

GNSS y estudio de las mediciones de un sistema de radiocomunicaciones en una estación terrestre.

Cristian Giménez Javaloyes

Máster de Ingeniería de Telecomunicaciones

Departamento de Tecnologías de Antenas

Tutor: Dr. Aurora Andújar Linares y Dr. Jaime Anguera Pros

14/06/2021



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

Dedicado a las tres personas más importantes de mi vida

Paqui, Pepe y Lorena

Junio de 2021

Agradecimientos:

A mi familia, por su apoyo incondicional a lo largo de estos años, siempre confiaron en que lo conseguiría, no permitieron que me rindiera, incluso cuando todo se volvía difícil. Gracias a vosotros, puedo decir después de todos estos años: LO CONSEGUÍ.

A mis amigos, por su apoyo y confianza ciega en mis posibilidades.

Al año 2020 y 2021, que a pesar de estar envueltos en una pandemia mundial por el COVID-19 cargado de tristeza y separación de nuestros seres queridos, me ha permitido caminar por una senda de evolución personal.

A mi compañero de trabajo César Barquinero Gómez que, sin su ayuda y tiempo, no hubiera sido posible hacer este proyecto que tanta ilusión me hacía hacer.

A mis tutores Aurora Andújar y Jaime Anguera por aceptar mi propuesta de trabajo de fin de máster, brindándome la posibilidad de trabajar en un proyecto interesante e ilusionante a partes iguales.

A las personas que se han ido de mi vida durante estos años, gracias por las lecciones aprendidas.

A las personas que han entrado en este último año, bienvenidas y sigamos compartiendo grandes momentos juntos.

*En memoria de mis abuelos,
Amador Giménez, Dolores Rodríguez y Francisco Javaloyes
fallecidos el 20/07/14, 19/07/15 y 01/07/92.*

*En memoria de mi tía,
María del Mar Giménez,
fallecida el 07/01/21.*

Siempre os llevo conmigo.

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	<i>GNSS y estudio de las mediciones de un sistema de radiocomunicaciones en una estación terrestre.</i>
Nombre del autor:	<i>Cristian Giménez Javaloyes</i>
Nombre del consultor/a:	<i>Aurora Andújar, Jaime Anguera</i>
Nombre del PRA:	<i>Germán Cobo</i>
Fecha de entrega (mm/aaaa):	06/2021
Titulación:	<i>Máster en Ingeniería de Telecomunicaciones</i>
Área del Trabajo Final:	<i>Tecnologías de Antenas</i>
Idioma del trabajo:	<i>Español</i>
Palabras clave	<i>Sistema de posicionamiento por satélite, Segmento de Tierra, Sistema de telecomunicaciones, Antenas</i>

Resumen del Trabajo (máximo 250 palabras): *Con la finalidad, contexto de aplicación, metodología, resultados i conclusiones del trabajo.*

En la actualidad, los sistemas de posicionamiento por satélite se emplean en multitud de sectores, brindando a la humanidad de una inmensidad de aplicaciones y servicios, los cuales eran prácticamente inimaginables hace unos años. Sin embargo, la verdadera realidad es que, la mayoría de los usuarios desconocen qué hay detrás del servicio o aplicación que están usando en su día a día, es decir, no saben que un sistema de posicionamiento por satélite es el responsable de su funcionamiento. Mucho menos conocen los distintos sistemas existentes en el mundo y qué decir ya de su historia, estructura, características, aplicaciones, funcionamiento, entre otros, de cada uno de ellos. De ahí que, este proyecto busque llenar ese hueco de desconocimiento, recorriendo cada uno de los aspectos más relevantes mencionados anteriormente.

Además, se pretende dar un paso más allá, describiendo el cálculo de los parámetros y valores de un sistema de radiocomunicaciones, los cuales son utilizados para que una estación terrestre cumpla apropiadamente con su funcionamiento en su canal de transmisión y de recepción, pudiendo entablar de manera satisfactoria las comunicaciones con un satélite. Después, se definirá un tipo de estación terrestre prototipo, donde se realizarán unas pruebas definidas para caracterizar sus prestaciones, siendo sus resultados posteriormente analizados.

En definitiva, con este proyecto, se pretende dar una visión global del sistema de posicionamiento e ir profundizando en el mismo, hasta alcanzar sus aspectos más técnicos, siendo estos indispensables para tratar la comunicación

adecuadamente, permitiendo así el correcto funcionamiento del sistema definido.

Abstract (in English, 250 words or less):

Nowadays, satellite positioning systems are used in a multitude of sectors, providing mankind with an immense number of applications and services, which were practically unimaginable a few years ago. However, the true reality is that most users do not know what is behind the service or application they are using daily, i.e., they do not know that a satellite positioning system is responsible for its operation. Much less do they know the different existing systems in the world and what to say about their history, structure, characteristics, applications, operation, among others, of each one of them. Hence, this project seeks to fill this gap of ignorance, going through each of the most relevant aspects mentioned above. In addition, it is intended to go a step further, describing the calculation of the parameters and values of a radiocommunications system, which are used for a ground station to properly comply with its operation in its transmission and reception channel, being able to establish satisfactory communications with a satellite. Then, a prototype type of ground station will be defined, where some defined tests will be carried out to characterize its performance, and its results will be subsequently analyzed. In short, the aim of this project is to give a global vision of the positioning system and to go deeper into it, until reaching its more technical aspects, which are essential to treat the communication adequately, thus allowing the correct operation of the defined system.

Índice

1	Introducción	13
1.1	Contexto y justificación del Trabajo.....	13
1.2	Objetivos del Trabajo	13
1.3	Enfoque y método seguido.....	14
1.4	Planificación del Trabajo	14
1.5	Breve descripción de los capítulos de la memoria.....	17
2	Sistemas de radionavegación	18
2.1	Introducción	18
2.2	Descripción	19
2.3	Historia	19
2.4	Estructura	21
2.4.1	Segmento Espacial	21
2.4.1.1	Satélites de navegación	22
2.4.1.2	Satélites de comunicación.....	22
2.4.2	Segmento de Control.....	25
2.4.3	Segmento de Usuario	26
2.5	Características	26
2.6	Aplicaciones.....	27
2.7	Funcionamiento.....	29
2.8	Fuentes de error	34
2.9	Sistemas actuales.....	35
2.9.1	GPS	35
2.9.1.1	Características	35
2.9.1.2	Segmento Espacial.....	36
2.9.1.3	Segmento Control	37
2.9.1.4	Segmento Usuario.....	38
2.9.2	GLONASS.....	39
2.9.2.1	Características	39
2.9.2.2	Segmento Espacial.....	40
2.9.2.3	Segmento Control	40
2.9.2.4	Segmento Usuario.....	41
2.9.3	BeiDou.....	42
2.9.3.1	Características	42
2.9.3.2	Segmento Espacial.....	43
2.9.3.3	Segmento Control	43
2.9.3.4	Segmento Usuario.....	44
2.9.4	GALILEO.....	45
2.9.4.1	Historia.....	46
2.9.4.2	Fases de evolución.....	47
2.9.4.2.1	Galileo System Testbed	47
2.9.4.2.2	IOV (In Orbit Validation)	49
2.9.4.2.3	FOC (Full Operational Capability)	50
2.9.4.2.4	Evolución futura	52
2.9.4.3	Señal de Galileo.....	53

2.9.4.4	Funcionamiento	54
2.9.4.5	Arquitectura.....	55
2.9.4.5.1	Segmento espacial	55
2.9.4.5.2	Segmento de lanzamiento	57
2.9.4.5.3	Segmento tierra	58
2.9.4.5.4	Segmento usuario	63
2.9.4.6	Servicios	64
3	Parámetros y cálculos de un sistema de radiocomunicaciones	66
3.1	Introducción	66
3.2	Link Power Budget – Canal ascendente	66
3.2.1	Cálculo de las pérdidas del enlace	66
3.2.2	Cálculo de la ganancia de la antena de transmisión	66
3.2.3	Cálculo de la PIRE (en dBW) y la DF de funcionamiento.	67
3.2.4	Cálculo de la relación entre el enlace ascendente y el ruido (<i>CNo</i>).....	68
3.3	Link Power Budget – Canal descendente	69
3.3.1	Cálculo de la PIRE procedente del satélite	69
3.3.2	Cálculo del ancho de banda operativa del satélite.....	70
3.3.3	Cálculo de las pérdidas del enlace	71
3.3.4	Cálculo de la ganancia de la antena del receptor	71
3.3.5	Cálculo del G/T del receptor	72
3.3.6	Cálculo del margen de enlace.....	73
3.4	Respuesta en frecuencia	75
3.5	Temperatura y figura de ruido	77
3.6	Sensibilidad	78
3.7	Estabilidad en frecuencia.....	80
3.7.1	Ruido de fase	81
3.8	Espurios	82
4	Estación prototipo de tierra.....	83
4.1	Introducción	83
4.2	Descripción, misión, especificaciones de la antena y sistemas/subsistemas de la estación	83
4.2.1	Subsistemas de la estación	85
4.2.1.1	Subsistema de antena y seguimiento.	86
4.2.1.2	Subsistema de banda base	86
4.2.1.3	Subsistema de transmisión de RF	86
4.2.1.4	Subsistema de recepción de RF	87
4.2.1.5	Subsistema de frecuencia y tiempo	87
4.2.1.6	Estación meteorológica.....	87
4.2.1.7	Subsistema de prueba y calibración.....	88
4.2.2	Especificaciones de la antena	88
4.2.2.1	Sistema de alimentación	89
4.2.2.2	Subsistema de transmisión RF	90
4.2.2.3	Subsistema de Recepción RF	91
4.2.2.4	Subsistema de la cadena de calibración.....	91
4.2.3	Equipos de las cadenas transmisión.....	91
4.2.3.1	Banda base	91
4.2.3.2	Convertidor ascendente.....	92
4.2.3.3	Amplificador de alta potencia.....	93

4.2.4	Equipos de la cadena de recepción	94
4.2.4.1	Amplificador de bajo ruido	94
4.2.4.2	Convertidor descendente.....	94
4.2.4.3	Banda base	95
4.3	Caracterización de las cadenas de transmisión y recepción	95
4.3.1	Prueba de verificación de interconexión de las cadenas de transmisión y recepción .	95
4.3.1.1	Nivel de la estación y diagrama de frecuencia en la cadena de transmisión	95
4.3.1.1.1	Objetivo	95
4.3.1.1.2	Equipos empleados.....	96
4.3.1.1.3	Realización de la prueba y resultados	96
4.3.2	Pruebas de la cadena de transmisión	101
4.3.2.1	Potencia de salida y rango	101
4.3.2.1.1	Objetivo	101
4.3.2.1.2	Equipos empleados.....	101
4.3.2.1.3	Realización de la prueba y resultados	101
4.3.2.2	Detección de espurios	108
4.3.2.2.1	Objetivo	108
4.3.2.2.2	Equipos empleados.....	108
4.3.2.2.3	Realización de la prueba y resultados	108
4.3.2.3	Respuesta en frecuencia	113
4.3.2.3.1	Objetivo	113
4.3.2.3.2	Equipos empleados.....	113
4.3.2.3.3	Realización de la prueba y resultados	113
4.3.2.4	Ruido de fase.....	123
4.3.2.4.1	Objetivo	123
4.3.2.4.2	Equipos empleados.....	123
4.3.2.4.3	Realización de la prueba y resultados.....	123
4.3.3	Pruebas de la cadena de recepción.....	125
4.3.3.1	Respuesta en frecuencia	125
4.3.3.1.1	Objetivo	125
4.3.3.1.2	Equipos empleados.....	125
4.3.3.1.3	Realización de la prueba y resultados.....	125
4.4	Conclusiones de los resultados.....	135
5	Conclusiones y perspectivas futuras.....	137
6	Glosario.....	139
7	Bibliografía.....	144
8	Anexos	149
8.1	Fundamentos de antena relevantes:	149
8.2	Analizador de espectros.....	150

Índice de ilustraciones

Ilustración 1-1 Hoja de tareas del Proyecto.....	16
Ilustración 1-2 Diagrama de Gantt del proyecto	16
Ilustración 2-1 Representación de los segmentos GNSS.....	21
Ilustración 2-2 Representación satelital.....	21
Ilustración 2-3 Representación de las orbitas.....	21
Ilustración 2-4 Representación de los tipos satélites.....	23
Ilustración 2-5 Segmento de Control	25
Ilustración 2-6 Representación del segmento Usuario	26
Ilustración 2-7 Tipos de servicios GNSS	27
Ilustración 2-8 Representación de las distintas aplicaciones GNSS	29
Ilustración 2-9 Funcionamiento de un GNSS	30
Ilustración 2-10 Método del cálculo de posición	31
Ilustración 2-11 Modelo algebraico del cálculo de la ubicación	31
Ilustración 2-12 Técnica de acceso CDMA	32
Ilustración 2-13 Código PRN.....	33
Ilustración 2-14 Correlación códigos PRN.....	33
Ilustración 2-15 Técnica de acceso FDMA	34
Ilustración 2-16 Fuentes de error	34
Ilustración 2-17 Segmento especial GPS	36
Ilustración 2-18 Segmento de control GPS	37
Ilustración 2-19 Segmento de control de tierra GPS	38
Ilustración 2-20 Representación de todos los segmentos GPS.....	38
Ilustración 2-21 Segmento espacial GLONASS	40
Ilustración 2-22 Segmento de tierra GLONASS	41
Ilustración 2-23 Representación de los segmentos GLONASS.....	42
Ilustración 2-24 Segmento espacial Beidou	43
Ilustración 2-25 Estaciones del segmento de tierra BeiDou	44
Ilustración 2-26 Logo GALILEO.....	45
Ilustración 2-27 Órbita satélites Galileo	45
Ilustración 2-28 Satélite Galileo	45
Ilustración 2-29 Satélite en órbita	46
Ilustración 2-30 Satélites en órbita	46
Ilustración 2-31 Presentación de GALILEO.....	47
Ilustración 2-32 Representación de las fases de implementación y peso de los satélites	47
Ilustración 2-33 Satélites GIOVE-A y GIOVE-B.....	48
Ilustración 2-34 Precisión de posicionamiento	49
Ilustración 2-35 Satélite GALIEO IOV	49
Ilustración 2-36 Representación de los 4 satélites de IOV	49
Ilustración 2-37 Test de medida de precisión	50
Ilustración 2-38 Satélite de FOC	51
Ilustración 2-39 Satélite de FOC y características.....	51
Ilustración 2-40 Ubicación de satélites Galileo en el espacio	52
Ilustración 2-41 Frecuencias Galileo	53
Ilustración 2-42 Determinación de la posición	54
Ilustración 2-43 Arquitectura Galileo	55

Ilustración 2-44 Segmento especial Galileo	56
Ilustración 2-45 Componentes satélite Galileo	56
Ilustración 2-46 Reloj PHM y de rubidio	57
Ilustración 2-47 Lanzadores de satélites Galileo	58
Ilustración 2-48 Procedimiento de lanzamiento de un satélite FOC Galileo	58
Ilustración 2-49 Segmento de tierra Galileo	59
Ilustración 2-50 Distribución de los centros Galileo	60
Ilustración 2-51 Centro de misión y control Galileo	60
Ilustración 2-52 Distribución del segmento de tierra Galileo	61
Ilustración 2-53 GSS y antena ULS.....	61
Ilustración 2-54 Antena ULS.....	62
Ilustración 2-55 Estación TTC	63
Ilustración 2-56 Representación del segmento de usuario.....	64
Ilustración 2-57 Servicios Galileo	65
Ilustración 3-1 Ejemplo de una respuesta en frecuencia de un sistema LTI	75
Ilustración 3-2 Probabilidad de error de Eb/No para QPSK, BPSK, GMSK y 16QAM	79
Ilustración 3-3 Espectro de un oscilador	81
Ilustración 3-4 Efecto del ruido de fase en frecuencia.....	81
Ilustración 4-1 Representación de la comunicación estación-satélite	84
Ilustración 4-2 Representación DSSS	85
Ilustración 4-3 Subsistemas de la estación	85
Ilustración 4-4 Sistema de alimentación antena	89
Ilustración 4-5 Subsistema de transmisión RF	90
Ilustración 4-6 Subsistema de transmisión RF	91
Ilustración 4-7 Convertidor ascendente.....	92
Ilustración 4-8 Amplificador de alta potencia	93
Ilustración 4-9 Convertidor descendente	94
Ilustración 4-10 Cadenas de la estación	95
Ilustración 4-11 Canal ascendente	96
Ilustración 4-12 Punto A	99
Ilustración 4-13 Punto B	99
Ilustración 4-14 Punto D.....	99
Ilustración 4-15 Canal descendente	100
Ilustración 4-16 Gráfica PIRE	108
Ilustración 4-17 Frecuencia 2.04887187 GHz	110
Ilustración 4-18 Frecuencia 2.025 a 2.12 GHz	110
Ilustración 4-19 Frecuencia de 1 a 2.025 GHz	111
Ilustración 4-20 Frecuencia de 1 a 3 GHz	111
Ilustración 4-21 Frecuencia de 2.12 a 3 GHz	112
Ilustración 4-22 Frecuencia de 4 a 7 GHz	112
Ilustración 4-23 Frecuencia 3 a 14 GHz	113
Ilustración 4-24 Representación gráfica respuesta en frecuencia	122
Ilustración 4-25 Medición del ruido de fase	124
Ilustración 4-26 Gráfica respuesta en frecuencia	134

Índice de tablas

Tabla 2-1 Tabla comparativa de satélites.....	23
Tabla 2-2 Fuentes de error.....	35
Tabla 2-3 Evolución satélites GPS.....	36
Tabla 2-4 Evolución satélites GLONASS.....	40
Tabla 2-5 Evolución del segmento espacial BeiDou.....	43
Tabla 4-1 Especificaciones de la antena.....	89
Tabla 4-2 Especificaciones máximas en parada.....	89
Tabla 4-3 Especificaciones sistema alimentación antena.....	90
Tabla 4-4 Configuración de equipos.....	96
Tabla 4-5 Valores de acoplador.....	97
Tabla 4-6 Valores de potencia.....	98
Tabla 4-7 Valores de los puntos a testear.....	98
Tabla 4-8 Configuración de los equipos.....	100
Tabla 4-9 Valores de potencia.....	100
Tabla 4-10 Valores en los puntos a testear.....	101
Tabla 4-11 Parámetros de configuración de los equipos.....	102
Tabla 4-12 Valores de acoplamiento de la guía de onda.....	102
Tabla 4-13 Tabla cálculo de PIRE.....	107
Tabla 4-14 Parámetros de configuración equipos.....	109
Tabla 4-15 Parámetros de configuración equipos.....	114
Tabla 4-16 Cálculo de respuesta en frecuencia.....	121
Tabla 4-17 Cálculo de variación y ecuación de la de ganancia.....	122
Tabla 4-18 Parámetros de configuración equipos.....	123
Tabla 4-19 Configuración de los equipos.....	125
Tabla 4-20 Cálculo de respuesta en frecuencia.....	133
Tabla 4-21 Cálculo de variación y ecuación de la recta de ganancia.....	134

1 Introducción

1.1 Contexto y justificación del Trabajo

Los sistemas de posicionamiento por satélite son indudablemente relevantes en el día a día de las personas, gobiernos, países y, por supuesto, a nivel mundial. Esto es debido a que sus servicios y aplicaciones se encuentran implementados en una multitud de tareas, funciones y actividades que se realizan en la actualidad. Sin embargo, ¿qué es lo que se sabe de estos sistemas? Normalmente, por ejemplo, se utiliza un dispositivo que obtiene la ubicación exacta de donde se encuentra, usando un software y el mismo se encarga de guiar hasta llegar al destino fijado, pero ¿qué hay detrás?, ¿cómo funciona?, ¿tiene estructura?, ¿qué características poseen?, ¿cómo consigue saber la ubicación en tiempo real?, ¿hay solamente un sistema de posicionamiento por satélite o hay más? ¿qué tipos de servicios y aplicaciones pueden implementarse para este tipo de sistemas? Estas preguntas y muchas otras deben ser respondidas, para poder entender verdaderamente el funcionamiento de estos sistemas y poder alcanzar un entendimiento total de su presencia en la actualidad.

Junto a todo anterior, se deberá profundizar hasta los aspectos más técnicos de un sistema de comunicaciones, para llegar a una comprensión total de cuáles son los parámetros que son indispensables para el correcto funcionamiento de este tipo de sistemas. La siguiente pregunta será: ¿Se puede poner en práctica la teoría? La respuesta es totalmente afirmativa. En realidad, existen pruebas que pueden realizarse con un equipo adecuado y potente. En definitiva, la idea es empezar con los conceptos básicos de un sistema de posicionamiento satelital, desde la parte más teórica hasta llegar a ponerlo en práctica.

1.2 Objetivos del Trabajo

Las metas que se pretenden alcanzar con este proyecto son las siguientes:

- Describir el GNSS (*Global Navigation Satellite System*), profundizando en su historia, estructura, características, aplicaciones, funcionamiento y fuentes de error.
- Describir los GNSS más relevantes como son GPS, GLONASS, BeiDou y Galileo, enfatizando en las características y segmentos de cada uno. Se profundiza más en Galileo, por tratarse del sistema europeo.
- Un GNSS es un sistema de radiocomunicaciones, por lo que se debe explicar aquellos parámetros y cálculos necesarios que permitan diseñar y garantizar el correcto funcionamiento de estos sistemas.

- Definir una estación prototipo de tierra, determinando su misión y especificaciones de la antena y sistemas como subsistemas de ésta.
- Realizar pruebas de mediciones de la mayoría de los conceptos técnicos de un sistema de radiocomunicaciones, con el fin de ponerlos en práctica.
- Analizar, razonar y comprender los resultados obtenidos en las pruebas.

1.3 Enfoque y método seguido

Para llevar a cabo este trabajo, se ha tenido que realizar un estudio teórico tanto de los sistemas de radionavegación en toda su plenitud, como de los parámetros y cálculos que se realizan en el sistema de radiocomunicaciones de dichos sistemas. Esto ha sido posible usando los conocimientos adquiridos en el máster, en concreto, en las asignaturas de antenas y de sistemas de radionavegación. Además, hay que sumarle la experiencia laboral en el sector y la búsqueda de información sobre estos temas en libros e internet.

Una vez se ha recopilado la información para cada capítulo, se estudia, se analiza, se compara y se describe finalmente para dejarla plasmada en la memoria. El siguiente paso es definir, en base a todos los datos recopilados anteriormente, un tipo de estación terrestre a la que poder poner en práctica los aspectos teóricos que se han mencionado en el proyecto, o al menos su mayoría. Dicha definición ha sido posible por la disponibilidad de equipos específicos para el tipo de pruebas que se ha planteado. Esta estrategia ha sido la más adecuada porque ha permitido usar los conocimientos previamente adquiridos, antes de empezar el proyecto, pero sobre todo porque ha permitido afinarlos, permitiendo que evolucionen hasta comprender y aprender en profundidad en cada uno de los objetivos propuestos de este proyecto.

1.4 Planificación del Trabajo

En primer lugar, los recursos necesarios para la realización del trabajo serían los siguientes:

- Recursos relacionados a GNSS por vía internet, libros, artículos científicos, etc.
- Recursos relacionados a los parámetros y cálculos de un sistema de telecomunicaciones enfocado a un GNSS por vía internet, libros, artículos científicos, etc.
- Recursos relacionados para realizar un diseño de una estación terrestre por vía internet, libro, artículos científicos, etc.

- Disponer del equipo necesario para las pruebas a realizar. Los más relevantes serían una banda base, un amplificador de potencia de estado sólido, un convertidor ascendente, un convertidor descendente, un generador de señal, un analizador de señal, un medidor de potencia, un sensor de potencia, cables coaxiales y transiciones.
- Recursos de manuales y *datasheet* de los equipos empleados.
- Software de ofimática.

Del mismo modo, las tareas a realizar serán las siguientes:

- Especificar tema y objetivos del proyecto.
- Determinar puntos iniciales en los que se dividirá el proyecto.
- Recopilar información sobre GNSS. En base a la anterior recopilación, determinar partes a tratar, resumir contenido y documentar en el documento.
- Recopilar información sobre los parámetros y cálculos de un sistema de radiocomunicaciones enfocado a un GNSS. En base a la anterior recopilación, determinar partes a tratar, resumir contenido y documentar en el documento.
- Definir estación terrestre para la realización de pruebas, esto incluye recopilar información, descripción, misión y especificaciones de la antena y sistemas/subsistemas de la estación.
- Determinar, realizar como comentar las pruebas de caracterización de las cadenas de transmisión y recepción de la estación propuesta.
- Exponer conclusiones y perspectivas futuras.
- Realizar glosario y bibliografía en base a la información empleada.

En base a lo anterior, se ha plasmado las tareas en el siguiente diagrama de Gantt, con el fin de definir una planificación temporal para cada una de ellas, este sería:

	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predecesoras
1	▸ Proyecto TFM	117 días	jue 18/02/21	lun 14/06/21	
2	▸ Especificación de Proyecto	2 días	jue 18/02/21	vie 19/02/21	
3	Planteamiento de propuesta	1 día	jue 18/02/21	jue 18/02/21	
4	Propuesta inicial de TFM	1 día	vie 19/02/21	vie 19/02/21	3
5	▸ Documentación	26 días	sáb 20/02/21	mié 17/03/21	2
6	Doc. Acerca de GNSS	13 días	sáb 20/02/21	jue 04/03/21	
7	Doc. Acerca de sistemas de radiocomunicaciones	13 días	vie 05/03/21	mié 17/03/21	6
8	▸ Estación terrestre	20 días	jue 18/03/21	mar 06/04/21	5
9	Definición del tipo de estación	2 días	jue 18/03/21	vie 19/03/21	
10	Doc. Del tipo de estación	3 días	sáb 20/03/21	lun 22/03/21	9
11	Descripción y misión	5 días	mar 23/03/21	sáb 27/03/21	10
12	Especificaciones de la antena	5 días	dom 28/03/21	jue 01/04/21	11
13	Especificaciones sistemas y subsistemas	5 días	vie 02/04/21	mar 06/04/21	12
14	▸ Pruebas	37 días	mié 07/04/21	jue 13/05/21	8
15	Definición banco de pruebas	4 días	mié 07/04/21	sáb 10/04/21	
16	Doc. De manuales de equipos	1 día	dom 11/04/21	dom 11/04/21	15
17	Realización de pruebas	29 días	lun 12/04/21	lun 10/05/21	16
18	Analizar resultados	3 días	mar 11/05/21	jue 13/05/21	17
19	▸ Memoria	25 días	vie 14/05/21	lun 07/06/21	14
20	Realizar memoria	22 días	vie 14/05/21	vie 04/06/21	
21	Cambios en memoria	3 días	sáb 05/06/21	lun 07/06/21	20
22	Preparación presentación	6 días	mar 08/06/21	dom 13/06/21	19
23	Entrega TFM	1 día	lun 14/06/21	lun 14/06/21	22

Ilustración 1-1 Hoja de tareas del Proyecto

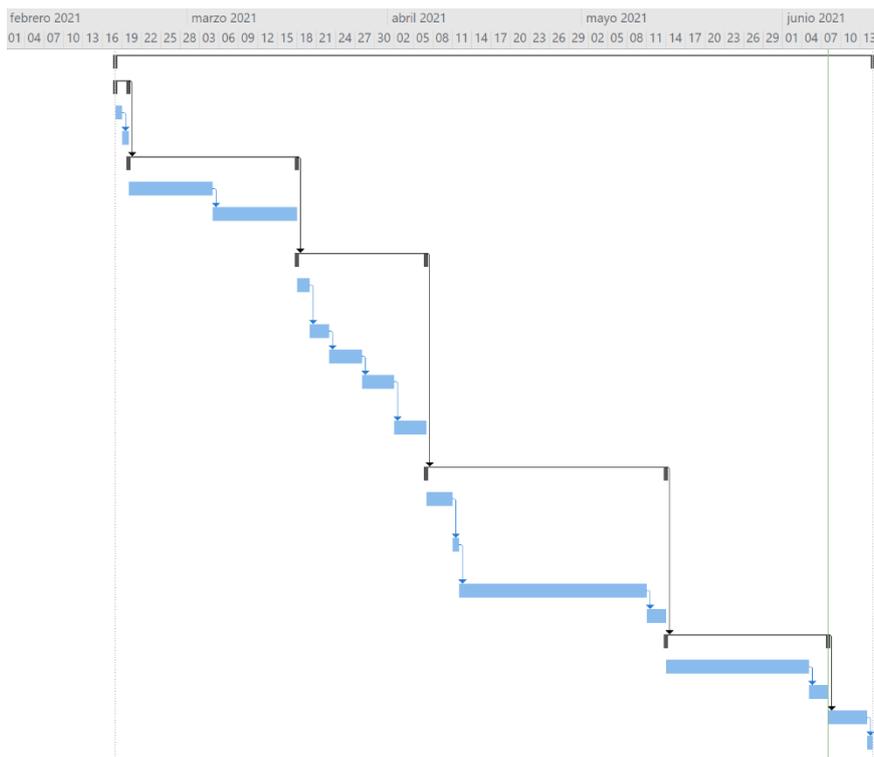


Ilustración 1-2 Diagrama de Gantt del proyecto

1.5 Breve descripción de los capítulos de la memoria

El resto del documento estará dividido en los siguientes capítulos:

- **Sistemas de radionavegación**, donde se desarrollan los aspectos y características más importantes de estos sistemas. En concreto, este estará compuesto por los apartados: descripción, historia, estructura, características, aplicaciones, funcionamiento, fuentes de error y sistemas actuales.
- **Parámetros y cálculos de un sistema de telecomunicaciones**, donde se describen la parte más técnica de estos sistemas para poder garantizar el correcto funcionamiento de estos sistemas. En concreto, se trata el *Link Power Budget* (para canal ascendente y descendente), respuesta en frecuencia, temperatura y figura de ruido, sensibilidad, estabilidad en frecuencia, ruido de fase y espurios.
- **Estación prototipo de tierra**, donde se define la estación, describiendo los sistemas y subsistemas que la componen. Además, se determinan las pruebas a llevar a cabo, comentando finalmente sus resultados.
- **Conclusiones y perspectivas futuras**, se establecen las conclusiones del proyecto y se detallan aspectos o pruebas que pueden realizarse en futuro.

Finalmente, los dos últimos capítulos están compuestos por un glosario de términos y reseñas a la bibliografía utilizada en el desarrollo del proyecto y memoria.

2 Sistemas de radionavegación

2.1 Introducción

En este capítulo, se pretende dar a conocer un sistema **GNSS** (*Global Navigation Satellite System*), para así brindar una base teórica introductoria al lector, necesaria para la adecuada comprensión de los posteriores capítulos y apartados. Los aspectos más relevantes que se tratarán en este capítulo son los siguientes:

- **Descripción**: se define qué es un GNSS.
- **Historia**: se detalla el motivo de su surgimiento, la evolución de la tecnología con el paso del tiempo, identificación de sus actores principales.
- **Estructura**: se define la estructura que todo GNSS debe tener para poder considerarse como tal.
- **Características**: se describen las principales de estos sistemas.
- **Aplicaciones**: se describe para qué es empleada GNSS, sus fines y aplicaciones posibles.
- **Funcionamiento**: se define su principio de funcionamiento, explicando para ello las bases del posicionamiento espacial.
- **Fuentes de error**: se describen brevemente los tipos de fuentes de error existentes en un GNSS.
- **Sistemas actuales**: se detallan los GNSS más importantes en la actualidad como son GPS, GLONNAS, BeiDou y Galileo.

2.2 Descripción

Las siglas de **GNSS** (*Global Navigation Satellite System*) corresponden con Sistema Global de Navegación por Satélite en español, haciendo referencia al conglomerado de sistemas que, bajo una constelación de satélites artificiales, calculan rangos de señales para obtener el posicionamiento y la localización en todo el planeta, pues en base a esa información, se puede establecer las coordenadas geográficas y altitud del objetivo que se pretende observar.

2.3 Historia

En el año 1957, se puso en órbita el Sputnik. El primer satélite artificial con la que Unión Soviética dio el pistolazo de salida en la carrera espacial. Para los EE. UU., que se encontraban inmersos en plena Guerra Fría, fue un acontecimiento duro para el país. Por esa razón, respondieron llevando al siguiente nivel la finalidad de los satélites, empleando sus señales para encontrar elementos en Tierra. Para llevar a cabo esta idea, la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) es fundada, con el fin de volver a poner a EE. UU. en la cúspide de los sectores espacial y tecnológico, involucrándose de lleno en la investigación de comunicaciones por satélite y en el desarrollo de su propio GNSS.

El primer GNSS americano fue puesto en funcionamiento en 1960, convirtiéndose en el primer sistema de navegación por satélite operativo, bajo el nombre de TRANSIT o NAVSAT. Su uso era estrictamente militar. Además, se podía obtener la ubicación de una manera precisa de los submarinos americanos. También, se empleó en los sistemas de navegación de sus buques mientras se desarrolló la Guerra Fría. Más adelante, se abriría su uso al ámbito civil también.

Hasta los años 70, se fueron creando otros sistemas, hasta que el DoD (*Department of Defense*) de EE. UU. fundó el comité NAVSEC (*Navigation Satellite Executive Committee*) con la finalidad de impulsar el desarrollo de un nuevo GNSS, empleando todos los sistemas anteriores creados hasta la fecha. De ahí surgió NAVSTART-GPS (*Navigation System Timing and Ranging-Global Positioning System*), compuesto por 24 satélites de órbitas inclinadas de 12 horas de período que incorporaba las mejores tecnologías hasta la fecha.

Como ya se ha mencionado, el GPS (se redujo de *NAVSTART-GPS*) era el sistema GNSS estadounidense, que en principio se usaba para fines únicamente militares, siendo este controlado por el DoD y sometido a un severo control gubernamental. Más adelante, cuando se empezó a tener en consideración su aplicación en el ámbito civil, el Gobierno de los EE. UU. encomendó efectuar varios estudios a diversas agencias, una de ellas fue RAND (*Research and Development*).

Paralelamente, en la década de los 80, la Unión Soviética da a conocer su propio sistema de navegación, bajo el nombre de GLONASS (*Global Navigation Satellite System*).

Una vez que los estudios fueron realizándose en EE. UU., en la segunda mitad de los 90, la tecnología de los sistemas de navegación se empezó a usar en el sector civil, llegándose a materializar múltiples acuerdos entre los EE. UU. y otros países del planeta. Como consecuencia de esto, el GPS era el único GNSS dominante totalmente operativo que contaba con todo el control de los sistemas de posicionamiento bajo sus satélites. Otro acontecimiento que influyó fue que Rusia decidió no continuar con GLONASS.

Ante esta situación, emergió una intranquilidad mundial resultante debido a que todo el control de la señal civil del GPS recaía únicamente en EE. UU., pues estos podían emitir, distorsionar o detener su emisión si se daba una guerra o desacuerdos entre países. Al darse una disponibilidad selectiva, el resto de los países decidieron desarrollar su propio GNSS, evitando de ese modo dependencias y dotarles de una mayor autonomía.

Al tener EE. UU. el dominio del segmento espacial, debido a su red de satélites, los demás países o continentes, como EU, Japón, entre otros más, decidieron centrar sus recursos en los segmentos de tierra. En concreto, se centraron los recursos en los centros de control y recepción de las señales GPS, como desarrollar sistemas de aumento, tipo SBAS y GBAS, permitiendo así alcanzar una mayor precisión en el posicionamiento. Como consecuencia a lo anterior, emerge EGNOS, que se trata del sistema de aumentación europeo, convirtiéndose en el primer intento de Europa con los GNSS, de la mano de la Agencia Espacial Europea.

En el caso de EU, una vez finalizado EGNOS, se plantea Galileo como un sistema de uso civil, pero también puede ser empleado para fines militares. Su planificación inicial fue para 2008, pero no ha estado operativo hasta el año 2016.

Otros países, como Rusia, deciden relanzar GLONASS, siendo en 1996 el momento exacto, en que el sistema comenzaba a estar operativo. Aunque difiere respecto del GPS, este puede trabajar de manera conjunta con él.

Mientras se desarrollaba EGNOS, China decide entrar también en la carrera bajo un sistema experimental denominado BeiDou, siendo sus satélites lanzados en 1989, pero no sería hasta 2001 cuando estuviera operativo. En la actualidad, se emplea para dar cobertura a Asia-Pacífico bajo una segunda versión, denominada COMPASS. En 2020, bajo su tercera versión, se ofrece un servicio global.

Otros países, como India y Japón, proponen respectivamente sus sistemas regionales, IRNSS (*Indian Regional Navigation Satellite System*) y QZSS (*Quasi-Zenith Satellite System*), al poseer constelaciones de satélites más pequeñas, alrededor de 4 y 7 satélites, únicamente pueden ofrecer una cobertura más limitada.

2.4 Estructura

Existe una estructura predefinida que todo sistema de navegación por satélite debe tener, es decir, se debe componer de las siguientes tres partes para poder considerarse un GNSS operativo, estas son el segmento espacial, el segmento de control y el segmento de usuario.

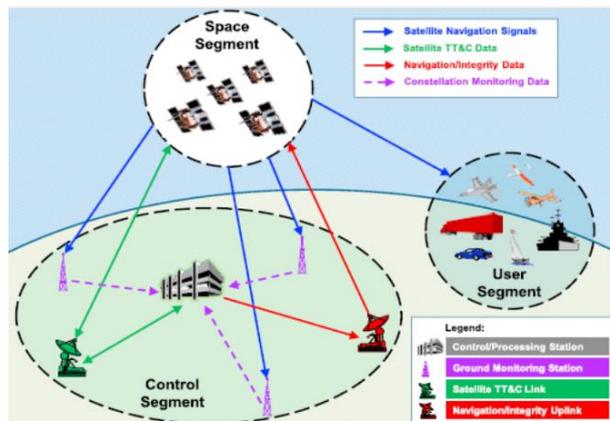


Ilustración 2-1 Representación de los segmentos GNSS

2.4.1 Segmento Espacial



Ilustración 2-2 Representación satelital

Se trata de la constelación de satélites de navegación y comunicación que forman el sistema. Los primeros orbitan repetidamente en distintos planos orbitales alrededor de la tierra. En cambio, los segundos son sistemas de aumento cuyo propósito es el de corregir errores de posicionamiento. La finalidad del segmento es enviar la señal que se recibe en los segmentos de control y de usuario.

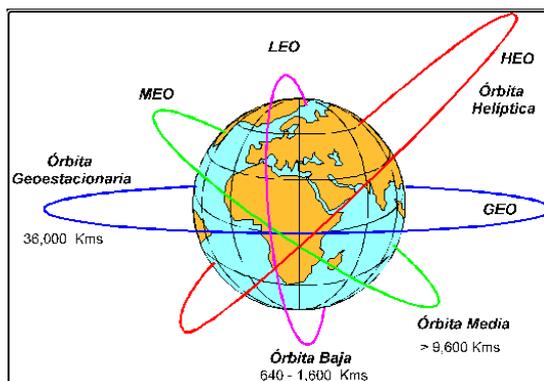


Ilustración 2-3 Representación de las orbitas

A continuación, se describen más detalladamente los tipos satélites existentes:

2.4.1.1 Satélites de navegación

Para poder garantizar una cobertura global en cualquier momento en el segmento satelital, el número de satélites de navegación debe ser suficiente. Para alcanzar una adecuada robustez del servicio, se debe tener en cuenta dos consideraciones. En primer lugar, el número de satélites debe permitir la transmisión redundante de la información para que, de ese modo, si alguno de los satélites estuviera fuera de servicio independientemente del motivo, la información y el funcionamiento del segmento continuarían funcionamiento sin problema alguno. En segundo lugar, siempre que fuera necesario, se debería tener la posibilidad de emplear un número mayor de satélites para conseguir mayor precisión en una zona determinada.

Por otro lado, la ubicación de los satélites en el espacio debe estar distribuida entre diversos planos orbitales, este método permite poder cubrir toda la superficie terrestre en cualquier momento. Estos no deben porque distribuirse de manera uniforme, pues el número de satélites influye en ello.

Para estos tipos de satélites, se emplea los de órbita **MEO** (*Medium Earth Orbit*), que se encuentran situados a una altitud de 9.600 a 14.500 Km, con un periodo orbital medio de 12 horas y velocidad entre 3 km/s y 7 km/s. Para abarcar todo el planeta son necesarios de 10 a 15 satélites, ya que se sitúan a una altitud menor. Suele emplearse estos satélites para observación, defensa, posicionamiento (GPS, GLONASS o Galileo) y redes. Estos consiguen alcanzar una mayor visibilidad que los satélites LEO. Además, empleando una constelación se alcanza una mayor cobertura global con un número inferior de satélites. Como desventaja, se encuentra su puesta en órbita y su contacto de radiación del cinturón de Van Allen.

