Universidad de La Laguna

Escuela Politécnica Superior de Ingeniería

Sección de Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval

TRABAJO DE FIN DE GRADO

"Funcionalidad del Sistema de Navegación Galileo"

Grado en Ingeniería Radioelectrónica Naval

Autor: *David Rodríguez Nóbrega*

Tutor: *José Ángel Rodríguez Hernández*

Septiembre 2019

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

“Funcionalidad del Sistema de Navegación Galileo”

GRADO EN INGENIERIA RADIOELECTRONICA NAVAL

David Rodríguez Nóbrega

Septiembre 2019

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

El Dr. D. José Ángel Rodríguez Hernández, profesor de la Universidad de La Laguna, y adscrito al Área de Ciencias y Técnicas de la Navegación

C e r t i f i c a:

Que bajo su dirección se ha realizado el Trabajo de Fin de Grado del alumno D. David Rodríguez Nóbrega, titulado

"***Funcionalidad del Sistema de Navegación Galileo***"

y para que así conste a los efectos oportunos, firma el presente en Santa Cruz de Tenerife a 2 de Septiembre de 2019.

José Ángel Rodríguez Hernández

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Agradecimientos

Me gustaría agradecer el apoyo recibido por parte de Don José Ángel Rodríguez Hernández, tanto profesional como personal, para que este Trabajo de Fin de Grado haya podido llegar a buen puerto.

Quiero dar las gracias al resto del personal docente de la “Escuela de Náutica”, los cuales, me han aportado una gran formación académica y me han animado a seguir hasta el final.

De igual manera, a los compañeros que he tenido, siempre han estado ahí cuando los he necesitado.

Agradecer a mi familia el apoyo recibido y los constantes ánimos recibidos en los momentos más complicados, sin ellos, esto no hubiera sido posible.

Por último y no menos importante, agradecerle a mi compañera sentimental, Gara, todos los momentos en los que me ha ayudado a lo largo de la carrera, como en la culminación de este proyecto.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Índice

Pág.

Resumen 13

Abstract 14

Objetivos, material y métodos 16

Capítulo 1. Inicios de la radionavegación 19

Introducción 19

1.1 ¿Qué es la radionavegación? 20

1.2 Sistemas tácticos de navegación 21

1.2.1 El goniómetro 22

1.3 Sistemas hiperbólicos 23

1.3.1 El DECCA 24

1.3.2 Los Radiofaros CONSOL 27

1.3.3 Sistema de navegación GEE 28

1.3.4 El LORAN 31

1.3.5 El VOR 33

1.3.6 El sistema OMEGA 36

1.3.7 eLoran 40

Capítulo 2. El GNSS y el TRANSIT 43

Introducción 43

2.1 Sistema global de navegación por satélite. (GNSS) 45

2.2 Sistema TRANSIT 47

2.2.1 Funcionamiento 50

Capítulo 3. Sistemas de navegación satelitales actuales 54

Introducción al capítulo 3 54

3.1 Creación del sistema global de navegación por satélite 56

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

3.1.1 Segmentos de un GNSS 57
3.2 NAVSTAR-GPS 61
3.2.1 Historia y desarrollo 62
3.2.2 Lanzamientos satelitales 66
3.2.3 Funcionamiento 67
3.2.4 Señales GPS 71
3.2.5 Códigos GPS 72
3.2.6 Sistema de tiempo en los satélites GPS 73
3.2.7 Fuentes de error 74
3.2.8 DGPS 75
3.2.8.1 Funcionamiento 76
3.2.8.2 Sistemas de mejoras en la precisión GPS 77
3.2.8.3 ¿Cómo funcionan estos sistemas? 83
3.3 GLONASS 84
3.3.1 Historia y desarrollo 87
3.3.2 Lanzamientos satelitales 93
3.3.3 Funcionamiento 94
3.3.4 Señales GLONASS 95
3.3.5 Códigos GLONASS 95
3.3.6 Sistema de tiempo en los satélites GLONASS 96
3.3.7 Fuentes de error 97
3.4 BeiDou 99
3.4.1 Historia y desarrollo 102
3.4.2 Lanzamientos satelitales 106
3.4.3 Funcionamiento 107
3.4.4 Señales BeiDou 107
3.4.5 Sistema de tiempo en los satélites BeiDou 109
3.5 QZSS 109
3.5.1 Historia y desarrollo 111
3.5.2 Lanzamientos satelitales 113

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

3.5.3 Funcionamiento 113
3.5.4 Señales QZSS 114
3.5.5 Sistema de tiempo en los satélites QZSS 114
3.6 Galileo 114
3.6.1 Historia y desarrollo 118
3.6.2 Colaboración internacional en el desarrollo 123
3.6.3 Los problemas relacionados con la financiación 124
3.6.4 Servicios y señales ofrecidos por Galileo 127
3.6.5 Lanzamientos satelitales 128
3.6.6 Sistema de tiempos en los satélites Galileo 128

Capítulo 4. Similitudes y diferencias entre Galileo y los GNSS 131
Introducción 131
4.1 Comparativa entre el sistema Galileo y los principales GNSS 133
4.1.1 Generalidades de cada sistema GNSS 134
4.1.2 Comparativa entre los diferentes sistemas GNSS 142

Conclusiones 144
Conclusions 145

Bibliografía 147

Glosario de términos 169

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Resumen

Este proyecto se presenta como finalización de los estudios de Grado en Ingeniería en Radioelectrónica Naval, en la Escuela Politécnica de Ingeniería – Sección de Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval, de La Universidad de La Laguna, con el título de ***"Funcionalidad del Sistema de Navegación Galileo"***.

Gracias a lo aprendido en la asignatura cursada llamada, "Sistemas de Radioayudas", he podido desarrollar gran parte del proyecto como por ejemplo, los sistemas de navegación actuales (GPS, GLONASS, BeiDou . . .), y algunos antiguos como el sistema TRANSIT.

En este trabajo se va a exponer las virtudes de la creación de un sistema de navegación por satélite (GNSS), por parte de la Unión Europea, a través de la Agencia Europea de Navegación por Satélite, realizándose además, un análisis exhaustivo de la parte económica, que ha sido uno de los principales escoyos para la creación y desarrollo de dicho sistema.

También se describirán los otros sistemas actuales que compiten con el sistema europeo, describiendo primeramente la necesidad de su creación y los avances que tuvieron para finalmente realizar una comparativa entre ellos, el Galileo y el primer sistema de navegación con satélites, llamado TRANSIT.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

A b s t r a c t

This project is presented as the completion of the degree studies in Naval Radioelectronics Engineering, in the Polytechnic School of Engineering - Nautical, Machines and Naval Radioelectronics Section, University of La Laguna, known as ***"Functionality of the Galileo Navigation System".***

Thanks to what I learned in the course called, "Radio Aid Systems", I have been able to develop much of the project as for example, current navigation systems (GPS, GLONASS, BeiDou . . .), and some old as the TRANSIT system.

In this work, the virtues of the creation of a satellite navigation system (GNSS) by the European Union, through the European Satellite Navigation Agency, will be explained. In addition, an exhaustive analysis will be made of the economic part, which has been one of the main outlines for the creation and development of such a system.

It will also describe the other current systems that compete with the European system, first describing the need for their creation and the progress they had to finally make a comparison between them, Galileo and the first satellite navigation system, called TRANSIT.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Objetivos

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es conocer las características principales del sistema de navegación Galileo creado por la Unión Europea, y establecer las ventajas y diferencias que aporta frente a sus homólogos actuales.

Primeramente, se hará una revisión histórica de los diferentes sistemas de navegación, desde la radiogoniometría, sistemas hiperbólicos hasta los actuales sistemas satelitales con el fin de poner en contexto el trabajo.

Seguidamente se establecerá una comparativa entre los sistemas de navegación satelitales para ver la potencialidad y aplicaciones del sistema Galileo con respecto a otros sistemas de navegación similares.

Con ellos se pretende ver que ofrece el sistema Galileo y que no está disponible en los demás sistemas, independientemente del nexo común de todos estos sistemas que es el posicionamiento en el globo terrestre.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Material y métodos

Para la realización de este proyecto se ha utilizado los siguientes materiales y métodos:

- **Documentación bibliográfica.**

  Se han utilizado numerosos recursos web's y documentos en formato PDF de internet, para la elaboración del proyecto.

- **Métodos utilizados.**

  Se ha revisado infinidad de recursos web's, extrayendo el contenido necesario para realizar este proyecto. Además, se ha desarrollado una labor de investigación y análisis para obtener los datos más importantes y de mayor relevancia encontrados en cada uno de los sistemas descritos a lo largo de los diferentes capítulos, contrastando la información aportada por las diferentes páginas webs consultadas para cada uno de ellos.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

C a p í t u l o 1

Inicios de la radionavegación

Introducción.

A raíz de la invención de la radio y del envío de señales de radiofrecuencia fueron muchas las aplicaciones y utilidades que se dieron a este invento, entre ellas la de utilizar dichas señales para localización, situación, medidas de distancias de blancos, etc., sobre todo en el medio marítimo y en el campo militar.

En este primer capítulo explicaremos los inicios de la radionavegación y los primeros sistemas que permitían situarse sobre una carta náutica, como la radiogoniometría y, los sistemas hiperbólicos como fueron el OMEGA o el DECCA.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

1.1 ¿Qué es la radionavegación?

La radionavegación consiste en aplicar las propiedades de propagación y alcance de las transmisiones radioeléctricas, en determinadas frecuencias de radio, para determinar la posición de una embarcación.

Son diversos los sistemas que se utilizan para ello, desde los primeros radiogoniómetros o radiofaros hasta los más sofisticados sistemas satelitarios de que se dispone en la actualidad, que instalados en determinadas órbitas alrededor del planeta, permiten obtener diferentes datos como la posición, la altitud o la velocidad. [1, 2, 3]

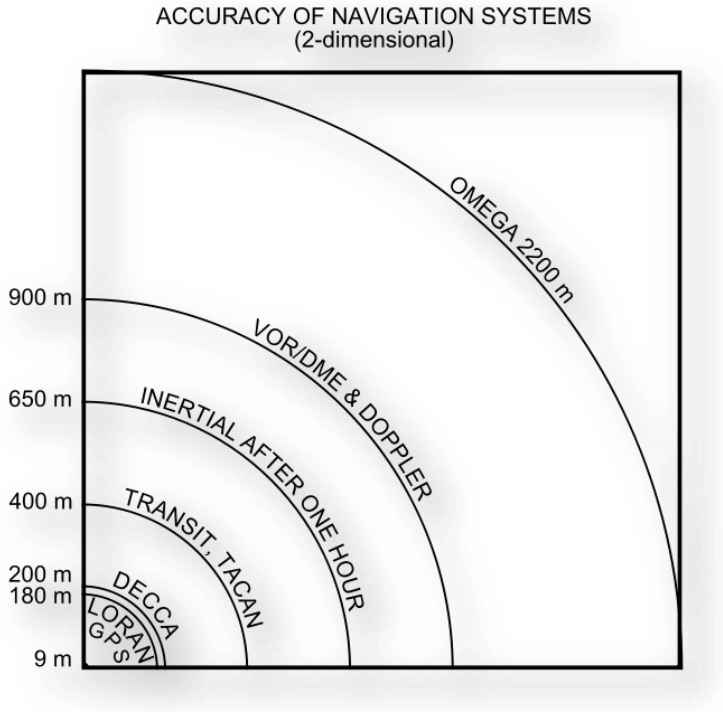

Figura 1.1. Precisión de los sistemas de navegación en 2 dimensiones. [1]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

1.2 Sistemas tácticos de navegación.

Los primeros sistemas electrónicos de radionavegación se empezaron a utilizar a principios del siglo XX, cuando se consiguió llevar a cabo transmisiones de ondas de radio.

En el año 1902, se patenta el primer sistema de detección de dirección, realizado por John Stone Stone. Su deseo fue crear un equipo que fuera capaz de detectar la dirección de la que procedía un mensaje enviado a una distancia de entre 20 y 70 millas. Este sistema se intentó llevar a los barcos debido a que, en condiciones meteorológicas adversas, la navegación era muy complicada. [4, 5]

En 1930, el invento de John Stone Stone fue aplicado y desarrollado por el científico escocés Robert Watson-Watt, que usaría la RAF (**R**oyal **A**ir **F**orce) en la Batalla de Inglaterra (1940). [6, 9]

Durante de la Segunda Guerra Mundial, se empezaron a utilizar sistemas que estaban basados en transpondedores para emitir señales que usaba el sistema para conocer la ubicación con una precisión baja. Se empleaban diferentes tipos de antenas direccionales en las estaciones de tierra llamadas radiofaros, con lo que en todo momento se mantenían controladas las aeronaves. Este aparato calculaba la posición midiendo el tiempo que tardaba el pulso producido por la estación costera en llegar al avión. [2]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

1.2.1 El goniómetro.

A partir de estos métodos, se empezó a utilizar la **radiogoniometría**, que nos permite determinar la posición relativa de una nave.

Está basado en la utilización de una antena directiva, que gira 360º en busca de una señal determinada. Para tal fin se utilizan antenas de cuadro que están formadas por varias espiras que se encuentran en un plano compuesto por varios dipolos que están unidos al cuadro, y que en su conjunto forman un diagrama de radiación en forma de cardiode.

Figura 1.2. Antena de cuadro para radiogoniometría. [2]

Con el paso del tiempo, se produjo una mejora sustancial de esta técnica, se usaron comparaciones de una señal medida con varias antenas pequeñas, o

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

también se aprovechaba un sólo solenoide que era muy directivo, de manera que se consiguieron receptores bastante más precisos, de menor tamaño y más fáciles de operar.

El sistema supo adaptarse a la aparición del *transistor* y los *circuitos integrados*, con lo que se logró reducir aún más el tamaño, y restarle complejidad. Debido a ello, a partir de la década de 1960 su uso fue en aumento y se bautizaron con el nuevo nombre de **radiogoniómetro automático**, o sus siglas en inglés **ADF**, (**A**utomatic **D**irection **F**inder). [7, 8, 9]

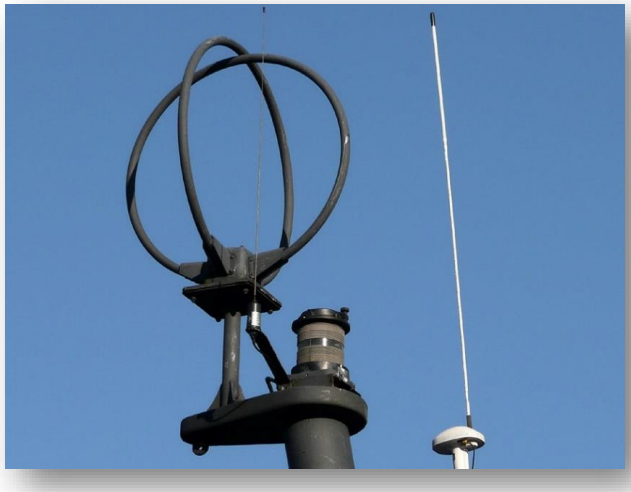

Figura 1.3. Antena tipo Bellini Tossi usada en buques. [3]

1.3 Sistemas hiperbólicos.

Son aquellos que, a diferencia de los sistemas tácticos de navegación, no necesitan un transpondedor.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Son los sistemas cuya técnica de localización de la posición de los móviles se basa en la intersección de hipérbolas. Siendo la hipérbola el lugar geométrico de los puntos del plano donde la diferencia de distancias a los puntos fijos llamados *focos* es constante. [10, 11]

1.3.1 El DECCA.

Este sistema aparece en el año 1936, fue creado por el ingeniero estadounidense William J. O'Brien, y fue utilizado inicialmente para medir la velocidad de un avión respecto a un punto situado en tierra.

Es un tipo de sistema hiperbólico para el conocimiento de la posición que se basa en la emisión y recepción de señales de radio de onda continua que operan en el rango de frecuencias entre los 70 a los 130 kHz. El alcance varía dependiendo de varios factores, pero normalmente suele ser de unos 440 km, variando por la noche y siendo el doble de esta distancia por el día.

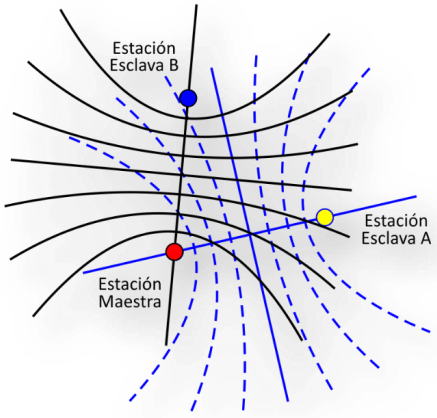

Figura 1.4. Funcionamiento de los sistemas hiperbólicos. [Elaboración propia].

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Está formado por una cadena de estaciones, una de ellas es la *estación maestra*, a la cual se le asignan varias tareas: supervisión, control y monitorización de la cadena, que normalmente formada por 2 o 3 *estaciones esclavas* que se encuentran alejadas entre unos 80 y 110 km de la *estación maestra*.

Su funcionamiento se basa en la creación de un haz hiperbólico entre la *estación maestra* y cada una de las *esclavas* (figura 1.4), que es donde se representa gráficamente las diferencias de fase existentes entre las emisiones de cada par de estaciones transmisoras, por lo que de esta manera un equipo receptor puede averiguar y revelar con exactitud la posición de cualquier objeto móvil en un momento determinado.

Figura 1.5. William O'Brian con su ayudante junto a un receptor DECCA de segunda generación. [4]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Se emplean diferentes frecuencias para cada estación transmisora, aunque todas ellas están relacionadas entre sí, por lo que se crea un haz hiperbólico entre un par de estaciones *(maestra – esclava)*, que tienen que estar sincronizadas tanto en fase como en frecuencia.

Si se quiere determinar con exactitud la posición de un objeto móvil, es necesario que el DECCA pueda usar tres estaciones transmisoras, y que se denominan "cadena DECCA".

Este sistema dependía mucho de la posición donde se encontraba el móvil con respecto a las estaciones transmisoras. Debido a la propagación, estas estaciones tenían un mayor alcance por el día que por la noche, siendo valores típicos los 740 y 470 km respectivamente, estas distancias también podían variar debido a la frecuencia a la que se trabajaba, el tipo de suelo, etc. [9, 12, 13, 14]

Figura 1.6. Receptor DECCA MK-21. [5]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

1.3.2 Los Radiofaros CONSOL.

Fue un sistema de ayuda a la navegación, desarrollado por el Dr. Erns Kramar en 1938, era capaz de proporcionar múltiples equiseñales fijas para fijar diferentes rumbos.

Estos radiofaros eran especiales ya que transmitían 2 tipos de señales:

- Las primeras eran omnidireccionales, permitiendo la marcación con un radiogoniómetro.
- Las segundas eran direccionales y podían recibirse con cualquier receptor.

Figura 1.7. Estaciones CONSOL en Europa [6]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

El ciclo de las señales tenía 60 signos de radiotelegrafía en forma de puntos y rayas. El transmisor se acoplaba a tres antenas verticales que se encontraban sobre una recta, con una distancia que oscilaba de los 2.500 a 3.000 metros y separadas entre sí tres longitudes de onda, las cuales trabajaban a una frecuencia de 300 kHz, dividían el horizonte en dos zonas, donde la parte útil de cada una de ellas tenía una amplitud de 120º aproximadamente.

Estos radiofaros CONSOL trasmitían por onda larga usando ondas de tipo A1 (radiotelegrafía de onda continua). Su alcance de noche podía superar las 1.000 millas. Los institutos hidrográficos de la mayoría de los países publicaban cartas náuticas especiales para este tipo de radiofaros. [15, 16]

Nombre de la estación	Indicativo	Ubicación	Frecuencia de operación (kHz)
Ploneis-Quimper	FRQ	Francia	257,0
Bushmills	MWN	Irlanda del Norte	266,0
Kap Kanin	KN	Rusia	269,0
Lugo	LG	España	285,0
Sevilla	SV	España	315,0
Stavanger-Varhaugh	LEC	Noruega	319,0
Andoya	LEX	Noruega	332,5
Jan Mayen	LMC	Noruega	332,5
Björnoya	LJS	Isla del Oso (Noruega)	332,5
Shumshu	NA	Islas Kuriles (Rusia)	340,0
Rybackij	RB	Rusia	363,0
Tierpenja	KS	Rusia	372,0
Pankratjeva	PA	Rusia	280,0
Zat. Posjeto	PZ	Rusia	263,0
San Francisco	SFI	USA	192,0
Nantucket	TUK	Alaska	194,0

Tabla 1.1. Lista de estaciones CONSOL. [7]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Figura 1.8. Antena Norte de la estación de Arneiro. [8]

1.3.3 Sistema de navegación GEE.

En 1935, Watson Watt realizó una demostración en Gran Bretaña sobre las posibilidades que tenía un radar para detectar aviones, por lo que se plantearon la posibilidad desarrollar unos transmisores que emitieran unos pulsos de gran potencia y se representaran los aviones a través de una pantalla. El gran problema es que se requería tubos de rayos catódicos estables, que, en ese momento, se estaban desarrollando.

Después de dos años, en octubre de 1937 y con los tubos de rayos catódicos totalmente operativos, el ayudante de Watson, R. J. Dippy, logró desarrollar un sistema que trabajaba con transmisores de pulsos y una presentación a través de un CRT, (**C**athode **R**ay **T**ube). Con este equipo se podía

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

medir el tiempo de llegada al avión a través de dos pulsos enviados desde transmisores que estaban colocados a unas 10 millas de distancia formando un ángulo de 90º con la pista de aterrizaje.

Figura 1.9. Unidad indicadora Type 62A GEE Mark II. [9]

En 1940, había la necesidad de un sistema que mejorase la precisión de la navegación aérea, por lo que la idea de Dippy, cobró fuerza. La nueva propuesta consistió en una estación principal que estaría acompañada de tres estaciones auxiliares. Su cobertura aproximadamente era de unas 300 millas después de realizarse las pruebas.

El principio de funcionamiento era el siguiente: trasmitía pulsos cortos de 6 microsegundos de duración con una frecuencia de 30 MHz (posteriormente fueron 80 MHz). La señal que se emitía a través de la estación principal era recibida por las estaciones auxiliares, lo que servía para sincronizar las transmisiones. [9, 14]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

1.3.4 El LORAN.

El LORAN, (del inglés **LO**ng **RA**nge **N**avigation, navegación de largo alcance), fue un sistema de navegación hiperbólico desarrollado por los Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial.

Figura 1.10. Receptor Loran-A. [10]

Este sistema era muy similar al **Gee** que utilizaba el Reino Unido pero el LORAN funcionaba a unas frecuencias más bajas para lograr un alcance mayor, en torno a 2.400 km, y teniendo una precisión de unas decenas de km. Sus primeros usuarios fueron los convoyes que cruzaban el océano Atlántico y los aviones que realizaban rutas largas. En un principio, el sistema LORAN era muy caro al tener que utilizar una pantalla de TRC (**T**ubo de **R**ayos **C**atódicos), por lo que su uso fue exclusivo de los militares y grandes empresas comerciales.

Los receptores sufrieron un gran avance en la década de 1950 al mejorarse en gran medida la electrónica y pudiéndose automatizar. La Marina

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

de los Estados Unidos trabajó en un sistema mejorado del LORAN, al que llamaron LORAN-B, que aumentaba la precisión hasta unos cientos de metros, pero tuvieron muchos problemas técnicos y dejaron de desarrollar este modelo. Paralelamente, la fuerza aérea de EE.UU. trató de investigar un concepto diferente, llamado "Cyclan", que la Armada estadounidense llamó LORAN-C.

El LORAN-C, consiguió un alcance más largo y una precisión mucho más exacta que el sistema original. Debido a ello, en 1958, la Guardia Costera americana se interesó por el uso de ambos sistemas, y a partir de entonces se hizo cargo de su mantenimiento y desarrollo.

Aunque este nuevo LORAN mejoró al modelo original (llamado ahora LORAN-A o Standard Loran), seguiría utilizándose bastante más el primero, básicamente por la gran cantidad de equipos excedentes del LORAN-A, debido a que muchos barcos y aviones de la armada desmontaron este sistema para utilizar el LORAN-C, por lo que la industria civil prefirió aprovechar este último y no gastar tanto dinero en el nuevo modelo.

Cuando la microelectrónica empezó a introducirse en el mercado de bajo costo, a mediados de 1980, esto hizo que los receptores del LORAN-C bajaran sustancialmente de precio con lo cual el uso del LORAN-A empezó a disminuir rápidamente y su uso fue decreciendo en todo el mundo hasta 1985. [9, 14, 17, 18, 19]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Figura 1.11. Un receptor Loran-C para uso en buques mercantes. [11]

1.3.5 El VOR.

Sus siglas son **V**ery High Frequency **O**mnidirectional **R**ange, en español, Faro Omnidireccional VHF, y es uno de los sistemas más usados en la radionavegación aérea. Surgió durante la Segunda Guerra Mundial y se transformó en un instrumento muy usado a partir de los años 50.

