

## MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

# TRABAJO FIN DE MÁSTER

### ***IMPLEMENTACIÓN DE UN DEMOSTRADOR SOFTWARE DE LAS SEÑALES DEL SERVICIO GALILEO***

<b>Estudiante</b>	<i>Ganzabal Barinaga, Ixone</i>
<b>Director</b>	<i>de la Vega Moreno, David</i>
<b>Departamento</b>	<i>Sistemas de Telecomunicación</i>
<b>Curso académico</b>	<i>2021-2022</i>

*Bilbao, 12 de septiembre de 2022*

## Resumen

En los últimos años, las GNSS (*Global Navigation Satellite System*) han ido evolucionando y mejorando sus prestaciones. Este trabajo se centra en el sistema de geolocalización europeo, llamado Galileo y consiste en el diseño e implementación de un demostrador de las señales transmitidas por los satélites de ese sistema. En primer lugar, se describen las señales utilizadas en este sistema y se desarrolla un software en el que se simulan mediante el programa de Matlab. Para ello, se estudian los elementos relevantes para la generación de cada señal, como los códigos PRN, las modulaciones utilizadas, los esquemas de multiplexación y las subportadoras. Los resultados de las señales obtenidas se contrastan con la teoría proporcionada por la Agencia Espacial Europea. Las señales pueden ser manejadas por la interfaz gráfica del demostrador, en la que se han incorporado diferentes funcionalidades para que un usuario externo (alumno) pueda simular y representar las señales del sistema de navegación Galileo y aprender sobre ellas. Con el objetivo de que el manejo del demostrador sea sencillo para el alumno, se crea un manual de usuario donde se explica detalladamente cada paso a realizar en la interfaz.

Palabras clave: GNSS, señales Galileo, demostrador.

## Laburpena

Azken urteetan, GNSS (*Global Navigation Satellite System*)ren prestazioak garatzen eta hobetzen joan dira. Lan hau Europako geolokalizazio sistemaren sateliteek transmititzen dituzten seinaleen erakusle bat diseinatzean eta implementatzean datza, Galileo deritzona. Lehenik eta behin, sistema honetan erabiltzen diren seinaleak deskribatzen dira eta Matlab programaren bidez simulatzeko gai den software bat garatzen da. Horretarako, seinale bakoitza sortzeko elementu garrantzitsuenak aztertzen dira, hala nola PRN kodeak, modulazioak, multiplexazio-eskemak eta azpieramaileak. Lortzen diren seinaleak Europako Espazio Agentziak adierazitako datu teorikoekin alderatzen dira. Seinaleak erakuslearen interfaze grafikoaren bidez maneiatu daitezke, non hainbait funtzionalitate txertatzen diren, erabiltzaile batek (ikasleak) Galileoren seinaleak simulatu eta irudikatu ahal izateko, beraietaz ikasiz. Erakuslearen erabilera ikaslearentzat erraza izan dadin, erabiltzaile eskuliburu bat idatziko da, interfazean egin beharreko urrats bakoitza zehatz-mehatz azalduz.

Hitz gakoak: GNSS, Galileo seinaleak, erakuslea.

## Abstract

In recent years, GNSS (*Global Navigation Satellite System*) have been evolving and improving their performance. This work focuses on the European geolocation system, called Galileo, and consists of the design and implementation of a demonstrator of the signals transmitted by the satellites of this system. First of all, the signals used in this system are described and a software is developed to simulate them using the Matlab program. For this purpose, the relevant elements for the generation of each signal are studied, such as PRN codes, modulations, multiplexing schemes and subcarriers. The results of the obtained signals are contrasted with the theory provided by the European Space Agency. The signals can be handled by the graphic interface of the demonstrator, in which different functionalities have been incorporated so that an external user (student) can simulate and represent the signals of the Galileo navigation system and learn about them. In order to make the handling of the demonstrator easier for the student, a user manual is created where each step in the interface is explained in detail.

Keywords: GNSS, Galileo signals, demonstrator.

## Índice

1.	Introducción.....	14
2.	Contexto .....	16
3.	Objetivos y alcance del trabajo.....	17
4.	Análisis del estado del arte.....	18
4.1.	Introducción a los GNSS.....	18
4.2.	Arquitectura de los GNSS.....	18
4.2.1.	Segmento espacial .....	18
4.2.2.	Segmento de control.....	19
4.2.3.	Segmento de usuario .....	20
4.3.	Las señales GNSS .....	20
4.4.	Los sistemas GNSS .....	21
4.4.1.	GPS.....	21
4.4.2.	GLONASS .....	23
4.4.3.	BeiDou.....	25
4.4.4.	Galileo .....	27
5.	Señales Galileo.....	37
5.1.	Señal E1.....	37
5.2.	Señal E5.....	42
5.3.	Señal E6.....	49
6.	Metodología.....	52
6.1.	Planteamiento .....	52
6.2.	Organización del trabajo.....	52
6.3.	Herramientas utilizadas .....	52
7.	Análisis de alternativas.....	54
7.1.	Matlab.....	54
7.2.	IbaAnalyzer.....	54
7.3.	EDM Post Analyzer .....	55
7.4.	Eficiencia del análisis de alternativas .....	55
7.5.	Razonamiento de la elección .....	56
8.	Plan de trabajo.....	57

8.1.	Equipo de trabajo .....	57
8.2.	Paquetes de trabajo.....	57
8.3.	Diagrama de Gantt .....	60
9.	Análisis de riesgos .....	61
9.1.	Demoras (A) .....	61
9.2.	Configuración errónea del código (B).....	61
9.3.	Pérdida de datos (C) .....	62
9.4.	Resumen del análisis de riesgos .....	62
10.	Declaración de gastos.....	63
10.1.	Horas internas .....	63
10.2.	Amortizaciones .....	63
10.3.	Resumen económico.....	63
11.	Diseño de la herramienta software.....	64
11.1.	Funciones para la generación de la señal E1.....	64
11.1.1.	Funciones principales.....	64
11.1.2.	Funciones secundarias .....	65
11.2.	Funciones para la generación de la señal E5.....	66
11.2.1.	Funciones principales.....	66
11.2.2.	Funciones secundarias .....	68
11.3.	Funciones para la generación de la señal E6.....	69
11.3.1.	Funciones principales.....	69
11.3.2.	Funciones secundarias .....	70
11.4.	Diseño de la interfaz gráfica de usuario.....	72
11.5.	Introducción .....	72
11.6.	Inicio.....	72
11.7.	Propiedades de los componentes .....	74
11.8.	Funcionamiento de una aplicación GUI .....	75
11.9.	Manejo de datos entre los elementos de la aplicación y el archivo .m.....	76
11.10.	Sentencias get y set .....	76
12.	ANEXO I. Códigos del sistema Galileo .....	77
12.1.	Códigos primarios .....	77
12.1.1.	E1-B y E1-C.....	77
12.1.2.	E5a-I, E5a-Q, E5b-I, E5b-Q.....	77

12.1.3.	E6 .....	83
12.2.	Códigos secundarios .....	84
13.	ANEXO II. Requisitos de instalación y Manual de usuario .....	89
13.1.	Objetivo.....	89
13.2.	Requerimientos .....	89
13.3.	Manual de usuario.....	90
14.	Bibliografía.....	115

## Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Segmentos de la arquitectura de los GNSS [1].	20
Ilustración 2. Bandas de frecuencia de navegación GPS, Glonass, Galileo y Beidou [1].	21
Ilustración 3. Segmento de control GPS [3].	23
Ilustración 4. Constelación del sistema GLONASS [4].	24
Ilustración 5. Segmento de control GLONASS [4].	25
Ilustración 6. Constelación del sistema BeiDou [5].	26
Ilustración 7. Situación general del espectro GNSS (GPS-GLONASS-BEIDOU-GALILEO) [6].	27
Ilustración 8. Constelación del sistema Galileo [7].	28
Ilustración 9. Segmento Tierra del sistema Galileo [1].	29
Ilustración 10. Generación de los códigos PRN [9].	32
Ilustración 11. Esquema de codificación convolucional de los datos de navegación [9].	33
Ilustración 12. Estructura del mensaje F/NAV [6].	34
Ilustración 13. Estructura del mensaje I/NAV [6].	35
Ilustración 14. Estructura del mensaje G/NAV y C/NAV [6].	36
Ilustración 15. Esquema de modulación de la señal E1 [9].	38
Ilustración 16. Espectro de las señales Galileo en E1 [10].	41
Ilustración 17. Esquema de modulación de la señal E5 [9].	43
Ilustración 18. Diagrama del estado de las fases 8-PSK de la señal AltBOC E5 [9].	44
Ilustración 19. Un periodo de las funciones de las subportadoras AltBOC $s_{CE5P}$ y $s_{CE5S}$ [9].	46
Ilustración 20. Coeficientes de la subportadora AltBOC [8].	46
Ilustración 21. Espectro de las señales Galileo en E5 [10].	48
Ilustración 22. Espectro de las señales GPS y Galileo en E5 [10].	48
Ilustración 23. Esquema de multiplexación de la señal E6 [9].	49
Ilustración 24. Espectro de las señales Galileo en E6 [10].	51
Ilustración 25. Logo de Matlab	54
Ilustración 26. Logo de IbaAnalyzer	54
Ilustración 27. Logo de EDM Post Analyzer	55
Ilustración 28. Diagrama de Gantt del proyecto.	60
Ilustración 29. Ventana de inicio GUI.	72
Ilustración 30. Entorno de diseño de GUI.	73
Ilustración 31. Opciones del componente.	74
Ilustración 32. Entorno Property Inspector.	75
Ilustración 33. Función Callback del Pop-up menú 1.	75
Ilustración 34. Generador de código basado en LFSR para secuencias M truncadas y combinadas [9].	78
Ilustración 35. Representación de la toma de retroalimentación del registro de códigos (E5a-I) [9].	79
Ilustración 36. Representación de los valores de inicio para el registro base 2 (E5a-I) [9].	79
Ilustración 37. Inicio rápido de GUIDE.	90
Ilustración 38. Inicio de la Interfaz Gráfica de Usuario.	91

Ilustración 39. Representación gráfica del código PRN de la componente b de la señal E1 en dominio temporal. ....	92
Ilustración 40. Representación gráfica del código PRN de la componente b de la señal E1 en dominio frecuencial. ....	93
Ilustración 41. Representación gráfica del código PRN de la componente c de la señal E1 en dominio temporal. ....	94
Ilustración 42. Representación gráfica del código PRN de la componente c de la señal E1 en dominio frecuencial. ....	95
Ilustración 43. Representación gráfica del código PRN de las componentes b y c de la señal E1 en dominio temporal. ....	95
Ilustración 44. Representación gráfica del código PRN de las componentes b y c de la señal E1 en dominio frecuencial. ....	96
Ilustración 45. Representación gráfica de los datos del canal b de la señal E1 en dominio temporal. ....	97
Ilustración 46. Representación gráfica de los datos del canal b de la señal E1 en dominio frecuencial. ....	98
Ilustración 47. Representación gráfica de la subportadora b de la señal E1 en dominio temporal. ....	99
Ilustración 48. Representación gráfica de la subportadora c de la señal E1 en dominio temporal. ....	100
Ilustración 49. Representación gráfica del mensaje de error. ....	101
Ilustración 50. Representación gráfica de la señal resultante de la combinación de la secuencia CDMA y los datos. ....	102
Ilustración 51. Representación gráfica del mensaje de aviso. ....	103
Ilustración 52. Indicación de los símbolos para poder manejar las gráficas. ....	104
Ilustración 53. Utilización de la herramienta zoom en las gráficas (recuadro amarillo). ....	105
Ilustración 54. Zoom del recuadro amarillo seleccionado en la imagen anterior. ....	106
Ilustración 55. Representación gráfica del espectro de la señal E1. ....	107
Ilustración 56. Aparición del mensaje “cargando”. ....	108
Ilustración 57. Mensaje de aviso por no introducir las subportadoras de la señal E5. ....	109
Ilustración 58. Mensaje de error por no seleccionar los 4 canales de los códigos PRN de la señal E5. ....	110
Ilustración 59. Mensaje de error por no elegir dominio frecuencial. ....	111
Ilustración 60. Cargando la representación gráfica de la señal final E5. ....	112
Ilustración 61. Representación gráfica en 3D del espectro de la señal E5. ....	113
Ilustración 62. Representación gráfica del espectro de la señal E6. ....	114



## Lista de tablas

Tabla 1. Longitudes de los códigos para cada una de las componentes de cada señal [9].	31
Tabla 2. Asignación del código secundario [9].	33
Tabla 3. Asignación de mensajes y contenido de datos generales [9].	33
Tabla 4. Descripción del tipo de página F/NAV [6].	34
Tabla 5. Descripción de los parámetros mencionados de la señal [9].	38
Tabla 6. Características técnicas de la señal E1 [10].	40
Tabla 7. Características técnicas de la señal E5 [10].	47
Tabla 8. Características técnicas de la señal E6 [10].	50
Tabla 9. Representación de la puntuación de cada programa.	56
Tabla 10. Equipo de trabajo del proyecto.	57
Tabla 11. Paquete de trabajo 1. Tareas iniciales.	57
Tabla 12. Paquete de trabajo 2. Elaboración de flujos de programación para cada una de las señales Galileo.	58
Tabla 13. Paquete de trabajo 3. Programación e implementación de las funciones para formar cada una de las señales Galileo.	58
Tabla 14. Paquete de trabajo 4. Creación de la interfaz gráfica de usuario/demostrador.	59
Tabla 15. Paquete de trabajo 5. Gestión y documentación del proyecto.	59
Tabla 16. Tabla matriz probabilidad-impacto del proyecto.	62
Tabla 17. Tabla correspondiente a la partida de horas internas.	63
Tabla 18. Tabla correspondiente a las amortizaciones.	63
Tabla 19. Tabla resumen de la declaración de gastos.	63
Tabla 20. Parámetros relevantes de la señal Galileo E1.	65
Tabla 21. Parámetros relevantes de la señal Galileo E5.	68
Tabla 22. Parámetros relevantes de la señal Galileo E6.	70
Tabla 23. Las herramientas disponibles de la interfaz gráfica.	73
Tabla 24. Descripción de los elementos de la paleta de componentes.	74
Tabla 25. Especificaciones de los códigos primarios E5 [9].	78
Tabla 26. Valores de inicio del registro base 2 y primer chip de código para E5a-I [9].	80
Tabla 27. Valores de inicio del registro base 2 y primer chip de código para E5a-Q (1) [9].	81
Tabla 28. Valores de inicio del registro base 2 y primer chip de código para E5a-Q (2) [9].	81
Tabla 29. Valores de inicio del registro base 2 y primer chip de código para E5b-I (1) [9].	82
Tabla 30. Valores de inicio del registro base 2 y primer chip de código para E5b-I (2) [9].	82
Tabla 31. Valores de inicio del registro base 2 y primer chip de código para E5b-Q (1) [9].	83
Tabla 32. Valores de inicio del registro base 2 y primer chip de código para E5b-QI (2) [9].	83
Tabla 33. Generación de código de la señal E6 [11].	84
Tabla 34. Secuencias de código secundario parte 1.1 [9].	84
Tabla 35. Secuencias de código secundario parte 1.2 [9].	85
Tabla 36. Secuencias de código secundario parte 1.3 [9].	86
Tabla 37. Secuencias de código secundario parte 2.1 [9].	86
Tabla 38. Secuencias de código secundario parte 2.2 [9].	87
Tabla 39. Asignación de los códigos secundarios (1) [9].	87

Tabla 40. Asignación de los códigos secundarios (2) [9].....88

## Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Expresión de la señal E5 [9]. .....	45
Ecuación 2. Coeficientes de las subportadoras de la señal E5. ....	45

## Lista de diagramas

Diagrama 1. Diagrama de las funciones principales y parámetros que forman la señal E1. ....	66
Diagrama 2. Diagrama de las funciones principales y parámetros que forman la señal E5. ....	69
Diagrama 3. Diagrama de las funciones principales y parámetros que forman la señal E6. ....	71

## Lista de acrónimos

<b>ARNS</b>	<i>Aeronautical Radio Navigation Service</i> (Servicio de Radionavegación Aeronáutica)
<b>BOC</b>	<i>Binary Offset Carrier</i> (Portadora Binaria Offset)
<b>BPSK</b>	<i>Binary Phase-Shift Keying</i> (Modulación por desplazamiento en fase de 2 símbolos)
<b>CDMA</b>	<i>Code Division Multiple Access</i> (Acceso Múltiple por División de Código)
<b>CS</b>	<i>Commercial Service</i> (Servicio comercial)
<b>EGNOS</b>	<i>European Geostationary Navigation Overlay System</i> (Sistema de Aumentación basado en Satélites)
<b>ESA</b>	<i>European Space Agency</i> (Agencia Europea Espacial)
<b>EUSPA</b>	<i>European Union Agency for the Space Programme</i>
<b>FDMA</b>	<i>Frequency Division Multiple Access</i> (Acceso Múltiple por División de Frecuencia)
<b>GEO</b>	<i>Geostationary Equatorial Orbit</i> (Órbita Ecuatorial Geoestacionaria)
<b>GNSS</b>	<i>Global Navigation Satellite System</i> (Sistema mundial de navegación por satélite)
<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamiento Global)
<b>GUI</b>	<i>Graphical User Interface</i> (Interfaz gráfica de usuario)
<b>IGSO</b>	<i>Inclined Geosynchronous Orbit</i> (Órbita Geoestacionaria Inclinada)
<b>LFSR</b>	<i>Linear Feedback Shift Register</i> (Registro de desplazamiento con retroalimentación lineal)
<b>MEO</b>	<i>Medium Earth Orbit</i> (Órbita Terrestre Media)
<b>OS</b>	<i>Open Service</i> (Servicio abierto)
<b>PRN</b>	<i>PseudoRandom Noise</i> (Ruido pseudoaleatorio)
<b>PRS</b>	<i>Public Regulated Service</i> (Servicio Público Regulado)
<b>QPSK</b>	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i> (Modulación por desplazamiento cuadrafásico)
<b>RNSS</b>	<i>Radionavigation Satellite Service</i> (Servicio de Radionavegación por Satélite)

<b>SAR</b>	<i>Search and Rescue Service</i> (Servicio de Búsqueda y Rescate)
<b>SOL</b>	<i>Safety of Life</i> (Seguridad por la Vida)
<b>SVN</b>	<i>Space Vehicle Number</i> (Número del Vehículo Espacial)

## 1. Introducción

Los sistemas de posicionamiento por satélite han ido cobrando mayor importancia en las últimas décadas, convirtiéndose en una herramienta de uso diario. Están presentes tanto para saber cuánto tarda un vehículo en llegar de un punto a otro, como para saber dónde se encuentra el restaurante más cercano. Del mismo modo, estos sistemas tienen un papel elemental en multitud de sectores como por ejemplo en la industria marítima, terrestre o aérea, entre otros.

Las necesidades de la sociedad están llevando a las redes de comunicaciones hacia escenarios de grandes capacidades y baja latencia. En este marco de baja latencia, la sincronización es un punto fundamental y ahí es donde debe destacarse los GNSS (Global Navigation Satellite Systems), que proveen una referencia fiable de sincronización, en sistemas en los que la precisión en la obtención de los datos es clave.

Respecto a lo anteriormente mencionado, las potencias mundiales han intentado desarrollar un sistema propio de posicionamiento independiente al GPS (Global Positioning System) de los Estados Unidos y el GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) de Rusia, con el objetivo de asegurar la integridad en cualquier situación. Al inicio, se crearon sistemas que hacían uso de los segmentos espaciales de los sistemas pioneros, pero con el paso del tiempo se fueron desarrollando poco a poco sistemas propios con constelaciones de satélites que permitirían ofrecer una cobertura global, como es el caso de BeiDou (China) y Galileo (Europa), o regional, como IRNSS (India) y QZSS (Japón).

Este trabajo se centra en el sistema europeo Galileo, desarrollado por la Unión Europea mediante la Agencia Espacial Europea (ESA). El sistema completo de Galileo consiste en: un segmento espacial de 30 satélites MEO (Medium Earth Orbit) en 3 planos inclinados a 56º, un segmento terrestre de control para supervisar y controlar los satélites y para gestionar los datos específicos de la misión y un segmento terrestre de usuario con equipos capaces de recibir y utilizar las señales Galileo.

El programa Galileo se ha estructurado en dos fases: IOV (In-Orbit Validation) y FOC (Full Operational Capability). Por un lado, IOV consiste en las pruebas y en el funcionamiento de cuatro satélites y su correspondiente infraestructura terrestre. Los dos primeros fueron lanzados en octubre de 2011 y los dos siguientes en octubre de 2012. Por otro lado, FOC se basa en el despliegue del resto de la infraestructura espacial y terrestre. El sistema completo consta de 30 satélites, centros de control situados en Europa y una red de estaciones de sensores y de enlace ascendente instaladas en todo el mundo.

Es importante destacar que el sistema europeo de navegación global está llegando actualmente al FOC (Full Operational Capability), es decir, que su servicio está totalmente desplegado proporcionando un servicio completo. La Agencia Espacial Europea (ESA) y la Agencia de la Unión Europea para el Programa Espacial (EUSPA) han confirmado que Arianespace, la principal empresa de lanzamiento de satélites del mundo, lanzará ocho satélites Galileo adicionales para el sistema europeo de navegación por satélite. Los dos primeros satélites serán lanzados este año, lo que conducirá a la capacidad operativa total del servicio abierto Galileo. Después, tres lanzamientos consecutivos se realizarán en 2023, 2024 y

2025, con lo que se finalizará el lanzamiento de la primera generación de satélites Galileo y mediante la cual aumentará la resistencia de la constelación.

Asimismo, en lo que respecta a los servicios que se ofrecen, a diferencia de GPS y GLONASS, Galileo ha sido el desarrollo para uso civil, además de ser interoperable con los dos sistemas de posicionamiento anteriores. En conclusión, teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, todo indica que se trata de uno de los sistemas de geolocalización más completo y mejorado.

## 2. Contexto

La idea de la realización de este TFM surgió a través de la asignatura de Radar y Sistemas de Navegación por Satélite, una de las materias de 4º curso dentro de la especialidad de Sistemas de Telecomunicación, cuyo material ha servido de apoyo para llevar a cabo este trabajo. Esta asignatura se centra en las tecnologías que se utilizan en la determinación de la posición mediante propiedades por ondas de radio, por lo que se estudian métodos usados en los sistemas radar y de posicionamiento actuales basados en satélites. Se describen las arquitecturas y las señales utilizadas por los sistemas de navegación por satélites (GPS, Glonass, Galileo y Beidou), y además se realizan varias prácticas de laboratorio con ordenador para profundizar los conocimientos.

En este proyecto se realiza una demo de las diferentes señales que se transmiten en el sistema Galileo, para la asignatura mencionada anteriormente. Se ha llevado a cabo mediante la implementación de un programa basado en Matlab. La finalidad de la demo es que se pueda utilizar para que los alumnos puedan aprender la composición de dichas señales y analizar la configuración de dichas señales.

El programa se ha implementado para que sea robusto en su manejo. La interfaz es práctica y de fácil manejo para el alumnado, y está enfocada a describir las especificaciones y características de las componentes de cada señal, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.



### 3. Objetivos y alcance del trabajo

El objetivo principal de este trabajo es implementar un demostrador de las señales del sistema de navegación por satélite Galileo, que muestre de forma didáctica la formación y la configuración de cada señal.

Para la consecución de este objetivo principal, se definen una serie de objetivos parciales:

- Recopilación de información detallada de la configuración de cada una de las señales del sistema europeo Galileo.
- Implementación y validación de cada una de las señales que componen el sistema Galileo.
- Implementación de una interfaz gráfica de usuario, con el fin de poder simular y representar las señales mencionadas.
- Elaboración de un manual de usuario que incluya la información asociada a las señales y al manejo del demostrador.

## 4. Análisis del estado del arte

### 4.1. Introducción a los GNSS

Los Global Navigation Satellite Systems (GNSS) son sistemas formados por una constelación de satélites que orbitan la Tierra, que transmiten señales constantemente, permitiendo al usuario determinar su posición. El funcionamiento de dichos sistemas se basa en la resolución de un problema de geometría, partiendo de las distancias del usuario a un conjunto de cuatro satélites GNSS como mínimo, de los cuales se conocen sus coordenadas. Estas distancias y coordenadas se determinan mediante el receptor del usuario, utilizando las señales con los datos de navegación que envían los satélites.

Se debe destacar que el primer GNSS fue el GPS (Global Positioning System), inicialmente enfocado a uso militar, pero más adelante abierto para uso público. Con el tiempo, el número de aplicaciones basadas en GNSS para uso científico y económico ha ido creciendo, convirtiéndose de vital importancia para la economía global. Esto ha llevado a que muchos países hayan decidido desarrollar su propio sistema de navegación.

Los sistemas GNSS actuales más importantes son los siguientes:

- GPS. Es un sistema de radionavegación desarrollado por los Estados Unidos de América, que proporciona servicios de posicionamiento, navegación y tiempo a usuarios civiles en todo el mundo.
- GLONASS. Este sistema global de navegación por satélite fue desarrollado por la Unión Soviética.
- BeiDou. Es un sistema de navegación por satélite chino, con el objetivo de dar servicio a su país y a países vecinos.
- Galileo. Es el sistema europeo de posicionamiento por satélite, desarrollado por la Agencia Espacial Europea y la Unión Europea, con cobertura global.

### 4.2. Arquitectura de los GNSS

Los sistemas de navegación por satélite tienen una arquitectura funcional similar, para lograr una buena compatibilidad e interoperabilidad entre todos los sistemas GNSS. La estructura de estos sistemas está formada por los siguientes tres segmentos: segmento espacial, segmento de control y segmento de usuario [1].

#### 4.2.1. Segmento espacial

El segmento espacial está compuesto de la constelación de satélites que forman el sistema, distribuidos en diferentes órbitas. Los satélites portan una carga útil formada por el equipo encargado de recibir, amplificar y retransmitir las señales. Se podría mencionar que sus elementos más característicos son los grandes paneles solares, utilizados como fuente de

alimentación necesaria para la estabilidad, ajuste y control de los satélites en sus respectivas órbitas.

Para poder saber a qué satélite corresponde cada señal recibida por los usuarios, es necesario identificar a cada satélite y así obtener la pseudodistancia a cada uno de ellos. Las formas de identificarlos son las siguientes [2]:

- Mediante un código previamente asignado. En el caso del sistema GPS, los satélites se identifican con un código asignado por las Fuerzas Aéreas de Estados Unidos (SVN: Space Vehicle Number).
- Mediante un código pseudoaleatorio asignado (PRN, PseudoRandom Noise). Este código es necesario para identificar las señales de cada satélite. Tiene una forma espectral similar a la del ruido blanco por el ensanchamiento del espectro producido por las técnicas CDMA de espectro expandido y, además, presenta una autocorrelación alta, pero la correlación cruzada es baja debido a las propiedades de correlación cruzada de los códigos que se utilizan.
- Mediante la posición en el plano orbital. Cada plano se identifica con una letra y cada satélite con un número dentro de cada plano.

Los primeros lanzamientos de satélites se llevaron a cabo en 1978, con el bloque I de experimentación de los satélites GPS. Desde entonces se han ido lanzando distintos bloques de satélites, mejorando las prestaciones de operación y la esperanza de vida de cada uno. Desde hace años, los sistemas GPS y GLONASS están considerados con capacidad total de operación. Además, hay otros dos sistemas globales, el sistema chino BeiDou y el sistema europeo Galileo que, aunque iniciaron su camino varias décadas después respecto a sus predecesores, se encuentran en la actualidad prestando servicios con señales de nueva generación.

#### 4.2.2. Segmento de control

El segmento de control está formado por el conjunto de estaciones terrestres que recogen los datos de los satélites, los monitorizan y actualizan, enviando si es preciso correcciones a los satélites. La sincronización es un elemento clave de los sistemas de navegación por satélite, por lo que las estaciones de control están equipadas con relojes atómicos de cesio para monitorizar y gestionar el sincronismo de los satélites. Este segmento ha sido implantado de una manera diferente para cada sistema, pero funcionalmente constaría a su vez de las siguientes tres partes [2]:

- Estaciones de monitorización. Estas estaciones están repartidas por todo el mundo y están equipadas de relojes atómicos y receptores. Así, reciben datos de los satélites y los envían a la estación maestra para que se procesen.
- Estación maestra. Esta estación procesa la información y monitoriza el estado de los satélites, generando mensajes de navegación y corrigiendo el sincronismo con los satélites para mantener la precisión.

- Estaciones de transmisión. Transmiten datos a los satélites, como las efemérides de cada satélite (coordenadas de la posición del satélite en azimut y elevación) y la corrección de los relojes atómicos de los satélites.

### 4.2.3. Segmento de usuario

Este segmento está formado por el receptor GNSS capaz de recibir señales GNSS, determinar pseudodistancias y resolver las ecuaciones de navegación para obtener las coordenadas de posicionamiento y proporcionar un tiempo preciso. Para ello, el dispositivo debe contar con unos elementos básicos que puedan recibir señales procedentes de los satélites. Estos elementos básicos son los siguientes: una antena con preamplificador, una sección de recepción de señales de radiofrecuencia en las bandas asignadas a este servicio, un microprocesador, un oscilador de precisión intermedia, una fuente de alimentación, memoria para almacenamiento de datos y una interfaz de usuario [2].

A continuación, en la Ilustración 1 se muestra los tres segmentos que componen la estructura de los GNSS.

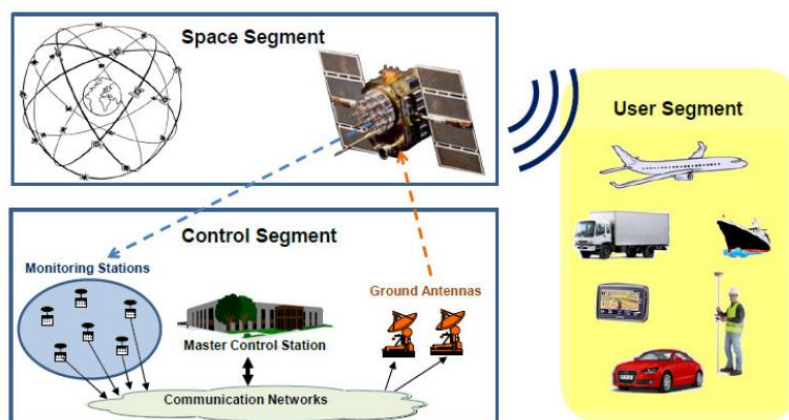


Ilustración 1. Segmentos de la arquitectura de los GNSS [1].

### 4.3. Las señales GNSS

Los satélites GNSS transmiten señales de navegación en dos o más frecuencias en la banda L. Dichas señales están compuestas de códigos pseudoaleatorios y datos de navegación para permitir a los usuarios calcular el tiempo de transmisión desde el satélite al receptor, sabiendo de antemano las coordenadas del satélite. La señal se compone de los siguientes elementos [1]:

- Portadora. Es una señal sinusoidal de radiofrecuencia generada con el propósito de soportar otra señal que contiene una cierta información.

- Códigos pseudoaleatorios (códigos PRN). Se trata de secuencias de ceros y unos que permiten la identificación de los satélites; mediante las técnicas CDMA de espectro expandido se pueden enviar diferentes códigos en la misma frecuencia, gracias al ensanchamiento del espectro.
- Datos de navegación. Se trata de un mensaje que proporciona información sobre las efemérides de los satélites, el estado de salud del satélite y los datos del reloj atómico.

Como se ha mencionado anteriormente, la banda que utilizan los GNSS es la banda L, dentro del rango de frecuencias desde 1 GHz a 2 GHz. Esto es asignado por la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones), agencia de las Naciones Unidas que coordina el uso mundial compartido del espectro de radio.

En la Ilustración 2 se muestran las bandas de frecuencia asignadas a los sistemas GNSS. Se observan los dos servicios que se utilizan en estas bandas: ARNS (Aeronautical Radio Navigation Service) y RNSS (Radionavigation Satellite Service).

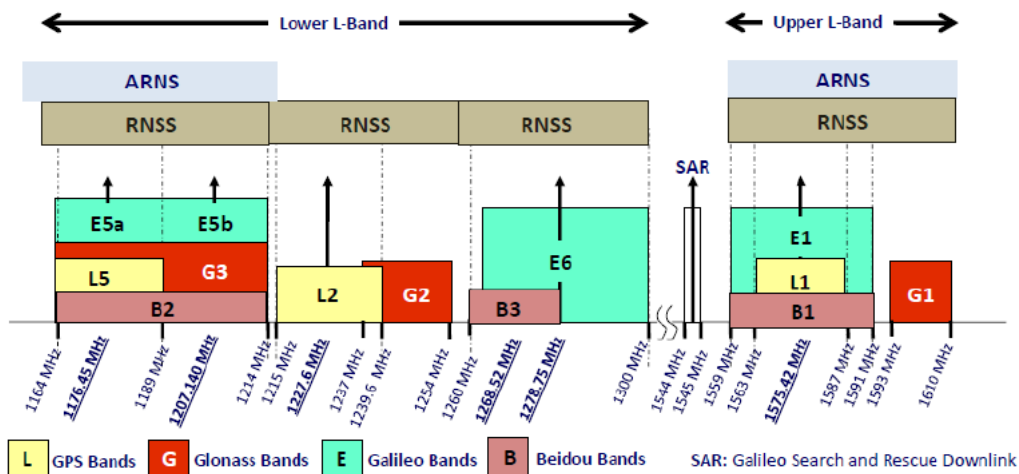


Ilustración 2. Bandas de frecuencia de navegación GPS, Glonass, Galileo y Beidou [1].

#### 4.4. Los sistemas GNSS

A continuación, se describe en detalle la situación de los sistemas GNSS más importantes operando actualmente, así como la estructura de los satélites que los componen, las señales que transmiten y las frecuencias que usan.

##### 4.4.1. GPS

El sistema GPS es el sistema de navegación por excelencia, ya que se trata del primero de los actuales sistemas a nivel global, además de ser el más utilizado en el mundo. Fue desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos y nació como sistema militar, pero en 1983 se abrió para uso público.