2.4.1.2 Satélites de comunicación

Para corregir errores del posicionamiento, existen ejemplos de sistemas de aumento, como el WASS de EE. UU., el EGNOS en EU o el MFSAS de Japón y Austria. Entre ellos, se emplean los siguientes tipos de satélite:

- **LEO** (*Low Earth Orbit*): ubicados a una altitud alrededor de 725 a 1.450 km. Se requiere de un mínimo de 40 satélites para alcanzar la cobertura total. Viajan a una velocidad de 8 km/s, por lo que en 90 minutos han dado una vuelta a la tierra. Suelen usarse para datos geológicos sobre el movimiento de placas terrestres y para la industria de la telefonía satélite.
- **GEO** (*Geostationary Earth Orbit*): establecidos en una órbita circular ecuatorial con una altitud de 35.786 km, siendo el periodo de rotación de 24

horas, por lo que da la impresión de que esté en el mismo lugar de la superficie del planeta. Solamente son necesarios 3 satélites para ofrecer una cobertura completa. Suelen tratarse de satélites proveedores de internet, televisión, telefonía y algunos otros datos a diversas regiones del planeta.

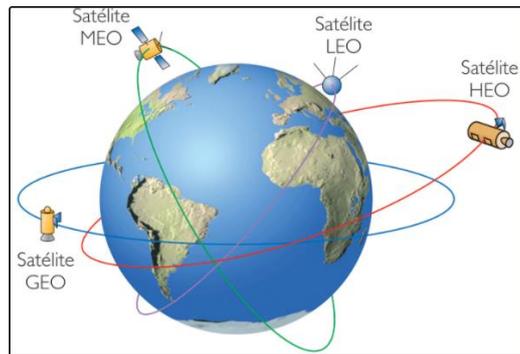


Ilustración 2-4 Representación de los tipos satélites

A continuación, se realiza una comparativa con los aspectos más relevantes entre los distintos tipos de satélites de navegación y de comunicación previamente mencionados:

Tipos de sistemas de satélites, en base a su órbita			
Características que analizar	Geoestacionarios	No geoestacionarias	
	GEO	LEO	MEO
Distancia a la Tierra	35786 km	200-3000 km	3000-35786 km
Número de satélites para dar cobertura global	3	Muy alto (> 20)	Entre 8-16 aprox
Coste por satélite	Muy alto	Bajo	Medio
Coste del sistema	Económico	Máximo	Medio
Uso de terminales portátiles	Muy difícil	Posible	Posible
Retardo de propagación	Alto (270 ms)	Bajo (5-20 ms)	Medio (20-270 ms)
Pérdidas de propagación	Altas	Bajas	Medias
Complejidad de la red	Sencilla	Compleja	Media
Período de desarrollo	Largo	Largo	Corto
Vida del satélite (años)	10 a 15	3 a 7	10 a 15
Visibilidad del satélite	Siempre	Corta	Media

Tabla 2-1 Tabla comparativa de satélites

En base a la comparativa, se puede extrapolar que los satélites LEO presentan un retardo inferior de propagación como de pérdidas. De ahí, que suelen ser los más aptos para implementar comunicaciones móviles vía satélite. Aunque, presentan algunas desventajas respecto a los otros como, por ejemplo:

- A pesar de su reducido peso y complejidad, siendo los más económicos en un principio por ello, al tener que emplearse un número elevado de satélites, esto genera que el coste total del sistema sea el más caro de los tres tipos. El coste total del sistema es el más caro de los tres tipos, ya que se tiene que emplear un número elevado de satélites debido a su peso reducido y

complejidad. Por ello, han pasado de ser los más económicos debido a sus características a los más costosos.

- En sintonía con lo anterior, al ser necesario lanzar más satélites para dotar de cobertura al sistema, el tiempo de desarrollo es más largo. Además, debido a su órbita, se encuentra muy cerca de la Tierra. Además, su tiempo de vida es relativamente corto, por ello se tiene que ir reponiendo más a menudo que los otros.
- Al requerir conexiones entre satélites, la complejidad de la red es la mayor de todos.

En el caso de los GEO, estos han ayudado a impulsar el uso de otras órbitas debido a las múltiples desventajas que presentan, estas serían las siguientes:

- Poseen un mayor retardo de propagación, consecuente por su tipo de órbita (35786 km) y la velocidad finita de las ondas electromagnéticas. Si se tiene en cuenta, dicha distancia y la velocidad de la luz ($3 \cdot 10^8$ km/s), se calcula que el tiempo de propagación de la señal, teniendo en cuenta la ida y vuelta, esta es entorno los 240 y 270 ms, valor que dependerá del ángulo de elevación de la posición del usuario respecto al satélite.
- Presenta un valor alto de pérdidas de transmisión, si se tienen en cuenta que los dispositivos móviles tendrán una potencia más limitada y un menor tamaño, no se podrá tener en consideración este tipo para su uso.
- Dotan una menor cobertura en las latitudes que se encuentren más allá del ecuador, siendo indispensable el emplear ángulos de elevación muy reducidos.
- Tienen un coste de lanzamiento alto.

En cambio, los satélites MEO son los que a primera vista pueden presentar ser la solución óptima, respecto a los mencionados anteriormente. Esto es porque ofrecen mejores resultados en la calidad del servicio, en los riesgos técnicos en su construcción, en su lanzamiento, en el coste de mantenimiento y en la elaboración de su red. De ahí que, de los tres tipos que se han tratado, este sea el que presenta un futuro más prometedor.

Finalmente, para poder determinar la señal recibida, se debe poder identificar correctamente cada satélite, y de ahí el pseudorange calculado que se corresponde con la distancia. Las maneras más habituales para proceder a su identificación son las siguientes:

- Usando la posición en el plano orbital, donde cada plano puede ser identificado por una letra y cada satélite que pertenece a un plano con un número.

- Usando un código previamente asignado.
- Usando un código pseudoaleatorio asignado (*PRN-Pseudo Random Noise*). Este código puede ser relativamente útil debido a sus características que permiten identificar las señales provenientes de cada uno de los satélites. Al poseer una forma parecida al ruido blanco, este tiene una correlación bastante baja respecto a todos los códigos de los demás satélites.

2.4.2 Segmento de Control

Referido al grupo de estaciones en tierra que tratan la información recogida procedente de los satélites. No presenta una definición única, siendo cada país o grupo de países quienes lo implementan de manera distinta.

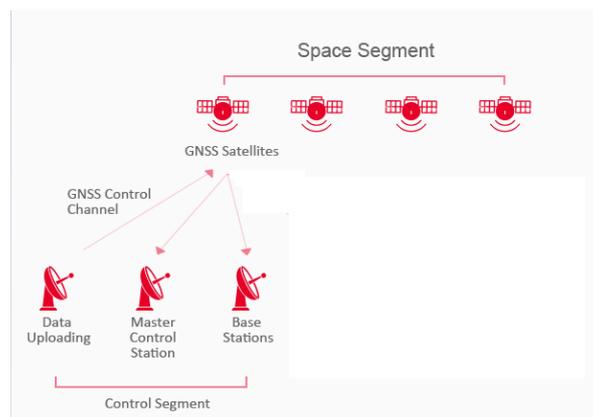


Ilustración 2-5 Segmento de Control

Entre las funciones que realiza, se encuentra la de garantizar las prestaciones a través del monitoreo del segmento espacial y, si es necesario, llevar a cabo corrección en la posición orbital y temporal de los satélites, transfiriendo datos de sincronización de los relojes atómicos y correcciones de posicionamiento de órbitas a cada uno de los respectivos satélites.

A pesar de que se implementen de manera distinta, a nivel funcional estará estructurado de la siguiente manera:

- **Estación maestra** (*Master Control Station*): trata la información y monitoriza el estado actual de los satélites. Además, es la encargada de generar los mensajes de navegación y rectifica el sincronismo que existe en los satélites para conseguir la mayor precisión posible. Suele encontrarse redundada como procedimiento de protección, pues es un elemento pilar importante.
- **Estaciones de monitorización** (*Base Stations*): ubicadas en distintos lugares de la Tierra. Éstas tratan la información procedente de los satélites e

información meteorológica. Ambas son enviadas a la estación maestra para su posterior procesamiento.

- **Estaciones de transmisión** (*Data uploading*): transmiten a los satélites los datos con las directivas pertinentes procedentes de la estación maestra, una vez que se ha procesado la información obtenida de la estación de monitorización.

Para facilitar el sincronismo con los satélites, las estaciones suelen tener uno o más relojes atómicos de cesio.

2.4.3 Segmento de Usuario

Formado por una amplia variedad de equipos, estos pueden ir desde un *Smartphone* hasta receptores más sofisticados. Este segmento recibe las señales provenientes del segmento espacial, para posteriormente procesarlas y extraer la información respecto a la posición, la velocidad, etc. Para poder hacer esto posible, se necesita un tipo de antena que soporte recibir las señales que proceden de los satélites, normalmente suelen ser **UHF** (con un rango de frecuencia 1.100 – 1.600 MHz), debiendo ser omnidireccional también.

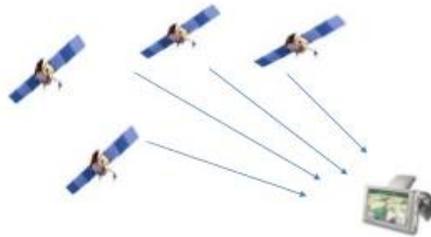


Ilustración 2-6 Representación del segmento Usuario

Su clasificación puede depender de varios aspectos, como el tipo de servicio que ofrece (militar o civil), la arquitectura de recepción implementada, la cantidad de frecuencias que sea capaz de tratar en la recepción, teniendo en cuenta que algunos receptores pueden ser mono frecuencia o multifrecuencia. La importancia de estos últimos radica en la capacidad de mejorar algunos efectos que afectan a la señal, como es el efecto ionosférico, pues no perjudica este a todas las frecuencias de la misma manera.

2.5 Características

Una vez que se ha descrito la estructura, se procede con la definición de las características esenciales que permiten identificar a un sistema de radionavegación por satélite. De manera común, un sistema GNSS debe poder cumplir los siguientes requisitos básicos:

- **Cobertura:** Debe ser capaz de garantizar y ofrecer una cobertura global, en otras palabras, el conjunto de la constelación de satélites deberá ser capaz de proveer el servicio en cuestión.
- **Disponibilidad:** Debe ser ampliamente funcional garantizando un alto tiempo dando servicio, alrededor del 95% o 99%. En la actualidad, todos los GNSS poseen en sus constelaciones algún satélite de *spare*, para asegurar en caso de necesidad, la correcta sustitución de los nominales.
- **Integridad:** Referente a la seguridad de los datos utilizados por los GNSS, pues estos deben poder asegurar que no estén expuestos a manipulación de forma externa al GNSS y puedan ser empleados de forma maliciosa, tanto desde el origen al destino por la ruta que se haya establecido.
- **Precisión:** Existen unas condiciones mínimas que todo GNSS debe ser capaz de ofrecer, entre ellos, los más relevantes son la precisión y cada uno de los indicadores de calidad del servicio.
- **Continuidad del servicio:** El funcionamiento de todo GNSS debe ser ininterrumpido.

2.6 Aplicaciones

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores, el origen de la tecnología GNSS procede de haberse aplicado al sector militar de la mano del GPS, para más adelante extender su uso para aplicaciones civiles también.



Ilustración 2-7 Tipos de servicios GNSS

A continuación, se desarrollan las aplicaciones existentes en la actualidad:

En primer lugar, se encontraría el GPS, este tiene innumerables beneficios, llegando a convertirse en un componente imprescindible para los sistemas militares estadounidenses como, por ejemplo, armas guiadas de alta precisión, navegación y

posicionamiento de las tropas en vehículos por tierra, mar o aire. En concreto, se da servicio a los militares del Ejército del Aire, Infantería y la Marina.

Como punto negativo, la gran dependencia del GPS ha llevado a los EE. UU. a establecer mecanismos de seguridad que impida que la tecnología pueda ser empleada entre ellos mismos. Algún ejemplo sería la selectiva o control que ejerce el gobierno sobre los receptores vendidos de GPS, limitando funcionalidades como la altitud y la velocidad, impidiendo que se pueda ubicar armas guiadas contra los EE. UU.

En segundo lugar, se debe destacar el GNSS usado para el sistema civil, entre las aplicaciones más destacables, se encontrarían:

- **Automoción:** Normalmente, el servicio más empleado y conocido a nivel de aplicación es el GPS. En concreto, los automóviles poseen receptores GPS con diferencias a nivel de características, a los que se les carga un software con el que poder acceder a distintos tipos de información (mapas, localizaciones, límites de velocidad, radares...), otorgándoles la capacidad de analizar y planificar rutas en tránsito. Actualmente, representan un gran nicho del mercado.
- **Ferrocarriles:** En el día a día ya se usa la navegación por satélite en sector ferrocarril, entre algunas de sus aplicaciones cabe mencionar, el apoyo al control del tráfico, la gestión de recursos ferroviarios, la asistencia al cliente o el control de manera activa de los trenes. Además, se prevé que en futuro se implemente la tecnología para los sistemas de control de trenes y señalización de la UE, utilizando el proyecto Galileo.
- **Aviación:** En este sector se emplean sistemas de GPS integrados para usar el piloto automático mediante la planificación de rutas. Para una mayor precisión en la ruta son empleados diversos sistemas de aumento como WASS o LASS dependiendo de su localización.
- **Navegación marítima:** En la actualidad, el GPS es la más empleada en el sector para que los barcos puedan navegar en el agua. Existe un software denominado MOB, que permite realizar un rescate marítimo de personas en el mar, en caso de accidente, con una precisión exacta.
- **Agricultura:** En el sector agrícola, el DGPS facilita infinidad de procesos lo que ha provocado una revolución en dicho sector. Entre las más destacables se encuentran, la gestión de activos como optimizar la cantidad de recursos en base a la parcela que esté ubicada la máquina, las lindes, la gestión forestal o el seguimiento de vehículos.
- **Inspección y mapeo de territorios:** aquí se emplea el este tipo de servicio para la realización de las mediciones de datos que permiten la actualización de los mapas cartográficos. Un ejemplo podría ser SIG (Sistemas de Información Geográfica).

- **Sincronización de equipos:** Se emplea GPS por su precisión en la sincronización entre equipos. Como ejemplo, se puede nombrar NTP, que mediante el reloj del GPS permite la sincronización. Otro uso es en las comunicaciones redes TDMA.
- **Telefonía móvil:** Los *smartphones* de hoy en día integran receptores de GPS y que usando un software de navegación se consigue obtener los datos de la ubicación.
- **Servicios de localización y emergencia:** Se emplea GPS y tiene un gran abanico de aplicaciones, como servicios de emergencia para localizar personas o para publicidad ofreciendo la localización de las ubicaciones.
- **Transporte multimodal:** la evolución de los GNSS está favoreciendo que se reduzcan los tiempos de entrega y de costes, al permitir una mejor localización y gestión de las flotas de transporte (mar, tierra o aire).
- **Elaboración de mapas de la ionosfera:** utilizando GPS se puede analizar la información procedente de los satélites respecto a las perturbaciones de la ionosfera, pues esta genera errores en la propagación de la señal transmitida. Analizando estos errores se pueden medir seísmos en tiempo real.
- **Otras aplicaciones futuras:** optimización de la distribución de energía en una red eléctrica, perfeccionamiento de las redes de comunicaciones, mejora de la eficacia del transporte o en la monitorización eficiente de los recursos.



Ilustración 2-8 Representación de las distintas aplicaciones GNSS

Como se puede observar, se permite mejorar la calidad de vida en aquellos que países que lleven a cabo inversiones en este tipo de sistemas y tecnología.

Por último, se tendría que destacar la integración existente en las redes de telecomunicaciones, debido a que permiten mejorarlas, incrementando la eficiencia de la comunicación. Las redes que podrán beneficiarse de este tipo de integración con los GNSS serían la telefonía móvil, las redes de comunicaciones tales como Internet, UMTS, GSM, LTE y aumentando la seguridad de red en el momento de iniciar la comunicación, como en el desarrollo de futuros nuevos servicios.

2.7 Funcionamiento

Se cuantifica la distancia existente entre un satélite y su receptor, basándose para ello en el tiempo que toma la señal desde el satélite. Después, con varias

medidas se puede llevar a cabo una triangulación y determinar la posición. Debido a lo anterior, se debe emplear más de un satélite, pues conocida la distancia del receptor con un satélite, se tiene un gran abanico de localizaciones en el espacio, pero con dos satélites se reduce a una circunferencia y con un tercero llega hasta reducirse a nada más que dos puntos. Aunque es con cuatro satélites, cuando se podrá eliminar los errores de sincronismo.



Ilustración 2-9 Funcionamiento de un GNSS

Para calcular la posición se requiere dos parámetros, estos son la posición del satélite y el reloj de este. El proceso de cálculo se realiza una vez la señal enviada ha sido recibida al receptor desde el satélite, se calcularía de la siguiente manera:

1. El receptor es conocedor de la ubicación de cada satélite basándose en las efemérides¹, los satélites son los responsables de transmitirla.
2. Un receptor GNSS se encarga de medir la distancia de los satélites, calculando la distancia en base a la posición calculada. Para eso es necesario calcular el tiempo que la señal tarda en ser recibida en el receptor. Una vez se obtiene el tiempo y sabiendo que la señal se transmite a la velocidad de la luz (se pueden aplicar correcciones), se hace posible realizar el cálculo de la distancia entre el receptor y el satélite.
3. Los satélites transmiten al receptor su ubicación en un punto en la superficie de la esfera con un centro en el propio satélite y de radio la distancia total hasta el receptor.
4. Para poder calcular la posición será necesario disponer de 4 satélites, pues con tres satélites únicamente será posible obtener la ubicación en tres dimensiones, mientras que con el cuarto se podrá eliminar los errores de sincronismo.

¹ Se trata de un conjunto de parámetros orbitales que permiten indicar la ubicación del satélite.

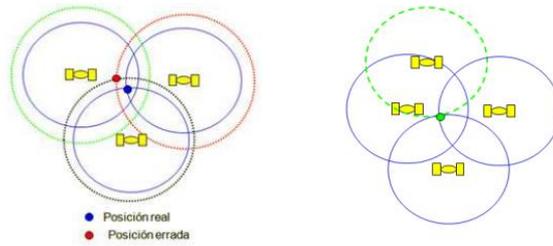


Ilustración 2-10 Método del cálculo de posición

Para dar una solución más resumida al problema, se establece un modelo algebraico de n ecuaciones basado en el número de satélites empleados, siendo R_i la distancia del satélite, las coordenadas de cada satélite (x_i, y_i, z_i) , las coordenadas del usuario (x_u, y_u, z_u) , R_i corresponde con la pseudodistancia y τ a la sincronización de sistemas. En la siguiente imagen se representa el modelo algebraico mencionado:

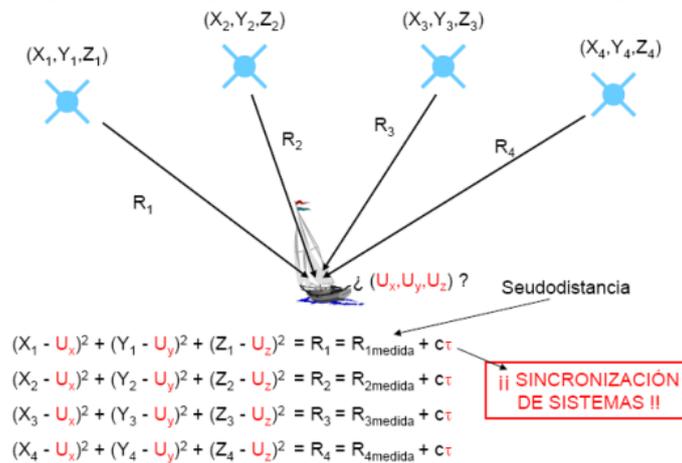


Ilustración 2-11 Modelo algebraico del cálculo de la ubicación

Siendo la ecuación para i satélites:

$$(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2 = R_i = R_{i\text{ medida}} + c\tau$$

En resumen, la tarea del satélite reside en transmitir una señal que contenga los datos orbitales y la hora exacta que fue transmitida, para que una vez llegue al receptor, éste pueda calcular el tiempo transcurrido y de ahí obtener la distancia del satélite. Por eso, la sincronización entre la referencia temporal del satélite y receptor es el principio de funcionamiento de los sistemas de radionavegación.

Por otro lado, para poder calcular el tiempo de propagación desde el satélite hasta al usuario, se realiza una resta entre el tiempo de emisión y recepción que se encuentran en distintas escalas de tiempo. Por ello, la pseudodistancia depende del tiempo de receptor, emisor y de la Estación Maestra del segmento de control, pues esta coordina las referencias temporales de la constelación.

A un nivel más técnico, existe otros aspectos que hay que tener en cuenta, como son los pseudorángos y las técnicas de acceso que se utilizan, estas pueden ser

CDMA (Acceso Múltiple por División de Código) o FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia).

Respecto a lo primero, teniendo en cuenta que una señal es recibida por el receptor en el instante t se puede describir la seudistancia o pseudorange como:

$$P(t) = c[t_u(t) - t^S(t - \tau)]$$

siendo:

- C , la velocidad de la luz en el vacío; T , el tiempo de tránsito real; $t_u(t)$, el tiempo de recepción de la señal y $t^S(t - \tau)$, tiempo de emisión de la señal por el satélite s .

Con lo anterior, se puede desarrollar la relación del tiempo de receptor y del satélite de esta manera:

$$t_u(t) = t + \delta t_u(t)$$

$$t^S(t - \tau) = (t - \tau) + \delta t^S(t - \tau)$$

Siendo δt_u y δt^S el sesgo de reloj del receptor y satélite, con la consideración referencial de reloj proveniente del segmento de control. Sustituyendo, se puede obtener la siguiente expresión:

$$P(t) = c((t + \delta t_u(t)) - (t - \tau) + \delta t^S(t - \tau)) + \varepsilon_p(t)$$

donde $\varepsilon_p(t)$ se refiere al término en el que se incluyen todos aquellos efectos que en el proceso no son deseados. Después de todo, el segmento de usuario será el encargado de solucionar el sistema de ecuaciones, de igual manera para el caso en que haya 4 o 3 satélites. Si se da un idéntico sesgo en los casos, se puede distinguir, siendo el satélite el responsable de trabajar con el segmento de control, monitorizando, en todo momento, el reloj de los satélites para de esta manera corregir las desviaciones detectadas.

Para poder calcular correctamente las ecuaciones de la pseudodistancia de cada uno de los satélites, donde todos puedan acceder al medio de manera consecutiva, se debe determinar la identificación y el discernimiento entre las diversas señales recibidas para conocer el satélite al que se referencian. Una de las técnicas de acceso que más empleadas, en estos sistemas GNSS, es el CDMA.

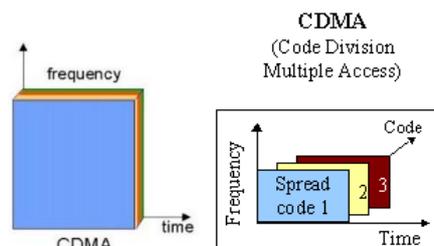


Ilustración 2-12 Técnica de acceso CDMA

Esta técnica transfiere un conjunto de señales de manera simultánea a una misma frecuencia, esto es posible al emplear multiplexación mediante código. Esta gran utilidad en los GNSS capacita la discriminación de las señales procedentes de varios satélites, sin requerir emplear distintas frecuencias, favoreciendo a los transpondedores instalados en su interior y a disponer de un eficiente uso del espectro.

El funcionamiento radica en que cada satélite posee un código pseudoaleatorio (PRN, *Pseudo Random Noise*) asignado, constituido con unas particulares características ideales para este tipo de sistemas.

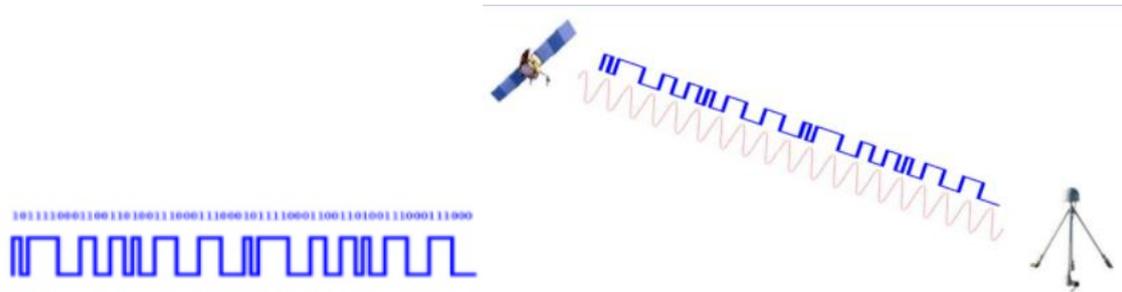


Ilustración 2-13 Código PRN

Su nombre proviene de que, a pesar de ser señales deterministas, presenta una conducta similar al ruido blanco, pues su función de autocorrelación es igual a una delta. Para el ruido blanco, su interpretación es que la señal en un instante se encuentra incorrelada con la señal el tiempo restante. Sin embargo, en el caso de los satélites, la correlación cruzada entre los códigos PRN de varios satélites será bastante baja, pero en cambio, la autocorrelación será elevada. Permitiendo, de esta manera, que el receptor correlacione la señal recibida con los códigos PRN sabidos de los satélites, pudiendo desvincular la señal y obtener la versión original, garantizando que las señales que han sido transmitidas de otros satélites no interfirieron.

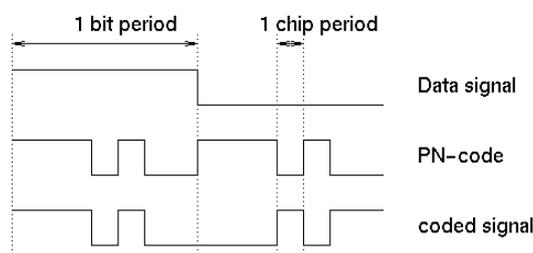


Ilustración 2-14 Correlación códigos PRN

Con esta técnica se mitigan los problemas conocidos en los GNSS, como puede ser la limitación en el número de usuarios simultáneos conectados al medio, al predeterminedar este valor en los códigos PRN usados. Para esta situación, no se supera en 3 o 4 decenas el número de satélites a identificar, no siendo, por tanto, un factor problemático. Además, otro problema presente en este tipo de técnicas es la diferencia existente en los niveles de potencia recibidos, pues si hay fuentes con

atenuaciones o distancias diferentes, puede suceder que algunas señales enmascaren a otras que posean niveles más débiles. Aunque, para los receptores GNSS, no es un aspecto condicionante, al estar los satélites alejados bajo una misma orden de magnitud y con unos niveles de potencia recibidos no excesivamente diferenciados.

Por último, también está la técnica de acceso FDMA, esta funciona asignando a cada uno de los satélites una frecuencia distinta de transmisión, con el fin de eludir el solapamiento en frecuencia. Esta ventaja respecto a CDMA tiene una contrapartida, residiendo en la complejidad y coste en el diseño de antenas y receptores, al ser necesario implementar filtros y calibración para poder emplear todas las bandas posibles. En la actualidad, únicamente se emplea, desde 2011, este tipo de técnica en algunas de las señales *legacy* de GLONASS.

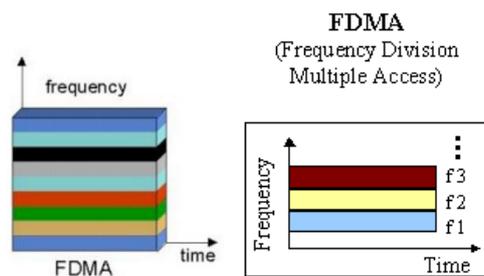


Ilustración 2-15 Técnica de acceso FDMA

2.8 Fuentes de error

Cada satélite transmite la señal con la información requerida, pero eso no exime a que sea afectada por distintas fuentes de error. Las más relevantes son:

- Efectos atmosféricos y multitrayecto.
- Errores de efemérides, de reloj y de la relatividad.
- Disponibilidad selectiva.

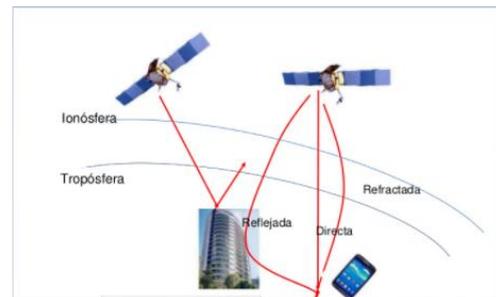


Ilustración 2-16 Fuentes de error

En la tabla siguiente se describen más fuentes:

Sistemas GNSS	Fuentes de error y tipo de efectos
Satélite	Errores orbitales, oscilador (Offset del reloj), efectos relativistas, errores intencionados por el administrador del sistema, S/A – Disponibilidad selectiva y A/S – Anti-spoofing. Código Y.
Propagación	Efectos atmosféricos, refracción Ionosférica refracción Troposférica y pérdidas de ciclo.
Receptor	Variación del centro de fase, oscilador (Offset del reloj), multipath y retardos instrumentales.
Errores intencionados con dispositivos externos que perturban la señal	Jamming, meaconing, spoofing e interferencias electromagnéticas.
Variaciones en la posición del receptor	Mareas terrestres, cargas oceánicas, cargas atmosféricas y movimientos tectónicos.

Tabla 2-2 Fuentes de error

Como anteriormente se ha comentado, la creación de sistemas de mejora permite que se alcancen mayores prestaciones, reduciendo los errores que perjudican la precisión del servicio.

2.9 Sistemas actuales

Una vez se conoce todo lo relevante a un GNSS, se procede a presentar de manera breve, los GNSS más actuales, siendo estos el GPS, GLONASS y BeiDou. Existe otro GNSS, el sistema europeo Galileo, que se describirá más en detalle. A continuación, se adentra en la historia, características generales y sus segmentos (espacial, control y usuario), como de la estructura de su señal de los GNSS mencionados.



2.9.1 GPS

A lo largo de los apartados anteriores, se ha mencionado varias veces el sistema de posicionamiento GPS, por tratarse del primer sistema de posicionamiento en estar operativo previamente a nivel global. En la actualidad, continúa siendo el más extendido a nivel mundial. Su desarrollo fue realizado por el DoD de los EE. UU.

2.9.1.1 Características

Al tratarse del sistema más antiguo de todos, se puede entender que tenga una trayectoria de desarrollo mayor que el resto y un nivel de madurez de implantación mayor. Entrando en detalle, el GPS está compuesto por una constelación de satélites que transfieren señales de rango, estas capacitan el reconocimiento del transmisor original. A su vez, las señales modulan mensajes de

navegación que almacenan información de las efemérides que son relevantes para realizar el cálculo de cada uno de los satélites. Además, se emplea una señal combinada (hora y estado de la constelación) denominada almanaque y un código de rango que se modula entre varias portadoras a frecuencias que se encuentran en la UHF, en concreto en las frecuencias² L1, L2 y L5. Se usa CDMA para acceder al segmento espacial.

En lo que respecta a las señales, las que son civiles son públicas y se encuentran plasmadas en los documentos IS (*Interface Specification*) en su web oficial, pero las señales para usos militares presentan una codificación cifrada con la finalidad de restringir su uso mediante autorización. Sin embargo, existe la posibilidad de que un civil pueda beneficiarse de dichas señales de manera limitada sin ser requerido su desciframiento, lo que se denomina acceso sin codificación o semicodificado.

2.9.1.2 Segmento Espacial

La composición de la constelación GPS viene determinada por satélites MEO, los cuales dan la vuelta al planeta dos veces al día, orbitando a unos 20.200 Km sobre la superficie terrestre y están distribuidos entre 6 planos orbitales. Como requisito mínimo, se establece que debe disponer de al menos 24 satélites para su óptimo funcionamiento. A lo largo de su evolución, se han lanzado al espacio varios bloques, como se puede ver representado en la siguiente tabla:

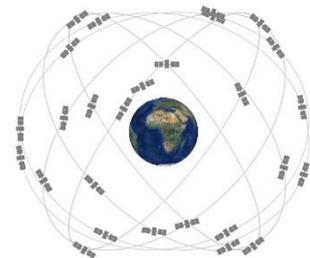


Ilustración 2-17
Segmento espacial

	Satélites Legacy			Satélites Modernizados	
	Bloque IIA	Bloque IIR	Bloque IIR – M	Bloque IIF	Bloques III/IIIF
Operativo	0	9	7	12	2
Señales	L1: C/A y P(Y) L2:P(Y)	L1: C/A y P(Y) L2:P(Y)	L1: C/A y P(Y) L2:P(Y) y L2C Señal Militar M	L1: C/A y P(Y) L2:P(Y) y L2C Señal Militar M L5: L5	L1: C/A,P(Y) y L1C; L2:P(Y) y L2C;Señal Militar M; L5: L5
Vida útil	7,5 años	7,5 años	7,5 años	12 años	15
Lanzamiento	1990 - 1997	1997 - 2004	2005 - 2009	2010 - 2016	2018 - X

Tabla 2-3 Evolución satélites GPS

² Más información sobre el plan de señales de GPS, en el siguiente enlace: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Signal_Plan

2.9.1.3 Segmento Control

Actualmente, el OCS (Segmento de Control de Operacional) de GPS está compuesto por dos estaciones de control maestra (una nominal y otra alternativa), 11 estaciones de transmisión de datos y 16 estaciones de monitorización. A continuación, se describen sus funciones:

- **Estación de control maestra:** Centraliza el control de la constelación GPS y se encuentra redundada, reduciendo así al mínimo los posibles fallos. Su principal tarea es la de monitorizar el estado de los satélites, esto engloba el control de las órbitas, predecir las efemérides, parámetros orbitales y correcciones de reloj que son devueltos a la constelación. En definitiva, debe encargarse de la generación de los mensajes de navegación que se enviarán a los satélites y de la gestión del sincronismo del reloj. A su vez, controla el mantenimiento de los satélites, englobando la rectificación de sus órbitas, su fin del servicio o retirada de la constelación. En base a sus tareas, se trata del elemento más relevante de todo el segmento de control y a nivel de sistema crítico.
- **Estación de monitorización:** Su ubicación suele ser cercana al Ecuador para obtener una mayor cobertura. Sus competencias son las correspondiente al seguimiento de las señales procedente de los satélites, es decir, recibirla y transmitirla a la estación de control maestra. Posteriormente, esta tratará la información contenida en la señal y proporcionará los mensajes de navegación necesarios.
- **Estación de transmisión:** Transmite la señal con la información procedente de la estación de control maestra, luego de que ésta haya generado los nuevos mensajes de navegación, con las correcciones orbitales, de reloj, etc. La señal debe ser modulada apropiadamente a las frecuencias de transmisión compatibles para que, la constelación de los satélites la reciban correctamente.

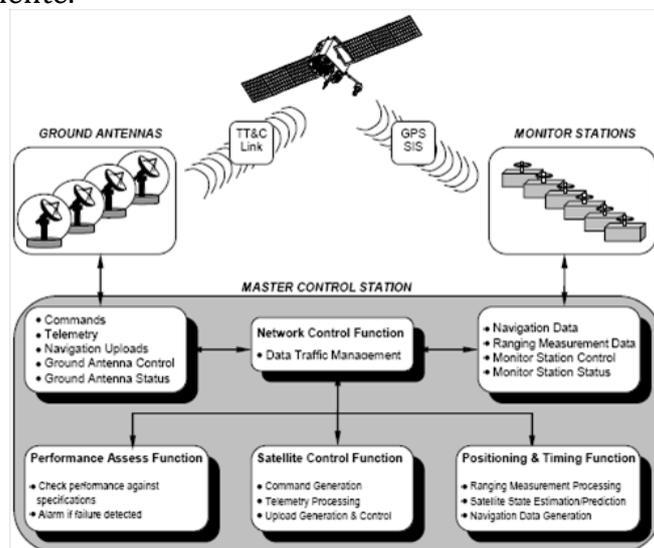


Ilustración 2-18 Segmento de control GPS

Para obtener una visión global de la estructura del segmento de control, se puede ver a continuación, una imagen de la ubicación de las estaciones descritas por todo el planeta, en esta imagen cabe destacar que *Ground Antenna* se refiere a las Estaciones de transmisión:

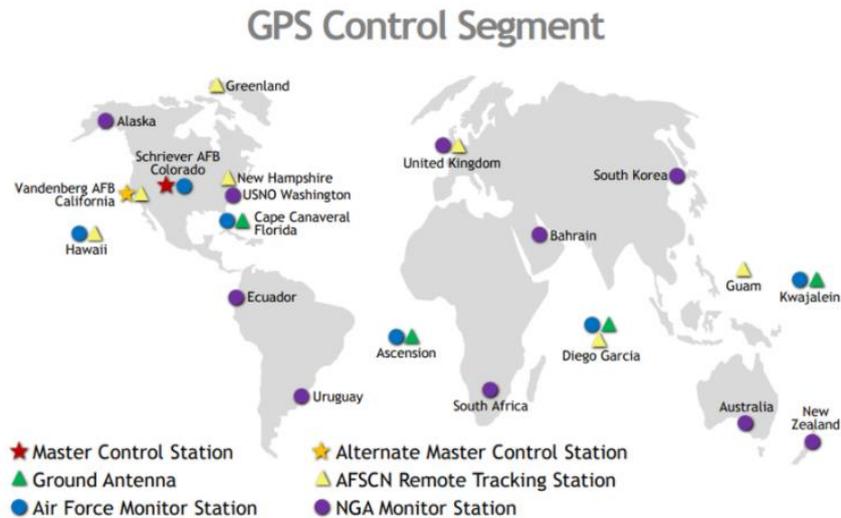


Ilustración 2-19 Segmento de control de tierra GPS

2.9.1.4 Segmento Usuario

Está comprendido por receptores o procesadores y antenas con la capacidad de tratar con señales de banda L enviadas desde los satélites, demodulando los datos, obteniendo de esa manera los pseudorangs y otros observables, con los que se puede calcular, empleando las ecuaciones de navegación correspondientes, las coordenadas del receptor, su velocidad y una referencia temporal bastante precisa. Sobre esta última utilidad, se puede decir que es apenas conocida, pero a su favor presenta importantes aplicaciones como puede ser en las redes que deban tener un elevado requisito de sincronismo y latencia como, por ejemplo, las redes 5G, entre otras.

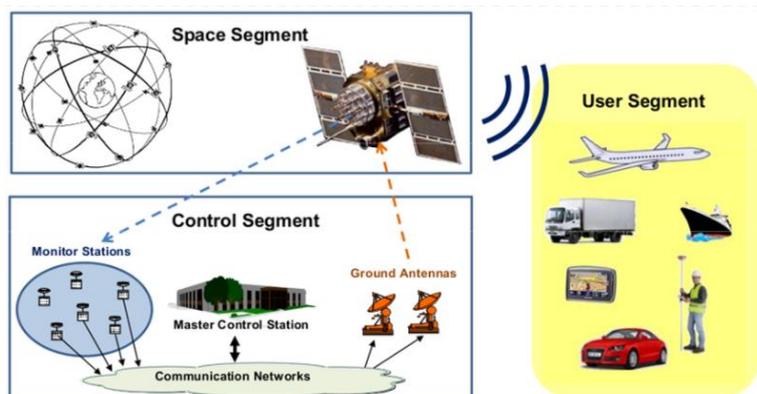


Ilustración 2-20 Representación de todos los segmentos GPS

La estimación de dispositivos con GPS en 2012 fue de alrededor de los 2.000 millones, dicha información fue proveniente por un informe de mercado de la Agencia Europea GNSS.

2.9.2 GLONASS



Este GNSS fue inicialmente desarrollado por la Unión Soviética, pero en la actualidad está bajo el control la Federación Rusa, siendo un equivalente de las propuestas del Galileo europeo y del GPS de los EE. UU.

2.9.2.1 Características

En la época de los años 60, la extinta Unión Soviética decide entrar en el sector de los GNSS para desarrollar un sistema que compitiera con el estadounidense. En concreto, se desarrolló un sistema inicial conocido bajo el nombre de *Tsikada* y el nombre que recibió el primer satélite órbita fue *Cyclone*. Aunque, más adelante, comprendieron que trabajar a órbitas bajas no permitiría alcanzar los requisitos necesarios del sistema, por lo que tuvieron que buscar otras opciones.

Más adelante, en 1982, se iniciaron las pruebas de GLONASS con tres nuevos satélites denominados Kosmos (con número 1413,1414 y 1415). A pesar de que, en los posteriores años la Unión Soviética fue disuelta, el proyecto continuó bajo la mano de la Federación Rusa, alcanzando en 1993 un sistema totalmente operativo, pero no fue hasta 1995 que no logró alcanzar un punto óptimo con 24 satélites en órbita.

Con lo que no se contaba fue con la caída de la economía que sufriría Rusia, acabando con la financiación de todos los proyectos espaciales. No fue hasta el 2000 que Rusia, bajo el mando de Vladimir Putin, vuelve a insuflar ingresos en GLONASS. En el año 2007, se presenta el sistema como un servicio de posicionamiento que brindaría servicio de igual manera a su país como a todo aquel externo al mismo que quisiera usarlo, por supuesto sin coste y sin ninguna limitación.