Consta de estaciones en tierra que trabajan en un rango de frecuencias entre **108** y **118 MHz**. Teniendo montado un equipo receptor en las aeronaves logramos crear "autopistas aéreas" en las que vuelan los aviones y se nombran como aerovías, que son básicamente un grupo de VOR's que están interconectados entre sí, que van a través de unos caminos virtuales que se establecen en el espacio aéreo, y cada uno tiene una cantidad de vuelos permitidos, unas rutas específicas, etc.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Figura 1.12. Estación de tierra VOR. [12]

La estación VOR se encuentra alineada con el norte magnético, donde se transmiten dos tipos de señales de radio:

- Una señal de referencia omnidireccional.
- Una señal variable en cada uno de los 360º magnéticos que rodean la estación.

Como vemos, es una ayuda a la navegación aérea, por lo que los aviones son guiados mediante el uso de tecnología radio conociendo un punto geográfico.

Los VOR's son elementos importantes porque:

- Permite el guiado de las aeronaves hasta localizaciones conocidas como puede ser un aeropuerto.
- Se utilizan como punto de referencia para la construcción de las aerovías. [9, 14, 20, 21, 22]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

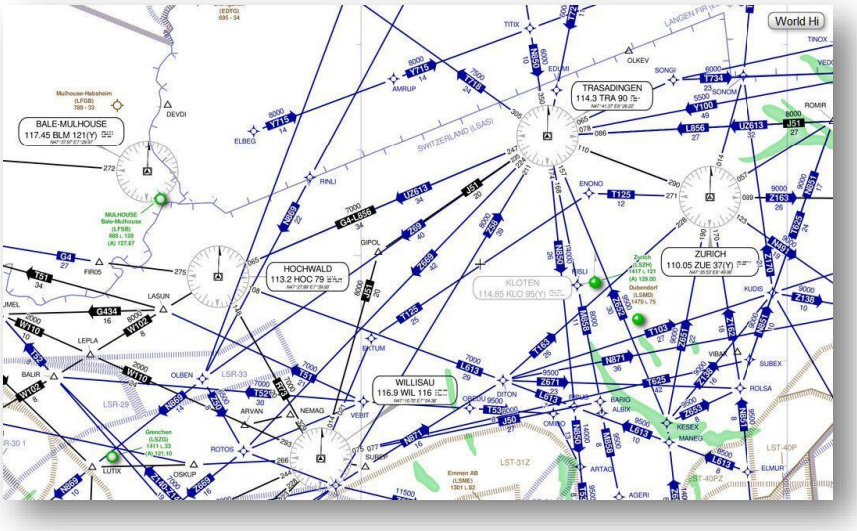

Figura 1.13. Representación de las aerovías. [13]

Normalmente, el VOR va acompañado de un **DME** (**D**ata **M**easurement **E**quipment) o equipo medidor de distancia. Se trata de una estación de radio que utilizan las aeronaves para calcular la distancia a la que están respecto a este dispositivo.

Secuencialmente, su funcionamiento es el siguiente:

1) El avión emite varios pulsos de radio.
2) Los pulsos llegan hasta la estación DME.
3) La estación recibe los pulsos y los retransmite.
4) Estos pulsos llegan al avión y el receptor DME calcula la distancia entre el avión y la estación tomando como referencia el tiempo entre transmisión y recepción.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

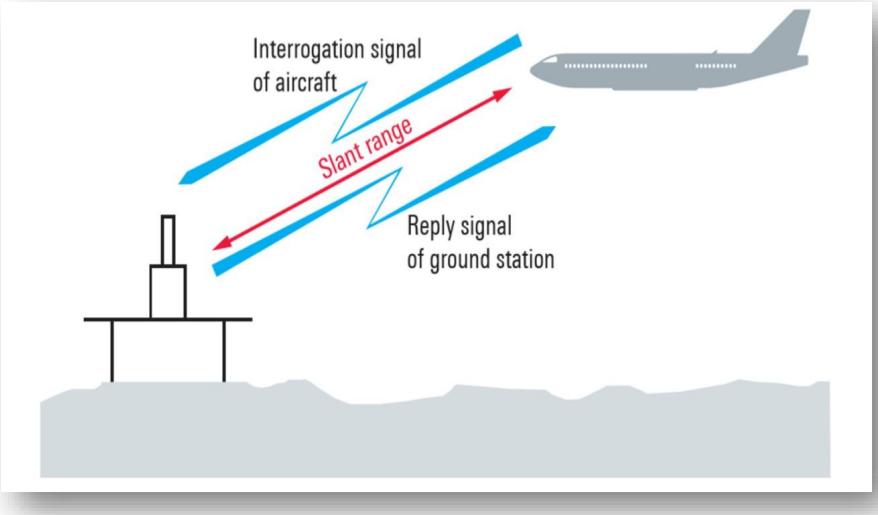

Figura 1.14. Funcionamiento de los DME. [14]

Además de la posición respecto al DME, nos proporciona la "Ground Speed", es decir, la velocidad respecto a tierra y el tiempo que tardará en llegar a la estación. [21, 22]

Tanto los VOR como el DME se utilizan en la navegación civil mientras, que el equivalente militar sería el TACAN (Tactical Air Navigation System). [14, 21]

1.3.6 El sistema OMEGA.

Fue un sistema de navegación global que trabajaba en la banda VLF (**V**ery **L**ow **F**requency), empleando ondas continuas, las cuales tienen una amplitud y frecuencia constante.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

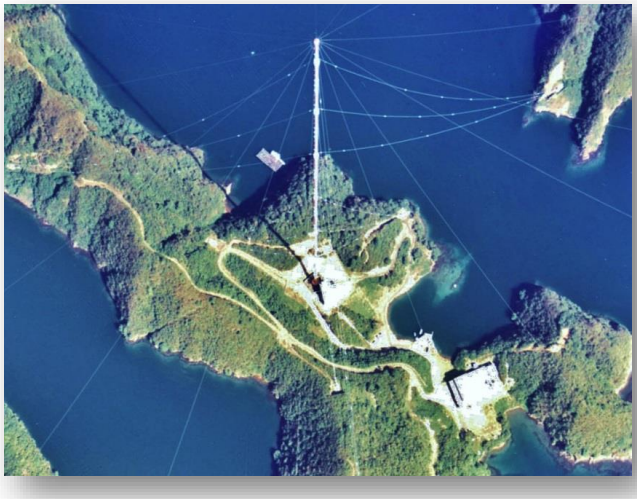

Figura 1.15. Antena OMEGA, en la isla de Tsushima (Japón). [15]

Las señales eran transmitidas omnidireccionalmente a través de una red de ocho estaciones repartidas estratégicamente por el globo terráqueo, lo que otorgaba una cobertura mundial. Estas estaciones se encontraban numeradas de la (A) a la (H) y estaban localizadas en: **Noruega** (A), **Liberia** (B), **Hawaii** (C), **Dakota del Norte** (D), **La Reunión** (E), **Argentina** (F), **Australia** (G), que anteriormente se encontraba en **Trinidad y Tobago**, y **Japón** (H). Cada estación emitía con una potencia de 10 KW salvo la de Trinidad con sólo 1 KW.

Sus antenas no tenían un rendimiento superior al 7% ya que los elementos radiantes eran de poca altura respecto a la longitud de onda transmitida. Estas se instalaban, principalmente, en dos formas diferentes:

- Antenas que se montaban sobre unas torres verticales de unos 450 metros aproximadamente de altura donde se colocaba una “sombrilla” (lugar

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

donde se encuentran los elementos radiantes de este tipo de antena), y unos tirantes como medio de sujeción al suelo para asegurar su firmeza, este método se utilizó en las estaciones de Liberia, La Reunión, Dakota del Norte, Argentina, Japón y Australia.

- Las antenas se colocaban en una extensión plana donde se colocaban los elementos radiantes alrededor de un valle de montañas, que tenía una medida aproximada de unos 3.500 metros.

Para que se pudieran propagar estas señales VLF, se utilizaban las guías de ondas naturales, que se encuentra entre la superficie de la tierra y la capa D ionosférica. Estas ondas con forma esférica tenían una anchura que variaba aproximadamente unos 70 km si era de día y los 90 km si era de noche.

Figura 1.16. Antena tipo "valley-span". [16]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

El número de estaciones, frecuencias y potencias de transmisión se eligieron para cumplir un requisito esencial, que hubiera cobertura global, por lo que desde cualquier punto de la tierra se debía recibir señal de al menos cuatro estaciones, aunque en condiciones reales, se tenían que obtener señales de entre cuatro y siete estaciones.

Cada estación variaba la cobertura dependiendo de la dirección en la que se emitía, y dependiendo de la rotación de la tierra:

- Dirección **Este**, 10.500 MN, con una atenuación de **2 dB** cada **1.000 Km.**
- Dirección **Oeste**, 6.000 MN, con una atenuación de **4 dB** cada **1.000 Km.**
- Dirección **Norte** y **Sur**, 8.000 MN, con una atenuación de **3 dB** cada **1.000 Km.** [14, 23, 24, 25]

Figura 1.17. Receptor OMEGA AN/URH-21(XN-1). [17]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

1.3.7 eLoran

Se desarrolló en los Estados Unidos a partir de mediados de los 90. Fue el comienzo del Programa de Modernización y Recapitalización del Loran de la Guardia Costera de los Estados Unidos (USCG), comprometiéndose a que el sistema fuera operativo y eficiente a lo largo de los siguientes años.

Es un sistema que trabaja independientemente del GPS, GLONASS o cualquier otro GNSS. El receptor es capaz de funcionar en todas las regiones donde haya un servicio eLoran, cuyos receptores trabajarán de forma automática sin depender del usuario.

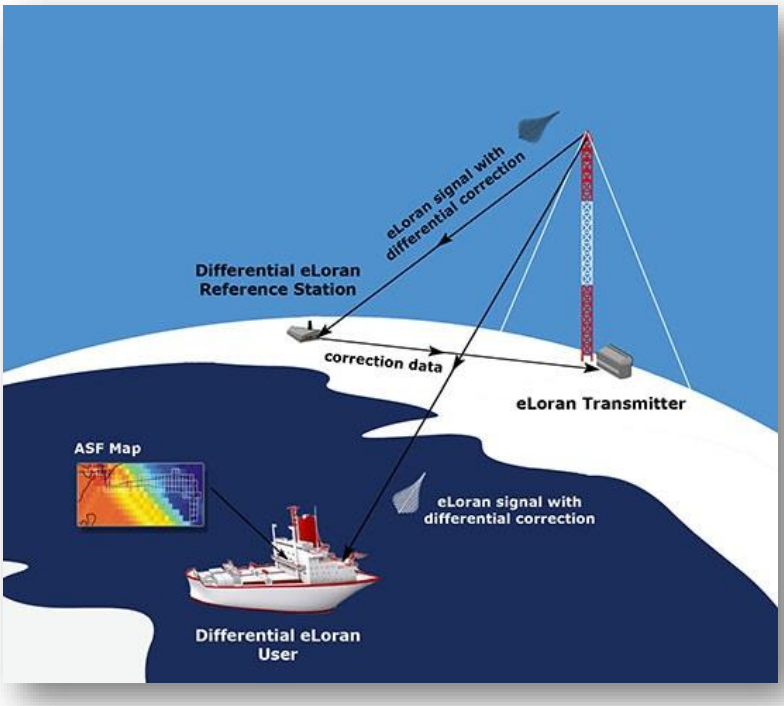

Figura 1.18. Funcionamiento del sistema eLoran [18]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

La principal característica que lo diferencia del LORAN-C es la incorporación de un canal de datos a la transmisión, el cual se encarga de transmitir unos datos determinados de correcciones, advertencias y la integridad de la señal. Gracias a estos se pueden lograr condiciones donde se exige el conocimiento de la posición de los aviones en caso de aterrizaje cuando hay mala climatología o casos donde es de extrema necesidad la posición del móvil. [26, 27, 28, 29]

Figura 1.19. Estación LORAN C situada en la Isla Marcus (Japón). Su torre mide 213 m de altura. Fue clausurada en el año 1993 por la Coast Guard americana y cedida a las autoridades niponas. [19]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

C a p í t u l o 2

El GNSS y el TRANSIT

Introducción.

Los inconvenientes que afectaban a la precisión, manejo y cobertura de los sistemas hiperbólicos de navegación de onda continua; disminución de la precisión con el alcance, propagación ionosférica, actividad solar, etc., fueron mitigados a medida que se avanzó en el desarrollo de la electrónica. Por otra

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

parte, dicho desarrollo, como tantas veces ha ocurrido a lo largo de la historia, viene de la mano de las necesidades y aplicaciones militares.

A principios de la Segunda Guerra Mundial, el sistema LORAN permitía obtener posicionamientos bajo cualquier tipo de condiciones atmosféricas, pero era un sistema bidimensional, es decir, sólo proporcionaba latitud y longitud.

En los años 60, Estados Unidos crea el primer sistema de navegación basado en satélites cuya finalidad era mejorar la precisión de sus misiles submarinos y la navegación de su flota, aunque también se utilizó con carácter civil para estudios geotécnicos y topográficos. Surge así el sistema TRANSIT o NAVSAT que estaría operativo hasta el año 1996.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

2.1 Sistema global de navegación por satélite. (Global Navigation Satellite System, GNSS).

Está formado por una constelación de satélites que orbitan alrededor de la tierra, transmitiendo señales que son utilizadas para ofrecer el posicionamiento y localización en prácticamente cualquier lugar del mundo por tierra, mar o aire. Los sistemas basados en satélites artificiales pueden proporcionar información al usuario de manera muy precisa sobre nuestra posición y con una gran exactitud, en cualquier parte del mundo, las 24 horas del día y bajo cualquier condición meteorológica.

Su funcionamiento es el siguiente:

Los satélites transmiten señales de radio, que contiene los datos orbitales (entre ellos la posición del satélite), y la hora exacta en que se transmitió dicha señal. También se incluye un almanaque aproximado, que nos ayuda a encontrarlos y las efemérides, que se transmiten en un mensaje de datos que se usa como referencia de tiempo. La posición se halla mediante el cálculo del tiempo que tarda en llegar las ondas de radio de los satélites al receptor, y puesto que estas señales viajan a la velocidad de la luz, es posible averiguar la ubicación. Para realizar de manera efectiva, es necesario tener al menos tres satélites para que sea posible conocer la posición en tres dimensiones, y con cuatro, podremos eliminar los errores de sincronismo.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Para hallar la situación, se puede proceder de tres maneras:

- A través de la ***diferencia de fase**:* es el método que nos ofrece más precisión. La señal radioeléctrica que es transmitida a través del satélite es controlada en fase y, además, se conoce la frecuencia y el punto donde se encuentra el satélite. Entonces se observa continuamente la evolución que sufre el desfase entre la señal que recibe el receptor, con la generada por el mismo, por lo que cuando aumenta o disminuye el desfase, lo hace también de manera proporcional a la distancia que hay entre el receptor y el satélite.
- A través del desplazamiento ***Doppler**:* es el cambio de frecuencia de una onda debido al movimiento relativo de la fuente respecto a su observador.
- A través de las ***pseudodistancias**:* es la medición del tiempo que tarda la señal en enviarse desde el satélite hasta llegar al receptor. [30, 31, 32]

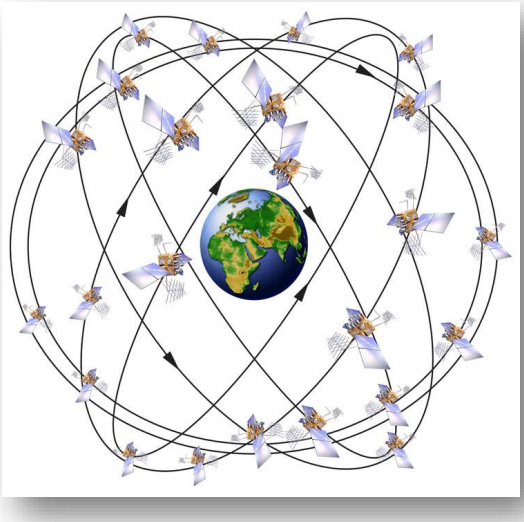

Figura 2.1. Órbitas de los satélites alrededor de la Tierra. [20]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

2.2 Sistema TRANSIT.

Fue el primer sistema que permitió la navegación por satélite, se conoció también con el nombre de NAVSAT, o NNSS (**N**avy **N**avigation **S**atellite **S**ystem), **S**istema de **N**avegación por **S**atélite de la **M**arina. Su principal usuario fue la Marina de EE. UU. para otorgar información exacta sobre la localización de sus submarinos que cargaban misiles balísticos y también se usó para la localización de sus buques, así como la realización levantamientos hidrográficos y geodésicos. Miles de buques de guerra, cargueros y embarcaciones privadas utilizaron el TRANSIT desde 1967 hasta 1991.

Este proyecto fue apoyado por la *Armada* de los Estados Unidos, y su desarrollo estuvo a cargo del departamento de defensa de los EE. UU., la agencia *DARPA* (**D**efense **A**dvanced **R**esearch **P**rojects **A**gency), y el *Laboratorio de Física Aplicada Johns Hopkins*, estando al mando del laboratorio el Dr. Richard Kirschner.

Comenzó en el año 1958, y en septiembre de 1959 se lanzó un prototipo de satélite llamado **TRANSIT 1A**, pero sin éxito puesto que no logró ponerse en órbita. El segundo prototipo llamado **TRANSIT 1B**, fue lanzado el 13 de abril de 1960, realizándose las pruebas ese mismo año con resultados exitosos.

Los satélites, conocidos como **OSCAR** y **NOVA,** se colocaban en órbitas polares bajas a una altitud aproximada de unos 1.100 km teniendo un periodo

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

orbital que duraba cerca de 106 minutos. Se utilizó una constelación de cinco satélites para conseguir una cobertura global aceptable, y además por cada satélite que estaba en órbita en la constelación básica, había uno de repuesto por si surgía algún problema, manteniéndolos en órbita para que la sustitución fuera lo más rápida posible.

Figura 2.2. Satélite TRANSIT-1A. [21]

Las órbitas que fueron elegidas cubrían toda la tierra, es decir, cruzaban los polos y pasaban por el ecuador. Normalmente, la visibilidad de los satélites en un momento dado se reducía a uno sólo, por lo que los cálculos de posicionamiento se hacían en relación a dicho satélite. En las zonas cercanas al

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

ecuador el retraso producido por las correcciones podía ser de varias horas, mientras que en las latitudes medias el retraso se reducía a una o dos horas.

El TRANSIT no tenía la capacidad de proporcionar la posición en tiempo real cuando la velocidad era muy alta, pero al añadirle mejoras posteriormente, se logró aumentar la precisión hasta los 200 metros y también se consiguió una sincronización cuasi instantánea de unos 50 microsegundos. Aparte de estas mejoras, se consiguieron otras secundarias como la transmisión de mensajes cifrados, o que los satélites utilizaran matrices de memoria con núcleo magnético para conseguir un almacenamiento de datos de hasta 32 kilobytes. Operaba en las frecuencias de, **150** y **400 MHz**. Ambas se utilizaron para poder cancelar la refracción de las señales de radio producida por la ionosfera, lo cual mejoró la precisión de la situación.

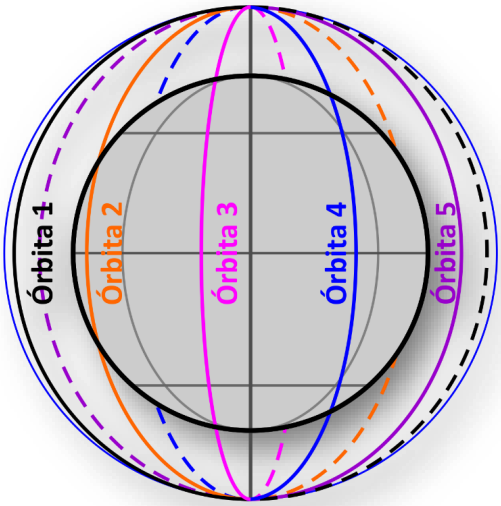

Figura 2.3. Distribución orbital de los cinco satélites. [22]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

2.2.1 Funcionamiento.

La técnica que utilizan los receptores para captar la posición de un objeto se realiza a través del efecto Doppler, que es el cambio de frecuencia en una onda producido por el movimiento de la fuente respecto al observador.

El satélite, al tener una velocidad aproximada de 27.000 km/h, ocasiona sustancialmente el aumento de la frecuencia hasta unos 10 kHz, esto se produce únicamente para cada ubicación de la línea de visión del satélite.

Realizar los cálculos exactos para saber realmente donde está el receptor, es complicado debido a que son necesarios realizar ajustes y actualizaciones para localizar el objeto. La precisión sufre la influencia del reloj, por lo que la transmisión se efectúa entre 150 y 400 MHz para reducir al máximo posible el efecto de la ionosfera y mejorar la precisión.

Cuando se solicitaba una posición, la localización del receptor sólo se podía realizar cuando el satélite se encontraba en el horizonte visible, mientras que, en otros puntos de la tierra, se llegaban a producir grandes retrasos, de aproximadamente dos horas, para la recepción de nuevos datos.

El TRANSIT estuvo adelantado a su tiempo en muchas de sus características, como, por ejemplo:

- Aplicar correcciones por el efecto de la ionosfera.
- Detectores solares de altitud, que logró grandes avances en varias áreas de la ciencia.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

- Mejoró la producción y el funcionamiento de los microprocesadores, reduciendo su tamaño, mejorando la capacidad de cálculo . . .

Figura 2.4. Maqueta del satélite TRANSIT-2A. [23]

El sistema de posicionamiento global (GPS) dejó obsoleto el sistema TRANSIT, que dejó de funcionar en 1996. Después de ese año, los satélites de este servicio de navegación se mantuvieron en uso para el Sistema de Monitoreo Ionosférico de la Marina (NIMS). [33, 34, 35]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

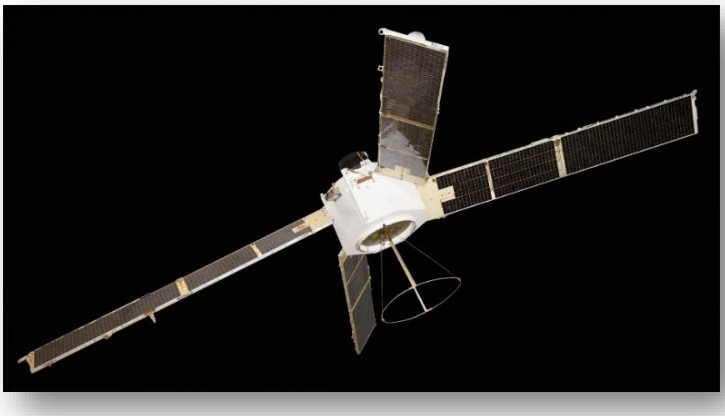

Figura 2.5. Satélite TRANSIT-5A desplegado en el espacio. [24]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

C a p í t u l o 3

Sistemas de navegación satelitales actuales

Introducción.

A partir de la creación del primer sistema de navegación satelital, el TRANSIT, se vio que los futuros métodos de navegación serian similares, por lo que lo que Estados Unidos, creador del mismo, decidió desarrollar un sistema mejorado en 1973, el GPS (**G**lobal **P**ositioning **S**ystem). Compuesto por 24 satélites girando alrededor de la tierra a través de seis órbitas que tendrían cuatro satélites cada una, da cobertura global de manera instantánea. Su uso al

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

principio fue exclusivo de los militares hasta unos años después que llegó a los usuarios civiles.

El GLONASS es su homólogo ruso, creado unos años después, en 1982. Viendo las grandes ventajas que aportaba el GPS, la URRS en aquel entonces desarrolló su propio sistema de navegación, para satisfacer, principalmente, sus necesidades militares principalmente y años más tarde, proporcionar este servicio, pero de manera menos precisa al sector civil.

El BeiDou es el sistema creado por China, que consta de tres fases de desarrollo para su total implementación y funcionamiento.

El QZSS, es el sistema de aumento basado en satélites, creado por el gobierno japonés, y se encarga de mejorar la eficacia del GPS en Japón en zonas donde los edificios son muy altos, provocando que los satélites sean muy difíciles de captar por los receptores.

El sistema de navegación Galileo está desarrollado por la Unión Europea, para no depender de los demás sistemas (GPS, GLONASS, BeiDou). Consta de cinco servicios principales que se adaptan a todos los usuarios, además será uno de los sistemas más precisos en su servicio más básico y creado principalmente para usuarios civiles.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

3.1 Creación del sistema global de navegación por satélite.

Las siglas GNSS se refieren, de modo genérico, a los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (**G**lobal **N**avigation **S**atellite **S**ystem) como son el GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU o el sistema japonés QZSS (**Q**uazi-**Z**enit **S**atellite **S**ystem). Dichos sistemas se basan en una constelación de satélites que orbitando alrededor de la tierra transmiten un mensaje llamado efemérides, con su posición y velocidad, a cualquier punto de la superficie terrestre para determinar sus coordenadas.