La constelación GPS logró la FOC (Full Operational Capability) en marzo de 1994, ya que 24 satélites del Bloque II/IIA se encontraban ya operativos en sus respectivas órbitas.

Este sistema está formado por una constelación de satélites que envían señales para poder identificar al transmisor y un mensaje de navegación con los datos de efemérides. La señal formada por los datos y el código PRN se modula por varias portadoras a frecuencias en el rango UHF (bandas L1, L2 y L5). Las señales GPS se transmiten en dos bandas de frecuencias en la banda L, llamadas L1, L2 y L5. Cuyas frecuencias derivan de la frecuencia fundamental  $f_0 = 10.23 \text{ MHz}$  [1].

$$L1 = 154 \times 10.23 \text{ MHz} = 1575.42 \text{ MHz}$$

$$L2 = 120 \times 10.23 \text{ MHz} = 1227.6 \text{ MHz}$$

$$L3 = 115 \times 10.23 \text{ MHz} = 1176.45 \text{ MHz}$$

Se utilizan las tres siguientes bandas de frecuencia [1]:

- Banda L1 (frecuencia central 1575.42 MHz). Utilizada para transmitir los códigos C/A y P. Más adelante se empezó a utilizar para enviar el código militar M y recientemente se ha incluido la nueva señal civil L1C con el nuevo bloque de satélites.
- Banda L2 (frecuencia central 1227.60 MHz). Originalmente utilizada para transmitir el código de precisión P(Y). Con la nueva generación de satélites se empezó a transmitir la señal militar M y la nueva señal civil L2C.
- Banda L5 (frecuencia 1176.45 MHz). Sólo la nueva generación de satélites emite esta frecuencia. Se transmite la señal L5 en cuadratura y en fase, lo que es lo mismo, la señal de datos L5 y la señal de control L5. También se transmiten dos códigos: el código en fase I5 y el código en cuadratura Q5.

Con el paso de los años, se han ido implementado varias generaciones de satélites GPS donde los satélites se han ido modernizando y mejorando. Cabe mencionar también que hay dos versiones de GPS, cada una de ellas asociadas a sus correspondientes generaciones de satélites. De la primera generación GPS, el conjunto de señales se consideran señales “legacy”, que modulan un mensaje de navegación legacy (LNAV) que son: el código de Coarse/Acquisition (C/A) y el código de Precisión (P). En la segunda versión GPS, se añaden nuevas señales con las ya existentes en la primera versión. Estas señales son transmitidas solo por los satélites nuevos y envían nuevos mensajes de navegación MNAV para uso militar (señal M) y CNAV para uso civil (señal L2C, señal L5 y señal L1C) [1].

Las señales de uso civil son públicas y están especificadas en los documentos de Interface Specification (IS); en cambio, las señales de uso militar tienen codificaciones cifradas que solo pueden ser usadas con autorización.

La constelación GPS está formada por satélites de órbitas medias, es decir, MEO (Medium Earth Orbit), los cuales orbitan a 20.200 km de la superficie de la Tierra en 6 planos orbitales. Esta constelación consta de como mínimo 24 satélites y cada uno de ellos da la vuelta a la

Tierra dos veces al día. Como anteriormente se ha mencionado, estos satélites se han ido lanzando en distintos bloques a lo largo de los años [3].

El actual Segmento de Control de Operacional (OCS) de GPS está formado por una estación de control maestra (MSC), otra alternativa, 16 estaciones de monitorización y 11 estaciones de transmisión de datos. En la Ilustración 3 se puede observar el segmento de control del sistema GPS.

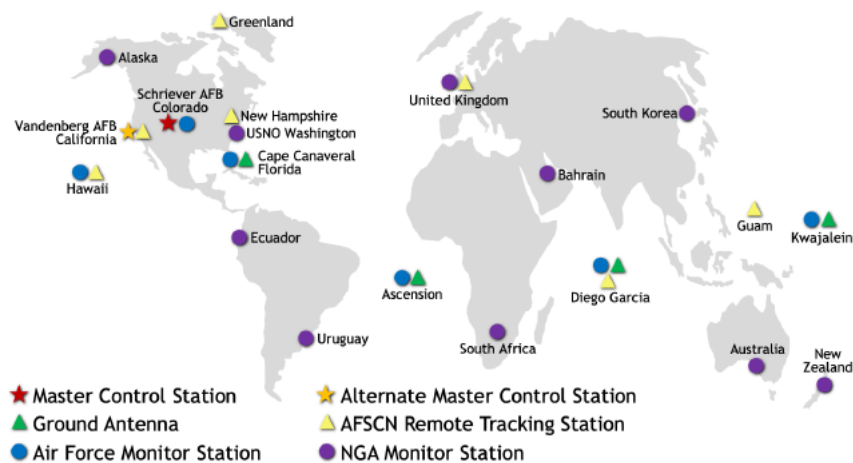


Ilustración 3. Segmento de control GPS [3].

Respecto al segmento de usuario GPS consta de receptores y antenas que son capaces de recibir las señales en banda L provenientes de los satélites. Para obtener las pseudodistancias, demodulan la señal y así son capaces de resolver las ecuaciones de navegación y determinar las coordenadas y velocidad del receptor.

#### 4.4.2. GLONASS

El sistema GLONASS es un GNSS desarrollado por la Unión Soviética y se trata de un homólogo al GPS de Estados Unidos y al Galileo europeo.

Las pruebas de este sistema comenzaron en 1982, lanzando los satélites Kosmos-1413, Kosmos-1414 y Kosmos-1415. Después de la disolución de la Unión Soviética, la Federación Rusa se encargó de gestionar su desarrollo, consiguiendo que el sistema fuera completamente operativo llegando a su punto culminante en 1995 con 24 satélites en órbita. A principios de la década del 2000, Rusia impulsa su inversión en este sistema, llevando al servicio de posicionamiento ruso a ser capaz de dar servicio tanto a Rusia como a áreas del extranjero sin ninguna limitación [1].

Se utilizan las bandas L1, L2 y L3, que son contiguas a las bandas L1, L2 y L5 de GPS. Además, cabe destacar que, a diferencia del sistema americano, se utiliza la multiplexación en frecuencia (FDMA) en vez de multiplexación por código (CDMA) para el acceso al medio de los satélites.

GLONASS opera en las siguientes bandas de frecuencia [1]:

- Banda L1 (frecuencia central 1602MHz). Se nombra G1 para diferenciarla de L1 de GPS y transmite la señal civil C/A y la señal militar P.
- Banda L2 (frecuencia central 1246MHz). Se nombra G2 y también transmite la señal civil C/A y la señal militar P.
- Banda L3 (frecuencia central 1207MHz). Es compartida en la frecuencia de la señal E5b de Galileo y BeiDou. Es la banda más moderna.

Este sistema está compuesto de una constelación de 24 satélites MEO distribuidos en 3 planos orbitales con 8 satélites en cada uno a una distancia de la superficie de 19140 km. Con 18 de los 24 satélites ya es suficiente para dar un servicio en todo el territorio ruso. El lanzamiento de los satélites GLONASS se ha distribuido en diferentes bloques a lo largo de los años, como el sistema homólogo GPS [1].



Ilustración 4. Constelación del sistema GLONASS [4].

Respecto al segmento de control cabe mencionar que al igual que en GPS, es el encargado de monitorizar el estado de los satélites, determinar las efemérides y la señal del reloj. Consta de un Centro de Control del Sistema (SCC), cinco centros de Telemetría, Seguimiento y Control (TT&C), dos centrales de Control de Reloj (CC-M), tres centrales de Transmisión de Datos (ULS), dos estaciones de Laser Ranging (SLR) y una red de 4 estaciones de Monitorización y Medidas (MS). Estas estaciones se muestran en la siguiente Ilustración 5 [1].



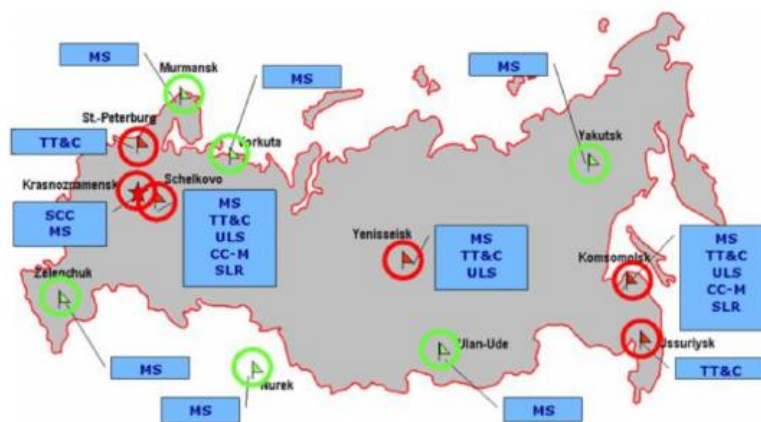


Ilustración 5. Segmento de control GLONASS [4].

Como en los demás sistemas GNSS, un receptor GLONASS trata de un dispositivo capaz de determinar la posición del usuario y su velocidad, mediante el procesamiento de las señales recibidas de los satélites en las bandas L1 y L2, calculando el tiempo de propagación desde el satélite hasta el usuario.

Cabe destacar que este sistema tiene una mayor desventaja en el aspecto civil frente al sistema estadounidense, ya que su uso no está tan extendido en aplicaciones comerciales. Con el objetivo de mejorar esta situación, Rusia está promoviendo GLONASS haciendo su uso más activo en sectores como en el de la aviación o en el transporte.

#### 4.4.3. BeiDou

El sistema global de navegación por satélite BeiDou es el sistema desarrollado por la República Popular de China durante las últimas décadas. En 1989, se lanzaron dos satélites geoestacionarios mediante el proyecto llamado Twin Stars con el que se realizaron las primeras pruebas de posicionamiento chino y bautizando el proyecto denominado BeiDou. Con esto, China empezó a desarrollar un sistema GNSS que compitiera de igual forma con el GPS. A partir de ese momento, China ha llevado a cabo un gran despliegue espacial que se ha dividido en tres fases diferentes: BeiDou-1, BeiDou-2 y BeiDou-3.

En 2001 se empezó a dar servicio con la primera fase, pero únicamente cubriendo el territorio chino. Este sistema marcó diferencia ya que se diferenció del resto de sistemas GNSS al no solo basarse en la recepción de la señal de los satélites en los terminales, sino también en la capacidad del terminal de poder responder al segmento de control mediante los satélites, llamando a esta funcionalidad: mensajería corta. A partir de 2011 con la segunda fase, se empezó a dar servicio con el modelo típico GNSS de recepción pasiva en los terminales, debido a que los terminales de usuario con capacidad de realizar transmisiones espaciales suponían un gran coste y tamaño de los terminales, por lo que se abortó esa idea. Con el paso del tiempo, se consigue dar cobertura en la región Asia-Pacífico y se propone a afrontar el servicio

a nivel global, mediante la tercera fase compuesta de satélites con nuevas señales de navegación. Este sistema está formado por una constelación de 35 satélites, de los cuales 5 son satélites GEO (Geostationary Earth Orbit) y 30 satélites en órbita no geostacionaria. Los satélites no estacionarios tratan de 3 satélites IGSO (Inclined Geosynchronous Orbit) y 27 satélites MEO que orbitan en tres planos orbitales con una inclinación de  $55^\circ$  con respecto al ecuador [1] [5].



Ilustración 6. Constelación del sistema BeiDou [5].

Respecto al segmento de control cabe destacar que está compuesto de los siguientes tres tipos de estaciones terrestres: 30 Monitor Stations (MS), encargadas de la monitorización a tiempo real de la información enviada por los satélites; dos Time Synchronization/Upload Stations (TS/US), responsables de enviar a los satélites los mensajes de navegación actualizados y medir el desvío temporal en la referencia horaria de los satélites; y una Master Control Station (MSC), recoge la información del resto de estaciones para poder calcular nuevos mensajes de navegación y monitorizan anomalías [1].

En la actualidad, BeiDou opera sobre las siguientes bandas de frecuencia:

- Banda B1. Centrada en 1561.098MHz, pero está siendo migrada a 1575.42MHz, compartiendo banda con GPS y Galileo.
- Banda B2. Centrada en 1207.14MHz, siendo compartida con la banda G3 de GLONASS y E5b de Galileo.
- Banda B3. Centrada en 1268.52MHz, compartiendo con la banda E6 de Galileo.
- Banda BS. Centrada en 2492.928MHz, utilizada para la realización de pruebas y no se encuentran señales que trabajen en esta banda.

En la siguiente Ilustración 7 se puede ver como se encuentra la situación general actual del espectro GNSS.

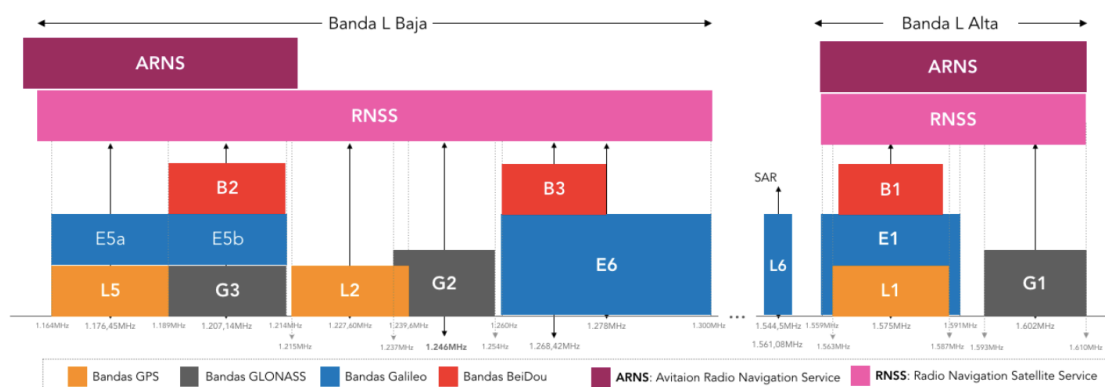


Ilustración 7. Situación general del espectro GNSS (GPS-GLONASS-BEIDOU-GALILEO) [6].

#### 4.4.4. Galileo

El sistema Galileo es el sistema global de navegación por satélite desarrollado por la Unión Europea y la Agencia Espacial Europea. Se trata de un sistema de uso civil y es interoperable con sus predecesores: GPS y GLONASS.

Cabe destacar que inicialmente se empezó el desarrollo de EGNOS en colaboración con Eurocontrol. Se trataba de un sistema de aumentación equivalente al WAAS americano, con el objetivo de mejorar la precisión de los demás sistemas de navegación como GPS o GLONASS. A continuación, se inició otra etapa que se centraba en desarrollar un sistema propio de geolocalización de uso civil gestionado solo por organismos europeos y que consiguiera mejorar las entonces actuales prestaciones de los demás sistemas. Este sistema adquirió el nombre Galileo [1].

De mismo modo que el resto de los sistemas, este sistema también se divide en tres segmentos diferentes: el segmento espacial, basado en los satélites que forman la constelación, el segmento de control, que monitoriza y controla el sistema en el plano terrestre y el segmento de usuario. Se profundizará más en este sistema, ya que el proyecto, como se ha mencionado anteriormente, se centra en las señales utilizadas en este sistema de navegación.

##### 4.4.4.1. Segmento espacial

Este sistema de posicionamiento tuvo una primera fase donde se lanzaron unos satélites experimentales llamados GIOVE (Galileo In-Orbit Validation Element) para asegurar las frecuencias que se le asignaron a Galileo, así como parametrizar las órbitas y otros elementos espaciales. Después de estos experimentos, se lanzaron 4 satélites IOV (In Orbit Validation) para poder validar las señales. Cabe destacar que tres de estos satélites siguen en funcionamiento y forman parte de la constelación operativa con los satélites FOC (Final

Operation Capability, consiste en el despliegue de la infraestructura espacial y terrestre restante).

La constelación de Galileo consta de 30 satélites (6 de repuesto), situados en tres planos orbitales MEO a 23222 km de la superficie terrestre y con una inclinación de los planos de 56° respecto al ecuador. Esta inclinación de las órbitas se decidió para garantizar una buena cobertura de las latitudes polares, ya que con el sistema GPS no están bien atendidas. Los satélites están distribuidos uniformemente en cada plano y tardan aproximadamente 14 horas y 22 minutos en orbitar la Tierra [1].

En la Ilustración 8 que se muestra a continuación, se observa el segmento espacial de Galileo explicado anteriormente.



*Ilustración 8. Constelación del sistema Galileo [7].*

#### **4.4.4.2. Segmento de control**

El segmento de control de tierra de Galileo se encarga de controlar toda la constelación de satélites y de las instalaciones del sistema. Está compuesto por dos elementos principales: el segmento de control de tierra y el segmento de misión de tierra [1].

El segmento de Control de Tierra (GCS, Ground Control Segment): es el responsable de la monitorización de los satélites, de la gestión de la constelación, de corregir las órbitas en base a la gestión que se realiza en el GMS y de controlar el mantenimiento y las tareas de recuperación de los satélites ante fallos. Para llevar a cabo estas funciones se hace uso de cinco estaciones de Telemetría Seguimiento y Control (TT&C), que usan antenas de frecuencia en banda S para proporcionar un intercambio seguro de datos entre los satélites y los centros de Control de Tierra.

El segmento de Misión de Tierra (GMS, Ground Mission Segment), es el responsable en proporcionar un rendimiento de navegación de alta velocidad. Genera los mensajes de navegación, monitoriza las señales provenientes de los satélites, determina las órbitas de cada

satélite y la sincronización entre ellos. Para llevar a cabo estas funciones se incluye la red GSS (Galileo Sensor Station) y ULS. La red GSS recopila los datos para ser procesados por el Centro de Control para determinar la integridad de los mensajes. Cada una de las estaciones sensoras (GSS) está formada por tres canales de recepción que son los siguientes: canal para la determinación de la integridad, canal para la determinación de los datos de órbita y canal de redundancia. La información recopilada por estas estaciones es gestionada en los Centros de Control Terrestre (GCC) y es enviada de vuelta a los satélites gracias a las estaciones de Enlace Ascendente, ULS. Estas últimas están equipadas de antenas parabólicas de banda C (5 GHz) y cabe destacar que los enlaces ascendentes están diseñados para garantizar suministro de navegación e integridad a todos los usuarios del sistema.

Las dos GCC son el núcleo del segmento terrestre. Su ubicación se encuentra en el Centro de Control de Oberpfaffenhofen, Alemania, y en el Centro de Control de Fucino, Italia. A continuación, se mencionan las tareas más importantes de estas estaciones: generación de los mensajes de navegación, control de los satélites, monitorización del rendimiento, predicción del rendimiento, determinación y sincronización de la órbita, control de los elementos del segmento tierra en tiempo real y provisión de una referencia horaria coordinada para el sistema.

Se puede observar en la Ilustración 9 los dos elementos que forman el segmento de control Galileo: segmento de control Tierra y segmento de misión Tierra.

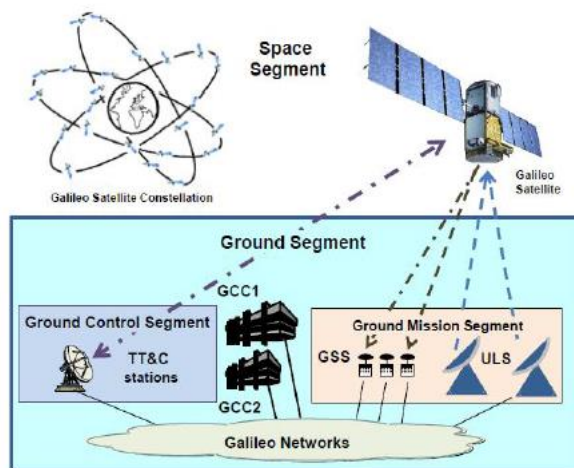


Ilustración 9. Segmento Tierra del sistema Galileo [1].

#### 4.4.4.3. Segmento de usuario

El segmento de usuario de Galileo está formado por los receptores que reciben las señales Galileo, determinando las pseudodistancias y calculando las propias coordenadas, la velocidad y la referencia horaria [8].

Este sistema ofrece a los usuarios los siguientes servicios listados:

- **Open Service (OS):** servicio que permite a cualquier usuario de manera gratuita la obtención de las señales del sistema Galileo, proporcionando la información de posición, velocidad y sincronización. Los receptores recibirán tanto las señales de Galileo como de GPS, lo que mejora significativamente la prestación de servicios en áreas urbanas. Está principalmente enfocado al posicionamiento de vehículos y a la telefonía móvil.
- **High Accuracy Service (HAS):** anteriormente conocido como Commercial Service (CS). Se trata de un servicio que complementa el sistema operativo al proporcionar una señal de navegación adicional y servicios de valor añadido en una banda de frecuencias diferente. La señal HAS se puede cifrar para controlar el acceso a los servicios HAS de Galileo.
- **Support to Search and Rescue Service (SAR):** servicio que ofrece recepción casi a tiempo real de mensajes de socorro con una localización precisa de alertas. Los satélites Galileo son capaces de captar señales de balizas de emergencia transportadas en barcos, aviones o personas y, en última instancia, enviarlas de vuelta a los centros nacionales de rescate. A partir de esto, un centro de rescate puede conocer la ubicación precisa de un accidente. Al menos un satélite Galileo estará a la vista de cualquier punto de la Tierra, por lo que es posible una alerta de socorro casi en tiempo real. En algunos casos, la retroalimentación podría enviarse de vuelta a una baliza, algo que solo es posible gracias a Galileo.
- **Public Regulated Service (PRS):** servicio controlado para aplicaciones gubernamentales que requieran un nivel alto de protección. Se trata de un servicio con buena robustez para proteger contra interferencias intencionadas y está restringido a usuarios autorizados por el gobierno, para aplicaciones sensibles que requieren un alto nivel de continuidad del servicio.

#### 4.4.4.4. Estructura de la señal

El sistema Galileo emite las señales en diferentes bandas mediante la técnica de multiplexación al medio CDMA. La estructura de estas señales se compone de los siguientes elementos:

- **Bandas de frecuencia:** se modula la información a la frecuencia de la portadora y se trata de frecuencias con comportamiento robusto frente a las pérdidas ionosféricas. El sistema Galileo emite sus señales en las bandas E1, E5a, E5b, E6 y L6.
- **Códigos PRN:** estos códigos hacen identificar de que satélite viene la información recibida. Existen tres tipos de códigos: los de acceso de abierto (públicos y sin encriptar), encriptados comerciales y los encriptados gubernamentales.
- **Mensajes de navegación:** es la información del satélite que recibe el receptor donde se da a conocer las efemérides y datos orbitales de dicho satélite. Los satélites Galileo emiten los datos en los siguientes cuatro mensajes de navegación: mensaje de navegación de acceso libre (F/NAV), comercial (C/NAV) y de integridad (I/NAV).

## Bandas de frecuencia

Como se ha mencionado anteriormente, cada servicio que ofrece Galileo se proporciona mediante el uso de señales que se emiten en diferentes bandas de frecuencia.

- Banda E1: transmite los servicios Open Service, High Accuracy Service y Public Regulated Service. Está centrada en la frecuencia de 1575.42MHz.
- Banda E5: transmite los servicios Open Service y High Accuracy Service.
  - Banda E5a: está centrada en 1176.45MHz.
  - Banda E5b: está centrada en 1207.14MHz.
- Banda L6: transmite el servicio Support to Search and Rescue Service. Está centrada en 1544.50MHz.
- Banda E6: transmite los servicios Public Regulated Service y High Accuracy Service. Está centrada en la frecuencia 1278.75MHz.

## Códigos pseudoaleatorios (PRN)

Los códigos PRN se generan mediante los llamados códigos primarios y códigos secundarios usando una construcción de códigos escalonados. Las longitudes de los códigos a utilizarse para cada componente de la señal se indican en la siguiente Tabla 1.

Signal component	Tiered Code Period (ms)	Code Length (chips)	
		Primary	Secondary
E5a-I	20	10230	20
E5a-Q	100	10230	100
E5b-I	4	10230	4
E5b-Q	100	10230	100
E1-B	4	4092	N/A
E1-C	100	4092	25

Tabla 1. Longitudes de los códigos para cada una de las componentes de cada señal [9].

Como se ha mencionado, los códigos PRN se generan a partir de las construcciones de códigos escalonados, donde una secuencia de código secundario es utilizada para modificar las repeticiones sucesivas de un código primario de longitud  $N$  y velocidad de chip  $f_c$ . El código secundario en este caso tendrá una longitud  $N_s$  y una velocidad de chip  $f_{cs} = f_c/N$ . La duración de  $N$  chips se denomina “primary code poch”, como se puede ver en la figura siguiente. Se observa que los chips del código secundario están secuencialmente fusionados con el código primario, es decir, un chip del código secundario por cada periodo del código primario. En la Ilustración 10 se observa el esquema de la generación de los códigos pseudoaleatorios.



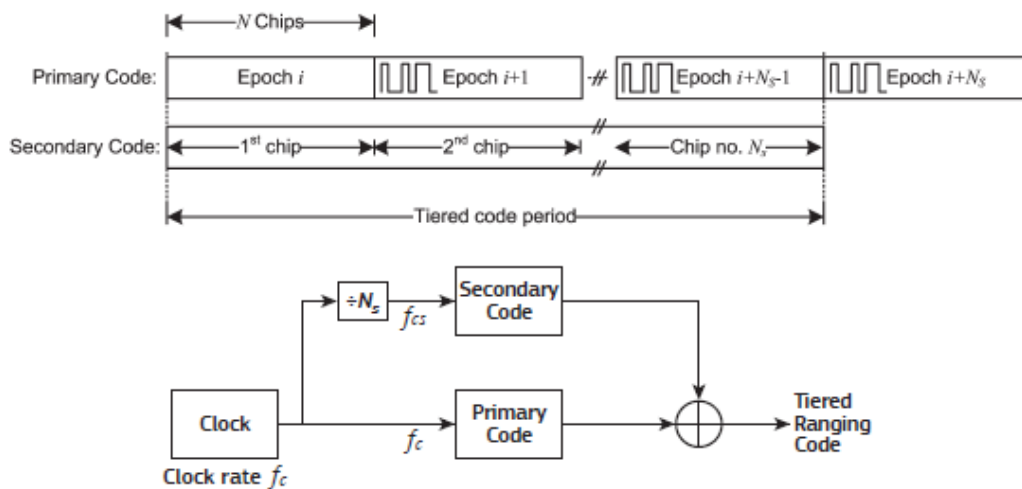


Ilustración 10. Generación de los códigos PRN [9].

### Códigos primarios

Los códigos primarios pueden ser:

- Secuencias de pseudoruido basadas en registros de desplazamiento de retroalimentación lineal.
- Secuencias de pseudoruido optimizadas.

Los códigos optimizados se almacenan en la memoria, por lo que se les llama “códigos de memoria”. En cambio, los códigos basados en registros de desplazamiento se generan como combinaciones de dos secuencias M, truncadas a una longitud adecuada. Estos códigos pueden generarse con pares de LFSR (Linear Feedback Shift Registers) y también pueden almacenarse en memoria.

Los códigos primarios de E1-B y E1-C son secuencias de códigos de memoria pseudoaleatorios de acuerdo a la representación hexadecimal que figura en el ANEXO I.12.1.1.

Los códigos primarios de las componentes E5a-I, E5a-Q, E5b-I y E5b-Q son generados mediante LFSR. En el ANEXO I.12.1.2 se explica la generación de dichos códigos.

### Códigos secundarios

Los códigos secundarios son secuencias fijas definidas en hexadecimal (ANEXO I.12.2). Para los códigos secundarios cuya longitud no es divisible entre 4 (caso del CS25<sub>1</sub>), el último símbolo hexadecimal se obtiene rellenando el último grupo de chips de código con ceros al final, y así, alcanzar una longitud de 4 símbolos binarios.

En el ANEXO I.12.2 se encuentran las tablas que proporcionan los identificadores de código junto con las longitudes, el número de símbolos hexadecimales y el número de ceros rellenos.

En la Tabla 2, se puede observar la asignación de los códigos secundarios de cada una las componentes de las señales Galileo.



Componente	Asignación de código secundario
E5a-I	CS20 <sub>1</sub>
E5a-Q	CS100 <sub>1-50</sub>
E5b-I	CS4 <sub>1</sub>
E5b-Q	CS100 <sub>51-100</sub>
E6-B	N/A
E6-C	CS100 <sub>1-50</sub>
E1-B	N/A
E1-C	CS25 <sub>1</sub>

Tabla 2. Asignación del código secundario [9].

### Mensajes de navegación

Los canales Galileo transmiten diferentes tipos de mensajes según el servicio que se ofrezca, como se puede ver en la Tabla 3 siguiente. Los mensajes de tipo F/NAV corresponden al servicio Open Service y los mensajes de tipo I/NAV corresponden a Open Service y High Accuracy Service.

Tipo	Servicio	Componente
F/NAV	OS	E5a-I
I/NAV	OS/HAS	E5b-I, E1B
C/NAV	HAS	E6B

Tabla 3. Asignación de mensajes y contenido de datos generales [9].

Los datos de los mensajes de navegación se estructuran en tramas, subtramas y páginas. La página es la estructura en la que se construye todo el mensaje y tiene un campo llamado "tipo" donde se indica el tipo de dato que contiene.

El sistema Galileo ha introducido una protección de errores FEC en todos los tipos de mensajes de navegación mediante una codificación convolucional entrelazada. Se trata de una codificación FEC de tasa de código 1/2 y sabiendo que la velocidad de símbolo del mensaje de navegación es de 250 símbolos por segundo, la tasa efectiva de datos será menor a 125 símbolos por segundo, ya que se ha de añadir algunos bits de sincronización además de la protección de errores. En realidad, la tasa efectiva se queda en 114 símbolos por segundo.

En la siguiente Ilustración 11 se puede ver el esquema de codificación convolucional, el cual podrá ser decodificado mediante un decodificador Viterbi estándar.

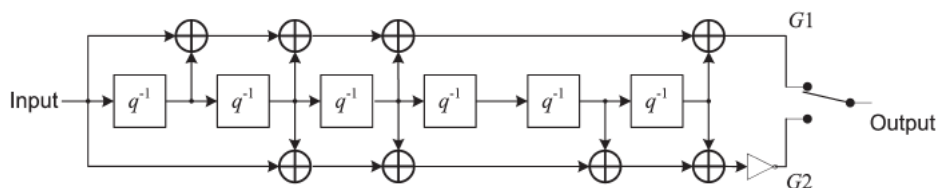


Ilustración 11. Esquema de codificación convolucional de los datos de navegación [9].

## F/NAV

Como se ha mencionado anteriormente, el tipo de mensaje F/NAV corresponde al servicio Open Service en la componente de la señal E5a-I. Su estructura del mensaje se muestra en la siguiente Ilustración 12, donde también se indica la duración de cada elemento.

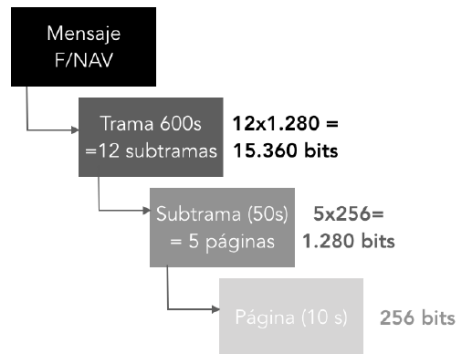


Ilustración 12. Estructura del mensaje F/NAV [6].

Como se observa en la Ilustración 12, cada trama del mensaje tiene una duración de 600 segundos y está formada por 12 subtramas. Cada una de las subtramas dura 50 segundos y está compuesta por 5 páginas y cada una de las páginas tiene una duración de 10 segundos. Las páginas están formadas de los siguientes tres campos:

- Patrón de sincronización: su longitud es de 12 bits y es 101101110000. El objetivo de este campo es permitir la sincronización del receptor con el límite de la página.
- Página F/NAV: es la parte codificada por el FEC. Contiene los siguientes tres elementos:
  - Tipo de página: son 6 bits y su objetivo es identificar el tipo de información, que se muestra en la siguiente Tabla 4.

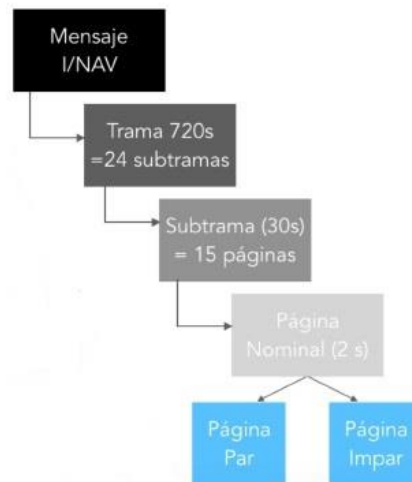
Tipo de página	Contenido de la página
1	Corrección de reloj, SVID, corrección ionosférica, SISA (Signal in Space Accuray), estado de salud de la señal, estado de validez de datos y retardo de grupo.
2	Efemérides (1/3) y GST (Galileo System Time).
3	Efemérides (2/3) y GST (Galileo System Time).
4	Efemérides (3/3), conversión GST-UTC, conversión GST-GPS y TOW.
5-6	Almanaque para el satélite k y para el k+n (parte n).

Tabla 4. Descripción del tipo de página F/NAV [6].

- Datos de navegación: son 208 bits y contiene los datos correspondientes al tipo de página que sea.
- CRC: tiene 24 bits y se compone de datos de verificación por redundancia.
- Cola: su longitud es de 6 bits y se utiliza para la decodificación FEC de cada una de las páginas.

## I/NAV

El mensaje I/NAV es usado tanto para Open Service como para Commercial Service en las componentes de la señal E5b-I y E1B. La estructura del mensaje es representada en la Ilustración 13, donde se indica la duración de cada uno de los elementos.