A un nivel más técnico, el sistema usa bandas³ L1, L2 y L3, próxima a las L1, L2 y L5 del GPS, pero en este caso se emplea FDMA (multiplexación de frecuencia) y no CDMA (código) para acceder al segmento espacial.

³ Más información sobre el plan de señales de GLONASS, en el siguiente enlace: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Signal_Plan

2.9.2.2 Segmento Espacial

Su composición viene determinada por 24 satélites MEO que, se encuentran distribuidos en 3 planos orbitales con 8 satélites en cada uno, a una distancia aproximada de 19.140 Km. Requieren de 11 horas para dar una vuelta completa al planeta y con 18 satélites es posible ofrecer servicio integral en el país ruso. A lo largo de su evolución, se han lanzado al espacio varios bloques, como se puede representado en la siguiente tabla:



Ilustración 2-21 Segmento espacial GLONASS

	Glonass	Glonass-m	Glonass-K
Estado	Fuera de servicio	En servicio	En servicio
Primer lanzamiento	1982	2003	2011
Vida útil (años)	3	7	10
Peso (Kg)	1250	1480	750
N.º de señales civiles	1	2	2
Estabilidad de relojes a bordo	5×10^{-13}	1×10^{-13}	1×10^{-14}
Potencia de salida (W)	1000	1600	16000

Tabla 2-4 Evolución satélites GLONASS

2.9.2.3 Segmento Control

Su cometido es proveer una óptima operación completa del sistema, administrando intercomunicación entre los segmentos espacial y de usuario. Entre sus funciones, se encuentra la monitorización del estado de los satélites, obtener sus efemérides, la señal de reloj y realizar, dos veces al día, la actualización de los mensajes de navegación. La distribución del segmento quedaría de la siguiente manera:

- **Centro de Control del Sistema (SCC):** Consta de un centro y se responsabiliza del control de la constelación, posee funcionalidades de telemetría y control remoto de los satélites. Además, coordina las funciones y operaciones provenientes del procesamiento de las señales que proceden de las centrales TT&C.
- **Centro de Telemetría, Seguimiento y control (TT&C):** Compuesto por 5 centros que reciben y almacenan información proveniente de los satélites de señales de rango y los datos de telemetría, que se envían a la estación central para su procesamiento posteriormente.
- **Centrales de Control de Reloj (CC-M):** Formado por 2 centrales redundantes, su tarea reside en determinar la escala de tiempos del sistema a través de un reloj atómico de hidrógeno de alta precisión. También,

determina la referencia a la que se debe sincronizar los relojes atómicos de cesio de los satélites.

- **Centrales de Transmisión de datos (ULS):** Consta de 3 centrales, que se encargan de hacer llegar la información procesada y los mensajes de navegación a los satélites nuevamente.
- **Estaciones de Laser Ranging (SLR):** Compuesto por 2 estaciones, estas monitorizan y garantizan que exista una gran precisión láser, debido a que se trata del único método de calibración que permite obtener las efemérides.
- **Red de Estaciones de Monitorización y medidas:** Formado por 4 estaciones, que pueden ser ampliable a 6, se encargan de recibir la información procedente de los satélites y proporcionarla a las centrales TT&C.

Para obtener una visión global de la estructura del segmento de control, se puede ver a continuación, una imagen de la distribución del segmento:

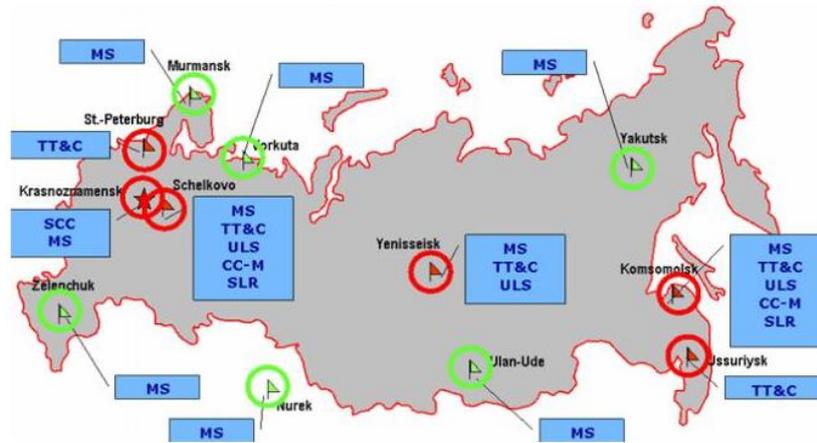


Ilustración 2-22 Segmento de tierra GLONASS

2.9.2.4 Segmento Usuario

Compuesto por dispositivos y/o receptores GLONASS con capacidad de obtener la ubicación del usuario, su velocidad y conseguir una precisión referencial de tiempo. Se emplea procesamiento de las señales transmitidas y recibidas de la constelación de los satélites en las bandas L1 y L2, empleando el tiempo de propagación del satélite al usuario y en conocimiento de la ubicación del satélite.

A pesar de que se desarrolló inicialmente para el sector militar ruso, hay que destacar que, en el sector civil y comercial, el sistema presenta desventajas respecto al GPS, pues este se encuentra mucho más extendido en aplicaciones comerciales. Ante esta situación, desde el gobierno ruso se ha incentivado de manera activa su uso en sectores importantes como son el de la aviación o el transporte. Por ejemplo,

desde 2011 si se fabrica un coche en suelo ruso, el fabricante deberá implementar el sistema GLONASS en el vehículo.

En la actualidad, su oferta se ha ido integrando en diversos sectores como, por ejemplo, en el sector de los *smartphones*, pues ahora se usa conjuntamente GLONASS y GPS para minimizar los periodos de obtención de las señales al poder usar más satélites de ambas redes.

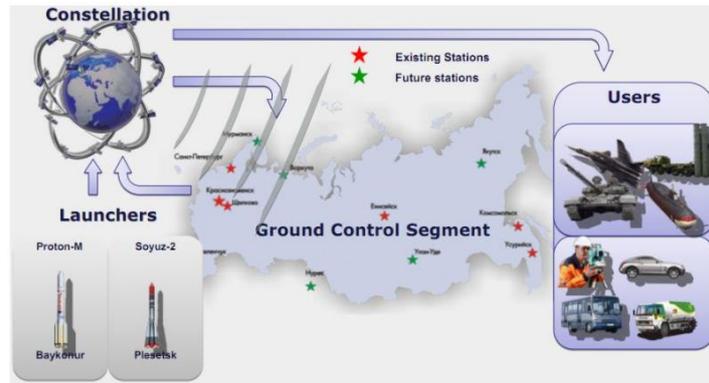


Ilustración 2-23 Representación de los segmentos GLONASS

2.9.3 BeiDou



Se trata del sistema GNSS, cuyo nombre proviene del chino de las siete estrellas más brillantes de la Osa Mayor, desarrollado durante las pasadas décadas por parte de la República Popular de China, con la meta de entrar en la carrera de la geonavegación durante el año 2020.

2.9.3.1 Características

La idea de poner en órbita el primer satélite rondaba los años 70 pero no fue hasta 1989, mediante el proyecto *Twin Stars*, que se lanzaron dos satélites geostacionarios experimentales, con la intención de proceder con las primeras pruebas de posicionamiento, fue entonces cuando China propuso a BeiDou como su sistema GNSS. El proyecto estaría formado por tres fases planificado en 1994, con la intención de desarrollar un sistema que rivalizase con el GPS. En lo que respecta a las tres etapas, estas estaban divididas de manera diferenciada en BeiDou-1, BeiDou-2 o Compass y BeiDou-3 o BDS-3.

El servicio comenzó en el año 2001 con BeiDou-1, ofreciendo cobertura solamente en el país chino. Presenta una característica con la que diferencia entre los otros sistemas GNSS del momento, ya que éste emplearía una recepción de la señal de los satélites en los terminales, y a su vez, podría ser capaz el terminal de responder al segmento de control mediante los satélites, utilizando mensajería

corta. Por supuesto, podría usarse para servicios básicos de navegación y sincronización de tiempo. Aunque, el sistema fue ideado con la intención de ser implementado y utilizado para fines militares y gubernamentales, se topó con problemas relacionados con el tamaño y los costes de los terminales de usuario que eran esenciales para llevar a cabo las transmisiones espaciales.

Durante el 2011, se desarrolló la segunda fase llamada *Compass*. Comenzó a brindar sus servicios, con la particularidad de que se empleaba el método típico GNSS en lo que respecta a la recepción pasiva en los terminales⁴. Pasado un año, el sistema comenzaría a tener la capacidad suficiente para dar su servicio a la región Asia-Pacífico, estableciéndose de esta manera los pilares necesarios para plantearse ofrecer el servicio a una escala global. Lo anterior, se alcanzaría con la última fase, BDS-3, pues los satélites empleaban un nuevo tipo de señales de radionavegación y que finalizaría en 2020.

Hay que mencionar que la información pública sobre este sistema es limitada, no habiendo como consecuencia suficiente información que permita profundizar en sus características.

2.9.3.2 Segmento Espacial

Compuesto por un total de 35 satélites, de los cuales, 5 son GEO, 30 non-GSO, 27 MEO y 3 IGSO. Los MEO son desplegados bajo una constelación Walker, 24 MEO en 3 planos más tres de repuesto. Como ya se ha mencionado está compuesto de tres fases. encontrándose descritas en la siguiente tabla:



Ilustración 2-24
Segmento espacial
Beidou

Evolución			
	BeiDou-1	BeiDou-2	BeiDou-3
Periodo de lanzamiento	2000 - 2006	4	0
Satélites lanzados	2007 - 2019	20	12
Satélites en órbita y en funcionamiento	2015 - X	35	30

Tabla 2-5 Evolución del segmento espacial BeiDou

2.9.3.3 Segmento Control

Se compone por tres tipos de estaciones terrestres:

- **Monitor Stations (MS)**: estación que se responsabiliza de la monitorización en tiempo real de los datos que los satélites transmiten, para posteriormente transferirla a la estación maestra.

⁴ Más información sobre el plan de señal de BeiDou en el siguiente enlace: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/BeiDou_Signal_Plan

- **Time Synchronization/Upload Stations (TS/US)**: estación que se responsabiliza de la medición continua del desvío temporal en la referencia horaria de los satélites y de transmitir los mensajes actualizados de navegación a los satélites.
- **Master Control Station (MCS)**: estación de control y operación primario del sistema. Se encarga de recolectar los datos procedentes del resto de las estaciones para proceder al cálculo de los nuevos mensajes de navegación. Otras funciones son la de monitorizar las anomalías existentes en los satélites como funciones de control y mantenimiento.



Ilustración 2-25 Estaciones del segmento de tierra BeiDou

Como dato importante sobre este segmento, cabe señalar que durante la primera fase se encargaba de realizar el cálculo de la posición del usuario, una vez había recibido la señal de los terminales de usuario por los satélites correspondientes, y así, finalmente, ser devuelto mediante el mismo procedimiento. que, una vez recibida la señal de los terminales de usuario por los satélites correspondientes, se realizaba el cálculo de la posición del usuario, para luego ser devuelto mediante el mismo procedimiento. Aunque en la segunda fase, el cálculo de la ubicación se volvió pasiva, se sigue manteniendo la funcionalidad de establecer comunicación vía satélite entre los terminales y el segmento de control para brindar soporte de servicio de mensajería corta.

2.9.3.4 Segmento Usuario

En su primera generación, la información se calculaba y se enviaba de nuevo al usuario por el segmento de control, pero al tener que usarse un sistema de comunicación bidireccional con los satélites, el coste y el tamaño eran considerablemente altos, empleándose antenas con una medida alrededor de los 20 cm. En las siguientes fases, los receptores de BeiDou calculaban la posición y la velocidad del dispositivo mediante las señales procedentes de los satélites, como el resto de los GNSS.

Durante el año 2011, la apuesta de ofrecer servicio por el segmento terrestre se completó junto con la parte de pruebas en desarrollo del terminal de usuario. A pesar de eso, en 2009 los terminales se basaban en ASIC, comprendiendo la integración del GPS. Aunque, hoy en día, hay bastantes terminales BeiDou, éstos van desde los *smartphones* hasta dispositivos de navegación aeromarítima, buscando expandirse a servicios de emergencia o rescate (SAR). Esto se realiza bajo la

estrategia de alcanzar una cooperación internacional que permita la interoperabilidad entre BeiDou y los demás sistemas GNSS.

2.9.4 GALILEO



Por último, se encontraría el sistema europeo Galileo. Este programa surge de la necesidad de EU por tener su propio GNSS, siendo el proyecto una iniciativa europea con el que conseguir un sistema de navegación global por satélite de última generación. Dicho sistema garantiza un servicio de posicionamiento y de alta precisión bajo control civil. Además, proporciona servicios autónomos de navegación y posicionamiento, sin olvidar que es interoperable con otros sistemas GNSS, como el GPS y el GLONASS. Cuando el sistema esté totalmente desplegado, se prevé tener una constelación formada por 30 satélites, desplegándose estos de manera escalonada junto con la infraestructura terrestre asociada.



Ilustración 2-26 Logo GALILEO

Como ventajas del sistema, un usuario puede obtener una posición con el mismo receptor desde cualquiera de los satélites independientemente de la combinación empleada. Además, Galileo ofrece una precisión de posicionamiento en tiempo real de hasta un metro, debido a que usa dos frecuencias de serie. Otra es que la disponibilidad del servicio está garantizada ante las circunstancias más extremas, informando de un fallo de cualquier satélite a los correspondientes usuarios. Junto a lo anterior, Galileo mejora la disponibilidad y la cobertura global de las señales GNSS.

A diferencia de Galileo, los sistemas GPS, GLONASS, BeiDou y otros como QZSS son sistemas desarrollados para uso militar bajo control militar que, aunque presten un servicio civil, este puede ser desconectado o ser menos preciso si así se decide, por ejemplo, en caso de conflicto. No hay que olvidar, la importancia de los servicios proporcionados por la navegación por satélite a la humanidad en el día a día. Por tanto, solamente habría que imaginar el caos si un servicio se redujera o se apagara.

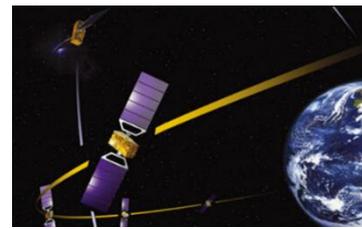


Ilustración 2-27 Órbita satélites Galileo



Ilustración 2-28 Satélite Galileo

Gracias a la combinación de las señales Galileo y GPS, mediante interoperabilidad en receptores duales, se puede alcanzar nuevas aplicaciones GNSS, que requieran un mayor nivel de precisión que el GPS solamente pueda conseguir. En la mayoría de los lugares, la visibilidad de los satélites rondará entre los 6 y 8 satélites Galileo, que junto con las señales GPS, se podrá alcanzar una precisión de unos pocos centímetros.

En definitiva, Europa con Galileo puede conseguir múltiples oportunidades de negocio, beneficiando a los fabricantes de receptores y equipos GNSS, los proveedores de aplicaciones y los operadores de servicios. La estimación del coste del programa ronda los 10.000 Millones de euros que, para unos 500 Millones de ciudadanos en la UE, supone menos de 20 euros por ciudadano.

2.9.4.1 Historia

En la década de los 90, después de que UE hubiera desarrollado EGNOS, ante el uso extendido y dependencia del GPS americano, se vio en la necesidad de desarrollar su propio sistema GNSS. Ante esto, la Comisión Europea y la Agencia Espacial Europea se unieron para construir Galileo, un sistema europeo independiente bajo control civil.

En lo que respecta, a la fase de definición y la fase de desarrollo y validación en órbita del programa, éstas fueron llevadas a cabo por la Agencia Espacial Europea (ESA) y cofinanciadas por la ESA y la Unión Europea. En cuanto, a la fase de plena capacidad operativa, esta es totalmente financiada por la UE y gestionada por la Comisión Europea. Esta última y la ESA firmaron un acuerdo de delegación por el que la ESA actúa como agente de diseño y contratación en nombre de la comisión.



Ilustración 2-29 Satélite en órbita

En el año 2004, EU y EEUU firmaron un acuerdo de cooperación para la interoperabilidad entre sus sistemas, Galileo y GPS, lanzando a finales de 2005, el primer satélite experimental de la constelación Galileo (GIOVE-A) para reservar y hacer uso del plan de frecuencias, modulaciones y características de la señal, que se habían asignado desde el 2000 y que permitían la compatibilidad e interoperabilidad entre los sistemas mencionados anteriormente.



Ilustración 2-30 Satélites en órbita

Finalmente, el programa está constituido en tres fases principales que serán desarrolladas en el siguiente apartado. El sistema Galileo comenzó a prestar sus servicios el 15 de diciembre de 2016 y se espera que se alcance la plena capacidad, una vez la fase FOC esté acabada.

2.9.4.2 Fases de evolución

En el proyecto Galileo se determinó una implementación dividida en varias fases, con el fin de mitigar los riesgos del desarrollo y evolución de un sistema tan complejo de manera gradual.

Las fases que acordaron fueron las siguientes:

- ***Galileo System Testbed***
- ***IOV (In Orbit Validation)***
- ***FOC (Full Operational Capability):***
 - ***Fase 1:*** (IOC: *Initial Operational Capability*)
 - ***Fase 2:*** (Con todos los servicios)



Ilustración 2-31
Presentación de GALILEO

A continuación, se muestra el plan de implementación previsto en su totalidad, que va desde las pruebas experimentales con el que se pretende validar los conceptos y algoritmos, hasta la última fase FOC, en el que estarán disponibles todos los servicios del sistema.

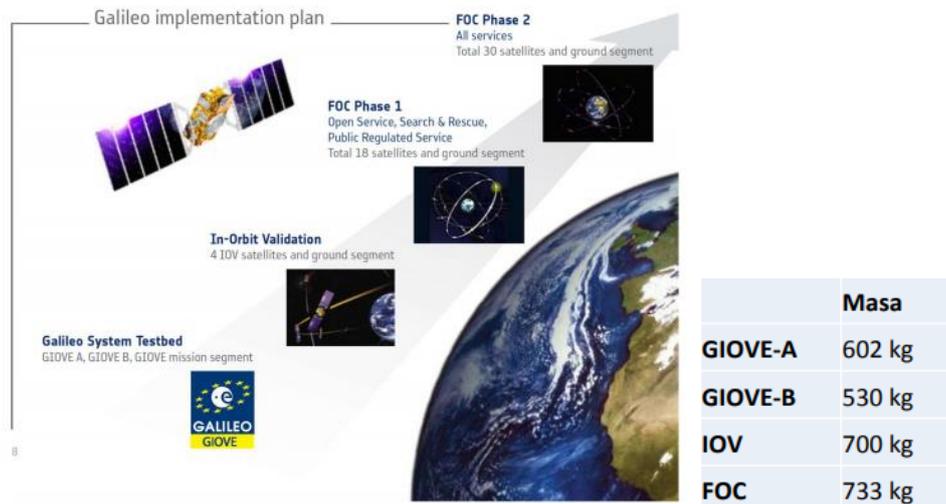


Ilustración 2-32 Representación de las fases de implementación y peso de los satélites

2.9.4.2.1 Galileo System Testbed

Esta primera fase supuso el primer paso en la validación del sistema, se desarrollaron dos satélites experimentales, GIOVE-A (lanzado el 28 de diciembre de 2005) y GIOVE-B (lanzado el 27 de abril del 2008).



Ilustración 2-33 Satélites GIOVE-A y GIOVE-B

La meta que se buscaba con estos primeros satélites experimentales era:

- Antes de finalizar el plazo de uso de la frecuencia reservada para Galileo, se requiere su uso por la ITU.
- Existen tecnologías esenciales que requieren ser validadas, para su posterior implementación en la constelación Galileo en IOV, entre ellos se encuentran los relojes atómicos (rubidio y máser pasivo de hidrógeno (PHM), con estabilidades de 10 ns/día y 1 ns/día respectivamente).
- Estudiar y monitorizar el comportamiento de los satélites en las órbitas MEO, analizando el impacto de las radiaciones en los elementos del propio satélite.
- Generación y validación de las primeras señales Galileo.
- Recepción y validación de la señal de navegación mediante GSS (*Galileo Sensor Stations*), junto con sus algoritmos correspondientes.
- Validar los efectos de la ionosfera en la propagación de la señal Galileo.
- Estudiar la diferencia entre GST y GPS (tiempo galileo y tiempo GPS), esto es porque ambos emplean referencias distintas de tiempo.

El proceso de validación se llevó a cabo usando una red global de estaciones sensoras (*Sensor Stations*), una estación experimental de precisión de tiempo (E-PTS en Turín, Italia) y un Centro de Procesado en la Agencia Espacial Europea (ESA-ESTEC en Holanda).

A continuación, se muestra una figura con la simulación de la precisión de posicionamiento horizontal (95% tiempo, en metros), empleando GPS, usando **GPS+EGNOS** o usando **GPS+Galileo+EGNOS**. En los resultados puede observarse que la elevada disponibilidad de los satélites Galileo y EGNOS consigue alcanzar una precisión de posicionamiento mayor en cualquier parte del planeta.

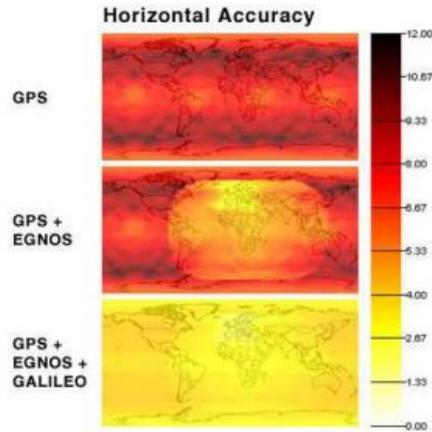


Ilustración 2-34 Precisión de posicionamiento

2.9.4.2.2 IOV (*In Orbit Validation*)

Una vez se finalizó la fase anterior, en esta se requería de cuatro satélites Galileo idénticos, estos formarán parte de la constelación final de satélites. Este requisito proviene de un fundamento técnico y matemático, pues el número corresponde al número mínimo de satélites para obtener el vector PVT (Posición, Velocidad y Tiempo) en un receptor de usuario. Este concepto ha sido explicado en el apartado 2.7.

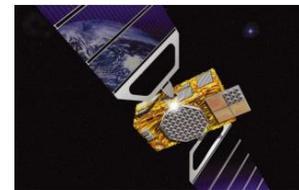


Ilustración 2-35 Satélite GALILEO IOV

Por esta razón, en esta fase fueron lanzados 4 satélites, con la finalidad de validar el funcionamiento del sistema de navegación Galileo antes de continuar con el desarrollo completo del sistema. Estos satélites fueron puestos en órbita en parejas desde Kourou, en la Guayana Francesa, en las fechas, 21 de octubre de 2011 y 12 de octubre del 2012.

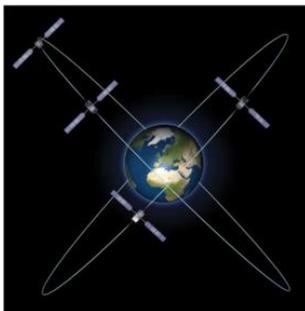


Ilustración 2-36
Representación de los 4 satélites de IOV

Como ya se ha comentado, la finalidad de esta fase residía en la cualificación del sistema mediante la realización de pruebas en los diferentes niveles de operaciones y de segmentos de control, misión y usuario.

Respecto al segmento de terreno, las validaciones planteadas eran las siguientes:

- Dos centros de control, uno en *Oberpfaffenhofen* (Alemania) y otro en *Fuccino* (Italia). El centro de Alemania opera solamente el segmento de control y en el caso del de Italia, solamente el segmento de misión.

- Red global de GSS proporciona medidas para la orbitografía (cálculo de la órbita/posición de los satélites) y medidas de las señales de navegación.
- Una red global de ULS (*Uplink Stations*), estas se encargan de transmitir el mensaje de navegación al satélite para ser reenviado a los receptores de los usuarios.
- Dos estaciones TTC (*Tracking & Telemetry & Command*), estas realizan el seguimiento de los satélites, recibiendo la telemetría (salud del satélite) y enviando telecomandos (comandos al satélite).
- Infraestructura global de red, para la conexión de todos los subsistemas.

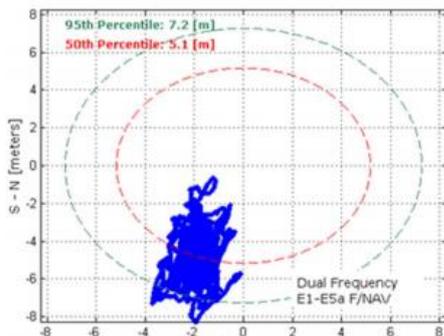


Ilustración 2-37 Test de medida de precisión

Esta fase se completó satisfactoriamente el 12 de marzo de 2013, al conseguir realizar la primera medida de posicionamiento con un receptor Galileo. En ESTEC se realizó el test, alcanzando una precisión de 8 metros en horizontal y 9 metros en vertical (95% del tiempo). El tiempo de precisión de sincronización fue de 10 ns. A lo largo del 2013, se llevaron a cabo multitudes de pruebas para validar el sistema como, por ejemplo, vehículos, peatones y aplicaciones de posicionamiento fijo.

2.9.4.2.3 FOC (*Full Operational Capability*)

Al estar completada la fase de IOV, la siguiente fase planificada era la de FOC, en esta nuevos satélites y nuevas capacidades del segmento terreno (en lo que respecta a control, misión y estaciones terrestres) se desarrollan e instalarán, para de esta manera completar el sistema y esté completamente operacional.

El objetivo de esta fase no es otra que, la de ampliar el sistema para su correcta finalización y la de dotarle robustez y fiabilidad.

Para llevar a cabo su finalidad, la fase ha sido dividida en dos, como se describen a continuación:

La prima es la **fase 1** (IOC: *Initial Operational Capability*), con ella se establece la puesta en marcha parcial de la infraestructura terrestre y espacial en 2014 – 2015, junto con la prestación de los servicios como abierto, búsqueda, rescate y PRS. Todos estos servicios iniciales fueron presentados en 2016. En esta fase, se determinó y se puso en marcha, un lote de satélites (14 satélites adicionales a los 4 de IOV), los servicios de lanzamiento, la infraestructura terrestre de misión y control, los servicios de apoyo al sistema y las operaciones correspondientes. Respecto a los centros de segmento de control y centro de segmento de misión, se les dotó la

capacidad de redundancia entre ellos. Además, en el segmento de terreno, nuevas estaciones terrestres fueron instaladas.

En lo que respecta a la **fase 2** (con todos los servicios), esta fase será completada tras el lanzamiento de 30 satélites operacionales (27 y 3 de repuesto), esto se llevará a cabo de manera progresiva desde la fase IOC, con ello el sistema Galileo estará completo, previsto para 2020.

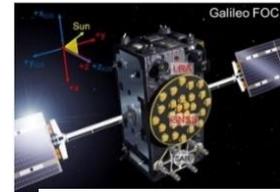
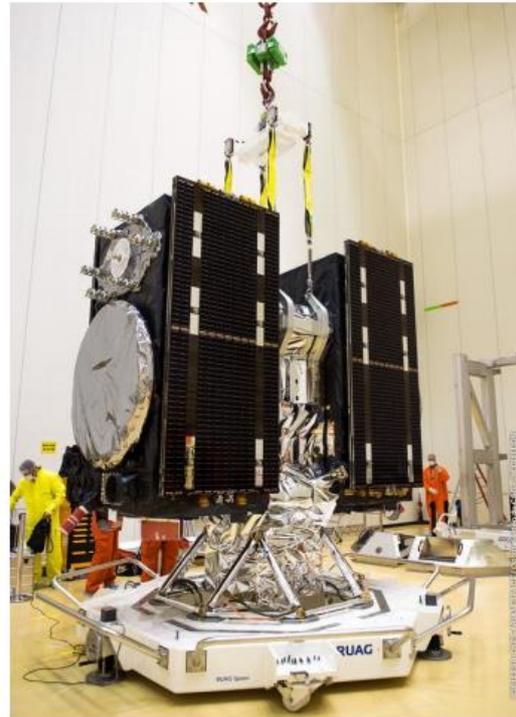
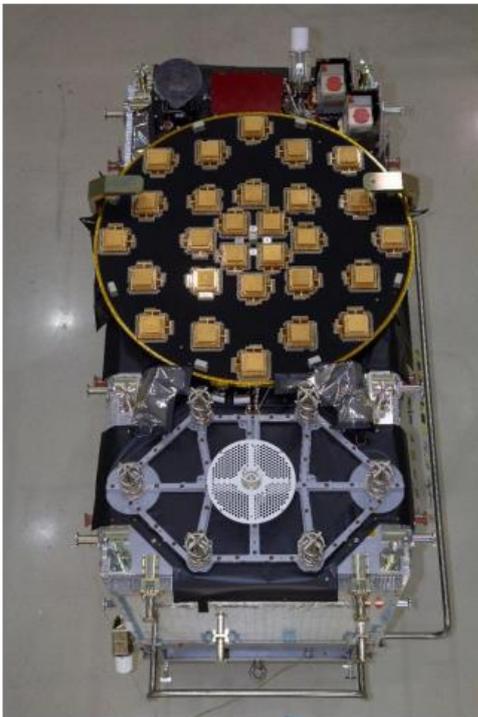


Ilustración 2-38
Satélite de FOC

Paralelamente, se acabará de desplegar centros de control situados en Europa, junto con sus capacidades y un segmento de tierra, con una red de estaciones de sensores, de enlace ascendente y de telemetría, control y comando instaladas en todo el mundo.

Cuatro satélites Galileo fueron puestos en órbita el 25 de Julio de 2018, desde el puerto europeo de Kourou, en la Guayana Francesa. Dicho lanzamiento significó la finalización de la constelación Galileo⁵, con todas las metas cumplidas, siendo la señal Galileo mejor de lo esperado, pudiéndose usar en todos los nuevos teléfonos móviles.



- FOC Sat. (OHF):
- Mass 733 Kg
 - Size 2.5mx1.1mx1.1m or 14.7m (wings stowed or deployed)
 - Power consumption: 1900 W
 - MEO: 29600 Km (14h 4m 42s / rev.)
 - Lifespan: 12 y

Ilustración 2-39 Satélite de FOC y características

⁵ Más información de la lista de satélites pasados y presentes del sistema de navegación Galileo, así como los siguientes lanzamientos de satélites, puede ser consultado en el siguiente enlace: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Galileo_satellites

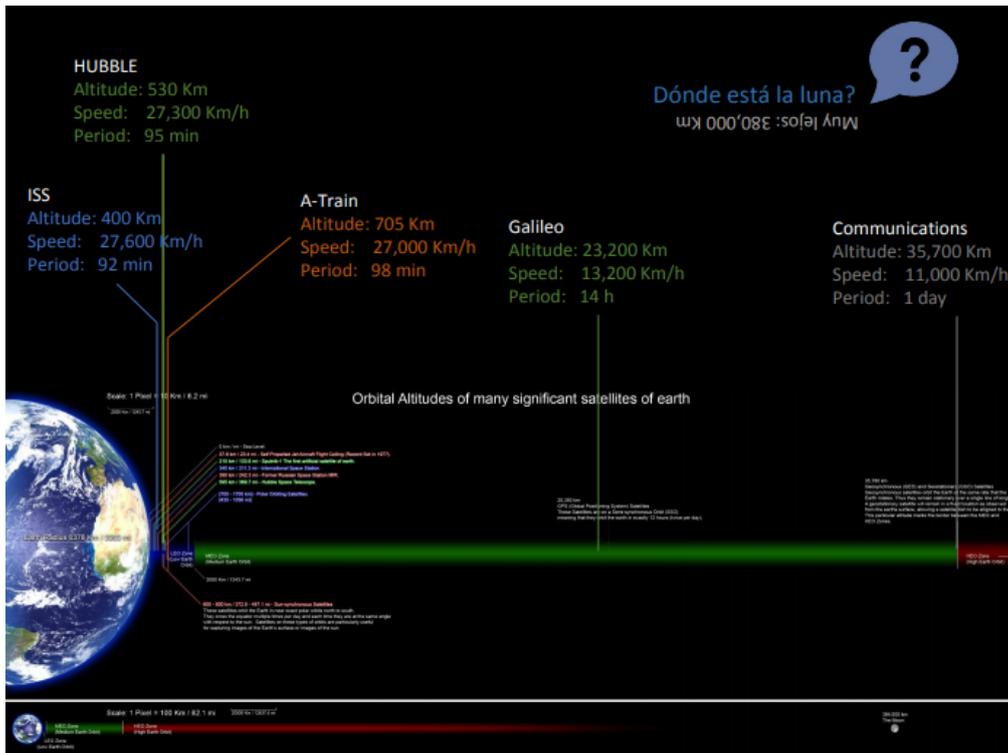


Ilustración 2-40 Ubicación de satélites Galileo en el espacio

2.9.4.2.4 Evolución futura

Para el futuro del sistema, los objetivos del EGEP (*European GNSS Evolution Program*) son el definir las futuras arquitecturas del sistema Galileo y preparar la tecnología para futuras versiones del sistema, proporcionando bancos de pruebas y herramientas del sistema, con el que mejorar el conocimiento de la Agencia sobre el control del rendimiento GNSS y los principales factores ambientales que influyen en el rendimiento, promoviendo y apoyando la explotación científica de Galileo.

Otro objetivo principal del EGEP es la preparación de la futura generación de Galileo, G2G (*Galileo Second Generation*), que durante el 2020 está prevista su introducción progresivamente, puesto que se prevé que para ese tiempo los primeros satélites lanzados alcancen el final de su vida operativa. Entre las actividades del G2G, se incluyen estudios sobre las ventajas, viabilidad y el impacto de los distintos conceptos en los que se centrará el análisis, esto es a nivel de sistema, en el segmento terrestre, las cargas útiles, entre otros. Sobre los principales objetivos estos consisten en la recopilación de todos los estudios mencionados para la elaboración de un posible marco de referencia para la G2G, en el que se incorporarán las lecciones aprendidas de la primera generación⁶.

⁶ Más información en el siguiente enlace: <https://www.gmv.com/en/Company/Communication/News/2014/08/segunda-generacion-Galileo.html>

Sobre G2G, se espera que ofrezca mejores prestaciones y características RNP (*Required Navigation Performances*), como la fiabilidad, el mantenimiento, la disponibilidad, la continuidad, la precisión y la integridad. De ahí, que la CE tomase la decisión de poner en marcha el Programa de Transición con la ESA para la definición técnica y de implementación.

Hay que tener en consideración, la constante necesidad de repuesto de piezas orbitales para sustituir los satélites Galileo que alcanzan el final de su vida útil, garantizando de esta manera que el sistema europeo continúe funcionando sin perder la disponibilidad de los servicios. En 2017 fueron solicitados doce satélites adicionales, con el fin de emplearlos para una transición de cara a una futura generación, manteniendo el objetivo de mejorar las prestaciones de precisión, robustez, disponibilidad e integridad en su función principal PNT (Posicionamiento, Navegación y Tiempo), como parte permanente del panorama europeo y mundial en el GNSS y para conferir autonomía europea sobre su constelación, para su uso civil y con aplicaciones gubernamentales.

Por último, el sistema G2G y su desarrollo tecnológico son apoyados por los Programas HSNV GNSS y H2020 de la ESA, delegando su definición técnica y la gestión de sus actividades relacionadas con su implementación, garantizando la compatibilidad con las versiones anteriores. Además, de la continuidad de los servicios Galileo y su posible integración con los SBAS, en el caso europeo, es el sistema EGNOS, que consta de tres satélites adicionales.

2.9.4.3 Señal de Galileo

Las señales de navegación de Galileo son transmitidas en cuatro bandas de frecuencias, estas son la E5a, E5b, E6 y E1, proviniendo un ancho de banda para la transmisión de las señales Galileo⁷.

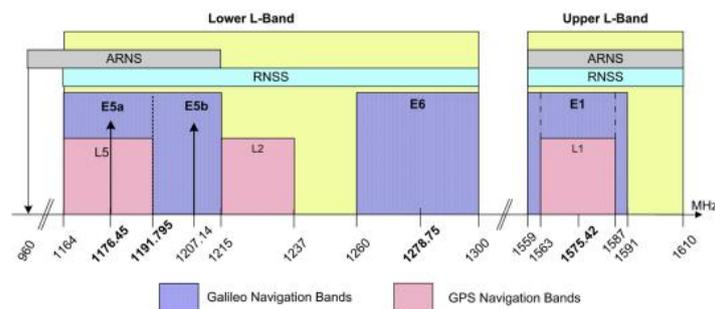


Ilustración 2-41 Frecuencias Galileo

Las bandas de frecuencia han sido definidas en el espectro empleado para RNSS (*Radio Navigation Satellite Services*), que junto con las bandas E5a, E5b y E1 son incluidas en la zona del espectro para ARNS (*Aeronautical Radio Navigation*)

⁷ Para más información sobre el plan de señal de Galileo, acceder al siguiente enlace: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Signal_Plan

Services), para poder ser usadas por los usuarios de la aviación civil, permitiendo a su vez, aplicaciones críticas de seguridad dedicadas.

2.9.4.4 Funcionamiento

Anteriormente, se ha descrito el funcionamiento de un sistema GNSS, puede verse en el apartado 2.7. Aunque, se procede a describir el funcionamiento, de una forma resumida, del sistema Galileo, como sigue a continuación:

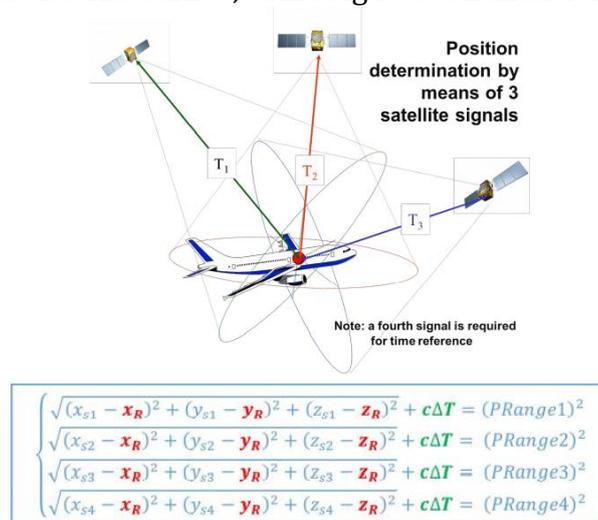


Ilustración 2-42 Determinación de la posición

De las imágenes se puede extraer la siguiente información:

- Las señales enviadas por los satélites a través del espacio contienen posición y hora del satélite, siendo recibidas en tierra.
- El receptor mide el tiempo que tarda la señal en llegar para calcular la distancia al satélite, esta se calcula multiplicando la velocidad de la luz y el tiempo.
- Usando trilateración, se puede calcular la posición del receptor con tres incógnitas (X_R, Y_R, Z_R), usando 3 satélites (3 ecuaciones).
- Al no estar sincronizado el reloj del receptor con el sistema hay una cuarta incógnita, ΔT .
- Se requiere de 4 ecuaciones (4 satélites) para resolver las 4 incógnitas ($X_R, Y_R, Z_R, \Delta T$).
- Existen diferentes factores, como el ruido, que pueden alterar la señal afectando al cálculo.

2.9.4.5 Arquitectura

Continuando con la arquitectura, las estaciones GSS reciben la señal de los satélites para sincronizar los relojes y medir órbitas. Esa información es enviada a los centros de control. Estos generan el mensaje de navegación con información de las estaciones, correcciones, información de integridad, etc. Con las estaciones ULS, se envía el mensaje de navegación a los satélites y estos lo transmiten a los usuarios. En lo que respecta a las estaciones TTC, estas permiten controlar las plataformas de los satélites. Todo este puede verse representado, en la siguiente imagen:

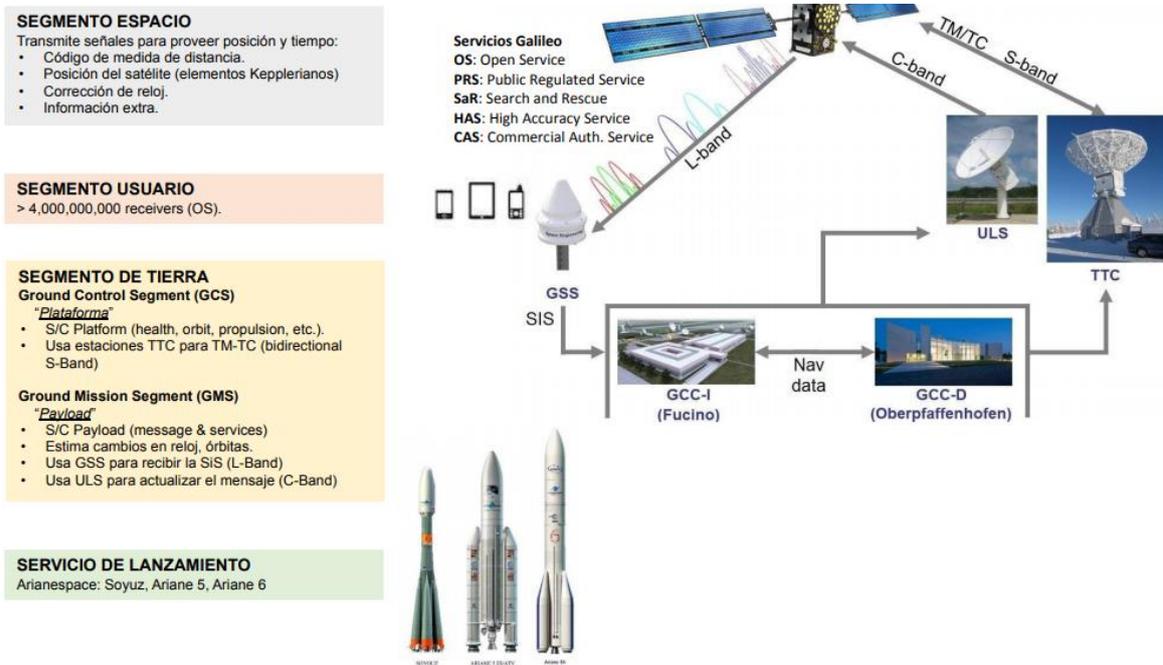


Ilustración 2-43 Arquitectura Galileo

En la imagen anterior, se puede ver que el sistema está compuesto por los siguientes segmentos:

- Segmento de espacio.
- Segmento de lanzamiento.
- Segmento de terreno.
- Segmento de usuario.

