transmisión Digital de Señales Banda Base: <https://es.slideshare.net/nica2009/lecture-11-precodificacin-y-ecualizacin>