*Ilustración 13. Estructura del mensaje I/NAV [6].*

Como se observa en la imagen, cada trama dura 720 segundos y se compone de 24 subtramas. Cada una de las subtramas tiene una duración de 30 segundos y está compuesta de 15 páginas nominales, que se trata de un conjunto de dos páginas, una par y otra impar. En la señal E5b-I la página impar es la que primero se transmite, en cambio, en la señal E1B, la par. Esta configuración tiene como ventaja permitir que un receptor que decodifica el mensaje I/NAV en ambas frecuencias puede decodificar las mismas páginas en la mitad de tiempo que un receptor de una frecuencia.

Cada página contiene los siguientes elementos:

- Patrón de sincronización: tiene longitud de 10 bits y es 0101100000.
- Página I/NAV: tiene 120 bits y depende si es segundo par o impar se transmite un mensaje distinto, como se puede ver en la imagen siguiente.
- Cola: contiene 6 bits y se utiliza para la decodificación FEC de cada una de las páginas.

## C/NAV y G/NAV

Se trata de los tipos de mensajes de navegación de carácter gubernamental (G/NAV) y comercial (C/NAV). Como se trata de servicios dirigidos a usuarios autorizados, sus códigos están cifrados. La estructura del mensaje es representada en la siguiente Ilustración 14, donde se indica la duración de cada uno de los elementos.

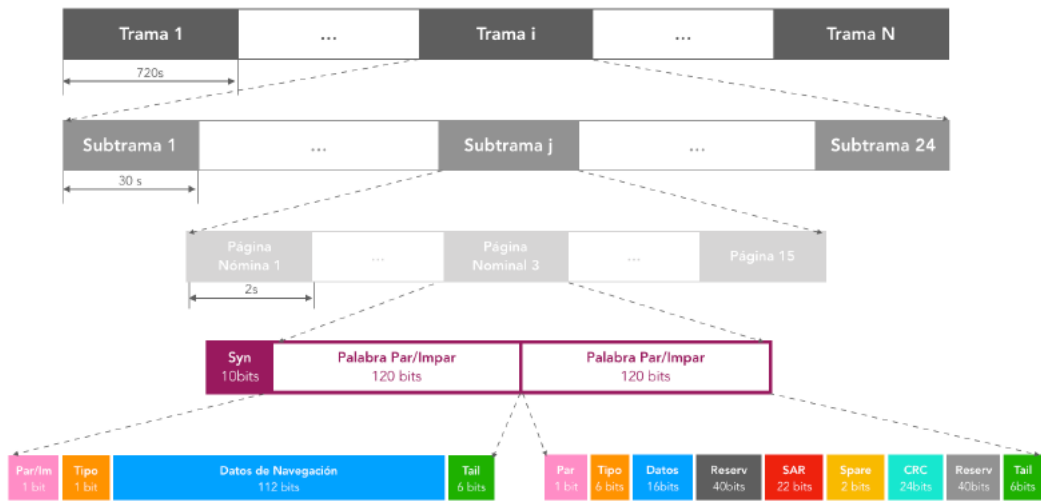


Ilustración 14. Estructura del mensaje G/NAV y C/NAV [6].

## 5. Señales Galileo

### 5.1. Señal E1

La señal E1 transmite los servicios OS, CS y PRS mediante sus diferentes componentes. Está compuesta por la componente E1B, que se trata de la componente de información, y de la componente E1C, que es la componente de control y son transmitidas en la banda de frecuencias 1559-1610 MHz. No están encriptadas y por ello son accesibles para todos los usuarios, donde E1B contiene el mensaje de navegación, mientras E1C es un canal de control. Existe la componente E1A, pero está cifrada y solo es accesible para los usuarios autorizados, ya que ofrece el servicio de PRS.

Esta señal se modula con una implementación de la modulación BOC (Binary Offset Carrier). Se trata de una modulación de subportadora cuadrada, donde una señal (código PRN) se combina con una subportadora de frecuencia  $f_{sc}$  igual o mayor que la velocidad chip y que es el signo de una señal sinusoidal o coseno. Con esta modulación, el espectro de la señal queda dividido en dos partes, una a la parte derecha de la frecuencia portadora y otra a la izquierda.

La idea principal de la modulación BOC es reducir la interferencia de la modulación BPSK, que tienen forma de función sinc en el espectro. Por lo tanto, las señales moduladas en BPSK (GPS) tienen la mayor parte de su energía espectral concentrada alrededor de la frecuencia de carga, mientras que las señales moduladas por BOC (sistema Galileo) tienen baja energía alrededor de la frecuencia de la portadora y dos lóbulos espectrales principales más alejados de la portadora (espectro dividido).

Una forma de onda BOC se denota de la forma BOC (m,n), donde:

$$m = f_{sc}/f_{ref} \quad f_{sc}: \text{frecuencia de la subportadora} \quad f_{ref}: 1023 \text{ Mcps}$$
$$n = f_c/f_{ref} \quad f_c: \text{frecuencia del chip}$$

La implementación de la modulación BOC con la que la señal E1 es modulada se llama CBOC (6,1,1/11) o BOC compuesta con  $f_0 = 1.023$  MHz y ratio de chip igual a 1.023 MChip/s. La información en la componente E1b se transmite a una velocidad de 250 símbolos/s. La señal se modula con dos subportadoras diferentes:  $sc\_a = f_0$  y  $sc\_b = 6f_0$ . Ambas componentes E1b (información) y E1c (control) son moduladas en la misma componente de la subportadora, por lo tanto, la potencia usada para su transmisión se divide al 50%.

CBOC es una combinación lineal entre las subportadoras moduladas con BOC (1,1) y BOC (6,1). Estas subportadoras, siendo la suma de dos subportadoras cuadradas, tendrán 4 niveles diferentes.

A continuación, en la Ilustración 15 se observa el esquema de modulación de la señal E1.

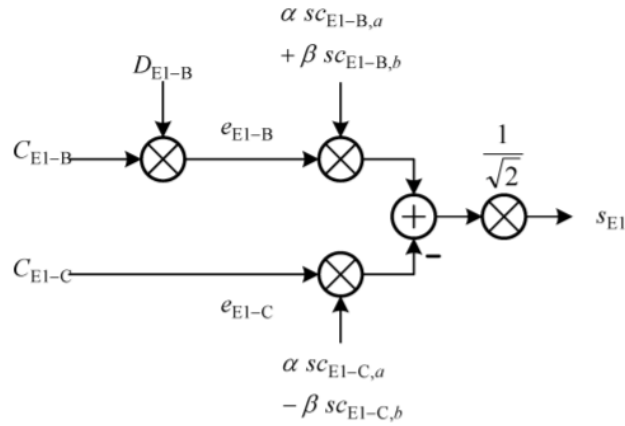


Ilustración 15. Esquema de modulación de la señal E1 [9].

Las componentes de la señal E1 son creadas de la siguiente manera:

- $e_{E1-B}$  : a partir de los datos de navegación I/NAV,  $D_{E1-B}$  y del código pseudoaleatorio  $C_{E1-B}$ , modulado con las subportadoras  $s_{C_{E1-B,a}}$  y  $s_{C_{E1-B,b}}$ .
- $e_{E1-C}$  : a partir del código pseudoaleatorio  $C_{E1-C}$  incluyendo su código secundario, modulado con las subportadoras  $s_{C_{E1-C,a}}$  y  $s_{C_{E1-C,b}}$ .

En las siguientes fórmulas se definen las componentes de la señal binaria.

$$e_{E1-B}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} [c_{E1-B,|i|L_{E1-B}} D_{E1-B,|i|DC_{E1-B}} \text{rect}_{T_{c,E1-B}}(t - iT_{c,E1-B})]$$

$$e_{E1-C}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} [c_{E1-C,|i|L_{E1-C}} \text{rect}_{T_{c,E1-C}}(t - iT_{c,E1-C})]$$

Los códigos pseudoaleatorios se crean de diferente manera para cada una de estas componentes. Por un lado, los códigos primarios para E1-B y E1-C son secuencias de códigos de memoria pseudoaleatorios y hay 50 códigos primarios para cada una de las componentes, pero solo se usa uno de esos 50 códigos. Por otro lado, los códigos secundarios son solo introducidos en la señal E1-C, que se trata de unas secuencias fijas en hexadecimal. Con esto, el código pseudoaleatorio para el canal C es una combinación entre el código primario y el código secundario. En el ANEXO I. Códigos del sistema Galileo se explica con mayor detalle.

En la siguiente Tabla 5 se explica cada uno de los parámetros mencionados.

Parámetro	Explicación
$s_x(t)$	Señal de banda base normalizada (potencia media unitaria) = $s_{x-1}(t) + j s_{x-0}(t)$
$c_{X-Y,k}$	El chip k del código pseudoaleatorio
$d_{X-Y,k}$	El símbolo k del mensaje de navegación
$DC_{X-Y}$	= $T_{D,X-Y} / T_{C,X-Y}$ - número de chips código por símbolo
$[i]_{DC}$	Parte entera de $i/DC$
$[i]_L$	L módulo i
$\text{rect}_T(t)$	Función rectángulo que es igual a 1 para $0 \leq t < T$ e igual a 0 en el resto

Tabla 5. Descripción de los parámetros mencionados de la señal [9].

Cabe mencionar que la tasa de bits de los códigos pseudoaleatorios  $C_{E1-B}$  y  $C_{E1-C}$  es de 1023 MChips por segundo. Tras la codificación del canal, el flujo de datos del mensaje de navegación se transmite con la siguiente velocidad de símbolo, dependiendo del canal:

- Tasa de símbolo de  $D_{E1-B} = 250$  símbolos/s
- Tasa de símbolo de  $D_{E1-C} =$  no hay datos, ya que se trata de la componente piloto.

Como se puede observar en la imagen de arriba, las componentes binarias de la señal  $e_{E1-B}$  y  $e_{E1-C}$  son moduladas mediante CBOC(6,1,1/11) a la frecuencia  $f_0$ . La señal se modula con dos subportadoras,  $sc_a$  a la frecuencia  $f_0 = 1023\text{MHz}$  y la otra  $sc_b$  a la frecuencia  $6f_0 = 6138\text{MHz}$ . Con esto se ve que las modulaciones BOC(1,1) y BOC(6,1) se combinan linealmente.

Por lo tanto, la señal compuesta E1-B/C se genera según la ecuación que se encuentra a continuación, con los componentes binarios de la señal,  $e_{E1-B}(t)$  y  $e_{E1-C}(t)$ . Cabe destacar que ambos componentes (el de datos y el de control), se modulan sobre el mismo componente de la portadora, con una potencia compartida del 50% ( $1/\sqrt{2}$ ).

$$s_{E1}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( e_{E1-B}(t) \left( \alpha sc_{E1-B,a}(t) + \beta sc_{E1-B,b}(t) \right) - e_{E1-C}(t) \left( \alpha sc_{E1-C,a}(t) - \beta sc_{E1-C,b}(t) \right) \right) \quad \text{Eq. 11}$$

with  $sc_x(t) = \text{sgn}(\sin(2\pi R_{s,x}t))$

Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  tienen los siguientes valores:

$$\alpha = \sqrt{10/11}$$

$\beta = \sqrt{1/11}$  -> Componente BOC(6,1) tiene que representar 1/11 de la potencia total del canal

Estos parámetros son elegidos para que la potencia de la combinación de las componentes de la subportadora,  $sc_{E1-B,b}$  y  $sc_{E1-C,b}$  se corresponda con la onceava parte de la potencia total de  $e_{E1-B}$  y  $e_{E1-C}$ . Nótese que el signo de la subportadora BOC(6,1) es diferente para el canal de información que para el canal de control. Esto es necesario para evitar los términos cruzados que aparecen de la correlación cruzada entre las subportadoras BOC(1,1) y BOC(6,1).

A continuación, en la Tabla 6 se recogen las características técnicas resumidas que se han explicado de la señal E1.

<b>GNSS System</b>	Galileo	Galileo	Galileo
<b>Service Name</b>	E1 OS		PRS
<b>Centre Frequency</b>	1575.42 MHz		
<b>Frequency Band</b>	E1		
<b>Access Technique</b>	CDMA		
<b>Spreading modulation</b>	CBOC(6,1,1/11)		$\text{BOC}_{\cos}(15,2.5)$
<b>Sub-carrier frequency</b>	1.023 MHz and 6.138 MHz (Two sub-carriers)		15.345 MHz
<b>Code frequency</b>	1.023 MHz		2.5575 MHz
<b>Signal Component</b>	Data	Pilot	Data
<b>Primary PRN Code length</b>	4092		N/A
<b>Code Family</b>	Random Codes		N/A
<b>Secondary PRN Code length</b>	-	25	N/A
<b>Data rate</b>	250 sps	-	N/A
<b>Minimum Received Power [dBW]</b>	-157		N/A
<b>Elevation</b>	10°		N/A

Tabla 6. Características técnicas de la señal E1 [10].

Para finalizar, observamos la siguiente figura Ilustración 16 donde se representa el espectro de las señales Galileo en E1.



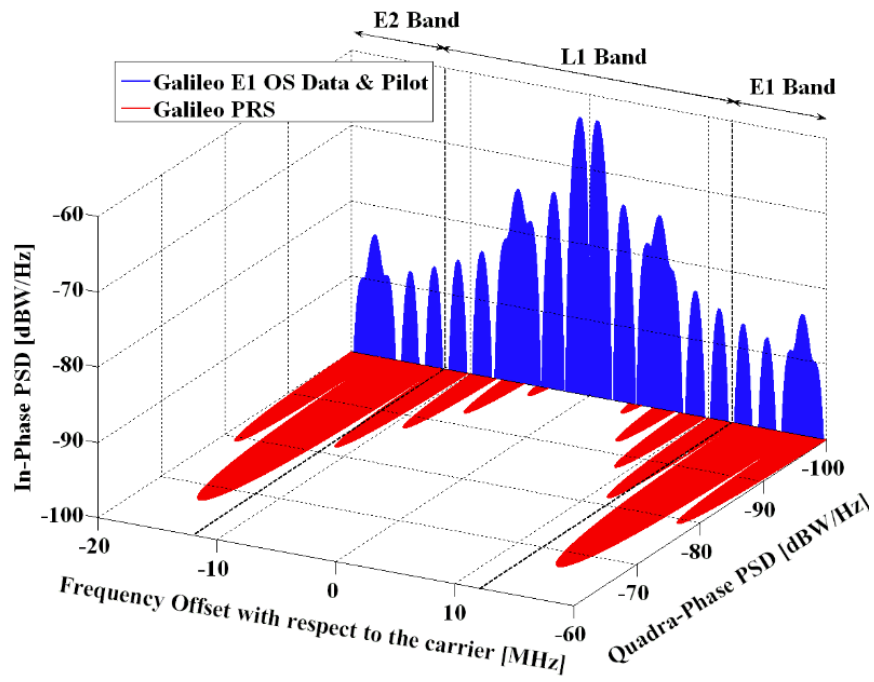


Ilustración 16. Espectro de las señales Galileo en E1 [10].

## 5.2. Señal E5

La señal E5 de Galileo transmite los servicios OS, CS y SOL. Está formada por las componentes de señal E5a y E5b y es transmitida en la banda de frecuencias 1164-1215 MHz.

Esta señal se genera con la suma de cuatro componentes que están moduladas mediante AltBOC (Alternative BOC modulation). Con esta modulación, las componentes de la señal se pueden filtrar en el procesamiento de señal del receptor para que seleccionemos dos de ellas, una en fase y otra en cuadratura.

Las cuatro componentes de la señal E5 son creadas de la siguiente manera:

- $e_{E5a-I}$ : a partir de los datos de navegación F/NAV,  $D_{E5a-I}$ , modulado con el código pseudoaleatorio  $C_{E5a-I}$ .
- $e_{E5a-Q}$ : a partir del código pseudoaleatorio  $C_{E5a-Q}$ .
- $e_{E5b-I}$ : a partir de los datos de navegación I/NAV,  $D_{E5b-I}$ , modulado con el código pseudoaleatorio  $C_{E5b-I}$ .
- $e_{E5b-Q}$ : a partir del código pseudoaleatorio  $C_{E5b-Q}$ .

En las siguientes fórmulas se definen las componentes de la señal binaria.

$$\begin{aligned}
 e_{E5aI}(t) &= \sum_{i=-300}^{\infty} C_{E5aI}[i]_{L_{E5aI}} D_{E5aI}[i]_{DC_{E5aI}} \prod (R_{c_{E5aI}} t - i) \\
 e_{E5aQ}(t) &= \sum_{i=-300}^{\infty} C_{E5aQ}[i]_{L_{E5aQ}} \prod (R_{c_{E5aQ}} t - i) \\
 e_{E5bI}(t) &= \sum_{i=-300}^{\infty} C_{E5bI}[i]_{L_{E5bI}} D_{E5bI}[i]_{DC_{E5bI}} \prod (R_{c_{E5bI}} t - i) \\
 e_{E5bQ}(t) &= \sum_{i=-300}^{\infty} C_{E5bQ}[i]_{L_{E5bQ}} \prod (R_{c_{E5bQ}} t - i)
 \end{aligned}$$

Siendo:

- $L_{E5xx}$  la longitud de código de la componente E5xx.
- $R_{c_{E5xx}}$  el ratio de chips por segundo.
- $DC_{E5xx}$  el ratio de bits por símbolo de la componente E5xx.  $DC_{E5xx} = R_{c_{E5xx}} / R_{s_{E5xx}}$
- $[i]_{DC_{E5xx}}$  una operación que da el entero más próximo de  $i/DC_{E5xx}$ .

Los canales de información DE5a-I y DE5b-I se transmiten con una velocidad de 50 y 250 símbolos por segundo, respectivamente y el ratio de chip de los códigos PRN es  $10f_0$  (10.230 MChip/s). Las componentes CE5a-I, CE5a-Q, CE5b-I, CE5a-Q son códigos PRN descritos y CE5a-I y CE5b-I modulan las componentes DE5a-I y DE5b-I, respectivamente.

A continuación, en la Ilustración 17 se observa el esquema de modulación de la señal E5.

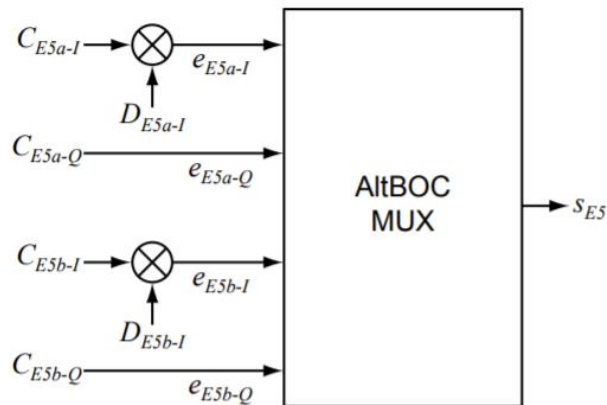


Ilustración 17. Esquema de modulación de la señal E5 [9].

Esta señal es modulada y multiplexada con AltBOC (15,10). Este esquema de modulación da lugar a una señal modulada con una amplitud constante que también puede ser considerada como una técnica de multiplexación. Debido a que la modulación AltBOC separa el espectro en dos lóbulos principales, la banda E5 puede ser usada como dos bandas laterales separadas, definidas como banda E5A y E5B, en las que se transmiten 4 canales diferentes: E5a-I, E5a-Q, E5b-I, E5b-Q. Cada uno de estos canales de información y de control son las componentes en fase y en cuadratura.

A continuación, se explica con más detalle la modulación utilizada en esta señal Galileo. AltBOC es una técnica de modulación y multiplexación que se utiliza en la señal E5 de Galileo. Sin embargo, para la modulación de la señal E5 se usa una versión ligeramente diferente y más compleja de esta técnica.

Como se mostró anteriormente, la modulación BOC estándar es la modulación de una subportadora cuadrada que consiste en multiplicar una señal  $s(t)$  con una subportadora cuadrada de frecuencia la cual divide el espectro de la señal en dos partes, localizadas en el lado izquierdo y derecho de la frecuencia portadora.

La idea de la modulación AltBOC es realizar el mismo proceso, pero multiplicando la señal en banda base por una subportadora rectangular “compleja”:

$$r_{cs}(t) = \text{sign}(\cos(2\pi f_s t)) + j \cdot \text{sign}(\text{sen}(2\pi f_s t)) = c_r(t) + j \cdot s_r(t)$$

De esta forma, el espectro de la señal no se divide, sino que se desplaza a frecuencias más altas. Una señal  $s(t)$  diferente, que contenga un código PRN y unos datos de navegación distintos, puede ser usado para desplazar a un rango de frecuencias más alto o más bajo. Por este principio los lóbulos laterales de una señal BOC pueden llevar una información diferente.

De acuerdo a la ecuación anterior, la señal AltBOC puede ser expresada de la siguiente forma:

$$s(t) = C_a(t) \cdot r_{cs}(t) + C_b(t) \cdot r_{\check{s}}(t)$$

donde,

- $C_a(t)$  es un código de ruido pseudoaleatorio (PNR) para el canal a.
- $C_b(t)$  es un código de ruido pseudoaleatorio (PNR) para el canal b.
- $r_{cs}$  es la subportadora compleja rectangular definida arriba.

Como las secuencias  $C_a(t)$  y  $C_b(t)$  pueden asumir solo valores de  $\pm 1$ , se puede reescribir la señal  $s(t)$  de la siguiente manera:

$$s(t) = 2 \cdot e^{jk\frac{\pi}{2}} \quad k \in \{1,2,3,4\}$$

Con esto, se puede comprobar que la amplitud del canal en fase y en cuadratura es igual.

Las limitaciones de este concepto se basan en el hecho de que cada señal en cada banda lateral debe ser una BPSK y no una QPSK, para poder incluir canales de control, debido a que alguna parte de la señal AltBOC tiene potencia nula. Por lo tanto, para poder añadir los canales de control, la expresión  $s(t)$  se dividirá en sus componentes en fase (canales de datos) y en cuadratura (canales de control):

$$s(t) = C_a(t) \cdot r_{cs}(t) + C_b(t) \cdot r'_{cs}(t) + j [C_a'(t) \cdot r_{cs}(t) + C_b'(t) \cdot r'_{cs}(t)]$$

donde,

- $C_a(t)$  son los datos combinados con el código PNR para el canal a.
- $C_b(t)$  son los datos combinados con el código PNR para el canal b.
- $r_{cs}$  es la subportadora compleja rectangular.
- $C_a'(t)$  es el código PRN para el canal a.
- $C_b'(t)$  es el código PRN para el canal a.

Esta señal puede tomar 8 valores diferentes, así que desarrollando la expresión anterior, se puede reescribir con la siguiente fórmula que expresa el estado de las fases 8-PSK de la señal AltBOC en la Ilustración 18:

$$s_{E5}(t) = \exp\left(j\frac{\pi}{4}k(t)\right) \quad \text{with} \quad k(t) \in \{1,2,3,4,5,6,7,8\},$$

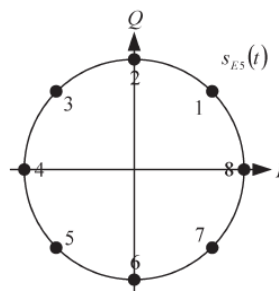


Ilustración 18. Diagrama del estado de las fases 8-PSK de la señal AltBOC E5 [9].

Se puede comprobar que la modulación resultante no será una modulación de amplitud constante. Por este motivo, la modulación AltBOC usada por Galileo ha sido modificada introduciendo dos subportadoras diferentes y los productos de las componentes con el objetivo de obtener una señal que corresponda a una constelación 8-PSK (amplitud constante) lo cual es muy importante para satélites con amplificadores de alta potencia.

Como se puede observar en la Ilustración 18, la expresión de la ecuación total a la salida de la modulación y multiplexación se expresa de la siguiente forma en Ecuación 1:

$$\begin{aligned}
 s_{E5}(t) = & \frac{1}{2\sqrt{2}}(e_{E5aI}(t) + je_{E5aQ}(t))[sc_{E5S}(t) - jsc_{E5S}(t - T_{SE5}/4)] + \\
 & + \frac{1}{2\sqrt{2}}(e_{E5bI}(t) + je_{E5bQ}(t))[sc_{E5S}(t) + jsc_{E5S}(t - T_{SE5}/4)] + \\
 & + \frac{1}{2\sqrt{2}}(\bar{e}_{E5aI}(t) + j\bar{e}_{E5aQ}(t))[sc_{E5P}(t) - jsc_{E5P}(t - T_{SE5}/4)] + \\
 & + \frac{1}{2\sqrt{2}}(\bar{e}_{E5bI}(t) + j\bar{e}_{E5bQ}(t))[sc_{E5P}(t) + jsc_{E5P}(t - T_{SE5}/4)]
 \end{aligned}$$

*Ecuación 1. Expresión de la señal E5 [9].*

Las señales de la fórmula anterior  $\bar{e}_{E5aI}(t)$ ,  $\bar{e}_{E5bI}(t)$ ,  $\bar{e}_{E5aQ}(t)$  y  $\bar{e}_{E5bQ}(t)$  son productos de intermodulación que se expresan de la siguiente forma matemática:

$$\begin{aligned}
 \bar{e}_{E5aI}(t) &= e_{E5aQ}(t)e_{E5bI}(t)e_{E5bQ}(t) \\
 \bar{e}_{E5bI}(t) &= e_{E5bQ}(t)e_{E5aI}(t)e_{E5aQ}(t) \\
 \bar{e}_{E5aQ}(t) &= e_{E5aI}(t)e_{E5bI}(t)e_{E5bQ}(t) \\
 \bar{e}_{E5bQ}(t) &= e_{E5bI}(t)e_{E5aI}(t)e_{E5aQ}(t)
 \end{aligned}$$

Para entender mejor estas señales hay que mencionar las subportadoras AltBOC  $sc_{E5S}(t)$  y  $sc_{E5P}(t)$  y sus características. Los coeficientes que definen estas subportadoras se muestran en la Ecuación 2.

$$\begin{aligned}
 sc_{E5-S}(t) &= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} AS_{|i|_8} \text{rect}_{\frac{T_{s,E5}}{8}} \left( t - \frac{iT_{s,E5}}{8} \right) \\
 sc_{E5-P}(t) &= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} AP_{|i|_8} \text{rect}_{\frac{T_{s,E5}}{8}} \left( t - \frac{iT_{s,E5}}{8} \right)
 \end{aligned}$$

*Ecuación 2. Coeficientes de las subportadoras de la señal E5.*

En la Ilustración 19 se observan las funciones correspondientes a las subportadoras AltBOC  $sc_{E5P}$  y  $sc_{E5S}$

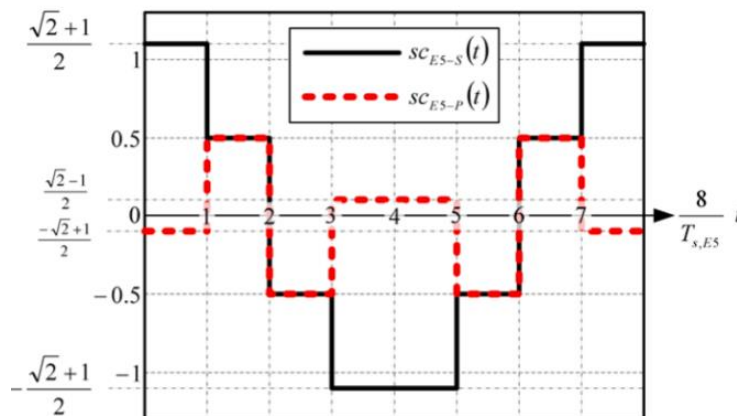


Ilustración 19. Un periodo de las funciones de las subportadoras AltBOC  $sc_{ESP}$  y  $sc_{ESS}$  [9].

Los parámetros  $sc_{ESP}$  y  $sc_{ESS}$  representan los cuatro posibles valores que se obtienen de las funciones que definen las subportadoras y se definen en la siguiente Ilustración 20:

i	0	1	2	3	4	5	6	7
<b>ASi</b>	$\frac{\sqrt{(2)+1}}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{(2)+1}}{2}$	$-\frac{\sqrt{(2)+1}}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{(2)+1}}{2}$
<b>APi</b>	$-\frac{\sqrt{(2)+1}}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{(2)-1}}{2}$	$\frac{\sqrt{(2)-1}}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{(2)+1}}{2}$

Ilustración 20. Coeficientes de la subportadora AltBOC [8].

Por lo tanto, en cada banda lateral se transmitirán un único canal de información (equivalente a una señal BPSK) y un canal de control (otra señal BPSK). La señal, modulada con AltBOC, es en realidad equivalente a dos QPSKs separadas (formando una constelación 8-PSK) colocadas a lo largo de la frecuencia central de E5a y E5b.

- La **señal E5a** es un elemento intrínseco de la señal E5 y está formada por una componente de información en la componente en fase y una componente de control en la componente en cuadratura.
- La **señal E5b** es un elemento intrínseco de la señal E5 y al igual que E5a, está formada por una componente de información transmitida en la componente en fase y una componente de control en la componente en cuadratura.

Respecto a los códigos PRN de la señal E5 ( $C_{E5a-I}$ ,  $C_{E5b-I}$ ,  $C_{E5a-Q}$ ,  $C_{E5b-Q}$ ), se explican con más detalle en el ANEXO I. Códigos del sistema Galileo12.1.2. Para la generación de estos códigos se usan dos LFSRs de grado 14º, con los que se crea el código llamado código de oro (código primario). Se trata de la combinación XOR de dos secuencias de la misma longitud de chips  $2^m - 1$ .

Para cada componente de la señal existe 50 códigos secundarios diferentes. Pero hay que destacar que para las componentes E5aQ y E5bQ, se usa un solo código secundarios para cada uno de los canales. En cambio, para E5aI y E5bI se utilizan los 50 códigos secundarios existentes para cada uno de ellos. La generación de estos códigos implica que ambos LFSR

deben resetear su código primario unas 100 veces, porque hay un código secundario de 100 chips. Por ello, como solo se proporcionan 50 valores iniciales diferentes (para el segundo registro), para realizar la simulación se toman los 50 valores restantes como los mismos, pero dando la vuelta al orden en que entraron en los LFSRs.

A continuación, en la Tabla 7 se recogen las características técnicas resumidas que se han explicado de la señal E5.

GNSS System	Galileo	Galileo	Galileo	Galileo
Service Name	E5a data	E5a pilot	E5b data	E5b pilot
Centre Frequency	1191.795 MHz			
Frequency Band	E5			
Access Technique	CDMA			
Spreading modulation	AltBOC(15,10)			
Sub-carrier frequency	15.345 MHz			
Code frequency	10.23 MHz			
Signal Component	Data	Pilot	Data	Pilot
Primary PRN Code length	10230			
Code Family	Combination and short-cycling of M-sequences			
Secondary PRN Code length	20	100	4	100
Data rate	50 sps	-	250 sps	-
Minimum Received Power [dBW]	-155 dBW		-155 dBW	
Elevation	10°		10°	

Tabla 7. Características técnicas de la señal E5 [10].

En la siguiente Ilustración 21 se observa la representación en el espectro de las señales Galileo en E5.

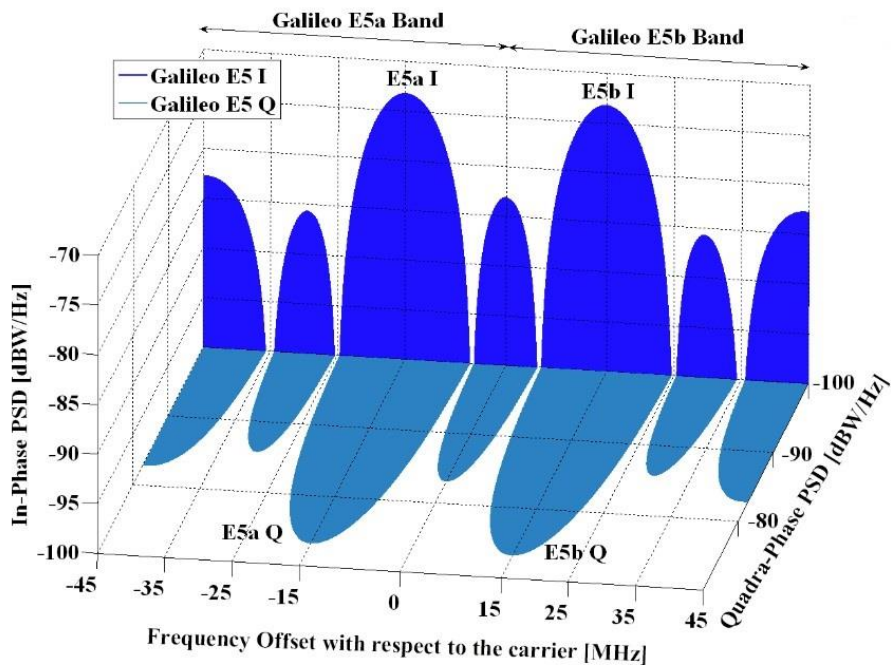


Ilustración 21. Espectro de las señales Galileo en E5 [10].

Para finalizar y tener una mejor idea del solapamiento entre GPS y Galileo en la banda E5, la siguiente Ilustración 22 muestra las señales de dichos sistemas para esta banda.

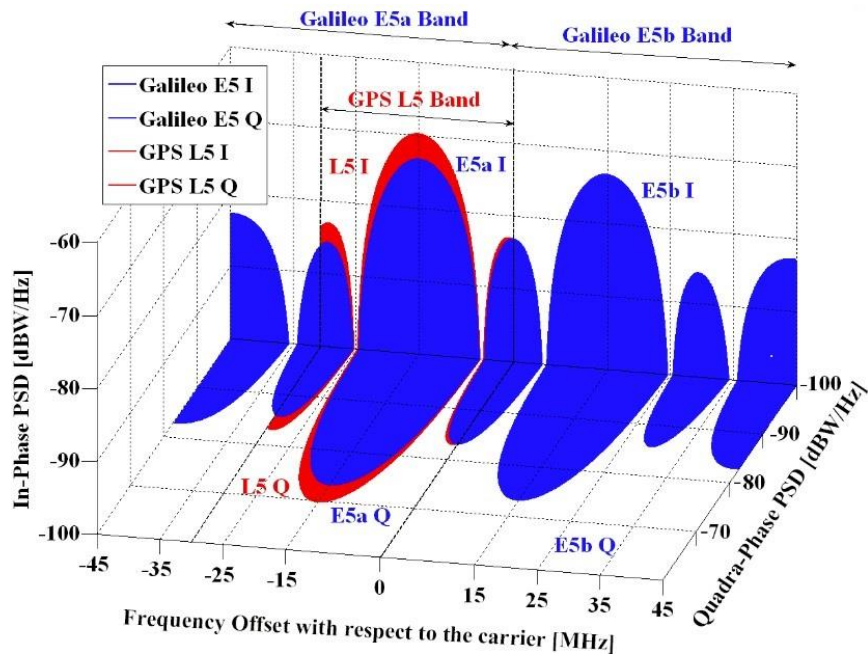


Ilustración 22. Espectro de las señales GPS y Galileo en E5 [10].