Figura 3.1. Satélite GLONASS-K. [25]

El origen de la navegación satelital fue militar, comenzando en los años setenta con el desarrollo del sistema GPS, aunque anteriormente se había utilizado el sistema **TRANSIT**, siendo el primer sistema de navegación por

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/
Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c
Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

satélite. Su uso principal fue para permitir que las armas balísticas alcanzaran su objetivo con una precisión milimétrica, cosa que anteriormente, sin tener estos sistemas era prácticamente imposible, por lo que aparte de aumentar la efectividad se reducían los daños colaterales.

Más tarde, a mediados de los años noventa, la corporación RAND (**R**esearch **AN**d **D**evelopment), realiza un estudio para emplear los sistemas GNSS con fines civiles. Posteriormente se realizaron numerosos acuerdos entre el gobierno de Estados Unidos y diferentes países de todo el mundo para lograr que fuera de uso civil. [31]

3.1.1 Segmentos de un GNSS.

Los sistemas GNSS se encuentran divididos en tres segmentos, lo que facilita el control, manejo y la conservación de estos. Se encargan de controlar la transmisión de señales electromagnéticas por parte de los satélites y vigilar la salud de los mismos.

- **Segmento espacial:** lo constituye el conjunto de satélites que forman parte del sistema. Los de navegación se encuentran orbitando alrededor de la Tierra distribuidos en distintos planos orbitales, mientras que los de aumento, que forman parte del Sistema de Aumentación Basado en Satélites (SBAS), nos proporcionan la corrección de errores en el posicionamiento.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Estos tipos de satélites deben cumplir ciertas características:

Los satélites de navegación:

- Tiene que haber un mínimo de ellos para poder garantizar una cobertura global en cualquier instante.
- Deben estar en distintos planos orbitales para que en cualquier lugar del planeta sean captados.
- La cantidad de satélites en una misma órbita no tiene porqué ser uniforme.

Figura 3.2. Satélite de la constelación GPS orbitando sobre la tierra. [26]

- **Segmento de control:** está formado por el conjunto de estaciones que se encuentran en tierra y recogen los datos enviados a los satélites.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Realiza la función de garantizar los servicios, estando en constante monitorización del segmento espacial y ofrece correcciones de posición orbital y temporal a los satélites, a través de información para la sincronización de los relojes atómicos y correcciones para el posicionamiento de las órbitas a los satélites.

Es una estructura básica para cualquier sistema GNSS porque las estaciones terrestres se encargan de recoger las señales emitidas por los satélites, realizando las funciones anteriormente descritas.

Cada una de estas estaciones crea una información única sobre el funcionamiento del sistema, la cual se envía a una estación de control que suministra a los satélites, correcciones sobre su posición orbital y coordenadas temporales.

De cada satélite conocemos los datos nombrados anteriormente y, además, cada uno tiene un reloj atómico de cesio. Esto nos sirve para realizar ciertos cálculos que nos facilitan la localización espacial y temporal de los satélites. En el momento que cualquier satélite se esté saliendo de su órbita, las estaciones de control emitirán unas señales electromagnéticas específicas para que el satélite corrija su órbita y su mensaje de navegación.

- **Segmento de usuario:** está formado por receptores de señales GNSS procedentes del segmento espacial. Normalmente, cada receptor, está formado por los siguientes elementos básicos:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

- Una **antena receptora** de GNSS que funciona a la frecuencia del sistema (entre la banda inferior L y la banda superior L, de 1,5 a 2,9 GHz), y que sea omnidireccional. Pudiendo ser de muchas formas y tamaños dependiendo del uso y del tipo de receptor.

Figura 3.3. Antena marina para receptor de satélite, Icom MXG-5000S. [27]

- El **receptor** debe ser del tipo superheterodino, es decir, se basa en la mezcla de frecuencias o heterodinación. Este dispositivo contiene un reloj estable que normalmente es un oscilador de cristal con una pantalla para ver la información de posicionamiento. [30, 31, 32]

Figura 3.4. Receptor GPS Quectel L80-M39. [28]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

3.2 NAVSTAR-GPS (NAVigation System and Ranging - Gobal Position System).

Es un sistema desarrollado, instalado y empleado por el Departamento de Defensa de EE. UU. con fines militares, pero a partir de la década de 1980, empezó a tener disponibilidad para uso civil, permitiendo un uso limitado, que se realiza a través de señales degradadas, por razones de seguridad. Nos permite conocer la ubicación, velocidad y tiempo en cualquier punto del planeta, las 24 horas del día y en cualquier condición climática, mediante el uso de un receptor que capta las señales emitidas por los satélites.

Figura 3.5. Logotipo del GPS. [29]

Compuesto por tres segmentos, como los demás sistemas GNSS, los segmentos de control y espacial son de responsabilidad militar.

- El **segmento espacial:** consta de seis órbitas y está formado por 31 satélites (24 operativos y siete de repuesto), a una altura de 20.180 km, con una

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

órbita radial de 26.560 km para cubrir toda la superficie terrestre, con un periodo de 12 horas.

- El **segmento de control:** formado por cinco estaciones monitoras, se encargan de mantener en órbita a los satélites y controlar su correcto funcionamiento. Esto se hace a través de tres antenas que se encuentran en tierra que envían señales a los satélites, y una estación experta que se encarga de supervisar todas las operaciones.
- **Segmento de usuario:** está formado por receptores de señales procedentes del segmento espacial. Normalmente, cada receptor, está formado por una antena receptora de la banda L y un receptor superheterodino.

El GPS participa en el segmento espacial del sistema Cospas-Sarsat, llamado MEOSAR, y el cual está financiado por la Unión Europea, Rusia y Estados Unidos. [9, 36, 37, 89, 92]

3.2.1 Historia y desarrollo.

El proyecto del sistema GPS se lanzó en los Estados Unidos en el año 1973 para mejorar los sistemas de navegación que existían hasta entonces. El honor de haberlo inventando se les atribuye a **Roger L. Easton**, del **Laboratorio de Investigación Naval**, **Ivan A. Get**, de **The Aerospace Corporation**, y **Bradford Parkinson**, del **Laboratorio de Física Aplicada**.

En los primeros años de 1960, el sistema de navegación OMEGA se convertiría en el primer sistema de radionavegación mundial, pero al tener

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

limitaciones, impulso a la necesidad de crear un sistema más preciso y universal.

La armada de los Estados Unidos quería llevar esta tecnología de navegación a los satélites para ofrecerles a sus flotas un sistema de navegación que cumpliera una serie de requisitos:

- Tener un funcionamiento continuo.
- Que no le afectara las condiciones atmosféricas, ya que es muy dinámico, para permitir su uso en aviones.

En 1964 ya existía el programa de navegación **TRANSIT**, pero al no ser tan preciso y, además, tardar un mínimo de una hora en conseguir que uno de sus satélites estuviera en el horizonte visible, la US Navy, empezó a estudiar otro sistema de navegación satelital.

Los satélites que formarían el segmento espacial de este nuevo sistema estarían equipados con un reloj muy preciso, sincronizado con los demás. Lo más destacable era que el satélite enviaría constantemente señales horarias y de posición al receptor, siendo posible determinar la posición del satélite con respecto a este, por lo que no habría que esperar una hora o más como pasaba con el **TRANSIT**.

También tendría una constelación con suficientes satélites y diferentes órbitas, para poder cubrir todos lugares del planeta, y que el receptor pudiera

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

triangular la posición en cualquier lugar con una precisión de al menos 100 metros. [9, 36, 37]

Esto llevó a experimentar con los satélites **Timation** (**Tim**e Navig**ation**), que fueron creados, desarrollados y lanzados al espacio por el Laboratorio de Investigación Naval en Washington D.C., a principios de 1964. Lo primero que necesitaban era utilizar un reloj atómico (relojes muy precisos) en el satélite, que en aquella época estaban poco desarrollados.

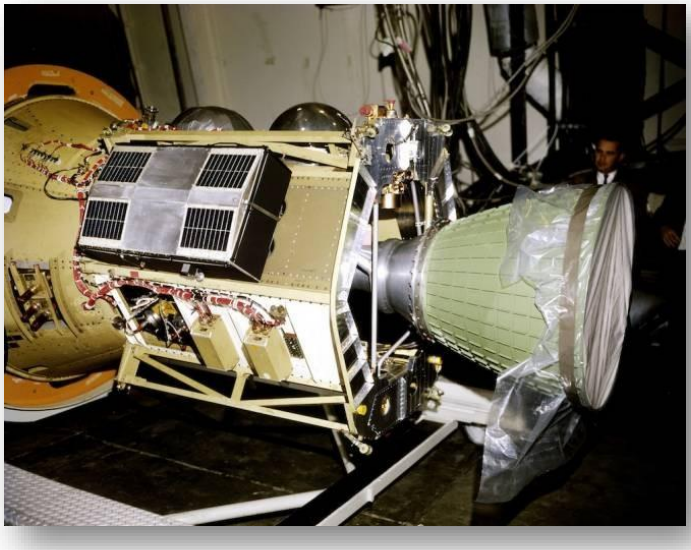

Figura 3.6. Satélite Timation-1. [30]

El primer satélite, llamado **Timation-1**, fue lanzado el 31 de mayo de 1967. Dentro de este, se encontraba un oscilador de cristal de cuarzo y un transmisor de 400 MHz, que consumía menos de los 6 vatios que producía las células voltaicas. Se demostró que al utilizar estos osciladores eran mucho más estables que los usados en los del **TRANSIT**.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

No obstante, se detectaron varios problemas: la precisión no era tan buena como la que tendría que ser y había oscilaciones en su frecuencia debido a la radiación espacial.

Estos contratiempos se intentaron solucionar para el próximo satélite que se lanzaría, por lo que el reloj se mejoró sustancialmente, siendo tres veces más estable que su antecesor, el transmisor trabajaría con dos frecuencias, 150 y 400 MHz, mejorando la precisión de navegación y, además, se incorporó una protección contra la radiación espacial.

Así, el 30 de septiembre de 1969, se lanzó al espacio el **Timation-2**, siendo tal el éxito, que sus señales se usaron para sincronizar los relojes nacionales en tierra.

En la misma década, con el avance que hubo en los relojes atómicos, se diseñó una constelación de satélites, en los que cada uno portaría un reloj atómico y estarían todos sincronizados entre ellos, con una referencia de tiempo determinado.

En el año 1973, los programas de la Armada y la Fuerza Aérea de los Estados Unidos se unieron en lo que se conoció como **Navigation Technology Program**, para luego ser renombrado como **NAVSTAR-GPS**.

Entre 1978 y 1985, se desarrollaron y lanzaron 11 satélites experimentales NAVSTAR, hasta completar la constelación actual. Se declaró con capacidad operacional inicial en diciembre de 1993, y con capacidad total en abril de 1995. [46, 47, 48, 57]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Figura 3.7. Constelación de los satélites GPS. [31]

3.2.2 Lanzamientos satelitales.

En esta tabla se exponen todos los satélites lanzados. Están en diferentes grupos porque en cada uno de ellos se han realizado mejoras con respecto a los anteriores.

En la tabla 3.1 se indican los lanzamientos de satélites GPS realizados desde el primero, lanzado el 22 de febrero de 1978, hasta el 23 de diciembre de 2018. [58]

Grupo	Lanzamientos	Operacionales	Pruebas / Reservas	Mal estado	Retirado	Lanzamientos fallidos
Grupo I	11	0	0	0	10	1
Grupo II	9	0	0	0	9	0
Grupo IIA	19	0	8	0	11	0
Grupo IIR	13	12	0	0	0	1
Grupo IIRM	8	7	1	0	0	0
Grupo IIF	12	12	0	0	0	0
Grupo IIIA	1	0	1	0	0	0
Total	**73**	**31**	**10**	**0**	**30**	**2**

Tabla 3.1. Lanzamientos de satélites GPS realizados. [32]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
Fecha: 09/09/2019 12:50:45

3.2.3 Funcionamiento.

Con este sistema logramos calcular la posición en cualquier punto del planeta a través de un espacio de coordenadas cartesianas (X, Y, Z). Para ello es necesario que estén en el horizonte visible un mínimo de tres satélites de la constelación, de los que se conoce su posición. De estos satélites se recibe la información donde se reflejan la identificación y el reloj de cada uno de ellos, y en base a estas señales, el dispositivo sincroniza el reloj del GPS, y calcula el tiempo que tardan en llegar las señales al equipo, por lo que mide la distancia que hay al satélite a través de la ***trilateración***.

La *trilateración* es una técnica que utilizan los receptores GPS para medir las distancias.

Para explicar cómo funciona, vamos a utilizar un ejemplo bidimensional. Supongamos tres satélites situados en algún lugar del espacio (Figura 3.8). Dichos satélites transmiten señales unidireccionales que contienen datos de su posición y de la hora.

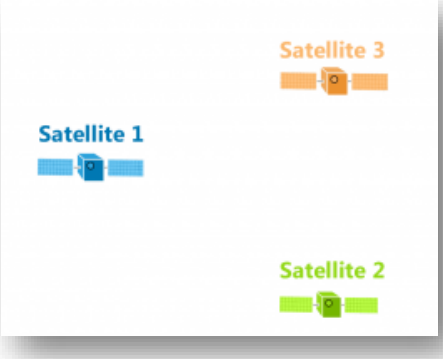

Figura 3.8. Posición conocida de tres satélites. [33]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

El funcionamiento es básico, el primer satélite emite una señal que es captada por un receptor GPS (véase la figura 3.9), indicando una hora y la distancia a la que se encuentra en ese instante. Aunque no sepamos el ángulo, conocemos la distancia, la cual forma un círculo en todas direcciones. Esto nos da a entender que la posición GPS se puede encontrar en cualquier punto de la superficie del círculo formado por el satélite, que tiene el centro en el propio satélite.

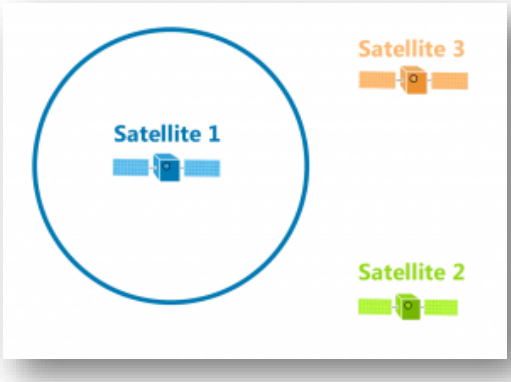

Figura 3.9. Círculo formado por el satélite 1. [34]

Consideremos ahora que llegan dos señales procedentes de dos satélites, con lo que la posición del objeto podría ser cualquiera de los dos puntos de intersección de ambos círculos de cobertura generados por dichos satélites, según se aprecia en la figura 3.10. Aquí se crea una ambigüedad, pues no sabemos en cuál de los dos puntos de corte se encuentra el objeto.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

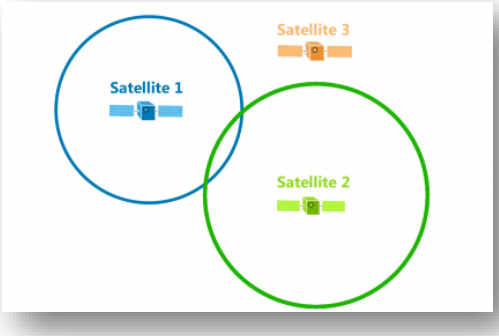

Figura 3.10. Círculos formados por los satélites 1 y 2. [35]

La conclusión a la que se llega es que, para saber la posición exacta a través de este método, necesitamos como mínimo tres satélites, como vemos en la figura 3.11, en la cual el punto en el que los tres círculos se interceptan es donde se ubica la posición del objeto.

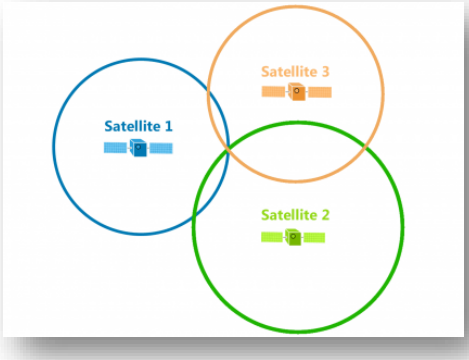

Figura 3.11: Método de trilateración. [36]

La distancia entre un receptor GPS y un satélite se calcula multiplicando el tiempo que la señal tarda en llegar desde el satélite hasta el receptor por la velocidad de propagación. Para conocer el tiempo que se encuentra la señal en vuelo, los relojes tanto de los satélites (que son atómicos), como los que van o

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

los que se instalan en los receptores GPS (que son de cuarzo), tienen que estar sincronizados entre sí para que creen el mismo código simultáneamente.

Pero existe un problema, mientras los relojes de los satélites son muy precisos, los de los receptores son osciladores de cuarzo, lo que reduce su exactitud, y se producen errores en las distancias medidas, generando lo que se llaman pseudodistancias, que es la distancia medida entre el receptor GPS y el satélite, pero menos precisa. Debido a este problema, se debe aumentar el uso mínimo de satélites hasta un total de cuatro para señalar bien la posición.

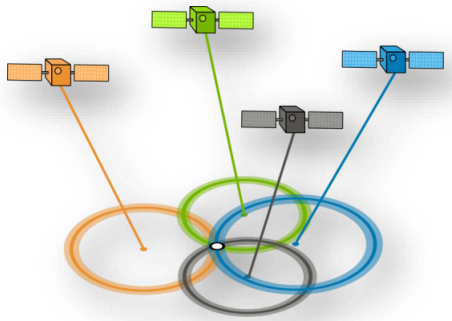

Figura 3.12. Uso de 4 satélites (vista en dos dimensiones). [37]

Para el cálculo de las pseudodistancias tenemos que saber que las señales del GPS son muy débiles, del orden de -160 dBW, y además se encuentran con otros ruidos de fondo que están en la banda de radio. Para evitar que las señales se pierdan, se ha creado un código pseudo-aleatorio artificial para los receptores GPS para utilizarlo como patrón de fluctuaciones, y en cada instante cualquier satélite, emite una señal electromagnética con el mismo patrón que el código pseudo-aleatorio creado por el recetor.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

En el momento que se logra la sincronización, el receptor se encarga de calcular la distancia desplazando temporalmente su código pseudo-aleatorio, hasta hacer que coincida con el código recibido por el satélite, entonces el desplazamiento concuerda con el tiempo de vuelo. Todo este proceso se realiza de manera continua y automática en todos los receptores.

Figura 3.13. Uso de 4 satélites (vista en tres dimensiones). [38]

Estos tipos de códigos se utilizan para permitir el control de acceso a los sistemas satelitales, por lo que en el caso que se produzca, por ejemplo, un conflicto bélico se podría cambiar los códigos para restringir su uso y limitar el uso a una banda de frecuencias exclusiva sin que haya interferencias, puesto que cada satélite tiene su propio código GPS. [36, 39, 51, 52, 56, 57]

3.2.4 Señales GPS.

Cada uno de los satélites GPS, emite continuamente un mensaje de navegación con una velocidad de 50 bits por segundo en las frecuencias portadora de **1.575,42 MHz** (La señal **L1**) y **1.227, MHz** (La señal **L2**).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Esta señal GPS nos da la hora de la semana precisa, gracias al reloj atómico que va incorporado en el satélite, también nos proporciona el número de la semana GPS y un informe del estado del satélite.

Cada transmisión dura unos 30 segundos y envía unos 1.500 bits de datos codificados, siendo codificada con una secuencia pseudoaleatoria (PRN), que es diferente para cada satélite. Los receptores GPS conocen estos códigos (PRN) por lo que aparte de decodificar la señal, saben que satélite es cada uno. [36, 51, 52, 56]

3.2.5 Códigos GPS.

En el código pseudo-aleatorio que se transmite, se compone de tres tipos de códigos:

- **Código C/A** (Coarse/Acquisition), que tiene una frecuencia de 1.023 MHz, siendo para usuarios civiles.
- **Código P** (Precision Code), su uso es militar, teniendo una frecuencia 10 veces mayor al código C/A.
- **Código Y**, se envía de forma encriptada en vez del código P, usa el modo Anti-spoofing (Anti-engaños).

Los satélites emiten información en dos frecuencias fundamentales que son:

- La frecuencia portadora **L1**, de 1575.42 MHz, transmitiendo los códigos C/A y P.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

- La frecuencia portadora **L2**, de 1.227.60 MHz, que transmite informaciones moduladas a través del código P.

Además de estas dos frecuencias, cada satélite emite una señal de 50 Hz, en ambas señales portadoras, donde se transmiten las efemérides y las correcciones de los relojes satelitales. [36, 51, 52, 56]

3.2.6 Sistema de tiempo en los satélites GPS.

Los satélites GPS van equipados con varios relojes atómicos que miden el tiempo con gran precisión. Los satélites que se encuentran actualmente en órbita cuentan con dos relojes atómicos de **cesio** y otros dos de **rubidio**, lo que permite determinar la hora con una precisión de 50 nanosegundos. Mientras que los receptores GPS utilizan relojes de cuarzo que son muy inexactos en comparación con los relojes de cesio y rubidio.

Los satélites emiten cada cierto tiempo un patrón de control junto con la señal de radiofrecuencia, llegando al receptor con un mayor retraso que la señal normal de radiofrecuencia, por lo que, el retraso de ambas señales será igual al tiempo que demora la señal de radiofrecuencia en viajar del satélite al receptor. [57]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

3.2.7 Fuentes de error.

Existen diferentes factores (tabla 3.2) que pueden producir errores en la precisión cuando tratamos de conseguir nuestro posicionamiento, según se detalla a continuación:

- **Interferencias debidas a la Disponibilidad Selectiva S/A:** fue producida intencionadamente por los militares, por lo que es el factor que mayor error producía. El dos de mayo del 2000 fue eliminada, aunque el gobierno estadounidense aseguró que pueden aplicarla en cualquier momento.
- **Perturbación ionosférica:** la capa ionosférica está compuesta por partículas que se cargan eléctricamente, por lo que pueden modificar la velocidad de las señales de radio que la atraviesan.
- **Error multitrayecto o multisenda:** se produce cuando las señales emitidas por los satélites, sufre reflexiones antes de alcanzar el receptor, esto se puede evitar utilizando antenas de un diseño especial, además de tener un riguroso cuidado en la colocación. Además, los receptores modernos emplean métodos avanzados que procesan la señal para minimizar este error.
- **Fenómenos meteorológicos:** estos se producen por el vapor de agua, producido en la troposfera, el cual ya que afecta a las señales electromagnéticas disminuyendo su velocidad.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

- **Interferencias eléctricas:** ocasionan errores en el redondeo inadecuado para el cálculo de una órbita.
- **Mal ajuste de los relojes:** estos presentan pequeñas desviaciones, tanto los relojes atómicos de los satélites como los de los receptores. [36, 51, 56]

Fuente del error	Error aproximado. (m)
Ionosfera	± 3,0
Efemérides	± 2,5
Reloj satelital	± 2,0
Distorsión multibanda	± 1,0
Troposfera	± 0,5

Tabla 3.2. Distancia en metros de las fuentes de error. [39]

3.2.8 DGPS.

Differential **GPS**, o bien, GPS Diferencial, es un sistema que se encarga de suministrar correcciones (diferenciales) de posición a las señales emitidas por los satélites GPS de manera que se mejore la precisión.

Esta técnica utiliza una posición fija y conocida en tierra para que se pueda adaptar las señales GPS en tiempo real y eliminar los errores producidos por las pseudodistancias en zonas próximas a la estación de referencia. *Un dato importante es que el funcionamiento del DGPS sólo se encarga de corregir la precisión de los datos de posicionamiento, mientras que los datos de la velocidad no los corrige.*

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Los errores de medición de posicionamiento ocurren aleatoriamente, por lo que, a veces, es muy complicado saber la posición exacta en un momento dado. Otra cosa a tener en cuenta es que cada satélite tiene sus propios errores, por ejemplo, cuando los satélites alumbran en diferentes partes del planeta, sus señales están supeditadas por las diferentes condiciones atmosféricas.

3.2.8.1 Funcionamiento.

Para mejorar la precisión del GPS, se utilizan estaciones de base estáticas, que se encargan de enviar mensajes de corrección para los retrasos de señales. Esto se realiza a través de dichas estaciones, configurándolas en un punto en el suelo para luego determinar su posición exacta en la superficie de la tierra.