2.9.4.5.1 Segmento espacial

La finalidad de este segmento es generar y transmitir los mensajes de navegación a los usuarios. De la misma manera, este debe ser capaz de captar y almacenar las correcciones con los mensajes de navegación recibidas desde el segmento de terreno, para posteriormente retransmitirlo a los usuarios.

La constelación de satélites está formada por 30 satélites en una órbita MEO, a una altura de 23222 km sobre la superficie terrestre. Estos se encuentran en una órbita geosíncrona circular en tres planos, con una inclinación de 56° con respecto al ecuador. Cada plano de la órbita tiene 8 satélites distribuidos de manera uniforme dentro del plano. El desplazamiento angular entre los satélites de dos planos adyacentes es de 15°. En cada plano hay un satélite de repuesto, para sustitución en caso de avería. Por lo que, la constelación completa está formada por 6 satélites de repuesto, siendo una constelación Walker 24/3/1. Estos pueden ser activados y asignados a una ranura operativa determinada en función de las actividades de mantenimiento o evolución del servicio.

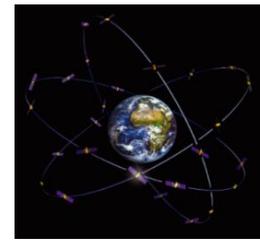


Ilustración 2-44
Segmento especial Galileo

Cada satélite orbita la tierra en 14 horas, 4 minutos y 42 segundos, con una vida útil de 12 años. Cuando se acaba su vida útil son desplazados a la zona cementerio (*graveyard*), es una zona orbital determinada como “lugar de retiro”, ubicándose alrededor de 300 Km por encima de la órbita funcional. De esta manera, se pueden tener controlados y evitar que choquen con otros satélites. Cómo se ha comentado anteriormente, la constelación de Galileo consta de 30 satélites, de los cuales 24 son operativos y el resto unidades de *spares* para sustituir alguno en caso de avería. A medida que se va acabando la vida útil de los satélites se van lanzando adicionales para sustituirlos. En los próximos tres años se van a lanzar 12 adicionales, a sumar a los 24 existentes.

En lo que respecta a las medidas de los satélites, estos pesan unos 750 kg de masa total y unos 1600 W de potencia, con unas dimensiones de 2,7 m x 1,1 m x 14,7 m (ancho) con los paneles solares desplegados (13 metros de los 14,7).

A continuación, la imagen describe los componentes básicos de un satélite Galileo:

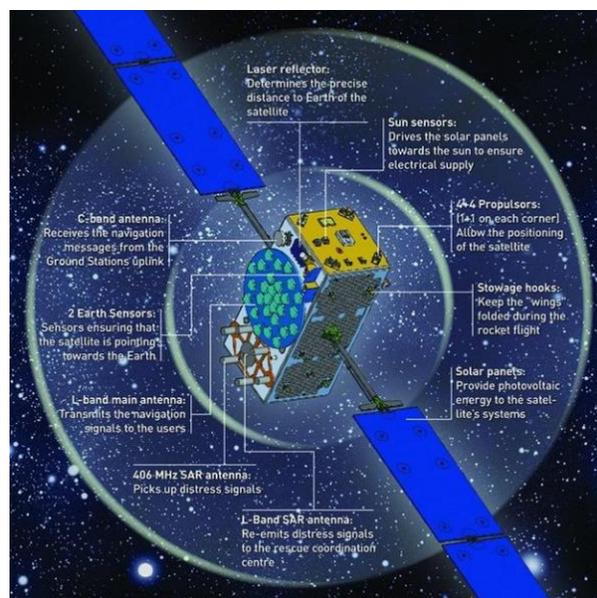


Ilustración 2-45 Componentes satélite Galileo

Aunque no aparezca en la imagen existe otro componente importante y se trata de la antena de banda S. En realidad, cuenta con dos, estas forman parte del subsistema de telemetría, seguimiento y comando. Su finalidad consiste en transmitir los datos de mantenimiento de la carga útil y de la nave espacial al control en tierra y, en paralelo, reciben comandos para controlar la nave espacial y operar sobre la carga. Otra funcionalidad, de estas antenas es de recibir, procesar y transmitir señales de alcance que miden la altitud del satélite con una precisión de pocos metros.

Además, el satélite se equipa con dos cargas útiles diferentes, una permite el servicio de navegación por satélite, principal servicio y la otra con un transpondedor de búsqueda y rescate (SAR), permitiendo procesar las señales de socorro procedentes de balizas en Tierra y de transmitir las a una estación terrestre, para proporcionar un servicio de rescate de emergencias.

En los satélites existe un elemento tecnológico bastante importante, se trata de la precisión de los relojes atómicos incorporados en ellos, fundamental para el adecuado funcionamiento del sistema. Constan de cuatro relojes, dos de rubidio, con frecuencia de 6 GHz y dos de PHM (*Passive Hydrogen Maser*), a 1,4 GHz. Ambos cuentan con una configuración redundada, siendo el PHM, el reloj más estable hasta la fecha. Respecto a los errores, el de rubidio tiene 3s en 1 millón de años, en cambio, el de PHM 1s en 3 millones de años. De la misma manera, se puede decir que es un error menor de 1 ns en 24 horas, equivaliendo a un error de posicionamiento de 30 cm. Dichos errores, se deben corregir periódicamente mediante las estaciones terrestres.

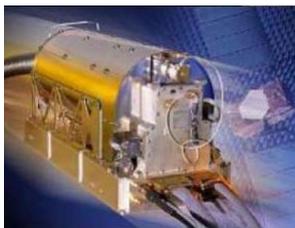


Ilustración 2-46 Reloj PHM y de rubidio

2.9.4.5.2 Segmento de lanzamiento

Desde la fase IOV, los satélites Galileo han sido lanzados en parejas desde distintos lanzadores, empezando por el lanzador ruso *Soyuz*, después por el Ariane 5 y finalmente con Ariane 6 desde la Guayana Francesa. En 2021 hay lanzamientos programados⁸, se prevé poner en órbita 4 satélites mediante Ariane 6 y luego otros ocho para 2022, siendo estos los últimos satélites comprados para el bloque FOC. En total se lanzarían un total de 12 satélites.

⁸ Más información de la lista de los lanzamientos de satélites, se puede consultar en el siguiente enlace por parte de la ESA: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Galileo_satellites

SERVICIO DE LANZAMIENTO
Arianespace: Soyuz, Ariane 5, Ariane 6

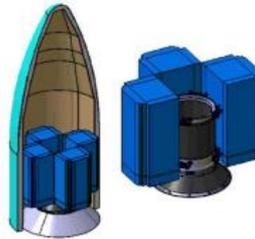


Ilustración 2-47 Lanzadores de satélites Galileo

3, 2, 1, 0... despegue!

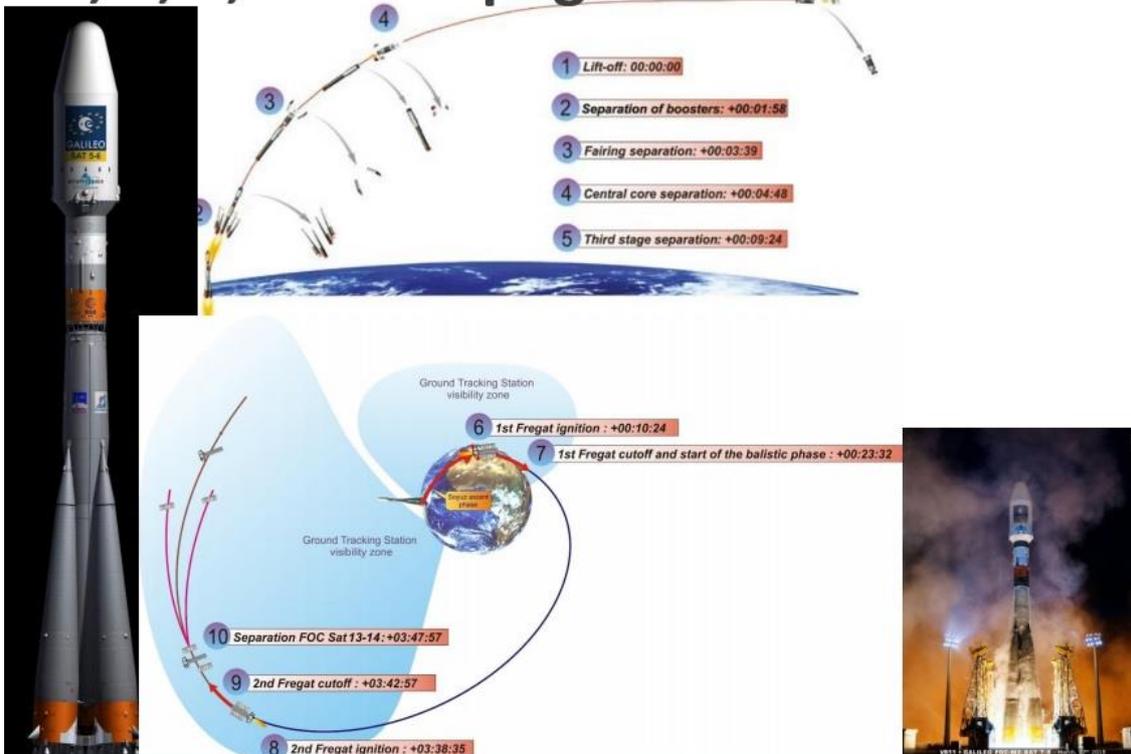


Ilustración 2-48 Procedimiento de lanzamiento de un satélite FOC Galileo

2.9.4.5.3 Segmento tierra

Este segmento es uno de los desarrollos más complicados realizados por la ESA, no solamente por la gran complejidad de los centros de control, sino también

por la dispersión y la gran cantidad de ubicaciones con diferentes subsistemas y estaciones terrestres.

Sus funciones consisten en mantener controlado los satélites en órbita, como de asegurar la estabilidad del tiempo de los satélites, junto con la predicción de su posición.

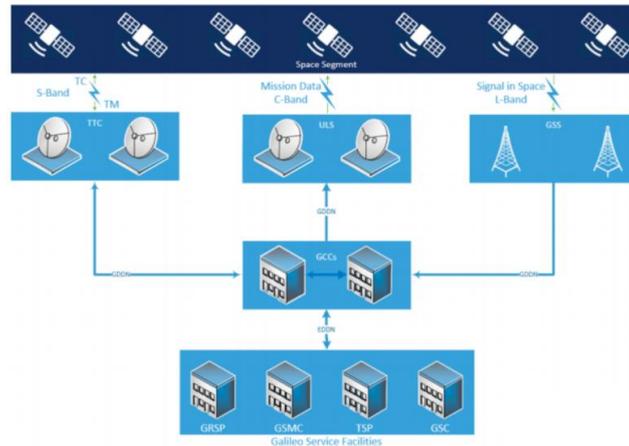


Ilustración 2-49 Segmento de tierra Galileo

Este segmento consta de dos GCC (*Galileo Control Centers*), estos son el GMS (*Ground Mission Segment*) que se encarga del control del sistema de navegación y el GCS (*Ground Control Segment*) que se encarga del mantenimiento de la nave y de la constelación. Estos centros interconectan los satélites con una red mundial de estaciones terrestres que implementan funciones de control y supervisión:

- Una red global de GSS, utilizadas para la determinación de la órbita, sincronización del tiempo y determinación de la integridad.
- Una red global de estaciones TT&C (*Telemetry, Tracking & Control stations*) con el que controlar y monitorizar los satélites.
- Una red global de ULS (*Up-link stations*) para transmitir los datos/mensaje de navegación al satélite.
- Una red de comunicación global.
- Dos centros de control redundantes, para el control, monitorización y procesado de los datos.
- Conjunto de terminales de usuario local en órbita terrestre media (MEOLUT) que es usado para el servicio de búsqueda y rescate de Galileo.

En referencia a los centros, el de misión se encuentra en *Oberpfaffenhofen*, Alemania y el de control, en *Fuccino*, Italia. Ambos centros son el núcleo del sistema Galileo.

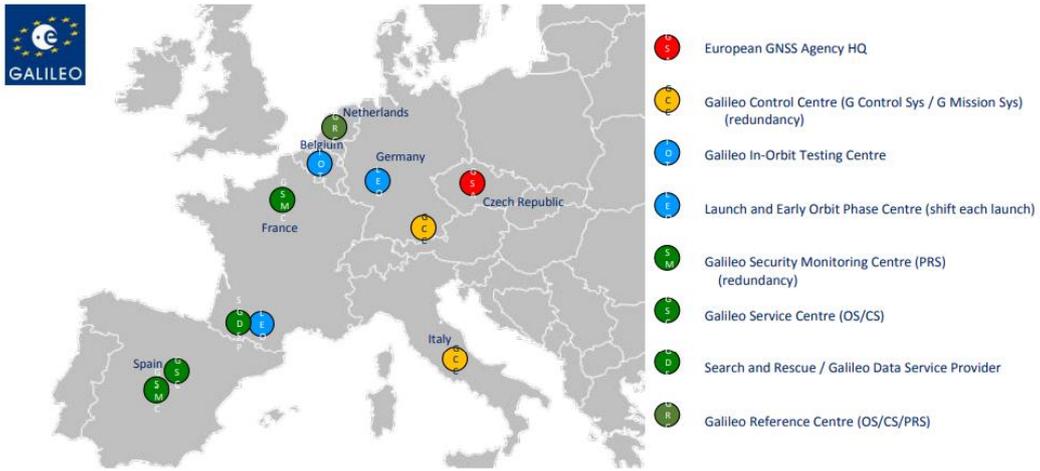


Ilustración 2-50 Distribución de los centros Galileo

Durante la fase de IOV, estos centros trabajaban de manera independiente, pero desde la fase FOC, ambos funcionan como *backup* del otro. Así, aunque cada uno tenga su propia función, si uno de los dos tiene un fallo, el otro centro podrá desarrollar con total normalidad las funciones del otro también, junto con las propias, garantizando así una total redundancia geográfica.



Ilustración 2-51 Centro de misión y control Galileo

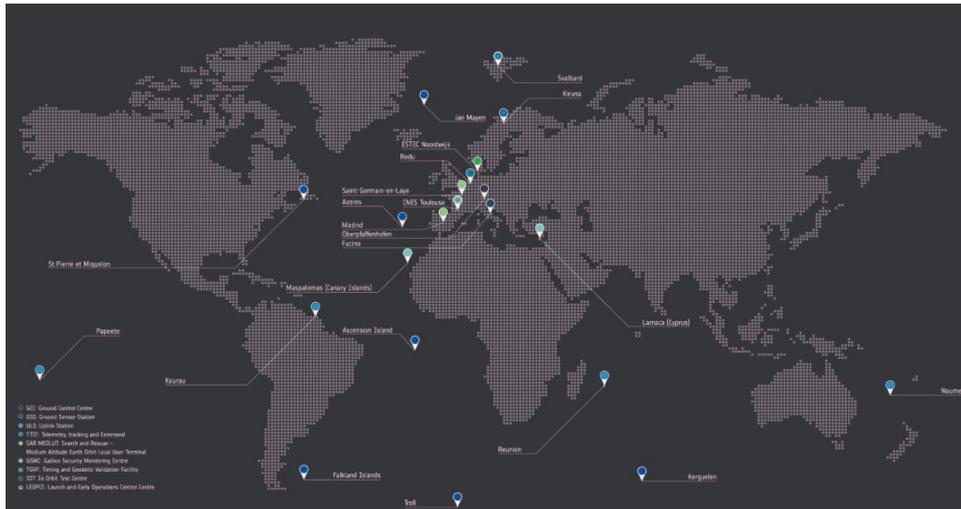


Ilustración 2-52 Distribución del segmento de tierra Galileo



Ilustración 2-53 GSS y antena ULS

Sobre el segmento de misión (GMS), su misión es generar y transmitir los mensajes de navegación a los satélites de la constelación, permitiendo, de esta manera, el envío de las posiciones y la sincronización de tiempo en el mensaje con suficiente precisión a los usuarios.

Este segmento cuenta con una red global de GSS, encargados de monitorizar el mensaje de navegación de todos los satélites. A su vez, se comunica con los satélites mediante las antenas ULS, que cuentan con unas antenas de 3,5 m de diámetro y operan en banda C (5 GHz).

En lo que respecta a las GSS, este segmento las usa de dos maneras diferentes:

- Se encarga de recibir los mensajes de navegación para determinar la orbitografía (posición de los satélites) y sincronizar el tiempo de los mismos. Calcula la órbita precisa y el offset de los relojes de los satélites, junto con una predicción de las variaciones para las próximas horas. Estos cálculos son transmitidos al satélite, usando la ULS al satélite nominal, cada 100 minutos.
- Procesar la función de integridad, proporcionando observaciones instantáneas para corroborar la integridad de la señal. El resultado de los cálculos, para la constelación completa, se envía a los satélites, los cuales lo retransmiten a los usuarios.

Respecto a los mensajes de integridad, estos permiten conocer el estado de los satélites que envían el mensaje de navegación, avisar cuando la exactitud de los parámetros de la señal de navegación transmitidos por un satélite, exceden en un determinado margen, considerándose el mensaje como no válido.

El requisito de tiempo entre que aparezca una condición de fallo y el usuario reciba el aviso debe ser menor que 6 segundos.

Por otro lado, respecto a las estaciones ULS, el segmento se comunica con los satélites Galileo usando la red global de ULS que opera en banda C (5 GHz). Son estaciones con un reflector de 3,5 m de diámetro instalados en Svarbald, Kourou, Reunion, Tahiti, Nueva Caledonia, cada uno con dos antenas ULS. Estas transmiten el mensaje de navegación a los satélites, que éstos reenvían a los usuarios.



Ilustración 2-54
Antena ULS

Finalmente, este segmento de misión tiene unos componentes⁹ que lo componen, para su correcto funcionamiento.

En cuanto al segmento de control (GCS), este segmento se responsabiliza del control y monitorización de los satélites, proporcionando para tal fin, la capacidad de seguimiento, telemetría y control del conjunto de la constelación de satélites.

Junto con las TTC, este centro de control cuenta con una gran cantidad de subsistemas, encargados de varias funciones, tales como:

- Monitorizar y controlar la constelación de satélites mediante los datos que han sido obtenidos en las estaciones TTC.
- Planificar todos los contactos/accesos a los satélites.
- Determinar las órbitas de los satélites para realizar maniobras y su planificación.
- Preparar todos los procedimientos operacionales y automatizar las operaciones.
- Monitorizar y controlar todos los elementos que forman parte del segmento de control, incluyendo estaciones TTC, subsistemas del GCC y comunicaciones.
- Encriptar las comunicaciones que se realizan entre los diversos subsistemas.
- Simular constelaciones y cadenas de validación, para poder validar los procedimientos operacionales e investigación de anomalías.

⁹ Para más información sobre las componentes del segmento, acceder al siguiente enlace: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Ground_Segment

En la actualidad se disponen de 6 estaciones TTC (la séptima en Kourou estará completada en 2021-2022) situadas en:

- **TTCF-1:** Kiruna (Suecia)
- **TTCF-2:** Kourou (Guayana Francesa)
- **TTCF-3:** Nueva Caledonia
- **TTCF-4:** Reunión
- **TTCF-5:** Redu (Bélgica)
- **TTCF-6:** Papeete (Tahití)
- **TTCF-7:** Kourou (Guayana Francesa)



Ilustración 2-55 Estación TTC

Estas estaciones cuentan con un gran equipamiento, con redundancia en todas sus funciones para conseguir la mayor disponibilidad, con antenas reflectoras de 13 m de diámetro y operando en banda S (2025-2120 MHz en transmisión, 2200-2300 MHz en la recepción).

Finalmente, este segmento de control tiene unos componentes¹⁰ que lo componen, para su correcto funcionamiento.

2.9.4.5.4 Segmento usuario

El principio de este segmento está basado en los receptores de los usuarios, siendo su función la de recibir los mensajes de navegación y resolver las ecuaciones usando los satélites visibles, obteniendo el vector PNT.

Como los satélites se encuentran en constante movimiento, la señal del satélite debe previamente ser detectada para obtener y procesar el mensaje de navegación. Dicho mensaje contiene todos los parámetros que permiten al receptor del usuario realizar los cálculos pertinentes. Los elementos más relevantes de este segmento son los siguientes:

- Efemérides, contiene las posiciones de los satélites.
- Parámetros de corrección de tiempo, necesarios para calcular la distancia al satélite adecuadamente.
- Parámetros de servicio, con los que se identifica la calidad de la señal.
- Almanaque, usado para calcular la posición de todos los satélites con una precisión reducida y para adquirir los satélites más rápidamente.

¹⁰ Para más información sobre las componentes del segmento, acceder al siguiente enlace: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Ground_Segment



Ilustración 2-56 Representación del segmento de usuario

2.9.4.6 Servicios

Los servicios que proporciona Galileo como sistema civil y no militar, como si son el resto de los GNSS, son los siguientes:

- **Open Service (OS)**: compuesto por dos señales de navegación a dos frecuencias distintas, siendo su uso gratuito para todos aquellos que dispongan de un receptor Galileo. Su mercado es el mismo que el GPS, vehículos, *smartphones*, etc. No presenta garantías del servicio y la precisión del sistema vendrá solamente determinada por los receptores de los usuarios.
- **Commercial Service (CS)**: servicio de pago que ofrecerá información de posición y tiempo para los productos profesionales y comerciales de valor añadido. Con una precisión superior al OS, al utilizarse dos frecuencias adicionales encriptadas. Su mercado está enfocado a las empresas con actividades altamente dependientes a la navegación por satélite. Las nuevas frecuencias mencionadas anteriormente, facilitan nuevas aplicaciones, integrando los servicios de navegación de Galileo con redes de comunicación *Wireless*, para de este modo mejorar las precisiones de posicionamiento o para la navegación en espacios cerrados/urbanos, así como sincronizaciones en tiempo de precisión. No se ofrece información de integridad.
- **Public Regulated Service (PRS)**: servicio encriptado de gran robustez y disponibilidad. Su mercado es para uso gubernamental y organismos públicos dedicados a la seguridad, así como aplicaciones en sectores críticos o de interés estratégico, así como aplicaciones militares.
- **Safety of Life (SoL)**: Engloba todas aquellas aplicaciones donde el uso de Galileo o su indisponibilidad pueda significar un riesgo para la vida de las personas. Su mercado es la aviación comercial, pudiendo proporcionar servicios de integridad de la señal.

- ***Search and Rescue (SAR)***: Los usuarios podrán en situación de emergencia ser localizados de manera instantánea y con gran precisión, notificando la recepción de la señal de socorro. Es integrado en el servicio de búsqueda y rescate global Cospas-Sarsat, con estaciones terrestres para la captación de dichos mensajes de rescate en Svarbald, Maspalomas y Larnaca (Chipre). El centro de control está en Toulouse (Francia).

A continuación, se plasma un resumen de los servicios anteriormente citados:

Open Service (OS)	Servicio de libre acceso para posicionamiento, navegación y tiempo.	
Public Regulated Service (PRS)	Servicio cifrado restringido a usuarios autorizados por el gobierno. Diseñado para una mayor robustez y una mayor disponibilidad	
Search and Rescue Service (SAR)	Ayuda a localizar a las personas en peligro y confirma que la ayuda está en camino	
High Accuracy Service (HAS)	Ofrece servicios de alta precisión y servicios de valor agregado a través de una banda de frecuencia cifrada diferente	
Commercial Authentication Service (CAS)	Ofrece servicios autenticados de alta precisión a través de una banda de frecuencia cifrada diferente	

Ilustración 2-57 Servicios Galileo

3 Parámetros y cálculos de un sistema de radiocomunicaciones

3.1 Introducción

En este capítulo, se pretende dar a conocer, los parámetros y cálculos que afectan a un sistema de radiocomunicaciones, permitiendo así dotar de una base técnica relevante para la adecuada comprensión de los posteriores capítulos y apartados. Por ello, los aspectos más relevantes, que se estudiarán en este capítulo son *Link Power Budget* (para canal ascendente y descendente), respuesta en frecuencia, temperatura y figura de ruido, sensibilidad y estabilidad en frecuencia (Espurios y Ruido de fase).

3.2 *Link Power Budget* – Canal ascendente

3.2.1 Cálculo de las pérdidas del enlace

Estas pérdidas dependen de la frecuencia del enlace ascendente y de la distancia entre el satélite y la estación terrestre. Donde la frecuencia del enlace ascendente es la frecuencia a la que la estación terrestre se comunica con el satélite. Su cálculo se realizaría de la siguiente manera:

$$\text{Pérdidas enlace ascendente} = 10 \log \left(\frac{4\pi d c}{f} \right)^2 \text{ dB}$$

donde:

- **d** es la distancia entre el satélite y la estación terrestre.
- **f** es la frecuencia.
- **c** es la velocidad de la onda electromagnética.

3.2.2 Cálculo de la ganancia de la antena de transmisión

Se trata de la ganancia de potencia isotrópica de la antena, G_T , se define como la densidad de potencia en la dirección máxima, denotada aquí por P_D , a la densidad de potencia archivada por un radiador isotrópico 100 % eficiente. Se puede calcular de la siguiente forma:

$$G_T = \frac{4\pi P_D}{P_T} = 10 \log \left(\frac{\pi^2 D^2 \eta}{\left(\frac{3}{f}\right)^2} \right) \text{ dB}$$

donde:

- P_T es la potencia total radiada.

- D es el diámetro de la antena.
- η es la eficiente de la antena, se relaciona entre la potencia de entrada y la potencia radiada de la antena, suele estar comprendida entre 0,55 y 0,73.

3.2.3 Cálculo de la PIRE (en dBW) y la DF de funcionamiento.

Para realizar el cálculo, previamente hay que tener en cuenta:

- **Potencia de transmisión:** es la potencia de entrada que suministra el transmisor al alimentador de antena en la estación terrestre para que irradie potencia hacia el satélite. La unidad de medida es vatios (w).
- **Pérdidas en el alimentador del transmisor:** dan lugar en la conexión entre la antena transmisora y el transmisor. Se producen en los cables, las guías de onda de conexión, los filtros y los acopladores.
- **Pérdida de apuntamiento de la antena:** La situación ideal de un enlace por satélite, cuando se establece un enlace con él, sería que la antena de la estación terrestre y del satélite estuvieran alienadas para alcanzar la máxima ganancia. Existen dos posibles fuentes de pérdida fuera del eje, una en el satélite y otra en la estación terrestre. La primera se tiene en cuenta al diseñar el enlace para que funcione en el contorno real de la antena del satélite. La segunda se denominan pérdidas de apuntamiento de la antena. Normalmente, las antenas están ajustadas para que estas pérdidas suelen representar solamente unas décimas de decibelio, aunque la calidad del ajuste dependerá del ancho de haz de la antena (i.e. que a su vez depende del tamaño de la antena y de la frecuencia de transmisión).
- **N.º de portadoras:** Utilizando el esquema de multiplexación de frecuencias se puede transmitir cualquier número de portadoras de la antena transmisora.

En lo que respecta la **PIRE**, se obtiene del producto de la potencia real y la ganancia de potencia de la antena transmisora. Se puede representar de la siguiente manera:

$$PIRE = P_T * G_T \text{ dB o } PIRE = P_T[W] + G_T[W] \text{ dBw}$$

Si se tienen en cuenta las pérdidas de alimentación del transmisor y las pérdidas de apuntamiento de la antena, se obtiene que:

$$PIRE_T(\text{dB}) = 10 \log(\text{Potencia del transmisor}) \\ - \text{Pérdida del alimentador del transmisor} \\ + \text{Ganancia de la antena del transmisor} \\ - \text{Pérdida de apuntamiento de la antena}$$

Para calcular la **densidad de flujo máxima de funcionamiento del satélite (dB/Sq m)**, se tendrá en cuenta el valor para el cual el amplificador de un transpondedor de satélite presenta una saturación de la potencia de salida. La densidad de flujo necesaria en la antena receptora para producir la saturación del TWTA, se denomina densidad de flujo de saturación. Esta puede ser calculada mediante:

Densidad de flujo de funcionamiento del satélite

$$= 20 \log \left(\frac{4\pi df}{c} \right) (dB)$$

– pérdidas atmosféricas (lluvia, centelleo, nubes, etc)(dB)

Donde las **pérdidas atmosféricas (lluvia, centelleo, nubes, etc.) (dB)**, se corresponde con que la lluvia provoca atenuación de las ondas por dispersión y absorción, de la energía de la onda. Esta aumenta con el aumento de la frecuencia. Además, se deben tener en cuenta otros factores que atenúan como el centelleo, nubes, etc.

Para calcular la **potencia nominal del transmisor de tierra**, esta corresponde con la potencia suministrada por el transmisor de tierra. Esta se puede expresar como:

Potencia nominal del transmisor de tierra

$$= 10^{((10 \log(N^{\circ} \text{ de portadoras} * \text{potencia de portadora}) + \text{Back off del amplificador})/10)}$$

Donde:

- **Back off del amplificador (Amplifier back off)**: Para reducir la distorsión de intermodulación, el punto de funcionamiento del TWT debe desplazarse hacia la parte lineal de la curva, la reducción de la potencia de entrada se denomina back off de entrada (input back-off). Cuando hay múltiples portadoras, la potencia alrededor de la saturación, para cualquier portadora, es algo menor que la que se consigue con el funcionamiento de una sola portadora. El back-off de entrada es la diferencia en decibelios entre la entrada de la portadora en el punto de funcionamiento, y la entrada de saturación que se requeriría para el funcionamiento de una sola portadora.

3.2.4 Cálculo de la relación entre el enlace ascendente y el ruido (C/N_0)

Para realizar el cálculo hay que tener en cuenta dos factores:

- **Pérdidas atmosféricas (lluvia, centelleo, nubes, etc) (dB)**: explicada en el punto anterior.

- **G/T del satélite (dB/k):** indica la figura de mérito. La relación G/T es la relación entre la ganancia del satélite y la temperatura del ruido térmico del satélite. Este valor dependerá de los componentes del satélite.

En lo que respecta al C/N_0 (dB Hz), el enlace ascendente del circuito de satélite es el enlace en que la estación terrestre transmite la señal y el satélite la recibe. Su relación viene determinada por:

$$\begin{aligned} [C/N_0]_U(\text{dB}) &= [PIRE]_U + [G/T]_U - [Pérdidas]_U + 228.6 \\ &= [PIRE]_U + [G/T]_U \\ &\quad - [Pérdidas \text{ enlace ascendente} + Pérdidas atmosféricas]_U \\ &\quad + 228.6 \end{aligned}$$

3.3 Link Power Budget – Canal descendente

3.3.1 Cálculo de la PIRE procedente del satélite

Este valor puede calcularse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} [PIRE]_D &= \text{Densidad de flujo de funcionamiento del satélite} \\ &\quad + ([PIRE]_{saturada} - \text{Back off de salida}) \\ &\quad - (\text{Densidad de flujo de saturación} - \text{Back off de entrada}) \end{aligned}$$

donde:

- $[PIRE]_{saturada}$: es la PIRE del satélite, a la que el amplificador de la estación terrestre entra en saturación.
- **Densidad de flujo de funcionamiento (Operating flux density, $\frac{dB}{sq} m$):** El amplificador de tubo viajero de un transpondedor de la estación terrestre presenta una saturación de la potencia de salida. La densidad de flujo necesaria en la antena receptora para producir la saturación del TWTA se denomina densidad de flujo de saturación.
- **Back-off de entrada:** se corresponde con la diferencia en decibelios entre la entrada de la portadora en el punto de funcionamiento y la entrada de saturación que se requeriría para el funcionamiento con una sola portadora.
- **Back-off de salida:** Al igual que se emplea el back-off de entrada debe permitirse el correspondiente back-off de salida para la PIRE del satélite.

3.3.2 Cálculo del ancho de banda operativa del satélite

Para poder realizar el cálculo del ancho de banda operativa del satélite, previamente es necesario conocer ciertos aspectos teóricos para calcular la tasa de efectiva de datos de entrada y la tasa de transmisión:

- **Tasa de datos de entrada (Kb/s)**: corresponde con el número de señales de mensajes reales por segundo.
- **Factor de sobrecarga del enlace (% del peor caso)**: se trata del retardo de transmisión adicional entre los bits de mensaje para evitar la colisión o la interferencia entre símbolos de los bits de mensaje.
- **Codificación de tasa FEC (Forward error correction)**: se trata de un sistema de control de errores con el que transmitir datos redundantes de manera artificial con el fin de corregir en la recepción errores dados por el medio, interferencias y ruido. Existen diversos tipos como “Block Coding”, “Convolutional Coding (con “Sequential” y “Viterbi decoding”)”, “Concatenated Coding” o “Turbo Coding”.
- **Bits/Símbolo (m)**: se refiere al número de símbolos transmitidos por el transmisor cada bit.

Para calcular la **tasa efectiva de datos de entrada (kbps)** se puede realizar mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} & \textit{Tasa efectiva de datos de entrada} \\ & = \textit{Tasa de datos de entrada(kbps)} / (1 \\ & \quad + \textit{factor de sobrecarga del enlace}/100) \end{aligned}$$

A continuación, el cálculo de la **tasa de transmisión** se calcula como:

$$\begin{aligned} & \textit{Tasa de transmisión(kbps)} \\ & = \textit{Tasa de datos de entrada} / \textit{codificación de la tasa FEC} \end{aligned}$$

Con las dos ecuaciones anteriores, se puede calcular el ancho de banda operativo del satélite por portadora, la ecuación sería:

$$\begin{aligned} & \textit{Ancho de banda operativo del satélite (kbps)} \\ & = (\textit{Velocidad de transmisión} / \textit{Bits por símbolo}) \end{aligned}$$

3.3.3 Cálculo de las pérdidas del enlace

Para llevar a cabo dicho cálculo hay que saber que:

- La frecuencia del enlace descendente es la frecuencia a la que el satélite se comunica con la estación de tierra.
- Las pérdidas del enlace descendente dependerán de la frecuencia del enlace descendente y la distancia entre el satélite y la estación terrestre.

Con la siguiente ecuación se define dichas pérdidas:

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas enlace descendente} &= 10 \log \left(\frac{4\pi d}{c/f} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{4\pi d f}{c} \right) \\ &= 32,4 + 20 \log f + 20 \log d \quad \text{dB} \end{aligned}$$

donde:

- **d** es la distancia entre el satélite y la estación terrestre (Km).
- **f** es la frecuencia de la onda del enlace descendente (MHz).
- **c** es la velocidad de la onda electromagnética.

3.3.4 Cálculo de la ganancia de la antena del receptor

Se trata de la ganancia de potencia isotrópica de la antena, G_T , se define como la densidad de potencia en la dirección máxima, denotada aquí por P_D , a la densidad de potencia archivada por un radiador isotrópico 100 % eficiente. Se puede calcular de la siguiente forma:

$$G_R = \frac{4\pi P_D}{P_T} = 10 \log \left(\frac{\pi^2 D^2 \eta}{\left(\frac{3}{f}\right)^2} \right) \text{dB}$$

donde:

- P_T es la potencia total radiada.
- **D** es el diámetro de la antena.
- η es la eficiencia de la antena, se relaciona entre la potencia de entrada y la potencia radiada de la antena, suele estar comprendida entre 0,55 y 0,73.

3.3.5 Cálculo del G/T del receptor

Para realizar este cálculo hay que tener en cuenta varias temperaturas, como:

- **Elevación de la antena (deg):** esta afecta a la temperatura de ruido de la antena, disminuyendo con el aumento de la elevación.
- **Temperatura de ruido de la antena:** corresponde a la suma total de las fuentes de ruido en la antena.
- **Aumento del ruido de la antena debido a la lluvia:** la lluvia afecta a la temperatura de ruido de la antena, incrementándola.
- **Temperatura de ruido del LNA**

Con esto se puede obtener la **temperatura de ruido del sistema (k)**, que representa la sumada de todas las temperaturas en la antena receptora. Esta se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} \text{Temperatura de ruido del sistema (k)} \\ &= \text{temperatura de ruido de la antena} \\ &+ \text{aumento del ruido de la antena debido a la lluvia} \\ &+ \text{temperatura de ruido de la cadena receptora} \end{aligned}$$

A través del cálculo anterior, se puede calcular la **G/T del receptor**, siendo esta la figura de mérito en la antena receptora. Para ello, se emplea la siguiente ecuación:

$$\frac{G}{T} \left(\frac{dB}{K} \right) = \text{Ganancia de la antena receptora} - \text{pérdidas del alimentador} - 10 \log (\text{temperatura de ruido del sistema})$$

Es importante señalar que la temperatura de ruido y la ganancia para el cálculo de la G/T se calculan en el punto de entrada del LNA, ya que es la manera más práctica para llevar a cabo el diseño de los sistemas.

Finalmente, respecto a la temperatura de ruido del sistema se calcula de la siguiente manera:

$$T^a_{\text{sistema}} = T^a_{\text{antena}} + T^a_{LNA} + \frac{T^a_{DC}}{G_{LNA}} + \frac{T^a_{BB}}{G_{LNA} * G_{DC}} + \dots$$

Teniendo en cuenta que las T^a_{antena} y T^a_{LNA} son los puntos más importantes, siendo más el LNA, se puede calcular la figura de ruido del sistema siguiendo la ecuación de Friss (explicada en el apartado 3.5):

$$F_r = F_{LNA} + \frac{F_{DC} - 1}{g_{LNA}} + \frac{F_{BB} - 1}{g_{LNA}g_{DC}} + \dots$$

Como puede observarse en la fórmula anterior, si la ganancia del LNA es suficientemente alta, las figuras ruido de los equipos tras el LNA tienen una influencia despreciable en el ruido total de la cadena receptora.

3.3.6 Cálculo del margen de enlace

Para conseguir el valor del margen de enlace previamente hay que calcular ciertos parámetros, estos serían:

- **Pérdidas atmosféricas:** la caída de lluvia introduce una atenuación por absorción y dispersión de la energía de la señal, y la atenuación por absorción introduce ruido.

La temperatura efectiva del ruido sería la siguiente:

$$T_{lluvia} = TA(1 - (1/A))$$

Donde T_{lluvia} se conoce como la temperatura de absorción aparente. Se trata de un parámetro medido, que es una función de muchos factores, incluyendo la temperatura física de la lluvia, el efecto de dispersión de la lluvia y el efecto de dispersión de la célula sobre el ruido térmico que incide sobre ella. El valor de la temperatura de absorción aparente se sitúa entre 270 y 290 Kº.

La temperatura total del ruido del cielo es la temperatura del cielo claro más la temperatura de la lluvia

$$T_{cielo} = T_{cc} + T_{lluvia}$$

Donde:

- T_{cc} es la temperatura del ruido del cielo claro.

- **Pérdida de apuntamiento de la antena receptora:** se ha explicado anteriormente en el apartado 3.2.3, siendo análogo para este caso.
- **Eb/No requerida para una BER determinada:** Es la relación señal/ruido requerida para lograr una relación de error de bit de bit de error por bits de mensaje. El valor de la BER dependerá de la modulación digital y de los códigos correctores que se empleen. Un ejemplo sería una BER de $1/10^7$, la cual consiste en una relación de error de bit de 1 bit de error por 107 bits de mensaje.