### 5.3. Señal E6

La señal E6 de Galileo transmite principalmente el servicio de alta precisión (HAS) mediante el mensaje de navegación C/NAV. Esta señal está formada por las componentes E6b y E6c y es transmitida en la banda de frecuencias 1215-1300 MHz. Las componentes de señal E6b y E6c son las componentes de información y de control respectivamente.

La modulación que se utiliza es una BPSK con frecuencia igual a 5.115 MChip/s ( $5f_0$ ) y un ratio de símbolo de 1000 Símbolos por segundo. Ya que esta banda no se utiliza en GPS o en GLONASS, no hay muchas limitaciones para elegir el tipo de modulación.

A continuación, se observa en la Ilustración 23 el esquema de multiplexación de la señal E6 con los componentes binarios de la señal  $e_{E6-B}$  y  $e_{E6-C}$ :

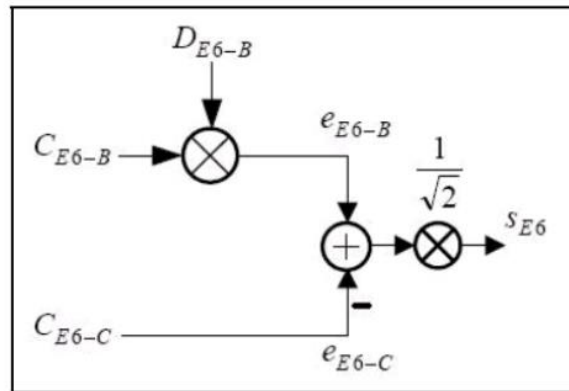


Ilustración 23. Esquema de multiplexación de la señal E6 [9].

- $e_{E6-B}$ , se trata de la componente de datos que se genera a partir de  $D_{E6-B}$  (flujo de datos del mensaje de navegación C/NAV) modulada por el código pseudoaleatorio  $C_{E6-B}$ .
- $e_{E6-C}$ , se trata de la componente de control que se construye a partir del código pseudoaleatorio  $C_{E6-C}$ .

Las expresiones matemáticas de las componentes binarias de la señal son las siguientes:

$$e_{E6-B}(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} [c_{E6-B,|i|_{LE6-B}} d_{E6-B,|i|_{DCE6-B}} \text{rect}_{T_{C,E6-B}}(t - iT_{C,E6-B})]$$

$$e_{E6-C}(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} [c_{E6-C,|i|_{LE6-C}} \text{rect}_{T_{C,E6-C}}(t - iT_{C,E6-C})]$$

Mediante el esquema de multiplexación, se obtiene la siguiente ecuación final:

$$S_{E6}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} [e_{E6-B}(t) - e_{E6-C}(t)]$$

Se ha de destacar que la banda E6P (canal a) está restringida para organismos gubernamentales, es decir, para el servicio PRS. Por ello, no se proporciona información de la señal, únicamente que la modulación que se utiliza es una BOCcos(10,5).

Respecto a los códigos PRN de la señal E6 ( $C_{E6a}$ ,  $C_{E6b}$ ), se explican con más detalle en el ANEXO I. Códigos del sistema Galileo 12.1.3. Cada uno de los códigos pseudoaleatorios es implementado por dos LFSRs de grado 13º, correspondientes al canal B y por otros dos de grado 14º que corresponden a los del canal C. Los códigos que se generan mediante estos registros son los llamados códigos de oro, es decir, los códigos primarios. Hay que destacar que el canal C tiene un código secundario de 50 bits los cuales modulan el código primario. Los datos de información de los canales B y C son proporcionados, sin embargo, como la información del canal A es restringida, se supondrá igual a la información del canal B multiplicada por -1.

En la siguiente Tabla 8 se recogen las características técnicas resumidas que se han explicado de la señal E6.

GNSS System	Galileo	Galileo	Galileo
Service Name	E6 CS data	E6 CS pilot	E6 PRS
Centre Frequency	1278.75 MHz		
Frequency Band	E6		
Access Technique	CDMA		
Spreading modulation	BPSK(5)	BPSK(5)	BOC <sub>cos</sub> (10,5)
Sub-carrier frequency	-	-	10.23 MHz
Code frequency	5.115 MHz		
Signal Component	Data	Pilot	Data
Primary PRN Code length	5115	5115	N/A
Code Family	Memory codes		N/A
Secondary PRN Code length	-	100	N/A
Data rate	1000 sps	-	N/A
Minimum Received Power [dBW]	-155		N/A
Elevation	10°		N/A

Tabla 8. Características técnicas de la señal E6 [10].

Por último, en la Ilustración 24 se representa el espectro de las señales Galileo en E6.

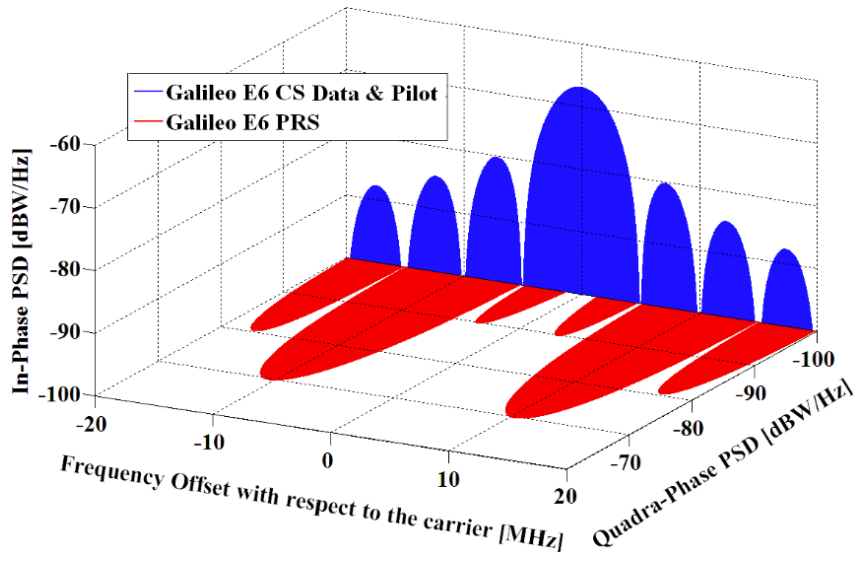


Ilustración 24. Espectro de las señales Galileo en E6 [10].

## 6. Metodología

Este apartado describe los procedimientos y las herramientas que se han utilizado para cubrir los objetivos del proyecto.

### 6.1. Planteamiento

Primeramente, se estudian las características de las señales transmitidas por los satélites Galileo, desde la estructura de dichas señales a las especificaciones técnicas de cada una de ellas. Seguidamente, se analiza la implementación de las señales en una interfaz gráfica de usuario en Matlab. Para ello, se crea un programa interactivo con el usuario basado en las funcionalidades de Matlab y con la utilización de algunas librerías específicas. Y así, finalmente, alcanzar el objetivo de poder simular y representar las señales Galileo transmitidas mediante un programa de uso fácil. Además, se incorpora la elaboración de un manual de usuario que incluya la información asociada a las señales y al manejo del demostrador.

### 6.2. Organización del trabajo

En este apartado, se detallan las tareas que se han ido llevando a cabo en el TFM. A continuación, se explican con más detalle de forma ordenada.

- Estudio de la estructura y las especificaciones de cada una de las señales que se transmiten por los satélites Galileo.
- Estructura de la programación: se analiza la estructura del código de Matlab de cada señal, se identifican las funciones principales de cada señal y el desglose de las diferentes funcionalidades que se programan por separado.
- Elaboración de un flujo de programación de cada una de las señales de Galileo. Estudio del proceso de formación de las señales, mediante los procesos de generación de códigos, de codificación y de modulación.
- Programación de cada una de las funciones que generan cada señal.
- Validación de cada una de las funciones.
- Integración de todas las funciones para formar cada señal.
- GUI (Graphical User Interface): su diseño, es decir, identificar las funcionalidades que debe realizar este programa.
- GUI: programación de la interfaz y testeo de ella para la validación.

### 6.3. Herramientas utilizadas

Para llevar a cabo este proyecto se ha utilizado el programa Matlab (MATrix LABoratory), programa de cómputo numérico y comúnmente empleado en el ámbito del procesado de señales.

La versión de Matlab con la que se ha trabajado ha sido la versión 9.9, llamada Matlab R2020b. Los paquetes o librerías que ofrece Matlab con sus diferentes funcionalidades y que se tenían instaladas para el correcto funcionamiento del programa son las siguientes:

- Signal Processing Toolbox (versión 8.5): funciones de forma de onda, estadísticas, transformadas, correlaciones, modelado de señales, análisis de filtros digitales...
- DSP System Toolbox (versión 9.11): funciones de analizar espectros.
- Communications Toolbox (versión 7.4): funciones de operaciones de señal (convertir hexadecimal a binario, octal a binario... etc), ángulos de vista, de propagación.
- Simulink (versión 10.2): abre la página de inicio de Simulink donde se puede elegir un modelo o un modelo de proyecto o ver ejemplos.
- System Identification Toolbox (versión 9.13): funciones de representación de datos (size), de analizar datos (plot), extracción de datos (get, set).
- Symbolic Math Toolbox (versión 8.6): funciones para resolver y manipular ecuaciones matemáticas (xor).

## 7. Análisis de alternativas

En este apartado, se detallarán las diferentes opciones técnicas consideradas, con el propósito de lograr los objetivos propuestos en este proyecto. Se analizarán dichas opciones técnicas, se elegirá una de ellas y se explicará la razón de dicha elección.

Después de investigar programas basados principalmente en el procesamiento de señales, se encontraron las tres herramientas software siguientes: Matlab (Signal Analyzer), EDM Post Analyzer e ibaAnalyzer.

### 7.1. Matlab

El programa Matlab (MATrix LABoratory) es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Cabe destacar sus prestaciones básicas como: la manipulación de matrices, la representación de datos y



Ilustración 25. Logo de Matlab

funciones, la implementación de algoritmos... En lo que al proyecto respecta, el paquete Matlab dispone de herramientas adicionales que expanden sus prestaciones.

Se mencionará el uso de las aplicaciones Signal Analyzer y Signal Processing Toolbox. La primera, trata de una herramienta interactiva para visualizar, medir, analizar y comparar señales tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia. La segunda, provee más funcionalidades a la hora de procesar señales. Proporciona funciones y apps para analizar, preprocesar y extraer características de las señales muestreadas; incluye herramientas para diseñar y analizar filtros, remuestrear, suavizar, eliminar tendencias, y calcular el espectro de potencia. También da la oportunidad de extraer características como puntos de cambio y envolventes, localizar pico, cuantificar similitudes de señales y realizar mediciones tales como SNR (Relación Señal a Ruido) y distorsión.

### 7.2. IbaAnalyzer



Ilustración 26. Logo de IbaAnalyzer

Este software es una herramienta muy completa para analizar de forma eficiente datos de mediciones. Proporciona las siguientes características: ofrecer un análisis orientado a las señales, donde se pueden medir los valores de las señales y las distancias entre señales utilizando marcadores versátiles; editor de filtros, se pueden configurar varios filtros digitales (de

paso bajo, paso alto, paso banda y corte de banda, entre otros) mediante una entrada totalmente gráfica; análisis en el intervalo de la frecuencia (FFT) y otros modos de visualización, se pueden llevar a cabo análisis de frecuencia de un modo sencillo utilizando los

datos grabados; combinación de datos provenientes de diferentes procesos de medición o fuentes de datos.

### 7.3. EDM Post Analyzer

Para ofrecer un paquete completo de análisis en tiempo real y procesamiento posterior, Crystal Instruments desarrolló aplicaciones de soporte EDM (Engineering Data Management) para incluir tres módulos de software separados: Post Analyzer, Waveform Editor y File Converter.



Ilustración 27. Logo de EDM Post Analyzer

Centrándose en Post Analyzer (PA), cabe decir que es una aplicación que analiza archivos de datos en una computadora y tiene tres versiones: PA Viewer, permite al usuario ver datos; PA Basic, contiene análisis espectral FFT y funciones de visualización de la señal en 3D; y PA Premium, tiene funciones más avanzadas como filtros de octava y seguimiento de pedidos.

El procesamiento que se lleva a cabo con esta herramienta, proporciona un acondicionamiento de datos, filtros en tiempo real, análisis espectral FFT, ajuste de curvas, THD (Total Harmonic Distortion), cálculo RMS, filtros de octava, espectrogramas de mapa de colores y diagramas de tiempo y de Bode (en frecuencia). Después del procesamiento, los datos obtenidos se pueden exportar o utilizar para generar informes.

### 7.4. Eficiencia del análisis de alternativas

A continuación, se detalla el análisis de eficiencia que se ha llevado a cabo para la elección del software adecuado. Con el objetivo de elegir el programa para el procesamiento de las señales que se realizarán durante el proyecto, se han tenido en cuenta los siguientes criterios:

- Conocimiento sobre el programa (5 puntos). Se evaluará los conocimientos que el joven investigador Junior, que abordará este trabajo, tenga sobre los programas.
- User friendly (3 puntos). Se evalúa la facilidad de uso del programa.
- Licencia del programa (2 puntos). Se puntuará el hecho de que el investigador Junior disponga de la licencia de Matlab (la UPV/EHU ofrece la licencia de Matlab a los alumnos matriculados).

Después de haber explicado los criterios de elección, se ha detallado una tabla con la puntuación final de cada una de las opciones:

Programa a evaluar	Conocimiento sobre el programa (5 puntos)	User friendly (3 puntos)	Licencia de programa (2 puntos)	Resultado final (sobre 10 puntos)
Post Analyzer	1	1	0	2
IbaAnalyzer	1	2	0	3
Matlab	4	3	2	9

Tabla 9. Representación de la puntuación de cada programa.

### 7.5. Razonamiento de la elección

Se ha elegido el programa de Matlab para desarrollar el trabajo. Siendo estas las razones principales de la elección:

- Tener un conocimiento más profundo del uso del programa Matlab. Este programa se ha usado durante los cursos del Grado de Ingeniería en Tecnología de Telecomunicación y por ello, la habilidad es mayor.
- Debido al punto anterior, el ingeniero Junior tiene la licencia del programa en su ordenador debido a estar matriculado en la UPV/EHU.
- El programa Matlab tiene herramientas de ayuda para hacer su uso más sencillo.
- El grupo de investigación TSR tiene implementados muchos códigos en dicho programa, ya que la utilización de este software es la más adecuada para el procesamiento y tratamiento de las señales. Estos códigos se emplearán en el proyecto y los códigos que se vayan creando durante el trabajo, se proporcionarán al grupo TSR.



## 8. Plan de trabajo

En este apartado se especifican, en primer lugar, los integrantes del grupo de trabajo y, en segundo lugar, las diferentes fases o paquetes de trabajo en las que se divide el proyecto.

### 8.1. Equipo de trabajo

Con el objetivo de organizar el trabajo, se ha llevado a cabo una previa definición del equipo de trabajo que lo formaría.

Nombre y apellidos	R	Rol
David de la Vega Moreno	Director de proyecto	Ingeniero senior
Ixone Ganzabal Barinaga	Proyectista	Ingeniera junior

Tabla 10. Equipo de trabajo del proyecto.

El director del proyecto tiene como función establecer un plan de trabajo, además de determinar los objetivos a alcanzar y ser el encargado de supervisar el proyecto y corregir la documentación. El proyectista, por su parte, llevará adelante lo propuesto por el director y redactará la documentación donde resuma el trabajo realizado.

### 8.2. Paquetes de trabajo

En este apartado, se definen los paquetes de trabajo junto con las tareas correspondientes.

P.T.1.	Tareas iniciales (02/01/2022 – 20/01/2022)
T.1.1.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Documentarse</b> leyendo artículos sobre las GNSS.</li> <li>• Recursos humanos: proyectista.</li> <li>• Recursos técnicos: ordenador.</li> <li>• Duración: 02/01/2022 – 10/01/2022</li> </ul>
T.1.2.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Estudio de la estructura y especificaciones</b> de cada una de las señales transmitidas por los satélites Galileo.</li> <li>• Recursos humanos: proyectista.</li> <li>• Recursos técnicos: ordenador.</li> <li>• Duración: 10/01/2022 – 20/01/2022</li> </ul>
T.1.3.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Analizar la estructura del código</b> de Matlab de cada señal Galileo.</li> <li>• Recursos humanos: proyectista.</li> <li>• Recursos técnicos: ordenador, Matlab.</li> <li>• Duración: 10/01/2022 – 20/01/2022</li> </ul>

Tabla 11. Paquete de trabajo 1. Tareas iniciales.

P.T.2	Elaboración de flujos de programación para cada una de las señales Galileo (20/01/2022 – 05/04/2022)
-------	--

T.2.1.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Flujograma de la señal E1</b> de Galileo.</li> <li>• Identificación de las <b>funciones principales</b>.</li> <li>• Recursos humanos: proyectista.</li> <li>• Recursos técnicos: ordenador, Matlab.</li> <li>• Duración: 20/01/2022 – 30/01/2022</li> </ul>
T.2.2.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Flujograma de la señal E5</b> de Galileo y programarla.</li> <li>• Identificación de las <b>funciones principales</b>.</li> <li>• Recursos humanos: proyectista.</li> <li>• Recursos técnicos: ordenador, Matlab.</li> <li>• Duración: 20/02/2022 – 05/03/2022</li> </ul>
T.2.3.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Flujograma de la señal E6</b> de Galileo y programarla.</li> <li>• Identificación de las <b>funciones principales</b>.</li> <li>• Recursos humanos: proyectista.</li> <li>• Recursos técnicos: ordenador.</li> <li>• Duración: 24/03/2022 – 27/03/2022</li> </ul>

Tabla 12. Paquete de trabajo 2. Elaboración de flujos de programación para cada una de las señales Galileo.

<b>P.T.3</b>	<b>Programación e implementación de las funciones para formar cada una de las señales Galileo (20/01/2022 – 05/04/2022)</b>
T.3.1.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Programación de las funciones de la señal E1</b> de Galileo.</li> <li>• <b>Testeo y validación</b> de las funciones.</li> <li>• <b>Integración</b> de las funciones para formar la señal.</li> <li>• Recursos humanos: proyectista.</li> <li>• Recursos técnicos: ordenador, Matlab.</li> <li>• Duración: 20/01/2022 – 20/02/2022</li> </ul>
T.3.2.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Programación de las funciones de la señal E5</b> de Galileo.</li> <li>• <b>Testeo y validación</b> de las funciones.</li> <li>• <b>Integración</b> de las funciones para formar la señal.</li> <li>• Recursos humanos: proyectista.</li> <li>• Recursos técnicos: ordenador, Matlab.</li> <li>• Duración: 20/02/2022 – 24/03/2022</li> </ul>
T.3.3.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Programación de las funciones de la señal E6</b> de Galileo.</li> <li>• <b>Testeo y validación</b> de las funciones.</li> <li>• <b>Integración</b> de las funciones para formar la señal.</li> <li>• Recursos humanos: proyectista.</li> <li>• Recursos técnicos: ordenador, Matlab.</li> <li>• Duración: 24/03/2022 – 05/04/2022</li> </ul>

Tabla 13. Paquete de trabajo 3. Programación e implementación de las funciones para formar cada una de las señales Galileo.

<b>P.T.4.</b>	<b>Creación de la interfaz gráfica de usuario/demostrador (05/04/2022 – 31/05/2022)</b>
T.4.1.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Estructura del diseño funcional</b> de la GUI.</li> <li>• <b>Identificar las funcionalidades</b> que debe realizar el programa.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recursos humanos: proyectista.</li> <li>• Recursos técnicos: ordenador, Matlab.</li> <li>• Duración: 05/04/2022 – 12/04/2022</li> </ul>
T.4.2.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Programación de la interfaz.</b></li> <li>• <b>Implementación</b> de las señales E1, E5 y E6 de Galileo en el <b>demostrador.</b></li> <li>• Testeo para validación.</li> <li>• Recursos humanos: proyectista.</li> <li>• Recursos técnicos: ordenador, Matlab.</li> <li>• Duración: 12/04/2022 – 31/05/2022</li> </ul>

Tabla 14. Paquete de trabajo 4. Creación de la interfaz gráfica de usuario/demostrador.

<b>P.T.5.</b>	<b>Gestión y documentación del proyecto (02/01/2022 – 31/08/2022)</b>
T.5.1.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Reuniones con el director del proyecto.</b> Se realizan reuniones cada cierto tiempo en las que se comentan los avances y analizan resultados obtenidos.</li> <li>• Recursos humanos: proyectista, director del proyecto.</li> <li>• Recursos técnicos: ordenador.</li> <li>• Duración: 02/01/2022 – 31/08/2022</li> </ul>
T.5.2.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Redacción y supervisión de la documentación.</b> Documentación de los resultados del proyecto y redacción final del TFG.</li> <li>• Recursos humanos: proyectista, director del proyecto.</li> <li>• Recursos técnicos: ordenador.</li> <li>• Duración: 10/06/2022 – 31/08/2022</li> </ul>

Tabla 15. Paquete de trabajo 5. Gestión y documentación del proyecto.

### 8.3. Diagrama de Gantt

En la Ilustración 28, se puede observar el diagrama de Gantt del proyecto.

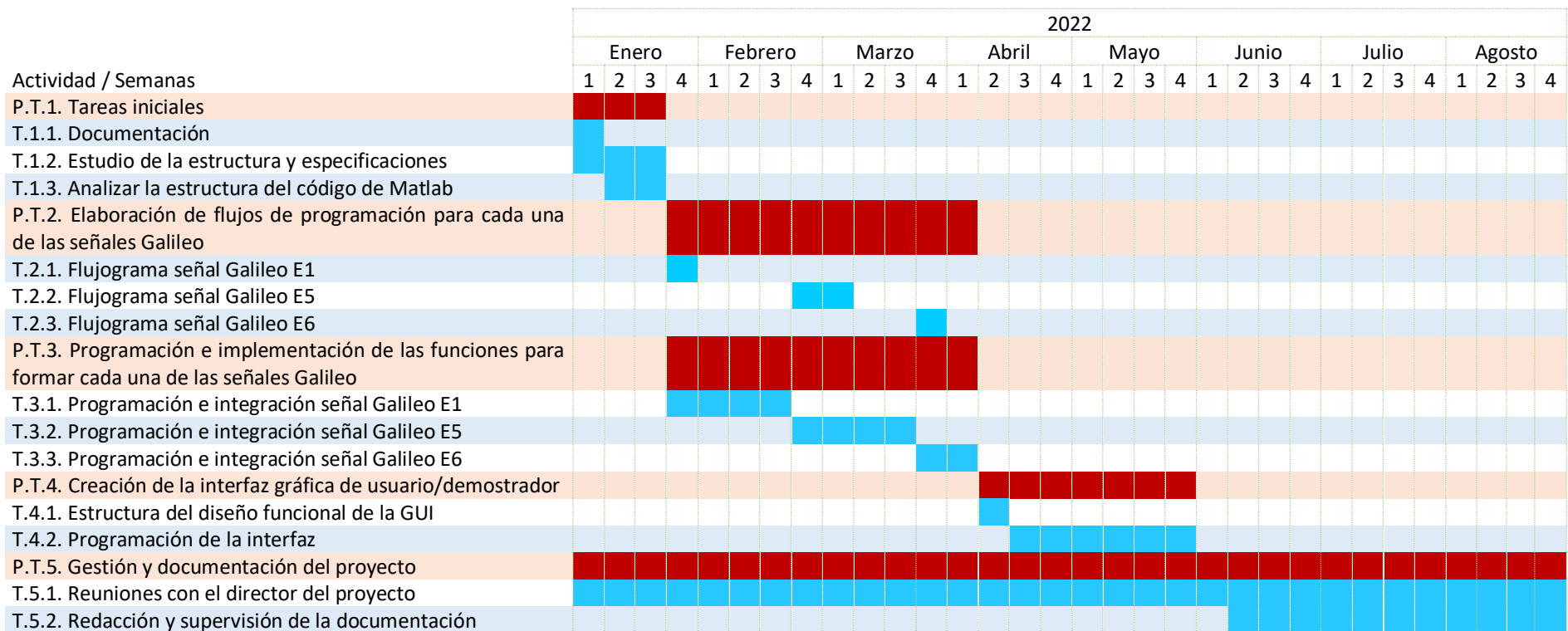


Ilustración 28. Diagrama de Gantt del proyecto.

## 9. Análisis de riesgos

El objetivo de este apartado es evaluar los riesgos que han podido ocurrir durante el desarrollo del proyecto; ya que mientras se realizaba este trabajo se podrían haber dado diferentes sucesos que hubieran hecho cuestionar el proyecto. Pero el proyecto ha salido adelante, por lo que se puede concluir que los posibles riesgos se han gestionado de una manera adecuada y no ha ocurrido ningún percance.

Para realizar este análisis, primero se han identificado los posibles riesgos y se han tenido en cuenta dos conceptos importantes para su clasificación. En este apartado se ha valorado la probabilidad de que estos ocurran y se ha cuantificado el efecto que pueden causar en el proyecto. Además, se ha propuesto un plan de contingencia para evitar dichos riesgos.

### 9.1. Demoras (A)

En cualquier proyecto puede darse retrasos que impidan la correcta finalización del mismo en los plazos fijados. Por lo tanto, para evitar esta situación, se propone establecer una planificación en la que se identifiquen de manera clara, las tareas a realizar y la finalización de las mismas. A pesar de que el impacto en el proyecto es medio, la probabilidad de aparición es baja, ya que el trabajo es guiado por el director del proyecto, que determina en todo momento, las diferentes tareas a seguir, realizando un seguimiento de las mismas.

### 9.2. Configuración errónea del código (B)

La mayor parte del proyecto, se centra en la ejecución del código de las señales Galileo. Este proceso es repetido constantemente para cada una de las señales, con el objetivo de analizar y comprender el código y si es necesario, realizar algún cambio en el código. Esto conlleva a que se produzca algún posible fallo humano, debido a que todo el trabajo se basa en los resultados obtenidos en la ejecución de dicho código.

Con el objetivo de tratar de evitar este riesgo, se propone analizar detalladamente y con calma las líneas de código utilizadas y observar bien los cambios que se realicen -si procede- en cada ejecución, para saber si se ha implementado de forma correcta y que los datos obtenidos son los correspondientes a la representación de cada señal.

La probabilidad de que se de este riesgo es bastante alta, porque como se ha mencionado anteriormente, el trabajo se basa en la implementación del código en el demostrador. Sin embargo, debido al plan de contingencia propuesto, la probabilidad de que afecte en el proyecto ha disminuido. Aun así, hay que mencionar que este riesgo ha ocurrido en alguna ocasión, pero gracias a la buena gestión y el entusiasmo en realizar un buen trabajo, se ha conseguido seguir adelante.

### 9.3. Pérdida de datos (C)

Dado que este proyecto se realizará utilizando herramientas informáticas, todos los resultados que se van a obtener estarán guardados en formato digital. Será necesario el hecho de guardar esta información de forma digital, ya que no es factible guardarlos en formato físico, como por ejemplo en papel; debido al volumen de datos y procesamiento que se llevará a cabo después de obtener los datos.

La medida propuesta para no perder los datos digitales, es realizar copias de seguridad de toda la información que se vaya obteniendo. Aunque la probabilidad de que este riesgo ocurra sea baja, el impacto que generaría en el proyecto sería muy alto.

### 9.4. Resumen del análisis de riesgos

La gestión de riesgo se realiza mediante la matriz probabilidad-impacto que se explicará en la Tabla 16 a continuación, donde se resumen los riesgos mencionados hasta ahora.

		IMPACTO				
		Muy bajo (0.05)	Bajo (0.1)	Moderado (0.2)	Alto (0.4)	Muy alto (0.8)
PROBABILIDAD	Rara vez (0.1)					C
	Poco probable (0.3)					
	Probable (0.5)	A				
	Bastante probable (0.7)					
	Casi seguro (0.9)				B	

Tabla 16. Tabla matriz probabilidad-impacto del proyecto.

## 10. Declaración de gastos

En este apartado, se expone el coste total del proyecto que se divide en diferentes partidas: horas internas, amortizaciones y gastos.

### 10.1. Horas internas

Las horas internas se definen como las horas de los miembros del equipo de trabajo para la realización del proyecto.

Concepto	Número de horas (h)	Coste horario (€/h)	Coste total (€)
Ingeniero Senior	40 h	40,00 €	1.600,00 €
Ingeniero Junior	600 h	20,00 €	12.000,00 €
<b>Subtotal (€)</b>			<b>13.600,00 €</b>

Tabla 17. Tabla correspondiente a la partida de horas internas.

### 10.2. Amortizaciones

Las amortizaciones son los activos fijos que se utilizan para el proyecto. En este caso, como se observa en la Tabla 18, el ordenador del ingeniero junior es declarado como gasto ya que se requiere comprar un ordenador con ciertas prestaciones mínimas, las que se mencionan en el ANEXO II. .

Concepto	Coste (€)	Vida útil (h)	Uso (h)	Coste total (€)
Ordenador ing. Junior	2.000,00 €	5.000 h	600 h	240,00 €
<b>Subtotal (€)</b>				<b>240,00 €</b>

Tabla 18. Tabla correspondiente a las amortizaciones.

### 10.3. Resumen económico

Una vez analizada cada partida, se recoge el total de la declaración de gastos:

Concepto	Coste (€)
Subtotal horas internas	13.600,00 €
Subtotal amortizaciones	240,00 €
<b>Total (€)</b>	<b>13.840,00 €</b>

Tabla 19. Tabla resumen de la declaración de gastos.

## 11. Diseño de la herramienta software

En este apartado se explica cómo se ha estructurado la programación de cada una de las señales y, para ello, se identifican las funciones principales utilizadas. El código de cada una de las señales está formado por subfunciones que se relacionan entre ellas para conseguir la señal Galileo deseada.

A continuación, se detallan las funciones que componen cada señal Galileo y la tarea que cumple cada una de ellas.

### 11.1. Funciones para la generación de la señal E1

La función “generationGalileoE1” se trata de la función general que genera la señal Galileo E1, formada por diferentes parámetros y funciones que se mencionan a continuación.

#### 11.1.1. Funciones principales

La generación de la señal está principalmente dividida en cuatro elementos:

- Secuencias CDMA
  - “memcodL1”: se trata de dos códigos de memoria para las componentes de señal E1b y E1c, respectivamente.
  - “memseqL1”: esta función transforma a binario los códigos de memoria que están en hexadecimal.
  - “cdmaL1”: esta función se encarga de devolver los dos códigos PRN de la señal E1. Se hace uso de las funciones “memcodL1” y “memseqL1”.
- Flujo de datos
  - “randn”: genera un vector random de +-1.
  - DCB: flujo de datos de la componente b de la señal.
- Componentes de la señal
  - e1B: flujo de datos x secuencia CDMA (código PRN) de la componente b de la señal.
  - scB: subportadora B.
  - e1C: secuencia CDMA de la componente c de la señal.
  - scC: subportadora C.
- Densidad espectral de potencia de la señal (PSD)

No hay una función como tal, sino que se combinan los códigos pseudoaleatorios con el flujo de datos y las subportadoras y así, generar la señal E1:

$$sE1 = A * ((e1B .* scB) - (e1C .* scC));$$



donde,  
 $A = 1/\sqrt{2}$

### 11.1.2. Funciones secundarias

A continuación, se mencionan algunas funciones utilizadas varias veces dentro de las funciones principales:

- “expan”: sobremuestra los símbolos mediante la función “kron” (multiplica matrices).
- “fulltime”: repite la señal hasta la longitud deseada.
- “shcenteredFFT”: transformada FFT de una señal.
- “xcorr”: autocorrelación de la señal.
- “bipolar”: transforma la secuencia de 1s y 0s en valores de +-1.
- “htob”: transforma un número hexadecimal en binario.

A continuación, se muestra en la Tabla 20 las variables o parámetros más relevantes a la hora de la generación de la señal Galileo E1.

Parámetro	Explicación
$f_0$	Frecuencia fundamental: 1.023 MHz
$f_{\text{samp}}$	Frecuencia de muestreo: $90f_0$
$f_{s\_A}$	Frecuencia subportadora del canal A: $15f_0$
$f_{s\_a}$	Frecuencia subportadora del parámetro a: $f_0$
$f_{s\_b}$	Frecuencia subportadora del parámetro b: $6f_0$
SrB	Velocidad de símbolo de la componente b
SrA	Velocidad de símbolo de la componente a
$\beta$	Componente BOC, representa 1/11 de la potencia total del canal
$\infty$	Componente BOC, representa 1/11 de la potencia total del canal

Tabla 20. Parámetros relevantes de la señal Galileo E1.

Para finalizar, se detalla el Diagrama 1 en el que se muestran las relaciones entre todas las funciones y los parámetros principales. Las relaciones unidas con líneas discontinuas representan los parámetros relevantes pertenecientes a las funciones que generan la señal.