A medida que pasa el tiempo, la estación va obteniendo datos, y a su vez las capas ionosférica y troposférica cambian (la ionosfera varía la densidad de iones, y se vuelve más o menos conductora de la electricidad y la troposfera varía las condiciones y fenómenos meteorológicos), por esta razón se producen retrasos en la señal de forma aleatoria. Esto queda registrado y por ello se puede realizar un promedio logrando una medición de la posición muy exacta gracias a la estación DGPS, de manera que prácticamente se eliminan todos los errores. [52, 53, 54]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

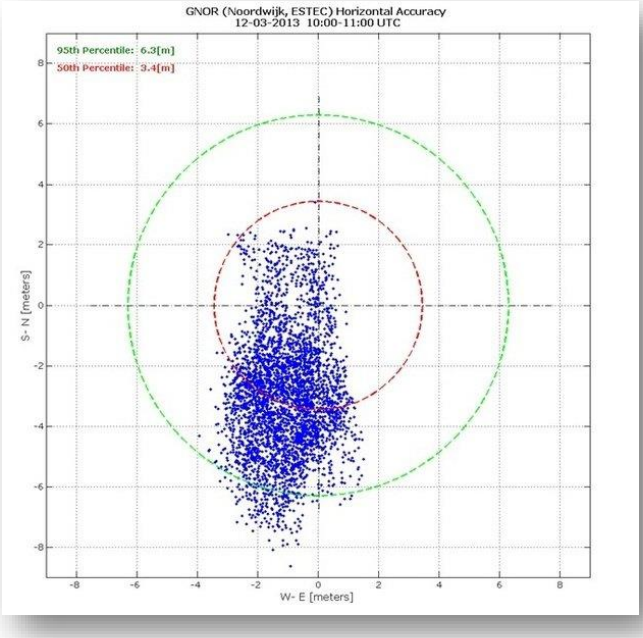

Figura 3.14. Esta gráfica representa las posiciones GPS tomadas desde un móvil a intervalos de 30 segundos y durante un periodo una hora. [40]

3.2.8.2 Sistemas de mejoras en la precisión GPS.

Tenemos el **SBAS** (**S**atellite **B**ased **A**ugmentation **S**ystem), en español, Sistema de Aumentación Basado en Satélites. Se trata de un sistema que se encarga de corregir las señales emitidas a través de los GNSS. Estos sistemas mejoran la estimación del cálculo de la posición geográfica, tanto horizontal como verticalmente y además nos sirven para mejorar la disponibilidad e integridad de la señal para facilitarnos la posición en momentos críticos de la navegación, cuando no es posible captar cuatro satélites y no es factible detener el servicio como puede ser el momento en el que aterriza un avión y saber que pista es a la que tiene que acceder.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Finalidad SBAS:

- Se aumenta la integridad: es necesario saber que el sistema tiene un retardo de unos 6 segundos aproximadamente cuando se necesita una posición muy precisa.
- Intensificar la exactitud del GPS en los casos que se necesite una localización precisa: en ocasiones puntuales podrían ocurrir accidentes si no se utilizan sistemas basados en SBAS.
- Amplificar la disponibilidad: en algunos casos donde la cobertura satelital se vea limitada por cualquier anomalía, se recurrirá a los sistemas SBAS para asegurar que en todo momento se conozca la ubicación.

Ventajas que ofrece el SBAS:

- Ofrece una guía tridimensional para aeronaves dentro de espacios reducidos, mejorando la navegación.
- Gran precisión, tanto vertical como horizontal, y mejora de la disponibilidad.
- Reduce los accidentes en lugares con mucho tráfico.
- Reduce el consumo de combustible, haciendo que se realicen rutas más cortas.

Existen diferentes tipos de exigencias en la navegación civil, que obligan a los sistemas GPS tener una precisión prácticamente centimétrica. Un ejemplo

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

de ello lo tenemos en la navegación marítima, que, en lugares con un intenso tráfico, es necesario tener controlado en todo momento, tanto los barcos cercanos como el propio para evitar posibles accidentes.

Para ello, se han desarrollado sistemas que incrementan la precisión del GPS, estos se encargan de realizar correcciones en tiempo real mejorando la precisión. En total hay cuatro sistemas que son independientes entre ellos, aunque son compatibles:

- El **WAAS,** en Estados Unidos.
- El **EGNOS,** en Europa.
- El **MSAS,** en Japón.
- El **GAGAN,** en la India.
- El **SDCM,** en Rusia. [36, 44]

El WAAS.

Es el Sistema de Aumento de Área Amplia, (**W**ide **A**rea **A**ugmentation **S**ystem), sirve para mejorar la precisión del sistema GPS, desarrollado por EE.UU.

Tiene una red de 25 estaciones ubicadas en los Estados Unidos que se encargan de controlar los datos emitidos por los satélites. Su funcionamiento es el siguiente: dos estaciones principales que se encuentran ubicadas en la costa, recogen los datos que emiten las estaciones de referencia y a su vez

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

crean un mensaje de corrección GPS. Este mensaje contiene las correcciones debido a la desviación del reloj y el retardo de la señal debido a la propagación ionosférica.

El sistema transmite el mensaje diferencial ya corregido a través de los satélites geoestacionarios, y estos a su vez, lo transmiten a los receptores GPS. [43]

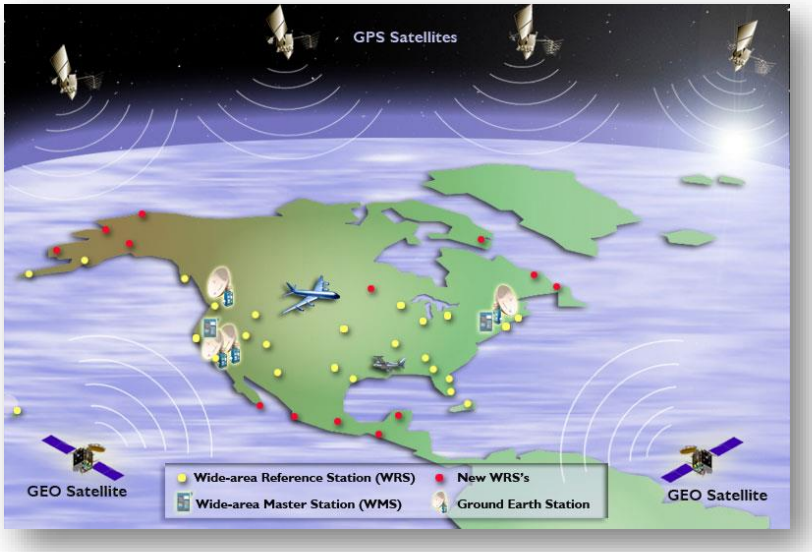

Figura 3.15. Estaciones del WAAS. [41]

El EGNOS.

El Servicio de Superposición de Navegación Geoestacionaria Europea, (**E**uropean **G**eostationary **N**avigation **O**verlay **S**ervice).

Está compuesto por unas 40 estaciones de referencia y de supervisión de la integridad (**RIMS**) y consta también de satélites estacionarios que corrigen constantemente las señales GPS.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/
Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c
Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Cada estación de referencia se encarga de supervisar los satélites antes de que estos envíen las señales y los mensajes de integridad por si existe algún fallo. [42]

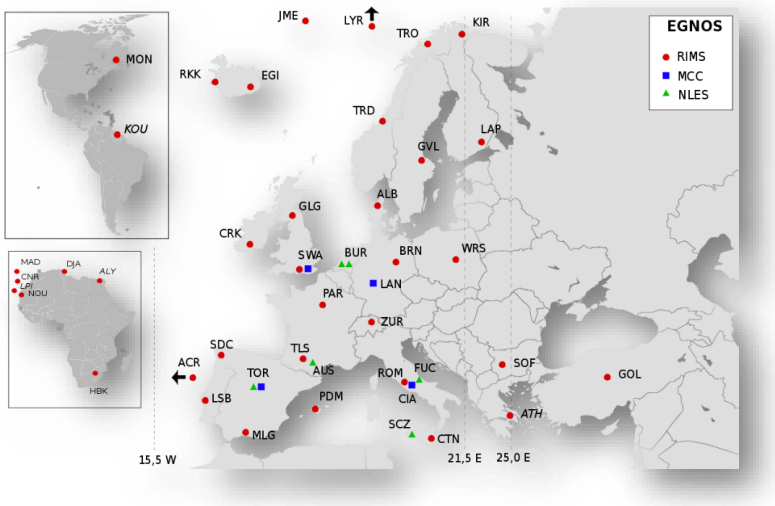

Figura 3.16. Estaciones del sistema EGNOS. [42]

El MSAS.

El Sistema de Aumentación de Satélite Multifuncional, (**M**ulti-functional **S**atellite **A**ugmentation **S**ystem). Este es un sistema de aumentación satelital, que se encarga de mejorar la precisión GPS y además tiene una función meteorológica. Opera principalmente en Japón.

Se desarrolló paralelamente junto al EGNOS y al WAAS, para proporcionar mejoras en la precisión GPS en la zona de Asia.

Presenta varias diferencias con respecto a su homólogo europeo y estadounidense, puesto que incluye dos modos de comunicación, voz y datos. [41]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

El GAGAN.

El **G**PS **A**ided **G**eo **A**ugmented **N**avigation, ha sido desarrollado por la Agencia India de Investigación Espacial, y creado para funcionar como complemento del GPS para mejorar su precisión y la seguridad de transferencia de señales. Se creó para satisfacer los requisitos de seguridad y precisión de las compañías aéreas en el espacio aéreo hindú además de incluir el espacio del océano Índico.

Es compatible con los sistemas WAAS, EGNOS y MSAS. [55]

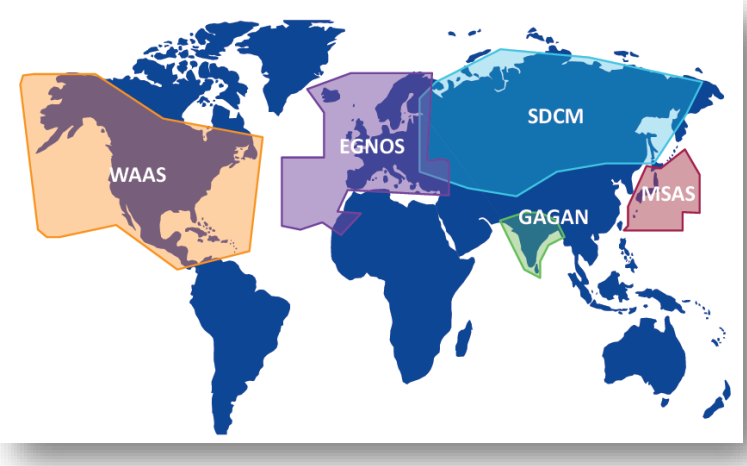

Figura 3.17. Cobertura de los principales sistemas SBAS. [43]

El SDCM.

El Sistema de Correcciones Diferenciales y Monitoreo, (**S**ystem for **D**ifferential **C**orrections and **M**onitoring), es un sistema desarrollado por la Federación Rusa para mejorar la capacidad de posicionamiento de los sistemas de navegación satelitales. La principal diferencia con el resto de los sistemas

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/
Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c
Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

SBAS es que se creó para monitorear la integridad de los satélites **GPS** y **GLONASS**, mientras que los demás sólo ofrecen correcciones e integridad a los satélites GPS. [45]

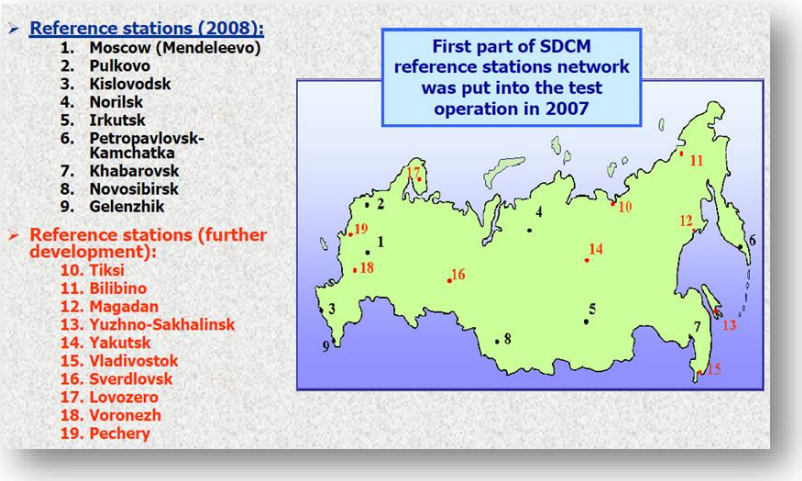

Figura 3.18. Estaciones de referencia del SDCM. [44]

3.2.8.3 ¿Cómo funcionan estos sistemas?

Todos los sistemas SBAS están formados por una red de estaciones que se encuentran repartidos a lo largo de diferentes puntos de la Tierra, y se encargan continuamente de la supervisión de los satélites del GNSS.

En el momento que logramos saber la posición exacta de la estación en tierra y del satélite, tendremos dos puntos conocidos, por lo que se podrá averiguar la posición de manera precisa.

En la figura 3.19 vemos la línea roja, que indica la señal "*real*", la cual ha atravesado las capas tanto ionosférica como troposférica, sufriendo un retraso

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/
Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c
Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

variable. La línea gris, que indica la señal "teórica", debe ser una distancia más corta, como vemos en la figura. Al restar estas dos pseudodistancias, se obtiene una corrección que se aplica a ese satélite en particular.

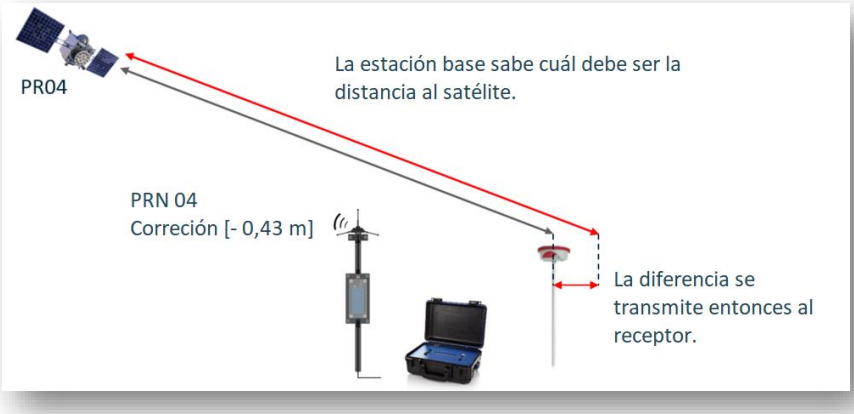

Figura 3.19. Correcciones con el DGPS. [45]

Cuando se restan estas dos señales (Real – Teórica), se obtiene una corrección que se aplica a ese satélite únicamente, que es la modificación que se usa en el DGPS, es decir, para cada satélite se va a obtener una corrección diferente. [54]

3.3 GLONASS.

En ruso (**Glo**bal'naya **Na**vigatsionnaya **S**putnikovaya **S**istema), es un sistema de navegación por satélite que fue creado por la Unión Soviética y que actualmente es dirigido por la Federación Rusa. Este proyecto se inició en el año 1976, pero no fue hasta 1982 cuando empezaron a realizar los

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/
Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c
Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

lanzamientos de los satélites a través de cohetes, siendo el primero de ellos el KOSMOS-1413, hasta que, en el año 1995, se completó la constelación encontrándose las órbitas a una altura de 19.100 km. [59, 62]

Figura 3.20. Logo del GLONASS. [46]

Al igual que los demás sistemas de navegación, está formado por tres segmentos:

- **Segmento espacial:** formado por una constelación de 24 satélites en activos, y tres en reserva, que se encuentran en tres planos orbitales con ocho satélites cada uno, teniendo una órbita circular inclinada de 64,8º respecto al ecuador, y ubicándose a una altitud de 19.100 km. Están más bajos que los satélites GPS, y tienen periodo orbital de 11 horas y 15 minutos.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

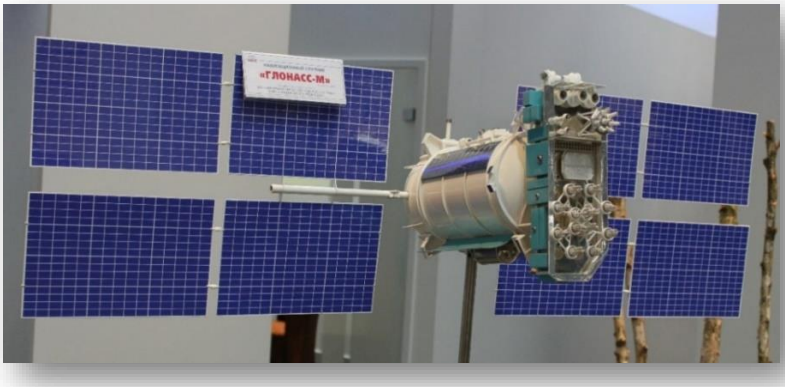

Figura 3.21. Satélite Kosmos-2516. [47]

- **Segmento de control:** está formado por una estación maestra de control, estaciones que se encargan del seguimiento de los satélites y estaciones para el control de los satélites y trasmisión mensajes de navegación.

  Las estaciones del segmento control se encuentra en su totalidad ubicadas en Rusia a excepción de una que se encuentra en Brasil.

- **Segmento de usuario:** consta de receptores GLONASS que están formados por un receptor-procesador y una antena. Estos constan de un reloj que se encarga de sincronizar las señales transmitidas por los satélites.

  Existen dos generaciones de receptores:

  - Primera generación: es la más sencilla, trabaja con 1, 2 y 4 canales.
  - Segunda generación: más desarrollada que la primera, contiene 5, 6, 12 y hasta 24 canales, que se usan para aplicaciones civiles y son capaces de trabajar conjuntamente con las constelaciones GPS y GLONASS.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

El GLONASS ofrece dos niveles de servicios:

- **Channel of Standard Accuracy** (CSA): es muy similar al Standard Positioning Service (SPS), para uso civil.
- **Channel of High Accuracy** (CHA): semejante al Precise Positioning Service (PPS) del Sistema GPS, disponible sólo para usuarios autorizados.

Los planos orbitales se encuentran numerados del 1 al 3, y cada órbita se encuentra dividida en zonas que están numeradas del 1 al 8, del 9 al 16 y del 17 al 24.

Al igual que el GPS, el sistema GLONASS también participa en el segmento espacial del sistema Cospas-Sarsat. [60, 61, 89, 92]

3.3.1 Historia y desarrollo.

El GLONASS nació debido a la necesidad de crear otro sistema de navegación ruso, que fuese diferente al antiguo sistema de la extinta Unión Soviética llamado *Tsiklon*. Dicho sistema, tenía la finalidad de proporcionar a los submarinos, un método de marcación preciso para los misiles. El *Tsiklon* tenía gran precisión cuando los buques o los submarinos no se encontraban en movimiento, pero cuando se desplazaban, se necesitaban varias horas de observación para fijar los blancos, por lo que se hacía inútil para la mayoría de las aplicaciones.

Vistas las carencias de este sistema, entre los años 1968 y 1969, se concibió la creación de un nuevo sistema de navegación, que cubriría a las

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

fuerzas marinas, aéreas, terrestres y espaciales, y en 1976, el gobierno soviético tomó la decisión de desarrollar el "Sistema de navegación unificada GLONASS".

Esta ardua tarea se le asignó a una empresa especialista en satélites llamada NPO PM, siendo su nombre actual Information Satellite Systems Reshetnev, la cual se le concedió a un grupo de jóvenes liderados por Vladimir Cheremisin. Este grupo de personas propusieron varias ideas, de las cuales el director de la empresa, Grigory Chernyavsky seleccionó las siguientes:

- En los primeros años tendría una precisión de 65 metros.
- El sistema constaría de 24 satélites operando a una altitud de unos 20.000 km aproximadamente en una órbita circular media.
- Sería capaz de corregir rápidamente la posición de la estación receptora, ayudándose de las señales de 4 satélites, además de aportar velocidad y rumbo del móvil.
- Los satélites se lanzarían a través de los cohetes *Proton* cuyo equivalente americano sería el Challenger.

El trabajo de preparación del sistema acabaría al final de los años 70.

Debido a la gran cantidad de satélites que se iban a necesitar, la empresa encargó la fabricación de los satélites a *PO Polyot*, que tenía mejores capacidades de producción.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

A principios de la década de 1980, *NPO PM* recibió el primer prototipo de satélites de la empresa de *PO Polyot*, para probarlos en tierra. Como la mayoría de las piezas producidas eran de baja calidad, los ingenieros de *NPO PM*, tuvieron que rediseñar de nuevo como serían los satélites, por lo que esto provocó un retraso importante.

Figura 3.22. Logotipo actual de la empresa Information Satellite Systems Reshetnev. [48]

El 12 de octubre de 1982, se quería lanzar tres satélites ese día, el Kosmos-1413, el Kosmos-1414 y el Kosmos-1415, en los cohetes *Proton*. Al no estar listos dos de los tres que se pretendían poner en órbita, se sustituyeron los dos no preparados por maquetas.

Desde 1982 hasta abril de 1991, la Unión Soviética lanzó un total de 43 satélites relacionados con GLONASS más cinco de ellos de pruebas. Cuando la Unión Soviética se disolvió, doce satélites GLONASS estaban operativos para su uso, lo que provocó que el uso de este sistema fuera muy limitado, (para cubrir todo el territorio ruso habría hecho falta seis satélites más).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Al pasar el control del sistema a manos de la Federación de Rusia, siguieron con su desarrollo y en 1993, después de lograr perfeccionar el GLONASS, se declaró formalmente operativo. Posteriormente, y hasta diciembre 1995 siguieron lanzando al espacio otros 12 satélites para hacer la constelación totalmente operativa.

Gracias a estos lanzamientos, se logró que el GLONASS estuviera a la par con el GPS, que había logrado el pleno funcionamiento un año antes.

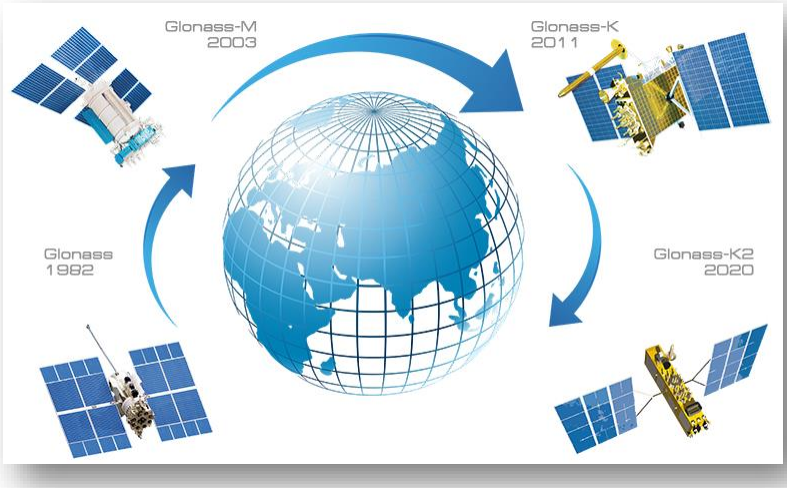

Figura 3.23. Evolución de los satélites GLONASS. [49]

Durante el periodo comprendido entre 1989 a 1991, se produjo una gran crisis que redujo la financiación del programa espacial ruso en casi un 80%, produciéndose un grave problema, pues era necesario hacer dos lanzamientos de satélites al año para mantener la red completa de 24 satélites, por lo que, en 1995, al completar la constelación, no hubo más lanzamientos hasta

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

después de cuatro años, en 1999. Esto produjo que en el año 2001 sólo tuviera operativos seis satélites.

Como consecuencia de la desmilitarización, el programa se transfirió del Ministerio de Defensa, a la agencia espacial rusa *Roscosmos*.

En la década del 2000, la economía rusa empezó a mejorar considerablemente. Por aquel entonces, el presidente Vladimir Putin se interesó bastante por el GLONASS, e hizo que la restauración del sistema fuera una de las prioridades de su gobierno.

Figura 3.24. Logotipo de la Agencia Espacial Rusa. [50]

Para lograr ese objetivo, en agosto de 2001 lanzó el Programa Federal De Objetivos "Sistema Global de Navegación" (Decisión del gobierno Nº 587). Este programa tuvo un presupuesto aproximado de 420 millones de dólares y tenía el objetivo de restaurar la constelación totalmente para 2009.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

El 10 de diciembre de 2003, se lanzó el primer satélite de segunda generación, el GLONASS-M, cuyas mejoras con respecto a la primera generación eran:

- Mayor vida útil, hasta siete años, cuatro años más que la primera generación.
- Disminuía la tasa de reemplazo gracias a su mayor duración.
- Mejor precisión y capacidad para transmitir dos señales civiles adicionales.

En el año 2006, el ministro de Defensa, Sergey Ivanov, quiso que se pusiera a disposición civil, la señal tenía una precisión de 30 metros, pero el presidente Putin no estaba satisfecho, por lo que exigió que todo el sistema estuviera disponible para cualquier usuario, por lo que el 18 de mayo de 2007, se quitaron todas las restricciones para los usuarios civiles. Desde entonces, está disponible una precisión de 10 metro de manera gratuita.