Con todo lo anterior, se puede calcular la relación portadora/ruido del enlace descendente. Para ello, se emplea la siguiente ecuación:

$$\text{Enlace descendente } \frac{C}{N_o} \text{ (dB Hz)}$$

$$= \text{PIRE de funcionamiento del satélite}$$

$$- \text{Pérdida de trayectoria del enlace descendente}$$

$$- \text{Pérdidas atmosféricas}$$

$$- \text{Pérdida de apuntamiento de la antena receptora}$$

$$+ \frac{G}{T} \text{ del receptor} + 228,6$$

A continuación, se puede obtener los siguientes valores:

- **Over all enlace descendente C/No (dB Hz):** consiste en la suma de la relación portadora/ruido en el enlace descendente y la relación portadora/ruido en el enlace ascendente. Siento este valor el C/N efectivo total del sistema. Se puede calcular de la siguiente manera:

$$\text{Over all Enlace descendente } \frac{C}{N_o} \text{ (dB Hz)} = -10 \log \left(10^{-\left(\frac{C}{N_o}\right)^U} + 10^{-\left(\frac{C}{N_o}\right)^D} \right)$$

Donde:

- $\left(\frac{C}{N_o}\right)^U$ es la relación C/N del enlace ascendente.
- $\left(\frac{C}{N_o}\right)^D$ es la relación C/N del enlace descendente.

- **Eb/No disponible:** es la relación señal/ruido del sistema. Se puede calcular de la siguiente manera:

$$\frac{E_b}{N_o} \text{ disponible}$$

$$= \text{over all enlace descentente } \left(\frac{C}{N_o}\right)$$

$$/ \text{tasa de datos de entrada}$$

$$= \text{over all enlace descentente } \left(\frac{C}{N_o}\right) \text{ (dB)}$$

$$- \text{tasa de datos de entrada (dB)}$$

$$= \text{over all enlace descentente } \left(\frac{C}{N_o}\right) \text{ (dB)}$$

$$- 10 \log (\text{tasa de datos de entrada en KB} * 10_3)$$

Finalmente, se puede obtener el **margen de enlace disponible**. Este es la diferencia entre “Eb/No disponible” y “Eb/No requerido” para BER determinada en dB. Se puede calcular de la siguiente manera:

Margen de enlace disponible

$$= \frac{E_b}{N_o} \text{ disponible (dB)} - \frac{E_b}{N_o} \text{ requerido para BER determinada}$$

3.4 Respuesta en frecuencia

Se refiere a la respuesta de un sistema, en régimen permanente, al emplearse una señal de entrada con una excitación senoidal de amplitud fija y de frecuencia cambiante desde cero hasta infinito. La respuesta de un sistema LTI será otra senoidal con misma frecuencia de entrada, pero distinta amplitud y fase.

La caracterización de un sistema de esta manera presenta dos ventajas importantes, como son la facilidad experimental de realización y que la FDT en el dominio frecuencia se calcula reemplazando las del dominio complejo de las Transformadas de Laplace por $j\omega$. Con ello, se consigue una nueva función de variable compleja, $G(j\omega)$ que, mediante su módulo y argumento, se podrá expresar la amplificación o atenuación del equipo y el desfase que ha sido introducido a una frecuencia determinada.

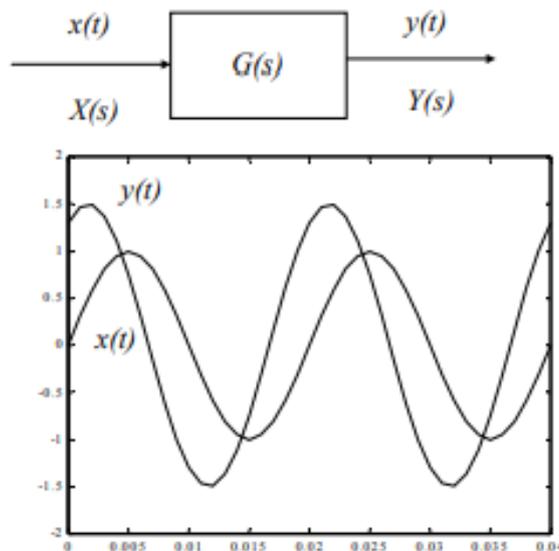


Ilustración 3-1 Ejemplo de una respuesta en frecuencia de un sistema LTI

Para demostrar lo anterior, se parte de un sistema LTI al que se le excita con un armónico con una variable independiente que será su frecuencia:

$$x(t) = X_{max} \text{sen}(\omega t) \quad 0 \leq \omega \leq t$$

Al aplicar la transformada de Laplace será:

$$X(s) = X_{max} \frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$$

A la salida, se obtendrá una señal que será el resultado de la convolución procedente de la excitación de entrada y la FDT del sistema. Como se considera que el equipo es lineal, la expresión se puede expresar en dos polinomios, el numerador como $N(s)$ y el denominador como $D(s)$; cumpliendo la condición de existencia física que exige que el grado del denominador sea mayor o igual al del numerador:

$$Y(s) = G(s)X(s) = \frac{N(s)}{D(s)} X_{max} \frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$$

Al tratarse de un sistema LTI, $G(s)$ puede ser escrita como resultado de un polinomio en el numerador y otro en el denominador con coeficientes constantes en ambos:

$$Y(s) = X_{max} \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \frac{N(s)}{D(s)} \quad n \equiv \text{grado}(D(s)) \geq m \equiv \text{grado}(N(s))$$

Para llevar a cabo el cálculo de la anti transformada se realiza la descomposición en fracciones simples, dividiendo la componente del permanente de la parte correspondiente del transitorio:

$$Y(s) = \frac{k_1}{s + j\omega} + \frac{k_2}{s - j\omega} + \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{s + p_i}$$

donde p_i son las raíces o polos de $D(s)$.

Como bien define la respuesta en frecuencia, solo es interesante la respuesta del régimen permanente, es decir, la solución particular de la ecuación diferencial. En las transformadas de Laplace, el transitorio depende de los polos del polinomio característico y el régimen permanente coincide con los polos de la señal entrada:

$$y_{rp}(t) = L^{-1} \left[\frac{k_1}{s + j\omega} + \frac{k_2}{s - j\omega} \right] = k_1 e^{-j\omega t} + k_2 e^{j\omega t}$$

Al resolver los residuos simples quedaría:

$$k_1 = [(s + j\omega)Y(s)]_{s=-j\omega} = \left[(s + j\omega) X_{max} \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} G(s) \right]_{s=-j\omega} = X_{max} \frac{G(-j\omega)}{-2j}$$

$$k_2 = [(s - j\omega)Y(s)]_{s=-j\omega} = \left[(s - j\omega) X_{max} \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} G(s) \right]_{s=-j\omega} = X_{max} \frac{G(-j\omega)}{2j}$$

Al introducir los residuos en la expresión del régimen permanente de salida y sacando factor común a $\frac{X_{max}}{2j}$:

$$y_{rp}(t) = \frac{X_{max}}{2j} [-G(-j\omega)e^{-j\omega t} + G(j\omega)e^{j\omega t}]$$

Al sustituir s por $j\omega$ y ser una expresión en el dominio complejo, se empleará una representación en módulo y argumento:

$$G(-j\omega) = |G(-j\omega)|e^{j\varphi(-j\omega)} = |G(j\omega)|e^{-j\varphi(j\omega)}$$

$$G(j\omega) = |G(j\omega)|e^{j\varphi(j\omega)}$$

Al introducir los resultados quedaría:

$$y_{rp}(t) = X_{max}|G(j\omega)| \left[\frac{-e^{j\varphi(j\omega)}e^{-j\omega t} + e^{j\varphi(j\omega)} + e^{j\omega t}}{2j} \right]$$

$$y_{rp}(t) = X_{max}|G(j\omega)| \text{sen}(\omega t + \varphi(j\omega))$$

Como se puede observar, la salida es otro armónico con misma frecuencia que el de la entrada, siendo su amplitud amplificada o atenuada dependiendo del valor de $|G(\omega)|$, al igual que desfasada respecto de la entrada dependiendo de $\varphi(\omega)$. Dicha conclusión solamente es válida para sistemas lineales. En el caso, de un sistema no lineal, la salida sería el resultado de la combinación de n-armónicos, de frecuencias múltiplos del armónico fundamental, es decir, al no ser lineal el sistema aparece una distorsión armónica. En resumen, en el caso de que sea un sistema lineal, la salida es otro armónico de igual frecuencia que la de entrada. En cambio, si el sistema es no lineal, no sólo hay un componente de igual frecuencia al armónico de entrada o fundamental sino de armónicos múltiples.

3.5 Temperatura y figura de ruido

Inicialmente es necesario determinar ciertos parámetros, como F_r y T_r la figura y la temperatura equivalente de ruido del receptor, formado éste por los elementos procedentes del conector de la antena a la entrada hasta el demodulador. A lo anterior se suman, F_a y T_a , que se utilizan para denotar la figura y temperatura equivalente de ruido de la antena. Además, F_s y T_s representan la figura de ruido y la temperatura equivalente del sistema completo, antena más receptor. Hay que tener en cuenta que, las figuras de ruido se encuentran en unidades naturales, se escriben minúsculas para ello. A su vez, para las figuras de ruido se empleará mayúsculas para dB. Las magnitudes vienen relacionadas y determinadas por las siguientes ecuaciones.

Por un lado, la temperatura de ruido y figura de ruido del sistema, se expresan de la siguiente manera:

$$T_s = T_a + T_r$$

$$F_s = T_s/T_0$$

Donde T_0 es la temperatura ambiente (290 K), dada en términos de figura de ruido de antena y receptor por la siguiente ecuación (usando unidades naturales):

$$F_s = F_a + F_r - 1$$

Con las ecuaciones dadas se calcula que $T_a = T_0 F_a$, y, $T_r = T_0 (F_r - 1)$.

Además, se sabe que la figura de ruido de una red pasiva a temperatura ambiente es el valor de sus pérdidas. Por tanto, si el receptor está constituido por bloques en cadena, la figura de ruido equivalente sería la siguiente:

$$F_r = F_1 + \frac{F_2 - 1}{g_1} + \frac{F_3 - 1}{g_1 g_2} + \frac{F_4 - 1}{g_1 g_2 g_3} + \dots$$

Donde g_i se corresponde con la ganancia del bloque i y F_i es la figura de ruido correspondiente, siendo el primer bloque, el bloque 1, seguido del 2, del 3 y así sucesivamente. Cabe mencionar que la figura de ruido en un dispositivo ideal (perfecto) debe tener un factor de ruido entre 0 y 1 dB. Además, se suele poner un preamplificador (interno o externo) para mejorar el factor de ruido del dispositivo, debido que en la ecuación de Friis, el primer término es el más importante.

En lo que respecta, al ruido a la salida del sistema, éste se puede expresar en función de los siguientes parámetros:

$$n = KT_s B g = kT_0 F_s B g = kT_0 (F_a + F_r - 1) B g$$

$$N(\text{dB}) = 10 \log(kT_0) + 10 \log(F_s B g)$$

$$N(\text{dBm}) = -174 \text{dBm/Hz} + F_s + 10 \log B(\text{Hz}) + G$$

Donde B , se corresponde con el ancho de banda equivalente de ruido y g se refiere a la ganancia procedente desde la conexión de antena hasta la salida del sistema.

3.6 Sensibilidad

Se refiere como parámetro que determina fundamentalmente el alcance del sistema, refiriéndose al mínimo valor de señal que requerida para un óptimo funcionamiento. Existen varios parámetros que influyen en la sensibilidad, los principales son el nivel de ruido a la entrada del demodulador, esto incluye el ruido térmico generado en el propio equipo como del ruido externo captado por la antena. A su vez, si existiera otra interferencia externa incidente en la antena influirá, tanto en la calidad del sistema como en el valor de la sensibilidad. Cuanto más baja sea la sensibilidad, mejor será la recepción.

En base a la teoría de modulaciones digitales, para alcanzar un umbral de calidad específico, es decir, una tasa de error, el demodulador requiere que su entrada haya un cierto nivel de energía de bit sobre densidad espectral de ruido, E_b/N_0 . Dicho nivel vendrá determinado por la modulación digital y de los códigos correctores que se empleen.

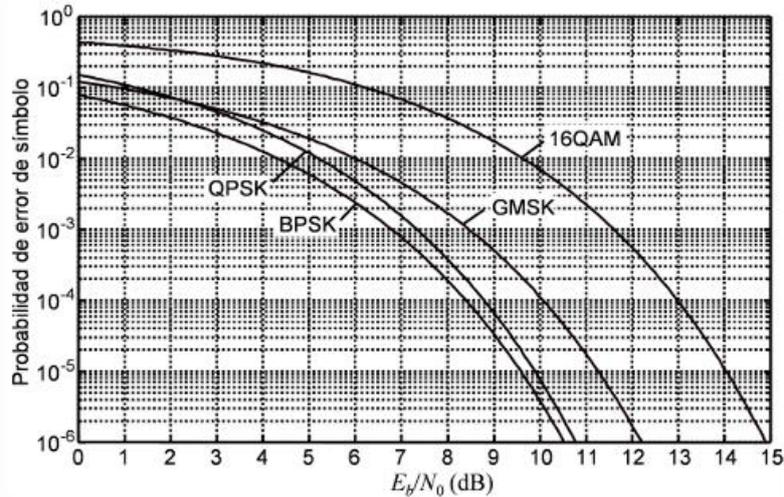


Ilustración 3-2 Probabilidad de error de E_b/N_0 para QPSK, BPSK, GMSK y 16QAM

La BER se define empleando la siguiente ecuación:

$$BER = P_{eb} = P_{es} / \log 2M$$

Donde P_{es} corresponde con la probabilidad de error símbolo, P_{eb} se refiere a la probabilidad de error de bit y M se trata del número de símbolos de modulación. Por ejemplo, $M=4$ para QPSK y $M=16$ para 16QAM.

Desde E_b/N_0 , se puede calcular la relación portadora a ruido C/N , como:

$$\frac{C}{N} = \frac{E_b \cdot \nu_b}{N_0 \cdot B}$$

Donde ν_b se refiere la tasa de bit y B al ancho de banda de canal. El nivel de potencia mínimo o sensibilidad que se requiere a la entrada del demodulador para conseguir un determinado umbral de calidad, será calculado usando el valor de C/N , si el nivel de ruido en dicho punto es conocido.

En radiocomunicaciones digitales es habitual utilizar:

$$\frac{c}{n} = \frac{e_b/T_b}{n_0 \cdot B} = \frac{e_b \cdot R_b}{n_0 \cdot B}$$

Donde c se corresponde con la potencia de portadora en u.n, B al ancho de banda equivalente de ruido y $R_b = 1/T_b$ como el régimen binario.

Si se define $w = \frac{e_b}{n_0}$ como la relación señal ruido normalizada

$$w = \frac{e_b}{n_0} = \frac{p'_r g_T T_b}{kT_0 F_s g_T} = \frac{p'_r}{kT_0 F_s R_b}$$

Donde f_s se refiere a la figura de ruido del sistema en u.n y g_T como la ganancia de todos los bloques entre antena receptora y la entrada al demodulador, donde se mide la w . Al despejar la expresión, se puede obtener $c = p'_r = wkT_0 F_s R_b$. Si se exige una relación señal a ruido normalizada mínima, w_{min} , la potencia recibida es el umbral o sensibilidad, supuesto que el sistema está limitado por ruido y no por potencia. En este caso, se despeja $t_h = w_{min} kT_0 F_s R_b$, en dB queda

$$T_h(dBm) = w_{min}(dB) + F_s(dB) + 10 \log R_b \left(\frac{bits}{s} \right) - 174(dBm/Hz)$$

Donde al estar -174 expresado en dBm/Hz, la potencia resultante también lo estará. Cabe destacar que los bits/s tiene dimensión de hercio, dado que R_b es el inverso del tiempo de bit, y que tanto w , como F_s son adimensionales. Con esta expresión se emplea la potencia necesaria para, dado un determinado nivel de ruido y un régimen binario, alcanzar un w objetivo. El W se encuentra totalmente relacionado con la tasa de error de bit alcanzada.

La anterior ecuación está expresada para sistemas digitales, para el caso de los sistemas analógicos se alcanza a una ecuación proveniente de la relación señal a ruido (SNR), tal que así:

$$T_h(dBm) = SNR_{min}(dB) + F_s(dB) + 10 \log B (Hz) - 174(dBm/Hz)$$

3.7 Estabilidad en frecuencia

Esta se entiende como la medida que un oscilador conserva el mismo valor de frecuencia dentro de un periodo determinado. Una onda sinusoidal ideal se define por la siguiente ecuación:

$$V(t) = V_0 \text{sen}(2\pi ft)$$

A su vez, se puede expresar la salida instantánea de un oscilador como:

$$V(t) = V_0 [1 + A(t)] \text{sen}[2\pi ft + q(t)]$$

siendo $A(t)$ la amplitud, y, $q(t)$, las fluctuaciones de fase de la señal.

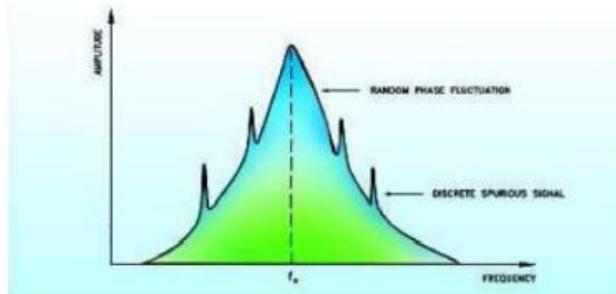


Ilustración 3-3 Espectro de un oscilador

En la figura, se representa el espectro de un oscilador, comprendido por una función delta en la frecuencia de oscilación. En lo que respecta, a la densidad espectral, esta decreta por los lados simétricamente, hasta estabilizarse en el nivel de ruido térmico a una determinada distancia de la frecuencia de oscilación. Dos componentes son apreciadas en la imagen, las cuales causan fluctuaciones en la fase. La primera corresponde a la espuria, esta surge como diversas componentes en la densidad espectral. En cuanto a la segunda componente, se refiere al ruido de fase, que es aleatoria por naturaleza. A continuación, se describe la última componente:

3.7.1 Ruido de fase

Medida para la estabilidad de los osciladores, esta se trata de un caso particular, en el que se dan variaciones muy rápidas o a corto plazo, sobre la frecuencia de la señal. Esta componente surge por el ruido térmico y el ruido *Flicker*, donde ruido es $1/f$. Existen dos métodos para realizar la medición del ruido de fase de un oscilador, midiendo la desviación en fase o frecuencia de la fuente. Esto se puede llevar a cabo en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia. Es importante mencionar que el tiempo y la frecuencia son términos relacionados. Sin embargo, en el dominio de la frecuencia es donde, el ruido de fase de un oscilador se detalla notablemente mejor. Esto es debido a la densidad espectral de las fluctuaciones en la fase, por unidad de ancho de banda, al caracterizarse midiendo el ruido en las bandas laterales, a ambos lados de la frecuencia central de la señal de salida. Además, suele estar especificada en dBc/Hz, en la banda lateral única a un offset establecido con respecto a la portadora.

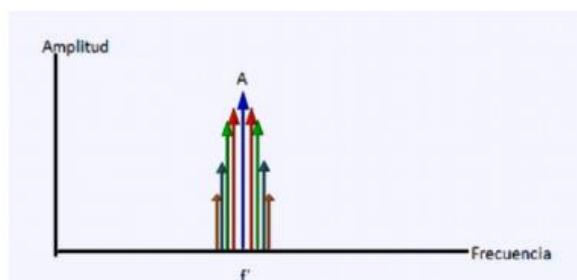


Ilustración 3-4 Efecto del ruido de fase en frecuencia

Entre los factores que más afectan al ruido de fase de un VCO destacan:

- Factor Q del resonador.
- Factor Q del diodo varactor.
- Dispositivos activos usados para el transistor oscilante.
- Ruido de la fuente de potencia.
- Ruido de la fuente externa de tensión.

Respecto los dos últimos, estos pueden ser eliminados realizando una apropiada decisión de las fuentes, siendo el ruido de fase proveniente prácticamente del factor Q del circuito.

3.8 Espurios

Estos aparecen por intermodulación en los elementos no lineales como pueden ser los mezcladores del UC y en los elementos no lineales de la cadena como son los amplificadores. Además, los espurios son referidos a emisiones en una o diversas frecuencias que se encuentran en el exterior de la anchura de banda aceptada, pudiéndose reducir su nivel sin perjudicar a la transmisión de información. Para ello, se puede bajar el nivel de ruido, atenuando, pero sin llegar a saturar el equipo e incluso se pueden aplicar máscaras ya definidas. Estas emisiones reducen el rendimiento del sistema y puede interferir en otros módulos del mismo sistema o superponerse a las señales enviadas por transmisores que funcionen en otras bandas de frecuencias.

4 Estación prototipo de tierra

4.1 Introducción

Una vez tratados los capítulos anteriores, se pretende profundizar concretamente más en las pruebas de medidas de RF que se realizarían en una estación terrestre. Para ello, se define una estación prototipo con la que simular el comportamiento de una estación de Telemetría, Seguimiento y control. Los puntos que se tratarán en este capítulo son los siguientes:

- Descripción, misión, especificaciones de la antena y sistemas/subsistemas de la estación.
- Realización de pruebas de RF con las que verificar el apropiado funcionamiento de las cadenas ascendente y descendente.

4.2 Descripción, misión, especificaciones de la antena y sistemas/subsistemas de la estación

Para este proyecto se ha determinado simular una estación terrestre del tipo de Telemetría, Seguimiento y control, cuya función principal es controlar y monitorizar los satélites de su segmento espacial. Estas estaciones normalmente cuentan con un gran equipamiento y con redundancia en todas sus funciones para conseguir la mayor disponibilidad posible. Sin embargo, para este proyecto, se contará con un equipamiento simple y sin dicha redundancia.

Sobre su segmento espacial, éste estaría compuesto por satélites de tipo MEO, ubicados a una distancia de 23.000 Km sobre la superficie terrestre, con una inclinación de 56° (para altas altitudes) en tres planos y su polarización es circular debido a su mayor velocidad. La vida útil de los satélites sería de 12 años.

Entre las operaciones rutinarias, que corresponden a este tipo de estaciones, se encontrarían las relacionadas con:

- Seguimiento de satélites, procesamiento de telemetría (TM), transmisión de telecomandos (TC) y localización de satélites, realizando mediciones de alcance y Doppler.

Por otro lado, las especificaciones definidas para la estación a nivel de antena y de banda serán las siguientes:

- La antena es reflectora de 13,5 m de diámetro.

- Se opera en banda S por su ancho de banda pequeño, que para el propósito de este tipo de estaciones es ideal, debido a que realizan funciones de comunicación mediante mensajes de estado y comandos a los satélites.
- Las frecuencias que se empleará serán alrededor de 2048 MHz en transmisión y 2225 MHz en la recepción.

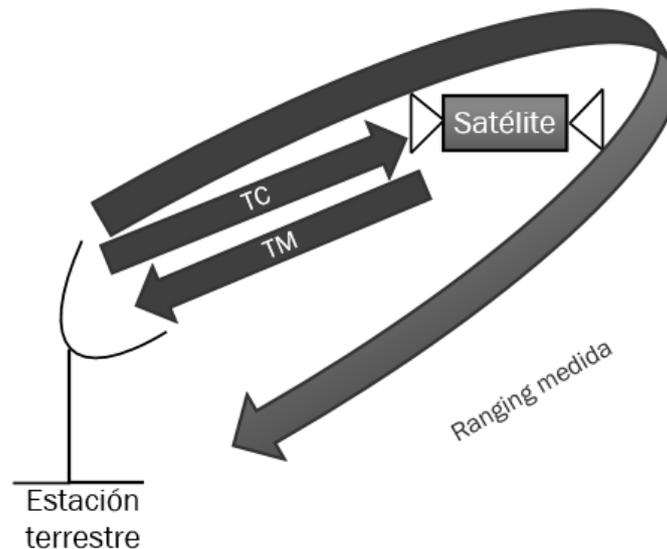


Ilustración 4-1 Representación de la comunicación estación-satélite

En la imagen anterior, se puede apreciar los tipos de información que se transmiten entre el satélite y la estación, como igualmente dentro de la propia estación, siendo estos:

- **TM:** se trata de la telemetría procedente de los satélites, es decir, se refiere a la información sobre el estado del satélite.
- **TC:** se trata del telecomando, es decir, cuando se envían comando al satélite.
- **Ranging**, existen dos tipos:
 - **Ranging de calibración:** se trata de la medición del tiempo de los equipos de la estación terrena de los canales ascendente y descendente.
 - **Ranging de medida:** se trata de la medición del tiempo de la señal saliente de la estación al satélite y posterior recepción a la estación.

Al disponer de equipos complejos para este proyecto, las técnicas de modulación empleadas en la estación serán las siguientes:

- **PM (modulación de fase):** se trata de una modulación caracterizada por tener una fase de la onda portadora que cambia de manera proporcional en

base a la señal moduladora. Esta señal será empleada tanto para el canal de subida, que envía los telecomandos, como para el canal de bajada para la telemetría. Además, se empleará para el cálculo del *Ranging* bidireccional.

Sobre las especificaciones técnicas para los enlaces ascendentes y descendentes, estos serán:

- **DSSS** (espectro ensanchado por secuencia directa): se define esta modulación como otro método para el telecomando y telemetría usando CDMA de secuencia directa y espectro ensanchado. En este tipo de modulación, un portador de banda estrecha se modula por una secuencia de código. Donde la fase del portador de la señal transmitida se modifica en base a la secuencia de código, siendo esta proveniente mediante un generador pseudo aleatorio que tiene una longitud fija. Esta es muy sensible a *offsets* de frecuencia.

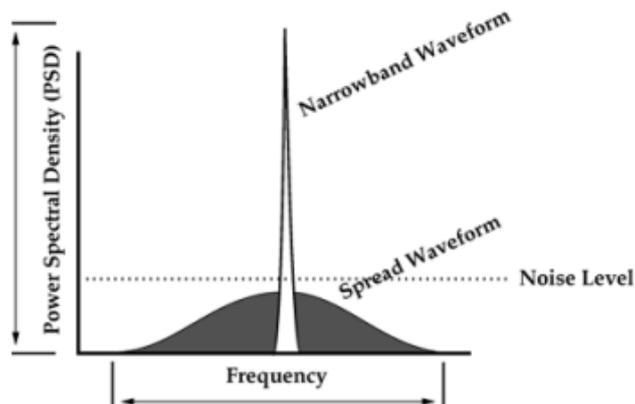


Ilustración 4-2 Representación DSSS

En el empleo de estas dos modulaciones, se encuentra la opción de que la estación esté en los siguientes modos:

- **No coherente**: La estación y el satélite usan la propia referencia de frecuencia para transmitir y recibir señal.
- **Coherente**: La frecuencia del satélite se sintoniza con la estación.

4.2.1 Subsistemas de la estación

La estación debe estar compuesta por diversos subsistemas con los que poder realizar su tarea principal, como otras secundarias. A continuación, se definen estos para la estación prototipo terrestre, estos serían:



Ilustración 4-3 Subsistemas de la estación

4.2.1.1 Subsistema de antena y seguimiento.

Este subsistema proporciona el punto de interfaz con los satélites, transmitiendo y recibiendo las señales de estos. El apuntamiento automático de la antena, mediante la unidad de control de la antena (ACU), tendrá dos modos:

- ***Program track***: predica donde va a estar el satélite, mediante efemérides. La estación realiza un seguimiento “a ciegas” de la ubicación del satélite.
- ***Auto track***: La antena se fija en la señal del satélite, realizando el seguimiento de este, ya sea recibiendo una señal en DSSS o en modo PM.

El funcionamiento del apuntamiento consistirá en iniciar en *Program Track* y cuando la señal está por encima del umbral configurado para el seguimiento *Auto track*, cambiar al modo *Auto track*. De nuevo, si en algún momento la potencia de la señal recibida está por debajo del umbral, el modo del ACU cambia automáticamente a *Program Track*.

El sistema está compuesto por la propia estructura y óptica de la antena, una unidad de control de la antena, un convertidor descendente de seguimiento y receptor de seguimiento, un LNA de seguimiento y el propio edificio de la antena. Además, se cuenta con los apropiados sistemas de deshidratación, luces, aire acondicionado, equipos de servo (AZ y EL) para mover la antena y equipos de tracking.

4.2.1.2 Subsistema de banda base

Este subsistema se encarga del encaminamiento de las señales del enlace ascendente y descendente de FI. En concreto, sus tareas son las siguientes:

- Recepción de telecomandos (TC), extracción de la telemetría de mantenimiento del satélite (TM) y mediciones de *Ranging* y *Doppler*.

4.2.1.3 Subsistema de transmisión de RF

En el caso de este subsistema, este proporciona el acondicionamiento necesario en términos de frecuencia y potencia para realizar el enlace a los satélites. Su tarea consiste en enviar señales y está compuesto por:

- Equipo de conversión ascendente de banda S, para la frecuencia de conversión de 70MHz a RF.
- Amplificador de alta potencia en banda S.

- Recorridos de guía de ondas y cable coaxial, monitorización y conmutación local y prueba/puntos de monitorización.

4.2.1.4 **Subsistema de recepción de RF**

Por otro lado, este subsistema proporciona el acondicionamiento necesario en términos de frecuencia y nivel para recibir las señales del satélite. Este está compuesto por:

- Amplificador de bajo ruido.
- Equipo de conversión descendente de banda S para la frecuencia de conversión de RF a 70MHz.
- Recorridos de cables y puntos de conmutación y prueba/monitorización.

4.2.1.5 **Subsistema de frecuencia y tiempo**

Este es otro subsistema, el cual proporciona una frecuencia estable común y referencias horarias precisas a los diferentes equipos de la estación. El subsistema está compuesto por:

- Equipos de referencia de tiempo con una antena y receptor GNSS para proporcionar las referencias locales de tiempo y frecuencia de la estación. Dicha frecuencia será de 10MHz, procedente de un oscilador, para que los equipos trabajen sincronizados con la misma referencia de frecuencia.
- Unidad de distribución de tiempo y de distribución de frecuencias.

4.2.1.6 **Estación meteorológica**

Dicho subsistema recoge y controla las condiciones meteorológicas para apoyar la determinación del alcance del satélite. También se utiliza para determinar el estado operativo de la estación debido a las condiciones de viento. Se encuentra formada por los siguientes dispositivos:

- Un anemómetro (velocidad y dirección del viento), un sensor de humedad relativa/temperatura, un sensor de presión barométrica y un Pluviómetro.

4.2.1.7 Subsistema de prueba y calibración

También, existe un subsistema de prueba y calibración para verificar el apropiado funcionamiento de la estación. Entre los equipos que lo forman se encuentran:

- Analizador de señales que cuenta con un contador de frecuencia integrado, generador de CW, medidor de potencia, sensor de potencia, fuente de ruido, multímetro.

También existe un **subsistema de supervisión y control**, este interactúa con el equipo de la estación y la infraestructura del emplazamiento. Por último, el **subsistema de comunicación** es el que proporciona la capacidad de enrutamiento y transferencia de datos internamente dentro de la estación y fuera de ella.

4.2.2 Especificaciones de la antena

La antena proporciona el punto de interfaz con los satélites para las actividades de la estación. Para este proyecto, se propone utilizar una antena constituida por un reflector de 13,5 metros montado en un pedestal de elevación sobre acimut. Dicho reflector está formado por tres hileras de 16 paneles de chapa de aluminio de precisión cada una. El reflector está equipado con un alimentador y un subreflector como parte de la geometría *Cassegrain*¹¹.

Por otro lado, el sistema de accionamiento de la antena se encuentra formado por tres motores en cada eje alojados en el yugo. La antena es capaz de recibir y transmitir en banda S señales de satélite. También, se encuentra equipada con capacidades de seguimiento automático monopulso.

A continuación, se especifican en la tabla los parámetros más relevantes de la antena:

¹¹ Para más información sobre geometría *Cassegrain*: https://personales.unican.es/perezvr/pdf/Antenas%20con%20Reflector%20Parab%C3%B3lico_V4.pdf

Configuración de los ejes de elevación y acimut.		
Óptica del reflector	<i>Cassegrain</i>	
Reflector principal	Diámetro	13,5 m
	Contorno	Parábola en forma
Subreflector	Diámetro	Aproximadamente 1800 mm
	Contorno	Hiperboloide en forma (con parte central especial)
Rangos de rotación	Eje AZ	De -360 a 360 grados (referente al Norte)
	Eje EL	De -1 a 181 grados de funcionamiento
Temperatura	-20 a 65 °C	
Interior del equipo (funcionamiento normal): Temperatura y humedad	20°C a 24°C, gradiente de 2°C/h; 20% a 90%, gradiente de 6%/h.	
Interior del equipo (en caso de fallo de CA): Temperatura y humedad	0°C a 44°C, gradiente de 10°C/h (fallo de CA) 20% a 90% (sin condensación), pendiente del 10%/h	
Condiciones de funcionamiento del viento	≤ 150 km/h incl. Ráfagas	
Conducción hasta la posición stow	> 150 km/h	
Altitud	1000 m	
Humedad	≤100%	

Tabla 4-1 Especificaciones de la antena

En cuanto a condiciones ambientales en posición de supervivencia, los rangos de parámetros serían los siguientes:

Temperatura	-30°C a 65 °C
Viento	≤ 200 km/h (antena en posición vertical)
Sísmico	0,3g aceleración horizontal; 0,1 g aceleración vertical

Tabla 4-2 Especificaciones máximas en parada

En lo que respecta al subsistema de RF de la antena, esta estará compuesta por los sistemas y subsistemas que se tratan a continuación.

4.2.2.1 Sistema de alimentación

El sistema de alimentación recibe señales en banda S polarizada en RHCP y LHCP en la banda de 2.200 a 2.300 GHz y transmite una señal RCHP O LCHP (no simultáneamente) en la banda de 2.025 a 2.120 GHz.

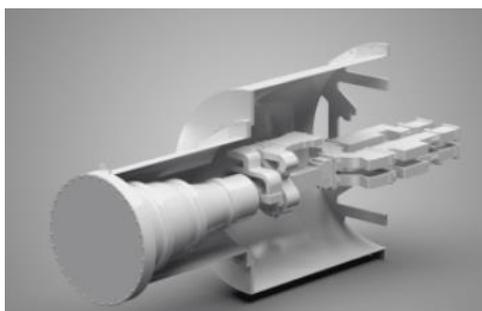


Ilustración 4-4 Sistema de alimentación antena

Algunos de los parámetros más relevantes de este sistema, se describen en la siguiente tabla:

Parámetro	Especificación
Bandas de frecuencia:	
➤ Transmisión:	2025-2120 MHz
➤ Recepción:	2200-2300 MHz
➤ Seguimiento:	2200-2300 MHz
Polarización:	
➤ Transmisión:	RHCP o LHCP (seleccionable)
➤ Recepción:	RHCP y LHCP (simultáneamente)
➤ Seguimiento:	RHCP o LHCP (seleccionable)
Ganancia en la interfaz del diplexor de alimentación:	
➤ Transmisión:	2025 MHz: 47.3 dBi min. 2120 MHz: 47.7 dBi min. Pérdida inserción: 0,6 dB
➤ Recepción:	2200 MHz: 47.9 dBi min. 2300 MHz: 48.3 dBi min. Pérdida inserción: 11,5 dB.
Lóbulos laterales (recepción y transmisión)	For $0^\circ \leq \varphi < 48^\circ$: $G=32-25\log \varphi$ dBi For $48^\circ \leq \varphi < 180^\circ$: $G= -10$ dBi

Tabla 4-3 Especificaciones sistema alimentación antena

4.2.2.2 Subsistema de transmisión RF

Este subsistema proporciona el acondicionamiento necesario en términos de de frecuencia y nivel para recibir las señales procedentes del satélite. Además, permite recibir simultáneamente dos polarizaciones.

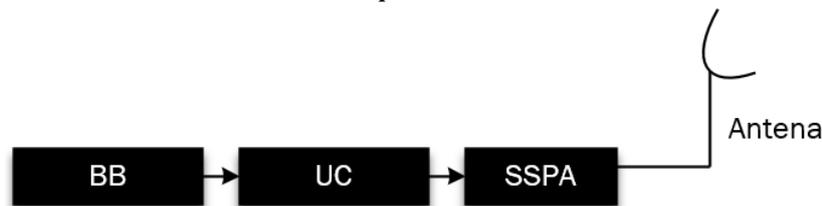


Ilustración 4-5 Subsistema de transmisión RF

Este subsistema conduce la señal generada por una banda base al satélite. Existe la posibilidad de reconducirla a una carga ficticia para fines de prueba. Luego, la señal es conducida a un equipo de conversión ascendente en banda S para la conversión de la señal a RF, a la frecuencia de 2048 MHz. A continuación, esta pasa por la transmisión del SSPA, se conecta a la ruta de la antena o a una carga de RF. A su vez, está compuesta por el recorrido de los cables coaxiales, puntos de conmutación, prueba y monitorización.

4.2.2.3 Subsistema de Recepción RF

Al igual que el subsistema anterior, este proporciona el acondicionamiento necesario en términos de frecuencia y nivel, pero en este caso, para recibir las señales del satélite.

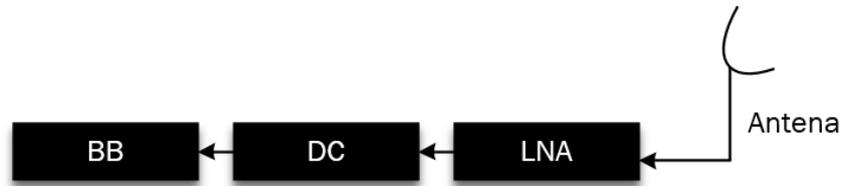


Ilustración 4-6 Subsistema de transmisión RF

El subsistema recibe la señal procedente de la antena y la conduce a un amplificador de bajo ruido. Luego, la señal es conducida al equipo de conversión descendente en banda S para la conversión de RF a los 70MHz de frecuencia de conversión. Después, la señal es conducida a una unidad de interfaz de FI que permite con el uso de divisores que las señales RHCP y LHCP sean recibidas en la banda base. Además, permite recibir simultáneamente dos polarizaciones. A su vez, está compuesta por el recorrido de los cables, puntos de conmutación, prueba y monitorización.

4.2.2.4 Subsistema de la cadena de calibración

Las funciones de este subsistema es el de verificar el buen funcionamiento del sistema en la estación. Los equipos que la componen son los siguientes:

- Traductor de bucle de prueba, generador de CW, medidor de potencia, sensores de potencia y calibración de alcance, con el que se mide el tiempo de tránsito de la estación.

4.2.3 Equipos de las cadenas transmisión

4.2.3.1 Banda base

Se trata de un equipo de banda de frecuencia que envía y recibe la señal mensaje, puede tratar señales analógicas o digitales. Este equipo está compuesto por interfaces de FI. Un FI se refiere a la frecuencia intermedia, que consiste en la diferencia entre la señal sintonizada en antena y la frecuencia generada por un oscilador local. Dicha frecuencia funciona a una frecuencia igual a la del canal que se desea. Para el caso de transmisión, pasará de FI a RF, y en la recepción RF a FI. Se determina usar una salida y una entrada de FI de 70MHz. Se han incorporado dos amplificadores LNA de FI de nivel fijo de 30dB dentro de la carcasa de la banda base para acondicionar la señal de entrada de FI.

Entre sus funcionalidades de este equipo destacan:

- Telecomandos (TC) de generación para el enlace ascendente de FI de 70 MHz. Con el que se puede realizar mediciones de calibración.
- Telemetría (TM) de adquisición para el enlace descendente de 70 MHz de FI. Con el que se puede realizar mediciones de alcance.
- Doppler, se calculan a través de la variación de la frecuencia entre el satélite y la estación, pues el satélite está en constante movimiento. Para ello se calcula el *offset* de la señal, es decir, la diferencia entre la señal de subida (70 MHz) y la de bajada. En el contacto siguiente, la BB lo aplicará para que la señal se acerque lo mejor posible a los 70MHz.
- *Ranging*.
- Modos de operación: PM y DSSS.

Por un lado, cuenta con modulador y demodulador PM:

- El *ranging* en el enlace ascendente funciona copiando la señal de alcance en el descendente. La señal de telemetría del enlace ascendente coincide con la del enlace descendente.

Por otro, cuenta con un modulador y demodulador de DSS:

- El *ranging* emplea códigos de dispersión normales, solamente puede ser usado en modo coherente y los enlaces ascendente y descendente no son simétricos.

4.2.3.2 Convertidor ascendente

La unidad es un convertidor de oscilador local doble. Se encarga de proporcionar la conversión de frecuencia de IF (70 MHz) a la frecuencia de RF (banda S).



Ilustración 4-7 Convertidor ascendente

Sus principales funciones son:

- Convertir las señales de TC y *ranging* de medida o de calibración alrededor de la frecuencia de entrada de 70 MHz a la banda S.

- También proporciona la potencia suficiente a la entrada las unidades SSPA.
- Los convertidores tienen la posibilidad de sincronizarse con la referencia de frecuencia externa de 10 MHz.

4.2.3.3 Amplificador de alta potencia

La unidad SSPA realiza la amplificación de potencia en la cadena de transmisión para cumplir con la PIRE determinada. El equipo se basa en el uso de la tecnología de amplificador de potencia de estado sólido que proporciona una mayor disponibilidad en comparación con el uso de TWTA.