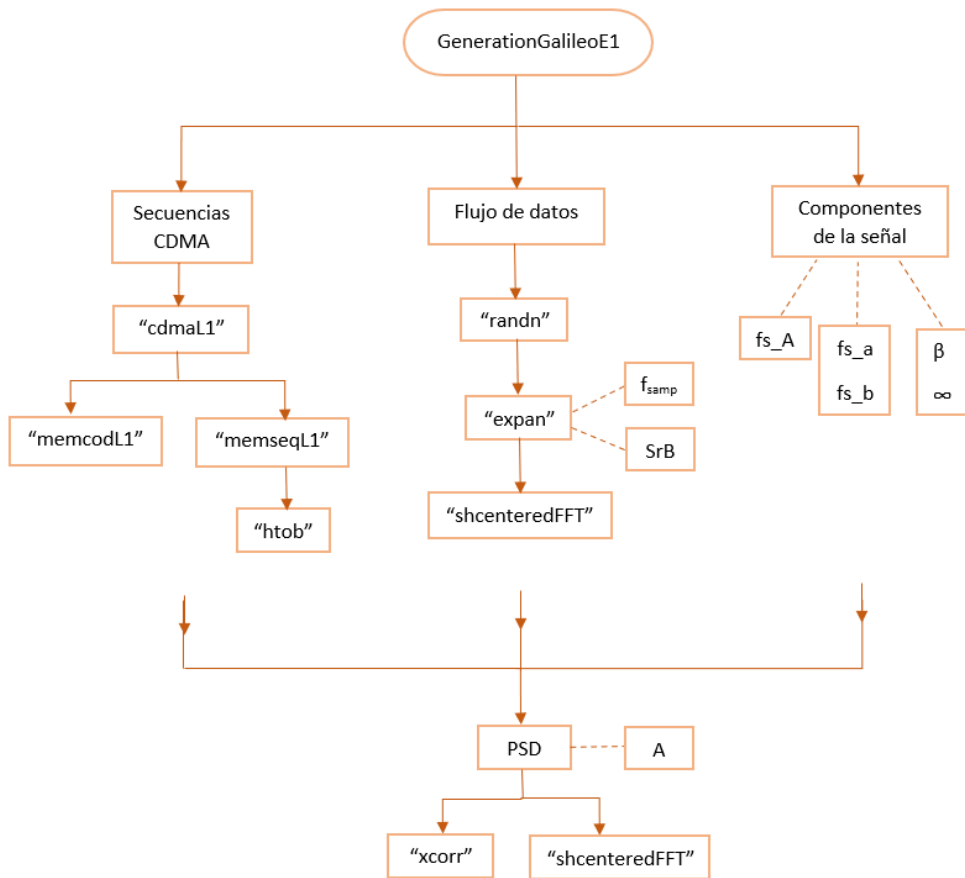


Diagrama 1. Diagrama de las funciones principales y parámetros que forman la señal E1.

## 11.2. Funciones para la generación de la señal E5

La función "sE5n" se trata de la función principal que genera la señal Galileo E5, formada por diferentes parámetros y funciones que se mencionan a continuación.

### 11.2.1. Funciones principales

La generación de la señal está principalmente dividida en cuatro elementos:

- Secuencias CDMA
  - "draftcdmaE5": implementa la codificación CDMA de la señal E5 mediante el esquema proporcionado en Galileo OS SIS ICD. Esta función hace uso de las siguientes funciones:
    - "tappol": función que pasa un número octal a binario. Se usa la siguiente función dentro de esta:

- “transf”: transforma elemento a elemento a binario de un vector compuesto de elementos octales o hexadecimales. Esta función hace uso de la siguiente:
  - “otob”: transforma todos los elementos de un número octal a binario.
  - “starval”: función que contiene los “start values” del segundo registro base para crear el código primario. Hace uso de la función “transf” también.
  - “initseq”: contiene los “initial sequences” que se cargaran en cada registro LFSR del segundo registro base. Hace uso de la función “transf” también.
  - “seccodeE5”: se genera el código secundario. Además de hacerse uso de la función “transf”, se hace uso de la función “htob”, que se encarga de transformar un número hexadecimal en binario.
  - “prilfsr”: implementa la función del “base register 1” (registro LFSR).
  - “seclfsr”: implementa la función del “base register 2”(registro LFSR).
  - “bipolar”: transforma la secuencia de 1s y 0s en valores de +/-1.
- Flujo de datos

Se puede crear una vector random con la función “randn” o crear a mano un vector de valores +/-1:

  - Dal = 1; flujo de datos de la componente I del canal a.
  - Dbl = [1 1 -1 -1 -1]; flujo de datos de la componente I del canal b.

- Componentes de la señal
  - sdaI: datos e5aI (de la componente I del canal a) x código pseudoaleatorio.
  - sdaQ: código pseudoaleatorio de la componente Q del canal a.
  - sdbI: datos e5bI (de la componente I del canal b) x código pseudoaleatorio.
  - sdbQ: código pseudoaleatorio de la componente Q del canal b.

Componentes “dashed” (productos de todas las señales a la salida del multiplexor):

- asdaI= sdaQ.\*sdbI.\*sdbQ;
- asdaQ=sdaI.\*sdbI.\*sdbQ;
- asdbI= sdbQ.\*sdaI.\*sdaQ;
- asdaQ=sdbI.\*sdaI.\*sdaQ;

Subportadoras: coeficientes de la subportadora AltBOC. Para ello, se hace uso de la función “parameters”, que implementa los valores paramétricos de las subportadoras.

- Densidad espectral de potencia de la señal (PSD)

No hay una función como tal, sino que se combinan los códigos pseudoaleatorios con el flujo de datos y las subportadoras y así, generar la señal E5:

```
x1=sdaI.*conj(pcbs) + sdbI.*pcbs; %ranging code por data del canal  
a y b (sdaI y sdbI) y por las subportadoras
```

```

y1=sdaQ.*conj(pcsc) + sdbQ.*pcsc; %control del canal a y b
x2=asdaI.*conj(pcsp) + asdbI.*pcsp;
y2=asdaQ.*conj(pcsp) + asdbQ.*pcsp;
  
```

donde,

pcsc: subportadora S.

pcsp: subportadora P.

Después se combinan las señales de datos x1 y x2 (componentes en fase) y las señales de control y1 e y2 que son las componentes en cuadratura y así, se obtiene la señal Galileo E5 completa.

### 11.2.2. Funciones secundarias

A continuación, se mencionan algunas funciones utilizadas varias veces dentro de las funciones principales:

- “expan”: sobremuestra los símbolos mediante la función “kron” (multiplica matrices).
- “fulltime”: repite la señal hasta la longitud deseada.
- “shcenteredFFT”: transformada FFT de una señal.
- “xor”: se trata de una función “or”.

A continuación, se muestra en la Tabla 21 las variables o parámetros más relevantes a la hora de la generación de la señal Galileo E5.

Parámetro	Explicación
$f_0$	Frecuencia fundamental: 1.023 MHz
$f_{\text{samp}}$	Frecuencia de muestreo: $240f_0$
$f_s$	Frecuencia subportadora: $15f_0$
Sral	Velocidad de símbolo de la componente a
Srbl	Velocidad de símbolo de la componente b

Tabla 21. Parámetros relevantes de la señal Galileo E5.

Para finalizar, se detalla el Diagrama 2 en el que se muestran las relaciones entre todas las funciones y los parámetros principales. Las relaciones unidas con líneas discontinuas representan los parámetros relevantes pertenecientes a las funciones que generan la señal.

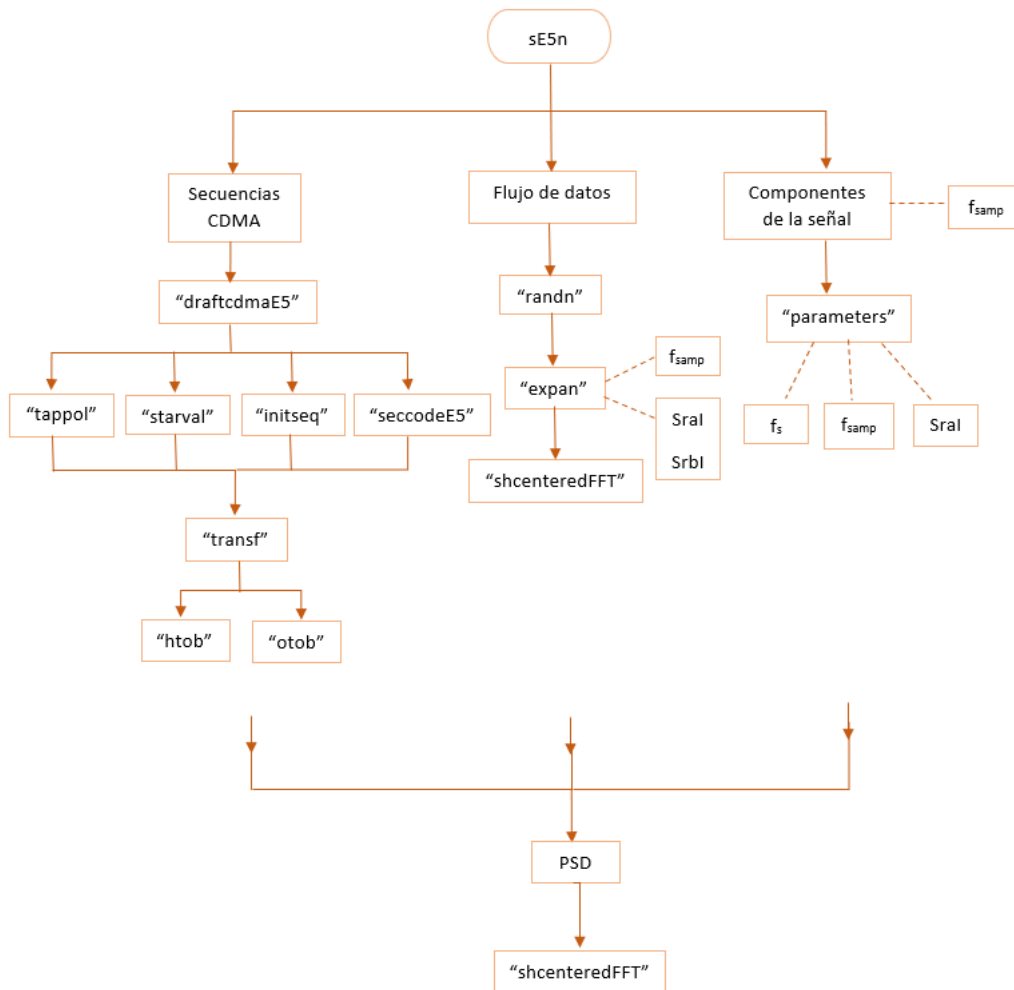


Diagrama 2. Diagrama de las funciones principales y parámetros que forman la señal E5.

### 11.3. Funciones para la generación de la señal E6

La función “sE6” se trata de la función principal que genera la señal Galileo E6, formada por diferentes parámetros y funciones que se mencionan a continuación.

#### 11.3.1. Funciones principales

La generación de la señal está principalmente dividida en cuatro elementos:

- Secuencias CDMA
  - “cdmaE6”: implementa la codificación de la secuencia CDMA. Para ello, se hace uso de las siguientes funciones:
    - “prilfsr”: implementa la función del registro LFSR de grado 13 y 14.

- “E6seclfsr”: implementa la función del registro LFSR de grado 13 y 14 donde se resetea el registro con los “start values”.
  - “bipolar”: transforma la secuencia de 1s y 0s en valores de +-1.
- Flujo de datos
  - “randn”: genera un vector random de +-1.  
DCB: datos del canal b.
- Componentes de la señal
  - e6B: flujo de datos x código pseudoaleatorio del canal b.
  - e6C: código pseudoaleatorio del canal c.
- Densidad espectral de potencia de la señal (PSD)  
No hay función como tal. A la salida del esquema de multiplexación, la señal E6 generada será de la siguiente forma:

$$s_{E6} = A * (e_{6B} - e_{6C});$$

donde,

$$A = 1/\sqrt{2}$$

### 11.3.2. Funciones secundarias

A continuación, se mencionan algunas funciones utilizadas varias veces dentro de las funciones principales:

- “expan”: sobremuestra los símbolos mediante la función “kron” (multiplica matrices).
- “fulltime”: repite la señal hasta la longitud deseada.
- “shcenteredFFT”: transformada FFT de una señal.
- “xor”: se trata de una función “or”.

A continuación, se muestra en la Tabla 22 las variables o parámetros más relevantes a la hora de la generación de la señal Galileo E6.

Parámetro	Explicación
$f_0$	Frecuencia fundamental: 1.023 MHz
$f_{\text{samp}}$	Frecuencia de muestreo: $100f_0$
$f_s$	Frecuencia subportadora: $10f_0$
SrB	Velocidad de símbolo de la componente b

Tabla 22. Parámetros relevantes de la señal Galileo E6.

Para finalizar, se detalla el Diagrama 3 en el que se muestran las relaciones entre todas las funciones y los parámetros principales. Las relaciones unidas con líneas discontinuas representan los parámetros relevantes pertenecientes a las funciones que generan la señal.

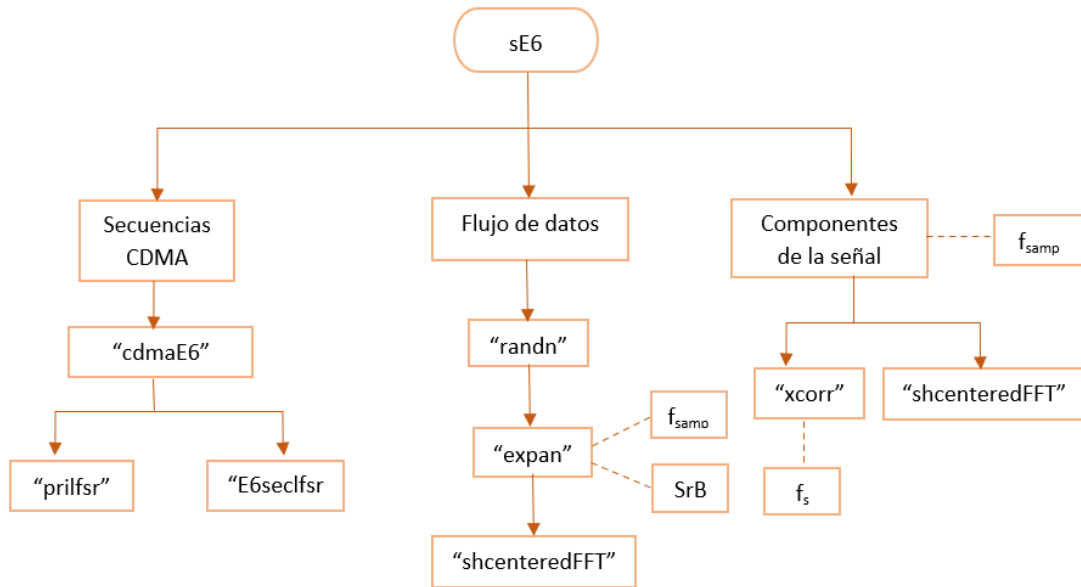


Diagrama 3. Diagrama de las funciones principales y parámetros que forman la señal E6.

## 11.4. Diseño de la interfaz gráfica de usuario

Para realizar este proyecto se ha tenido que implementar un demostrador a través de una Interfaz Gráfica de Usuario. Por ello, en este apartado se explicarán sus funcionalidades principales.

## 11.5. Introducción

Una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) es un entorno de programación visual en Matlab para programar y ejecutar programas que necesiten ingreso continuo de datos. Proporcionan un control gráfico de las aplicaciones, eliminando la necesidad de que los usuarios deban aprender un lenguaje o escribir comandos para poder ejecutar la aplicación.

## 11.6. Inicio

Para iniciar el proyecto, se ejecuta la siguiente instrucción en la ventana de comandos:

```
>> guide
```

Se presenta el cuadro de diálogo que se observa en la siguiente Ilustración 29:

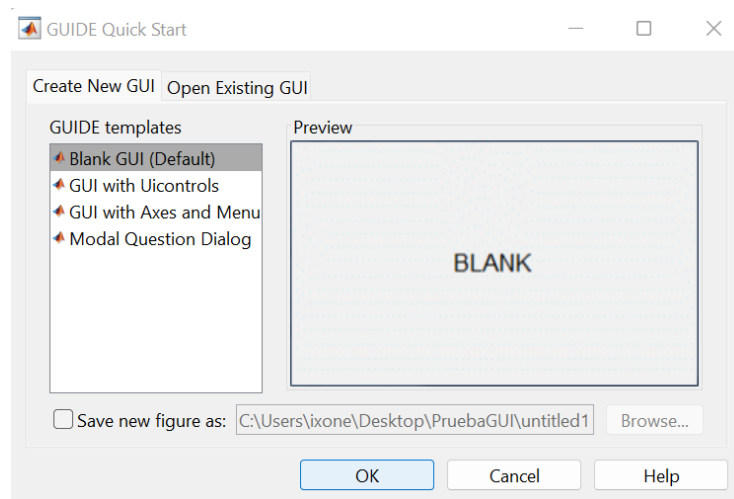


Ilustración 29. Ventana de inicio GUI.

Se presentan las siguientes opciones:

- Blank GUI (Default): es la opción de interfaz gráfica de usuario en blanco, donde se presenta un formulario nuevo en el cual se puede diseñar un programa propio.



- GUI with Uicontrols: presenta un ejemplo en el cual se calcula la masa, dada la densidad y el volumen, en alguno de los dos sistemas de unidades. Se puede ejecutar este ejemplo y obtener resultados.
- GUI with Axes and Menu: presenta un ejemplo que contiene el menú File con las opciones Open, Print y Close. En el formulario se encuentra un Popup menu, un push button y un objeto Axes. Se puede ejecutar el programa eligiendo alguna de las seis opciones que se encuentran en el menú despegable y haciendo click en el botón de comando.
- Modal Question Dialog: se muestra en la pantalla un cuadro de diálogo común, que consta de una pequeña imagen, una etiqueta y dos botones Yes y No. Dependiendo del botón que se presione, el GUI retorna el texto seleccionado ('Yes' o 'No')

Se elige la primera opción, Blank GUI y obtenemos:

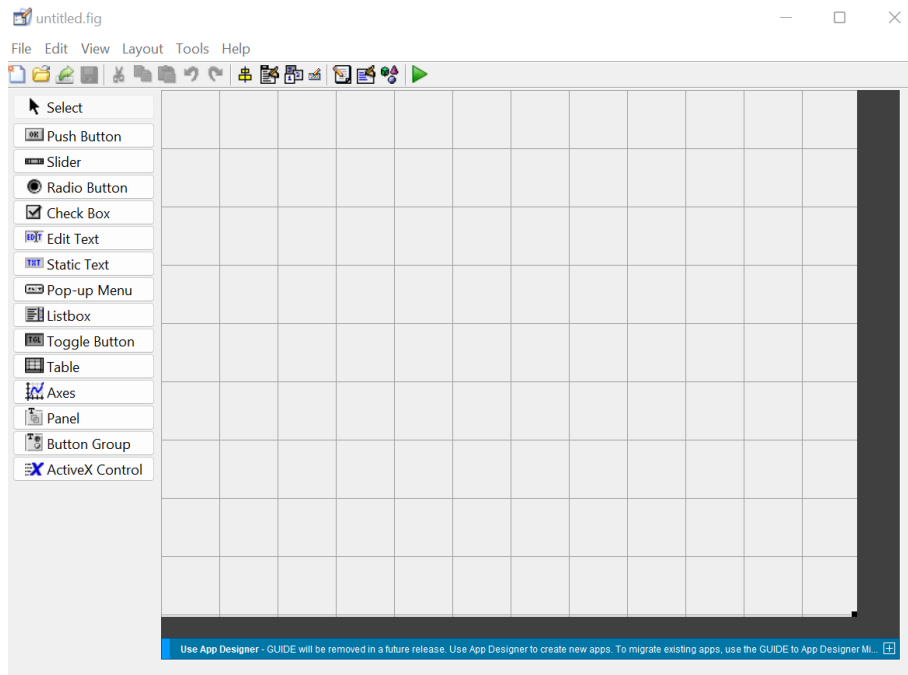


Ilustración 30. Entorno de diseño de GUI.

La interfaz gráfica cuenta con las siguientes herramientas mostradas en la Tabla 23:









	Alinear objetos
	Editor de menú
	Editor de orden de etiqueta
	Editor de barra de herramientas
	Editor del M-file
	Propiedades de objetos
	Navegador de objetos
	Grabar y ejecutar (ctrl + T)

Tabla 23. Las herramientas disponibles de la interfaz gráfica.

La siguiente Tabla 24 muestra una descripción de cada elemento de la paleta de componentes:

Control	Valor de estilo	Descripción
Check box	'checkbox'	Indica el estado de una opción o atributo
Editable Text	'edit'	Caja para editar texto
Pop-up menu	'popupmenu'	Provee una lista de opciones
List Box	'listbox'	Muestra una lista deslizable
Push Button	'pushbutton'	Invoca un evento inmediatamente
Radio Button	'radio'	Indica una opción que puede ser seleccionada
Toggle Button	'togglebutton'	Solo dos estados, "on" o "off"
Slider	'slider'	Representar un rango de valores
Static Text	'text'	Muestra un string de texto en una caja
Panel Button		Agrupar botones como un grupo
Button Group		Permite exclusividad de selección con los radio button

Tabla 24. Descripción de los elementos de la paleta de componentes.

### 11.7. Propiedades de los componentes

Cada uno de los elementos de GUI tienen un conjunto de opciones que podemos acceder con un click derecho. En la Ilustración 31 se puede observar dichas opciones.

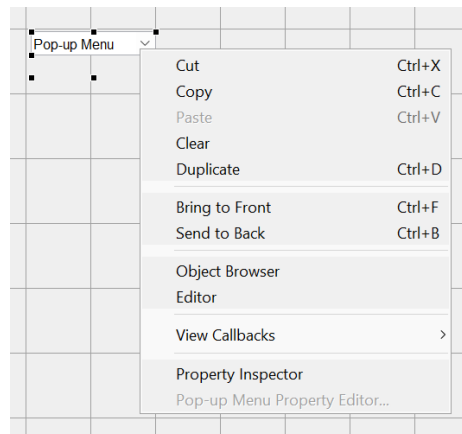


Ilustración 31. Opciones del componente.

La opción de Property Inspector permite ver y editar las propiedades de cada uno de los elementos, como se observa en la Ilustración 32.

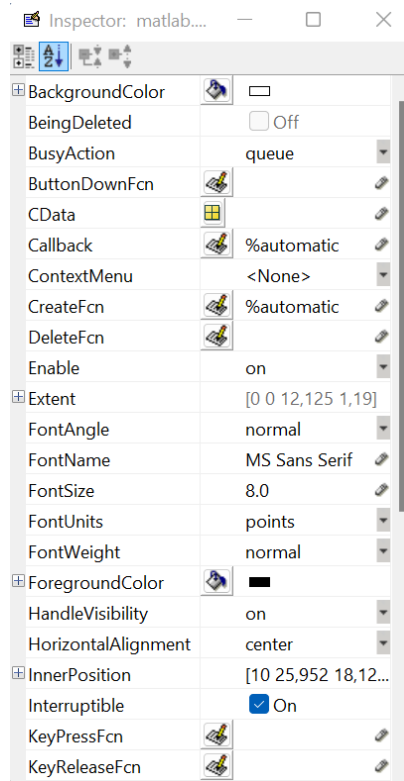


Ilustración 32. Entorno Property Inspector.

Una de las opciones más importantes es View Callbacks, la cual al ejecutarla se abre el archivo.m asociado al diseño creado y se posiciona en la parte del programa que corresponde a la subrutina que se ejecutará cuando se realice una determinada acción sobre el elemento que está siendo editado. Por ejemplo, si se clicka *View Callbacks>>Callbacks* en el Pop-up menu, en la Ilustración 33 se observa que se nos ubicará en la siguiente parte del programa:

```

% --- Executes on selection change in popupmenu1.
function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
  
```

Ilustración 33. Función Callback del Pop-up menú 1.

## 11.8. Funcionamiento de una aplicación GUI

Una aplicación GUIDE está formada por dos archivos: *.m* y *.fig*. El archivo *.m* contiene el código con los correspondientes botones de control de la interfaz, y el archivo *.fig* contiene los elementos gráficos.

Cada vez que se añade un elemento nuevo en la interfaz gráfica, se genera código nuevo correspondiente en el archivo *.m*. Para ejecutar una interfaz gráfica y si se le ha nombrado con

el nombre *programa.fig*, se ha de escribir >>programa en la ventana de comandos de Matlab o haciendo click derecho en el m-file y seleccionando la opción de Run.

### 11.9. Manejo de datos entre los elementos de la aplicación y el archivo .m

Cabe mencionar que los valores de las propiedades de los elementos como la posición, el string, el color... y los valores de las variables transitorias del programa se almacenan en una estructura, a los que se accede mediante un único *identificador* para todos ellos. Dicho identificador se asigna de la siguiente manera:

```
handles.output = hObject;
```

handles, es el identificador de los datos de la aplicación y es guardado con la siguiente instrucción:

```
guidata(hObject, handles);
```

guidata es la función que guarda las variables y propiedades de los elementos en la estructura de datos de la aplicación, por lo que en cada subrutina se debe escribir en la última línea el siguiente comando: guidata(hObject, handles); Con ello, se garantiza que cualquier cambio o asignación de variables o propiedades se almacene.

Como, por ejemplo, si dentro de una subrutina una operación da como resultado una variable *casa*, para poder utilizarla desde el programa o desde otra subrutina se ha de salvar de la siguiente forma:

```
handles.casa = casa;
```

```
guidata(hObject, handles);
```

La primera línea crea la variable *casa* a la estructura de datos de la aplicación apuntado por *handles* y la segunda línea graba el valor.

### 11.10. Sentencias get y set

La obtención y asignación de valores de los componentes se realiza mediante las sentencias get y set. Si se desea que la variable *u* tenga el valor del Slider, se ejecuta lo siguiente:

```
u = get(handles.slider1,'Value');
```

Para asignar el valor a la variable *u* al *statictext* etiquetada como text1 se escribe:

```
set(handles.text1,'String',u);
```

## 12. ANEXO I. Códigos del sistema Galileo

### 12.1. Códigos primarios

En este apartado se detallan los códigos primarios de cada una de las señales Galileo.

#### 12.1.1. E1-B y E1-C

Los códigos primarios de las componentes E1-B y E1-C tratan de 50 códigos primarios compuestos por números hexadecimales que se encuentran en el documento Galileo Signal Generation [8].

#### 12.1.2. E5a-I, E5a-Q, E5b-I, E5b-Q

La Ilustración 34 muestra un ejemplo de implementación estándar del método LFSR para la generación de secuencias M truncadas y combinadas. Se utilizan dos registros de desplazamiento paralelos: el registro base 1 y el registro base 2. La secuencia de salida del código primario es el OR exclusivo de las secuencias de salida del registro base 1 y 2, el desplazamiento entre estas dos secuencias es cero.

Cada registro de desplazamiento  $i$  ( $i=1$  para el registro base 1 e  $i=2$  para el registro base 2) de longitud R se retroalimenta con un conjunto particular de tomas de retroalimentación  $\{a_{i,j}\}_{j=1\dots R} = [a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,R}]$  y su contenido se representa mediante un vector  $\{c_{i,j}\}_{j=1\dots R} = [c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,R}]$ . Para el truncamiento a la longitud de código primario N, el contenido de los dos registros de desplazamiento se reinicia (reset) después de N ciclos con los llamados valores de inicio  $\{s_{i,j}\}_{j=1\dots R} = [s_{i,1}, s_{i,2}, \dots, s_{i,R}]$ .

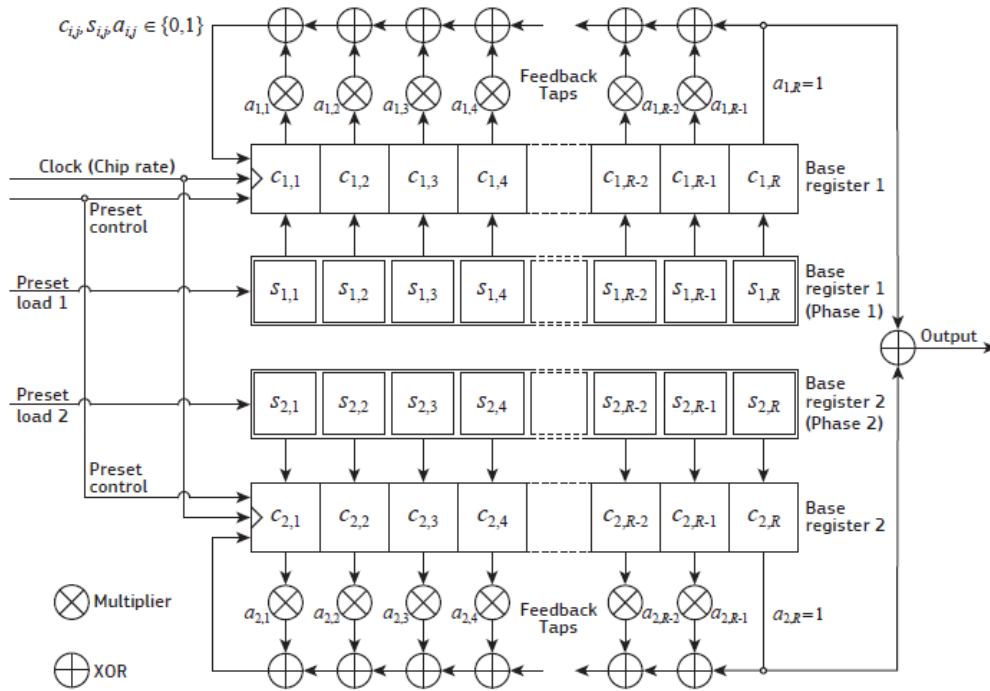


Ilustración 34. Generador de código basado en LFSR para secuencias  $M$  truncadas y combinadas [9].

Los códigos primarios E5a-I, E5a-Q, E5b-I y E5b-Q se generan mediante LFSR, y los parámetros definidos en la Tabla 25. Obsérvese que cada conjunto de códigos para cada componente de la señal comprende 50 miembros.

Component	Shift Register Length (polynomial order)	Feedback Taps (octal)	
		Register 1	Register 2
E5a-I	14	40503	50661
E5a-Q	14	40503	50661
E5b-I	14	64021	51445
E5b-Q	14	64021	43143

Tabla 25. Especificaciones de los códigos primarios E5 [9].

La transformación entre la notación octal y la descripción vectorial  $\{a_{i,j}\}$  para las posiciones de la toma de retroalimentación se define a continuación y se ilustra con un ejemplo en la Ilustración 35. Después de transferir la notación vectorial octal a la notación binaria, los bits se cuentan de derecha a izquierda comenzando con  $j = 0$  desde el LSB y terminando con  $j = R$  en el MSB, donde  $R$  es la longitud del registro de código. A continuación, el bit  $j$  se aplica para la toma de retroalimentación  $a_{i,j}$  para  $j = 1, \dots, R$ , como se muestra en la Ilustración 34. Nota:  $a_{i,R}$  es siempre uno y  $a_{i,0}$  no se considera en la toma de retroalimentación del registro.

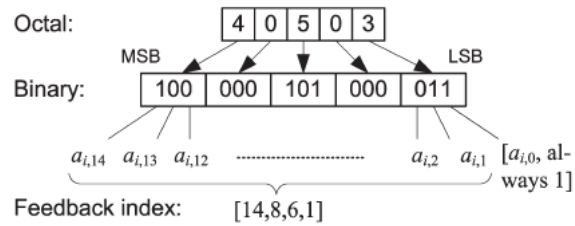


Ilustración 35. Representación de la toma de retroalimentación del registro de códigos (E5a-I) [9].

Los valores de inicio de todas las celdas del registro base 1, en notación de nivel lógico, son "1" para todos los códigos de E5a-I, E5a-Q, E5b-I y E5b-Q. Los valores de inicio del registro base 2 se proporcionan en las secciones siguientes. La transformación entre la notación octal y la descripción vectorial  $\{s_{i,j}\}$  para los valores de inicio del registro se define como sigue y se ilustra con un ejemplo en la Ilustración 36. Después de transferir la notación octal en notación binaria, los bits se cuentan de derecha a izquierda comenzando con  $j=1$  (Nota: el valor de inicio diferente en comparación con la definición de los grifos de retroalimentación) desde el LSB y terminando con  $j=R$  en el MSB, donde R es la longitud del registro de código. Entonces el bit  $j$  se aplica al valor de inicio  $s_{i,j}$  para  $s_{i,j}$  for  $j = 1, \dots, R$ , como se muestra en la Ilustración 34. Nota: en este ejemplo el MSB es cero para completar la secuencia de valores binarios de 14 bits para que quepa en una secuencia de símbolos octales.

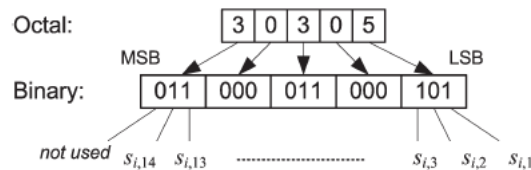


Ilustración 36. Representación de los valores de inicio para el registro base 2 (E5a-I) [9].

- Valor de inicio del registro base 2 para E5a-I

El valor de inicio del registro base 2 en forma octal es definido en la Tabla 26 para cada código primario E5a-I. Además, el formato hexadecimal convencional de los primeros 24 chips de código de los códigos primarios E5a-I también se indica en la tabla. Por ejemplo, los primeros 24 chips del código primario E5a-I N°1 de la Tabla 26 son 0 0 1 1 1 0 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1, el primer valor binario correspondiente al primer chip de código primario en el tiempo.

Code No	Start Value	Initial Sequence	Code No	Start Value	Initial Sequence
1	30305	3CEA9D	26	14401	9BFAC7
2	14234	9D8CF1	27	34727	18A25B
3	27213	45D1C8	28	22627	69A39F
4	20577	7A0133	29	30623	39B27D
5	23312	64D423	30	27256	454598
6	33463	23300D	31	01520	F2BC62
7	15614	91CEF2	32	14211	90DBC6
8	12537	AA82DC	33	31465	332827
9	01527	F2A17D	34	22164	6E2FCA
10	30236	3D84AE	35	33516	22C6D5
11	27344	446D38	36	02737	E881D9
12	07272	C514F2	37	21316	74C4DB
13	36377	0C0184	38	35425	13AB03
14	17046	8767E0	39	35633	119323
15	06434	CB8EFF	40	24655	594886
16	15405	93EBCD	41	14054	9F4D89
17	24252	5D55CE	42	27027	47A3C0
18	11631	B19B7C	43	06604	C9ED53
19	24776	5805FC	44	31455	334994
20	00630	F99EA1	45	34465	1B2A30
21	11560	B23CE5	46	25273	5513F3
22	17272	8515E8	47	20763	7831C1
23	27445	436822	48	31721	30B93A
24	31702	30F77B	49	17312	84D584
25	13012	A7D629	50	13277	A5029C

Tabla 26. Valores de inicio del registro base 2 y primer chip de código para E5a-1 [9].