En junio de 2008, el sistema constaba con 16 satélites, teniendo 12 de ellos en pleno funcionamiento, *Roscosmos* pretendía tener una constelación de 24 satélites en órbita para 2010, un año después de lo acordado.

El objetivo tuvo un fracaso cuando en diciembre de 2010, el lanzamiento de tres satélites GLONASS-M sufrió un accidente y no logró poner estos satélites en órbita, por lo que *Roscosmos* tuvo que activar dos satélites de reserva y decidió fabricar el primer satélite GLONASS-K, que se lanzó en febrero

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

de 2011, como parte de la constelación en funcionamiento, llevando el número de satélites a 23, y obteniendo una cobertura mundial casi completa.

Después de varios meses, el 2 de octubre de 2011 se lanzaría el 24º satélite que sería un GLONASS-M, restaurando la constelación completamente por primera vez desde 1996. En los años siguientes se seguirían lanzando más satélites GLONASS-M, y así, el 7 de diciembre de 2015, se confirma oficialmente que la constelación del sistema estaba completa. [59, 60, 64, 65]

3.3.2 Lanzamientos satelitales.

Como sucede en los satélites GPS, en esta tabla se exponen todos los satélites lanzados. Son en diferentes grupos porque en cada uno de ellos se han realizado mejoras con respecto a los anteriores.

Lanzamientos de satélites GLONASS realizados desde el primero, el 12 de octubre de 1982, hasta el 3 de noviembre de 2018. [67]

Versión y Grupo	Lanzamientos	Operacionales	No usados	Retirado	Lanzamientos fallidos
Uragan I	10	0	0	10	0
Uragan II	9	0	0	9	0
Uragan IIB	12	0	0	6	6
Uragan IIV	56	0	0	56	0
Uragan III	1	0	0	1	0
Uragan-M	47	23	1	17	6
Uragan-K1	2	1	1	0	0
Total	**137**	**24**	**2**	**99**	**12**

Tabla 3.2. Lanzamientos de satélites GLONASS realizados. [51]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

3.3.3 Funcionamiento.

El receptor se encarga de tomar mediciones respecto al tiempo, usando un mínimo de cuatro satélites para obtener la posición de las coordenadas (X, Y, Z), al que se le suma el error producido por el reloj.

Con un sólo satélite no es posible conocer la posición de un móvil, por lo que se necesitaran al menos tres satélites para poder triangular la señal. Su funcionamiento es el siguiente:

- Cada uno de los satélites nos indica que el receptor está en un punto de la esfera, siendo el centro de la esfera donde se encuentra el satélite.
- Si obtenemos información de dos satélites más, se determina un espacio que se produce cuando intersectan las esferas en algún punto, que es donde está el receptor.

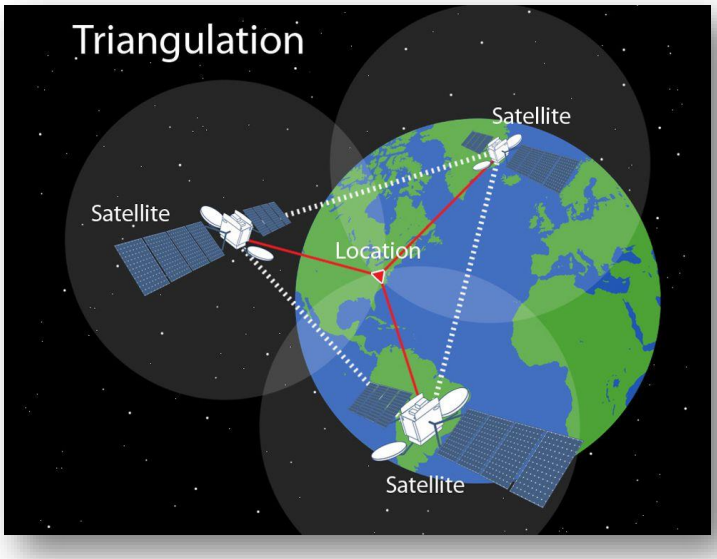

Figura 3.25: Método de triangulación. [52]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

- Para conocer la altitud en ese punto, es necesario disponer de un cuarto satélite.

Como podemos ver, el GLONASS tiene un funcionamiento prácticamente igual a los demás sistemas GNSS. [59, 60, 63]

3.3.4 Señales GLONASS.

Los satélites del GLONASS usan radiofrecuencias que toman el nombre de Acceso Múltiple por División de Frecuencia o **FDMA** (Frequency Division Multiple Access).

Cada satélite transmite dos tipos de señales, la **L1** tiene una precisión estándar y la **L2** es de alta precisión. A través de la **L2** es por donde se transmiten los datos.

- **Frecuencia banda L1**: f1 (k) = 1.602 MHz + k * 9/16 MHz
- **Frecuencia banda L2**: f2 (k) = 1.246 MHz + k * 7/16 MHz

Donde K = número del satélite. [59, 60, 61]

3.3.5 Códigos GLONASS.

El mensaje de navegación se transmite a una velocidad de 50 bits/s modulándose a través de los códigos C/A y P.

Cada uno de los satélites del GLONASS envía un mensaje de navegación a través del código C/A, este está formado por una trama que a su vez tiene

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/
Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c
Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

cinco subtramas. En una subtrama hay 15 palabras de 100 bits cada una. El tiempo que tarda cada una de estas subtramas en ser emitidas varía entre 10 y 15 segundos, por lo que una trama entera tardaría en emitirse aproximadamente 2,5 minutos.

Una subtrama contiene el almanaque de cinco satélites. Cada almanaque, comprende/incluye la información aproximada de las efemérides del resto de los satélites, y son recibidas por el receptor, en tierra, cada 30 segundos.

El código P ha sido descifrado por varias organizaciones ya que el gobierno ruso no ha dado ningún detalle sobre él. Por lo que los análisis realizados nos dicen que cada satélite emite una trama que está formada por 72 subtramas, cada una de las cuales está formada, a su vez, por cinco palabras de 100 bits. Una subtrama tarda en transmitirse 10 segundos.

Respecto a las efemérides, que contienen los detalles del propio satélite, están incluidas en las tres primeras subtramas, siendo transmitidas al receptor cada 10 segundos. [59, 60, 63]

3.3.6 Sistema de tiempo en los satélites GLONASS.

Cada satélite del GLONASS está equipado con un reloj atómico de **cesio**, que son corregidos dos veces al día, dando así, una precisión de unos 15 nanosegundos con la sincronización de tiempos de los satélites en relación al

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

sistema de tiempos GLONASS (**GLONASST**), que es generado en la central de sincronización de tiempos de Moscú. [60]

3.3.7 Fuentes de error.

Al igual que el sistema GPS, el GLONASS está expuesto a errores que afectan a la precisión de la posición que se calcula. En su conjunto producen un error entre los 10 y 25 metros, dependiendo de la calidad del receptor, la posición de la tierra y debido a otros errores, como pueden ser los siguientes:

- **Error ionosférico:** es el error que más interfiere en el cálculo de la posición, debido a que la ionosfera, que es una capa formada por partículas cargadas eléctricamente, se encuentra a una altura entre los 130 y los 190 km con respecto a la superficie de la tierra. Esto provoca que la señal de radiofrecuencia se desvíe por refracción dependiendo de la hora del día, la actividad solar y otros factores.

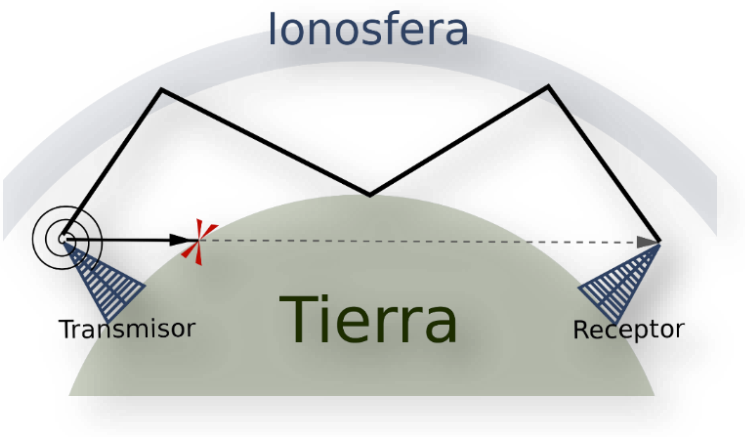

Figura 3.26: Propagación ionosférica. [53]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

- **Error atmosférico:** se produce cuando las señales de radiofrecuencia atraviesan el vapor de agua en la atmósfera, haciendo que dichas señales disminuyan su velocidad, y afectando al cálculo de esta.
- **Error del receptor:** se pueden incluir estos errores debido a las diversas etapas de procesamiento de las señales recibidas por los satélites. Pueden ser causados por:
  - Ruido térmico del propio aparato.
  - Precisión del software.
- **Error debido a las efemérides:** un satélite transmite su posición en sus efemérides y esta no coincide con su posición.
- **Error multitrayecto o multisenda:** se debe a que las señales emitidas por los satélites sufren reflexiones antes de llegar al receptor, llegando por dos caminos diferentes, uno directo y otro reflejado.
- **Dilución de Precisión (DOP):** la geometría de los satélites visibles es muy importante para obtener la posición lo más precisa posible, y cambia con el transcurso del tiempo por el movimiento relativo de los satélites.

  Se consideran unos valores aceptables de DOP cuando estos son pequeños, como pueden ser dos o tres, mientras que un valor alto tal como ocho, se considera malo, puesto que se reduce la exactitud de la posición.

Con respecto a la **Disponibilidad Selectiva**, el gobierno ruso ha declarado que no degradará la señal para uso civil, de manera que este error producido

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

intencionadamente, no afecta al sistema GLONASS, teniendo una precisión absoluta en tiempo real en el eje horizontal de unos 60 metros (99,7%) y 75 metros en el eje vertical (99,7%). [59, 66]

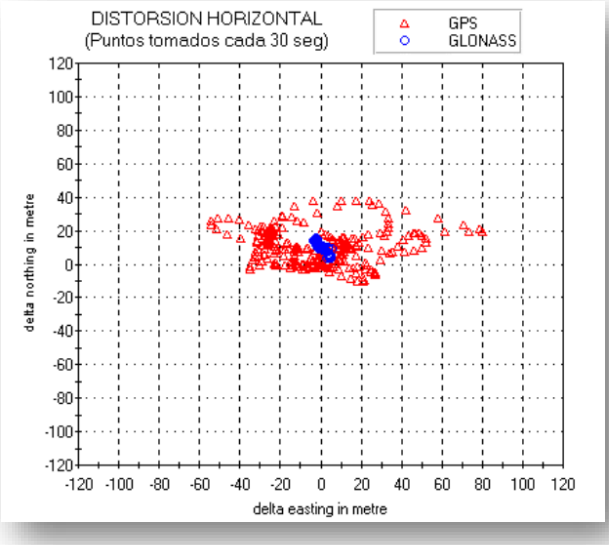

Figura 3.27: Comparativa entre la posición horizontal dada por el GPS y el GLONASS. [54]

3.4 BeiDou.

El BeiDou, es el sistema de posicionamiento vía satelital desarrollado por la República Popular de China.

Este sistema comenzó a funcionar en el año 2000, dando cobertura sólo a China y más adelante, en 2012, a la región comprendida entre Asia y el Pacífico.

El 27 de diciembre de 2018, comenzó a suministrar servicios a nivel global.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Figura 3.28: Logotipo del sistema BeiDou. [55]

Como los demás sistemas de navegación satelital, consta de tres segmentos:

- **Segmento espacial:** cuenta con dos constelaciones de satélites, la primera de ellas está formada por los satélites de segunda generación llamados *BeiDou Navigation Satellite System (BDS)* o *BeiDou-2* dando cobertura limitada a la región entre Asia y el Pacífico. Entró en funcionamiento en diciembre de 2011 y contando inicialmente con 10 satélites en órbita, para más tarde tener 35 en total. La segunda constelación está formada por los satélites de tercera generación *BeiDou-3* que proporcionara cobertura global.
- **Segmento de control:** muy similar a los otros sistemas satelitales, consta de una estación maestra y tres estaciones de seguimiento llamadas *Jamushi*, *Kashi* y *Zhanjiang*. También cuenta con 30 estaciones para monitorear la

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

información que emiten los satélites que se encuentran en el horizonte visible.

- **Segmento de usuario:** tiene unos receptores ligeramente más grandes que otros sistemas, una antena de unos 20 cm y utiliza unas baterías más potentes, debido a que necesita transmisores con doble vía para permitir la comunicación entre las estaciones y los satélites. [68, 70]

BeiDou ofrecerá el servicio para la búsqueda y rescate global (SAR) en los satélites del sistema *BeiDou-3*, como parte del sistema MEOSAR. [68, 70 73, 89, 92]

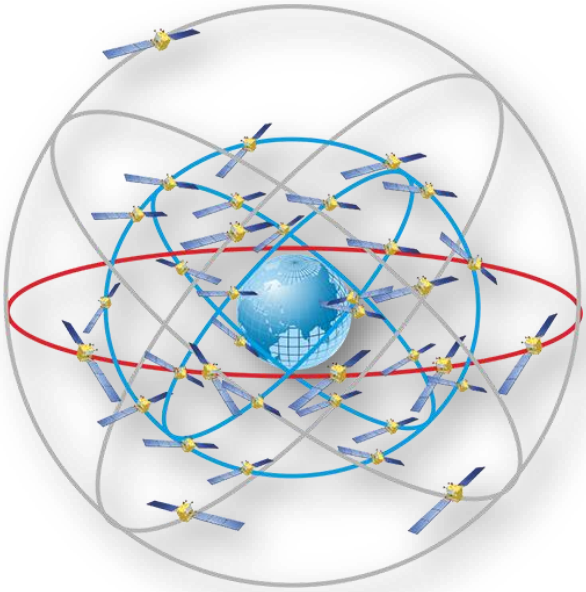

Figura 3.29: Órbitas de los satélites BeiDou, en rojo la órbita GEO, en azul la órbita MEO y en gris la órbita IGSO. [56]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

3.4.1 Historia y desarrollo.

En el año 1983, *Chen Fangyun*, una de las personas más importantes de la industria espacial y la comunidad científica de China, plantearon un sistema de navegación, que necesitara sólo dos satélites que estuvieran en la órbita geoestacionaria, es decir, sobre el ecuador terrestre, en un ángulo de 60º de longitud entre sí, para que se pudiera proporcionar la ubicación a los usuarios terrestres. Se propuso el uso de satélites geoestacionarios porque este sistema no requería tantos satélites por constelación como los satélites de órbita media terrestre (MEO), además de aumentar la disponibilidad de los mismos.

Esta idea captó un gran interés del ejército chino y consiguió el apoyo de la Oficina de Encuestas y Mapas del Departamento del Personal General del Ejército Popular Chino en 1986. Después de varios años, a finales de septiembre de 1989, el equipo de proyecto liderado por *Chen Fangyun*, demostró que el sistema de navegación satelital utilizando satélites chinos GEO era muy eficaz para hallar la posición del receptor, de modo que, en 1993, las autoridades chinas aprobaron oficialmente este proyecto para que siguiera en desarrollo.

A partir de la aprobación del proyecto, el equipo de desarrollo decidió que se llevaría a cabo en tres fases:

1) Entre los años 2000 y 2003, se realizaría el lanzamiento de tres satélites experimentales BeiDou.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

2) Para el año 2012: serían lanzados los satélites suficientes para dar cobertura a China y las regiones cercanas.
3) Para 2020: el sistema tendría un funcionamiento global, dando cobertura en todo el mundo.

El primer sistema BeiDou, que fue experimental y de cobertura regional, se llamó *BeiDou-1*, tenía una precisión de unos 100 metros, pero mediante el uso de métodos diferenciales, la precisión mejoraba hasta los 20 metros. Tenía una capacidad de 540.000 usuarios por hora, con la posibilidad de que pudieran trabajar 150 usuarios simultáneamente y de uso exclusivo para los militares. Constaba de cuatro satélites geoestacionarios (tres operacionales y uno de repuesto).

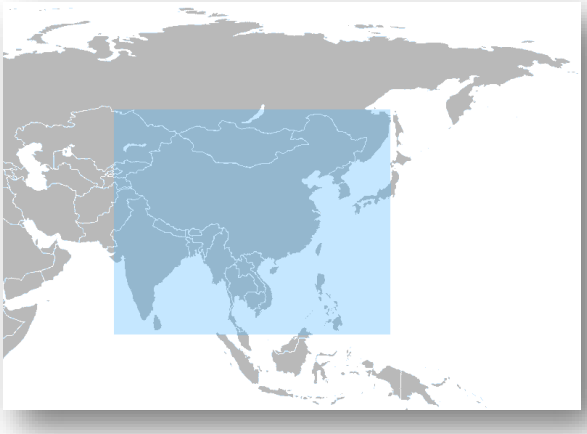

Figura 3.30: Cobertura del sistema BeiDou-1. [57]

El primer satélite lanzado, llamado *BeiDou-1A*, fue el 31 de octubre del 2000, el segundo satélite, *BeiDou-1B*, se lanzó el 21 de diciembre de 2000 y el

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

último satélite operativo de la constelación, *BeiDou-1C*, se lanzó el 25 de mayo del 2003. El satélite de reserva, *BeiDou-1C*, se lanzó el 3 de febrero de 2007.

El sistema *BeiDou-2 o COMPASS*, anteriormente llamado *COMPASS*, es el sistema que sustituyo a su predecesor *BeiDou-1*. Tendrá una constelación de 35 satélites, siendo seis de ellos geoestacionarios como los que se usaron en el *BeiDou-1*, estando 21 de ellos en la órbita media terrestre (MEO) y seis en la órbita geosíncrona inclinada (con el mismo periodo de rotación que la tierra).

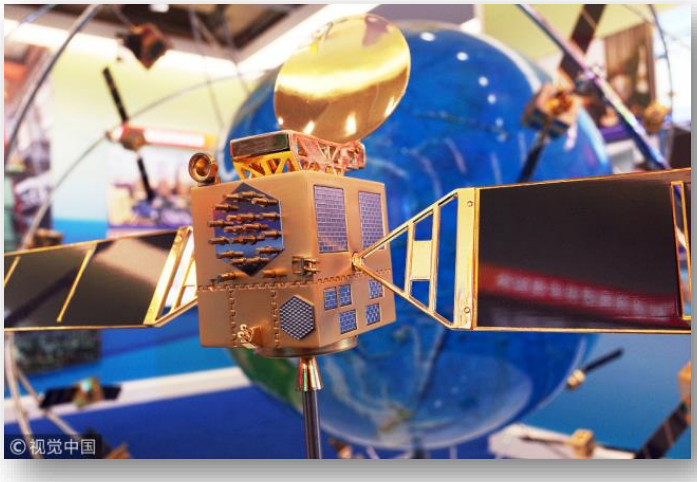

Figura 3.31: Maqueta de un satélite utilizado en el sistema BeiDou. [58]

El sistema entró en funcionamiento de prueba en 2011, dando una precisión de unos 25 metros con tan sólo 10 satélites en órbita, por lo tanto, a medida que se lanzaran más satélites, la precisión iría mejorando de manera sustancial.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Al igual que los otros sistemas de posicionamiento satelital, ofrece un servicio autorizado, que sólo puede utilizar el gobierno y el ejército chino, teniendo una gran precisión, de aproximadamente unos 10 centímetros, y proporciona información sobre el estado del sistema, mientras que el servicio abierto para civiles, que es gratuito, tiene una precisión de 10 metros, sincroniza los relojes con una precisión de 10 nanosegundos, y también ofrece la posibilidad de medir la velocidad del receptor hasta 0,2 m/s.

En diciembre de 2012, la constelación ya estaba completa y ofrecía servicios a la región de Asia y el Pacífico.

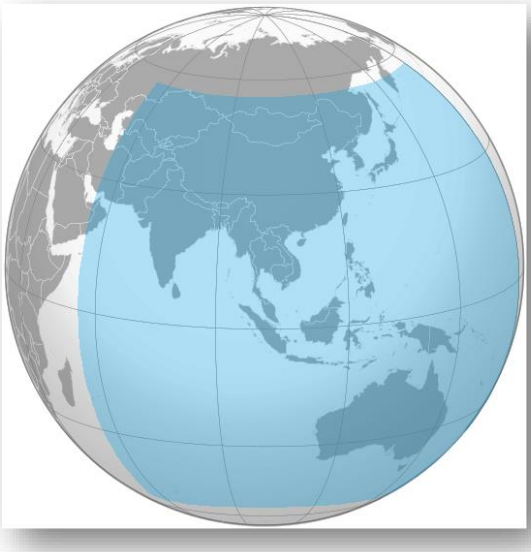

Figura 3.32: Cobertura del sistema BeiDou-2. [59]

La tercera fase del sistema BeiDou, llamado *BeiDou-3*, dará cobertura global. Contará con tres satélites GEO, tres satélites IGSO (ocupan una órbita inclinada alrededor de la tierra que tiene un ángulo distinto de 0º con respecto

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

al plano ecuatorial), y 24 satélites MEO. En octubre de 2018, se lanzaron 15 satélites para esta fase del sistema y se prevé que esta nueva constelación esté completa y totalmente funcional a partir de 2020.

Estos satélites tienen la posibilidad de utilizar los sistemas SBAS y los sistemas SAR (**S**earch **A**nd **R**escue). También introducirán nuevas frecuencias para la emisión de señales radioeléctricas de los satélites. [68, 69, 70, 71]

3.4.2 Lanzamientos satelitales.

En esta tabla se exponen todos los satélites lanzados. Son en diferentes bloques porque en cada uno de ellos sirve para un sistema actualizado del BeiDou con respecto a los anteriores.

Lanzamientos de satélites BeiDou realizados desde el primero, el 30 de octubre de 2000, hasta el 21 de abril de 2019. [72]

Bloque	Periodo de lanzamiento	Éxito	Fracaso	Actualmente en órbita
1	2000 – 2006	4	0	0
2	2007 – 2018	19	0	15
3	2015 - Actualidad	25	0	25
	Total	48	0	**40**

Tabla 3.4: Lanzamientos de satélites BeiDou realizados. [60]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

3.4.3 Funcionamiento.

Para calcular la posición del usuario, se necesitan únicamente dos satélites y una estación en tierra. La estación maestra transmite una señal de consulta a los receptores BeiDou, utilizando únicamente dos satélites que se encontrarán disponibles en el horizonte visible al receptor del usuario. Después, la estación maestra capta las señales de respuesta que emiten los receptores a través de los dos satélites para calcular de la ubicación del usuario en 2D. Teniendo la posición 2D, se compara con un mapa del territorio de la zona digitalizado, que se encuentra en la base de datos del sistema de posicionamiento, con lo que se obtiene la posición 3D del usuario y se emite a través de los satélites de manera cifrada.

También pueden enviarse mensajes cortos de unos 120 caracteres chinos a la estación central. [68, 69]

3.4.4 Señales BeiDou.

En el sistema *BeiDou-1,* los satélites utilizaban la frecuencia **2.941,75 MHz**, mientras que el receptor enviaba las señales de nuevo al satélite con la frecuencia **1.615,68 MHz**.

El sistema *BeiDou-2 o COMPASS*, las frecuencias están asignadas a cuatro bandas: E1, E2, E5B y E6B y se superponen con las del sistema **Galileo**.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Que las frecuencias se encuentren superpuestas con las de **Galileo**, tiene sus ventajas y desventajas. Desde el punto de los receptores, se simplificaría su diseño, ya que no habría que prepararlos para frecuencias distintas entre estos dos sistemas. Por otro lado, puede haber interferencias puesto que las bandas E1 y E2, están asignadas al servicio público del **Galileo.**

Como es un tema muy importante, la *ITU* (Unión Internacional de Telecomunicaciones), aclaró que el primer sistema que trabajara con un rango de frecuencias específicas tendrá prioridad sobre estas y cualquier otro usuario que quiera utilizarlas, deberá obtener un permiso antes de usarlas.

Por último, el sistema *BeiDou-3* introducirá nuevas bandas y frecuencias que son:

- Las bandas **B1A, B1C y B1I** (1.575,42 MHz).
- Las bandas **B2a y B2b** (1.191,795 MHz).
- Las bandas **B3I, B3Q y B3A** (1.268,52 MHz).
- Y una banda de prueba **Bs** (2.492,028 MHz). [69, 70, 93]

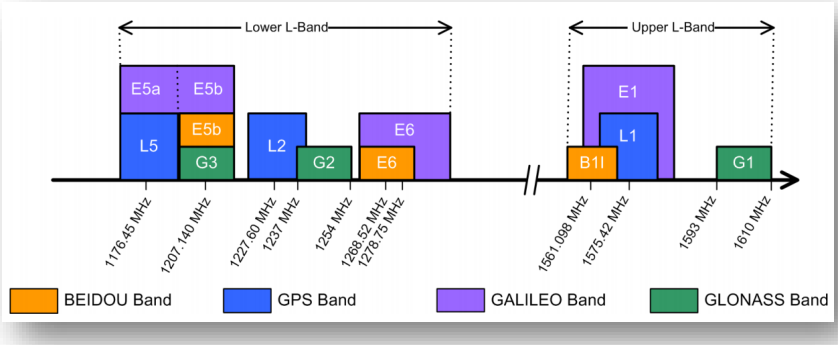

Figura 3.33: Frecuencias de trabajo de los diferentes sistemas satelitales. [61]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

3.4.5 Sistema de tiempo en los satélites BeiDou

Los satélites lanzados antes del año 2015 están equipados con un único reloj atómico de cesio, y a partir de ese año, empezaron a instalar los relojes de hidrógeno.