Ilustración 4-8 Amplificador de alta potencia

Las funciones principales de la SSPA son las siguientes:

- Amplificación de la señal entrante de telecomando y de alcance/calibración de la señal.
- Proporcionar una potencia de salida estable.
- Limitar la emisión de señales espurias y fuera de banda.
- Permitir actividades de prueba y calibración.

Los componentes del SSPA son las siguientes:

- **Módulo conductor:** Proporciona una amplificación de 50 dB para alimentar la señal de RF en el módulo de potencia. Compuesto por una atenuadora variable para ajustar la ganancia y una etapa de preamplificación con el que completa el módulo conductor. Este preamplificador está compensado en temperatura para garantizar la ganancia y la estabilidad en temperatura.
- **El módulo de potencia:** contiene cuatro submódulos, que se combinan para proporcionar 56 dBm (P1dB) de potencia nominal.
- La placa de monitorización y control supervisa todos los parámetros clave de funcionamiento.

- El panel frontal proporciona la monitorización y el control local del SSPA, la entrada de RF y el monitor de salida de RF para poder medir cómodamente la potencia de la señal de RF.
- Sistema de refrigeración por aire forzado.

4.2.4 Equipos de la cadena de recepción

A continuación, se describen los equipos empleados para dicho enlace:

4.2.4.1 Amplificador de bajo ruido

La unidad de LNA se encarga de tomar la señal recibida por la antena. Su función es la de amplificar la señal débil recibida a un nivel útil en la estación para poder ser tratada.

4.2.4.2 Convertidor descendente

La unidad es un ágil convertidor descendente de frecuencia de doble etapa. Se encarga de proporcionar la conversión de frecuencia de RF (banda S) a la frecuencia de FI (70 MHz). Las polarizaciones del enlace descendente se reciben y convierten simultáneamente.

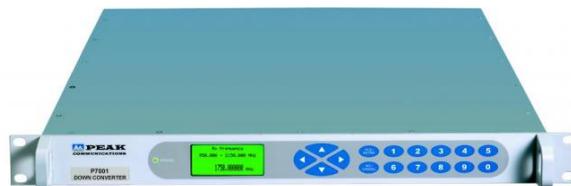


Ilustración 4-9 Convertidor descendente

Sus principales funciones son:

- Rechazo de frecuencia de imagen.
- Se utiliza para convertir las señales de TM, *ranging* de medida o de calibración de la señal recibida en banda S hasta la banda de 70 MHz.
- Filtrado del producto de mezcla, amplificación de la señal y selección del ancho de banda de entrada.

La unidad tiene la capacidad de sincronizarse con una referencia de frecuencia externa de 10 MHz.

4.2.4.3 Banda base

El equipo ya ha sido descrito en el punto 4.2.3.1.

4.3 Caracterización de las cadenas de transmisión y recepción

En este apartado se van a especificar, tanto para la cadena de transmisión como para la de recepción, las pruebas que se van a realizar en ellas. Con el fin de asegurar el correcto funcionamiento de dichas cadenas dentro de la estación. A continuación, se muestra una imagen de las cadenas de la estación, mostrando los equipos y puntos de medidas que serán utilizados en las pruebas.

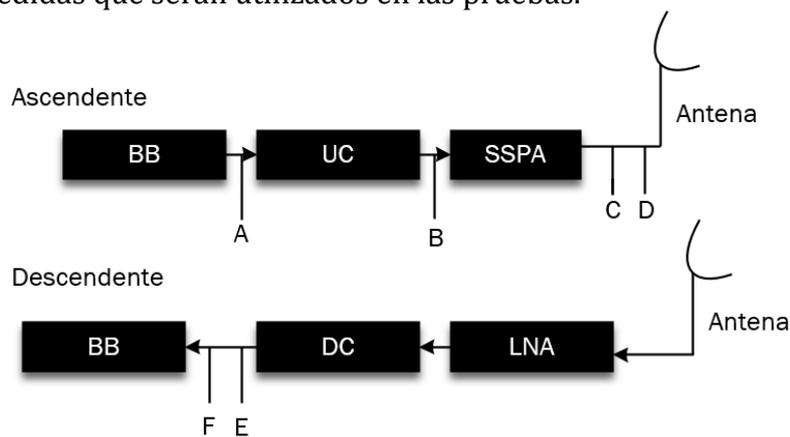


Ilustración 4-10 Cadenas de la estación

4.3.1 Prueba de verificación de interconexión de las cadenas de transmisión y recepción

4.3.1.1 Nivel de la estación y diagrama de frecuencia en la cadena de transmisión

4.3.1.1.1 Objetivo

En esta prueba se pretende establecer la configuración de los equipos en términos de frecuencia, ganancia y atenuación de la cadena de transmisión y de recepción. Posteriormente, se comprobará que los niveles de potencia, atenuación, ajustes de ganancia y conversiones de frecuencia sean correctos para la transmisión y la recepción. Por último, se verificará que los niveles de potencia y frecuencias actuando sobre la atenuación de los equipos para generar una configuración con la que se cumpla con la PIRE esperada (≥ 70 dBW).

4.3.1.1.2 Equipos empleados

El equipo empleado y materiales que serán usados para realizar la prueba serán los propios de cada canal (ascendente y descendente), un generador de señal, un analizador de señal, un medidor de potencia, un sensor de potencia, cables coaxiales y transiciones.

4.3.1.1.3 Realización de la prueba y resultados

Para el canal ascendente, se transmite una onda a través de la banda base y para el canal descendente mediante un generador de señales. En ambos casos, dicha señal será de tipo continua (CW), a la frecuencia determinada para cada canal, con un nivel de potencia de salida adecuado para dichos canales. La potencia de salida será medida usando un medidor de potencia y/o un analizador de espectro en diferentes puntos de las cadenas. La frecuencia de salida se medirá mediante un contador de frecuencia que viene incorporado en el Analizador de Espectros, en esos mismos puntos.

En primer lugar, se realiza la configuración y conexión de los equipos para el canal de transmisión (ascendente), basándose en la imagen que aparece a continuación.

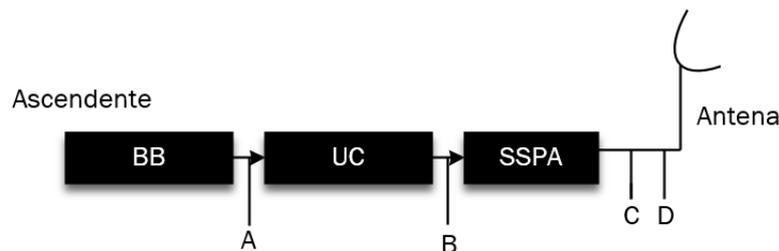


Ilustración 4-11 Canal ascendente

Al inicio de la prueba, se debe asegurar que todo el equipo esté completamente montado según la configuración requerida para la prueba y que esté encendido durante al menos 30 minutos. La configuración inicial de los equipos serán los siguientes:

Equipo	Configuración
UC	- Ganancia = 20 dB - Frecuencia= 2048.877187 MHz
SSPA	- Atenuación=3 dB
SA	- Frecuencia: 70 MHz (punto A) o 2048.877187 MHz (punto B y D) - SPAN: 10 KHz, RBW: 100 Hz y VBW: 20 Hz

Tabla 4-4 Configuración de equipos

Una vez configurados los anteriores equipos, se procede a realizar la calibración del medidor de potencia para la frecuencia correspondiente al punto a medir, que será el correspondiente al punto A. Para ello se conecta el sensor de

potencia a uno de los canales del medidor de potencia, y a su vez se conecta a su puerto de referencia externa. Una vez, se ha realizado la apropiada conexión, se procede a realizar el *zero* y *cal* para calibrar. Cuando el equipo muestra que, se ha realizado la correcta calibración a una frecuencia de 50 MHz (valor de frecuencia de referencia por defecto) se procede a inyectar potencia para corroborar que sale 0 dB, queriendo decir que está el equipo correctamente calibrado. El siguiente paso será el de cambiar la frecuencia por los 70MHz correspondientes al punto A. Luego, se deberá de modificar de nuevo este valor para poder realizar la medición en los otros puntos que se deben medir para esta prueba.

Llegado a este punto, es el momento de generar la señal portadora con la que se realizará la prueba. Para ello, se configura la banda base para que genere una onda continua (CW), a un nivel de potencia de -18 dBm y a una frecuencia de 70 MHz. Posteriormente, se activa el UC y el SSPA para que transmitan.

Antes de continuar, será necesario verificar, usando el SA, que no hay señal por encima de los 10 dB de ruido del sistema en el punto A, chequeando de esta manera que el espectro esté limpio.

Hay que tener en cuenta, que valores obtenidos en los puntos de las pruebas corresponden a la salida de los acopladores que existen en la estación para extraer una parte de la señal y así poder realizar las mediciones. También, hay que tener en cuenta la pérdida de los cables. En cuanto a los acopladores, sus valores de acoplamiento son los siguientes:

Acoplador	Factor de acoplador (dB)
A	10
B	20
C	48,84
D	20
E	10
F	10

Tabla 4-5 Valores de acoplador

Comprobado lo anterior, se procede a conectar el sensor de potencia en los puntos de salida y entrada de los equipos (BB, UC y SSPA) para obtener los valores de ganancia de estos, que aparecen en la siguiente tabla:

BB-UC-SSPA	dB
BB (OUT)	-18,04
UC (IN)	-26,41
UC (OUT)	-5,8
SSPA (IN)	-17,84
SSPA (OUT)	53,50
Salida acoplador punto C (Guía onda)	-0,21
Ganancia UC	20,61
Ganancia SSPA	71,34

Tabla 4-6 Valores de potencia

Ahora se procede a conectar el SA en los puntos A, B y D, activando a su vez el contador de frecuencia para medir la real en dicho punto. Será necesario ir cambiando la frecuencia en el SA para poder detectar la señal:

Puntos a testear	Frecuencia y valor esperado	Resultado:
Punto A	+/-2 dB 70.000000 MHz +/- 1 Hz	-31,75 dBm 69999999.997 Hz
Punto B	+/-2 dB 2048.877188 MHz +/- 1 Hz	-34,14 dBm 2048877187.173 Hz
Punto D	+/-2 dB 2048.877188 MH +/- 1 Hz	-25,98 dBm 2048877187.046 Hz

Tabla 4-7 Valores de los puntos a testear

A continuación, se adjuntan las capturas tomadas del SA en los correspondientes puntos:

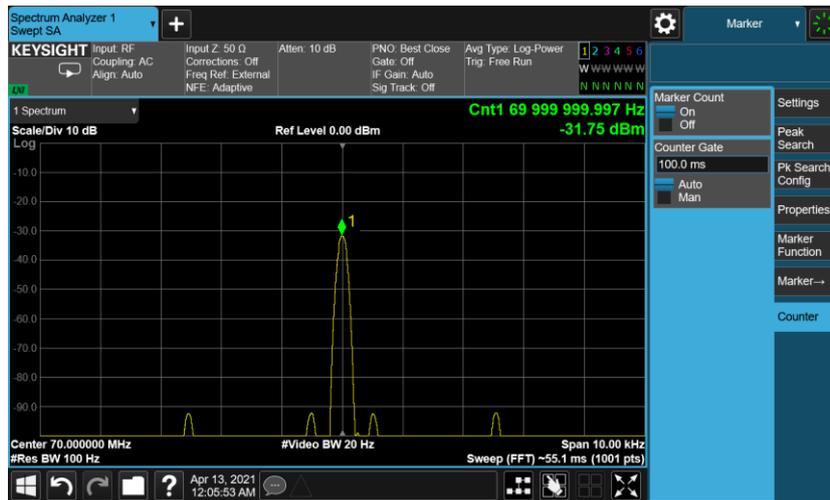


Ilustración 4-12 Punto A

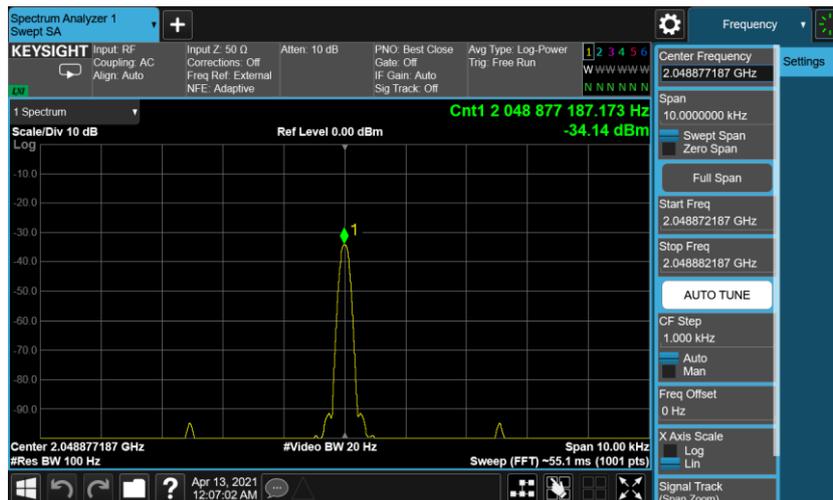


Ilustración 4-13 Punto B

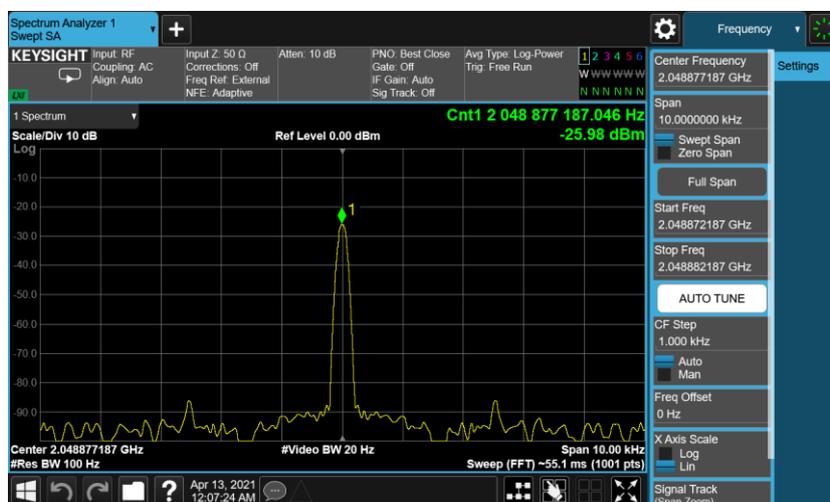


Ilustración 4-14 Punto D

Una vez finalizado las mediciones con el canal ascendente, se procede a realizar la prueba para el canal descendente. Para ello, se debe realizar la correcta conexión y configuración los equipos de la siguiente manera:

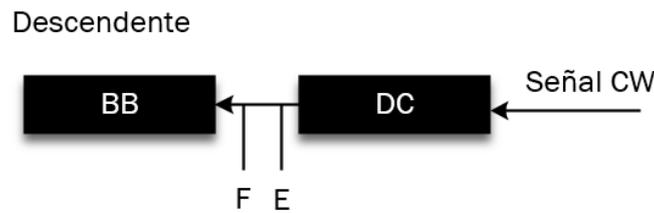


Ilustración 4-15 Canal descendente

Equipo	Configuración
SA	- Frecuencia: 70 MHz (punto A) o 2048.877187 MHz (punto B y C). - SPAN: 10 KHz, RBW: 100 Hz y VBW: 20 Hz.
DC	- Ganancia=45 dB, Frecuencia= 2225.025 MHz

Tabla 4-8 Configuración de los equipos

El siguiente paso consistirá en configurar el generador de señales con los siguientes parámetros y conectarlo al punto de inyección para conducir la señal al U/C. Se genera una señal CW, con un nivel de potencia de -60 dBm (para el cálculo de la potencia) o -45 dBm (para el cálculo de la frecuencia real) y frecuencia de 2225,025 MHz.

Siguiendo con la prueba, se procede a medir la potencia en las entradas y salidas de los siguientes equipos:

DC-BB	dB
DC (IN)	-61,45
DC (OUT)	-17,23
BB (IN)	-42,78
Ganancia DC	45,77

Tabla 4-9 Valores de potencia

Ahora se procede a conectar el medidor de potencia y el SA en los puntos E y F para obtener los valores reales de potencia y frecuencia:

Puntos a testear	Frecuencia y valor esperado	Resultado:
Punto E	+/-2 dB 70.000000 MHz +/- 1 MHz	-43,47 dBm 69999974,449
Punto F	+/-2 dB 70.000000 MHz +/- 1 MHz	-42,98 69999998,299

Tabla 4-10 Valores en los puntos a testear

4.3.2 Pruebas de la cadena de transmisión

En este apartado, se llevarán a cabo las respectivas pruebas relacionadas con la cadena de transmisión en la estación.

4.3.2.1 Potencia de salida y rango

4.3.2.1.1 Objetivo

Con esta prueba, se pretende obtener la potencia máxima del SSPA y su alcance. Esto se realizará enviando una señal CW a través de una fuente de señal, la banda base. El medidor de potencia se conecta a la salida del subsistema SSPA (punto C).

Los valores que se obtienen se utilizan para calcular la PIRE final. El atenuador dentro del U/C y el amplificador se escalonarán para determinar el rango de ajuste del PIRE. Además, se generará una curva AM/AM.

4.3.2.1.2 Equipos empleados

Los equipos y accesorios necesarios para realizar la prueba son un generador de señal, un medidor de potencia, un sensor de potencia, cables coaxiales y transiciones.

4.3.2.1.3 Realización de la prueba y resultados

En primer lugar, se realiza la configuración y conexión de los equipos basándose en la Ilustración 4-11. Al inicio de la prueba se debe asegurar que todo el equipo esté completamente conexasión según la configuración requerida para la prueba y que esté encendido durante al menos 30 minutos. La configuración inicial de ciertos equipos serán los siguientes:

Equipo	Configuración
UC	- Ganancia = 20 dB - Frecuencia= 2048.877187 MHz
SSPA	- Atenuación=0 dB,
SA	- Frecuencia: 2048.877187 MHz (punto C). - SPAN: 10 KHz, RBW: 100 Hz y VBW: 20 Hz.

Tabla 4-11 Parámetros de configuración de los equipos

Una vez configurados los anteriores equipos, se procede a realizar la calibración del medidor de potencia para la frecuencia correspondiente al punto a medir, que será el correspondiente al punto C. Para ello, se conecta el sensor de potencia a uno de los canales del medidor de potencia, y a su vez se conecta a su puerto de referencia externa. Una vez, se ha realizado la apropiada conexión, se procede a realizar el *zero* y *cal* para realizar la calibración. Cuando el equipo muestra que se ha realizado la correcta calibración a una frecuencia de 50 MHz (valor de frecuencia de referencia por defecto) se procede a inyectar potencia para corroborar que sale 0 dB, queriendo decir que está el equipo correctamente calibrado. El siguiente paso será cambiar la frecuencia por los 2048.877187 MHz correspondientes al punto C.

Llegado a este punto, se procede a generar la señal portadora con la que se realizará la prueba. Para ello, se configura la banda base para que genere una onda continua (CW), a un nivel de potencia de -18 dBm y a una frecuencia de 70 MHz. Posteriormente, se activa el UC y el SSPA, previamente configurados, para que transmitan.

Antes de continuar, se debe verificar, usando el SA, que no hay señal por encima de los 10 dB de ruido del sistema en el punto C, chequeando de esta manera que el espectro esté limpio.

Comprobado lo anterior, se procede a conectar el sensor de potencia en el punto de salida C, que corresponde con la salida acoplada. Para dicho punto, el fabricante de la guía de onda determina que a la frecuencia que se trabaja en esta prueba, se obtiene un valor de 48,84 dB.

Frecuencia GHz)	Acoplamiento (dB)
2.025	48.84
2.075	48.83
2.120	48.83

Tabla 4-12 Valores de acoplamiento de la guía de onda

A continuación, se procede a disminuir la atenuación del SSPA, desde 0 dB a 30 dB, en pasos de 0,5 dB. Se va apuntando los valores del medidor de potencia y el valor de ganancia que da por pantalla el SSPA.

Luego, una vez alcanzados los 30 dB de atenuación del SSPA, se procede a disminuir la ganancia de los UC, desde los 20 a los 0 dB, apuntando los mismos valores que en el caso anterior.

Al finalizar las mediciones, se procede a calcular la PIRE (dBW), donde:

$$PIRE = PM + C - F - 30 + Ag$$

- **PM:** Lectura del medidor de potencia (dBm)
- **C:** Factor de acoplamiento (dB), el valor es 48.84 dB (dado por el fabricante en base a la frecuencia usada).
- **F:** Pérdidas medidas en la guía de ondas (dB), el valor es 1.0 dB (desde la salida del SSPA a la entrada del diplexor, valor dado por el fabricante de la guía de onda como peor caso)
- **Ag:** Ganancia medida de la antena de transmisión, el valor es 47.40 dB (valor proporcionado por el fabricante de la antena).

Se espera que el valor máximo de la PIRE sea ≥ 70 dBW para la frecuencia 2048.877188 MHz.

A continuación, se muestra la tabla realizando el cálculo de la PIRE empleando los valores obtenidos del sensor de potencia y la potencia de salida del SSPA.

Ganancia de la antena (dB)		47,40		Factor acoplado (dB)		48,84	
Pérdidas de transmisión (dB)		1,00		Variación del escalón máximo (dB)		0,20	
Pas o	Canal (Hz)	Atenuación SSPA (dB)	Ganancia U/C (dB)	Sensor de potencia (dBm)	Potencia salida SSPA (dBm)	EIRP (dBW)	Escalón (dB)
0	2.048.877.187	0,00	20,00	6,92	55,70	72,16	-
1	2.048.877.187	0,50	20,00	6,40	55,20	71,64	0,52
2	2.048.877.187	1,00	20,00	5,85	54,60	71,09	0,55
3	2.048.877.187	1,50	20,00	5,29	54,10	70,53	0,56
4	2.048.877.187	2,00	20,00	4,80	53,60	70,04	0,49
5	2.048.877.187	2,50	20,00	4,29	53,00	69,53	0,51
6	2.048.877.187	3,00	20,00	3,79	52,60	69,03	0,50

7	2.048.877.18 7	3,50	20,00	3,23	52,10	68,47	0,56
8	2.048.877.18 7	4,00	20,00	2,74	51,60	67,98	0,49
9	2.048.877.18 7	4,50	20,00	2,15	51,00	67,39	0,59
10	2.048.877.18 7	5,00	20,00	1,58	50,50	66,82	0,57
11	2.048.877.18 7	5,50	20,00	1,08	50,00	66,32	0,50
12	2.048.877.18 7	6,00	20,00	0,58	49,50	65,82	0,50
13	2.048.877.18 7	6,50	20,00	0,05	49,00	65,29	0,53
14	2.048.877.18 7	7,00	20,00	-0,49	48,40	64,75	0,54
15	2.048.877.18 7	7,50	20,00	-0,97	47,90	64,27	0,48
16	2.048.877.18 7	8,00	20,00	-1,50	47,40	63,74	0,53
17	2.048.877.18 7	8,50	20,00	-2,03	46,90	63,21	0,53
18	2.048.877.18 7	9,00	20,00	-2,65	46,30	62,59	0,62
19	2.048.877.18 7	9,50	20,00	-3,01	45,90	62,23	0,36
20	2.048.877.18 7	10,00	20,00	-3,52	45,40	61,72	0,51
21	2.048.877.18 7	10,50	20,00	-4,03	44,90	61,21	0,51
22	2.048.877.18 7	11,00	20,00	-4,60	44,40	60,64	0,57
23	2.048.877.18 7	11,50	20,00	-5,08	44,00	60,16	0,48
24	2.048.877.18 7	12,00	20,00	-5,59	43,50	59,65	0,51
25	2.048.877.18 7	12,50	20,00	-6,12	42,90	59,12	0,53
26	2.048.877.18 7	13,00	20,00	-6,71	42,40	58,53	0,59
27	2.048.877.18 7	13,50	20,00	-7,20	41,90	58,04	0,49
28	2.048.877.18 7	14,00	20,00	-7,68	41,50	57,56	0,48
29	2.048.877.18 7	14,50	20,00	-8,20	41,00	57,04	0,52
30	2.048.877.18 7	15,00	20,00	-8,69	40,40	56,55	0,49
31	2.048.877.18 7	15,50	20,00	-9,19	40,00	56,05	0,50

32	2.048.877.18 7	16,00	20,00	-9,72	39,40	55,52	0,53
33	2.048.877.18 7	16,50	20,00	-10,18	39,00	55,06	0,46
34	2.048.877.18 7	17,00	20,00	-10,68	38,50	54,56	0,50
35	2.048.877.18 7	17,50	20,00	-11,15	38,00	54,09	0,47
36	2.048.877.18 7	18,00	20,00	-11,74	37,60	53,50	0,59
37	2.048.877.18 7	18,50	20,00	-12,18	37,20	53,06	0,44
38	2.048.877.18 7	19,00	20,00	-12,67	36,60	52,57	0,49
39	2.048.877.18 7	19,50	20,00	-13,17	36,00	52,07	0,50
40	2.048.877.18 7	20,00	20,00	-13,64	35,60	51,60	0,47
41	2.048.877.18 7	20,50	20,00	-14,14	35,50	51,10	0,50
42	2.048.877.18 7	21,00	20,00	-14,65	35,00	50,59	0,51
43	2.048.877.18 7	21,50	20,00	-15,16	< 35,00	50,08	0,51
44	2.048.877.18 7	22,00	20,00	-15,61	< 35,00	49,63	0,45
45	2.048.877.18 7	22,50	20,00	-16,09	< 35,00	49,15	0,48
46	2.048.877.18 7	23,00	20,00	-16,65	< 35,00	48,59	0,56
47	2.048.877.18 7	23,50	20,00	-17,17	< 35,00	48,07	0,52
48	2.048.877.18 7	24,00	20,00	-17,71	< 35,00	47,53	0,54
49	2.048.877.18 7	24,50	20,00	-18,20	< 35,00	47,04	0,49
50	2.048.877.18 7	25,00	20,00	-18,70	< 35,00	46,54	0,50
51	2.048.877.18 7	25,50	20,00	-19,21	< 35,00	46,03	0,51
52	2.048.877.18 7	26,00	20,00	-19,68	< 35,00	45,56	0,47
53	2.048.877.18 7	26,50	20,00	-20,18	< 35,00	45,06	0,50
54	2.048.877.18 7	27,00	20,00	-20,70	< 35,00	44,54	0,52
55	2.048.877.18 7	27,50	20,00	-21,22	< 35,00	44,02	0,52
56	2.048.877.18 7	28,00	20,00	-21,72	< 35,00	43,52	0,50

57	2.048.877.18 7	28,50	20,00	-22,26	< 35,00	42,98	0,54
58	2.048.877.18 7	29,00	20,00	-22,72	< 35,00	42,52	0,46
59	2.048.877.18 7	29,50	20,00	-23,26	< 35,00	41,98	0,54
60	2.048.877.18 7	30,00	20,00	-23,70	< 35,00	41,54	0,44
61	2.048.877.18 7	30,00	19,50	-24,21	< 35,00	41,03	0,51
62	2.048.877.18 7	30,00	19,00	-24,66	< 35,00	40,58	0,45
63	2.048.877.18 7	30,00	18,50	-25,23	< 35,00	40,01	0,57
64	2.048.877.18 7	30,00	18,00	-25,73	< 35,00	39,51	0,50
65	2.048.877.18 7	30,00	17,50	-26,20	< 35,00	39,04	0,47
66	2.048.877.18 7	30,00	17,00	-26,70	< 35,00	38,54	0,50
67	2.048.877.18 7	30,00	16,50	-27,21	< 35,00	38,03	0,51
68	2.048.877.18 7	30,00	16,00	-27,73	< 35,00	37,51	0,52
69	2.048.877.18	30,00	15,50	-28,25	< 35,00	36,99	0,52
70	2.048.877.18 7	30,00	15,00	-28,76	< 35,00	36,48	0,51
71	2.048.877.18 7	30,00	14,50	-29,27	< 35,00	35,97	0,51
72	2.048.877.18 7	30,00	14,00	-29,78	< 35,00	35,46	0,51
73	2.048.877.18 7	30,00	13,50	-30,24	< 35,00	35,00	0,46
74	2.048.877.18 7	30,00	13,00	-30,79	< 35,00	34,45	0,55
75	2.048.877.18 7	30,00	12,50	-31,30	< 35,00	33,94	0,51
76	2.048.877.18 7	30,00	12,00	-31,86	< 35,00	33,38	0,56
77	2.048.877.18 7	30,00	11,50	-32,32	< 35,00	32,92	0,46
78	2.048.877.18 7	30,00	11,00	-32,82	< 35,00	32,42	0,50
79	2.048.877.18 7	30,00	10,50	-33,33	< 35,00	31,91	0,51
80	2.048.877.18 7	30,00	10,00	-33,85	< 35,00	31,39	0,52
81	2.048.877.18 7	30,00	9,50	-34,36	< 35,00	30,88	0,51
82	2.048.877.18 7	30,00	9,00	-34,92	< 35,00	30,32	0,56

83	2.048.877.18 7	30,00	8,50	-35,44	< 35,00	29,80	0,52
84	2.048.877.18 7	30,00	8,00	-35,90	< 35,00	29,34	0,46
85	2.048.877.18 7	30,00	7,50	-36,42	< 35,00	28,82	0,52
86	2.048.877.18 7	30,00	7,00	-36,92	< 35,00	28,32	0,50
87	2.048.877.18 7	30,00	6,50	-37,38	< 35,00	27,86	0,46
88	2.048.877.18 7	30,00	6,00	-37,94	< 35,00	27,30	0,56
89	2.048.877.18 7	30,00	5,50	-38,34	< 35,00	26,90	0,40
90	2.048.877.18 7	30,00	5,00	-38,84	< 35,00	26,40	0,50
91	2.048.877.18 7	30,00	4,50	-39,35	< 35,00	25,89	0,51
92	2.048.877.18 7	30,00	4,00	-39,95	< 35,00	25,29	0,60
93	2.048.877.18 7	30,00	3,50	-40,45	< 35,00	24,79	0,50
94	2.048.877.18 7	30,00	3,00	-40,94	< 35,00	24,30	0,49
95	2.048.877.18 7	30,00	2,50	-41,40	< 35,00	23,84	0,46
96	2.048.877.18 7	30,00	2,00	-41,99	< 35,00	23,25	0,59
97	2.048.877.18 7	30,00	1,50	-42,53	< 35,00	22,71	0,54
98	2.048.877.18 7	30,00	1,00	-43,00	< 35,00	22,24	0,47
99	2.048.877.18 7	30,00	0,50	-43,30	< 35,00	21,94	0,30
100	2.048.877.18 7	30,00	0,00	-43,89	< 35,00	21,35	0,59

Tabla 4-13 Tabla cálculo de PIRE

En base a los resultados de la tabla, se ha realizado una curva AM/AM. El eje X corresponde con la ganancia total en transmisión en dB, la cual es calculada usando la potencia máxima del SSPA (dato en el *datasheet* del equipo), que corresponde a 75 dB, y para cada paso se va restando la atenuación del SSPA y se suma la ganancia del UC. Respecto al eje Y, se emplean los valores del campo de la PIRE de la tabla anterior.

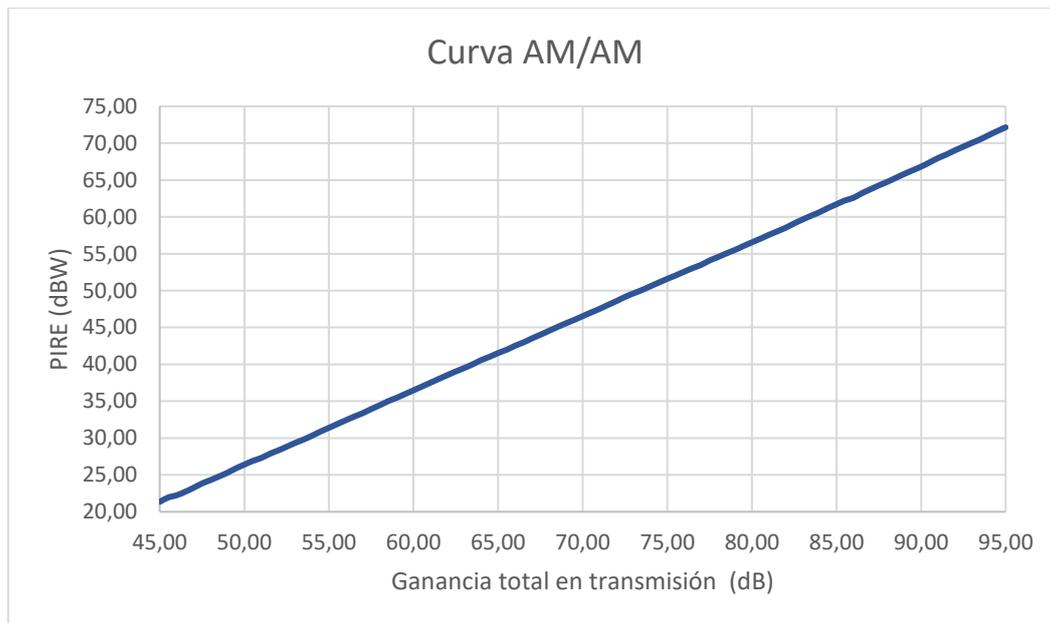


Ilustración 4-16 Gráfica PIRE

4.3.2.2 Detección de espurios

4.3.2.2.1 Objetivo

Con esta prueba, se pretende verificar el nivel de espurios de la cadena de enlace ascendente en la salida del SSPA (punto C). Para ello, se genera en la banda base una señal de onda continua y se examina el espectro a la salida del SSPA (Punto C) con un Analizador de Espectro, donde se miden los niveles y frecuencias de las espurias en banda, fuera de banda y armónicas. Se pretende encontrar espurios en banda de transmisión y fuera de la banda de TX, como a su vez los armónicos de TX.

4.3.2.2.2 Equipos empleados

Los equipos empleados para esta prueba son un generador de señal y un analizador de espectros, junto con los del propio canal ascendente. Además, se utiliza los cables coaxiales y transiciones que sean necesarios para realizar las medidas o interconexiones entre equipos.

4.3.2.2.3 Realización de la prueba y resultados

En primer lugar, se realiza la configuración y conexión de los equipos de la Ilustración 4-11. Al inicio de la prueba se debe asegurar que todo el equipo esté completamente conexionado según la configuración requerida para la prueba y que esté encendido durante al menos 30 minutos. La configuración inicial de los equipos serán los siguientes:

Equipo	Configuración
UC	- Ganancia = 20 dB - Frecuencia= 2048.877187 MHz
SSPA	- Atenuación=3 dB

Tabla 4-14 Parámetros de configuración equipos

Una vez configurados los anteriores equipos, se procede a realizar la calibración del medidor de potencia para la frecuencia correspondiente al punto a medir, que será el correspondiente al punto C. Para ello, se conecta el sensor de potencia a uno de los canales del medidor de potencia, y a su vez se conecta a su puerto de referencia externa. Una vez, se ha realizado la apropiada conexión, se procede a realizar el *zero* y *cal* para realizar la calibración. Cuando el equipo muestra que se ha realizado la correcta calibración a una frecuencia de 50 MHz (valor de frecuencia de referencia por defecto), se procede a inyectar potencia para corroborar que sale 0 dB, queriendo decir que está el equipo correctamente calibrado. El siguiente paso será cambiar la frecuencia por los 2048.877187 MHz correspondientes al punto C.

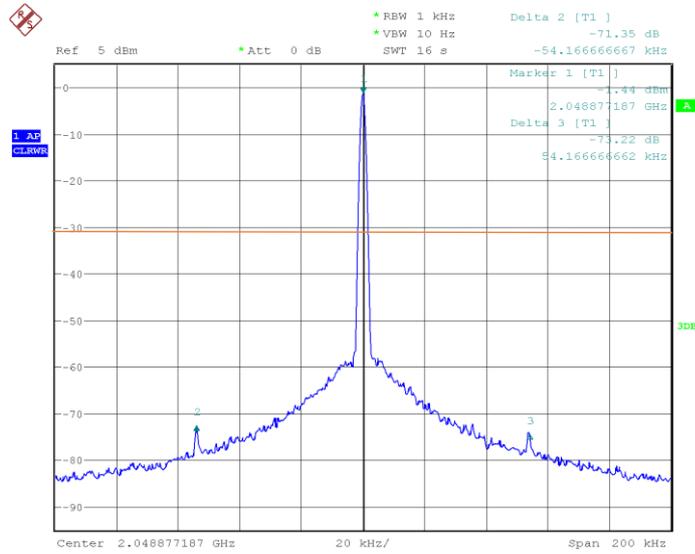
Llegado a este punto, se genera la señal portadora con la que se realizará la prueba. Para ello, se configura la banda base para que genere una onda continua (CW), a un nivel de potencia de -18 dBm y a una frecuencia de 70 MHz.

Antes de continuar, será necesario verificar, usando el SA, que no hay señal por encima de los 10 dB de ruido del sistema en el punto A, chequeando de esta manera que el espectro esté limpio.

Comprobado lo anterior, se activa el UC y el SSPA, previamente configurados, para que transmitan. Antes de iniciar la prueba, se verifica que la potencia es la correcta en el punto C.