- Valor de inicio del registro base 2 para E5a-Q

El valor de inicio del registro base 2 en formato octal es definido en la Tabla 27 y Tabla 28 para cada código primario E5a-Q. También se indica el formato hexadecimal de los primeros 24 chips de código.



Code No	Start Value	Initial Sequence	Code No	Start Value	Initial Sequence
1	25652	515537	26	20606	79E450
2	05142	D67539	27	11162	B63460
3	24723	58B2E5	28	22252	6D562B
4	31751	305914	29	30533	3A9010
5	27366	442710	30	24614	59CD72
6	24660	593CF8	31	07767	C0211A

Tabla 27. Valores de inicio del registro base 2 y primer chip de código para E5a-Q (1) [9].

Code No	Start Value	Initial Sequence	Code No	Start Value	Initial Sequence
7	33655	214AD7	32	32705	28EB96
8	27450	435EA6	33	05052	D7554B
9	07626	C1A7D5	34	27553	425126
10	01705	F0E94A	35	03711	E0DAFB
11	12717	A8C239	36	02041	EF79F2
12	32122	2EB63B	37	34775	18085D
13	16075	8F0A46	38	05274	D50CD8
14	16644	896DD4	39	37356	0447B9
15	37556	0245F1	40	16205	8DE877
16	02477	EB0160	41	36270	0D1FA0
17	02265	ED28B3	42	06600	C9FCF7
18	06430	CB9F5B	43	26773	48116D
19	25046	576592	44	17375	840BCC
20	12735	A88811	45	35267	152004
21	04262	DD3649	46	36255	0D4897
22	11230	B59F42	47	12044	AF6D25
23	00037	FF81F6	48	26442	4B7593
24	06137	CE8128	49	21621	71BB1B
25	04312	DCD55C	50	25411	53DA0E

Tabla 28. Valores de inicio del registro base 2 y primer chip de código para E5a-Q (2) [9].

- Valor de inicio del registro base 2 para E5b-I

El valor de inicio del registro base 2 en formato octal es definido en la Tabla 29 y Tabla 30 para cada código primario E5b-I. También se indica el formato hexadecimal de los primeros 24 chips de código.

Code No	Start Value	Initial Sequence	Code No	Start Value	Initial Sequence
1	07220	C5BEA1	26	25664	512FA9
2	26047	4F6248	27	21403	73F36B
3	00252	FD5488	28	32253	2D5317
4	17166	86277B	29	02337	EC8390
5	14161	9E39D5	30	30777	380374
6	02540	EA7EDE	31	27122	46B4DE
7	01537	F28321	32	22377	6C01D9
8	26023	4FB0C9	33	36175	0E0BB6
9	01725	F0AB64	34	33075	2708C7
10	20637	79833B	35	33151	265B55
11	02364	EC2D91	36	13134	A68E1C

Tabla 29. Valores de inicio del registro base 2 y primer chip de código para E5b-1 (1) [9].

Code No	Start Value	Initial Sequence	Code No	Start Value	Initial Sequence
12	27731	409B11	37	07433	C3916E
13	30640	397E16	38	10216	BDC595
14	34174	1E0FCD	39	35466	1327D0
15	06464	CB2F5A	40	02533	EA921F
16	07676	C1079A	41	05351	D45869
17	32231	2D9BC6	42	30121	3EB98A
18	10353	BC5146	43	14010	9FDE16
19	00755	F848B0	44	32576	2A04CA
20	26077	4F01E8	45	30326	3CA56F
21	11644	B16C9B	46	37433	03928A
22	11537	B2827D	47	26022	4FB5B9
23	35115	16C809	48	35770	101EC7
24	20452	7B570F	49	06670	C91D4F
25	34645	1969C0	50	12017	AFC22B

Tabla 30. Valores de inicio del registro base 2 y primer chip de código para E5b-1 (2) [9].

- Base Register 2 Start Value for E5b-Q

El valor de inicio del registro base 2 en formato octal es definido en la Tabla 31 y Tabla 32 para cada código primario E5b-Q. También se indica el formato hexadecimal de los primeros 24 chips de código.

Code No	Start Value	Initial Sequence	Code No	Start Value	Initial Sequence
1	03331	E49AF0	26	20134	7E8CFB
2	06143	CE701F	27	11262	B536C3
3	25322	54B709	28	10706	B8E68C
4	23371	641AB1	29	34143	1E7272
5	00413	FBD0AE	30	11051	B75B69
6	36235	0D8BC9	31	25460	533F65
7	17750	805FA5	32	17665	812B41
8	04745	D86BA0	33	32354	2C4DE1
9	13005	A7E921	34	21230	759E2C
10	37140	067E55	35	20146	7E6434
11	30155	3E4B58	36	11362	B43640
12	20237	7D82FB	37	37246	05671B
13	03461	E33BC2	38	16344	8C6FE0
14	31662	31372C	39	15034	978D4E
15	27146	46676F	40	25471	5319BF
16	05547	D2613E	41	25646	516499
17	02456	EB443C	42	22157	6E4292

Tabla 31. Valores de inicio del registro base 2 y primer chip de código para E5b-Q (1) [9].

Code No	Start Value	Initial Sequence	Code No	Start Value	Initial Sequence
18	30013	3FD0B1	43	04336	DC86A3
19	00322	FCB7CF	44	16356	8C46BE
20	10761	B83815	45	04075	DF0B03
21	26767	48224A	46	02626	E9A5B2
22	36004	0FEE25	47	11706	B0E553
23	30713	38D33B	48	37011	07DBAC
24	07662	C135B9	49	27041	4778E4
25	21610	71DE13	50	31024	37AF4F

Tabla 32. Valores de inicio del registro base 2 y primer chip de código para E5bQI (2) [9].

### 12.1.3. E6

El código primario de la señal E6 se obtiene mediante los polinomios y estados iniciales que se muestran en la Tabla 33.

E6-B code (5115 bits, 1msec, 13-stage Gold code)	
Polynomial_1	$X^{13} + X^{10} + X^8 + X^5 + 1$
Initial State_1	1111111111111
Polynomial_2	$X^{13} + X^{12} + X^{11} + X + 1$
Initial State_2	0101011100000
E6-C code (5115 bits, 1msec, 14-stage Gold code)	
Polynomial_1	$X^{14} + X^{11} + X^6 + X + 1$
Initial State_1	1111111111111
Polynomial_2	$X^{14} + X^8 + X^7 + X^4 + X^3 + X^2 + 1$
Initial State_2	01101000011101

Tabla 33. Generación de código de la señal E6 [11].

## 12.2. Códigos secundarios

Los códigos secundarios son secuencias fijas definidas en notación hexadecimal en la Tabla 34, Tabla 35, Tabla 36, Tabla 37 y Tabla 38. Para los códigos secundarios cuya longitud no es divisible por cuatro (sólo en el caso del CS251), el último símbolo hexadecimal (el más a la derecha) se obtiene rellenando el último grupo de chips de código con ceros al final en el tiempo (a la derecha), para alcanzar una longitud final de 4 símbolos binarios. Estas tablas proporcionan también los identificadores de los códigos junto con las longitudes de los mismos, el número de símbolos hexadecimales y el número de ceros rellenados.

Por ejemplo, el código secundario CS251 de la Tabla 34 corresponde a la secuencia binaria "0 0 1 1 0 0 0 0 1 0 1 0 1 0 1 0", correspondiendo el primer valor binario al primer chip de código secundario en el tiempo.

Code Identifier	Code Length	No. of Hexadec. Symbols	Number of Filled up Zeros	Code Sequence
CS4 <sub>1</sub>	4	1	0	E
CS20 <sub>1</sub>	20	5	0	842E9
CS25 <sub>1</sub>	25	7	3	380AD90
CS100 <sub>1</sub>	100	25	0	83F6F69D8F6E15411FB8C9B1C
CS100 <sub>2</sub>	100	25	0	66558BD3CE0C7792E83350525
CS100 <sub>3</sub>	100	25	0	59A025A9C1AF0651B779A8381
CS100 <sub>4</sub>	100	25	0	D3A32640782F7B18E4DF754B7
CS100 <sub>5</sub>	100	25	0	B91FCAD7760C218FA59348A93
CS100 <sub>6</sub>	100	25	0	BAC77E933A779140F094FBF98

Tabla 34. Secuencias de código secundario parte 1.1 [9].

Code Identifier	Code Length	No. of Hexadec. Symbols	Number of Filled up Zeros	Code Sequence
CS100 <sub>7</sub>	100	25	0	537785DE280927C6B58BA6776
CS100 <sub>8</sub>	100	25	0	EFCAB4B65F3B531ECA22257E2
CS100 <sub>9</sub>	100	25	0	79FBCAE838475EA5584BEFC9B
CS100 <sub>10</sub>	100	25	0	CA5170FEA3A810EC606B66494
CS100 <sub>11</sub>	100	25	0	1FC32410652A2C49BD845E567
CS100 <sub>12</sub>	100	25	0	FE0A9A7AFDAC44E42CB95D261
CS100 <sub>13</sub>	100	25	0	B03062DC2B71995D5AD8B7DBE
CS100 <sub>14</sub>	100	25	0	F6C398993F598E2DF4235D3D5
CS100 <sub>15</sub>	100	25	0	1BB2FB8B5BF24395C2EF3C5A1
CS100 <sub>16</sub>	100	25	0	2F920687D238CC7046EF6AFC9
CS100 <sub>17</sub>	100	25	0	34163886FC4ED7F2A92EFD8B8
CS100 <sub>18</sub>	100	25	0	66A872CE47833FB2DFD5625AD
CS100 <sub>19</sub>	100	25	0	99D5A70162C920A4BB9DE1CAB
CS100 <sub>20</sub>	100	25	0	81D71BD6E069A7ACCBEDC66CA
CS100 <sub>21</sub>	100	25	0	A654524074A9E6780DB9D3EC6
CS100 <sub>22</sub>	100	25	0	C3396A101BEDAF623CFC5BB37
CS100 <sub>23</sub>	100	25	0	C3D4AB211DF36F2111F2141CD
CS100 <sub>24</sub>	100	25	0	3DF25EAE761739265AF145C1
CS100 <sub>25</sub>	100	25	0	994909E0757D70CDE389102B5
CS100 <sub>26</sub>	100	25	0	B938535522D119F40C25FDAEC
CS100 <sub>27</sub>	100	25	0	C71AB549C0491537026B390B7
CS100 <sub>28</sub>	100	25	0	0CDB8C9E7B53F55F580A0597B
CS100 <sub>29</sub>	100	25	0	61C5FA252F1AF81144766494F
CS100 <sub>30</sub>	100	25	0	626027778FD3C68B4BAA7A59D
CS100 <sub>31</sub>	100	25	0	E745412FF53DEBD03F1C9A633
CS100 <sub>32</sub>	100	25	0	3592AC083F3175FA724639098
CS100 <sub>33</sub>	100	25	0	52284D941C3DCAF2721DDB1FD
CS100 <sub>34</sub>	100	25	0	73B3D8F0AD55DF4FE814ED890
CS100 <sub>35</sub>	100	25	0	94BF16C83BD7462F6498E0282
CS100 <sub>36</sub>	100	25	0	ABC3DE1AC668089B084583579
CS100 <sub>37</sub>	100	25	0	E23FFC2DD2C14388AD8D6BEC8
CS100 <sub>38</sub>	100	25	0	F2ACB71CDF89DDC0685960D2B
CS100 <sub>39</sub>	100	25	0	06191EC1F622A77A526868BA1
CS100 <sub>40</sub>	100	25	0	22D6E2A768E5F35FFC8E01796
CS100 <sub>41</sub>	100	25	0	25310A06675EB271F2A09EA1D
CS100 <sub>42</sub>	100	25	0	9F7993C621D4BEC81A0535703
CS100 <sub>43</sub>	100	25	0	D62999EACF1C99083C084A417

Tabla 35. Secuencias de código secundario parte 1.2 [9].

Code Identifier	Code Length	No. of Hexadec. Symbols	Number of Filled up Zeros	Code Sequence
CS100 <sub>44</sub>	100	25	0	F665A7EA441BAA4EA0D01078C
CS100 <sub>45</sub>	100	25	0	46F3D3043F24CDEABD6F79543
CS100 <sub>46</sub>	100	25	0	E2E3E8254616BD96CEFC6A651A
CS100 <sub>47</sub>	100	25	0	E548231A82F9A01A19DB5E1B2
CS100 <sub>48</sub>	100	25	0	265C7F90A16F49EDE2AA706C8
CS100 <sub>49</sub>	100	25	0	364A3A9EB0F0481DA0199D7EA
CS100 <sub>50</sub>	100	25	0	9810A7A898961263A0F749F56

Tabla 36. Secuencias de código secundario parte 1.3 [9].

Code Identifier	Code Length	No. of Hexadec. Symbols	Number of Filled up Zeros	Code Sequence
CS100 <sub>51</sub>	100	25	0	CFF914EE3C6126A49FD5E5C94
CS100 <sub>52</sub>	100	25	0	FC317C9A9BF8C6038B5CADAB3
CS100 <sub>53</sub>	100	25	0	A2EAD7486F9866E414393F239
CS100 <sub>54</sub>	100	25	0	72F2B1180FA68802C884DF997
CS100 <sub>55</sub>	100	25	0	13E3AE93BC52391D09E84A982
CS100 <sub>56</sub>	100	25	0	77C04202B91822C6D3469768E
CS100 <sub>57</sub>	100	25	0	FEBC592DD7C69AB103D08B29C
CS100 <sub>58</sub>	100	25	0	0B494077E7C66FB6C51942A77
CS100 <sub>59</sub>	100	25	0	DD0E321837A3D52169B7B577C
CS100 <sub>60</sub>	100	25	0	43DEA90EA6C483E7990C3223F
CS100 <sub>61</sub>	100	25	0	0366AB33F0167B6FA979DAE18
CS100 <sub>62</sub>	100	25	0	99CC8BFAB1242CBE31E18D52D
CS100 <sub>63</sub>	100	25	0	A3466923CEFD451EC0FCED22
CS100 <sub>64</sub>	100	25	0	1A5271F22A6F9A8D76E79B7F0
CS100 <sub>65</sub>	100	25	0	3204A6BB91B49D1A2D3857960
CS100 <sub>66</sub>	100	25	0	32F83ADD43B599CBFB8628E5B
CS100 <sub>67</sub>	100	25	0	3871FB0D89DB77553EB613CC1
CS100 <sub>68</sub>	100	25	0	6A3CBDF2D64D17E02773C645
CS100 <sub>69</sub>	100	25	0	28CD09889A1D7FC219F2EDE3B
CS100 <sub>70</sub>	100	25	0	3E49467F4D428089942CD6F8C
CS100 <sub>71</sub>	100	25	0	658E336DCFD9809F86D54A501
CS100 <sub>72</sub>	100	25	0	ED4284F345170CF77268C8584
CS100 <sub>73</sub>	100	25	0	29ECCE910D832CAF15E3DF5D1
CS100 <sub>74</sub>	100	25	0	456CCF7FE9353D50E87A708FA
CS100 <sub>75</sub>	100	25	0	FB757CC9E18CBC02BF1B8489A
CS100 <sub>76</sub>	100	25	0	5686229A8D98224BC426BC7FC

Tabla 37. Secuencias de código secundario parte 2.1 [9].

Code Identifier	Code Length	No. of Hexadec. Symbols	Number of Filled up Zeros	Code Sequence
CS100 <sub>77</sub>	100	25	0	700A2D325EA14C4B7B7AA8338
CS100 <sub>78</sub>	100	25	0	1210A330B4D3B507D854CBA3F
CS100 <sub>79</sub>	100	25	0	438EE410BD2F7DBCD85565BA
CS100 <sub>80</sub>	100	25	0	4B9764CC455AE1F61F7DA432B
CS100 <sub>81</sub>	100	25	0	BF1F45FDDA3594ACF3C4CC806
CS100 <sub>82</sub>	100	25	0	DA425440FE8F6E2C1188EC1A4
CS100 <sub>83</sub>	100	25	0	EE2C8057A7C16999AFA33FED1
CS100 <sub>84</sub>	100	25	0	2C8BD7D8395C61DFA96243491
CS100 <sub>85</sub>	100	25	0	391E48B6B8C43E98150CDDCADA
CS100 <sub>86</sub>	100	25	0	399F72A9EADB42C90C3ECF7F0
CS100 <sub>87</sub>	100	25	0	93031FDEA588F88E83951270C
CS100 <sub>88</sub>	100	25	0	BA8061462D873705E95D5CB37
CS100 <sub>89</sub>	100	25	0	D24188F88544EB121E963FD34
CS100 <sub>90</sub>	100	25	0	D5F6A88B081D8F383825A4DCA
CS100 <sub>91</sub>	100	25	0	0FA4A205F0D76088D08EAF267
CS100 <sub>92</sub>	100	25	0	272E909FAEBC65215E263E258
CS100 <sub>93</sub>	100	25	0	3370F35A674922828465FC816
CS100 <sub>94</sub>	100	25	0	54EF96116D4A0C8DB0E07101F
CS100 <sub>95</sub>	100	25	0	DE347C7B27FADC48EF1826A2B
CS100 <sub>96</sub>	100	25	0	01B16ECA6FC343AE08C5B8944
CS100 <sub>97</sub>	100	25	0	1854DB743500EE94D8FC768ED
CS100 <sub>98</sub>	100	25	0	28E40C684C87370CD0597FAB4
CS100 <sub>99</sub>	100	25	0	5E42C19717093353BCAAF4033
CS100 <sub>100</sub>	100	25	0	64310BAD8EB5836E38646AF01

Tabla 38. Secuencias de código secundario parte 2.2 [9].

### Asignación de los códigos secundarios

La asignación de los códigos secundarios de los componentes de la señal se realiza según la Tabla 39 y Tabla 40. Para los códigos secundarios de 4, 20 y 25 bits se utiliza el mismo código para todos los códigos primarios asociados. Para los códigos de 100 bits, se asigna un código secundario independiente para cada código primario.

Component	Secondary Code Assignment
E5a-I	CS20 <sub>1</sub>
E5a-Q	CS100 <sub>1-50</sub>
E5b-I	CS4 <sub>1</sub>
E5b-Q	CS100 <sub>51-100</sub>
E6-B	N/A

Tabla 39. Asignación de los códigos secundarios (1) [9].

Component	Secondary Code Assignment
E6-C	CS100 <sub>1-50</sub>
E1-B	N/A
E1-C	CS25 <sub>1</sub>

Tabla 40. Asignación de los códigos secundarios (2) [9].



## 13. ANEXO II. Requisitos de instalación y Manual de usuario

En los siguientes apartados se detalla información sobre la interfaz gráfica, para que al usuario le resulte sencillo el manejo del programa.

### 13.1. Objetivo

Poder simular y representar las señales del sistema Galileo con el objetivo de que alumnos del grado de Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación utilicen el programa para aprender la configuración de cada señal.

### 13.2. Requerimientos

Se detalla lo necesario para que el programa creado pueda ser ejecutado:

- Matlab: versión utilizada MATLAB 9.9: R2020b.
- Paquetes de Matlab:
  - Signal Processing Toolbox
  - DSP System Toolbox
  - Communications Toolbox
  - Simulink
  - System Identification Toolbox
  - Text Analytics Toolbox
- Sistema operativo:
  - Windows: Windows 11, Windows 10 (version 1909 o adelante).
  - Mac: macOS Monterey (12), macOS Big Sur (11.6), macOS Catalina (10.15.7).
  - Linux: Ubuntu 20.04 LTS, Ubuntu 18.04 LTS, Debian 10, Red Hat Enterprise Linux 8 (minimum 8.1), Red Hat Enterprise Linux 7 (minimum 7.6), SUSE Linux Enterprise Desktop 12 (minimum SP2), SUSE Linux Enterprise Desktop 15, SUSE Linux Enterprise Server 12 (minimum SP2), SUSE Linux Enterprise Server 15.
- Procesador:
  - Windows, Mac, Linux:
    - Mínimo: any Intel or AMD x86-64 processor.
- RAM:
  - Windows, Mac, Linux:
    - Mínimo: 4GB.
    - Recomendado: 8GB.
- Almacenamiento:
  - Windows: 3.6GB.
  - Mac: 3.5GB.

- Linux: 3.7GB.

### 13.3. Manual de usuario

Primeramente, nos encontramos con la Ilustración 37 al ejecutar <<guide en Matlab.

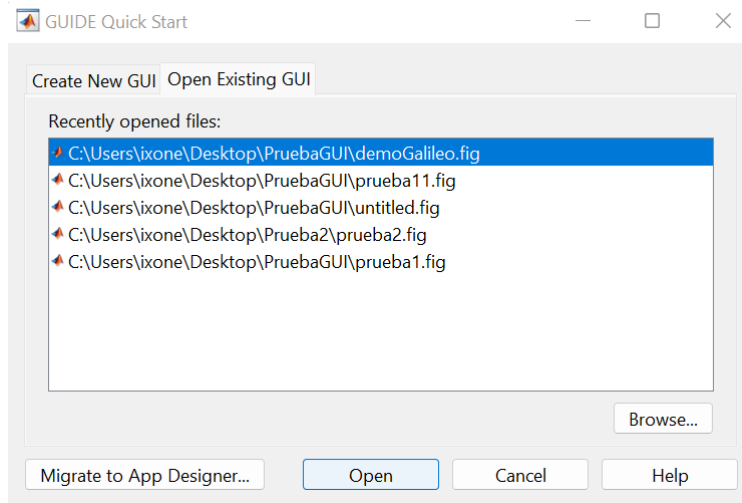


Ilustración 37. Inicio rápido de GUIDE.

Se seleccionará la que está marcada en azul ya que es la versión definitiva que se ha creado. A continuación, aparecerá en pantalla la siguiente ventana emergente de la Ilustración 38. Como se puede observar, está compuesta de diferentes apartados: el tipo de señal Galileo, la representación gráfica del código PRN (en tiempo y en frecuencia), la representación gráfica de los datos (en frecuencia y en datos), la representación gráfica de las subportadoras, un recuadro donde se explican cosas relevantes de la configuración de la señal y, por último, una gráfica más grande donde se representa la señal resultante de la combinación de las tres anteriores.

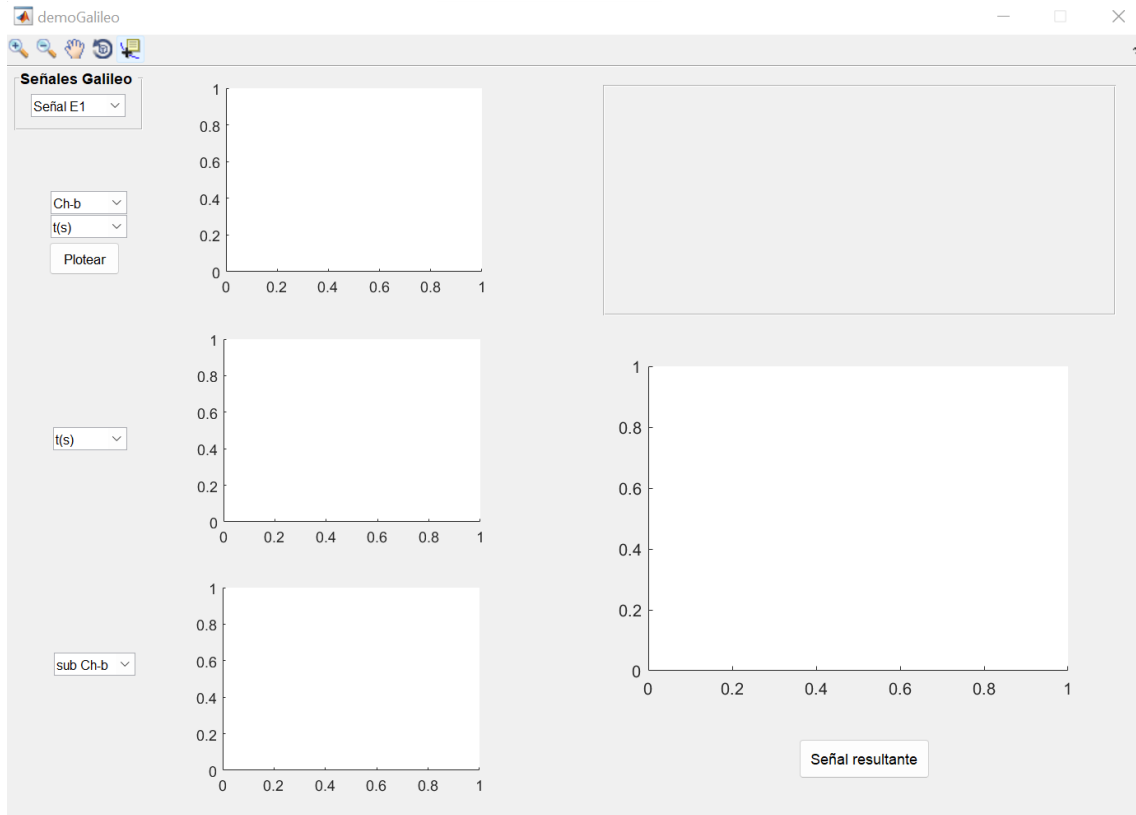
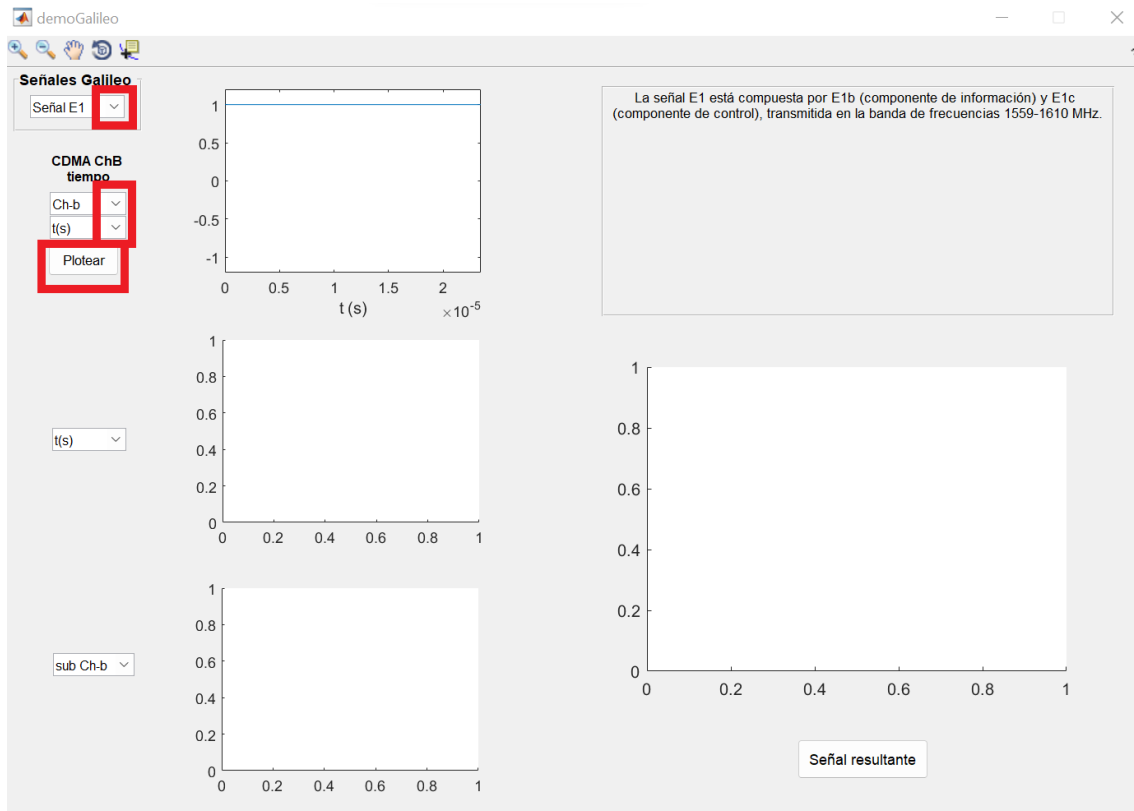


Ilustración 38. Inicio de la Interfaz Gráfica de Usuario.

Empezamos por las señales de los códigos PRN. Se puede ver que seleccionando la señal E1 y seleccionando su componente b de la señal en tiempo y dándole al botón de plotear, se plotea la señal del código PRN de la componente b en la gráfica de su derecha como se puede ver en la Ilustración 39. Además, en el recuadro de información, aparece algunos datos sobre la señal seleccionada E1.



*Ilustración 39. Representación gráfica del código PRN de la componente b de la señal E1 en dominio temporal.*

Al igual que la representación en el dominio temporal, se puede seleccionar el dominio frecuencial como se ve en la Ilustración 40.

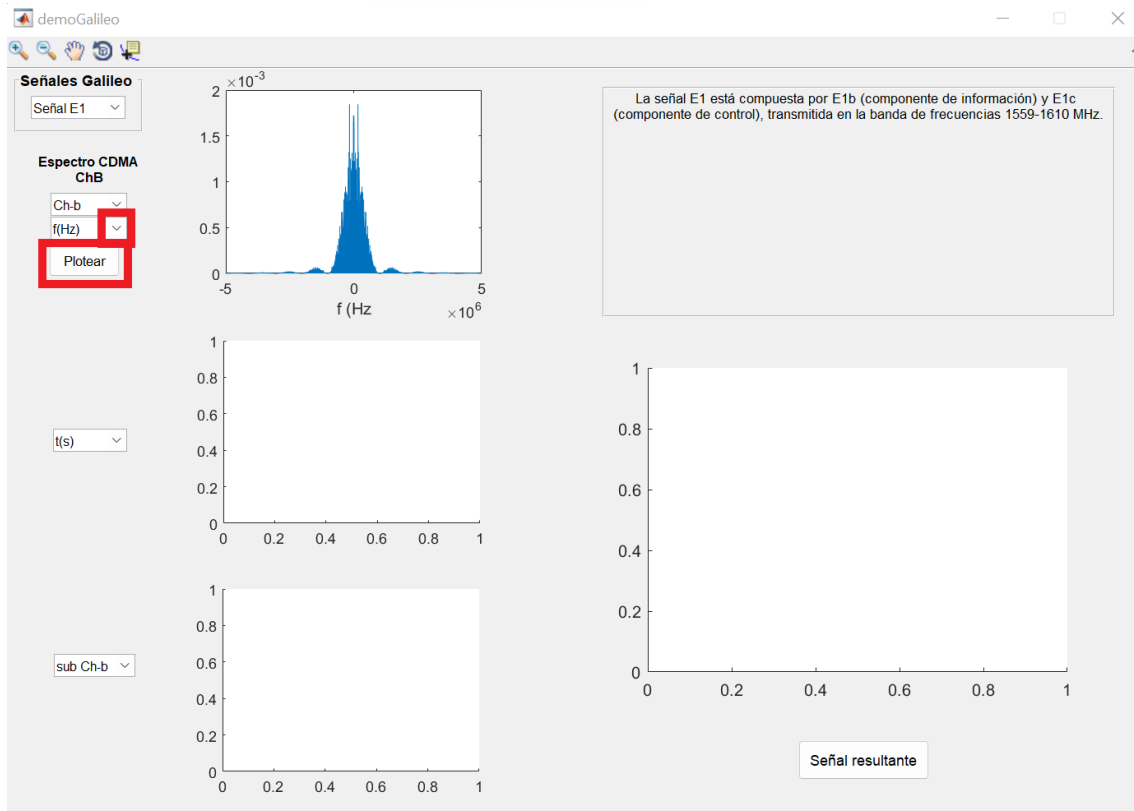


Ilustración 40. Representación gráfica del código PRN de la componente b de la señal E1 en dominio frecuencial.

Si seleccionamos la otra componente de la señal E1, es decir, la componente c, se representará gráficamente como se puede observar en la siguiente Ilustración 41.

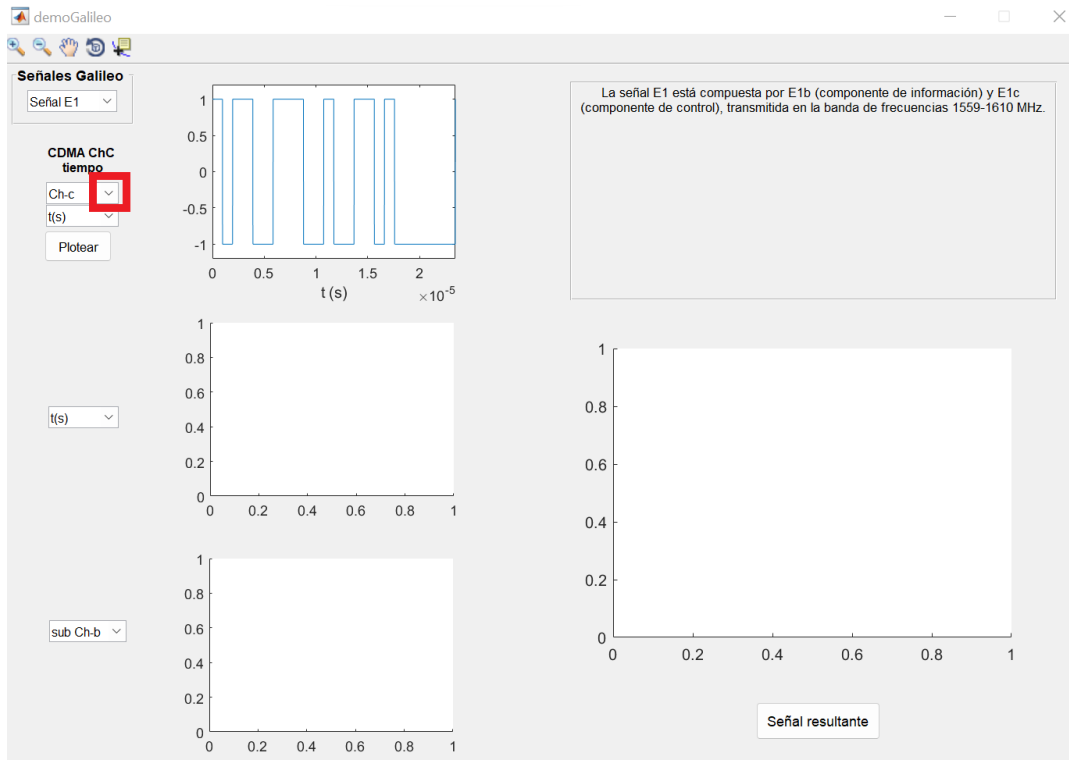


Ilustración 41. Representación gráfica del código PRN de la componente c de la señal E1 en dominio temporal.