3.5 QZSS.

El Sistema de Satélites Quazi-Zenith (QZSS), es un proyecto del gobierno japonés a fin de desarrollar un sistema de aumentación basado en satélites (SBAS), para el sistema de posicionamiento GPS.

Figura 3.34: Logotipo del sistema QZSS. [62]

El QZSS opera en las regiones de Asia-Oceanía, y se centra en mejorar la cobertura en las zonas de Japón donde el GPS presenta deficiencia, al igual que los demás sistemas de navegación satelitales, está formado por:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

- **Segmento espacial:** consta de tres satélites que orbitan en una órbita periódica altamente elíptica (HEO) y uno con una órbita geoestacionaria. QZSS está diseñado para que al menos uno de los satélites (HEO) esté casi siempre sobre el cenit de Japón, aproximadamente 12 horas. Esto da lugar al termino cuasi-cenit, para el cual, toma nombre el sistema.

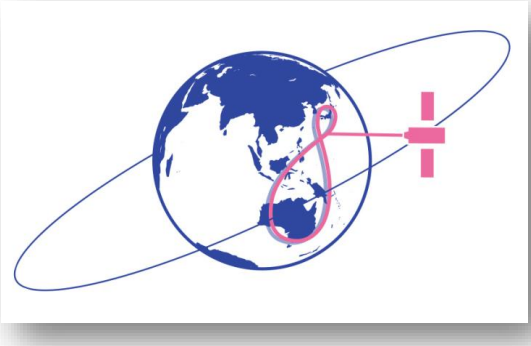

Figura 3.35: Óbita HEO (en azul) y cuasi-cenit (en rojo). [63]

- **Segmento de control:** formado por una estación maestra, estaciones de control y estaciones de monitoreo. La red de estaciones de monitoreo se encuentra en la región de Asia oriental y Oceanía, teniendo sus estaciones en: **Japón** (Okinawa, Sarobetsu, Koganei, Ogasawara) y fuera del país: Bangalore (**India**), **Guam**, Canberra (**Australia**), Bangkok (**Tailandia**) y Hawai (**Estados Unidos**).
- **Segmento de usuario:** formado por receptores de señales GNSS procedentes del segmento espacial. Normalmente, cada receptor es superheterodino y está formado por una antena receptora de la **Banda L**. [73, 74, 75]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

3.5.1 Historia y desarrollo.

En el año 2002, el gobierno japonés confirmó el desarrollo de un sistema de aumentación para mejorar la precisión del GPS, y que operase en Japón.

Este trabajo se le adjudicó a la empresa **A**dvance **S**pace **B**usiness **C**orporation (ASBC), que desarrolló conceptos con las compañías Mitsubishi Electric, Hitachi y GNSS Technologies Inc. En el año 2007, se produjo un retraso debido a que la empresa ASBC entró en quiebra, entonces el gobierno japonés decidió darle el trabajo a JAXA junto al Centro de Investigación y Aplicación de Posicionamiento de Satélites (SPAC). JAXA pertenece a cuatro departamentos gubernamentales japoneses: el Ministerio de Educación, Cultura, Deportes, Ciencia y Tecnología, el Ministerio de Asuntos Internos y Comunicaciones, el Ministerio de Economía, Comercio e Industria y el Ministerio de Tierra, Infraestructura, Transporte y Turismo.

Figura 3.36: Logotipo de JAXA. [64]

El primer satélite, llamado Michibiki-1, se lanzó el 11 de septiembre de 2010, y se logró el pleno funcionamiento en el verano de 2011.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Durante este tiempo se realizaron verificaciones técnicas para comprobar el funcionamiento y demostrar que el sistema tendría múltiples ventajas. Una de ellas fue la realización de una ruta, yendo con un automóvil por el centro de Tokio, donde el vehículo está rodeado de edificios altos, demostró que el porcentaje de localización de un usuario utilizando el GPS más el QZSS en esa zona, mejoró en un 10% al uso del GPS solamente, y en los casos más desfavorables, hasta un 40%.

En 2011, el gobierno de Japón decidió apresurar el despliegue del sistema QZSS para lograr una constelación de cuatro satélites a finales de 2010, mientras afirmaba que habría una constelación de siete satélites en el futuro.

En marzo de 2013, el gobierno japonés anunció formalmente un contrato con Mitsubishi Electric, para la construcción de tres satélites más, que serían lanzados antes del año 2018.

Por otro lado, se firmó otro contrato especial con la compañía dirigida por NEC y respaldada por Mitsubishi UFJ Lease & Finance y Mitsubishi Electric Corporation, para financiar el diseño y la construcción del segmento de control, así como su verificación y mantenimiento durante 15 años.

El sistema de cuatro satélites se declaró operativo el uno de noviembre de 2018. [73, 74]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

3.5.2 Lanzamientos satelitales.

En esta tabla se exponen los cuatro satélites lanzados.

Lanzamientos de satélites QZSS realizados desde el primero, 11 de septiembre de 2010, hasta el 10 de octubre de 2017. [77]

Nombre	Fecha de lanzamiento	Estado
QZS-1 (Michibiki-1)	11 de septiembre de 2010	Operativo
QZS-2 (Michibiki-2)	1 de junio de 2017	Operativo
QZS-3 (Michibiki-3)	19 de agosto de 2017	Operativo
QZS-4 (Michibiki-4)	10 de octubre de 2017	Operativo

Tabla 3.5: Lanzamientos satélites del sistema QZSS. [65]

3.5.3 Funcionamiento.

El principal propósito de este sistema es aumentar la disponibilidad del sistema GPS en las zonas de Japón donde hay una gran cantidad de edificios, de manera que los satélites sólo se pueden captar a grandes alturas.

Otras funciones disponibles son:

- Proporcionar un posicionamiento preciso con un error de precisión entre 2 y 3 metros.
- Mejora del rendimiento en situaciones donde el GPS pierde efectividad.
- Permitir el envío de mensajes cortos para emitir avisos de socorro y rescate.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

3.5.4 Señales QZSS.

Este sistema consta de seis señales:

- **1-C / A** (1.575,42 MHz).
- **L1C** (1.575,42 MHz).
- **L2C** (1.227,6 MHz).
- **L5** (1.176,45 MHz).
- **L1-SAIF** (1.575,42 MHz): frecuencia interoperable con el **GPS** para su uso como SBAS.
- **LEX** (1.278,75 MHz): es una señal de radiofrecuencia experimental para ofrecer un servicio de alta precisión con un margen de error de 3 centímetros. [73, 74, 75, 93]

3.5.5 Sistema de tiempo en los satélites QZSS.

Según el plan original, llevan dos tipos de relojes:

- Un reloj de hidrógeno.
- Un reloj atómico de rubidio. [76]

3.6 Galileo.

Galileo es el sistema de navegación global por satélite creado por la Unión Europea, a través de la Agencia Europea de Navegación Global por Satélite (GSA). El costo de creación y puesta en funcionamiento es de 10.000 millones de euros.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Uno de los principales propósitos de Galileo es facilitar un sistema de posicionamiento de alta precisión que sea utilizable por los miembros de la Unión Europea, además de los países que han financiado este proyecto y no tengan que depender del GPS creado por EE. UU. o del GLONASS de la Federación Rusa, debido a que estos podrían degradar o desactivar su propio sistema en cualquier momento.

Figura 3.37: Logotipo del sistema Galileo. [66]

El Galileo no tiene un servicio de uso militar, por lo que sólo tiene servicios civiles, uno de ellos es el sistema básico, que es el de menor precisión, que será gratuito y utilizable en todo el mundo, mientras que el servicio de pago será para empresas. En el caso de un conflicto bélico, las señales de este sistema se verían degradas. La precisión de las posiciones horizontales y verticales en el servicio gratuito será de aproximadamente de un metro y el servicio encriptado, ofrecerá una precisión aproximada de un centímetro tanto

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

horizontalmente como verticalmente, es decir, la precisión con respecto a los demás sistemas de posicionamiento a través de satélites (GPS, GLONASS y BeiDou), será la mayor que haya cuando esté operativo al cien por cien. [78, 79, 83, 90, 94]

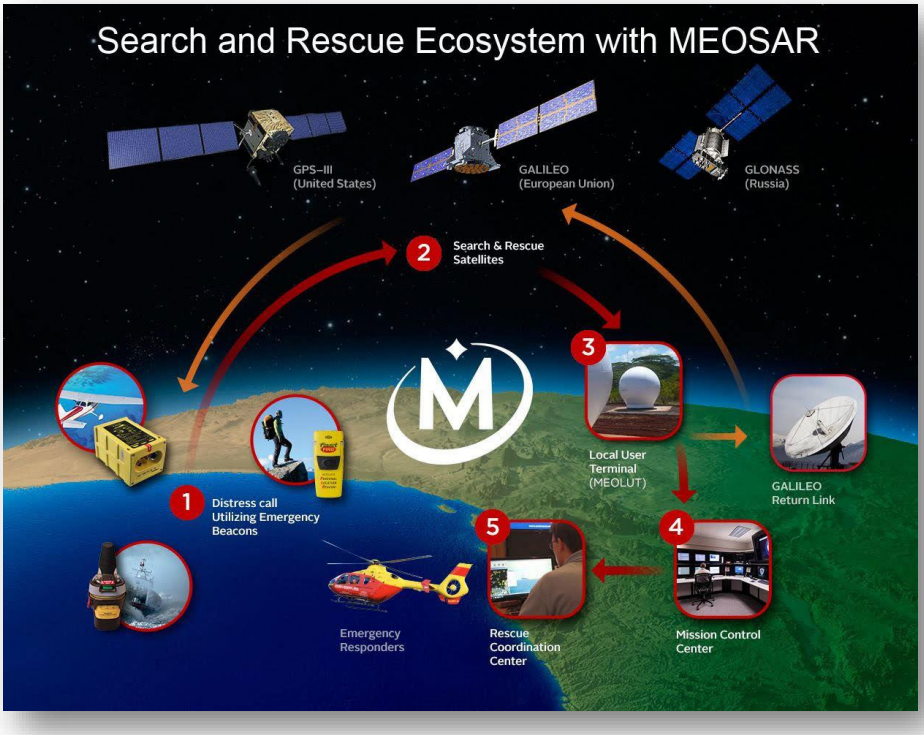

Figura 3.38: Funcionamiento del sistema SAR. [67]

Por otra parte, Galileo ofrecerá un servicio único para la búsqueda y rescate global (SAR), siendo uno de los más eficaces. Participa en el segmento espacial del sistema Cospas-Sarsat, llamado MEOSAR, y está financiado por la Unión Europea, Rusia y Estados Unidos. [89]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/
Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c
Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Al igual que los demás sistemas de navegación está formado por:

- **Segmento espacial:** estará formado por 30 satélites MEO, 24 en órbita y seis de repuesto, se encontrarán a una altura de unos 23.200 km aproximadamente y estarán repartidos en tres planos orbitales.

Figura 3.39: Órbitas del sistema Galileo. [68]

- **Segmento de control,** formado por:
  - Dos centros de control en tierra; en Oberpfaffenhofen y Fucino (**Alemania**), para la observación del estado de los satélites.
  - Seis estaciones que se encargan del seguimiento y control, ubicadas en: Kiruna (**Suecia**), Kourou (**Guayana Francesa**), Nouméa (**Nueva Caledonia**), Sainte-Marie (**Isla Reunión**), Redu (**Luxemburgo**) y Papeete (**Polinesia Francesa**).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

- Unas 10 estaciones de transmisión de datos, que se encuentran en: Svalbard (**Noruega**), Kourou (**Guayana Francesa**), Papeete (**Polinesia Francesa**), Sainte-Marie (**Isla Reunión**) y Nouméa (**Nueva Caledonia**).
- Una red de difusión de datos distribuida por todo el planeta.
- Un centro de servicio, con ubicación en Madrid (**España**), para consulta de dudas y ayuda sobre Galileo.

- **Segmento de usuario:** formado por receptores de señales GNSS procedentes del segmento espacial. Normalmente, cada receptor es superheterodino y está formado por una antena receptora dentro de la **Banda L**. [78, 79, 83, 87, 92]

3.6.1 Historia y desarrollo.

En los últimos años del siglo XX, varios países de la Unión Europea, empezaron a ver las deficiencias y peligros de los sistemas de posicionamiento que habían en ese momento (GPS y GLONASS), debido a que los países creadores de estos sistemas podrían limitar o no permitir su uso en caso de un conflicto bélico, lo que crearía grandes problemas operativos. Por otro lado, se dieron cuenta de que estos sistemas a lo mejor no acrecentarían su precisión en un futuro cercano.

En el año 1999, tres de los principales miembros de la Unión Europa (**Alemania, Italia y Francia**), presentaron varios conceptos de sistemas a la ESA,

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

la Agencia Espacial Europea. Esta agencia comparó los bocetos y decidió crear un grupo conjunto de ingenieros elegidos por los tres países.

El 26 de mayo de 2003, se acuerda la primera etapa del sistema Galileo, que supuso oficialmente el desarrollo inicial del sistema, dando sus primeros datos:

- Los principales contribuyentes al proyecto serían Alemania e Italia.
- Su uso sería principalmente civil, a diferencia del GPS y el GLONASS.
- Disponible con su máxima precisión y sin degradaciones, al contrario que ocurre con el GPS y GLONASS, que degradan las señales usadas por usuarios civiles.
- Su uso sería limitado o cerrado en casos extremos, como por ejemplo en caso de conflicto bélico.

En un principio, la financiación del proyecto fue complicada porque las previsiones del mismo no auguraban buenos resultados. Así, el 17 de enero de 2002, un portavoz del proyecto llegó a declarar que Galileo estaba a punto de desaparecer.

Visto los problemas, se hizo una reunión con todos los miembros de la UE de ese año para ver si seguían adelante con su desarrollo y decidieron que era muy importante contar con un sistema de posicionamiento propio e independiente de los demás.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/
Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c
Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Entonces, en marzo de 2002 la Agencia Espacial Europea y la propia Unión Europea financiaron el proyecto, invirtiendo para las primeras fases unos 1.100 millones de euros. Se concretó que tendría tres órbitas con 30 satélites que se lanzarían entre 2011 y 2014, entrando en completo funcionamiento y bajo mando civil en 2019. El costo final, incluyendo la infraestructura en tierra que se construiría entre 2006 y 2007, sería de 3.000 millones de euros.

Para poder hacer frente a esta suma de dinero, al menos dos tercios del presupuesto lo invertirían empresas privadas e inversores, haciéndose cargo del costo restante la ESA y la UE.

En los años siguientes se concretaron más datos sobre el Galileo.

- El servicio abierto básico estaría disponible sin cargo alguno para el usuario.
- El servicio de mayor precisión tendría un costo para su utilización, aunque en febrero de 2018 se acordó que fuera gratuito, pero sólo con disponibilidad para empresas y con autorización. [78, 79, 96]

En junio de 2004, se firmó un acuerdo con EE. UU. para permitir que el GPS y el Galileo coexistieran, además de permitir el uso combinado de ambos. En julio de 2004, Israel firma un acuerdo por el cual se convierte en miembro del desarrollo de Galileo. A finales del año 2004, China realizó un acuerdo con Europa, en el que invirtieron inicialmente 230 millones de euros. En el año 2005, Marruecos y Ucrania se unen también al proyecto.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

A finales del año 2005, comienza la fase de pruebas, se lanza el primer satélite experimental GIOVE-A, de los dos que se lanzarían. El segundo satélite experimental, llamado GIOVE-B, fue lanzado en abril de 2008, sus objetivos eran:

- Calificar cómo de valida es la órbita circular media MEO, a través del estudio de campos magnéticos, radiaciones . . .
- Experimentación con la captación y transmisión de señales electromagnéticas. También se aprovecharía para fijar el espectro de frecuencias que utilizaría Galileo.
- Comprobar el funcionamiento del nuevo reloj atómico, el máser pasivo de hidrógeno. Este reloj nos da una precisión muy alta, alrededor del nanosegundo cada 24 horas, dando un adelanto o retraso de un segundo cada 2,7 millones de años. En cambio, los relojes de rubidio tienen una precisión de 10 nanosegundos por día. Como vemos en la figura 3.39, el máser de hidrógeno, similar al que llevaría el satélite GIOVE-B, se encuentra sometido a pruebas en el *Laboratorio de Sistemas de Telecomunicaciones y Navegación*, ESTEC.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

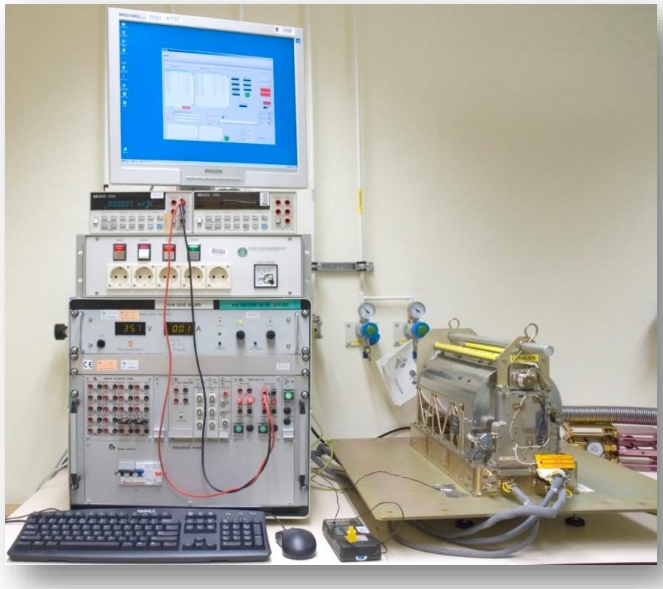

Figura 3.40: Máser de hidrógeno (derecha) poniéndose a prueba. [69]

Entre los años 2011 y 2012, se lanzaron cuatro satélites, que correspondían a la fase siguiente; a la experimental, ***I**n-**O**rbit **V**alidation* (IOV), realizándose estos lanzamientos para validar el sistema.

El 12 de marzo de 2013 se logró determinar la posición en tierra por primera vez, gracias a la trasmisión de datos realizados entre el segmento espacial y terrestre.

El 18 de diciembre de 2013, Suiza firmó un acuerdo con la UE para participar plenamente con el desarrollo, contribuyendo con 80 millones de euros para el periodo de financiación 2008 – 2013.

La última fase, nombrada ***F**ull **O**perational **C**apability* (FOC), se encargará de completar la constelación, que estará formada por 30 satélites e incluye el

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

segmento de tierra y se prevé que en el periodo comprendido entre 2019 y 2020 se complete. [80, 82, 84, 87, 91, 95, 96, 97]

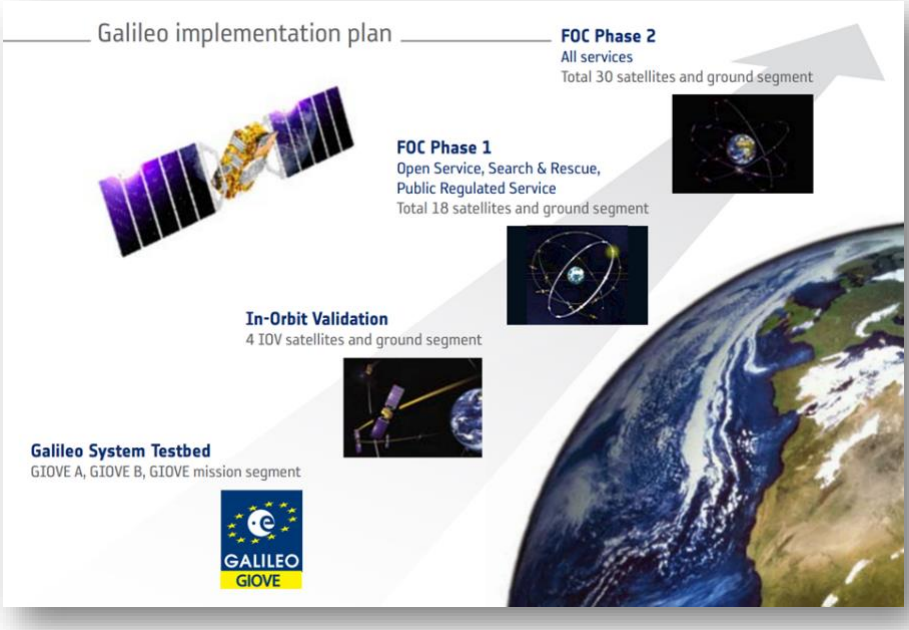

Figura 3.41: Fases del desarrollo del sistema Galileo. [70]

3.6.2 Colaboración internacional en el desarrollo.

- **Israel:** en julio de 2004, se firma un acuerdo para que Israel pase a ser miembro del desarrollo de Galileo.
- **Marruecos:** en noviembre de 2005, se une al programa.
- **Suiza:** el 18 de diciembre de 2013, firmó un acuerdo para participar plenamente con el desarrollo, contribuyendo con 80 millones de euros para el periodo de financiación 2008 – 2013.
- **Ucrania:** el 3 de junio de 2005, decide unirse al proyecto.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/
Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c
Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

- **China:** A finales del año 2004, se realizó un acuerdo con Europa, en el que invirtieron inicialmente 230 millones de euros. Tras varios años, en 2008, el gobierno chino decidió abandonar el proyecto para centrarse en su sistema de navegación BeiDou. [78]

3.6.3 Los problemas relacionados con la financiación.

Tras el fracaso a mediados de 2006 de la alianza público-privada (es un acuerdo que se realiza para que empresas, tanto del sector público como el sector privado, trabajen conjuntamente para realizar un servicio público), la Comisión Europea decidió nacionalizar el programa Galileo como un programa de la Unión Europea.

A comienzos del año siguiente, el proyecto se encontraba en crisis debido a la escasez de fondos públicos, ya que la UE no había decidido cómo financiar el plan. El ministro alemán de transportes, Wolfgang Tiefensee, tenía ciertas dudas sobre la capacidad de las empresas participantes, para poner fin a las luchas internas en un momento en que sólo se había lanzado con éxito un satélite de prueba.

Si bien, aún no se había adoptado una decisión, el 13 de julio de 2007 los países de la UE deliberaron la reducción de 548 millones de euros en el presupuesto de competitividad del año siguiente y la redistribución de una parte de estos fondos a otras partes del fondo de financiación, lo que podría sufragar una parte del coste del sistema de navegación.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

En noviembre de 2007, se acordó redistribuir los fondos presupuestarios del sector agrícola y administrativo de la UE y atenuar el proceso de adjudicación con el objetivo de invitar a más empresas de la UE.

A mediados del siguiente año, los ministros de transporte de la Unión Europea aprobaron el Reglamento de aplicación de Galileo. Lo que posibilitó destinar los 3.400 millones de euros de los presupuestos agrícolas y administrativos de la UE, permitiendo la realización de contratos para iniciar la construcción de los satélites y la estación terrestre.

En junio de 2009, el Tribunal de Cuentas Europeo realizó un informe donde recalcaba los problemas que había en el gobierno europeo, los retrasos en el proyecto y los excesos presupuestarios, provocando que, en 2007, el proyecto se paralizara. Por eso, en octubre del mismo año, la Comisión Europea limitó el número planeado de satélites de 28 a 22, para que los seis restantes pudieran fabricarse más adelante, y fuesen aprobados en otros presupuestos.

El presupuesto de 3.400 millones de euros, para el periodo 2006-2013 se consideró que era insuficiente, por ello, en el año 2010 el Think-Tank Open Europe (centro de investigación donde se realizan actividades relacionadas con tecnología, economía, cultura . . .), se evaluó que el costo total, desde el inicio del desarrollo hasta la finalización de éste y su respectivo mantenimiento durante 20 años, sería de 22.200 millones de euros, subvencionado por los contribuyentes, frente a las estimaciones iniciales, del año 2000, de unos 7.700

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

millones lo que supuso unos 2.600 millones de euros a cargo de los contribuyentes, y el resto fue aportado por inversores privados. Ello pone de manifiesto la complejidad de crear un sistema de navegación satelital.

En el primer trimestre de 2010, se constató que el presupuesto para Galileo sólo serviría para proporcionar cuatro satélites de la clase IOV y 14 de la clase FOC para principios de 2014, sin que hubiera garantías de que se completara la constelación, por lo que la capacidad del sistema no superaría el 60%. Por esta razón el gerente del programa Galileo informó a la Comisión Europea, que el financiamiento limitado para el lanzamiento de los 18 satélites nombrados anteriormente, provocaría que en algunos lugares del planeta cada ciertos días del año, se quedarían sin cobertura satelital, por lo tanto, Galileo no funcionaría.