Para esta prueba se han establecido distintos rangos de frecuencias para medir los espurios y armónicos de la estación. Por eso, se procederá a configurar el SA dependiendo del caso a realizar. A continuación, se muestra el resultado de las mediciones realizadas:

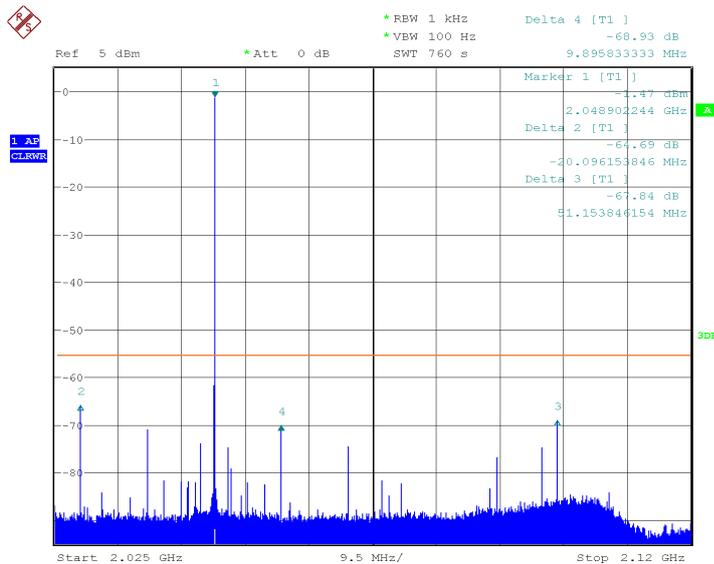
- **Frecuencia 2.04877187 GHz medida con el SA (Ref 5 dBm, Att 0 dBm, RBW 1 kHz, VBW 10 Hz, SWT 16s). Límite de -30 dBc:**



Date: 13.APR.2021 17:19:57

Ilustración 4-17 Frecuencia 2.0487187 GHz

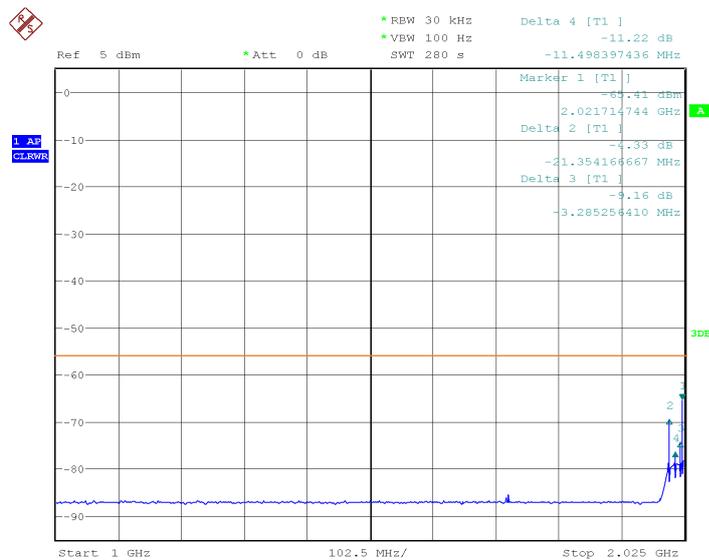
- **Frecuencia inicial: 2.025 GHz y Frecuencia de parada 2.12 GHz medida con el SA (Ref 5 dBm, Att 0 dBm, RBW 1 kHz, VBW 100 Hz, SWT 760 s). Límite de espurios es -55 dBc:**



Date: 13.APR.2021 18:18:29

Ilustración 4-18 Frecuencia 2.025 a 2.12 GHz

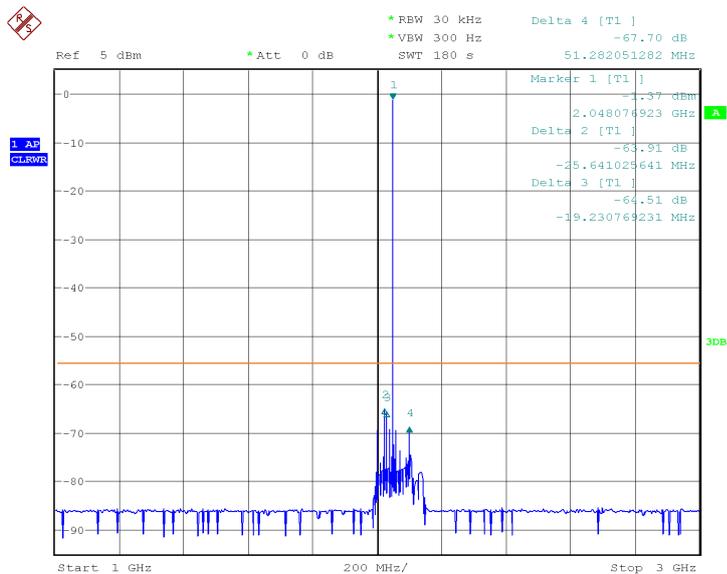
- **Frecuencia inicial: 1 GHz y Frecuencia de parada 2.025 GHz medida con el SA (Ref 5 dBm, Att 0 dBm, RBW 30 kHz, VBW 100 o 300Hz, SWT 90 s). Límite de espurios es -55 dBc:**



Date: 13.APR.2021 17:29:46

Ilustración 4-19 Frecuencia de 1 a 2.025 GHz

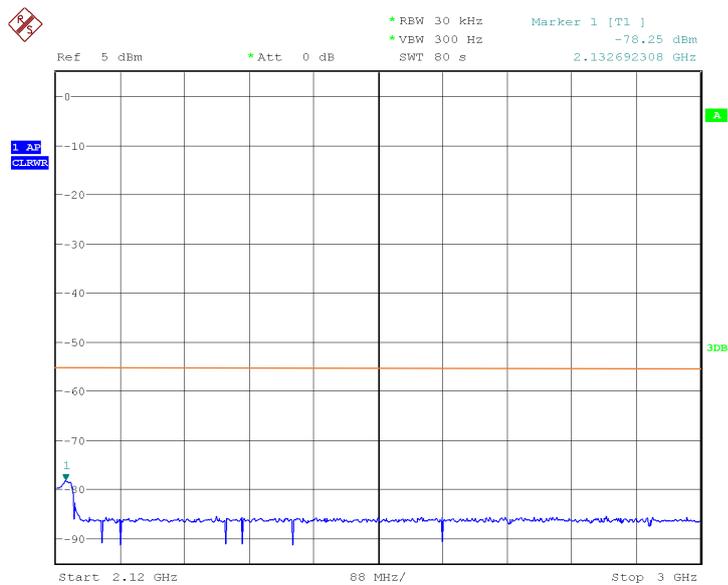
- **Frecuencia inicial: 1 GHz y Frecuencia de parada 3 GHz, medida con el SA (Ref 5 dBm, Att 0 dBm, RBW 30 kHz, VBW 300 Hz, SWT 180 s). Límite de espurios es -55 dBc:**



Date: 13.APR.2021 18:25:36

Ilustración 4-20 Frecuencia de 1 a 3 GHz

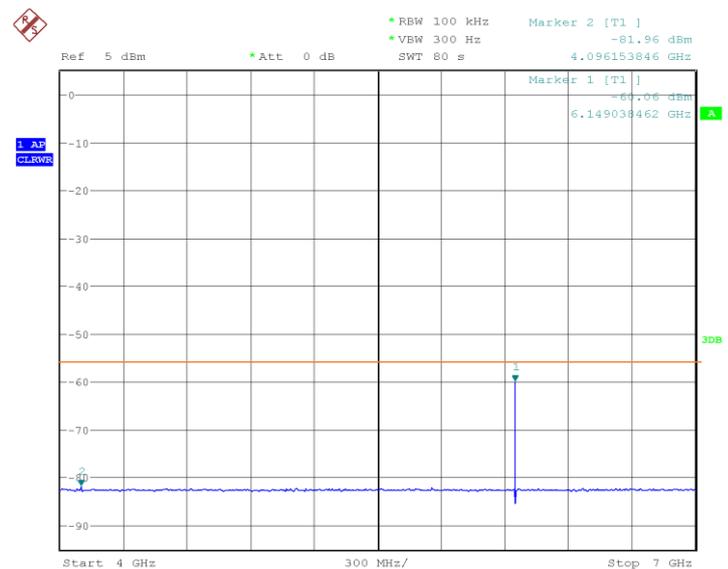
- **Frecuencia inicial: 2.12 GHz y Frecuencia de parada 3 GHz** medida con el SA (Ref 5 dBm, Att 0 dBm, RBW 30 kHz, VBW 300 Hz, SWT 80s). Límite de espurios es -55 dBc:



Date: 13.APR.2021 17:35:36

Ilustración 4-21 Frecuencia de 2.12 a 3 GHz

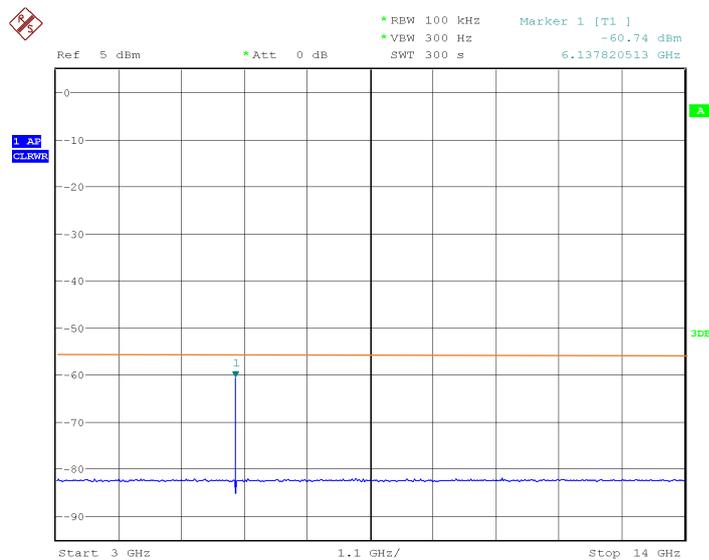
- **Frecuencia inicial: 4 GHz y Frecuencia de parada 7 GHz** medida con el SA (Ref 5 dBm, Att 0 dBm, RBW 100 kHz, VBW 300 Hz, SWT 80 s). Límite de espurios es -55 dBc:



Date: 13.APR.2021 17:46:41

Ilustración 4-22 Frecuencia de 4 a 7 GHz

- **Frecuencia inicial: 3 GHz y Frecuencia de parada 14 GHz medida con el SA (Ref 5 dBm, Att 0 dB, RBW 100 kHz, VBW 300 Hz, SWT 160 s). Límite de espurios es -55 dBc:**



Date: 13.APR.2021 17:42:34

Ilustración 4-23 Frecuencia 3 a 14 GHz

4.3.2.3 Respuesta en frecuencia

4.3.2.3.1 Objetivo

Con esta prueba, se comprueba la variación de amplitud frente a la frecuencia entre la salida de banda base y la salida del SSPA cuando se realiza un barrido de la señal en el rango de frecuencias 70 ± 3 MHz. La fuente de señal se barre desde la frecuencia de inicio de 67 MHz hasta la frecuencia de parada de 73 MHz con pasos de 50 KHz.

4.3.2.3.2 Equipos empleados

Los equipos empleados para esta prueba son un generador de señal y un analizador de espectros, junto con los del propio canal ascendente. Además, se utiliza los cables coaxiales y transiciones que sean necesarios para realizar las medidas o interconexiones entre equipos.

4.3.2.3.3 Realización de la prueba y resultados

En primer lugar, se realiza la configuración y conexión de los equipos de la Ilustración 4-11. Al inicio de la prueba, se debe asegurar que todo el equipo esté

completamente conexionado según la configuración requerida para la prueba y que esté encendido durante al menos 30 minutos. La configuración inicial de equipos serán los siguientes:

Equipo	Configuración
UC	- Ganancia = 20 dB - Frecuencia= 2048.877187 MHz
SSPA	- Atenuación=3 dB

Tabla 4-15 Parámetros de configuración equipos

Una vez configurados los anteriores equipos, se procede a realizar la calibración del medidor de potencia para la frecuencia correspondiente al punto a medir, que será el correspondiente al punto D. Para ello, se conecta el sensor de potencia a uno de los canales del medidor de potencia, y a su vez, se conecta a su puerto de referencia externa. Una vez, se ha realizado la apropiada conexión, se procede a realizar el *zero* y *cal* para realizar la calibración. Cuando el equipo muestra que se ha realizado la correcta calibración a una frecuencia de 50 MHz (valor de frecuencia de referencia por defecto), se procede a inyectar potencia para corroborar que sale 0 dB, queriendo decir que está el equipo correctamente calibrado. El siguiente paso será cambiar la frecuencia de 50 MHz, por 2048.877187 MHz al ser la frecuencia que usar.

Llegado a este punto, es el momento de generar la señal portadora con la que se realizará la prueba. Para ello, se configura la banda base para que genere una onda continua (CW), a un nivel de potencia de -18 dBm y a una frecuencia de 70 MHz.

Antes de continuar, será necesario verificar, usando el SA, que no hay señal por encima de los 10 dB de ruido del sistema en el punto A, chequeando de esta manera que el espectro esté limpio.

Comprobado lo anterior, se activa el UC y el SSPA, previamente configurados, para que transmitan. Se realizan las mediciones, las cuales son plasmadas en la siguiente tabla:

Paso	Canal (Hz)	Frecuencia a Banda base (Hz)	Contador de Frecuencia (Hz)	Sensor de potencia (dBm)	Potencia a SSPA (dBm)	Frecuencia (MHz)	Pendiente ganancia (dB)
0	2.048.877.187	67.000.000	2.045.877.188	-24,92	52,80	2045,88	-24,73
1	2.048.877.187	67.050.000	2.045.927.188	-24,95	52,70	2045,93	-24,73
2	2.048.877.187	67.100.000	2.045.977.188	-24,93	52,70	2045,98	-24,74

3	2.048. 877.1 87	67.150.00 0	2.046.027.18 8	-24,93	52,70	2046,03	-24,74
4	2.048. 877.1 87	67.200.00 0	2.046.077.18 8	-24,95	52,70	2046,08	-24,74
5	2.048. 877.1 87	67.250.00 0	2.045.877.18 8	-24,98	52,70	2045,88	-24,75
6	2.048. 877.1 87	67.300.00 0	2.045.927.18 8	-24,96	52,70	2045,93	-24,75
7	2.048. 877.1 87	67.350.00 0	2.045.977.18 8	-24,95	52,70	2045,98	-24,76
8	2.048. 877.1 87	67.400.00 0	2.046.027.18 8	-24,94	52,70	2046,03	-24,76
9	2.048. 877.1 87	67.450.00 0	2.046.327.18 8	-24,93	52,70	2046,33	-24,76
10	2.048. 877.1 87	67.500.00 0	2.046.377.18 8	-24,92	52,70	2046,38	-24,77
11	2.048. 877.1 87	67.550.00 0	2.046.427.18 8	-24,91	52,70	2046,43	-24,77
12	2.048. 877.1 87	67.600.00 0	2.046.477.18 8	-24,88	52,80	2046,48	-24,78
13	2.048. 877.1 87	67.650.00 0	2.046.527.18 8	-24,87	52,80	2046,53	-24,78
14	2.048. 877.1 87	67.700.00 0	2.046.577.18 8	-24,86	52,80	2046,58	-24,78
15	2.048. 877.1 87	67.750.00 0	2.046.627.18 8	-24,85	52,80	2046,63	-24,79
16	2.048. 877.1 87	67.800.00 0	2.046.677.18 8	-24,84	52,80	2046,68	-24,79
17	2.048. 877.1 87	67.850.00 0	2.046.727.18 8	-24,83	52,80	2046,73	-24,80
18	2.048. 877.1 87	67.900.00 0	2.046.777.18 8	-24,83	52,80	2046,78	-24,80
19	2.048. 877.1 87	67.950.00 0	2.046.827.18 8	-24,81	52,80	2046,83	-24,80

20	2.048. 877.1 87	68.000.00 0	2.046.877.18 8	-24,81	52,80	2046,88	-24,81
21	2.048. 877.1 87	68.050.00 0	2.046.927.18 8	-24,80	52,80	2046,93	-24,81
22	2.048. 877.1 87	68.100.00 0	2.046.977.18 8	-24,80	52,80	2046,98	-24,82
23	2.048. 877.1 87	68.150.00 0	2.047.027.18 8	-24,80	52,80	2047,03	-24,82
24	2.048. 877.1 87	68.200.00 0	2.047.077.18 8	-24,79	52,80	2047,08	-24,82
25	2.048. 877.1 87	68.250.00 0	2.047.127.18 8	-24,79	52,90	2047,13	-24,83
26	2.048. 877.1 87	68.300.00 0	2.047.177.18 8	-24,78	52,80	2047,18	-24,83
27	2.048. 877.1 87	68.350.00 0	2.047.227.18 8	-24,80	52,80	2047,23	-24,84
28	2.048. 877.1 87	68.400.00 0	2.047.277.18 8	-24,79	52,80	2047,28	-24,84
29	2.048. 877.1 87	68.450.00 0	2.047.327.18 8	-24,80	52,80	2047,33	-24,84
30	2.048. 877.1 87	68.500.00 0	2.047.377.18 8	-24,80	52,80	2047,38	-24,85
31	2.048. 877.1 87	68.550.00 0	2.047.427.18 8	-24,80	52,90	2047,43	-24,85
32	2.048. 877.1 87	68.600.00 0	2.047.477.18 8	-24,80	52,80	2047,48	-24,86
33	2.048. 877.1 87	68.650.00 0	2.047.527.18 8	-24,80	52,80	2047,53	-24,86
34	2.048. 877.1 87	68.700.00 0	2.047.577.18 8	-24,81	52,80	2047,58	-24,86
35	2.048. 877.1 87	68.750.00 0	2.047.627.18 8	-24,81	52,80	2047,63	-24,87
36	2.048. 877.1 87	68.800.00 0	2.047.677.18 8	-24,81	52,80	2047,68	-24,87

37	2.048. 877.1 87	68.850.00 0	2.047.727.18 8	-24,81	52,80	2047,73	-24,88
38	2.048. 877.1 87	68.900.00 0	2.047.777.18 8	-24,82	52,80	2047,78	-24,88
39	2.048. 877.1 87	68.950.00 0	2.047.827.18 8	-24,82	52,80	2047,83	-24,88
40	2.048. 877.1 87	69.000.00 0	2.047.877.18 8	-24,82	52,80	2047,88	-24,89
41	2.048. 877.1 87	69.050.00 0	2.047.927.18 8	-24,82	52,80	2047,93	-24,89
42	2.048. 877.1 87	69.100.00 0	2.047.977.18 8	-24,83	52,80	2047,98	-24,90
43	2.048. 877.1 87	69.150.00 0	2.048.027.18 8	-24,83	52,80	2048,03	-24,90
44	2.048. 877.1 87	69.200.00 0	2.048.077.18 8	-24,83	52,80	2048,08	-24,90
45	2.048. 877.1 87	69.250.00 0	2.048.127.18 8	-24,84	52,80	2048,13	-24,91
46	2.048. 877.1 87	69.300.00 0	2.048.177.18 8	-24,85	52,80	2048,18	-24,91
47	2.048. 877.1 87	69.350.00 0	2.048.227.18 8	-24,85	52,80	2048,23	-24,92
48	2.048. 877.1 87	69.400.00 0	2.048.277.18 8	-24,84	52,80	2048,28	-24,92
49	2.048. 877.1 87	69.450.00 0	2.048.327.18 8	-24,85	52,80	2048,33	-24,92
50	2.048. 877.1 87	69.500.00 0	2.048.377.18 8	-24,86	52,80	2048,38	-24,93
51	2.048. 877.1 87	69.550.00 0	2.048.427.18 8	-24,85	52,80	2048,43	-24,93
52	2.048. 877.1 87	69.600.00 0	2.048.477.18 8	-24,88	52,80	2048,48	-24,94
53	2.048. 877.1 87	69.650.00 0	2.048.527.18 8	-24,88	52,80	2048,53	-24,94

54	2.048.877.187	69.700.000	2.048.577.188	-24,87	52,80	2048,58	-24,94
55	2.048.877.187	69.750.000	2.048.627.188	-24,91	52,80	2048,63	-24,95
56	2.048.877.187	69.800.000	2.048.677.188	-24,92	52,80	2048,68	-24,95
57	2.048.877.187	69.850.000	2.048.727.188	-24,92	52,80	2048,73	-24,96
58	2.048.877.187	69.900.000	2.048.777.188	-24,93	52,80	2048,78	-24,96
59	2.048.877.187	69.950.000	2.048.827.188	-24,94	52,80	2048,83	-24,96
60	2.048.877.187	70.000.000	2.048.877.188	-24,95	52,80	2048,88	-24,97
61	2.048.877.187	70.050.000	2.048.927.188	-24,95	52,80	2048,93	-24,97
62	2.048.877.187	70.100.000	2.048.977.188	-24,96	52,80	2048,98	-24,98
63	2.048.877.187	70.150.000	2.049.027.188	-24,94	52,80	2049,03	-24,98
64	2.048.877.187	70.200.000	2.049.077.188	-24,96	52,80	2049,08	-24,98
65	2.048.877.187	70.250.000	2.049.127.188	-24,99	52,80	2049,13	-24,99
66	2.048.877.187	70.300.000	2.049.177.188	-24,98	52,70	2049,18	-24,99
67	2.048.877.187	70.350.000	2.049.227.188	-24,99	52,80	2049,23	-25,00
68	2.048.877.187	70.400.000	2.049.277.188	-25,00	52,80	2049,28	-25,00
69	2.048.877.187	70.450.000	2.049.327.188	-25,03	52,70	2049,33	-25,00
70	2.048.877.187	70.500.000	2.049.377.188	-25,03	52,70	2049,38	-25,01

71	2.048. 877.1 87	70.550.00 0	2.049.427.18 8	-25,04	52,70	2049,43	-25,01
72	2.048. 877.1 87	70.600.00 0	2.049.477.18 8	-25,05	52,70	2049,48	-25,02
73	2.048. 877.1 87	70.650.00 0	2.049.527.18 8	-25,07	52,70	2049,53	-25,02
74	2.048. 877.1 87	70.700.00 0	2.049.577.18 8	-25,08	52,70	2049,58	-25,02
75	2.048. 877.1 87	70.750.00 0	2.049.627.18 8	-25,09	52,70	2049,63	-25,03
76	2.048. 877.1 87	70.800.00 0	2.049.677.18 8	-25,11	52,70	2049,68	-25,03
77	2.048. 877.1 87	70.850.00 0	2.049.727.18 8	-25,11	52,70	2049,73	-25,04
78	2.048. 877.1 87	70.900.00 0	2.049.777.18 8	-25,14	52,70	2049,78	-25,04
79	2.048. 877.1 87	70.950.00 0	2.049.827.18 8	-25,15	52,70	2049,83	-25,04
80	2.048. 877.1 87	71.000.00 0	2.049.877.18 8	-25,15	52,70	2049,88	-25,05
81	2.048. 877.1 87	71.050.00 0	2.049.927.18 8	-25,17	52,70	2049,93	-25,05
82	2.048. 877.1 87	71.100.00 0	2.049.977.18 8	-25,16	52,70	2049,98	-25,06
83	2.048. 877.1 87	71.150.00 0	2.050.027.18 8	-25,19	52,70	2050,03	-25,06
84	2.048. 877.1 87	71.200.00 0	2.050.077.18 8	-25,20	52,70	2050,08	-25,06
85	2.048. 877.1 87	71.250.00 0	2.050.127.18 8	-25,20	52,70	2050,13	-25,07
86	2.048. 877.1 87	71.300.00 0	2.050.177.18 8	-25,20	52,70	2050,18	-25,07
87	2.048. 877.1 87	71.350.00 0	2.050.227.18 8	-25,21	52,70	2050,23	-25,08

88	2.048. 877.1 87	71.400.00 0	2.050.277.18 8	-25,24	52,70	2050,28	-25,08
89	2.048. 877.1 87	71.450.00 0	2.050.327.18 8	-25,24	52,70	2050,33	-25,08
90	2.048. 877.1 87	71.500.00 0	2.050.377.18 8	-25,27	52,70	2050,38	-25,09
91	2.048. 877.1 87	71.550.00 0	2.050.427.18 8	-25,27	52,70	2050,43	-25,09
92	2.048. 877.1 87	71.600.00 0	2.050.477.18 8	-25,28	52,60	2050,48	-25,10
93	2.048. 877.1 87	71.650.00 0	2.050.527.18 8	-25,30	52,60	2050,53	-25,10
94	2.048. 877.1 87	71.700.00 0	2.050.577.18 8	-25,31	52,60	2050,58	-25,10
95	2.048. 877.1 87	71.750.00 0	2.050.627.18 8	-25,32	52,60	2050,63	-25,11
96	2.048. 877.1 87	71.800.00 0	2.050.677.18 8	-25,31	52,60	2050,68	-25,11
97	2.048. 877.1 87	71.850.00 0	2.050.727.18 8	-25,34	52,60	2050,73	-25,12
98	2.048. 877.1 87	71.900.00 0	2.050.777.18 8	-25,36	52,60	2050,78	-25,12
99	2.048. 877.1 87	71.950.00 0	2.050.827.18 8	-25,35	52,60	2050,83	-25,12
100	2.048. 877.1 87	72.000.00 0	2.050.877.18 8	-25,37	52,60	2050,88	-25,13
101	2.048. 877.1 87	72.050.00 0	2.050.927.18 8	-25,38	52,60	2050,93	-25,13
102	2.048. 877.1 87	72.100.00 0	2.050.977.18 8	-25,39	52,60	2050,98	-25,14
103	2.048. 877.1 87	72.150.00 0	2.051.027.18 8	-25,40	52,60	2051,03	-25,14
104	2.048. 877.1 87	72.200.00 0	2.051.077.18 8	-25,41	52,60	2051,08	-25,14

105	2.048. 877.1 87	72.250.00 0	2.051.127.18 8	-25,42	52,60	2051,13	-25,15
106	2.048. 877.1 87	72.300.00 0	2.051.177.18 8	-25,42	52,60	2051,18	-25,15
107	2.048. 877.1 87	72.350.00 0	2.051.227.18 8	-25,40	52,60	2051,23	-25,16
108	2.048. 877.1 87	72.400.00 0	2.051.277.18 8	-25,43	52,60	2051,28	-25,16
109	2.048. 877.1 87	72.450.00 0	2.051.327.18 8	-25,47	52,60	2051,33	-25,16
110	2.048. 877.1 87	72.500.00 0	2.051.377.18 8	-25,46	52,60	2051,38	-25,17
111	2.048. 877.1 87	72.550.00 0	2.051.427.18 8	-25,48	52,60	2051,43	-25,17
112	2.048. 877.1 87	72.600.00 0	2.051.477.18 8	-25,48	52,60	2051,48	-25,18
113	2.048. 877.1 87	72.650.00 0	2.051.527.18 8	-25,48	52,60	2051,53	-25,18
114	2.048. 877.1 87	72.700.00 0	2.051.577.18 8	-25,49	52,60	2051,58	-25,18
115	2.048. 877.1 87	72.750.00 0	2.051.627.18 8	-25,48	52,60	2051,63	-25,19
116	2.048. 877.1 87	72.800.00 0	2.051.677.18 8	-25,50	52,60	2051,68	-25,19
117	2.048. 877.1 87	72.850.00 0	2.051.727.18 8	-25,49	52,60	2051,73	-25,20
118	2.048. 877.1 87	72.900.00 0	2.051.777.18 8	-25,51	52,60	2051,78	-25,20
119	2.048. 877.1 87	72.950.00 0	2.051.827.18 8	-25,48	52,60	2051,83	-25,20
120	2.048. 877.1 87	73.000.00 0	2.051.877.18 8	-25,48	52,60	2051,88	-25,21

Tabla 4-16 Cálculo de respuesta en frecuencia

De los valores de la tabla anterior, se mide la variación de ganancia y la pendiente de ganancia. Como requisito la respuesta en frecuencia de la ganancia debe ser inferior a ± 1 dB a lo largo de los ± 3 MHz alrededor de la frecuencia. Además, la pendiente de ganancia debe ser $\leq 0,2$ dB/MHz. Para el cálculo de los anteriores valores mencionados, se han escogido la potencia más alta y baja con sus respectivas frecuencias, que han sido obtenidas de la tabla anterior. El cálculo de la variación de ganancia máxima se realiza mediante la diferencia entre la diferencia de las potencias, dividiendo luego entre dos. En cuanto a la pendiente de ganancia, se ha obtenido la ecuación de la recta de ganancia, dividiendo la diferencia de las potencias entre la diferencia de las frecuencias, donde "m" corresponde con la pendiente de la ecuación. Por último, se multiplica "m" por el campo de "Frecuencia (MHz)" para cada caso y se suma la "n", obteniendo de esta manera la ganancia que se espera para cada frecuencia, ver Tabla 4-16 A continuación, se plasman los valores obtenidos comentados anteriormente:

Variación Ganancia		Ecuación de la recta de ganancia		
Máximo	-24,78	Paso 26	-24,78	2047,18
Mínimo	-25,51	Paso 118	-25,51	2051,78
Diferencia	0,73	m (pendiente)	-0,15870	
Variación ganancia máxima	0,37	n	300,09857	

Tabla 4-17 Cálculo de variación y ecuación de la de ganancia

Con la información calculada de las dos tablas, se dibuja la siguiente gráfica:

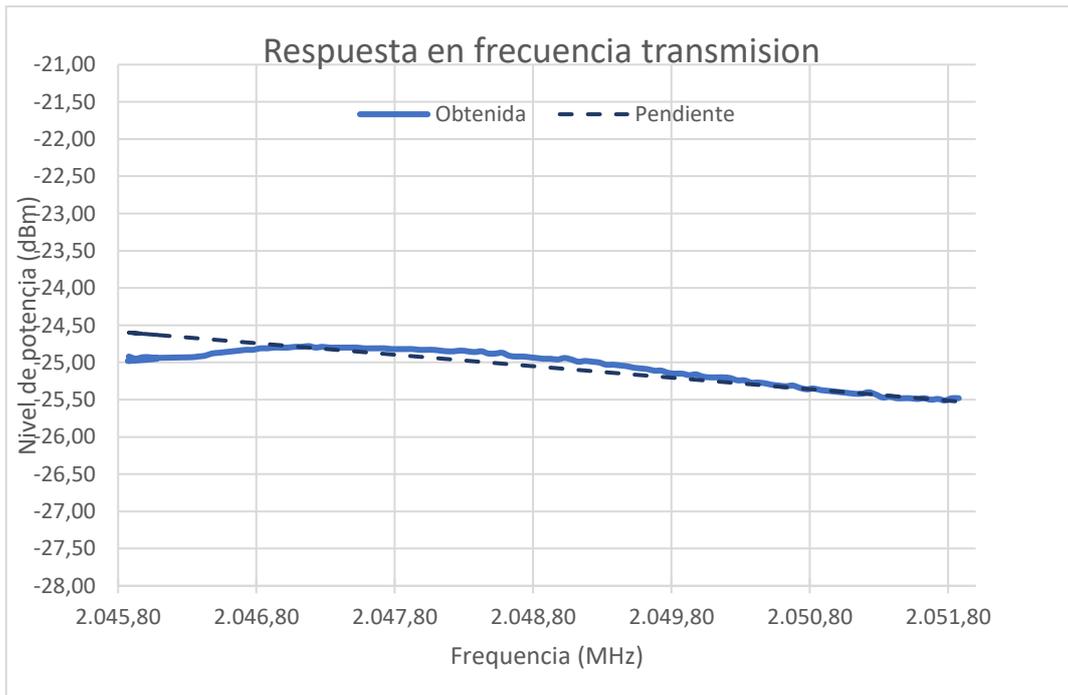


Ilustración 4-24 Representación gráfica respuesta en frecuencia

4.3.2.4 Ruido de fase

4.3.2.4.1 Objetivo

Con esta prueba, se mide el ruido de fase (dB/Hz) para el desplazamiento de frecuencia (Hz) en 10 Hz, 100 Hz, 1kHz, 10 kHz, 100 kHz y 1 MHz, de la portadora transmitida. Para ello, se medirá el parámetro a la salida del SSPA en el punto C.

4.3.2.4.2 Equipos empleados

Los equipos que se usan en esta prueba será los del propio canal ascendente, un analizador de espectros y sensor de potencia. Además, se utiliza los cables coaxiales y transiciones que sean necesarios para realizar las medidas o las interconexiones entre equipos.

4.3.2.4.3 Realización de la prueba y resultados

En primer lugar, se realiza la configuración y conexión de los equipos de la Ilustración 4-11. Al inicio de la prueba, se debe asegurar que todo el equipo esté completamente conexionado según la configuración requerida para la prueba y que esté encendido durante al menos 30 minutos. La configuración inicial de ciertos equipos serán los siguientes:

Equipo	Configuración
UC	- Ganancia = 20 dB - Frecuencia= 2048.877187 MHz
SSPA	- Atenuación=3 dB

Tabla 4-18 Parámetros de configuración equipos

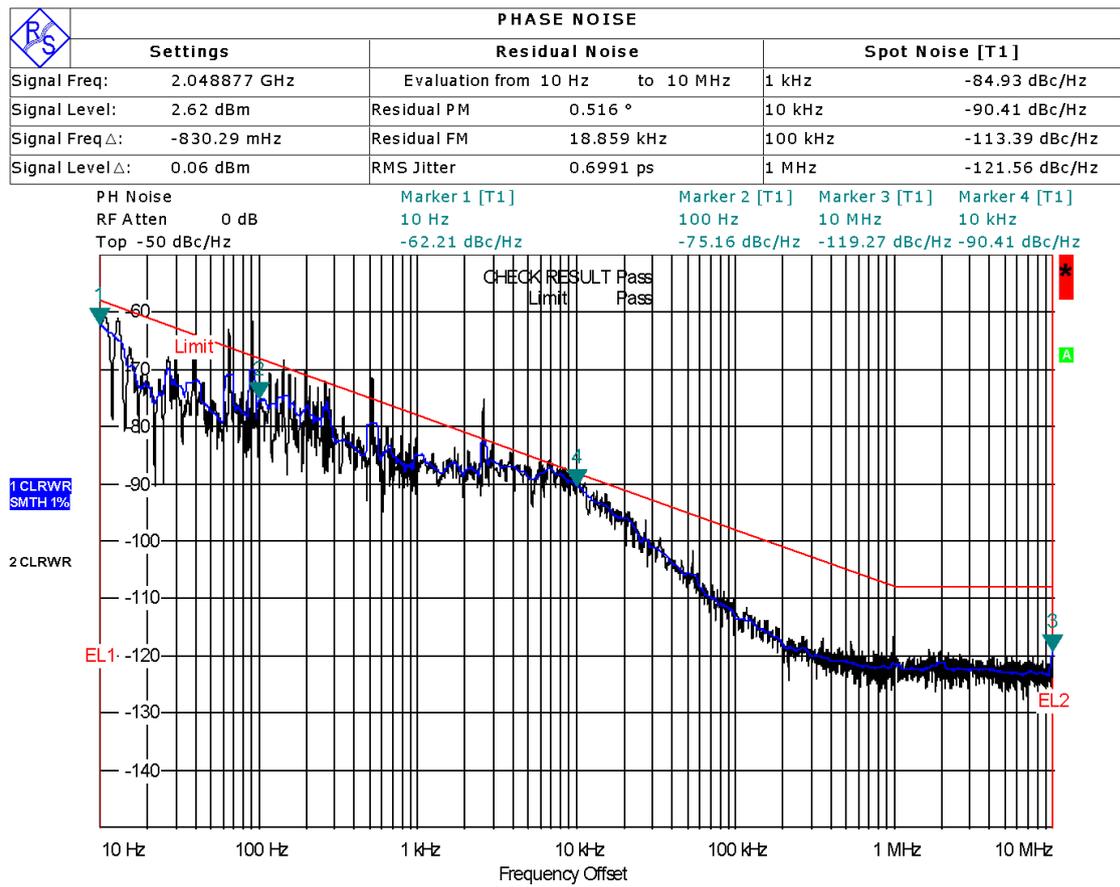
Una vez configurados los anteriores equipos, se procede a realizar la calibración del medidor de potencia para la frecuencia correspondiente al punto a medir, que será el correspondiente al punto C. Para ello, se conecta el sensor de potencia a uno de los canales del medidor de potencia, y a su vez se conecta a su puerto de referencia externa. Una vez, se ha realizado la apropiada conexión, se procede a realizar el *zero* y *cal* para realizar la calibración. Cuando el equipo muestra que se ha realizado la correcta calibración a una frecuencia de 50 MHz (valor de frecuencia de referencia por defecto), se procede a inyectar potencia para corroborar que sale 0 dB, queriendo decir que está el equipo correctamente calibrado. El siguiente paso será cambiar la frecuencia de 50 MHz, por 2048.877187 MHz al ser la frecuencia que usar.

Llegado a este punto, es el momento de generar la señal portadora con la que se realizará la prueba. Para ello, se configura la banda base para que genere una onda continua (CW), a un nivel de potencia de -18 dBm y a una frecuencia de 70 MHz.

Antes de continuar, será necesario verificar, usando el SA, que no hay señal por encima de los 10 dB de ruido del sistema en el punto A, chequeando de esta manera que el espectro esté limpio.

Comprobado lo anterior, se activa el UC y el SSPA, previamente configurados, para que transmitan. Luego, se comprueba que la potencia en el punto C es el esperado. Después, en el analizador de espectros, se configura para que mida el ruido de fase a la frecuencia 2048.877187 MHz, en el rango de 10 Hz hasta 1 MHz. Además, se configura una máscara con la que se limita el ruido de fase. Si se supera dicho limite, la prueba será fallida. Los limites son los siguientes: 10 Hz -58 dBc/Hz, 100 Hz -68 dBc/Hz, 1 kHz -78 dBc/Hz, 10 kHz -88 dBc/Hz, 100 kHz -98 dBc/Hz, 1 MHz -108 dBc/Hz, > 1MHz -108 dBc/Hz.

Una vez configurado el SA, se conecta al punto C y se realiza la medición, siendo el resultado el siguiente:



Measurement Aborted

Date: 23.APR.2021 14:54:57

Ilustración 4-25 Medición del ruido de fase

4.3.3 Pruebas de la cadena de recepción

En este apartado, se llevarán a cabo aquellas pruebas relacionadas con la cadena de recepción de la estación.

4.3.3.1 Respuesta en frecuencia

4.3.3.1.1 Objetivo

Con esta prueba, se pretende realizar la comprobación de la variación de la ganancia entre los D/C y la entrada de la banda base al realizar un barrido de la señal a lo largo de la frecuencia de recepción +/- 3 MHz. El generador de señales barre desde la frecuencia de inicio de 2222,025 MHz hasta la frecuencia de parada de 2227,975 MHz con pasos de 50 KHz.

4.3.3.1.2 Equipos empleados

Los equipos empleados para esta prueba son un generador de señal y un analizador de espectros, junto con los del propio canal ascendente. Además, se utiliza los cables coaxiales y transiciones que sean necesarios para realizar las medidas o las interconexiones entre equipos.

4.3.3.1.3 Realización de la prueba y resultados

En primer lugar, se realiza la configuración y conexión de los equipos basándose en la Ilustración 4-15 Al inicio de la prueba, se debe asegurar que todo el equipo esté completamente conexasión según la configuración requerida para la prueba y que esté encendido durante al menos 30 minutos. La configuración inicial de los equipos serán los siguientes:

Equipo	Configuración
DC	- Ganancia=45 dB, Frecuencia=2225.025 MHz

Tabla 4-19 Configuración de los equipos

Una vez configurados los anteriores equipos, se procede a realizar la calibración del medidor de potencia para la frecuencia correspondiente al punto a medir, que será el correspondiente al punto E. Para ello se conecta el sensor de potencia a uno de los canales del medidor de potencia, y a su vez se conecta a su puerto de referencia externa. Una vez, se ha realizado la apropiada conexión se procede a realizar el *zero* y *cal* para realizar la calibración. Cuando el equipo muestra que se ha realizado la correcta calibración a una frecuencia de 50 MHz (valor de frecuencia de referencia por defecto), se procede a inyectar potencia para corroborar que sale 0 dB, queriendo decir que está el equipo correctamente

calibrado. El siguiente paso será cambiar la frecuencia de 50 MHz, por 2225,025 MHz al ser la frecuencia que usar.

A continuación, se configura el generador de señales y se conecta al punto de inyección para conducir la señal al U/C. Se genera una señal CW, con un nivel de potencia de -60 dBm y frecuencia de 2225,025 MHz.

Antes de continuar, será necesario verificar, usando el SA, que no hay señal por encima de los 10 dB de ruido del sistema, chequeando de esta manera que el espectro esté limpio.