Cambiando la selección del menú deslizable a f(Hz) y dándole al botón de plotear, se graficará la señal del código PRN de la componente c de la señal E1 como se ve en la Ilustración 42.

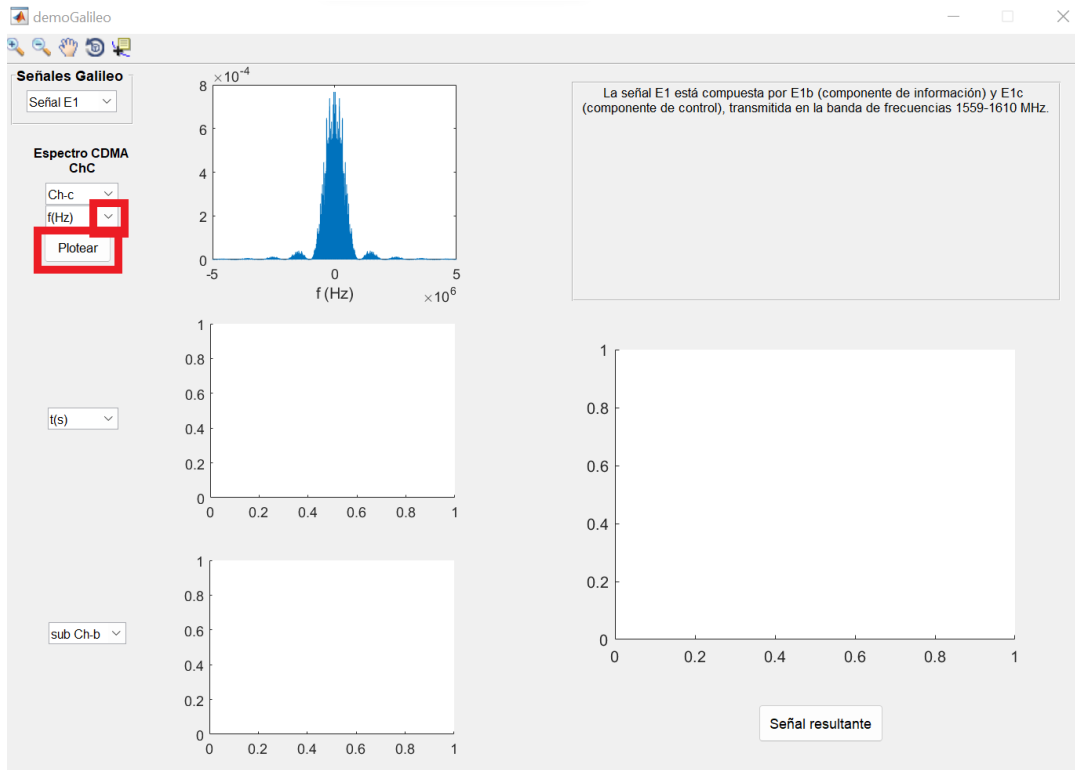


Ilustración 42. Representación gráfica del código PRN de la componente c de la señal E1 en dominio frecuencial.

Para graficar el código pseudoaleatorio de la señal E1 al completo, se debe seleccionar el código PRN de a y del b, para ello se selecciona la opción de Ch-b&c. Se puede plotear tanto en el dominio temporal como en el frecuencial, seleccionando t(s) o f(Hz) en el segundo menú deslizante. En la Ilustración 43 se muestra la representación gráfica en dominio temporal y en la Ilustración 44 en el dominio frecuencial.

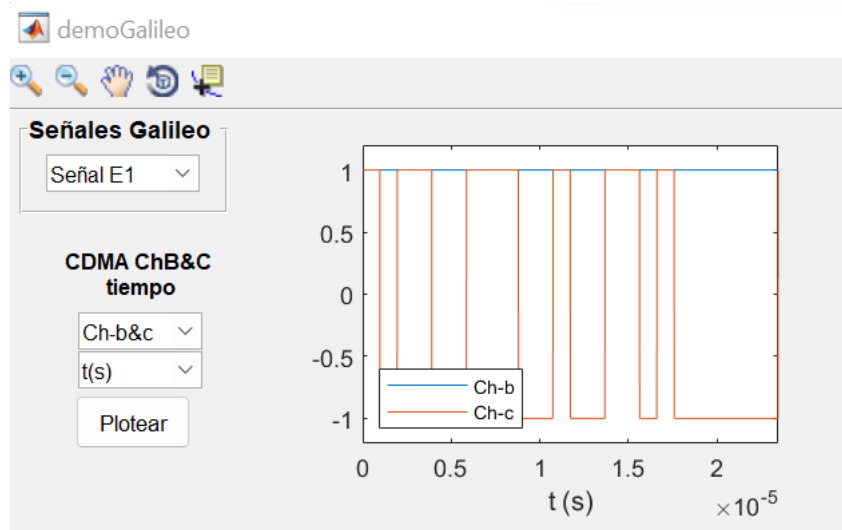


Ilustración 43. Representación gráfica del código PRN de las componentes b y c de la señal E1 en dominio temporal.

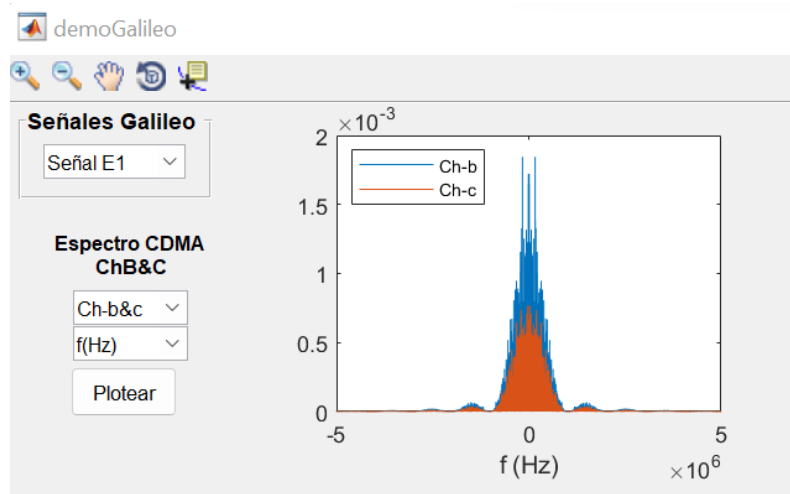


Ilustración 44. Representación gráfica del código PRN de las componentes b y c de la señal E1 en dominio frecuencial.

A continuación, vamos con las señales que representan los datos que se transmiten en cada componente. En el menú deslizante se hayan las opciones de t(s), f(Hz) y ---. Las dos primeras opciones representan las señales de los datos de la componente b, tanto en tiempo como en frecuencia. Por ello, el título del gráfico es bits o datos ChB, es decir, los datos de información del canal B. El canal C de la señal E1, es componente piloto, por lo que no transmite datos. La opción ---, es para no seleccionar los datos del canal B, para posibles combinaciones más adelante para la señal resultante.

Se selecciona la opción t(s) en la siguiente Ilustración 45 y se observa como en el recuadro de información aparece una frase informativa más.



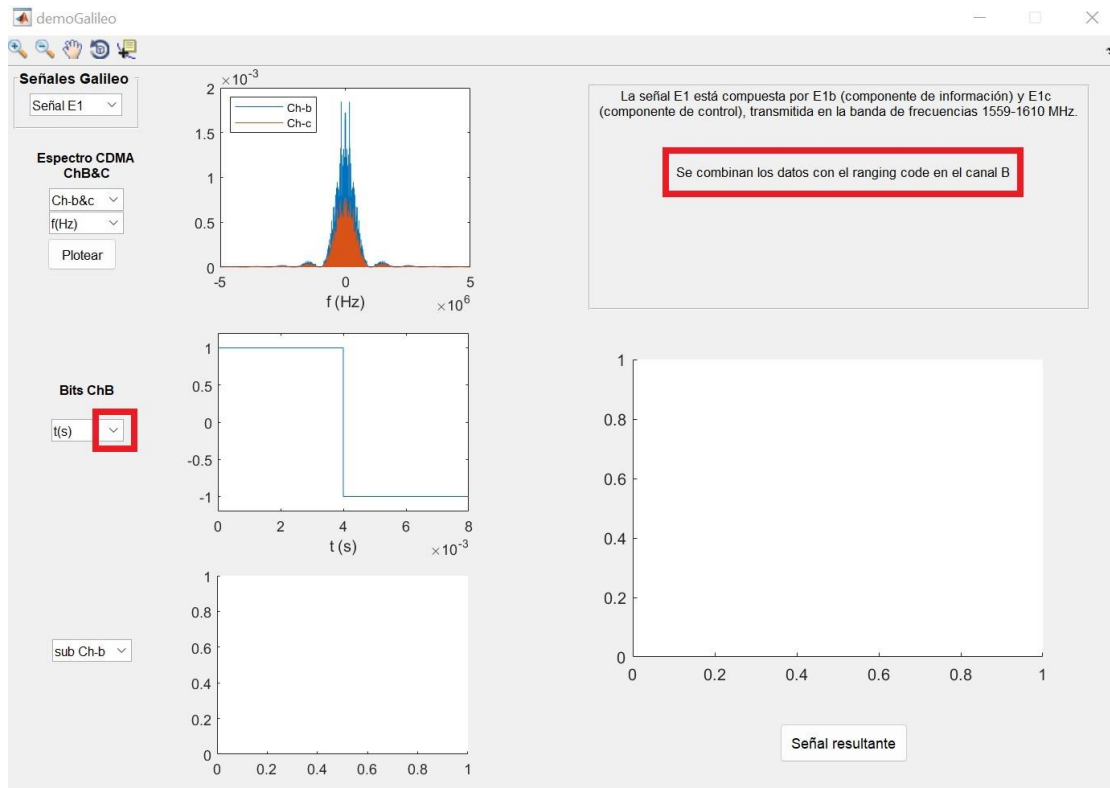


Ilustración 45. Representación gráfica de los datos del canal b de la señal E1 en dominio temporal.

Ilustración 46 se selecciona el dominio frecuencial de los datos.

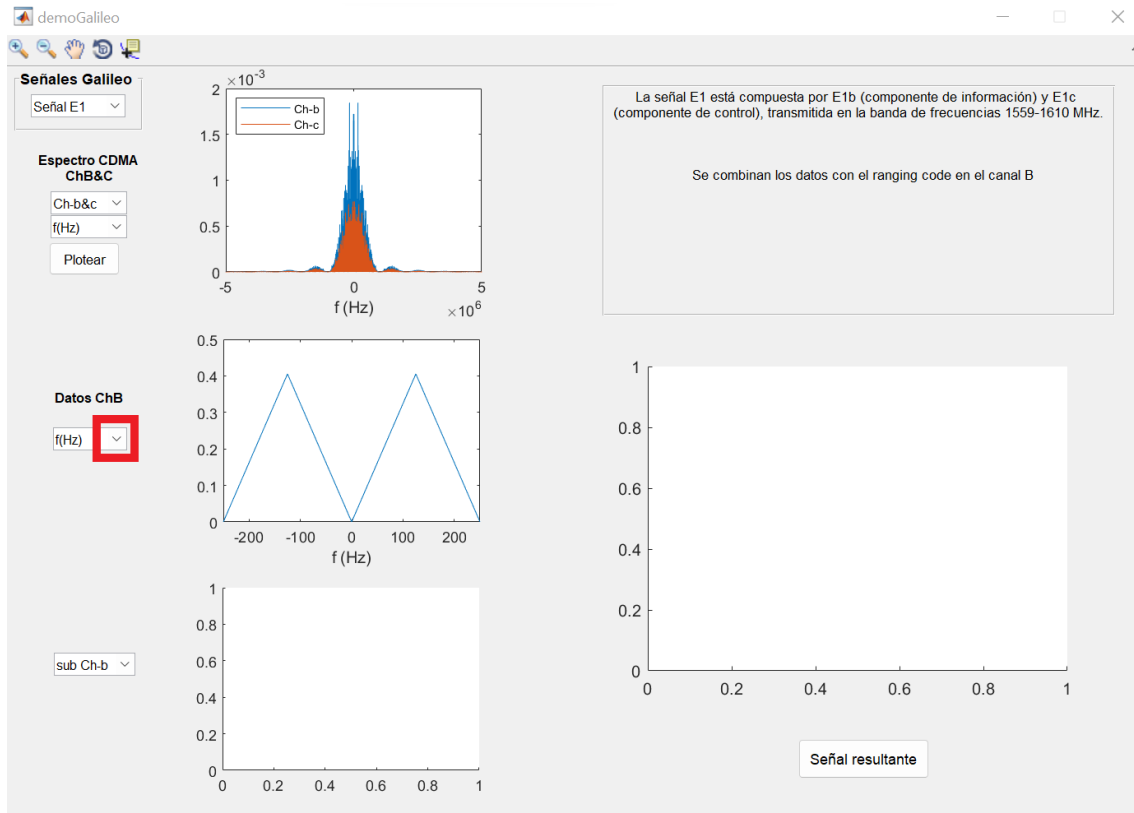


Ilustración 46. Representación gráfica de los datos del canal b de la señal E1 en dominio frecuencial.

Por último, tenemos la gráfica que representa las subportadoras que se usan en las diferentes modulaciones de cada una de las señales Galileo. Al seleccionar alguna opción en el menú deslizable, se puede destacar que, en el recuadro de información, aparece más información sobre la señal E1, en concreto, sobre la modulación utilizada en esta señal y sus respectivas subportadoras. Para modular la señal E1, se utilizan dos subportadoras, llamadas en nuestro programa como sub Ch-b y sub Ch-c (tiempo).

En la Ilustración 47 se ha seleccionado la subportadora Ch-b en el dominio temporal.

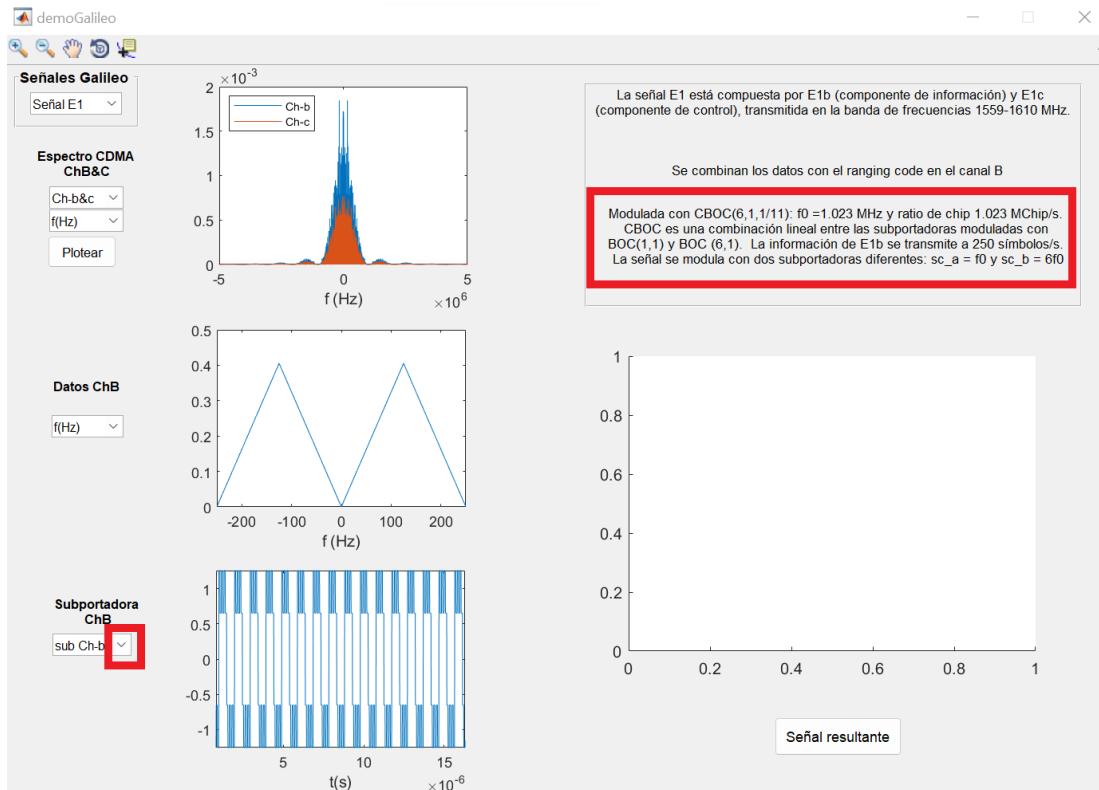


Ilustración 47. Representación gráfica de la subportadora b de la señal E1 en dominio temporal.

En la Ilustración 48, en cambio, en el menú deslizante se ha seleccionado la subportadora Ch-c.

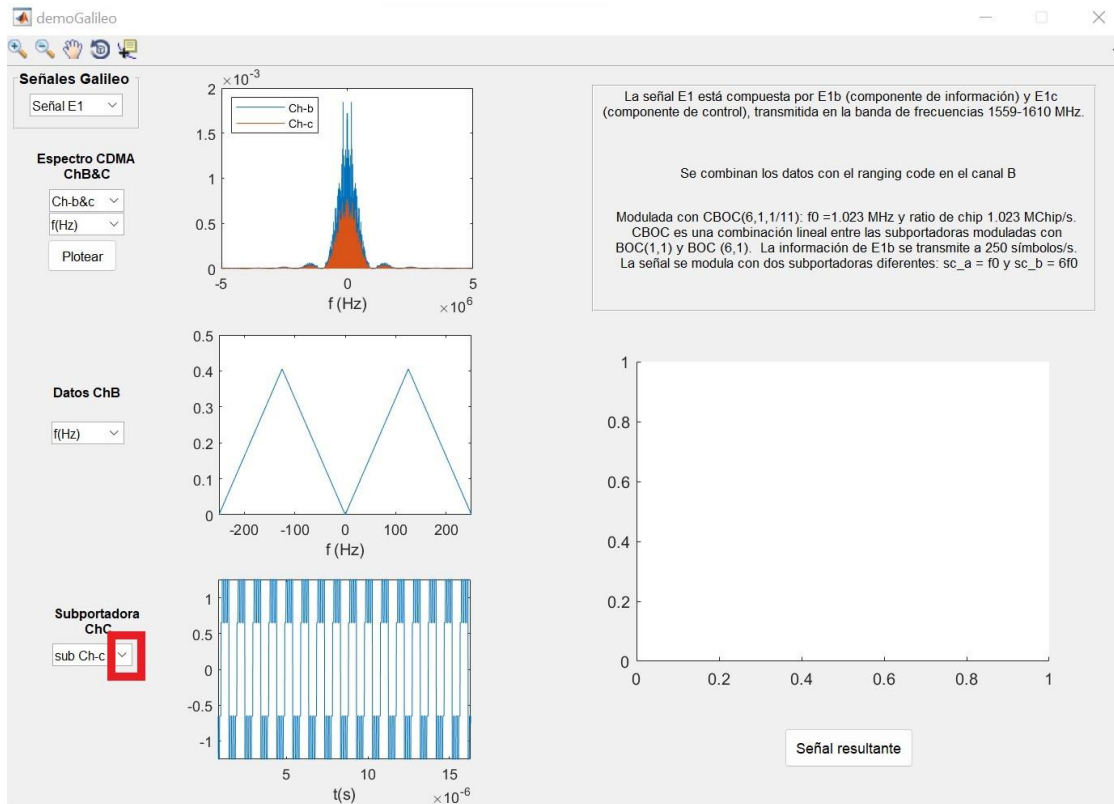


Ilustración 48. Representación gráfica de la subportadora c de la señal E1 en dominio temporal.

En esta gráfica también está la opción de ---, para no tener seleccionada ninguna subportadora y poder hacer diferentes combinaciones de la señal resultante.

Una vez explicadas las tres componentes importantes de la configuración de esta señal Galileo, se utilizará el botón de Señal resultante (abajo a la derecha). Dependiendo que señales de código PRN, de datos y de subportadoras tenemos seleccionadas, pulsando al botón Señal resultante, saldrá una señal final diferente.

En el caso de la Ilustración 49, se observa que sale un mensaje de error y por ello, no sale ninguna señal resultante en la gráfica final, debido a que el dominio elegido en el código PRN y en el de datos, no coincide. Además, se informa también de que la señal E1 completa se conforma de los códigos de rango de las dos componentes, así que para que se grafique alguna gráfica en la gráfica final se deberá tener seleccionado el CDMA de Chb&c.

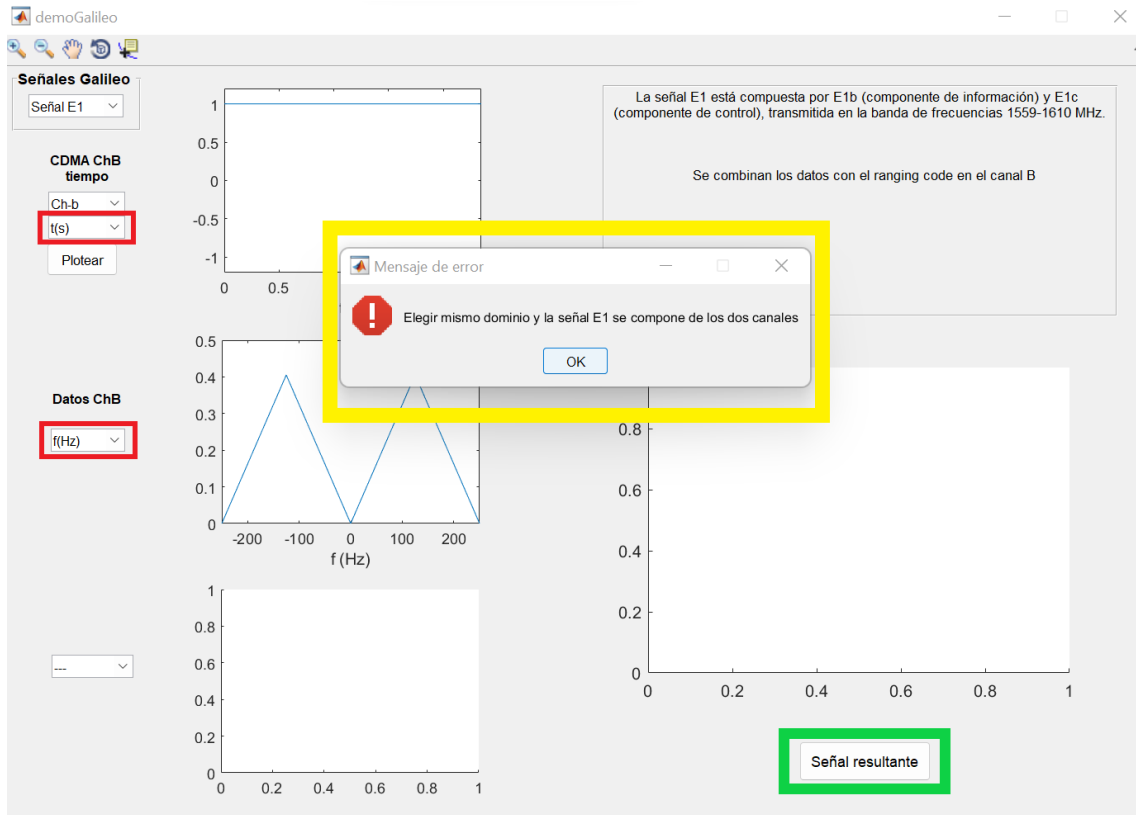


Ilustración 49. Representación gráfica del mensaje de error.

En la siguiente Ilustración 50, se ha elegido el dominio temporal, debido al mensaje de error anterior (pero se pueden hacer las combinaciones que se quiera y el programa te avisará de cualquier error). Con esto, seleccionando el código PRN de la señal E1 en tiempo (Chb&c) y los datos en dominio temporal también -sin introducir subportadoras- y pulsando la Señal resultante, se observa cómo se grafica en la gráfica final las señales CDMA y datos combinados.

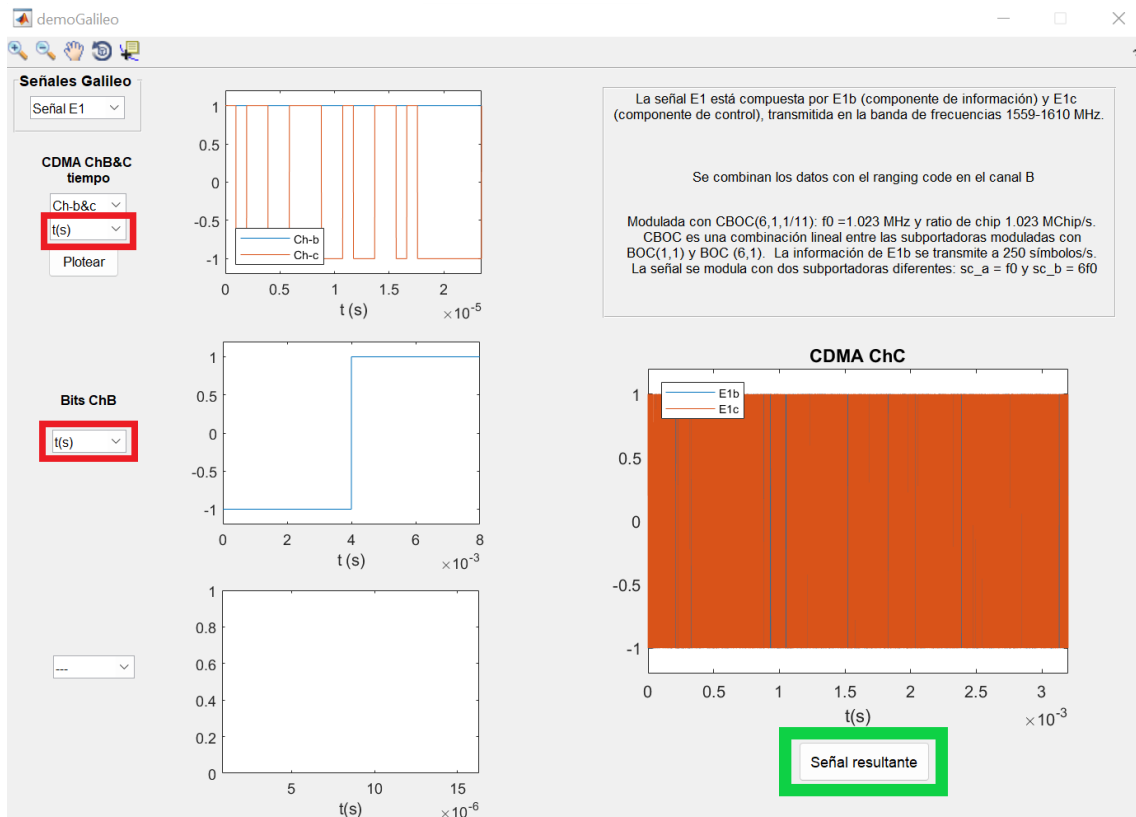


Ilustración 50. Representación gráfica de la señal resultante de la combinación de la secuencia CDMA y los datos.

Como se puede ver en la Ilustración 51, se han elegido tanto la señal del código pseudoaleatorio como el de datos en dominio frecuencial, y al presionar al botón de Señal resultante, sale la combinación del código CDMA de la señal E1 con los datos del canal B de la señal E1 en la gráfica final. Sin embargo, ha saltado un mensaje de aviso donde dice que para conseguir la correcta señal E1, se ha de modular y por ello, se ha de seleccionar una opción de las subportadoras.

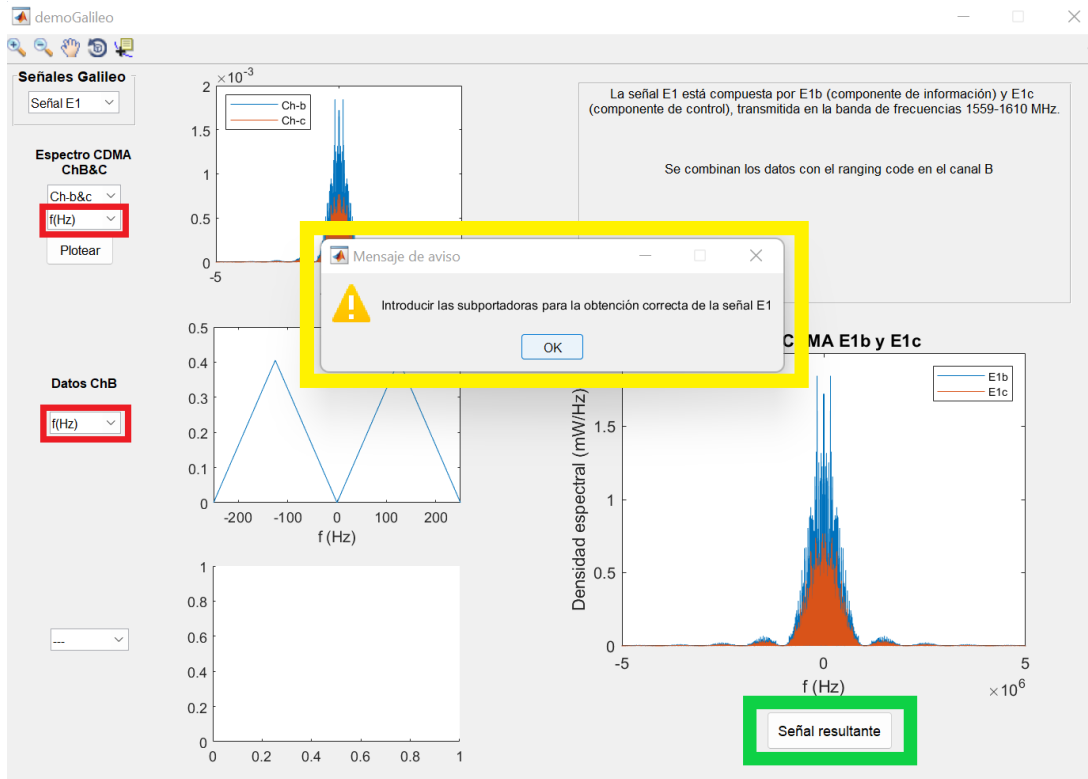


Ilustración 51. Representación gráfica del mensaje de aviso.

Cabe destacar que se da la opción de poder hacer zoom en las gráficas, moverlas con la mano, rotarlas y ponerles data tips. Esto se puede hacer con los símbolos que salen en la esquina arriba a la derecha donde se indican en la siguiente Ilustración 52.

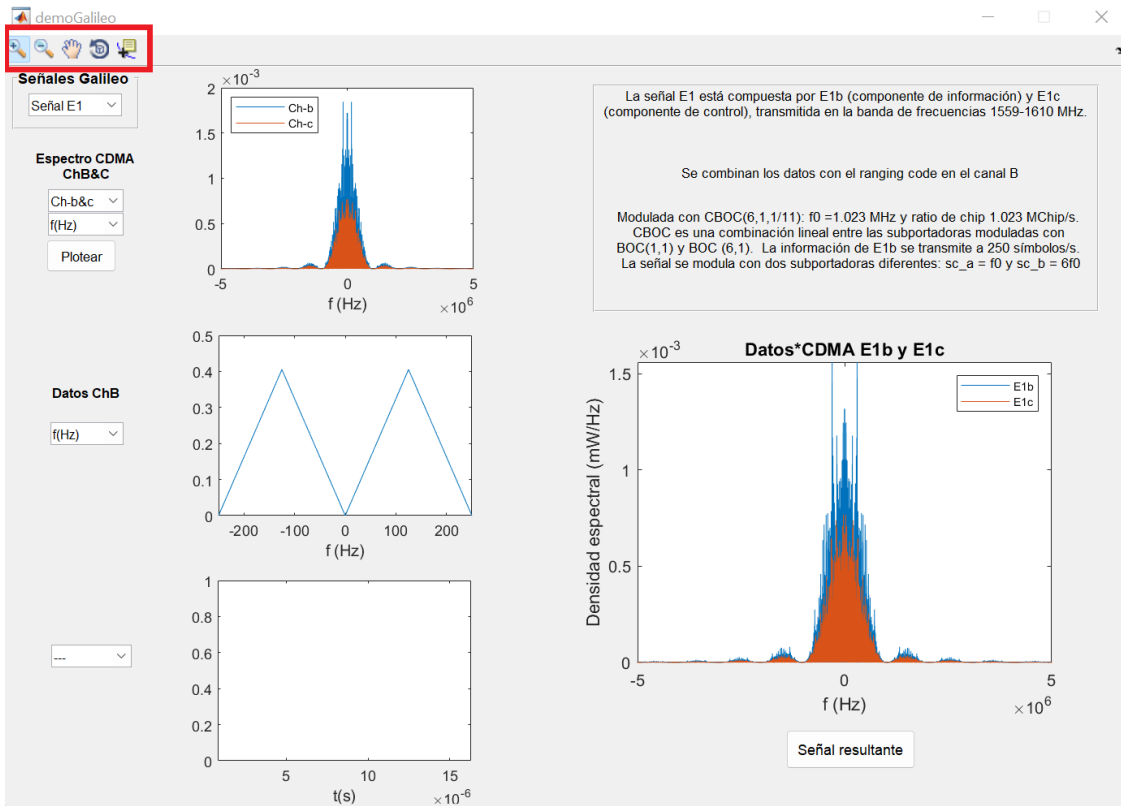


Ilustración 52. Indicación de los símbolos para poder manejar las gráficas.