El verano de ese mismo año, la Comisión Europea informó que, debido a los retrasos y los costos adicionales, se pospuso la fecha de finalización hasta 2018. También se planificó un gasto adicional de 1.900 millones de euros para que el sistema tuviera un total de 30 satélites, 27 operativos y 3 de reserva. Después de la finalización del proyecto, los gobiernos de los países de la UE más los demás integrantes internacionales, tendrán que aportar 750 millones de euros al año para el mantenimiento del mismo.

En el año 2011, se presupuestaron los gastos de infraestructura en 5.300 millones de euros. [78]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

3.6.4 Servicios y señales ofrecidos por Galileo.

Galileo proporcionará cinco servicios principales, que son:

- **Navegación de acceso abierto (OS):** disponible gratuitamente para cualquier usuario. Tiene una precisión de un metro y es interoperable con GPS y GLONASS.
- **Navegación comercial (CS):** sólo operable por empresas bajo autorización con un margen de error de un centímetro.
- **Servicio Safety-of-Life (SoL):** es de servicio abierto, para aquellas aplicaciones donde la precisión necesite ser lo más exacta posible, además ofrece mensajes sobre la integridad del sistema.
- **Navegación pública regulada (PRS):** los principales usuarios serán las agencias gubernamentales, ofreciendo disponibilidad continua, aunque los otros servicios estén cortados en caso de conflicto.
- **Servicio de búsqueda y rescate (SAR):** El sistema indicará las ubicaciones de las balizas de socorro. Mejorará el tiempo de recepción de señales de socorro, que tardarán una media de 10 minutos en ser captados por los satélites de este sistema, mientras que los otros tardan alrededor de una hora. Se podrá enviar mensajes, como, por ejemplo, confirmar que la ayuda está en camino.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Este sistema trabajará con 10 frecuencias en las diferentes bandas:

- Tres frecuencias en el rango de 1.559 hasta 1.591 MHz (**L1**).
- Cuatro frecuencias en el rango de 1.164 hasta 1.215 MHz (**E5A - E5B**).
- Tres frecuencias en el rango de 1.260 hasta 1.300 MHz (**E6**).

[78, 83, 86, 87]

3.6.5 Lanzamientos satelitales.

Los satélites lanzados se dividen en tres grupos, en la que cada uno es la fase de desarrollo a la que pertenecen.

Lanzamientos de satélites Galileo, realizados desde el primero, el 28 de diciembre de 2005, hasta el 29 de julio de 2018. [88]

Grupo	Periodo de Lanzamientos	Éxitos	Fracasos	Operacionales
GIOVE	2005 - 2008	2	0	0
IOV	2011 - 2012	4	0	3
FOC	2014 - Actualidad	20	2	20
	Total	**26**	**2**	**3**

Tabla 3.6: Lanzamientos satélites del sistema Galileo. [71]

3.6.6 Sistema de tiempos en los satélites Galileo.

Cada satélite de la constelación Galileo, tiene cuatro relojes atómicos:

- Dos relojes atómicos de hidrógeno.
- Dos relojes de rubidio que son independientes entre sí.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Como los relojes en los satélites son elementos muy importantes, se decidió llevar tal cantidad de ellos, para evitar que el satélite se quede en desuso si uno de ellos falla, lo que aumenta la vida útil de estos. [80, 81]

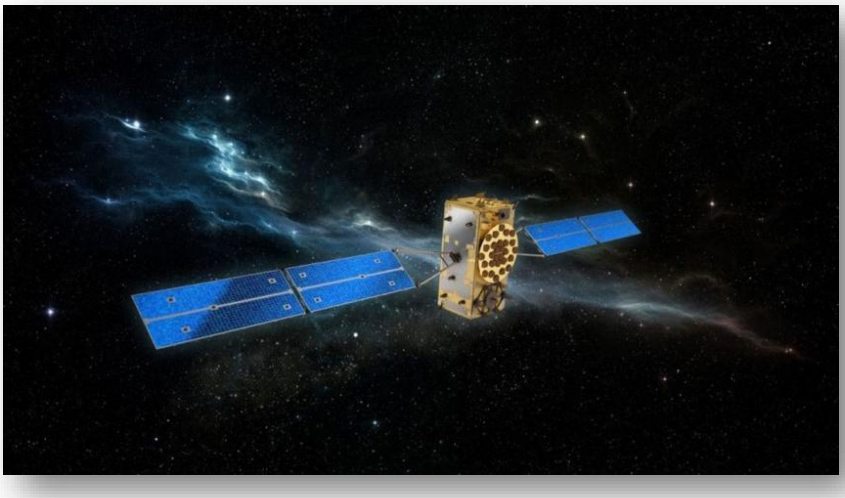

Figura 3.41: Satélite Galileo orbitando. [72]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

C a p í t u l o 4

Similitudes y diferencias entre Galileo y los sistemas GNSS

Introducción.

A la vista de lo expuesto en el capítulo anterior sobre los sistemas de posicionamiento satelitales, nos centraremos ahora en ver las diferencias y la capacidad que nos ofrece el sistema Galileo frente a los demás sistemas GNSS.

Esta constelación satelitaria es financiada y desarrollada por la Unión Europea, y pretende ser el GNSS más avanzado hasta la fecha, ofreciendo diferentes servicios que se adaptan a numerosas necesidades civiles, dando

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

cobertura mundial, y ofreciendo una precisión de un metro en su servicio más básico y de un centímetro en su prestación más completa.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

4.1 Comparativa entre el sistema Galileo y los principales GNSS.

Este proyecto surge de la idea de que los diferentes sistemas GNSS se han ido desarrollando a lo largo de los últimos cuarenta años, y durante ese tiempo los constantes avances tecnológicos han permitido incorporar nuevos servicios y aplicaciones en cada uno de ellos. Por consiguiente, las prestaciones que ofrecen unos y otros son diferentes y está en consonancia con dichos avances tecnológicos del momento, y sobre todo con las necesidades y los intereses que cada región geopolítica del planeta establece para sí misma.

Por otra parte, podemos decir, al menos a primera vista, que el Galileo establece otra filosofía de actuación como sistema de posicionamiento, quizás porque está bajo control civil, y en ese sentido tiene una independencia y soberanía de la que carecen el resto de los sistemas GNSS, y es que aquellos nacieron con una finalidad pura y estrictamente militar, aunque, por supuesto, también tengan sus aplicaciones civiles.

Para que Galileo comenzara su puesta en funcionamiento, se realizaron dos lanzamientos satelitales, y recibieron el nombre de **GIOVE**, que es un acrónimo que significa **G**alileo **I**n-**O**rbit **V**alidation **E**lement. Ambos sirvieron de pruebas para las frecuencias aparte de otros sistemas que se montaron a bordo de estos.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Los dos primeros satélites puestos en órbita fueron:

- El satélite GIOVE-A (lanzado el 28 de diciembre de 2005 y dado de baja el 30 de junio de 2012), su principal objetivo era reclamar para el propio sistema, las primeras frecuencias asignadas para Galileo: **L1, E5,** y **E6.**
- El satélite GIOVE-B (lanzado el 27 de abril de 2008 y dado de baja el 30 de junio de 2012), tenía el objetivo de caracterizar la órbita media terrestre (MEO), además de incluir dos relojes atómicos de rubidio. Fue el primer satélite que usó un máser de hidrógeno como reloj satelital.

El sistema estará en pleno funcionamiento a partir de 2020, aunque ya se encuentra operativo con un total de 24 satélites en órbita, con la puesta en marcha del servicio abierto, pudiéndolo utilizar cualquier usuario, y a la espera de completar su constelación y llegar hasta los 30 satélites.

4.1.1 Generalidades de cada sistema GNSS

A continuación, describiremos las principales diferencias entre el Galileo y los sistemas GPS, GLONASS, BeiDou y QZSS. Empezaremos viendo las características generales de todos los sistemas analizados en el capítulo 3.

El **GPS** fue creado principalmente para uso militar, y más tarde, para uso civil. Entró en funcionamiento en 1973, y se desarrolló tras ver las ventajas que proporcionaba el extinto sistema de navegación TRANSIT. Sus peculiaridades son las siguientes:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

- Consta de 31 satélites en total (24 operativos y 7 de repuesto).
- Repartidos en seis órbitas MEO (Órbita Media Terrestre), que contienen cuatro satélites cada una.
- Estos se encuentran a una altitud de 20.180 km con respecto a la superficie terrestre y una órbita radial de 26.560 km.
- Con un periodo orbital de 11 horas y 58 minutos y una inclinación de 55º respecto al ecuador terrestre.
- Los satélites, a partir del bloque IIR, llevan incorporados cuatro osciladores atómicos, siendo dos de *rubidio* y dos de *cesio*.
- Su precisión es inferior a cinco metros.
- Tiene dos tipos de servicios:
  - El **Standar Positioning Service** (SPS) es el servicio gratuito para usuarios civiles, con señal degradada.
  - El **Precise Positioning Service** (PPS) es el servicio utilizado únicamente por los militares estadounidenses. Tiene más precisión que el servicio civil.

    A partir del dos de mayo del 2000, el gobierno de Estados Unidos decidió eliminar la disponibilidad selectiva, para mejorar la precisión en el servicio civil, aunque aseguró que podían aplicarla en cualquier momento.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

- Utiliza tres frecuencias diferentes:
  - La **L1**, 1.575,42 MHz.
  - La **L2**, 1.227,60 MHz. Es exclusiva de los militares.
  - Y una frecuencia de 50 Hz en ambas señales portadoras nombradas anteriormente. Se utiliza para transmitir las efemérides y las correcciones de los relojes satelitales.

Respecto al **GLONASS**, fue creado inicialmente por la URSS, y después de su disolución, pasó a manos de la Federación Rusa. Diseñado para que su uso fuera principalmente militar, en el año 2007, pasó también a ser de uso civil teniendo prácticamente la misma precisión que el militar. Sus principales características son las siguientes:

- Consta de 27 satélites en total (24 operativos y 3 de reserva).
- Están repartidos en tres órbitas MEO (Órbita Media Terrestre), que contienen ocho satélites cada una.
- Estos se encuentran a una altitud de 19.130 km con respecto a la superficie terrestre y una órbita radial de 25.510 km.
- Con un periodo orbital de 11 horas y 15 minutos y una inclinación de 64,8º respecto al ecuador terrestre.
- Los satélites están equipados con un único reloj atómico de *cesio*.
- Tiene una precisión entre 4,5 y 7,4 metros.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

- Antes de 2007, tenía dos servicios:
  - **El Channel of Standard Accuracy** (CSA) es el servicio gratuito para usuarios civiles, y cuenta con señal degradada.
  - **El Channel of High Accuracy** (CHA) es el servicio utilizado únicamente por los militares rusos, y tiene más precisión que el servicio civil.

  A partir de 2007, tanto los usuarios militares como civiles, utilizan el mismo servicio, con la máxima precisión del sistema.
- Trabaja con dos frecuencias:
  - **Frecuencia banda L1**: f1 (k) = 1.602 MHz + k · 9/16 MHz
  - **Frecuencia banda L2**: f2 (k) = 1.246 MHz + k · 7/16 MHz

  Donde K = número del satélite.

El sistema **BeiDou** es el sistema desarrollado por la República Popular de China, y al igual que los anteriores, fue creado para un uso exclusivo militar, si bien posteriormente se aplicó para uso civil. Inicialmente, solo daba cobertura regional, pero para el año 2020, está previsto que proporcione cobertura global. Como principales características podemos citar:

- Actualmente, consta de 33 satélites operativos y ocho en fase de pruebas. Se espera que en el año 2020 se complete su constelación llegando a un total de 35. Seis satélites se encuentran en la órbita geoestacionaria (GEO),

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

21 en la órbita terrestre media (MEO) y seis en la órbita geosíncrona inclinada (IGSO).

- Los satélites de la órbita GEO se encuentran aproximadamente a 35.786 km de la superficie terrestre, teniendo un periodo orbital de un día sideral, (23 horas, 56 minutos y 4 segundos). Los de la órbita MEO se encuentra entre los 30.000 y 36.000 km de altura y un periodo de 12 horas. Finalmente, los satélites de la órbita IGSO se encuentran a una altura de 37.000 km con un periodo de prácticamente 24 horas.
- Los satélites lanzados antes del año 2015 están equipados con un único reloj atómico de *cesio*, y a partir de ese año, empezaron a instalar los relojes de *hidrógeno*.
- Una precisión entre 0,1 y 10 metros.
- Utiliza dos tipos de servicios.
  - El servicio **abierto** para usuarios civiles.
  - El servicio **restringido** únicamente para militares de la República Popular China.
- El sistema *BeiDou-2* utiliza cuatro frecuencias:
  - La **E5b**, 1.207,14 MHz.
  - La **E6**, 1.268,52 MHz.
  - La **E2**, 1.561,098 MHz.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

- La **E1**, 1.575,42 MHz.

- El sistema *BeiDou-3* utilizará nuevas bandas y frecuencias:
  - Las bandas B1A, B1C y B1I (1.575,42 MHz).
  - Las bandas B2a y B2b (1.191,795 MHz).
  - Las bandas B3I, B3Q y B3A (1.268,52 MHz).
  - Y una banda de prueba Bs (2.492,028 MHz).

Con el fin de mejorar la cobertura, Japón desarrolló el **QZSS** hacia el año 2006. Se trata de un sistema de aumentación basado en satélites (SBAS), que ayuda a aumentar la cobertura en lugares donde hay una gran concentración de edificios altos, y cuyas principales características son las siguientes:

- Consta de cuatro satélites operativos.
- Un satélite utiliza la órbita terrestre alta (HEO) mientras los otros tres utilizan la órbita geosíncrona (GSO).
- Los satélites de la órbita HEO se encuentran a una altitud de 35.786 km y los de la órbita GEO a la misma altura, 35.786 km respecto a la superficie terrestre.
- Tienen un periodo orbital de prácticamente 24 horas.
- Cuentan con dos relojes atómicos de *hidrógeno* y dos relojes de *rubidio.*
- Tiene una precisión entre 0,01 y 1 metro.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

- Utiliza un único servicio, tanto para usuarios civiles como militares.
- Consta de seis frecuencias:
  - **1-C / A** (1.575,42 MHz).
  - **L1C** (1.575,42 MHz).
  - **L2C** (1.227,6 MHz).
  - **L5** (1.176,45 MHz).
  - **L1-SAIF** (1.575,42 MHz): frecuencia interoperable con el GPS para su uso como SBAS.
  - **LEX** (1.278,75 MHz): es una señal de radiofrecuencia experimental para ofrecer un servicio de alta precisión con un margen de error de tres centímetros.

Finalmente, el último sistema de navegación satelital puesto en servicio, el **Galileo**, ha sido desarrollado por la Unión Europea. Su principal singularidad es la de haber sido creado para uso civil. Además, ofrecerá servicios de búsqueda y rescate y una mayor precisión.

A continuación, se enumeran sus principales peculiaridades:

- En la actualidad, consta de 24 satélites operativos, siendo en total 30 (24 activos y 6 de reserva), para alcanzar pleno funcionamiento entre 2019 y 2020.
- Repartidos en tres órbitas MEO, que contienen ocho satélites cada una.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

- Se encuentran a una altitud de 23.222 km y un periodo de 14 horas y 15 minutos.
- Cuentan con dos relojes atómicos de *hidrógeno* y dos relojes de *rubidio,* que le permite ofrecer mayor precisión.
- Tiene una precisión entre 0,01 y 1 metro.
- Consta de cinco servicios, que son:
  - Navegación de acceso abierto (OS): disponible gratuitamente para cualquier usuario. Tiene una precisión de un metro y es interoperable con GPS y GLONASS.
  - Navegación comercial (CS): sólo operable por empresas bajo autorización con un margen de error de un centímetro.
  - Navegación Segura (SoL): es de servicio abierto, para aquellas aplicaciones donde la precisión necesite ser lo más exacta posible, y además ofrece mensajes sobre la integridad del sistema.
  - Navegación pública regulada (PRS): los principales usuarios serán las agencias gubernamentales, ofreciendo disponibilidad continua, aunque los otros servicios estén cortados en caso de conflicto.
  - Servicio de búsqueda y rescate (SAR): el sistema indicará las ubicaciones de las balizas de socorro. Se podrá enviar mensajes, como por ejemplo, confirmar que la ayuda está en camino.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

- Este sistema trabajará con 10 frecuencias en las diferentes bandas:
  - Tres frecuencias en el rango de 1.559 hasta 1.591 MHz (L1).
  - Cuatro frecuencias en el rango de 1.164 hasta 1.215 MHz (E5A - E5B).
  - Tres frecuencias en el rango de 1.260 hasta 1.300 MHz (E6).

4.1.2 Comparativa de las características, servicios y aplicaciones de los diferentes sistemas GNSS.

Como colofón del presente estudio se presenta de manera sucinta las principales diferencias de todos los sistemas satelitales actuales de posicionamiento, y en especial con el sistema Galileo, el cuál establecemos como elemento comparativo o de referencia con respecto a los demás, tal y como se establece en la tabla 4.1.

Sistemas GNSS	TRANSIT	GPS	GLONASS	BEIDOU	QZSS	GALILEO
Características						
Número de órbitas.	5	6	3	3	2	3
Número de satélites.	5	24	24	33	4	24
Satélites de reserva.	5	7	3	8	NO	6
Osciladores como unidad de tiempo.	SÍ	NO	NO	NO	NO	NO
Relojes atómicos de rubidio.	NO	SÍ	NO	NO	SÍ	SÍ
Relojes atómicos de cesio.	NO	SÍ	SÍ	SÍ	NO	NO
Relojes atómicos de hidrógeno.	NO	NO	NO	SÍ	SÍ	SÍ
Servicio militar.	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	NO	NO
Servicio civil.	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
Precisión para usuarios militares. (m)	**20 – 200**	**< 5**	**4,5 – 7,4**	**0,1 - 10**	**0,01 - 1**	**0,01 - 1**
Precisión para usuarios civiles. (m)						
Tiempo en proporcionar la posición.	1 – 3 HRS.	Inmediato	Inmediato	Inmediato	Inmediato	Inmediato
Servicio para el Cospas – Sarsat.	**NO**	**SÍ**	**SÍ**	**SÍ**	**NO**	**SÍ**

Tabla 4.1: Comparativa entre los cinco sistemas de navegación por satélite. [Elaboración propia]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
Fecha: 09/09/2019 12:50:45

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Conclusiones

1) Después de la invención de la radio surgieron los sistemas de radionavegación que inmediatamente se convirtieron en una constante para la navegación tanto marítima como aérea.

2) Durante muchos años, el radiogoniómetro y los sistemas hiperbólicos fueron los referentes para ambos tipos de navegación. Eran complejos de utilizar y generaban errores del orden de cientos de metros, pero aun así fueron un gran paso y desarrollaron una gran función, sobre todo en el campo militar.

3) Cuando la tecnología lo permitió, hacia los años 60, un hito en los sistemas de navegación globales fue marcado por el sistema TRANSIT, que fue la antesala y marcó las directrices a seguir para una mejora de los sistemas actuales.

4) El GPS, como consecuencia de la experiencia adquirida por el TRANSIT, permitió ver las ventajas frente a los sistemas hiperbólicos de la época, mejorando una precisión métrica. Lo que ello provocó, por razones geopolíticas, que los países más punteros, Rusia, China, Europa . . . , crearan su propio sistema para no depender del GPS.

5) El último de los sistemas satelitales de navegación, el Galileo, es el único que se creó, desde un principio, con fines civiles en vez de militares. Presenta garantías a la Unión Europea de no depender de otros sistemas, y además es de los que mayor precisión ofrecen hasta la fecha.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Conclusions

1) After the invention of radio, radionavigation systems arose which immediately became a constant for both maritime and air navigation.

2) For many years, the direction finder and the hyperbolic systems were the references for both types of navigation. They were complex to use and generated errors of the order of hundreds of meters, but even so they were a great step and developed a great function, especially in the military field.

3) When technology allowed it, towards the 60's, a milestone in the global navigation systems was marked by the TRANSIT system, which was the anteroom and marked the guidelines to follow for an improvement of the current systems.

4) GPS, as a result of the experience acquired by TRANSIT, made it possible to see the advantages over the hyperbolic systems of the time, improving metric accuracy. This caused, for geopolitical reasons, that the leading countries, Russia, China, Europe . . . , created their own system so as not to depend on GPS.

5) The last of the satellite navigation systems, Galileo, is the only one that was created, from the beginning, for civil rather than military purposes. It provides the European Union with guarantees that it will not depend on other systems, and it is also one of the most accurate systems to date.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Bibliografía

[1] I. Zuleta y E. Rátiva, «Radionavegación», 3 marzo 2015. [En línea]. Available: https://prezi.com/eozt0japjgde/radionavegacion/

[2] Wikipedia, «Radionavigation», 14 febrero 2019. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Radio_navigation

[3] «Principios básicos de la radionavegación», 12 junio 2017. [En línea]. Available: http://aviaciond.com/radionavegacion-principios-basicos/

[4] Wikipedia, «John Stone Stone», 29 abril 2019. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/John_Stone_Stone

[5] «John Stone Stone», 14 febrero 2019. [En línea]. Available: https://ethw.org/John_Stone_Stone

[6] Wikipedia, «Robert Watson-Watt», 23 octubre 2018. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Robert_Watson-Watt

[7] «Radiogoniómetro», 11 julio 2002. [En línea]. Available: https://www.exordio.com/1939-1945/civilis/telecom/hf-df.html

[8] Wikipedia, «Automatic direction finder (ADF)», 11 junio 2019. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Radio_direction_finder#Automatic_direction_finder_(ADF)

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
Fecha: 09/09/2019 12:50:45

[9] M. J. M. Cubero, «Análisis y Evolución de los Sistemas de Ayudas a la Aproximación y Aterrizaje», Dep. Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Sevilla, TFG, 2015. [En línea].
Available:
http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90402/fichero/MEMORIA+DEFINITIVA.pdf

[10] «Sistemas de navegación hiperbólicos», [En línea]. Available: https://es.scribd.com/doc/112913089/Sistemas-de-navegacion-hiperbolicos

[11] C. M. Arrázola, «Sistemas Hiperbólicos Decca y Loran», [En línea]. Available: https://es.scribd.com/document/326600612/Sistemas-Hiperbolicos-Decca-y-Loran

[12] «Decca navigator», [En línea].
Available: https://deccanavigator.wordpress.com/historia/

[13] «Sistema de Navegacion Decca», [En línea].
Available: https://es.scribd.com/presentation/211928535/Sistema-de-Navegacion-Decca

[14] J. L. Vicario, «Fundamentos de los sistemas de radionavegación», Universidad Abierta de Cataluña, [En línea].
Available:
http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/77345/6/Sistemas%20de%20radionavegaci%C3%B3n_M%C3%B3dulo%203_Fundamentos%20de%20los%20sistemas%20de%20radionavegaci%C3%B3n.pdf

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
Fecha: 09/09/2019 12:50:45

[15] J. R. Montero, «Los radiofaros CONSOL», 2 diciembre 2007. [En línea]. Available: https://funkoffizier.com/2007/12/02/los-radiofaros-consol/

[16] S. Alaric, «Radiofaros CONSOL», [En línea]. Available: https://eclecticomania.net/radiofaros-consol/

[17] «Antes del GPS: Navegación hiperbólica (LORAN-C)», 21 junio 2016. [En línea]. Available: https://greatbustardsflight.blogspot.com/2016/06/antes-del-gps-navegacion-hiperbolica.html

[18] Wikipedia, «LORAN», 18 abril 2019. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/LORAN

[19] J. M. Curbera, «Historia de la Navegación LORAN», 1969. [En línea]. Available: http://revistamarina.cl/revistas/1969/1/jmoreuc.pdf

[20] J. L. Á. Pérez, «Sistema VOR», Universidad de Alcalá, [En línea]. Available: http://agamenon.tsc.uah.es/Asignaturas/it/rd/apuntes/handout5.pdf

[21] «Navegación VOR. La guía definitiva.», 29 abril 2018. [En línea]. Available: https://aviatorbluewings.com/navegacion-vor/

[22] Wikipedia, «Equipo medidor de distancia», 8 septiembre 2017. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Equipo_medidor_de_distancia

[23] J. Joglar, «El Sistema de Navegación OMEGA», 8 octubre 2017. [En línea]. Available: https://avionicajoglar.blogspot.com/2017/10/el-sistema-de-navegacion-omega.html

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
Fecha: 09/09/2019 12:50:45

[24] «¿Qué es el sistema de navegación OMEGA?», 14 junio 2017. [En línea]. Available: https://www.lowstars.com/jA364Em8/