Comprobado lo anterior, se activa el generador de señal para que transmita. Se realizan las mediciones, las cuales son plasmadas en la siguiente tabla:

Paso	Canal (Hz)	Frecuencia Generador de señal (Hz)	Frecuencia máxima de la señal (Hz)	Potencia máxima de la señal (dBm)	Sensor de potencia (dBm)	Frecuencia (MHz)	Ganancia de la pendiente (dB)
0	2.225.025.000	2.222.025.000	66999200,00	-31,12	-30,84	2222,03	-30,90
1	2.225.025.000	2.222.075.000	67047600,00	-31,12	-30,84	2222,08	-30,90
2	2.225.025.000	2.222.125.000	67096000,00	-31,12	-30,85	2222,13	-30,89
3	2.225.025.000	2.222.175.000	67144400,00	-31,12	-30,85	2222,18	-30,89
4	2.225.025.000	2.222.225.000	67204900,00	-31,13	-30,85	2222,23	-30,88
5	2.225.025.000	2.222.275.000	67253300,00	-31,13	-30,85	2222,28	-30,88
6	2.225.025.000	2.222.325.000	67301700,00	-31,13	-30,85	2222,33	-30,87
7	2.225.025.000	2.222.375.000	67350100,00	-31,13	-30,85	2222,38	-30,87
8	2.225.025.000	2.222.425.000	67398500,00	-31,13	-30,86	2222,43	-30,86
9	2.225.025.000	2.222.475.000	67446900,00	-31,13	-30,86	2222,48	-30,86

10	2.225. 025.0 00	2.222.525. 000	67495300 00,00	-31,13	-30,86	2222,53	-30,85
11	2.225. 025.0 00	2.222.575. 000	67555800 00,00	-31,12	-30,86	2222,58	-30,84
12	2.225. 025.0 00	2.222.625. 000	67604200 00,00	-31,13	-30,86	2222,63	-30,84
13	2.225. 025.0 00	2.222.675. 000	67652600 00,00	-31,13	-30,86	2222,68	-30,83
14	2.225. 025.0 00	2.222.725. 000	67701000 00,00	-31,13	-30,86	2222,73	-30,83
15	2.225. 025.0 00	2.222.775. 000	67749400 00,00	-31,13	-30,86	2222,78	-30,82
16	2.225. 025.0 00	2.222.825. 000	67797800 00,00	-31,12	-30,85	2222,83	-30,82
17	2.225. 025.0 00	2.222.875. 000	67846200 00,00	-31,17	-30,85	2222,88	-30,81
18	2.225. 025.0 00	2.222.925. 000	67894600 00,00	-31,16	-30,85	2222,93	-30,81
19	2.225. 025.0 00	2.222.975. 000	67955100 00,00	-31,16	-30,85	2222,98	-30,80
20	2.225. 025.0 00	2.223.025. 000	68003500 00,00	-31,16	-30,85	2223,03	-30,80
21	2.225. 025.0 00	2.223.075. 000	68051900 00,00	-31,15	-30,85	2223,08	-30,79
22	2.225. 025.0 00	2.223.125. 000	68100300 00,00	-31,15	-30,84	2223,13	-30,79
23	2.225. 025.0 00	2.223.175. 000	68148700 00,00	-31,15	-30,84	2223,18	-30,78
24	2.225. 025.0 00	2.223.225. 000	68197100 00,00	-31,14	-30,84	2223,23	-30,78
25	2.225. 025.0 00	2.223.275. 000	68245500 00,00	-31,14	-30,84	2223,28	-30,77
26	2.225. 025.0 00	2.223.325. 000	68306000 00,00	-31,14	-30,84	2223,33	-30,76

27	2.225. 025.0 00	2.223.375. 000	68354400 00,00	-31,13	-30,83	2223,38	-30,76
28	2.225. 025.0 00	2.223.425. 000	68402800 00,00	-31,13	-30,83	2223,43	-30,75
29	2.225. 025.0 00	2.223.475. 000	68451200 00,00	-31,12	-30,83	2223,48	-30,75
30	2.225. 025.0 00	2.223.525. 000	68499600 00,00	-31,12	-30,83	2223,53	-30,74
31	2.225. 025.0 00	2.223.575. 000	68548000 00,00	-31,12	-30,83	2223,58	-30,74
32	2.225. 025.0 00	2.223.625. 000	68596400 00,00	-31,12	-30,82	2223,63	-30,73
33	2.225. 025.0 00	2.223.675. 000	68644800 00,00	-31,11	-30,82	2223,68	-30,73
34	2.225. 025.0 00	2.223.725. 000	68705300 00,00	-31,11	-30,82	2223,73	-30,72
35	2.225. 025.0 00	2.223.775. 000	68753700 00,00	-31,1	-30,82	2223,78	-30,72
36	2.225. 025.0 00	2.223.825. 000	68802100 00,00	-31,11	-30,82	2223,83	-30,71
37	2.225. 025.0 00	2.223.875. 000	68850500 00,00	-31,1	-30,81	2223,88	-30,71
38	2.225. 025.0 00	2.223.925. 000	68898900 00,00	-31,09	-30,81	2223,93	-30,70
39	2.225. 025.0 00	2.223.975. 000	68947300 00,00	-31,09	-30,81	2223,98	-30,70
40	2.225. 025.0 00	2.224.025. 000	68995700 00,00	-31,09	-30,81	2224,03	-30,69
41	2.225. 025.0 00	2.224.075. 000	69044100 00,00	-31,09	-30,81	2224,08	-30,69
42	2.225. 025.0 00	2.224.125. 000	69104600 00,00	-31,09	-30,8	2224,13	-30,68
43	2.225. 025.0 00	2.224.175. 000	69153000 00,00	-31,08	-30,8	2224,18	-30,67

44	2.225.025.000	2.224.225.000	692014000,00	-31,08	-30,8	2224,23	-30,67
45	2.225.025.000	2.224.275.000	692498000,00	-31,07	-30,8	2224,28	-30,66
46	2.225.025.000	2.224.325.000	692982000,00	-31,07	-30,79	2224,33	-30,66
47	2.225.025.000	2.224.375.000	693466000,00	-31,06	-30,79	2224,38	-30,65
48	2.225.025.000	2.224.425.000	693950000,00	-31,06	-30,79	2224,43	-30,65
49	2.225.025.000	2.224.475.000	694555000,00	-31,06	-30,79	2224,48	-30,64
50	2.225.025.000	2.224.525.000	695039000,00	-31,06	-30,78	2224,53	-30,64
51	2.225.025.000	2.224.575.000	695523000,00	-31,05	-30,78	2224,58	-30,63
52	2.225.025.000	2.224.625.000	696007000,00	-31,05	-30,78	2224,63	-30,63
53	2.225.025.000	2.224.675.000	696491000,00	-31,04	-30,77	2224,68	-30,62
54	2.225.025.000	2.224.725.000	696975000,00	-31,04	-30,77	2224,73	-30,62
55	2.225.025.000	2.224.775.000	697459000,00	-31	-30,77	2224,78	-30,61
56	2.225.025.000	2.224.825.000	697943000,00	-31,02	-30,76	2224,83	-30,61
57	2.225.025.000	2.224.875.000	698548000,00	-31	-30,76	2224,88	-30,60
58	2.225.025.000	2.224.925.000	699032000,00	-31	-30,75	2224,93	-30,59
59	2.225.025.000	2.224.975.000	699516000,00	-31	-30,75	2224,98	-30,59
60	2.225.025.000	2.225.025.000	700000000,00	-30,98	-30,74	2225,03	-30,58

61	2.225.025.000	2.225.075.000	70048400,00	-30,98	-30,74	2225,08	-30,58
62	2.225.025.000	2.225.125.000	70096800,00	-30,97	-30,73	2225,13	-30,57
63	2.225.025.000	2.225.175.000	70145200,00	-30,95	-30,72	2225,18	-30,57
64	2.225.025.000	2.225.225.000	70193600,00	-30,94	-30,72	2225,23	-30,56
65	2.225.025.000	2.225.275.000	70254100,00	-30,94	-30,71	2225,28	-30,56
66	2.225.025.000	2.225.325.000	70302500,00	-30,93	-30,7	2225,33	-30,55
67	2.225.025.000	2.225.375.000	70350900,00	-30,92	-30,69	2225,38	-30,55
68	2.225.025.000	2.225.425.000	70399300,00	-30,92	-30,69	2225,43	-30,54
69	2.225.025.000	2.225.475.000	70447700,00	-30,9	-30,68	2225,48	-30,54
70	2.225.025.000	2.225.525.000	70496100,00	-30,9	-30,67	2225,53	-30,53
71	2.225.025.000	2.225.575.000	70544500,00	-30,88	-30,66	2225,58	-30,53
72	2.225.025.000	2.225.625.000	70605000,00	-30,87	-30,65	2225,63	-30,52
73	2.225.025.000	2.225.675.000	70653400,00	-30,86	-30,64	2225,68	-30,52
74	2.225.025.000	2.225.725.000	70701800,00	-30,84	-30,63	2225,73	-30,51
75	2.225.025.000	2.225.775.000	70750200,00	-30,84	-30,62	2225,78	-30,50
76	2.225.025.000	2.225.825.000	70798600,00	-30,82	-30,61	2225,83	-30,50
77	2.225.025.000	2.225.875.000	70847000,00	-30,8	-30,6	2225,88	-30,49

78	2.225. 025.0 00	2.225.925. 000	70895400 00,00	-30,8	-30,58	2225,93	-30,49
79	2.225. 025.0 00	2.225.975. 000	70955900 00,00	-30,79	-30,57	2225,98	-30,48
80	2.225. 025.0 00	2.226.025. 000	71004300 00,00	-30,77	-30,56	2226,03	-30,48
81	2.225. 025.0 00	2.226.075. 000	71052700 00,00	-30,76	-30,55	2226,08	-30,47
82	2.225. 025.0 00	2.226.125. 000	71101100 00,00	-30,78	-30,54	2226,13	-30,47
83	2.225. 025.0 00	2.226.175. 000	71149500 00,00	-30,77	-30,53	2226,18	-30,46
84	2.225. 025.0 00	2.226.225. 000	71197900 00,00	-30,75	-30,51	2226,23	-30,46
85	2.225. 025.0 00	2.226.275. 000	71246300 00,00	-30,74	-30,5	2226,28	-30,45
86	2.225. 025.0 00	2.226.325. 000	71294700 00,00	-30,72	-30,49	2226,33	-30,45
87	2.225. 025.0 00	2.226.375. 000	71355200 00,00	-30,71	-30,48	2226,38	-30,44
88	2.225. 025.0 00	2.226.425. 000	71403600 00,00	-30,7	-30,47	2226,43	-30,44
89	2.225. 025.0 00	2.226.475. 000	71452000 00,00	-30,68	-30,46	2226,48	-30,43
90	2.225. 025.0 00	2.226.525. 000	71500400 00,00	-30,67	-30,45	2226,53	-30,42
91	2.225. 025.0 00	2.226.575. 000	71548800 00,00	-30,67	-30,44	2226,58	-30,42
92	2.225. 025.0 00	2.226.625. 000	71597200 00,00	-30,65	-30,43	2226,63	-30,41
93	2.225. 025.0 00	2.226.675. 000	71645600 00,00	-30,65	-30,42	2226,68	-30,41
94	2.225. 025.0 00	2.226.725. 000	71694000 00,00	-30,63	-30,41	2226,73	-30,40

95	2.225. 025.0 00	2.226.775. 000	71754500 00,00	-30,62	-30,4	2226,78	-30,40
96	2.225. 025.0 00	2.226.825. 000	71802900 00,00	-30,61	-30,39	2226,83	-30,39
97	2.225. 025.0 00	2.226.875. 000	71851300 00,00	-30,6	-30,38	2226,88	-30,39
98	2.225. 025.0 00	2.226.925. 000	71899700 00,00	-30,6	-30,38	2226,93	-30,38
99	2.225. 025.0 00	2.226.975. 000	71948100 00,00	-30,59	-30,37	2226,98	-30,38
100	2.225. 025.0 00	2.227.025. 000	71996500 00,00	-30,58	-30,37	2227,03	-30,37
101	2.225. 025.0 00	2.227.075. 000	72044900 00,00	-30,58	-30,36	2227,08	-30,37
102	2.225. 025.0 00	2.227.125. 000	72105400 00,00	-30,57	-30,36	2227,13	-30,36
103	2.225. 025.0 00	2.227.175. 000	72153800 00,00	-30,58	-30,36	2227,18	-30,36
104	2.225. 025.0 00	2.227.225. 000	72202200 00,00	-30,57	-30,35	2227,23	-30,35
105	2.225. 025.0 00	2.227.275. 000	72250600 00,00	-30,57	-30,35	2227,28	-30,35
106	2.225. 025.0 00	2.227.325. 000	72299000 00,00	-30,57	-30,35	2227,33	-30,34
107	2.225. 025.0 00	2.227.375. 000	72347400 00,00	-30,57	-30,35	2227,38	-30,33
108	2.225. 025.0 00	2.227.425. 000	72395800 00,00	-30,57	-30,36	2227,43	-30,33
109	2.225. 025.0 00	2.227.475. 000	72444200 00,00	-30,58	-30,36	2227,48	-30,32
110	2.225. 025.0 00	2.227.525. 000	72504700 00,00	-30,58	-30,36	2227,53	-30,32
111	2.225. 025.0 00	2.227.575. 000	72504700 00,00	-30,57	-30,37	2227,58	-30,31

112	2.225. 025.0 00	2.227.625. 000	72601500 00,00	-30,6	-30,37	2227,63	-30,31
113	2.225. 025.0 00	2.227.675. 000	72649900 00,00	-30,59	-30,38	2227,68	-30,30
114	2.225. 025.0 00	2.227.725. 000	72698300 00,00	-30,6	-30,38	2227,73	-30,30
115	2.225. 025.0 00	2.227.775. 000	72746700 00,00	-30,61	-30,39	2227,78	-30,29
116	2.225. 025.0 00	2.227.825. 000	72795100 00,00	-30,63	-30,4	2227,83	-30,29
117	2.225. 025.0 00	2.227.875. 000	72855600 00,00	-30,63	-30,41	2227,88	-30,28
118	2.225. 025.0 00	2.227.925. 000	72904000 00,00	-30,64	-30,42	2227,93	-30,28
119	2.225. 025.0 00	2.227.975. 000	72952400 00,00	-30,65	-30,43	2227,98	-30,27

Tabla 4-20 Cálculo de respuesta en frecuencia

De los valores de la tabla anterior, se mide la variación de ganancia y la pendiente de ganancia. Como requisito la respuesta en frecuencia de la ganancia debe ser inferior a ± 1 dB a lo largo de los ± 3 MHz alrededor de la frecuencia. Además, la pendiente de ganancia debe ser $\leq 0,2$ dB/MHz. Para el cálculo de los anteriores valores mencionados, se han escogido la potencia más alta y baja con sus respectivas frecuencias, que han sido obtenidas de la tabla anterior. El cálculo de la variación de ganancia máxima se realiza mediante la diferencia entre la diferencia de las potencias, dividiéndola luego entre dos. En cuanto a la pendiente de ganancia, se ha obtenido la ecuación de la recta de ganancia, dividiendo la diferencia de las potencias entre la diferencia de las frecuencias, donde "m" corresponde con la pendiente de la ecuación. Por último, se multiplica "m" por el campo de "Frecuencia (MHz)" para cada caso y se suma la "n", obteniendo de esta manera la ganancia que se espera para cada frecuencia, ver Tabla 4-20. A continuación, se plasman los valores obtenidos comentados:

Variación de ganancia		Ecuación de la recta de ganancia		
Máximo	-30,35	Paso 8	-30,35	2227,23
Mínimo	-30,86	Paso 17	-30,86	2222,43
Diferencia	0,51	m (pendiente)	0,10625	
Variación ganancia máxima	0,26	n	-266.99319	

Tabla 4-21 Cálculo de variación y ecuación de la recta de ganancia

Con la información calculada de las dos tablas, se obtiene la siguiente gráfica:

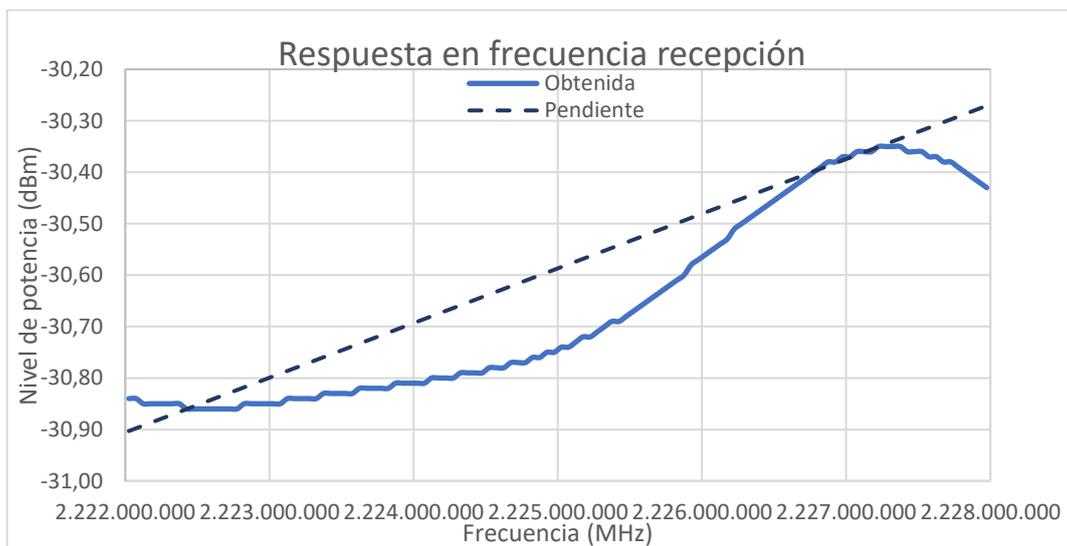


Ilustración 4-26 Gráfica respuesta en frecuencia

4.4 Conclusiones de los resultados

En cuanto a los resultados de las distintas pruebas, se comenta lo siguiente de cada una de ellas:

➤ **Prueba de verificación de interconexión de las cadenas de transmisión y recepción:**

Se ha realizado correctamente la configuración de los equipos, en base a la Tabla 4-4 y Tabla 4-8, tanto en frecuencia, ganancia y atenuación para las dos cadenas de la estación (transmisión y recepción). A su vez, los niveles de potencia, atenuación, ajustes de ganancia y conversiones de frecuencia se han verificado que sean los correctos, en base a las configuraciones anteriores, para los puntos determinados en la estación. Concretamente los definidos en la Tabla 4-6 y Tabla 4-7 para el ascendente, mientras que en el caso, del descendente en la Tabla 4-9 y Tabla 4-10. Además, se cumple con la condición de que la PIRE sea (≥ 70 dBW).

➤ **Pruebas de cadena de transmisión:**

- **Potencia de salida y rango:** Prueba realiza con éxito, puesto que se ha comprobado la potencia máxima del SSPA para las configuraciones de la Tabla 4-13, modificando la atenuación del SSPA y la ganancia del UC para cada caso. A su vez, se ha realizado una curva AM/AM (Ilustración 4-16) para corroborar que en los casos propuestos se trabaja con una ganancia lineal, por lo que habría margen en la estación para alcanzar una mayor potencia, puesto que no se ha llegado aún al punto de saturación en el SSPA. Se ha realizado de esta manera para evitar entrar en dicha zona, pues es más susceptible a introducir espurios en la señal.
- **Detección de espurios:** La prueba se ha realizado adecuadamente, pues se ha realizado la medición de los espurios en banda y fuera de ella, como sus armónicos. A pesar de no haberse configurado una máscara en el SA, se comentan los resultados en base a los límites que se han establecido para cada uno de los casos. Para la Ilustración 4-17, ningún espurio debe superar los -30 dBm, como puede verse esto se cumple en dicha figura. Respecto a la Ilustración 4-18, Ilustración 4-19, Ilustración 4-20, Ilustración 4-21, Ilustración 4-22 e Ilustración 4-23 se determina la condición de que ningún espurio debe ser superior a -55 dBm, se puede ver que también se cumple con dicha condición. Con esta prueba se comprueba que se está dentro de los valores apropiados para que no se produzca emisiones en otras señales que puedan interferir otros sistemas de radiocomunicaciones. Además, se comprueba que no exista dentro de la banda de transmisión espurios que puedan introducir ruido.

- **Respuesta en frecuencia:** Para esta prueba se establecen una serie de requisitos para que se esté dentro de unos valores apropiados para que no exista distorsión de la señal. Uno de ellos es que la respuesta en frecuencia de la ganancia debe ser inferior a ± 1 dB sobre los ± 3 MHz alrededor de la frecuencia central para el canal ascendente. Como puede verse en los valores calculados en la Tabla 4-17 el valor es inferior dando en este caso $\pm 0,37$ dB. El otro es que la pendiente de ganancia sea de $\leq 0,2$ dB/MHz, cumpliéndose puesto que es inferior, siendo de $0,15604$ dB/MHz.
- **Ruido de fase:** El resultado de la prueba se puede ver en la Ilustración 4-25. En ella se puede apreciar que el ruido de fase (dB/Hz) para el desplazamiento de frecuencia (Hz) de 10 Hz, 100 Hz, 1KHz, 10 KHz, 100 KHz y 1 MHz de la potencia transmitida, ha pasado la prueba correctamente bajo esos términos. Con esto, se ha verificado que, en la generación de la señal, las ampliaciones y el resto de las operaciones en el tratamiento de la señal no incluirán ruido que pueda presentar distorsiones en la transmisión de la señal.

➤ **Prueba de la cadena de recepción:**

- **Respuesta en frecuencia:** Para esta prueba se establecen una serie de requisitos para que se esté dentro de unos valores apropiados para que no exista distorsión de la señal. Uno de ellos es que la respuesta en frecuencia de la ganancia debe ser inferior a ± 1 dB sobre los ± 3 MHz alrededor de la frecuencia para el canal descendente. Como puede verse en los valores calculados en la Tabla 4-21 el valor es inferior dando en este caso $\pm 0,26$ dB. El otro sería que la pendiente de ganancia sea de $\leq 0,2$ dB/MHz, cumpliéndose puesto que es inferior, siendo de $0,10625$ dB/MHz.

5 Conclusiones y perspectivas futuras

Al inicio de este proyecto, se ha descrito qué es un GNSS, cómo está estructurado, sus características, sus aplicaciones, su funcionamiento y sus fuentes de error. Una vez que esos conceptos han sido descritos, se describen los diversos sistemas GNSS más relevantes, como son el GPS, GLONAS, BeiDou y Galileo, profundizando más en este último, al tratarse del GNSS europeo.

A continuación de lo anterior, cómo un GNSS en definitiva es un sistema de radiocomunicaciones, se ha realizado una descripción de los parámetros y cálculos más relevantes que permiten garantizar el correcto funcionamiento de dichos sistemas.

El siguiente paso ha sido definir una estación prototipo, en base a los conocimientos adquiridos, determinando su misión y especificaciones de la antena y sistemas de esta. Para ello, se ha desarrollado cada uno de los sistemas y subsistemas que la componen, detallando los equipos empleados. Con todo ello, se ha logrado plantear, realizar y comentar un conjunto de pruebas para corroborar que la estación cumple con las especificaciones descritas y que podrá funcionar sin problemas, cumpliendo adecuadamente con su propósito, teniendo en cuenta que la vida útil de los satélites del segmento espacial tendrá una vida útil de 12 años. Otros aspectos que han sido desarrollados en este proyecto son el análisis, comprensión y resolución de problemas.

Por otro lado, respecto a los objetivos planteados en este proyecto, se han logrado realizar todos con éxito, debido a que se ha conseguido implementar y llevar a cabo cada uno de los apartados y pruebas descritos en el proyecto. En cuanto a la planificación, se ha cumplido cada uno de los hitos e incluso se ha logrado finalizar antes de lo estipulado. Sin embargo, hay que destacar que han surgido problemas durante la realización de las pruebas, estos comprenden, por ejemplo, la asimilación y comprensión de las pruebas a llevar a cabo, como problemas entre las conexiones de los equipos, el aprendizaje de su funcionamiento e indisponibilidad de equipos de medida. A pesar de todo lo anterior, no ha sido necesario introducir ningún tipo de cambios para garantizar que las metas del proyecto fueran cumplidas.

Finalmente, existen pruebas que han quedado pendientes y que podrían tomarse como trabajo futuro, estas serían las siguientes:

- Lograr alcanzar una pendiente de ganancia de $\leq 0,1$ dB/MHz en la prueba de respuesta en frecuencia.
- Realizar un lazo en la estación, usando un TLT para poder conectar las cadenas de transmisión y recepción, con el fin de realizar mediciones de *ranging*.
- Realizar un *TM Loop* y *TC Loop* en la banda base para corroborar su correcto funcionamiento.

- Disponer de una antena que cumpla con los requisitos propuestos o un equipo con el que para poder llevar a cabo una simulación de un pase con una red de satélites.
- En qué situaciones el GPS deja de tener sentido, como en interiores y qué alternativas existen para la geolocalización.

6 Glosario

ACU	Antenna control unit
AM/AM	Measured data of amplitude to amplitude
ARNS	Aeronautical Radio Navigation Services
ASIC	Application-specific integrated circuit
Att	Attenuation
AZ	Azimuth
BB	Base band
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CC-M	Centrales de Control de Reloj
CDMA	Code Division Multiple Access
CS	Commercial Service
CW	Continuous wave
DC	Down converter
DGPS	Differential Global Positioning System
DoD	Department of Defense
DSSS	Direct sequence spread spectrum
EGEP	European GNSS Evolution Program
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EL	Elevation
ESA	Agencia Espacial Europea
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FI	Frecuencia intermedia

FOC	Full Operational Capability.
G2G	Galileo Second Generation
GBAS	Ground Based Augmentation System
GCC	Galileo Control Centers
GCS	Ground Control Segment
GEO	Geostationary Earth Orbit
GLONASS	Global Navigation Satellite System.
GMS	Ground Mission Segment
GNSS	Global Navigation Satellite System.
GPS	Global Positioning System
GSS	Galileo Sensor Stations
GST	Galileo System Time
IF	Intermediate frequency
IOC	Initial Operational Capability
IOV	In-Orbit Validation
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System.
IS	Interface Specification
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones
LASS	Local-area augmentation system
LCHP	Left-handed circular polarization
LEO	Low Earth Orbit
LNA	Low Noise Amplifier
LTI	Linear Time-Invariant
MCS	Master Control Station

MEO	Medium Earth Orbit.
MEOLUT	Medium Earth Orbit Local User Terminals
MFSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System
MS	Monitor Stations
NASA	National Aeronautics and Space Administration.
NAVSAT	Navy Navigation Satellite System
NAVSEC	Navigation Satellite Executive Committee.
NAVSTART-GPS	Navigation System Timing and Ranging-Global Positioning System.
NRZ-L	Nonreturn-to-zero-level
NRZ-M	Non-return-to-zero mark
NTP	Network Time Protocol
OCS	Segmento de Control de Operacional
OS	Open Service
PHM	Passive Hydrogen Maser
PIRE	Potencia isotrópica radiada por la antena
PM	Phase Modulation
PNT	Positioning, navigation, and timing
PRN	Pseudorandom Noise
PRS	Public Regulated Service
PSK	Phase Shift Keying
PVT	Position, Velocity and Time
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System.
RAND	Research and Development.

RBW	Resolution bandwidth
Ref	Reference
RF	Radiofrequency
RHCP	Right-handed circular polarization
RNP	Required Navigation Performance
RNSS	Radio Navigation Satellite Services
RX	Reception
SA	Signal Analyzer
SAR	Search and Rescue
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SCC	Centro de Control del Sistema
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SLR	Estaciones de Laser Ranging
SoL	Safety of Life
SSPA	Solid State Power Amplifiers
SWT	Stationary Wavelet Transform
TC	Telecommand
TDMA	Time Division Multiple Access
TM	Telemetry
TS/US	Time Synchronization/Upload Stations
TTC	Tracking & Telemetry & Command
TWTA	Traveling-wave tube amplifier
TX	Transmission
UC	Up converter

UHF	Ultra High Frequency
ULS	Uplink Stations
VBW	Video bandwidth
VCO	Voltage-controlled oscillator
BER	Bit error rate
WAAS	Wide Area Augmentation System

7 Bibliografía

A continuación, se enumera toda bibliografía utilizada en este proyecto, esto incluye texto, ecuaciones e imágenes.

1. J. Anguera and A. Pérez, "Teoría de antenas", Ingeniería La Salle, 2008.
2. Razavi, Behzad, "RF Microelectronics", primera edición, Prentice Hall (1997).
3. Bruce R. Elbert, "Satellite Communication Applications Handbook", 2ª edición, Artech House (30 noviembre 2003).
4. Dennis Roddy, "Satellite Communications", 3ª edición, McGraw-Hill Education; N.º 3 edición (16 mayo 2001).
5. Hofmann-Wellenhof, Bernhard, Lichtenegger, Herbert, Wasle, Elmar, "GNSS – Global Navigation Satellite Systems", 2008, Springer-Verlag Wien, ISBN 978-3-211-73012-6.
6. Thomas A. Milligan, "Modern Antenna Design", John Wiley & Sons Inc; 2nd Edition (29 julio 2005).
7. Elliot D. Kaplan, "Understanding GPS, Principles and Applications", 2nd Edition, Artech House; Revised edición (1 enero 2006).
8. Juan José Murillo Fuentes, "Fundamentos de Radiación y Radiocomunicación", 2ª Edición, Universidad De Sevilla, Sevilla, 2013.
9. A.Pozo-Ruz, A.Ribeiro, M.C.García-Alegre, L.García, D.Guinea, F.Sandoval, "Sistema de posicionamiento global (GPS): Descripción, análisis de errores, aplicaciones y futuro", Instituto de Automática Industrial, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Dpto. de Tecnología Electrónica, Universidad de Málaga, Mundo electrónico, ISSN 0300-3787, N.º 306, 2000, Arganda, Madrid.
10. Javier Hernández Sánchez, "Proyecto fin de carrera en Sistemas de comunicación por satélite: utilización en los sistemas de navegación aeronáuticos", 26 noviembre 2015, ID de Registro 40769.
11. Miguel Serna Agudo, "Trabajo fin de grado: Simulación del enlace descendente de Galileo", Universidad Carlos III de Madrid, Departamento Teoría de la Señal y Comunicaciones, Leganés, junio 2015.
12. Sonia Vilchez Benigno, "Trabajo Fin de Máster: Descripción y representación de las señales GNSS", Departamento Tecnologías Radiocomunicación, junio de 2019, Universidad Oberta de Catalunya.
13. Juan Luis Torrejón Guadalupe y Ernesto José Álvarez Sánchez, "Proyecto final de Carrera: Tutoriales Multimedia para sistemas de telecomunicación", Escuela universitaria de ingeniería técnica de telecomunicación de Madrid, 30 de septiembre 2013.
14. David Abelardo García Álvarez, "Proyecto final de carrera: Sistema GNSS (Global Navigation satellite system)", Escuela politécnica superior de la Universidad autónoma de Madrid, enero 2008.
15. Álvaro Catalina Madrid, "Trabajo fin de grado: Análisis de los sistemas de navegación por satélite", Universidad de Alcalá, Madrid, septiembre, 2017.
16. Jari Nurmi, Elena Simona Lohan, Stephan Sand, Heikki Hurskainen, "Galileo Positioning Technology", Ed. Springer, 2015.

17. Ahmed El-Rabbani, "Introduction to GPS: The global positioning system", Ed. Mobile Communication series (Artech house), 2002.
18. Matias Sánchez Caballero, "Galileo: El proyecto europeo de radionavegación por satélite", Antena de Telecomunicación, COITT, Pags 51-54, marzo, 2006.
19. Elliott D. Kaplan, Christopher J. Hegarty, "Understanding GPS: Principles and applications", Ed. Artech house, 2006.
20. Olivier Crop, "The European Satellite Navigation Programmes EGNOS and Galileo", European GNSS Agency (GSA), 2014.
21. "Galileo: The European Programme for Global Navigation Services", ESA publications, 2005.
22. "GNSS data processing, Volume I: Fundamentals and algorithms European", ESA publications, 2013.
23. "Programas europeos de navegación por satellite: Galileo y Egnos", Comisión europea, 2008.
24. Galileo's Earth article bulletin, ESA/ESTEC, 2013.
25. "Salvage in Space, recovering Galileo 5 and 6Galileo's Earth article bulletin", ESA, 2015.
26. "GNSS market report", issue 4, GNSS agency, 2015.
27. "Why we need Galileo?", Brochure, European Union, 2011.
28. Sistema Global de Navegación con ayuda de satélites - <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11417/fichero/Cap%C3%ADtulos+%252F2-+Sistema+de+Navegacion+con+ayuda+de+sat%C3%A9lites.pdf> - (20/02/21)
29. GNSS Segments - https://www.researchgate.net/figure/GNSS-segments-GNSS-Manual-June-2012_fig4_337972711 - (20/02/21)
30. Diseño geodésico - <https://slideplayer.es/slide/3404068/> - (20/02/21)
31. What is GNSS? - <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/galileo/galileo-european-global-satellite-based-navigation-system> - (20/02/21)
32. Introducción a los sistemas GNSS - <https://www.slideshare.net/CarlosDuarte39/introduccion-a-los-sistemas-gnss> - (20/02/21)
33. Teledetección satelital, Satélites y órbitas: tipos y usos - <http://zientzajoleak.pbworks.com/w/page/126126254/RSS13> - (20/02/21)
34. Nos ponemos en órbita (III): MEO y GEO - <https://entendiendonuevatecnologias.wordpress.com/2016/09/19/nos-ponemos-en-orbita-iii-meo-y-geo/> - (22/02/21)
35. <http://astroblog.cosmobic.com/2019/06/01/difference-leo-meo-geo-satellites/> - (22/02/21)
36. What's the difference between LEO, MEO and GEO Satellites? - <http://astroblog.cosmobic.com/2019/06/01/difference-leo-meo-geo-satellites/> - (22/02/21)
37. Las 5 órbitas de los satélites - <https://www.sutelco.com/blog/las-5-%C3%B3rbitas-de-los-sat%C3%A9lites> - (22/02/21)
38. LEO, MEO, GEO, HEO y SSO - <http://curioseantes.blogspot.com/2015/10/leo-meo-geo-heo-y-sso.html> - (22/02/21)

39. Clasificación de los satélites artificiales -
https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos_02_03/RADIO_ASTRONOMIA/web/Indice/S_art/I_s_art/3_3/Clas.htm - (25/02/21)
40. Sistemas de posicionamiento global GPS - https://www.u-cursos.cl/ciencias/2013/2/CS06025/1/material_docente/detalle?id=783275 - (25/02/21)
41. Space Segment, GPS - <https://www.gps.gov/systems/gps/space/> - (25/02/21)
42. GPS Applications - <https://www.gps.gov/applications/> - (25/02/21)
43. Sistemas espaciales - Fernando Davara Rodriguez -
<http://www.uma.es/foroparalapazenelmediterraneo/wp-content/uploads/2015/03/II-Sistema-espaciales-por-Fernando-Davara-Rodriguez1.pdf> - (25/02/21)
44. Comunicación de la Comisión - Galileo - La participación de Europa en una nueva generación de servicios de navegación por satélite - <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:51999DC0054&from=ES> - (25/02/21)
45. Galileo Telecommunications -
https://descanso.jpl.nasa.gov/monograph/series13/DeepCommo_Chapter4--141029.pdf - (25/02/21)
46. El Sistema Galileo, Luis Armendariz, Universidad Politècnica de València -
https://empretsinf.blogs.upv.es/files/2019/05/Introduccion_a_galileo-v0.3.pdf - (25/02/21)
47. Birth of the european satellite navigation constellation: Galileo In-Orbit Validation -
https://www.dlr.de/dlr/en/Portaldata/1/Resources/documents/2011_1/BR-297_Galileo_EN_web.pdf - (28/02/21)
48. Sistema de Navegación Galileo Segmento Terreno
https://fundacioncarolina.es/wp-content/uploads/2017/07/Galileo_CIBEAM.pdf - (28/02/21)
49. Galileo - <http://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo> - (28/02/21)
50. ESA Communications production, 2011,
http://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications/ESA_BR297_Birth_of_the_European_satellite_navigation_constellation - (30/02/21)
51. Página web de la ESA: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation - (3/03/21)
52. Página web de la GSA: <http://www.gsa.europa.eu> - (3/03/21)
53. Página web de Navipedia: <http://www.navipedia.net> - (3/03/21)
54. Ground Control Segment: Satellite communications, earth observation, navigation and positioning and control stations -
https://www.indracompany.com/sites/default/files/indra_gcs_ground_control_segment_en_baja.pdf - (3/03/21)
55. Direct Sequence CDMA -
<http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr05/cdma/dscdma.htm> - (3/03/21)
56. TFDMA, FDMA and CDMA -
http://acts.ing.uniroma1.it/courses/comelet/Slides/20071217_TEL_lecture_2.pdf - (3/03/21)

57. Access Technologies (FDMA, TDMA and CDMA) -
<https://www.itu.int/osg/spu/ni/3G/technology/> - (5/03/21)
58. Development of BeiDou Navigation Satellite System -
<https://slideplayer.com/slide/6539751/> - (5/03/21)
59. Constantino Pérez Vega,
https://personales.unican.es/perezvr/pdf/Antenas%20con%20Reflector%20Parab%20C3%B3lico_V4.pdf, Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Cantabria, 2008. (6/03/21)
60. Sistemas de Telecomunicación - Constantino Pérez Vega -
<https://personales.unican.es/perezvr/pdf/Compilacion4.pdf> - (6/03/21)
61. Comunicaciones por Satélite - Ramón Martínez Rodríguez -
<https://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/csat/material/CSA08-1-Introduccion.pdf> - (6/03/21)
62. Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Alberto Martín Pernía,
https://www.unioviado.es/ate/alberto/TEMA_4_Telecomunicacion_Telem.pdf - (6/03/21)
63. Satellite Communication Link Power Budgeting -
<https://www.tutorialsworld.com/satcom/link-power-budget/link-power-budget-index.htm> - (10/03/21)
64. Small satellite link budget calculation - https://www.itu.int/en/ITU-R/space/workshops/2016-small-sat/Documents/Link_budget_uvigo.pdf
65. Satellite Space link: Link-power Budget - https://www.just.edu.jo/~hazemot/Session%208_%20link%20budget.pdf - (10/03/21)
66. Cálculo de la atenuación en el espacio libre -
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-2-199408-I!!PDF-S.pdf - (10/03/21)
67. Satellite Communication - Link Budget -
https://www.tutorialspoint.com/satellite_communication/satellite_communication_link_budget.htm - (10/03/21)
68. Determination of the G/T ratio for earth stations operating in the fixed-satellite service - https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/s/R-REC-S.733-2-200001-I!!PDF-E.pdf - (10/03/21)
69. Radiación y radiocomunicación, 4º Ingeniería de Telecomunicación, Tema 4: Ruido, Juan José Murillo Fuentes,
<https://personal.us.es/murillo/docente/radio/documentos/tema4.pdf> - (10/03/21)
70. Análisis en el dominio de la frecuencia -
http://www.ieef.upm.es/webantigua/spain/Asignaturas/Servos/Apuntes/11_RespFr.pdf - (10/03/21)
71. Análisis de la Respuesta Frecuencial de Sistemas LTI -
http://mapir.uma.es/varevalo/teaching/automatica/pdfs/Tema%2005%200-%20Respuesta%20en%20frecuencia%20v6_vicente.pdf - (10/03/21)
72. Spurious Emissions - http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.329-7-199707-S!!PDF-E.pdf - (13/03/21)
73. Espurios y Armónicos -
<http://divulgacioncem.blogspot.com/2016/04/espurios-y-armonicos.html>

74. Mezcla y conversión de frecuencia -
<https://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/4.-%20Mezcladores.pdf> - (13/03/21)
75. Introducción a los sistemas de telecomunicación -
http://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/7053/7053539/tema_1_2007_2008.pdf - (13/03/21)
76. Cálculo de Radioenlace -
<https://www.analfatecnicos.net/archivos/24.CalculoDeRadioenlace.pdf> - (13/03/21)
77. Sensibilidad del equipo receptor -
<http://www.radioenlaces.es/articulos/sensibilidad-del-equipo-receptor/> - (13/03/21)
78. Estudio de la Estabilidad en el dominio Frecuencial -
http://isa.uniovi.es/docencia/ra_marina/UCLM_TEMA10.PDF - (13/03/21)
79. Estabilidad en el dominio de la frecuencia -
<http://www.ieef.upm.es/webantigua/spain/Asignaturas/Servos/Apuntes/PPTcap12EstFr.pdf> - (19/03/21)
80. Análisis en el dominio de la frecuencia -
http://www.ieef.upm.es/webantigua/spain/Asignaturas/Servos/Apuntes/11_RespFr.pdf - (19/03/21)
81. Spread Spectrum -
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/83/1/CD-0055.pdf> - (22/03/21)
82. Modulación DSSS para transmisión de información a través de líneas eléctricas de potencia -
<https://www.redalyc.org/pdf/849/84921327002.pdf> - (22/03/21)
83. Modulaciones angulares -
http://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/7054/7054392/tema_3_2007_2008_a.pdf - (24/03/21)
84. Modulación de fase, PM -
<https://www.textoscientificos.com/redes/modulacion/fase> - (19/03/21)
85. Modulación de fase, PM - <http://escueladeltrabajo.net/UNIDAD%203.pdf> - (24/03/21)
86. Spead Spectrum -
http://www.radiocomunicaciones.net/pdf/spread_spectrum.pdf - (25/03/21)
87. Modulación por desplazamiento de fase -
https://recursos.mec.edu.py/kiwix/wikipedia_es_all_maxi/A/BPSK - (25/03/21)

8 Anexos

En este apartado se describen parámetros de antena y del analizador de espectros.

8.1 Fundamentos de antena relevantes:

- **Directividad**: se trata de concentrar la potencia que radia o recibe la antena en una determinada dirección. Al apuntar en una dirección concreta, esta no recibe señales de otras direcciones.
- **Ganancia**: depende de la potencia que se entrega a la antena. Dependerá de la eficiencia de la antena.
- **Polarización**: se refiere la figura de la onda plana y perpendicular al eje de propagación.
- **Ancho de banda**: Rayo de frecuencias en el que la ganancia de la antena no decae de un valor máximo.
- **Figura de ruido**: parámetro que indica cómo empeora el equipo con la relación S/N de la salida con el S/N de la entrada.
- **Tipo de conectores**:
 - **N**: Se pueden usar hasta una frecuencia de 18 GHz.
 - **BNC**: Se pueden usar hasta una frecuencia de 4 GHz.
 - **SMA**: Se pueden usar hasta una frecuencia de 20 GHz. Algunos modelos de SMA pueden llegar hasta 26 GHz, aunque para aplicaciones hasta esas frecuencias o superiores sería más recomendable utilizar conectores de 3.5 mm ó conectores K o conectores de 2.4 mm.
- **Divisor (*splitter*)**: La señal de entrada sale por las salidas a la misma frecuencia, esta no cambia, pero si que, con menor potencia, ya que se divide entre sus salidas. Por ejemplo, un divisor de dos salidas provocaría dos señales a la salida de aproximadamente 3 dB menos, mientras que de 4 salidas serían de aproximadamente de 6 dBs. En cuanto a las salidas que no se utilizan se deben conectar cargas adaptadas. Estas suelen ser de 50 ohmios.

- **Acoplador**: Puede tener dos configuraciones:
 - Una compuesta por un puerto de entrada y dos de salida. En uno de los puertos de salida, se consigue una muestra de la señal con un nivel de potencia inferior, con la finalidad de poder llevar a cabo mediciones y testeos internos, para de esta manera obtener información del nivel de potencia y de la frecuencia de la señal. En cambio, en el otro puerto de salida la señal sale a la misma frecuencia y únicamente sufre pérdidas debido al camino.
 - La otra configuración consiste en la función inversa, con dos 2 entradas y otra de salida, que recibe el nombre de combinador.

8.2 Analizador de espectros

- **Nivel de referencia**: nivel total de entrada en el analizador de espectros. Nivel máximo.
- **Atenuador de Referencia**: el número en el que se encuentra la señal y dependerá del valor de referencia. Evita la saturación en la entrada.
- **Filtro resolución**: se trata de un filtro de pasa banda, cuanto menor sea mejor. Se consigue bajar el ruido.
- **Filtro de video (VBW)**: se trata de un filtro pasa bajo, que suele utilizarse para eliminar ruido, se encuentra enmascarado. Cuanto más pequeño sea el valor, mejor se verá la señal.
- **Asterisco a la derecha**: esto quiere decir que los parámetros están desacoplados entre sí, como el SPAN, filtros, etc. La solución sería cambiar dichos parámetros.
- **MAX Hold**: siempre hace una conservación de máximos.
- **Sobrecarga**: internamente hay componentes no lineales, es decir, generan señales no deseadas y por ello aparecen los armónicos de la señal de entrada. Estos aumentan más rápidamente que el ruido de entrada. Los armónicos de 3º orden aumentan más que los de 2º orden.