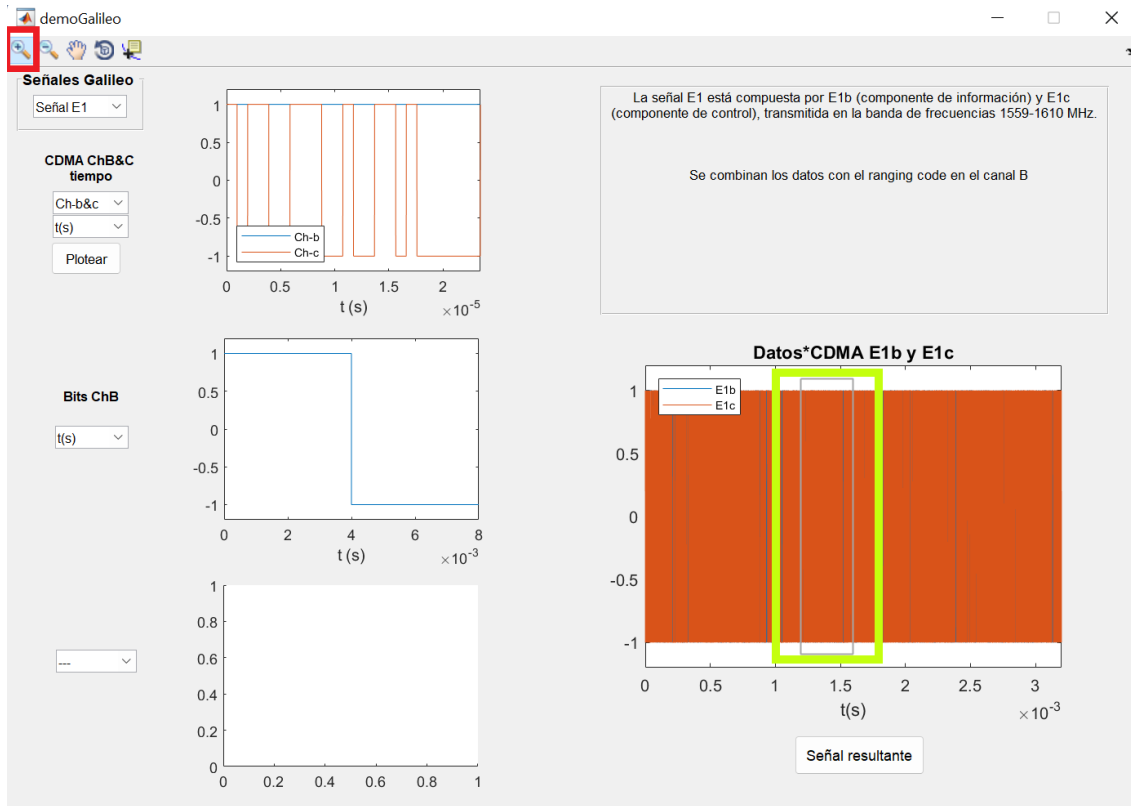


Ilustración 53. Utilización de la herramienta zoom en las gráficas (recuadro amarillo).

En Ilustración 53 la se observa el recuadro amarillo seleccionado donde se desea hacer zoom y con ello, en la Ilustración 54 se ve el zoom realizado.

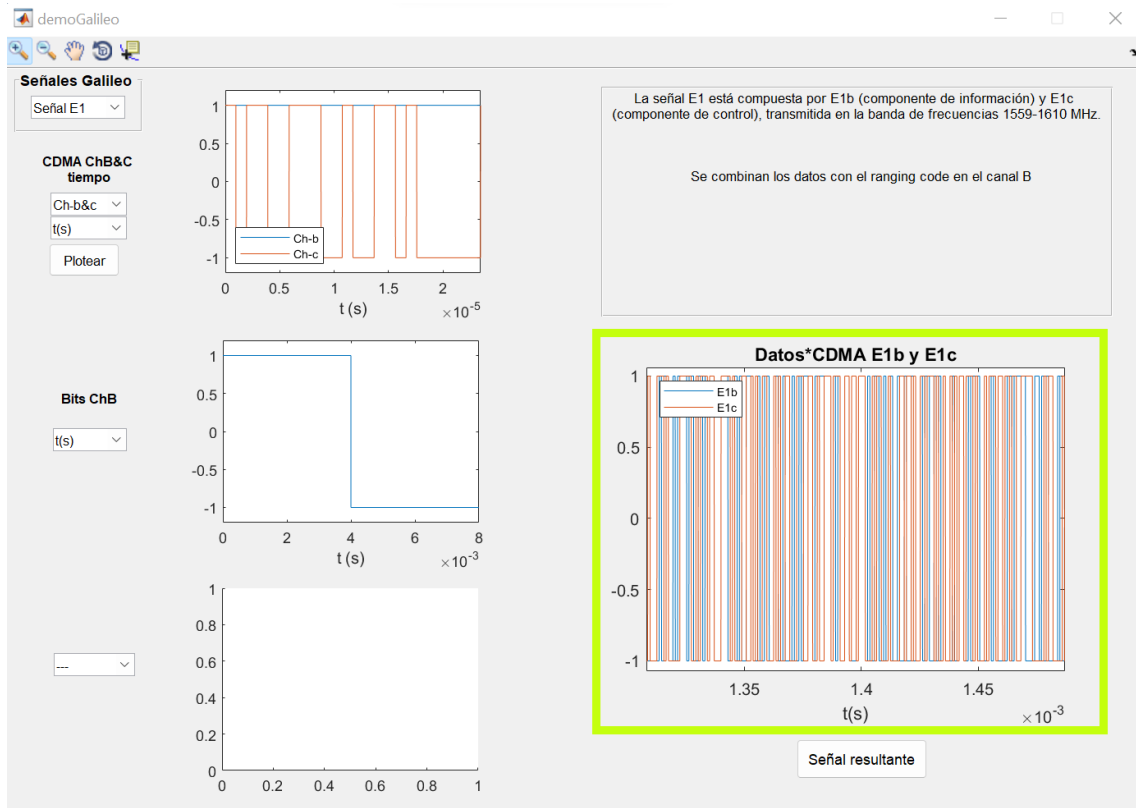


Ilustración 54. Zoom del recuadro amarillo seleccionado en la imagen anterior.

Para finalizar y conseguir la señal E1 deseada, se ha de introducir la modulación que se usa en esta señal mediante la selección de las portadoras (última gráfica de la izquierda). Con ello, pulsando al botón de Señal resultante, se grafica la densidad espectral de la señal E1 en la gráfica de la derecha como se observa en la Ilustración 55.

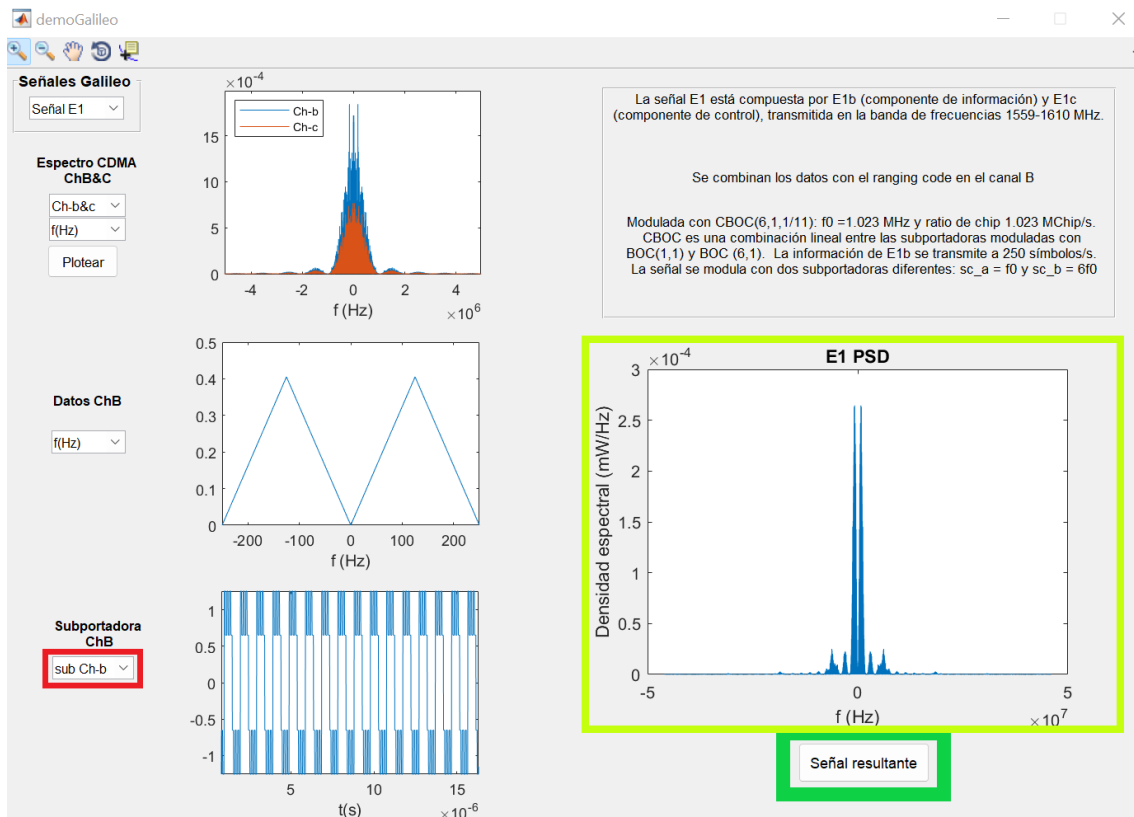


Ilustración 55. Representación gráfica del espectro de la señal E1.

Una vez explicado el funcionamiento de la interfaz con la señal Galileo E1, queda por explicar las señales E5 y E6. Pero cabe mencionar que la estructura de configuración de estas dos señales es prácticamente similar al de la señal E1. A continuación, se menciona algún detalle a tener en cuenta cuando se utilizan las señales E5 y E6, en comparación con la señal E1.

En la Ilustración 56 se puede observar que, si seleccionamos la señal E5 y se desea plotear el código CDMA de alguna de sus cuatro componentes o el CDMA al completo, sale un mensaje de “cargando...” para avisar de que tardará unos segundos en graficarse la señal deseada, debido a que el procesamiento de datos es alto. Cabe mencionar que esto solo ocurre en el dominio frecuencial, no en el temporal.

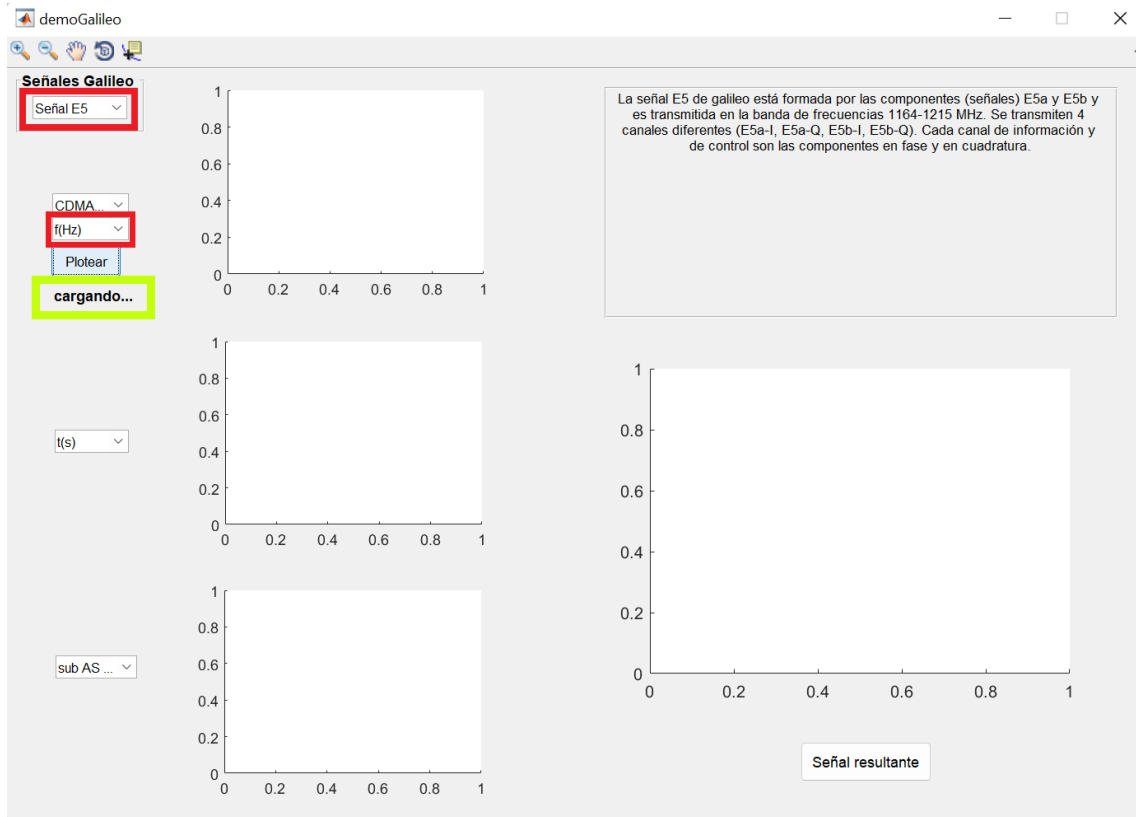


Ilustración 56. Aparición del mensaje "cargando".

Al igual que con la señal E1, se puede hacer diferentes combinaciones, y el programa dependiendo que opciones se seleccionen, saltará con ventanas emergentes de errores o avisos (como se muestra en la Ilustración 57, Ilustración 58 e Ilustración 59) para poder entender mejor la configuración de la señal E5 y conseguir la señal E5 final correctamente.

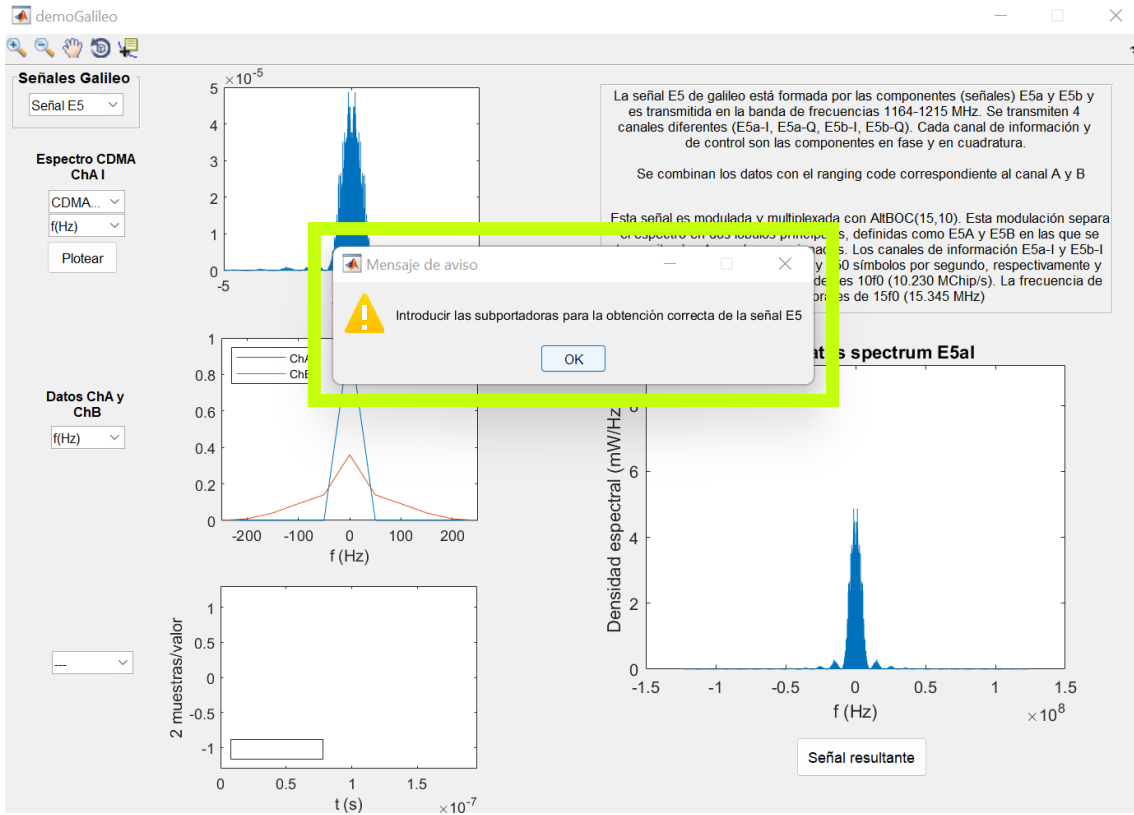


Ilustración 57. Mensaje de aviso por no introducir las subportadoras de la señal E5..

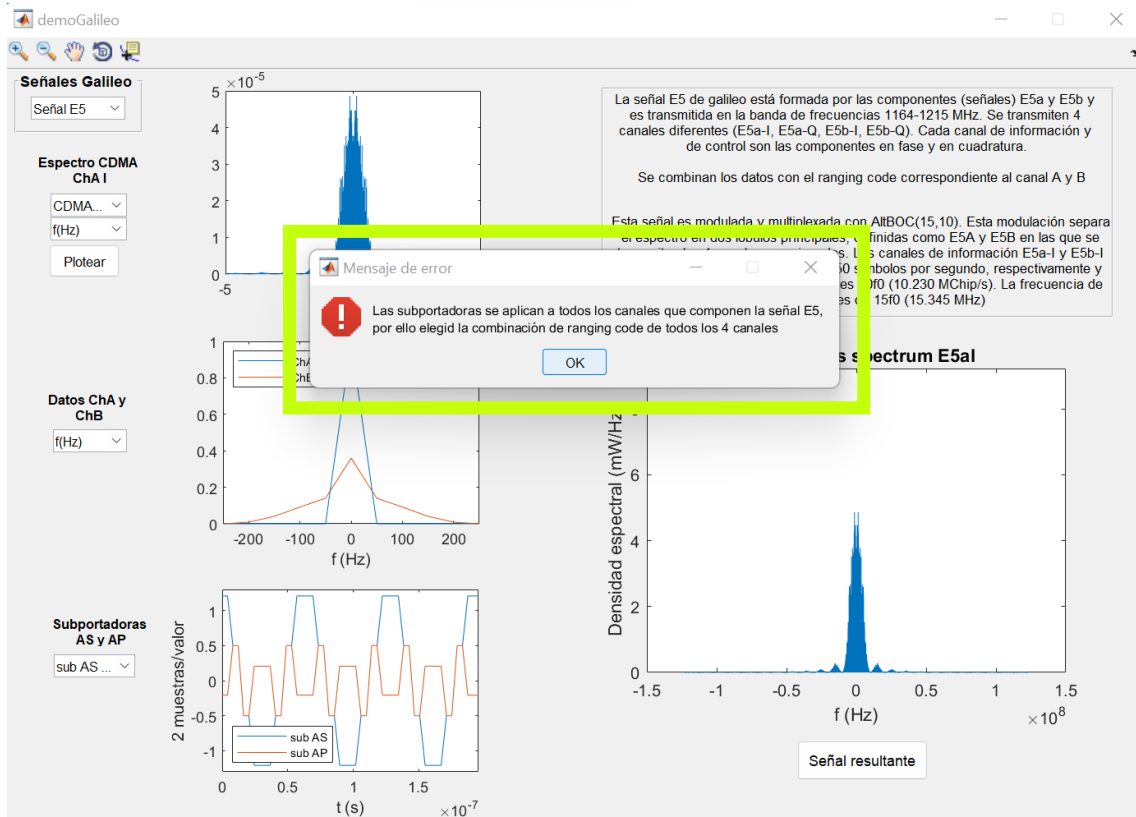


Ilustración 58. Mensaje de error por no seleccionar los 4 canales de los códigos PRN de la señal E5.

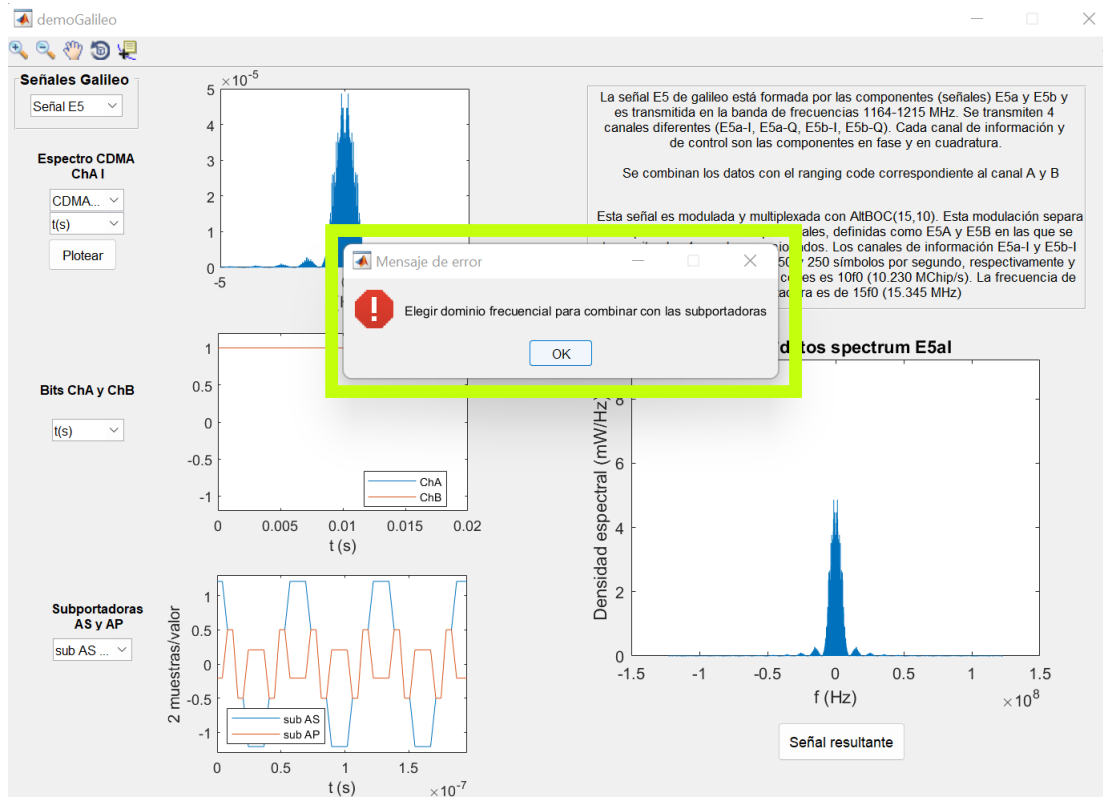


Ilustración 59. Mensaje de error por no elegir dominio frecuencial.

Para obtener la señal final E5 pulsando “Señal resultante,” saldrá un mensaje de “cargando...” también y tardará unos segundos en salir el espectro deseado, debido a su alto procesamiento de datos (Ilustración 60).

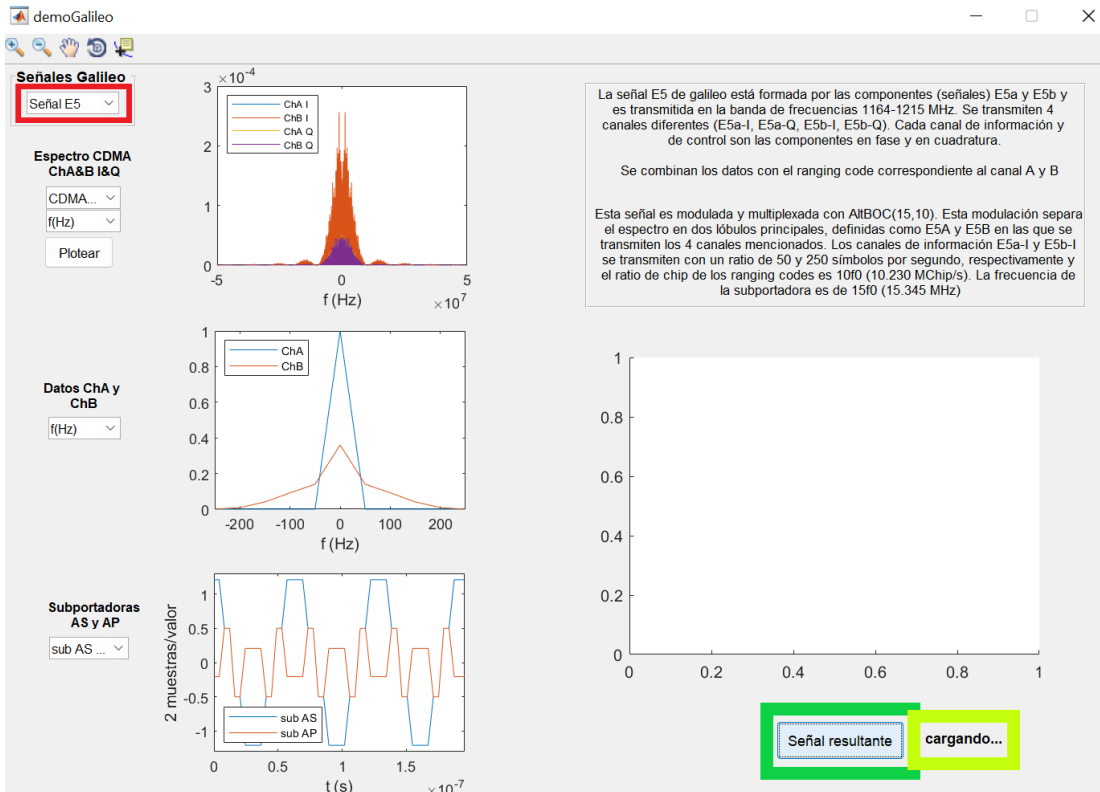


Ilustración 60. Cargando la representación gráfica de la señal final E5.

Finalmente, se obtiene la señal E5 en su componente de fase y cuadratura en una gráfica 3D como se ve en la Ilustración 61.



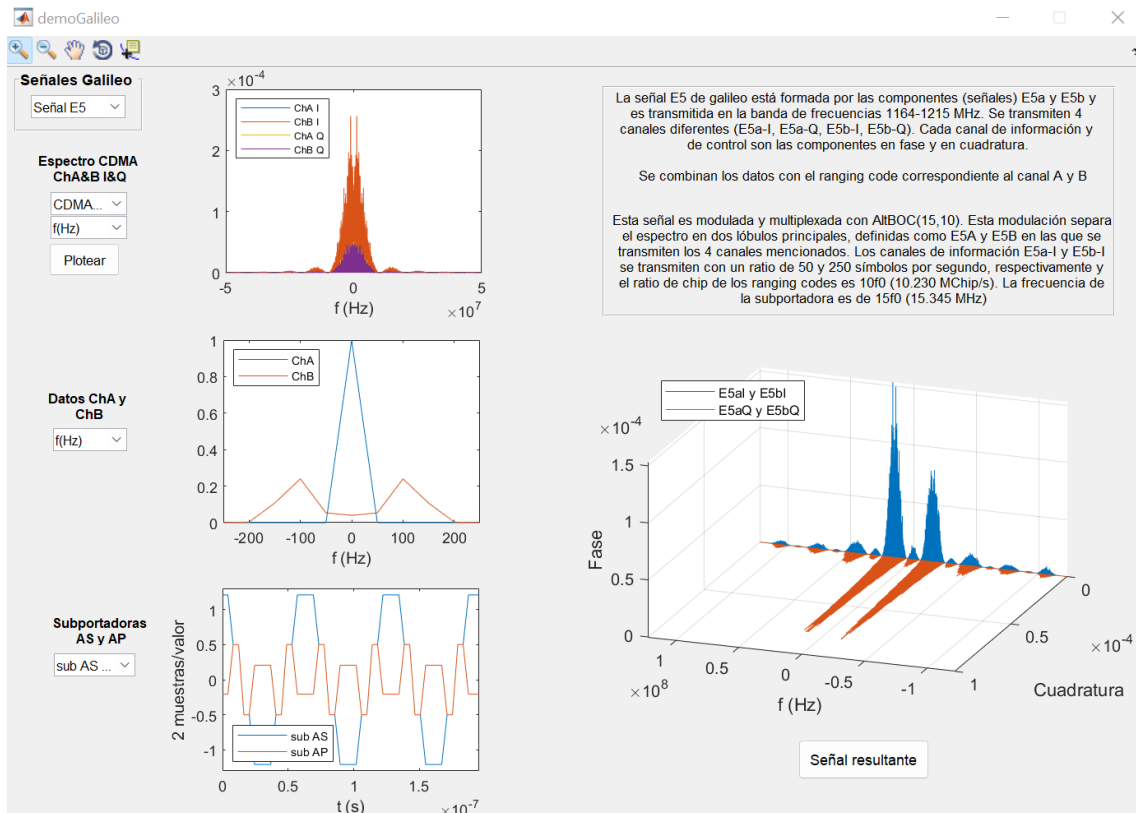


Ilustración 61. Representación gráfica en 3D del espectro de la señal E5.

Por último, representaremos la señal E6 final, ya que el funcionamiento de su configuración es igual al de las dos anteriores, así que con lo explicado y jugando con la interfaz se puede conseguir la señal completa (Ilustración 62).

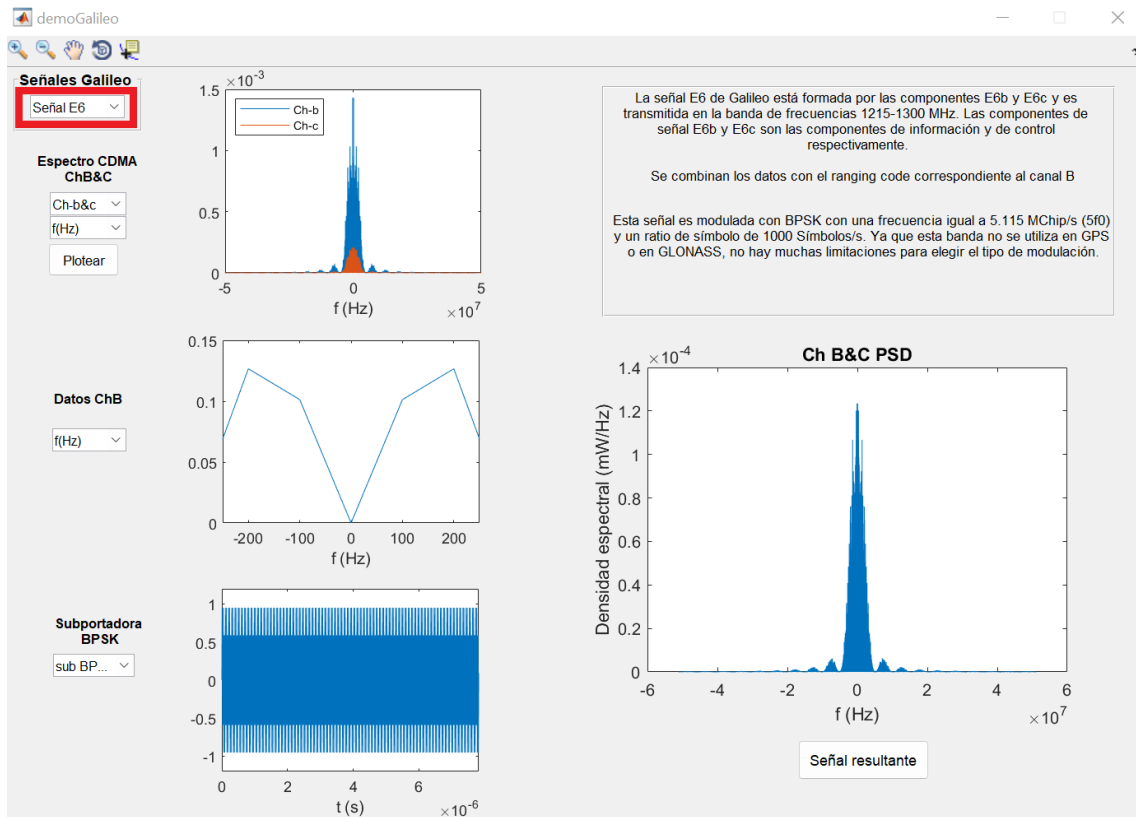


Ilustración 62. Representación gráfica del espectro de la señal E6.

## 14. Bibliografía

- [1] J. Sanz Subirana, J.M. Juan Zornoza y M. Hernández-Pajares, GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms, European Space Agency, 2013.
- [2] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger y E. Wasle, «GNSS - Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and more,» 2008.
- [3] «Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics.,» [En línea]. Available: <https://www.gps.gov/>. [Último acceso: 22 agosto 2022].
- [4] «Category:GLONASS,» [En línea]. Available: <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Category:GLONASS>.
- [5] «BeiDou Navigation Satellite System,» [En línea]. Available: <http://en.beidou.gov.cn/>.
- [6] S. Vílchez Benigno, Descripción y representación señales GNSS, Trabajo Fin de Máster, 2019.
- [7] «The European Space Agency - Applications Galileo,» [En línea]. Available: <https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo>.
- [8] R. Canalda Pedrós, «Galileo Signal Generation -Simulation Analysis-,» Department of Computer and Electronic Engineering University of Limerick.
- [9] EU Agency for the Space Programme, «European GNSS Galileo OS Signal-In-Space Interface Control Document,» 2021.
- [10] «Galileo Signal Plan,» [En línea]. Available: [https://gssc.esa.int/navipedia//index.php/Galileo\\_Signal\\_Plan](https://gssc.esa.int/navipedia//index.php/Galileo_Signal_Plan).
- [11] G. Xingxin Gao, J. Spilker, T. Walter y P. Enge, «Code Generation Scheme and Property Analysis of Broadcast Galileo L1 and E6 Signals,» Stanford University, CA, USA.