[25] J. Proc, «OMEGA», 14 mayo 2018. [En línea]. Available: http://www.jproc.ca/hyperbolic/omega.html

[26] S. Bartlett, G. Offermans y C. Schue, «Innovation: Enhanced Loran», 23 noviembre 2015. [En línea]. Available: https://www.gpsworld.com/innovation-enhanced-loran/

[27] «LORAN and eLoran», Universidad de Stanford, [En línea]. Available: https://gps.stanford.edu/research/early-research/loran-and-eloran

[28] «eLoran», [En línea]. Available: http://www.ursanav.com/solutions/technology/eloran/

[29] «Enhanced Loran (eLoran)», 12 enero 2007. [En línea]. Available: https://rntfnd.org/wp-content/uploads/eLoran-Definition-Document-0-1-Released.pdf

[30] D. A. G. Álvarez, «Sistema GNSS (Global Navigation Satellite System)», Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, Enero 2008. [En línea]. Available: http://arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20080125DavidGarcia.pdf

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
Fecha: 09/09/2019 12:50:45

[31] Wikipedia, «Sistema global de navegación por satélite», 15 marzo 2019. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_global_de_navegaci%C3%B3n_por_sat%C3%A9lite#Antecedentes

[32] «Sistema Global de Navegación por Satélites», [En línea]. Available: http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11417/fichero/Cap%C3%ADtulos+%252F2-+Sistema+de+Navegacion+con+ayuda+de+sat%C3%A9lites.pdf+

[33] M. Á. Frasca, J. Ribera y M. Gavidia, «Sistema TRANSIT», [En línea]. Available: https://sites.google.com/site/tecnopglobal/home/inicio-y-desarrollo-los-gps/historia

[34] G. B. González, «Navegación por satélite, el sistema TRANSIT», 1983. [En línea]. Available: https://revistamarina.cl/revistas/1983/2/barros.pdf

[35] Wikipedia, «TRANSIT (satellite)», 11 octubre 2018. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Transit_(satellite)

[36] Wikipedia, «Global Positioning System», 21 ocrubre 2018. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System

[37] S. Serrato, «¿Por qué surgió el GPS?», 1 diciembre 2014. [En línea]. Available: https://prezi.com/feutgnxo9tdr/por-que-surgio-el-gps/

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

[38] A. Palazzesi, «Historia del GPS: Cómo el mundo dejó de perderse», 2010. [En línea]. Available: https://www.neoteo.com/historia-del-gps-como-el-mundo-dejo-de-perderse/

[39] Gabriel, «¿Cómo funcionan los dispositivos GPS? Trilateración vs triangulación», 29 mayo 2018. [En línea]. Available: https://acolita.com/como-funcionan-los-dispositivos-gps-trilateracion-vs-triangulacion/

[40] A. R. Franco, «FAQ sobre el WAAS, EGNOS y MSAS», [En línea]. Available: http://www.elgps.com/documentos/FAQWAAS/faqwaas.html

[41] Wikipedia, «MSAS», 11 octubre 2016. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/MSAS

[42] «EGNOS, navegación y seguridad», 22 abril 2016. [En línea]. Available: https://m.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/EGNOS_navegacion_y_seguridad

[43] «¿Qué es el sistema WAAS?», [En línea]. Available: https://www.carvalza.es/sistema-waas-gps

[44] Wikipedia, «SBAS», 16 marzo 2019. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/SBAS

[45] «SDCM», 2 septiembre 2018. [En línea]. Available: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SDCM

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
Fecha: 09/09/2019 12:50:45

[46] «Timation», 27 marzo 2014. [En línea].
Available:
https://noticiasdelaciencia.com/art/9949/gran_enciclopedia_de_la_astronautica__290__timation

[47] Wikipedia, «Timation», 6 abril 2019. [En línea].
Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Timation

[48] H. J. Kramer, «Timation - a GPS Predecessor Program», 2002. [En línea].
Available: https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/timation

[49] «Qué significa GPS (Sistema de Posicionamiento Global)»,
[En línea]. Available: https://www.carvalza.es/que-es-un-gps

[50] «Cómo funciona el sistema de posicionamiento GPS», [En línea].
Available: https://www.aristasur.com/contenido/como-funciona-el-sistema-de-posicionamiento-gps

[51] A. Pozo-Ruz, A. Ribeiro, M. C. García-Alegre, L. García, D. Guinea y F. Sandoval, «Sistema de posicionamiento global (GPS): descripción, análisis de errores, aplicaciones y futuro», Dpto. de Tecnología Electrónica, E.T.S. Ingenieros de Telecomunicación. Universidad de Málaga, Málaga, [En línea].
Available: https://www.peoplematters.com/Archivos/Descargas/GPS.pdf

[52] «Sistema GPS/DGPS», [En línea]. Available: http://www.puertos.es/es-es/conceptosgenerales/Paginas/Sistema-GPSDGPS.aspx

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
Fecha: 09/09/2019 12:50:45

[53] D. Urrutia, «DGPS», [En línea].
Available: http://www2.udec.cl/~durrutia/gps/dgps.html

[54] «How Does DGPS (Differential GPS) Work?», 22 agosto 2018. [En línea].
Available:
https://racelogic.support/01VBOX_Automotive/01General_Information/Knowledge_Base/How_Does_DGPS_(Differential_GPS)_Work%3F

[55] Wikipedia, «GAGAN», 17 junio 2016. [En línea].
Available: https://es.wikipedia.org/wiki/GAGAN

[56] A. Fablan, «Sistemas de posicionamiento global: sistema GPS», Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina, 14 Abril 2014. [En línea].
Available: https://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/SD-3-GPS-Reuter.PDF

[57] R. Castro, «La física que hace funcionar al sistema GPS», 23 febrero 2019. [En línea]. Available: https://www.wikiversus.com/deportes-y-aire-libre/reloj-gps-pulsometro/como-funciona-el-gps/

[58] Wikipedia, «List of GPS satellites», 23 diciembre 2018. [En línea].
Available: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_GPS_satellites

[59] Wikipedia, «GLONASS», 8 junio 2019. [En línea].
Available: https://en.wikipedia.org/wiki/GLONASS

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
Fecha: 09/09/2019 12:50:45

[60] A. Fablan, «Sistema GLONASS», Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina, febrero 2001. [En línea].
Available: https://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/SD-4-GLONASS-Reuter.PDF

[61] C. D. Muñoz, «El Sistema GLONASS», 1 junio 2016. [En línea].
Available:
https://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=201

[62] «Qué es el sistema de posicionamiento GLONASS», [En línea]. Available: https://www.aristasur.com/contenido/que-es-el-sistema-de-posicionamiento-glonass

[63] J. C. García, «¿Qué es GLONASS?», [En línea].
Available: https://gpstotal.org/es/que-es-glonass

[64] «GLONASS», septiembre 2011. [En línea].
Available: https://www.ecured.cu/GLONASS

[65] «GLONASS history», 2019. [En línea].
Available: https://www.glonass-iac.ru/en/guide/

[66] «Dilución de Precisión (DOP)», 7 enero 2018. [En línea].
Available: https://glosarios.servidor-alicante.com/topografia-geodesia-gps/dilucion-de-precision-dop

[67] Wikipedia, «List of GLONASS satellites», 3 noviembre 2018. [En línea].
Available: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_GLONASS_satellites

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
Fecha: 09/09/2019 12:50:45

[68] J. C. García, «¿Qué es y cómo funciona BeiDou?», [En línea].
Available: https://gpstotal.org/es/que-es-beidou

[69] «BeiDou Navigation Satellite System», [En línea].
Available: https://chinaspacereport.wordpress.com/spacecraft/beidou/

[70] Wikipedia, «BeiDou», 25 mayo 2019. [En línea].
Available: https://en.wikipedia.org/wiki/BeiDou

[71] «Primer Sistema de posicionamiento Chino: BeiDou-1», 31 diciembre 2011. [En línea].
Available: http://unitsandtech.blogspot.com/2012/01/primer-sistema-de-posicionamiento-chino.html

[72] Wikipedia, «List of BeiDou satellites», 21 abril 2019. [En línea].
Available: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_BeiDou_satellites

[73] Wikipedia, «Quasi-Zenith Satellite System», 26 mayo 2019. [En línea].
Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Quasi-Zenith_Satellite_System

[74] «QZSS», 2 septiembre 2018. [En línea].
Available: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/QZSS

[75] «Overview of the Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)», [En línea].
Available: https://qzss.go.jp/en/overview/services/sv01_what.html

[76] F. Tappero, A. Dempster y T. Iwata, «Space-based positioning system with no on-board atomic clocks», junio 2006. [En línea].
Available: https://mycoordinates.org/space-based-positioning-system-with-no-on-board-atomic-clocks/

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
Fecha: 09/09/2019 12:50:45

[77] Wikipedia, «QZSS satellites», 10 octubre 2017. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Quasi-Zenith_Satellite_System#Satellites

[78] Wikipedia, «Galileo (satellite navigation)», 13 junio 2019. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_(satellite_navigation)

[79] J. C. González, «Galileo: la odisea del sistema europeo cinco veces más preciso que GPS... si funciona», 25 agosto 2014. [En línea]. Available: https://www.xataka.com/otros/galileo-la-odisea-del-sistema-europeo-cinco-veces-mas-preciso-que-gps-si-funciona

[80] Wikipedia, «GIOVE», 22 mayo 2018. [En línea].
Available: https://en.wikipedia.org/wiki/GIOVE

[81] «Relojes hiperprecisos: el corazón palpitante de Galileo», 10 mayo 2007. [En línea].
Available:
http://m.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/Relojes_hiperprecisos_el_corazon_palpitante_de_Galileo

[82] «Fases del proyecto Galileo», [En línea].
Available: http://www.inta.es/WEB/CPA/es/prs/evolucion/

[83] J. C. García, «¿Qué es y cómo funciona GALILEO?», [En línea].
Available: https://gpstotal.org/es/que-es-galileo

[84] «What is Galileo?», [En línea].
Available:
https://m.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/What_is_Galileo

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

[85] «Galileo is the European global satellite-based navigation system», 10 julio 2019. [En línea]. Available: https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/galileo/galileo-european-global-satellite-based-navigation-system

[86] «Los servicisos que proporcionará Galileo», 23 abril 2008. [En línea]. Available: http://m.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/Los_servicios_que_proporcionara_Galileo

[87] J. A. M. Tébar, «Sistema Galileo: El concepto europeo de la navegación por satélite», Facultad de Náutica, Universidad Politécnica de Barcelona, Barcelona, julio 2013. [En línea]. Available: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/19185/Galileo_TFC.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[88] Wikipedia, «List of Galileo satellites», 29 julio 2018. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Galileo_satellites

[89] Wikipedia, «Cospas-Sarsat», 14 febrero 2019. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/International_Cospas-Sarsat_Programme#MEOSAR

[90] «Tecnología Galileo vs GPS», 23 febrero 2017. [En línea]. Available: http://www.solopiensoentic.com/tecnologia-galileo-gps/

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
Fecha: 09/09/2019 12:50:45

[91] E. Velasco, «Galileo: Cómo el GPS europeo cambiará nuestras vidas», 24 diciembre 2018. [En línea].
Available: https://www.lavanguardia.com/ciencia/fisica-espacio/20181222/453672369759/galileo-gps-europeo-navegacion-satelite-semana-europea-espacio.html

[92] J. E. Burton, «Navigation: Are GLONASS, Galileo, and BeiDou using the same coordinate datum (WGS 84) as a GPS?», 20 noviembre 2015. [En línea]. Available: https://www.quora.com/Navigation-Are-GLONASS-Galileo-and-BeiDou-using-the-same-coordinate-datum-WGS-84-as-a-GPS

[93] «Which is the most accurate satellite navigation system: GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, qzss, irnss NAVIC, …?», [En línea]. Available: https://www.quora.com/Which-is-the-most-accurate-satellite-navigation-system-GPS-GLONASS-Galileo-BeiDou-qzss-irnss-NAVIC

[94] C. D. Muñoz, «Galileo: el sistema europeo de navegación por satélite,» 1 agosto 2016. [En línea].
Available:
https://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=381

[95] S. Fuentes, «Galileo, el GPS europeo. Todo lo que necesitas saber.», 27 diciembre 2005. [En línea].
Available: https://www.xataka.com/otros/galileo-el-gps-europeo-todo-lo-que-necesitas-saber

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

[96] C. Gómez, «Operaciones de transporte con mejor geolocalización gracias al GPS Galileo», 5 abril 2018. [En línea]. Available: https://www.sertrans.es/consejos-para-el-transporte/operaciones-de-transporte-con-mejor-geolocalizacion-gracias-al-gps-galileo/

[97] E. Sanz, «Cinco cosas que deberías saber sobre el sistema de navegación Galileo», [En línea].
Available: https://www.muyinteresante.es/tecnologia/articulo/cinco-cosas-que-deberias-saber-sobre-el-sistema-de-navegacion-galileo

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Bibliografía de Figuras y Tablas

Figura 1.1

https://military.wikia.org/wiki/Inertial_navigation_system?file=Accuracy_of_Navigation_Systems.svg

Figura 1.2

http://hipolpic.pw/radio-direction-finder-antenna.html

Figura 1.3

https://farm2.static.flickr.com/1308/1196552308_48577a151e_b.jpg

Figura 1.5

https://deccanavigator.files.wordpress.com/2015/08/decca_qm1_qm2_hsbob.jpg

Figura 1.6

https://collections.rmg.co.uk/collections/objects/256187.html

Figura 1.7

https://s26.postimg.cc/3w6140e0p/image.jpg

Figura 1.8

https://eclecticomania.net/radiofaros-consol/

Figura 1.9

https://timeandnavigation.si.edu/navigating-air/challenges/overcoming-challenges/radio-navigation

Figura1.10

http://loran-history.info/Loran-A/Photos/Photos.html

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
Fecha: 09/09/2019 12:50:45

Figura 1.11

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a0/Loran_C_Navigator.jpg

Figura 1.12

https://steemit.com/spanish/@nelyp/la-aviacion-un-mundo-maravilloso-xiv-sistemas-de-un-avion-6

Figura 1.13

https://forums.xplane.org/uploads/monthly_2019_03/

Figura 1.14

https://www.rohde-schwarz.com/es/aplicaciones/

Figura 1.15

https://elviajerohistorico.wordpress.com/2016/02/25/las-comunicaciones-con-los-submarinos/

Figura 1.16

http://clui.org/ludb/site/jim-creek-naval-radio-station

Figura 1.17

http://www.jproc.ca/hyperbolic/omega_urh21_01.jpg

Figura 1.18

https://gpsworld.com/wp-content/uploads/2017/06/Inn-Fig1.jpg

Figura 1.19

https://elviajerohistorico.wordpress.com/2016/02/25/las-comunicaciones-con-los-submarinos/

Figura 2.1

https://lidiaconlaquimica.wordpress.com/2015/11/27/el-gps-y-la-relatividad/

Figura 2.2

http://smcheritagefoundation.org/wp-content/uploads/Transit-Satellite-6-14-60-768x962.jpg

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Figura 2.3

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/62/NNSS_%285_Polarbahnen%29.png

Figura 2.4

https://commons.wikimedia.org/wiki

Figura 2.5

https://airandspace.si.edu/multimedia-gallery/4223hjpg

Figura 3.1

https://upload.wikimedia.org/wiki

Figura 3.2

https://hipertextual.com/2014/08/china-satelite

Figura 3.3

http://img.nauticexpo.es/images_ne/photo-g/23974-10956688.jpg

Figura 3.4

https://www.4gltemall.com/media/catalog/product

Figura 3.5

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3c/NAVSTAR_GPS_logo.png

Figura 3.6

http://wap.eastday.com/thumbnailimg/month_1611/7caa7191-8494-456d-8a98-e0cd5f9f3c7a.jpeg

Figura 3.7

https://blog.executivebiz.com/2011/10/lockheed-air-force-fortifying-gps-iii-launch/

Figura 3.8

https://gisgeography.com/wp-content/uploads/2016/11/Trilateration-1.png

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Figura 3.9

https://gisgeography.com/wp-content/uploads/2016/11/Trilateration-2.png

Figura 3.10

https://gisgeography.com/wp-content/uploads/2016/11/Trilateration-3.png

Figura 3.11

https://gisgeography.com/wp-content/uploads/2016/11/Trilateration-4.png

Figura 3.12

http://www.navegar.com/wp-content/uploads/2014/07/como-funciona-gps.png

Figura 3.13

https://gisgeography.com/wp-content/uploads/2016/10/GPS-Trilateration.png

Figura 3.14

http://detopografia.blogspot.com/2013/03/

Figura 3.15

http://desastresaereosnews.blogspot.com/2009_01_11_archive.html

Figura 3.16

https://sousa79.webnode.es/_files/200000312-ea794eb74b/4.png

Figura 3.17

https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss/what-sbas

Figura 3.18

https://gssc.esa.int/navipedia/images/0/0b/Sdcm_overview.png

Figura 3.19

https://racelogic.support/@api/deki/files/10512/picture3_(1).png?revision=1

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Figura 3.20

https://kids.kiddle.co/images/8/81/Glonass_logo.png

Figura 3.21

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons

Figura 3.22

https://upload.wikimedia.org/wikipedia

Figura 3.23

http://vtv.gob.ve/wp-content/uploads/2018/12/glonass.jpg

Figura 3.24

https://supernova.eso.org/exhibition/images/roscosmos_logo-CC/

Figura 3.25

https://media.nationalgeographic.org/assets/photos/000/282/28251.jpg

Figura 3.26

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons

Figura 3.27

http://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/SD-4-GLONASS-Reuter.PDF

Figura 3.28

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/thumb/2/29/Beidou_logo.png/880px-Beidou_logo.png

Figura 3.29

https://www.glonass-iac.ru/images/gnss/beidou_og_big.png

Figura 3.30

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/75/Beidou-coverage.png

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Figura 3.31

https://entendiendonuevastecnologias.files.wordpress.com/2016/08/26332.png?w=820

Figura 3.32

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons

Figura 3.33

https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes

Figura 3.34

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/9/94/QZSS_logo.png

Figura 3.35

http://qzss.go.jp/en/technical/technology/isos7j00000003cb-img/B05001_b.jpg

Figura 3.36

https://gssc.esa.int/navipedia/images/7/78/Jaxalogo.PNG

Figura 3.37

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bf/Galileo_logo.svg

Figura 3.38

http://www.mcmurdogroup.com/wp-content/uploads

Figura 3.39

http://www.infoespacial.com/mundo/2018/07/17/noticia-servicios-galileo-flota-gaasi.html

Figura 3.40

https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2007/05/Passive_Hydrogen_Maser_under_test

Figura 3.41

http://www.inta.es/WEB/.galleries/Galeria-de-Imagenes-CPA/prs05.png

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Figura 3.42

https://www.autobild.es/reportajes/proyecto-galileo-169463#modal_962

Tabla 1.1

https://eclecticomania.net/radiofaros-consol/

Tabla 3.1

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_GPS_satellites

Tabla 3.2

https://es.wikipedia.org/wiki/GPS#Fuentes_de_error

Tabla 3.3

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_GLONASS_satellites

Tabla 3.4

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_BeiDou_satellites

Tabla 3.5

https://en.wikipedia.org/wiki/Quasi-Zenith_Satellite_System#Satellites

Tabla 3.6

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Galileo_satellites

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Glosario

ADF: Automatic **D**irection **F**inder, es un instrumento de radionavegación marítimo o de aeronaves que muestra de forma automática y continua el rumbo relativo.

ASBC: Advance **S**pace **B**usiness **C**orporation, es una empresa tecnológica japonesa.

CHA: Channel of **H**igh Accuracy, servicio ofrecido por el sistema GLONASS, para usuarios autorizados.

Cospas-Sarsat: es un acrónimo en ruso de "Cosmicheskaya Sistema Poiska Avariynyh Sudov", que significa Sistema Espacial para la Búsqueda de buques en peligro y Sarsat, Search And Rescue Satellite-Aided Tracking, en español Búsqueda y rescate de seguimiento por satélite.

CRT o TRC: Cathode **R**ay **T**ube o **T**ubo de **R**ayos **C**atódicos, es un tubo de vacío que contiene uno o más cañones de electrones con una pantalla fosforescente, y se utiliza para mostrar imágenes.

CS: Comercial **S**ervice, en español, servicio comercial. Es un servicio ofrecido por el sistema Galileo.

CSA: Channel of **S**tandard **A**ccuracy, servicio ofrecido por el sistema GLONASS, para uso civil.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

DARPA: Defense **A**dvanced **R**esearch **P**rojects Agency, en español, Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa.

DME: Data **M**easurement **E**quipment o equipo medidor de distancia. Se trata de una estación de radio que utilizan las aeronaves para calcular la distancia a la que están respecto a este dispositivo.

DGPS: Differential **GPS**, en español, GPS Diferencial. Es un sistema que se encarga de suministrar correcciones (diferenciales) de posición a las señales emitidas por los satélites GPS de manera que se mejore la precisión.

DOP: Dilution **O**f **P**recision o dilución de la precisión.

EGNOS: European **G**eostationary **N**avigation **O**verlay **S**ervice, en español, servicio de superposición de navegación geoestacionaria europea.

eLoran: enhanced **LO**ng **RAN**ge o mejora de navegación de largo alcance.

ESTEC: European **S**pace research and **TEC**hnology centre, en español, Laboratorio de Sistemas de Telecomunicaciones y Navegación.

FOC: Full **O**perational **C**apability, en español, capacidad operativa completa, es la última fase de desarrollo del Galileo.

GAGAN: GPS **A**ided **G**eo **A**ugmented **N**avigation o navegación geo asistida por GPS.

GEO: Geosynchronous **E**quatorial **O**rbit, en español, órbita geoestacionaria.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

GIOVE: Galileo **I**n-**O**rbit **V**alidation **E**lement o elemento de validación en órbita de Galileo. Es la primera fase del desarrollo del Galileo.

GLONASS: GLObal'naya **NA**vigatsionnaya **S**putnikovaya **S**istema, en español, Sistema mundial de navegación por satélite.

GNSS: Global **N**avigation **S**atellite **S**ystem o sistema de navegación global por satélite.

GPS: Global **P**osition **S**ystem, en español, sistema de posicionamiento global.

HEO: High **E**arth **o**rbit o órbita alta terrestre.

Hz (Herzios): es la unidad internacional de medida de la frecuencia.

IGSO: Inclined **G**eo**S**ynchronous **O**rbit, en español, órbita geosíncrona inclinada.

IOV: In-**O**rbit **V**alidation o validación en órbita, es la segunda fase de desarrollo del sistema Galileo.

ITU: International **T**elecommunication **U**nion, en español, Unión Internacional de Telecomunicaciones.

JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency o Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón.

LORAN: LOng **RAN**ge o navegación de largo alcance.

MEO: Medium **E**arth **O**rbit, en español, órbita circular intermedia.

MSAS: Multi-functional **S**atellite **A**ugmentation **S**ystem, en español, Sistema de Aumentación de Satélite Multifuncional.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

NIMS: Navy **I**onospheric **M**onitoring **S**ystem o sistema de monitoreo ionosférico de la Marina.

NNSS: Navy **N**avigation **S**atellite **S**ystem, en español, sistema de navegación por satélite de la Marina.

OS: Open **S**ervice o servicio abierto. Es un servicio disponible para Galileo.

PRS: Public **R**egulated **N**avigation, en español, navegación pública regulada. Es un servicio disponible para Galileo.

QZSS: Quasi - **Z**enith **S**atellite **S**ystem o sistema por satélite cuasi - cenit.

RAF: Royal **A**ir **F**orce, en español, Real fuerza aérea británica.

RAND: Research **AN**d **D**evelopment, es una empresa estadounidense

SAR: Search **A**nd **R**escue o búsqueda y rescate.

SBAS: Satellite **B**ased **A**ugmentation **S**ystem o sistema de aumentación basado en satélites.

SDCM: System for **D**ifferential **C**orrections and **M**onitoring, en español, sistema de correcciones diferenciales y monitoreo.

SoL: Safety-**o**f-**L**ife o seguridad de vida. Es un servicio disponible para Galileo.

Timation: Time Navig**ation**, en español, tiempo de navegación. Son unos satélites de prueba desarrollados por EE. UU.

USCG: United **S**tates **C**oast **G**uard o Guardia Costera de los Estados Unidos.

US Navy: Marina de los Estados Unidos.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

VHF: Very **H**igh **F**requency o frecuencia muy alta.

VLF: Very **L**ow **F**requency o frecuencia muy baja.

VOR: Very high frequency **O**mnidirectional **R**ange, en español, Faro Omnidireccional VHF.

WAAS: Wide **A**rea **A**ugmentation **S**ystem o Sistema de Aumento de Área Amplia.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: https://sede.ull.es/validacion/

Identificador del documento: 2111945 Código de verificación: Dsceg+0c

Firmado por: José Ángel Rodríguez Hernández Fecha: 09/09/2019 12:50:45
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA