

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

**Sistema GNSS
(GLOBAL NAVIGATION
SATELLITE SYSTEM)**

David Abelardo García Álvarez

ENERO 2008

Sistema GNSS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM)

AUTOR: David García Álvarez
TUTOR: Antonio Aguilar Morales

**Grupo de sistemas de radiocomunicaciones y comunicaciones ópticas
Dpto. de Ingeniería Informática
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid**

PROYECTO FIN DE CARRERA

Título: *Sistema GNSS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM)*

Autor: D. David García Álvarez

Tutor: D. Antonio Aguilar Morales

Tribunal:

Presidente: D. Bazil Taha Ahmed

Vocal: D. Francisco J. Gómez Arribas

Vocal secretario: D. Antonio Aguilar Morales

Fecha de lectura:

Calificación:

Palabras clave

GNSS – GPS – Galileo – GLONASS - Segmento usuario- Segmento espacial - Segmento control – Navegación – Posicionamiento – Normativa – Viabilidad económica – Interfaz – Servicio – Satélite – Antena – Señal – Mensaje de navegación

Resumen

GNSS(*Global Navigation Satellite System*), es el acrónimo que se refiere al conjunto de tecnologías de sistemas de navegación por satélite que proveen de posicionamiento geoespacial con cobertura global de manera autónoma.

Los orígenes del GNSS se sitúan en los años 70 con el desarrollo del sistema militar estadounidense GPS (*Global Positioning System*), destinado al guiado de misiles, localización de objetivos y tropas etc. A través de una red de satélites, un receptor de GNSS es capaz de determinar su posición en cuatro dimensiones (longitud, latitud, altitud, y tiempo), lo que ha dado lugar a multitud de aplicaciones civiles y militares.

En este trabajo se estudia el estado del arte de los sistemas GNSS: abordando distintos aspectos de dicha tecnología, así como su composición y funcionamiento, posibles fuentes de error o aplicaciones. Se presentarán también los distintos sistemas existentes en la actualidad y futuros proyectos.

Por último, se analizan las organizaciones implicadas en el desarrollo y despliegue de estos sistemas, así como diversos estudios económicos que confirman la importancia que dicha tecnología está empezando a cobrar en la actualidad. Estos dos apartados son especialmente útiles e informativos sobre posibles oportunidades de negocio y profesionales en el sector de las telecomunicaciones.

Abstract

GNSS(*Global Navigation Satellite System*), is the acronym that refers to the group of technologies of Navigation Satellite Systems that provide geo-spatial positioning with global coverage in an autonomous way.

The origins of GNSS date back in the 70s with the development of the military system GPS (*Global Positioning System*), aimed to missile guidance, targets and troops location, etc. Through a satellite constellation, a GNSS receptor is able to set its position in four dimensions (longitude, latitude, altitude, and time), this has caused the appearance of lots of civil and military applications.

Through this work the state of art of GNSS will be studied: tackling different aspects of this technology, as well as its composition and its operation, possible error sources or applications. Different current systems and future projects will be presented as well.

Finally, we analyze the organizations involved in the development and deployment of these systems, as well as several economic studies that confirm the importance that this technology is beginning to have nowadays. These two sections are specially useful and informative about possible business and labour opportunities in the telecommunications sector.

Agradecimientos

En primer lugar agradecer a mi tutor, Antonio Aguilar Morales, por darme la oportunidad de realizar este proyecto fin de carrera, por su apoyo y comprensión. Sin la inestimable ayuda que me ha brindado, este proyecto no habría sido posible. Gracias por orientarme y ayudarme en todo momento. También agradecer al profesor Bazil Taha Ahmed, por su asesoramiento y ayuda en aspectos técnicos relacionados con comunicaciones por radio.

Me gustaría dar las gracias a la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid, en la cual he cursado mi carrera a lo largo de estos años, y de la que guardaré sin duda un grato recuerdo. Tanto los profesores como el personal de administración, han sido siempre cordiales en su trato, he aprendido mucho a lo largo de mis estudios no sólo académicamente, sino personalmente y no puedo expresar más que agradecimiento a todos los miembros que trabajan en la Escuela.

En último lugar a todas las personas que me han apoyado a lo largo de estos años, que han creído en mí y me han apoyado, en particular a mi familia y los amigos que he hecho en esta Escuela y que me han hecho tan agradables estos años en la Universidad.

David García Álvarez

Índice de Contenido

Palabras clave	i
Resumen	i
Agradecimientos	iii
Índice de Contenido	v
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Tablas	x
Acrónimos	xi
0 Motivación y objetivos del proyecto	1
0.1 Motivación del proyecto	1
0.2 Objetivos del proyecto y enfoque.....	2
1 Sistemas de navegación: ¿qué son y para que sirven?	4
1.1 Introducción	4
1.2 Historia del GNSS.	4
1.3 GNSS: definición de su composición, características y segmentos.	5
1.3.1 Segmento espacial	6
1.3.2 Segmento de control	7
1.3.3 Segmento de usuario	8
1.4 Prestaciones de los actuales sistemas GNSS	9
1.5 Funcionamiento de un sistema GNSS	10
1.5.1 ¿Cómo se calcula la posición?.....	11
1.5.2 Fuentes de error	12
1.6 Aplicaciones de los sistemas GNSS	12
1.6.1 GPS: el sistema militar.....	13
1.6.2 GNSS: el sistema civil global.....	13
1.6.3 Integración de los GNSS en las redes de telecomunicaciones	15
2 Sistemas existentes y su evolución: GNSS-1 y GNSS-2.....	17
2.1 Introducción	17
2.2 Sistemas GNSS	17
2.2.1 Sistema de aumento basado en aeronaves: ABAS	18
2.2.2 Sistema de aumento basado en tierra: GBAS.....	18
2.2.3 Sistema de aumento basado en satélites: SBAS	19
2.3 GPS: Global Positioning System.....	20
2.3.1 Historia.....	20
2.3.2 Composición del sistema	21
2.3.3 Servicios GPS	25
2.4 GLONASS: Global Navigation Satellite System.....	26
2.4.1 Historia.....	26
2.4.2 Composición del sistema	27
2.4.3 Servicios GLONASS	30
2.5 Galileo: el nuevo sistema europeo de navegación	31
2.5.1 Historia.....	31
2.5.2 Composición del sistema	33
2.5.3 Servicios Galileo.....	36
2.6 Comparativa de GPS, GLONASS y Galileo.....	37
3 Normativa.....	39

3.1	Introducción	39
3.2	Normativa ITU	39
3.3	GPS: Requisitos.....	41
3.3.1	GPS: Definición del interfaz	41
3.3.2	GPS: Criterios del interfaz	44
3.3.3	GPS: Implementación del interfaz.....	45
3.4	GLONASS: Requisitos	49
3.4.1	GLONASS: Definición del interfaz.....	49
3.4.2	GLONASS: Criterios del interfaz.....	52
3.4.3	GLONASS: Implementación del interfaz	54
3.5	Galileo: Requisitos	55
3.5.1	Galileo: Definición del interfaz	55
3.5.2	Galileo: Criterios del interfaz	61
3.5.3	Galileo: Implementación del interfaz	62
4	Estudio de viabilidad de un proyecto: el caso Galileo.....	66
4.1	Introducción	66
4.2	Dimensiones del proyecto Galileo	67
4.3	Objetivos del estudio de viabilidad del proyecto	67
4.4	Estudios de mercado.....	68
4.4.1	Introducción.....	68
4.4.2	Estructura del mercado GNSS.....	68
4.4.3	Situación del mercado actual.....	69
4.4.4	Previsiones de evolución.....	69
4.4.5	Conclusiones	70
4.5	Estudios técnicos	71
4.6	Estudio económico-financiero del proyecto Galileo	72
4.6.1	Introducción.....	72
4.6.2	Costes del proyecto	72
4.6.3	Análisis financiero	73
4.6.4	Análisis coste beneficio	75
4.6.5	Conclusiones	76
4.7	Estudio estratégico del proyecto Galileo	77
5	Conclusiones y trabajo futuro.....	78
6	Apéndice A. Teoría de la Información	80
6.1	Definiciones matemáticas	80
6.1.1	Capacidad de canal	80
6.1.2	Función de autocorrelación	80
6.2	Tipos de modulación	81
6.2.1	BPSK.....	81
6.2.2	BOC	81
6.2.3	Espectro ensanchado.....	82
6.3	Técnicas de acceso múltiple.....	84
6.3.1	FDMA	84
6.3.2	CDMA.....	84
6.4	Codificación de canal	85
6.4.1	FEC con codificación convolucional.....	86
7	Apéndice B. Radiación y Radiocomunicación.....	90
7.1	Radiopropagación.....	90
7.1.1	Propagación de la onda en el espacio	90
7.1.2	Potencia recibida.....	91

7.2	Electrónica de comunicaciones	92
7.2.1	Transmisor GNSS	92
7.2.2	Receptor GNSS	92
7.2.3	Ejemplos de receptores GNSS	93
8	Apéndice C. Transmisión de señales GNSS	95
8.1	Introducción	95
8.2	Generación de los códigos PRN.....	95
8.2.1	GPS: Generación de los códigos PRN.....	95
8.2.2	GLONASS: Generación de los códigos PRN	96
8.2.3	Galileo: Generación de los códigos PRN.....	97
8.3	Identificación de los códigos PRN	98
9	Apéndice D. Evaluación de Proyectos de inversión	100
9.1	Conceptos fundamentales de inversión	100
9.2	Proyectos de inversión.....	100
9.3	Metodología de evaluación de proyectos de inversión.....	101
9.4	Herramientas de análisis económico-financiero	102
9.4.1	Métodos dinámicos de análisis económico: VAN y TIR.....	103
	Bibliografía.....	104

Índice de Figuras

FIGURA 1.1 Constelación de satélites GPS ^[29]	7
FIGURA 1.2 Centro de control de Misiones de GPS ^[47]	8
FIGURA 1.3 Receptor WOXTER 100 GPS con Bluetooth ^[48]	9
FIGURA 1.4 Funcionamiento de un GNSS ^[19]	11
FIGURA 1.5 Representación esquemática del funcionamiento del GNSS ^[19]	12
FIGURA 1.6 Esquema de integración de GNSS con LBS	16
FIGURA 2.1 GNSS: representación en la actualidad ^[1]	18
FIGURA 2.2 Sistemas de aumento existentes en la actualidad ^[10]	20
FIGURA 2.3 Fases de desarrollo del proyecto NAVSTAR GPS ^[11]	21
FIGURA 2.4 Distribución original de la constelación de 24 satélites ^[31]	22
FIGURA 2.5 Segmento de control de GPS ^[30]	24
FIGURA 2.6 Precisión del GPS con y sin SA (disponibilidad selectiva) ^[32]	25
FIGURA 2.7 Plan de renovación de GLONASS ^[6]	27
FIGURA 2.8 Composición de GLONASS ^[33]	28
FIGURA 2.9 Constelación GLONASS ^[34]	29
FIGURA 2.10 Composición del sistema Galileo © 2006 European Space Agency ^[17]	33
FIGURA 2.11 Constelación Galileo ^[14]	34
FIGURA 3.1 Distribución de frecuencias aprobada por la ITU ^[35]	40
FIGURA 3.2 Mensaje de navegación GPS ^[3]	43
FIGURA 3.3 Generación y transmisión de la señal de posicionamiento SPS ^[3]	47
FIGURA 3.4 Estructura del segmento de control GPS ^[3]	48
FIGURA 3.5 Estructura del mensaje de Navegación C/A GLONASS ^[5]	51
FIGURA 3.6 Estructura del segmento de control GLONASS ^[6]	55
FIGURA 3.7 Estructura de página F/Nav ©, 2006, European Space Agency / Galileo Joint Undertaking ^[4]	58
FIGURA 3.8 Estructura del mensaje F/Nav ^[4]	59
FIGURA 3.9 Estructura de las señales Galileo ©, 2006, European Space Agency / Galileo Joint Undertaking ^[4]	59
FIGURA 3.10 Plan de frecuencias Galileo ©, 2006, European Space Agency / Galileo Joint Undertaking ^[4]	61
FIGURA 3.11 Diagrama de bloques de información del satélite Galileo ^[36]	63
FIGURA 3.12 Arquitectura del segmento de control Galileo ^[36]	65
FIGURA 4.1 Evolución del mercado de los GNSS ^[22]	68
FIGURA 4.2 Evolución del mercado GNSS de aplicaciones entre 2001 y 2015 ^[22]	70
FIGURA 4.3 Previsiones de evolución de mercado GNSS ^[22]	70
FIGURA 4.4 Estimación de cuota de mercado para las empresas que participen en Galileo ^[20]	71
FIGURA 4.5 Estimación de ingresos por venta de productos GNSS en todo el mundo ^[22]	74
FIGURA 4.6 Fondos de financiación del proyecto Galileo ^[21]	74
FIGURA 4.7 Flujo de caja previsto para Galileo ^[21]	75
FIGURA 6.1 Modulación BPSK ^[37]	81
FIGURA 6.2 Modulación BOC sin portadora ^[38]	82
FIGURA 6.3 Codificación DSSS ^[40]	83
FIGURA 6.4 Codificación convolucional ^[39]	86
FIGURA 6.5 Codificador convolucional (2,1,3) ^[39]	87
FIGURA 6.6 Diagrama de Trellis ^[39]	88

FIGURA 6.7 Diagrama de Trellis con todos los caminos posibles para una secuencia recibida ^[39]	89
FIGURA 6.8 Diagrama del camino más corto ^[39]	89
FIGURA 7.1 Diagrama funcional de un receptor GPS ^[11]	92
FIGURA 7.2 Receptor GPS MN1818 ^[49]	93
FIGURA 7.3 Diagrama de bloques del receptor MAX2742 ^[50]	94
FIGURA 8.1 Generador de códigos C/A ^[30]	96
FIGURA 8.2 Generador de código PRN de GLONASS ^[5]	96
FIGURA 8.3 Desplazamiento lineal de registros basados en secuencias de longitud M [®] , 2006, European Space Agency / Galileo Joint Undertaking [4]	97
FIGURA 8.4 Código PRN Galileo formado de construcción jerárquica [®] , 2006, European Space Agency / Galileo Joint Undertaking [4]	97
FIGURA 8.5 Correlación nula entre códigos ^[30]	98
FIGURA 8.6 Correlación parcial entre códigos ^[30]	99
FIGURA 8.7 Correlación completa entre códigos ^[30]	99
FIGURA 9.1 Planteamiento del análisis de inversiones en un proyecto	102

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Prestaciones de los servicios Galileo.....	37
Tabla 2.2 Comparativa de segmento espacial	37
Tabla 2.3 Comparativa del segmento de control	38
Tabla 2.4 Comparativa de Prestaciones	38
Tabla 3.1 Configuración de la señal ^[2]	44
Tabla 3.2 Planes de frecuencia para señales GPS	44
Tabla 3.3 Características de potencia de las señales GPS ^[2]	45
Tabla 3.4 Planes de frecuencia para señales GLONASS.....	52
Tabla 3.5 Portadoras para señales GLONASS ^[5]	53
Tabla 3.6 Definición del interfaz de Galileo ^[16]	56
Tabla 3.7 Longitud de los códigos PRN ^[4]	57
Tabla 3.8 Mapeo de mensajes - servicios - canales Galileo.....	57
Tabla 3.9 Modulación de las señales Galileo ^{©, 2006, European Space Agency / Galileo Joint Undertaking} ^[4]	61
Tabla 3.10 Ancho de banda en recepción de los enlaces Galileo.....	62
Tabla 3.11 Potencia en recepción de Galileo	62
Tabla 4.1 Tipos de mercados de aplicaciones GNSS	69
Tabla 4.2 Costes del proyecto Galileo ^[21]	73
Tabla 4.3 Estimación de ingresos para la UE de Galileo ^[21]	75
Tabla 4.4 Estimación de beneficios de Galileo ^[21]	76
Tabla 6.1 Secuencia de salida para un codificador convolucional ^[39]	87
Tabla 7.1 Balance de Potencia de las señales de navegación GPS L1 y L2 ^[46]	91
Tabla 9.1 Tipos de inversión	100

Acrónimos

AltBOC	Alternative Binary Offset Carrier Modulation
ARQ	Automatic Repeat Request
BOC	Binary Offset Carrier Modulation
BPSK	Binary Phase Shift Keying
C/A	Coarse/Adquisition
CCS	Central Control System
CDMA	Code Division Multiple Access
CHA	Channel of High Accuracy
CRC	Cyclic Redundancy Check
CS	Comercial Service
CS	Control Segment (Segmento de control)
CSA	Channel of Standard Accuracy
DGPS	Differential GPS
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay System
ESA	European Space Agency
FDMA	Frecuency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FHSS	Frecuency Hoping Spread Spectrum
FOC	Full Operational Capability
GBAS	Ground Based Augmentation System
GCC	Galileo Control Centres
GCS	Ground Control Segment
GIOVE	Galileo In Orbit Validation Element
GJU	Galileo Joint Undertaking
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GMS	Galileo Mission Segment
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSS	Galileo Sensor Station
GST	Galileo System Time
HOW	Handover Word
HP	High Precision
ICD	Interface Control Document
IOC	Initial Operational Capability
ITU	International Telecommunication Union
LAAS	Local Area Augmentation System
MCS	Master Control Station
MFSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System
MSB	Most Significant Bit
NCF	Navigation Control Facility
NSCC	Navigation System Control Centre
OS	Open Service
OSPF	Orbitography and Synchronisation Processing Facility
OSS	Orbitography and Synchronisation Stations
PFC	Proyecto de Fin de Carrera
PPS	Precise Positioning Service

PRN	Pseudo Random Noise
PRS	Public Regulated Service
PTS	Precision Timing Station
RF	Radio Frequency
RNSS	RadioNavigation Satellite System
SA	Selective Availability
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SCF	Navigation Control Facility
SDMA	Space Division Multiple Access
SoL	Safety of Live Service
SP	Standard Precision
SPS	Standar Positioning Service
SS	Space Segment (Segmento espacial)
TBC	To Be Confirmed
TBD	To Be Decided
TDMA	Time Division Multiple Access
TIR	Tasa Interna de Retorno
TM	Telemetry Word
TOW	Time Of Week
TT&C	Telemetry Tracking and Control
UTC	Universal Time Coordinated
VAN	Valor Actual Neto
VDB	VHF Data Broadcasting
VHF	Very High Frecuency
WASS	Wide Area Augmentation System
WRC	World Radiocommunication Conference

0 Motivación y objetivos del proyecto

0.1 Motivación del proyecto

Los sistemas de posicionamiento global por satélite permiten una gran cantidad de aplicaciones que los hacen especialmente atractivos en la actualidad: sistemas de navegación, localización o gestión de catástrofes son una realidad cada vez más presente. Su despliegue constituye una infraestructura global, como las existentes de satélites para comunicaciones, para su explotación en usos profesionales:

- **Navegación:** su uso principal es el uso de dispositivos de navegación para vehículos terrestres, marítimos o aéreos.
- **Sincronización:** proporciona con disponibilidad global, información de reloj con unas características tales que dicha información pueda ser usada como reloj maestro en una red de sincronización, lo que permite que los diferentes relojes de los diferentes elementos de una red de comunicaciones estén sintonizados al mismo reloj.
- **Servicios basados en localización (LBS):** estos servicios disponibles por parte de algunas redes de telefonía celular, permiten localizar al usuario de un teléfono móvil dentro de una determinada celda, si este dispone de un dispositivo GPS (y también con otras técnicas si no dispone de él), lo que permite bien desde el envío de publicidad a dicho teléfono hasta el uso de esta capacidad por parte de los servicios de emergencia en caso de catástrofe.
- **Topografía y geodesia:** los sistemas GNSS, actualmente los basados en GPS, se están empleando como sistemas de alta precisión para la toma de datos topográficos y geodésicos, surgiendo así nuevas redes con este fin.
- **Sistemas de información geográfica:** los sistemas SIG son una colección de información geográfica organizada de hardware y software, que nos permite capturar, almacenar, manipular y analizar información geográfica con el fin de solucionar problemas complejos de planificación y gestión.
- **Dispositivos de rastreo:** destinados a la localización de personas o especies protegidas de animales, vehículos etc.

Si bien hasta ahora el único GNSS era el GPS, en la actualidad distintos países están desarrollando sistemas propios a través de acuerdos internacionales, lo que hace especialmente interesante dicha tecnología, ya que está proporcionando y proporcionará en un futuro próximo, oportunidades de negocio y en consecuencia un amplio mercado laboral para los ingenieros de telecomunicación, que puede abarcar desde empresas de desarrollo de proyectos ligados a esta tecnología, a organismos internacionales de carácter regulador.

Por tanto, este proyecto surge motivado por el interés tecnológico, por la cantidad de sistemas que están surgiendo, la diversidad de aplicaciones de esta tecnología, las

perspectivas de negocio y del mercado laboral que va a generar y el estudio de la realidad tan compleja debido a la multitud de países y organizaciones implicadas en acuerdos internacionales.

Desde el punto de vista académico, este proyecto está ligado a muchas de las asignaturas de Ingeniería de la Telecomunicación, como: Proyectos (actividades profesionales, organizaciones, estudios tecno-económicos, planes de negocios, etc.), Radiocomunicaciones (planes de frecuencia para señales, propagación de ondas, electrónica de comunicaciones vía satélites, etc.), Transmisión de datos (los GNSS se fundamentan en distintos tipos de modulación, codificación, métodos de acceso al medio y principios matemáticos), comunicaciones avanzadas, etc.

0.2 Objetivos del proyecto y enfoque

Este proyecto de fin de carrera pretende realizar un exhaustivo estudio del estado del arte de la tecnología relacionada con los GNSS, así como también de sus implicaciones económicas, sociales y políticas en nuestra sociedad. Son multitud de actores que intervienen en este escenario, como se ha mencionado anteriormente.

Es importante comprender desde un punto de vista global aspectos como:

- ¿Qué es un GNSS? ¿Qué sistemas existen en la actualidad? Las diferencias que existen entre los sistemas GNSS-1 y GNSS-2, y la evolución de esta tecnología.
- Su funcionamiento a nivel técnico, la estructura básica de un GNSS, las señales que emite, fuentes de error, sistemas de aumento, etc.
- Normativa vigente de esta tecnología a nivel internacional, respecto a planes de frecuencia y compatibilidad, y normativa propia de cada sistema.
- Acuerdos multilaterales para el uso de los actuales sistemas GNSS, como son el GPS, GLONASS y Galileo, así como los acuerdos de interoperabilidad.
- Sus beneficios económicos, desde el punto de vista de oportunidades de negocio y empleo, comprendiendo los distintos tipos de trabajo que se pueden llevar a cabo: desde desarrollo software para satélites, a desarrollo de aplicaciones, mapas para dispositivos GPS, diseño hardware de dispositivos GPS, construcción de satélites, etc.

En relación con lo anterior el trabajo se acomete en el siguiente orden:

- **Sistemas de navegación: ¿qué son y para que sirven?:** este capítulo es una introducción a los sistemas de navegación. En él se presenta la historia de dichos sistemas, conceptos básicos en cuanto a su composición, funcionamiento prestaciones y aplicaciones.
- **Sistemas existentes y su evolución:** este capítulo aborda los sistemas existentes en la actualidad, GNSS-1, sistemas de aumento y GNSS-2, los nuevos sistemas de navegación.
- **Normativa:** dicho capítulo describe los interfaces definidos por cada sistema, en lo referente a planes de frecuencia, estructura de la señal e implementación del interfaz. Es un estudio técnico del funcionamiento de cada sistema en particular.
- **Estudio de viabilidad de un proyecto:** el objetivo de este capítulo es aprender a desarrollar la metodología de evaluación de proyectos mediante el estudio de un

caso concreto; el caso Galileo, y demostrar la viabilidad del desarrollo de un sistema de navegación.

- **Conclusiones y trabajo futuro.**

Además al final del proyecto se incorporan unos apéndices que cubren los aspectos más teóricos del proyecto relacionado con distintas asignaturas de ingeniería de telecomunicaciones y con el funcionamiento de los GNSS:

- **Apéndice A. Teoría de la información:** cubre aspectos relativos a las bases matemáticas de la transmisión de señales, en cuanto a modulación, métodos de acceso al medio y codificación. Está relacionado con Transmisión de datos y Temas avanzados de comunicaciones.
- **Apéndice B. Radiación y radiocomunicación:** se trata en este apéndice los temas relacionados con las asignaturas Radiocomunicaciones I y II que son la base teórica de la propagación de las señales GNSS por el espacio.
- **Apéndice C. Transmisión de señales GNSS:** la forma en que los distintos sistemas generan y reciben sus señales es muy parecida, aquí se explica los fundamentos teóricos en que se han basado cada sistema y las soluciones que han adoptado en cada caso. Está ligado al capítulo 3.
- **Apéndice D. Evaluación de proyectos de inversión:** los pasos para analizar la conveniencia de realizar o no un proyecto, y las herramientas de análisis económico empleadas para ello son presentadas en este apéndice que sirve de base teórica para el capítulo 4. Este apéndice está ligado con la asignatura Proyectos.

1 Sistemas de navegación: ¿qué son y para que sirven?

1.1 Introducción

El primer capítulo de este proyecto describe de forma teórica la tecnología de los GNSS, haciendo un breve repaso de porqué surgieron cuál es su objetivo y qué son exactamente. Más específicamente el orden en que se va a abordar este tema es:

- **Historia del GNSS:** porqué surgen, y cómo va evolucionando el uso de la tecnología a lo largo de su historia, quiénes son los principales actores.
- **Definición de su composición:** definición de la estructura básica que debe tener todo GNSS para ser considerado como tal.
- **Prestaciones:** cómo se miden los servicios prestados por un GNSS, a través de una serie de parámetros cuantificables.
- **Funcionamiento:** brevemente y de manera teórica cuales son las bases del posicionamiento espacial.
- **Aplicaciones:** para qué se usa esta tecnología, que fines y aplicaciones puede tener.

El objetivo de este capítulo es introducir al lector en la tecnología de GNSS, cubriendo distintos aspectos, que en conjunto nos dan una idea general de lo que son los GNSS. Es la base teórica del proyecto que permite comprender al resto de capítulos.

1.2 Historia del GNSS.

Como ya se ha mencionado se entiende por GNSS, al conjunto de sistemas de navegación por satélite, como son el GPS, GLONASS y el reciente Galileo. Es decir los sistemas que son capaces de dotar en cualquier punto y momento de posicionamiento espacial y temporal.

Sin embargo, el concepto de GNSS es relativamente reciente, puesto que su historia comienza en los años 70 con el desarrollo del sistema estadounidense GPS, que como ya hemos mencionado, tuvo en sus orígenes aplicaciones exclusivamente militares, y su cobertura a pesar de ser mundial, no era, como hoy se entiende “Global”, es decir, era un sistema de uso exclusivamente militar cuyo control estaba bajo el DoD (Department of Defense) de los Estados Unidos, y sometido a un estricto control gubernamental.

No es hasta que se empiezan a tener en cuenta sus aplicaciones civiles, cuando el Gobierno de los Estados Unidos encarga realizar diversos estudios a distintas agencias como a RAND, con el propósito de analizar la conveniencia de emplear esta tecnología con fines civiles.

Así pues, tras diversos estudios, es en los noventa, a partir de la segunda mitad, cuando esta tecnología comienza a emplearse con fines civiles, y a alcanzarse numerosos acuerdos entre el Gobierno Estadounidense y distintos países de todo el mundo. Siendo

el GPS hasta el momento el único sistema de navegación por satélite plenamente operativo, y debido a que el gobierno ruso decide no seguir adelante con GLONASS, los estadounidenses tienen en este período el control de los sistemas de posicionamiento con sus satélites.

Con el segmento espacial (red de satélites) perteneciente de manera exclusiva a los EEUU, el resto de países, como Japón, Australia, y el continente europeo, se centran en el desarrollo del segmento de tierra, es decir, de los centros de control y recepción de las señales GPS, y de elaborar sistemas de aumento (SBAS y GBAS) para dicha tecnología, que les permitan obtener un posicionamiento más preciso a través de distintos métodos que veremos más adelante.

Esto plantea inquietudes a nivel internacional, ya que, la capacidad que tienen los EEUU para emitir la señal civil del GPS es también la misma para distorsionarla o dejar de emitirla en caso de guerra o conflictos entre países (lo que se entiende como disponibilidad selectiva), surge así la necesidad para los demás países de tener su propio sistema de navegación por satélite, que les permita de manera autónoma disponer de esta tecnología sin dependencia de los EEUU.

Queda pues, un largo camino por recorrer para el resto de países en el desarrollo de nuevos sistemas de navegación por satélite. Europa plantea Galileo como sistema con un uso exclusivamente civil, si bien los gobiernos de los distintos países podrán emplearlo también con fines militares. Rusia relanza el proyecto GLONASS y otros países como China plantean el desarrollo de sistemas experimentales como COMPASS, la India IRNSS y Japón QZSS como sistemas regionales.

Si el GNSS plantea un futuro lleno de posibilidades, primero han de resolverse multitud de cuestiones, como capacidades de los nuevos sistemas, interoperabilidad con el GPS o costes entre otras cosas. Factores que implican a multitud de organizaciones, como agencias espaciales encargadas del desarrollo del sistema, gobiernos y otras agencias nacionales e internacionales encargadas de cuestiones legislativas.

Han proliferado en multitud de países agencias, publicaciones, asociaciones de GNSS con el fin de proponer aplicaciones, soluciones y acuerdos así como educar sobre esta tecnología, debido en parte a su prometedor futuro, y en parte a su complejo entorno internacional.

Hemos establecido ya un marco para definir qué características debe tener un sistema GNSS a estas alturas, ya que si bien el primero fue el GPS, su evolución así como el resto de sistemas que surjan en otros países deben tener una estructura básica muy similar para garantizar la interoperabilidad y las características entre distintos GNSS.

1.3 GNSS: definición de su composición, características y segmentos.

Los sistemas de navegación por satélite tienen una estructura claramente definida, que se divide en tres segmentos distintos: un segmento espacial, un segmento de control, un segmento de usuarios. No se entiende un GNSS sin alguno de estos tres elementos.

Hasta ahora la situación era la de sistemas dependientes del GPS, que no tenían segmento espacial, o que está en fase experimental, y por tanto son sistemas que por si mismos no son completamente operativos, como el Galileo ahora en fase experimental.

Así, mientras que el segmento espacial hasta ahora ha pertenecido exclusivamente al GPS y al GLONASS (aunque su constelación de satélites no abarca una cobertura global), quedando relegados el resto de países a usarlos, los segmentos de control se han implantado de distinta manera en cada país (Japón, EEUU, Rusia) o continente (Europa), dando lugar a los sistemas de aumento basados en tierra o satélite, comentados anteriormente.

A continuación vamos a describir qué es lo que debe tener un GNSS en cada segmento para poder ser considerado como tal, y no un sistema de aumento dependiente de otro GNSS.

1.3.1 Segmento espacial

Es el segmento compuesto por los satélites que forman el sistema, tanto de navegación como de comunicación. Mientras que los primeros orbitan alrededor de la Tierra, repartiéndose en distintos planos orbitales, los segundos son los que forman los llamados sistemas de aumento que sirven para la corrección de errores de posicionamiento.

Satélites de navegación

El segmento espacial de un GNSS debe tener el suficiente número de satélites de navegación, tales que éstos puedan garantizar una cobertura global en todo momento. Además para ser lo suficientemente robusto en el servicio, ha de tener un número que le permita transmitir información de manera redundante en caso de que algún satélite deje de prestar servicio, o para que haya un mayor número de satélites en una zona que nos permitan obtener un posicionamiento más preciso.

Los satélites por otro lado, han de estar colocados en distintos planos orbitales de tal forma que se cubra toda la Tierra de manera global en todo momento (actualmente el GPS garantiza un mínimo de 5 satélites visibles en cualquier parte del mundo). Sin embargo dependiendo del número de satélites, la distribución dentro de estos planos orbitales no tiene porqué ser uniforme.

Aunque entraremos en más detalle sobre las características técnicas en posteriores capítulos, basta con saber que el GPS estadounidense en la actualidad tiene una constelación de 30 satélites, distribuidos en seis planos orbitales de manera no uniforme, ya que los satélites adicionales que proporcionan información redundante se han ido añadiendo poco a poco a la constelación originalmente uniforme de 24 satélites.

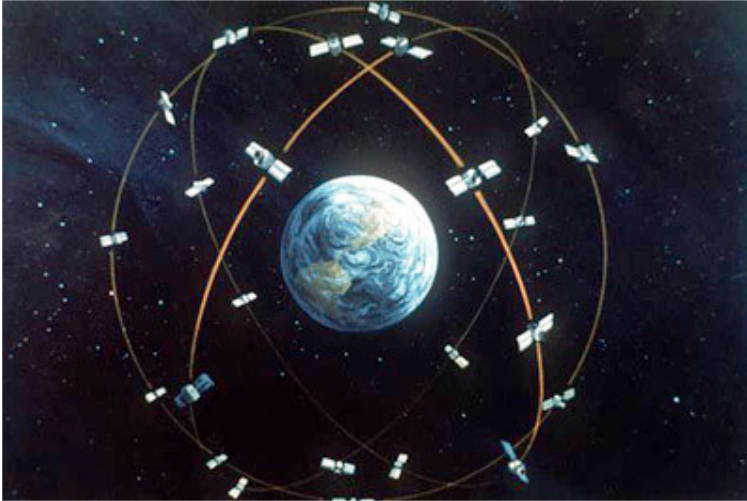


FIGURA 1.1 Constelación de satélites GPS ^[29]

Satélites de comunicación

Por otro lado, en el SS podemos encontrar satélites de comunicación GEO, que forman los llamados sistemas de aumento, particulares de cada país. Dicho satélite retransmite la información con correcciones procedente del segmento de control, lo que aumenta la precisión del sistema. Ejemplos de sistemas de aumento son el WASS de EEUU, el EGNOS en Europa o el MFSAS de Japón y Australia.

1.3.2 Segmento de control

Formado por el conjunto de estaciones en tierra que recogen los datos de los satélites. Este segmento es complejo en su definición, siendo propio de cada país o coalición de países, y estructurándolos en función de distintos criterios como más convenga.

Sus funciones son garantizar las prestaciones del sistema mediante monitoreo del segmento espacial y aplicar correcciones de posición orbital y temporal a los satélites, enviando información de sincronización de relojes atómicos y correcciones de posicionamiento de órbitas a los distintos satélites.

Estructura del segmento de control

La estructura básica para todo GNSS, es un conjunto de estaciones de monitorización y una estación de control, que reciben las señales de los satélites y son capaces de llevar a cabo las funciones anteriormente citadas.

Cada estación genera su propia información sobre el funcionamiento del sistema, en última instancia esta información se envía a una estación de control que aplica dichas correcciones al satélite del GNSS, en cuanto a su posición orbital y coordenadas temporales, o bien retransmite la información a un satélite geoestacionario que forma un sistema de aumento (como se hace en la actualidad con el GPS, en países que no tienen un segmento espacial propio).

Como la posición de cada estación y las coordenadas temporales se conocen (cada estación está equipada con un reloj atómico de cesio), se pueden combinar las medidas obtenidas por varias estaciones para crear un sistema de navegación inverso que determine la localización espacial y temporal del satélite.

En última instancia se envía a través de las estaciones de monitorización o de control la nueva información al satélite, que corrige así su órbita y su mensaje de navegación.



FIGURA 1.2 Centro de control de Misiones de GPS ^[47]

1.3.3 Segmento de usuario

Formado por los equipos GNSS que reciben las señales que proceden del segmento espacial. Este dispositivo está formado por un conjunto de elementos básicos que son:

- **Antena receptora** de GNSS a la frecuencia de funcionamiento del sistema, de cobertura hemiesférica omnidireccional. Puede ser de muchas formas y materiales, dependiendo de las aplicaciones y del coste del receptor: monopolo, dipolo, dipolo curvado, cónico-espiral, helicoidal o microstrip.
- **Receptor:** es del tipo heterodino, basado en la mezcla de frecuencias que permite pasar de la frecuencia recibida en la antena a una baja frecuencia que podrá ser manejada por la electrónica del receptor. Contiene un reloj altamente estable (generalmente un oscilador de cristal) y normalmente una pantalla donde mostrar la información de posicionamiento.

Los receptores se encargan de tres funciones principales:

- **Satellite Manager**, que es la gestión de los datos que envía el satélite. En primer lugar el receptor está en modo INIT en el que se almacena el almanaque y el estado de los satélites en una memoria. Después pasa al modo NAV en el que almacena los datos necesarios para los cálculos.

- Select Satellite, que se encarga de encontrar los cuatro satélites con geometría óptima para la navegación, a partir de una lista de satélites visibles.
- SV Position Velocity Acceleration, que calcula la posición y velocidad de los satélites empleados en la navegación.



FIGURA 1.3 Receptor WOXTER 100 GPS con Bluetooth ^[48]

Este segmento ha evolucionado mucho, desde sus principios donde un receptor era capaz de captar la señal de cuatro o cinco satélites, hasta la actualidad que tienen hasta doce o veinte canales, lo que permite un mejor posicionamiento.

Además del número de canales (o señales de satélite que es capaz de captar), los receptores también se caracterizan por los sistemas de corrección internos (como DGPS) y también por los protocolos que utiliza con distintos fines, como comunicaciones entre dispositivos (mediante USB, Bluetooth o NMEA 0183).

Por último decir que es de vital importancia la existencia de acuerdos entre distintos GNSS de forma que los receptores de un sistema puedan recibir señales de los satélites de otro sistema o de sistemas de aumento, lo que implica que en la actualidad se trate de buscar un consenso de cómo deben evolucionar los GNSS.

1.4 Prestaciones de los actuales sistemas GNSS

Ahora que ya hemos definido la estructura básica de un sistema global de navegación por satélite, vamos a analizar las prestaciones básicas que debe ofrecer. Aunque entraremos en detalle en el próximo capítulo sobre las prestaciones de cada sistema en particular, vamos a analizarlas en este apartado de manera común a todos:

- **Cobertura:** todo GNSS debe tener una cobertura mundial, es decir, una constelación de satélites que sea suficiente como para garantizar el funcionamiento del sistema en cualquier parte del planeta. Como dijimos antes,

necesitamos un mínimo de cuatro satélites para calcular las coordenadas espaciales y temporales.

- **Disponibilidad:** el sistema debe garantizar su normal funcionamiento durante un porcentaje muy elevado de tiempo, en torno al 95% o 99% si hablamos de aplicaciones críticas o no. Esto hace que se introduzcan satélites redundantes a la constelación para garantizar el funcionamiento en caso de que alguno falle.
- **Precisión:** el sistema debe proporcionar un posicionamiento espacial y temporal preciso. Hablamos de un rango de metros en aplicaciones civiles en la actualidad, que varían de un sistema de aumento a otro; y de centímetros para aplicaciones militares del GPS.
- **Integridad:** la integridad es un concepto fundamental en la navegación. Hace referencia a cómo de fiables son los datos que se están usando para seguir una determinada ruta o realizar una determinada operación. Para cuantificar la integridad, se suele expresar el riesgo de pérdida de integridad como la probabilidad de un fallo no detectado. Es decir los satélites deben transmitir información fiable y no errónea.
- **Continuidad de servicio:** concepto que se refiere sobre todo al servicio prestado por el GPS, ya que el Gobierno Norteamericano podría apagar la señal civil que generan sus satélites, terminando o interrumpiendo así su servicio.

Así para garantizar todas las prestaciones del sistema, se debe tener el control del mismo, ya que la dependencia de otros sistemas, ya sea GPS o GLONASS, hace que los países sin su propio Sistema de Navegación por Satélite, no puedan garantizar dichas prestaciones; si bien con los sistemas de aumento si podemos garantizar algunas de éstas.

1.5 Funcionamiento de un sistema GNSS¹

En este apartado vamos a cubrir los aspectos clave del funcionamiento de los GNSS. Ahora que conocemos su estructura básica y las prestaciones que debe ofrecer, vamos a ver el proceso que se da desde que se envía la información hasta que se recibe, y como se aprovecha dicha información para calcular el posicionamiento.

El funcionamiento de un Sistema de Navegación por Satélite involucra los distintos segmentos vistos anteriormente, de tal manera que se relacionan entre sí:

- **Segmento espacial:** envía la señal que se recibe en los segmentos de control y usuario.
- **Segmento de control:** recibe la señal del segmento de espacio, monitoriza y actualiza información enviando correcciones a los satélites si es preciso.
- **Segmento de usuario:** recibe información procedente del segmento espacial y calcula su posición.

¹ Más información en [42] y [45]

CONSTITUCIÓN DE UN SISTEMA DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE

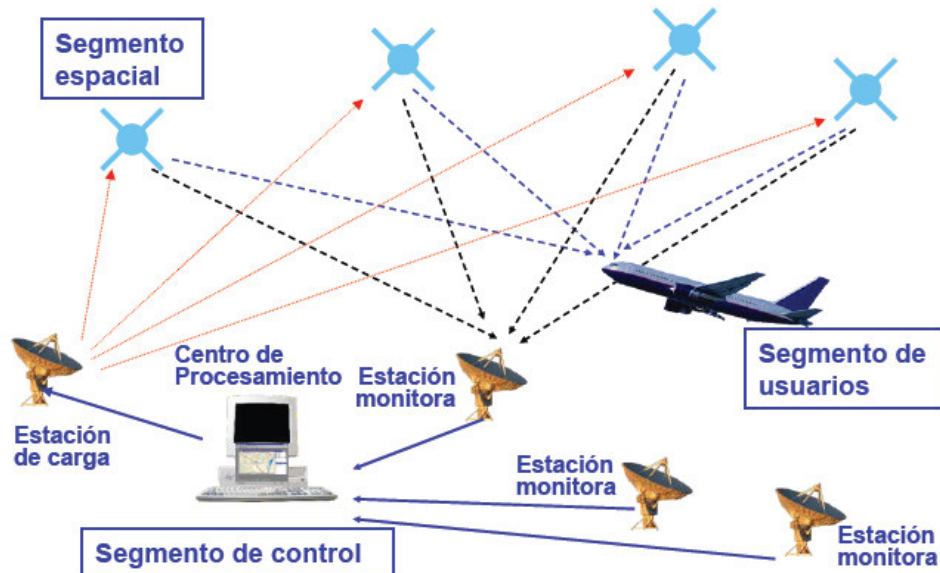


FIGURA 1.4 Funcionamiento de un GNSS ^[19]

1.5.1 ¿Cómo se calcula la posición?

El cálculo de la posición depende básicamente de dos parámetros que son la posición del satélite y el reloj del mismo. Dicha información es recogida en la señal enviada por el satélite hasta el receptor, siendo el proceso de cálculo el siguiente:

1. La situación de los satélites es conocida por el receptor con base en las efemérides², parámetros que son transmitidos por los propios satélites.
2. El receptor GNSS mide su distancia de los satélites, y usa esa información para calcular su posición. Esta distancia se mide calculando el tiempo que la señal tarda en llegar al receptor. Conocido ese tiempo y basándose en el hecho de que la señal viaja a la velocidad de la luz (salvo algunas correcciones que se aplican), se puede calcular la distancia entre el receptor y el satélite.
3. Cada satélite indica que el receptor se encuentra en un punto en la superficie de la esfera con centro en el propio satélite y de radio la distancia total hasta el receptor.
4. Son necesarios al menos cuatro satélites para obtener la posición, con tres satélites somos capaces de calcular la posición en tres dimensiones, mientras que el cuarto nos permite eliminar los errores de sincronismo.

Podemos resumir esto en el siguiente sistema de ecuaciones:

² Conjunto de parámetros orbitales que indican la posición del satélite.

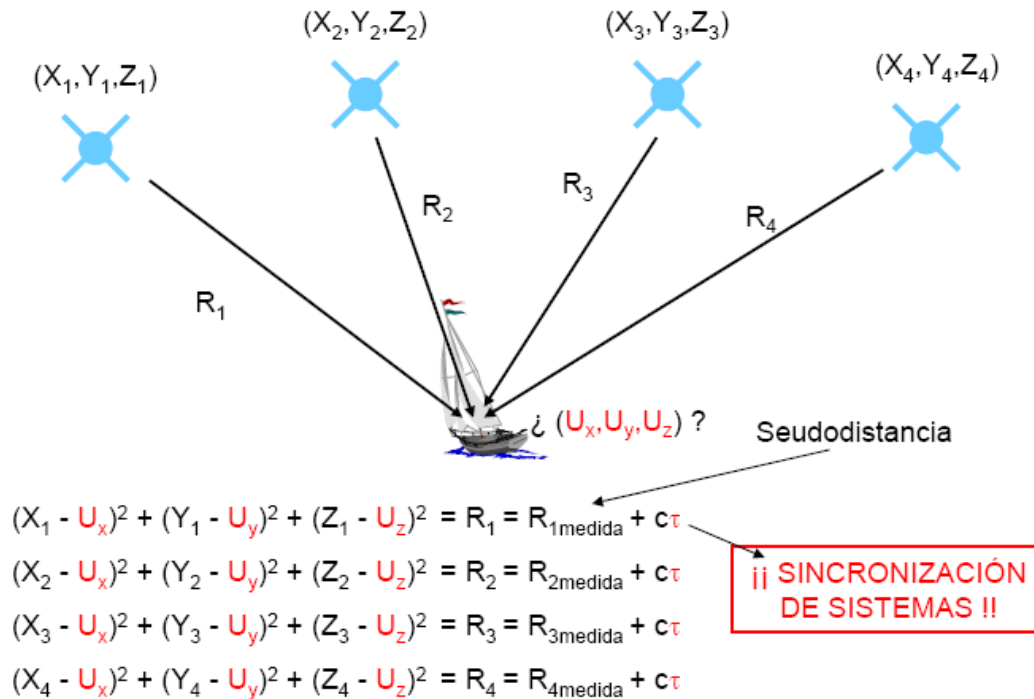


FIGURA 1.5 Representación esquemática del funcionamiento del GNSS ^[19]

1.5.2 Fuentes de error

La información procedente de cada satélite que viaja en una señal puede verse afectada por distintas fuentes de error:

- Efectos atmosféricos
- Efectos multitrayecto
- Errores de efemérides y reloj
- Errores debidos a la relatividad
- Disponibilidad selectiva

Estos errores que degradan la precisión del servicio, han hecho que surjan como ya se han comentado sistemas de mejora para obtener mayores prestaciones.

1.6 Aplicaciones de los sistemas GNSS

Como ya se ha descrito anteriormente, el nacimiento de la tecnología GNSS tiene su origen en las aplicaciones militares del GPS, empezando a funcionar para aplicaciones civiles a finales de los 80. Vamos a ver ahora estos dos tipos de aplicaciones y a describir su estado actual, así como sus características.

1.6.1 GPS: el sistema militar

Los beneficios del GPS son cuantiosos, se ha convertido en un componente esencial para los sistemas militares estadounidenses, usándose en todo tipo de equipamiento militar como armas guiadas de alta precisión, o navegación y posicionamiento de las tropas en vehículos de tierra mar y aire. Podemos clasificar los servicios militares como:

- **Servicios para Ejército del Aire:** reconocimiento y localización de objetivos, repostaje en vuelo, cálculo de rutas, aproximación al aterrizaje, precisión de los bombardeos, etc.
- **Servicios para Infantería:** supervivencia, emplazamiento de la artillería, reconocimiento y localización de objetivos, recuperación de equipos, puntos de encuentro, evacuaciones, etc.
- **Servicios para la Marina:** navegación, operaciones anfibias, patrulla costera, emplazamiento de minas, posicionamiento de submarinos, etc.

Sin embargo el GPS ha vuelto al ejército de EEUU extremadamente dependiente de dichos dispositivos, lo que ha llevado a cabo el estudio de mecanismos de seguridad que garanticen que no se va a emplear su propia tecnología contra ellos mismos. Mecanismos como la citada disponibilidad selectiva actualmente en desuso o el control que ejerce el gobierno sobre los receptores GPS que se venden, limitando su funcionalidad dependiendo de su altitud y velocidad, (no permiten una velocidad mayor de 515 m/s a una altitud mayor de 18 Km) evitando con dichas medidas que puedan colocarse en armas guiadas contra los EEUU.

1.6.2 GNSS: el sistema civil global³

El uso del GPS como tecnología civil se inicia a partir de la década de los 90, y supone el inicio de un nuevo sector tecnológico con multitud de aplicaciones potenciales. Cabe destacar distintos tipos de aplicaciones:

- **Automoción:** los sistemas de navegación de automóviles basados en GPS, son la aplicación más conocida de esta tecnología en la actualidad. Son receptores GPS de distintas características, y sobre los que podemos cargar un software con diversa información (mapas, localizaciones, límites de velocidad, radares...), son capaces de analizar y planificar rutas en marcha. Constituyen un amplio mercado en la actualidad.
- **Ferrocarriles:** La navegación por satélite se utiliza ya en algunas aplicaciones tales como el apoyo al control del tráfico, la gestión de recursos ferroviarios o la asistencia al cliente, o el «control activo de los trenes». También se empleará en futuros sistemas de control de trenes y señalización de la Unión Europea, a través del proyecto Galileo.⁴
- **Aviación:** los sistemas GPS integrados en las actuales cabinas sirven para el guiado del piloto automático a través de la planificación de rutas. Para lograr una

³ Información de aplicaciones en diversos sectores en [43]

⁴ Puede encontrarse amplia información de ésta y otras aplicaciones en el Libro Verde redactado por la Comisión de Energía y Transporte de la Unión Europea sobre Galileo.

mayor precisión en ruta utilizan sistemas de aumento como WAAS o LAAS en función de donde se encuentren.⁵

- **Navegación marítima:** el GPS es utilizado en la actualidad por multitud de barcos para navegar por mares océanos e incluso lagos. Estos sistemas tienen un software, como el MOB, que permite el rescate marítimo de personas en el mar de manera mucho más sencilla, ya que establece la posición exacta en la que se produce el accidente.⁶
- **Agricultura:** el DGPS ha supuesto también una revolución en el mundo agrícola facilitando multitud de procesos: La gestión de activos, optimizando el uso de recursos en función del trozo de parcela en el que se encuentre la máquina, el trazado de lindes, la gestión forestal y el seguimiento de vehículos son sólo algunos ejemplos.⁷
- **Inspección y mapeo de territorios (geodesia y geofísica):** el GNSS se emplea en la medición de datos para actualización de mapas cartográficos. Un ejemplo del uso del GNSS son los Sistemas de Información Geográfica (SIG), son una integración organizada de hardware, software, datos geográficos y personal, diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión, en donde se utiliza el GNSS para la recogida de datos.⁸
- **Sincronización de equipos:** el GPS es utilizado en la actualidad para la sincronización de distintos tipos de equipos por ser una fuente de tiempo muy precisa. Se usa por ejemplo en el protocolo NTP de Internet para la sincronización de equipos informáticos de una red, estableciendo el reloj del GPS como el maestro a partir de los que se sincronizan el resto. También se usa en comunicaciones TDMA para redes.
- **Telefonía móvil:** Algunos teléfonos móviles pueden vincularse a un receptor GPS diseñado a tal efecto. Suelen ser módulos independientes del teléfono que le proporcionan los datos de posicionamiento, los cuales son interpretados por un programa de navegación.
- **Servicios de localización y emergencia:** son servicios basados en el GPS integrado en un dispositivo móvil, que envía la información de la posición de éste a través de una red. Pueden tener distintas aplicaciones, como servicios de emergencia (localización de personas), o publicidad (localización de lugares). El uso del GPS para el ocio y tiempo libre es un segmento que tiene cada vez un mercado mayor: el senderismo, ciclismo, escalada, montañismo etc. Se han hecho eco de esta tecnología. La iniciativa GMES dentro del proyecto Galileo es un ejemplo del uso del GNSS con estos fines.
- **Transporte multimodal:** los GNSS van a permitir la localización y gestión de flotas de transporte (tierra, mar o aire), permitiendo mejores tiempos de entrega y el abaratamiento de costes.
- **Elaboración de mapas de la ionosfera:** la información que envían los satélites GPS es sensible a las perturbaciones de la ionosfera, que causan error en la señal que se propaga. A través de dicho error podemos medir las perturbaciones en la

⁵ Organismos como la ICAO establecen la normativa y el uso de estos sistemas.

⁶ Organismos de la ONU como la IMO (Organización Internacional Marítima) dictan normas y proyectos relacionados con receptores GPS.

⁷ El Ministerio de agricultura, pesca y alimentación proporciona amplia información sobre aplicaciones de GPS.

⁸ El Instituto Geográfico Nacional provee de información sobre el tema.

ionosfera y por tanto hacer un mapa de la misma, a través del cual se podrán medir sismos en cualquier parte del planeta en tiempo real.⁹

Las nuevas aplicaciones que están surgiendo son también las responsables del diseño de los nuevos GNSS y de la actualización de versiones de GPS y GLONASS, a los que se les han añadido nuevas prestaciones que permitan dar nuevos servicios (en el capítulo 3 se presentan las prestaciones de los actuales GPS y GLONASS frente a las del nuevo Galileo, en este capítulo se observa la evolución de la tecnología para ofrecer cada vez mejores prestaciones y mayores servicios).

Por otro lado, estas aplicaciones tendrán un profundo impacto en diversos sectores mejorándolos positivamente: permitiendo optimizar desde la distribución de energía en una red eléctrica, a la mejora de redes de comunicaciones, la gestión más efectiva del transporte, o la monitorización de recursos para su uso más eficiente. Todas estas aplicaciones tienen un impacto económico positivo a través del abaratamiento de costes por el uso más eficiente de recursos, y el desarrollo de un nuevo mercado con múltiples oportunidades de negocios. Los GNSS mejorarán la calidad de vida en los países que inviertan en el desarrollo de proyectos basados en esta tecnología.

1.6.3 Integración de los GNSS en las redes de telecomunicaciones

Las comunicaciones por satélite constituyen en sí redes de telecomunicaciones. En el caso de los GNSS, la información que transmite el satélite tiene que ver con su posicionamiento espacio-temporal. Mediante el envío de distintas señales codificadas de diversa forma y que se transmiten en distintas frecuencias, estas señales son recibidas en los segmentos de tierra y usuario. A través de las antenas de comunicaciones el segmento de tierra es capaz de comunicarse con los satélites mediante distintos enlaces, constituyendo así una red de telecomunicaciones formada por los satélites y el conjunto de estaciones de tierra, siendo el segmento usuario el receptor de los servicios de dicha red¹⁰.

La integración de los GNSS con otras redes de telecomunicaciones a través del desarrollo de distintas aplicaciones, permitirá la mejora de estas redes y el establecimiento de una comunicación más eficiente. Los nuevos GNSS podrán integrarse con redes de:

- **Telefonía móvil:** a través de la integración de un receptor GNSS en un dispositivo móvil. Sus aplicaciones se han comentado en 1.6.2.
- **Redes de comunicaciones:** los GNSS integrados en diversas redes de comunicación permitirán:
 - La sincronización de redes de comunicación como Internet, UMTS, GSM se puede realizar a través de los GNSS lo que permitirá ofrecer una mayor calidad de servicio a menor precio, incrementando la capacidad la red.

⁹ Más información en [41]

¹⁰ Más información en la Figura 2.8 y el punto 3.3.3

- Aumentar la seguridad de la red si para establecer la comunicación. A través de ésta, se usan los códigos de las señales encriptadas emitidas por los satélites, un posible uso sería el de las aplicaciones bancarias.
- Desarrollo de nuevos servicios.

Un ejemplo de integración de los Sistemas de Navegación con distintas redes de telecomunicaciones se da con los servicios basados en localización (LBS). Estos servicios se basan en el uso de la información geográfica almacenada en grandes bases de datos (que contiene información de diversa naturaleza como carreteras, planos de ciudades o puntos de interés); y que son suministrados por los proveedores de dicha información (proveedores GIS), para prestar distintos servicios como localización de personas, servicios de emergencia, información del tráfico, publicidad, información meteorológica, navegación, protección civil, etc., a partir del conocimiento de la posición del receptor de dicho servicio.

El usuario LBS calcula su posición a partir del posicionamiento obtenido con el GNSS y envía dicha información a través de la red de telecomunicaciones. El proveedor de servicios de localización a partir de dicha información, y de la información que obtiene del proveedor GIS, ofrece el servicio al usuario a través del operador de dicha red, que es el que se encarga de recibir la información del usuario, y transmitir la petición de servicio al proveedor LBS.

El funcionamiento de un LBS es en realidad mucho más complejo y su arquitectura puede variar mucho dependiendo de diversos factores. Lo anteriormente explicado se muestra en la siguiente Figura, en un esquema muy básico y simplificado, ya que sólo se pretende mostrar a modo de ejemplo la integración de la tecnología GNSS en una red de telecomunicaciones.

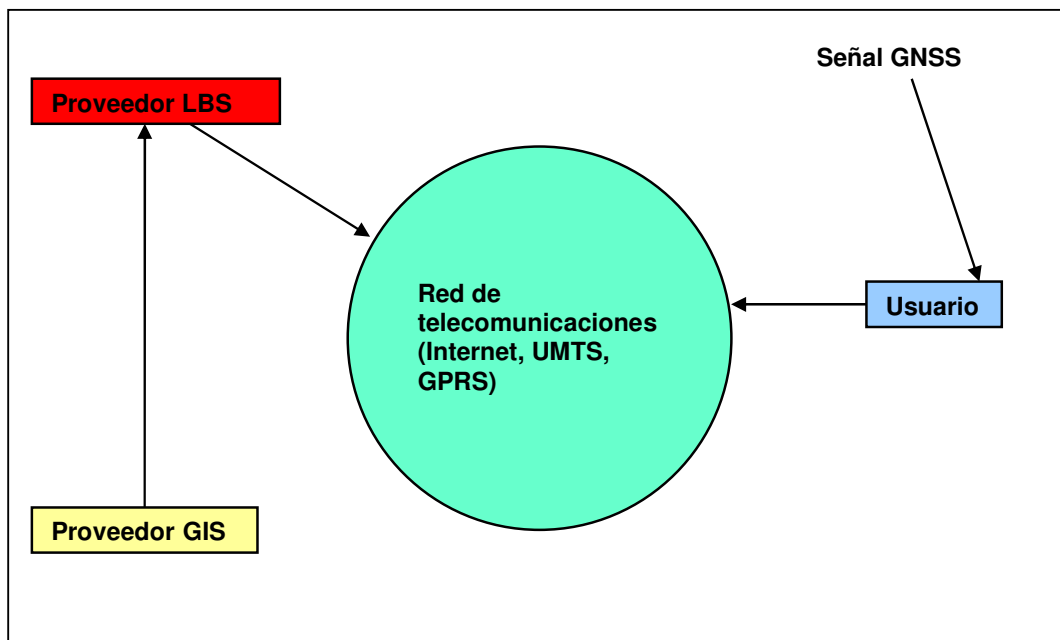


FIGURA 1.6 Esquema de integración de GNSS con LBS

2 Sistemas existentes y su evolución: GNSS-1 y GNSS-2

2.1 Introducción

En este capítulo vamos a presentar los sistemas existentes en la actualidad, es decir las implementaciones reales de la tecnología estudiada en el capítulo 1. Primero presentaremos los sistemas existentes y futuros. Después desarrollaremos tres casos: GPS y GLONASS, como sistemas de primera generación, y Galileo como sistema de nueva generación. El orden en que vamos a abordar el estudio de cada sistema es el siguiente:

- **Historia:** Evolución desde su concepción hasta su estado actual, estudiando los motivos políticos por los que surge cada sistema, así como las organizaciones implicadas en cada caso.
- **Estado actual:** aquí se revisa de forma general la composición del segmento espacial (lanzamiento y características orbitales de los satélites, tipos de satélites), y del segmento de Tierra (localización y funcionamiento).
- **Servicios:** que servicios presta cada sistema hoy día, en cuanto a las prestaciones que ofrece y bajo que condiciones.

El objetivo de este capítulo es adquirir los conocimientos generales en cuanto a historia, composición y servicios ofrecidos por los distintos sistemas en la actualidad, de tal forma que se complemente con el capítulo 1, estudiando con casos prácticos los puntos 1.1, 1.2, 1.3, 1.4.

2.2 Sistemas GNSS

Como se ha visto anteriormente, el hecho de que EEUU tuviera el monopolio del segmento espacial, hace al resto de países del mundo dependientes de su sistema (aunque el GLONASS ruso está activo, no tiene suficiente cobertura para ofrecer un servicio global).

Mientras en una primera fase los países se centran en el desarrollo de sistemas de aumento (SBAS, GBAS). Debido a la importancia que empieza a cobrar esta tecnología tanto por el número de posibles aplicaciones, como por el mercado que genera, se produce una segunda fase, liderada por Europa en la que se opta por desarrollar un segmento espacial propio que acabe con la dependencia del sistema estadounidense.

Esto se resume en la Figura 2.1, en la que muestra un esquema de los distintos sistemas:

- GNSS-1: formado por el GPS y GLONASS actuales, junto con los sistemas de aumento que han surgido: SBAS, GBAS, ABAS.
- GNSS-2: formado por el nuevo sistema Galileo, el reciente COMPASS chino y las actualizaciones de los actuales GPS y GLONASS.

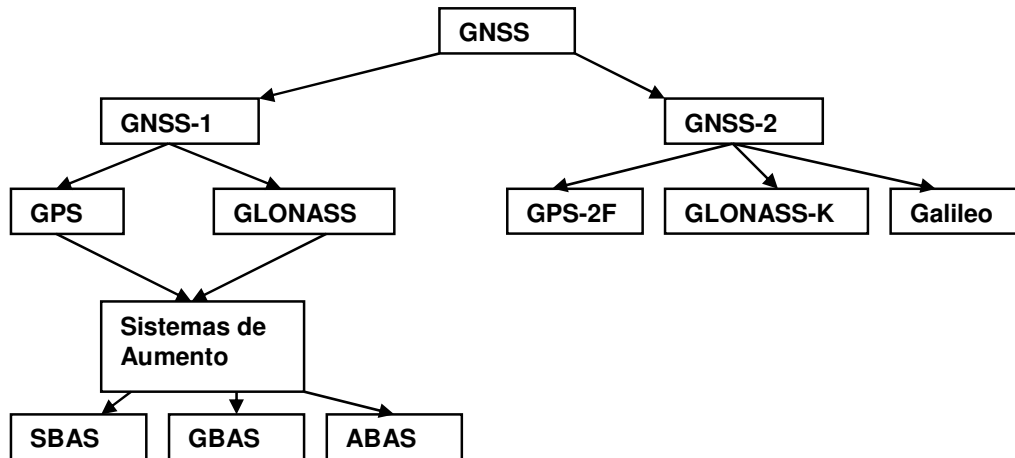


FIGURA 2.1 GNSS: representación en la actualidad ^[1]

2.2.1 Sistema de aumento basado en aeronaves: ABAS

Son sistemas que emplean más de 4 satélites para calcular la posición, de esta forma son capaces de detectar fallos en el envío de información.

En la actualidad se emplean dos sistemas:

- **Sistema Monitor de Integridad Autónoma del Receptor (RAIM):** por un lado detecta fallos calculando su posición con la combinación de 4 satélites sobre 5 o 6 visibles, así sabemos cual es el satélite defectuoso. Por otro, la aeronave puede ahora actuar como otro satélite debido a su altitud ya que conoce su posición.
- **Sistema de Identificación y Exclusión de Fallas (FDE):** esta funcionalidad permite descartar el satélite defectuoso para seguir empleando el GNSS de forma normal. Se encuentra en la mayoría de las aeronaves que se desarrollan en la actualidad.

2.2.2 Sistema de aumento basado en tierra: GBAS

Nace con el fin de dotar de mayor precisión al GPS y GLONASS para el tráfico aéreo. Los sistemas GBAS se diferencian de los SBAS en que ellos no dependen de los satélites Geoestacionarios (GEO), debido a que el GBAS no está diseñado para brindar su servicio sobre amplias regiones geográficas, se emplea en distancias cortas, por lo que es un LAAS, que es el nombre que le ha dado la FAA¹¹ a su GBAS.

¹¹ Federal Aviation Administration. Más información sobre las Categorías de aproximación I, II, III y los sistemas de aumento que se usan para éstas en su página web.

El funcionamiento es sencillo, el GBAS vigila las señales GPS ó GLONASS en un aeropuerto y transmite correcciones diferenciales de distancia, mensajes de integridad locales y datos de aproximación directamente al receptor de a bordo mediante una radiodifusión de datos VHF (VDB).

2.2.3 Sistema de aumento basado en satélites: SBAS

Se conoce como SBAS al conjunto de sistemas de aumento desarrollados por distintos países que se basan en el uso de satélites geoestacionarios para mejorar las prestaciones de los actuales GPS y GLONASS.

En la Figura 2.2 podemos observar por su distribución geográfica los SBAS que existen en la actualidad. Son sistemas que poseen una amplia cobertura y que por tanto tratan de mejorar en esas zonas las prestaciones del servicio de GPS y GLONASS.

Entre las funciones de mejora que ofrecen dichos sistemas destacamos:

- Aumentar la precisión de GPS y GLONASS: mientras que estos sistemas tienen una precisión de unos 20-70 metros, los SBAS ofrecen una precisión de entre 1 y 10 metros, variando de un sistema a otro.
- Incrementar la integridad del sistema informando de posibles fallos en satélites con mayor rapidez. Mientras que el GPS puede tardar 15 minutos para aplicaciones críticas, los actuales sistemas civiles requieren entre 6 y 30 segundos de retardo para informar de un fallo. Los SBAS alcanzan este requisito, siendo así imprescindibles para ciertas aplicaciones.
- Incrementar la disponibilidad. Actualmente el GPS tiene una disponibilidad del 95-98%, mientras que sistemas como el EGNOS tienen una disponibilidad de hasta el 99.97%.

Las otras prestaciones que son la cobertura, quedan limitadas a la región del sistema de aumento, y la continuidad de servicio depende del propio sistema GPS o GLONASS, estando fuera de control para estos sistemas.

La arquitectura básica de todos los sistemas SBAS esta conformado por:

- **Segmento terrestre:** una red de estaciones terrestres de referencia distribuidas por una amplia zona geográfica que monitorean a los satélites GNSS.
- **Segmento espacial:** formado por el uno o varios satélites GEO.

El funcionamiento es sencillo, el segmento de tierra retransmite los datos a una instalación de procesamiento central en donde se evalúa la validez de las señales y se calcula correcciones a los datos de efemérides y reloj radiodifundidos de cada satélite. Para cada satélite GPS o GLONASS vigilado, el SBAS estima los errores en los parámetros, y a su vez aplica las correcciones, que serán transmitidas a los satélites GEO y este las transmitirá a los receptores GNSS.

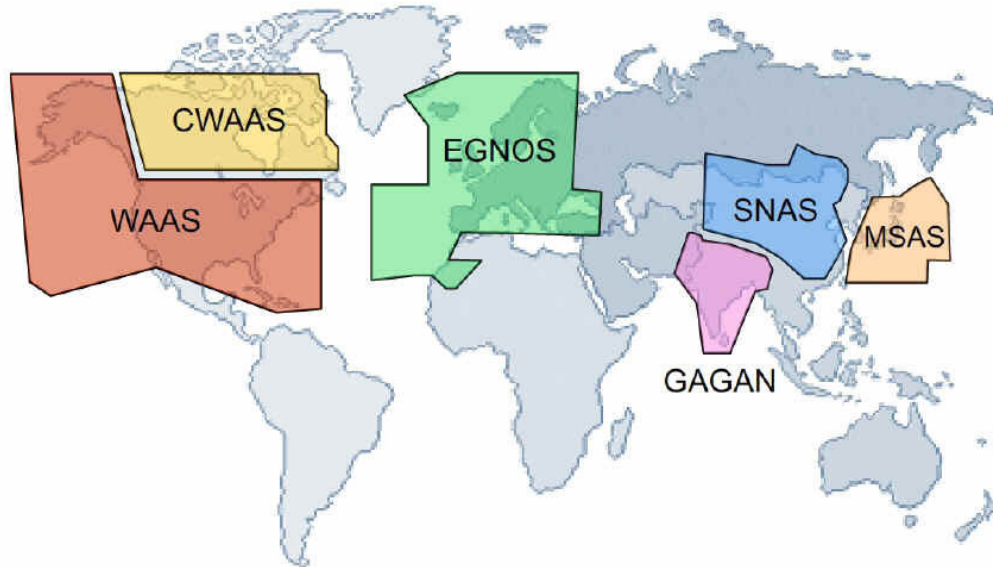


FIGURA 2.2 Sistemas de aumento existentes en la actualidad ^[10]

2.3 GPS: Global Positioning System

2.3.1 Historia

El NAVSTAR GPS¹² es hasta la fecha, el único sistema de posicionamiento global completamente operativo. Como ya hemos comentado antes, el GPS tiene un origen militar, que comienza, como gran parte de la tecnología que se desarrolla en el siglo XX, con la Guerra Fría.

El GPS tiene su origen en el sistema TRANSIT (también norteamericano) un sistema de navegación que surgió en los años 60 como resultado de la colaboración entre los Departamentos de Defensa y Transporte de los EEUU y la NASA. Si bien dicho sistema tenía una cobertura mundial, no es un GNSS, puesto que no ofrecía un servicio global ya que no era accesible las 24 horas del día.

Se hacía necesario por tanto un salto cualitativo, y se inicia el proyecto NAVSTAR GPS en 1973. La iniciativa, financiación y explotación corrieron a cargo del Departamento de Defensa. El proyecto se desarrolló en distintas fases:

- **Fase 1 (1973-1977):** estudio de conceptos, diseño y viabilidad del proyecto.
- **Fase 2 (1979-1988):** producción del primer bloque de satélites que servirá para validar el sistema.
- **Fase 3 (1989-1995):** conseguir un segmento espacial plenamente operativo con el lanzamiento del segundo bloque de satélites. Se declara la Capacidad Inicial

¹² Acrónimo de Navigation Satellite Timing And Ranking Global Positioning System, nombre original del proyecto.

Operativa en 1993 (IOC), y se declara la Plena Capacidad Operativa en 1995 (FOC).

- **Fase 4 (1996-2001):** lanzamiento y desarrollo del tercer bloque de satélites, y operación y mantenimiento del GPS.
- **Fase 5 (2002-2013):** desarrollo de los nuevos satélites con mejores prestaciones que sustituirán a los antiguos, y lograr una constelación más robusta.

A partir de la caída de la Unión Soviética el Gobierno de los EEUU decide poner a disposición civil esta tecnología, aunque con ciertas limitaciones que no pongan en peligro a los EEUU como se ha explicado anteriormente.

El sistema pasó a estar completamente operativo en 1994, cuando se alcanzaron los 24 satélites que componían el segmento espacial, y con un gran número de estaciones de control operativas en todo el mundo.

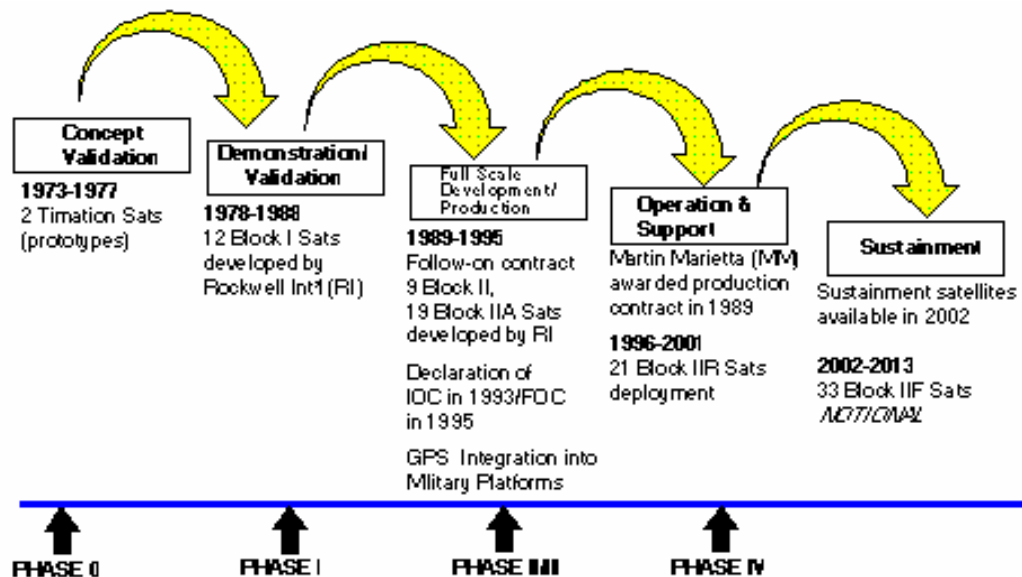


FIGURA 2.3 Fases de desarrollo del proyecto NAVSTAR GPS ^[11]

2.3.2 Composición del sistema

El GPS por ser el primer sistema, ha definido la arquitectura básica del resto de GNSS. Se compone de tres segmentos:

- **Segmento espacial:** conjunto de satélites, que han sido lanzados en sucesivas generaciones
- **Segmento de control:** formado por una estación maestra y un conjunto de estaciones de monitorización que proporcionan información a ésta y de antenas de tierra que forman un enlace bidireccional con los satélites.
- **Segmento de usuario:** conjunto de receptores GPS que hacen uso del sistema.

2.3.2.1 Segmento espacial

Como ya se ha visto en el capítulo 1, el segmento espacial del GPS diseñado en un principio constaba de 24 satélites distribuidos por igual en seis planos orbitales circulares distribuidos uniformemente con una inclinación de 55° sobre la línea del horizonte y una altitud de unos 20200 Km. El período de cada satélite para completar una órbita es de unas doce horas, siendo la posición la misma al cabo de un día sideral.

Esto garantizaba un mínimo de cinco satélites disponibles en cualquier parte del mundo (normalmente seis), sin embargo se han ido añadiendo satélites que mejoren las prestaciones de servicio del GPS.

En la actualidad hay un total de 30 satélites en el segmento espacial del GPS, distribuidos no uniformemente y que garantizan unas mejores prestaciones en cuanto a disponibilidad e integridad que la constelación de 24.

Sin embargo, el estado y el funcionamiento de cada satélite varía de uno a otro, ya que algunos operan con relojes atómicos de Cesio y otros con relojes atómicos de Rubidio.

Como se puede apreciar en la figura, dividiendo la tierra en planos orbitales en función de la latitud y longitud se obtiene una red sobre la que posicionar los distintos satélites.



FIGURA 2.4 Distribución original de la constelación de 24 satélites ^[31]

Los satélites GPS se lanzaron en distintas fases, y a cada grupo de satélites se le conoce como bloque.

Bloque I de satélites GPS

El primer bloque de satélites GPS está compuesto por los once primeros satélites que se lanzaron al espacio, adjudicados a Rockwell International. Se corresponden con los

satélites del 1 al 11 lanzados entre los años 1978 y 1985. Fueron los satélites que sirvieron para validar el proyecto y estaban distribuidos a una altitud de 20200 km(10900 millas náuticas) con un ángulo de inclinación de 63 grados.

Ninguno de ellos está ahora en servicio, si bien su tiempo de vida estimado era de 5 años, duraron más de lo previsto.

Bloque II de satélites GPS

El segundo bloque de satélites que se lanzaron al espacio está compuesto por los satélites lanzados de 1989 a 2006. Los satélites diseñados entre estas fechas se conocen como BLOCK II, BLOCK IIA, BLOCK IIR y BLOCK IIR-M.

Se conoce como BLOCK II a los satélites a los satélites del 13 al 21 lanzados en 1989 y 1990. Fueron desarrollados también por Rockwell International y actualmente ninguno de ellos presta servicio, y fueron diseñados para ser capaces de prestar servicios durante 14 días sin contactar con el segmento de tierra.

El BLOCK IIA es el conjunto de satélites lanzados entre 1990 y 1997. Son los satélites del 22 al 40 y fueron diseñados para poder permanecer 180 días sin comunicarse con la estación de control. A lo largo de este período la degradación de la precisión del satélite se hace más patente.

El tiempo medio de vida de BLOCK II y BLOCK IIA es de 7.3 años. En la actualidad 5 de los satélites BLOCK IIA han dejado de prestar servicio.

El último conjunto de satélites lanzados al espacio es el BLOCK IIR que se lanzaron a partir de 1997, desarrollados por la Lockheed Martin y que se corresponde con los vehículos del 41 al 62. Son más avanzados que los anteriores y pueden permanecer sin comunicar con el segmento de control 14 días y 180 navegando en modo autónomo sin sufrir casi degradación alguna en su órbita. Esto es posible gracias a un sistema de comunicación entre los satélites BLOCK IIR que les permite estimar los parámetros y alinearse sin contactar con el segmento de control.

Su vida media es más larga, unos 7.8 años y son los que prestan servicio en la actualidad junto a los BLOCK IIA.

Los satélites BLOCK IIR-M son los tres últimos satélites lanzados al espacio en 2005 y 2006, y aunque se consideran del BLOCK IIR, tienen nuevas prestaciones como el código L2C en la banda de frecuencias L2.

2.3.2.2 Segmento de control

El segmento de control del GPS está compuesto por los siguientes elementos:

- **Estación de control maestra (MCS):** situada en Colorado en la base Falcon de la US Air Force. Existen además dos estaciones de reserva en California y Maryland.

- **Estaciones de control:** situadas por todo el Globo terráqueo (Hawaii, Kwajalein, Ascension Island, Diego Garcia, Colorado Springs), tres de ellas poseen antenas que transmiten información a los satélites (Ascension Island, Diego Garcia, Kwajalein), mientras que otras dos no.

Se conoce de manera muy precisa la posición de cada una de estas estaciones de acuerdo con las mediciones realizadas por el World Geodetic System en el 1972 y posteriormente en 1984. De ésta forma se puede conocer la precisión del GPS, ya que al calcular la posición de la estación por triangulación a partir de la información que envían los satélites GPS, se calcula la desviación sobre la posición exacta (medida) de la estación.

El funcionamiento del segmento de control es el siguiente: las estaciones de control (*monitor stations*) reciben la información de los satélites, acumulando datos sobre posición de éstos, mensajes etc. Dichos datos se envían a la MCS, que los procesa y aplica las correcciones necesarias en cuanto a órbitas y mensaje de navegación del satélite.



Global Positioning System (GPS): Estaciones Monitoras y Estación de Control

FIGURA 2.5 Segmento de control de GPS ^[30]

Como la posición de cada estación y las coordenadas temporales se conocen (cada estación está equipada con un reloj atómico de cesio), se pueden combinar las medidas obtenidas por varias estaciones para crear un sistema de navegación inverso que determine la localización espacial y temporal del satélite para aplicar así las correcciones oportunas de los parámetros de navegación del mismo.

Por último dichas correcciones se transmiten por las estaciones de control que poseen antenas de tierra, que a su vez pueden aplicar correcciones de reloj, comandos de telemetría y otros mensajes, siendo una función exclusiva de la MCS la corrección de la órbita de los satélites. La transmisión de correcciones se realiza tres veces al día.

En caso de fallo de la MCS, las dos estaciones de reserva (Backup) estarían listas para funcionar de forma inmediata sin que se alterara el normal funcionamiento del sistema en ningún momento.

2.3.3 Servicios GPS

El GPS provee de dos niveles de servicio conocidos como SPS y PPS:

- **SPS:** es el servicio que está disponible a nivel global para todos los usuarios de GPS de manera gratuita. Al inicio su precisión horizontal era de unos 100 metros y vertical de 156, debido a la Disponibilidad Selectiva (SA) actualmente en desuso.¹³ Su precisión de temporal es de 340 ns con respecto al UTC¹⁴.

En la actualidad, sin la SA precisión depende del número de satélites siendo de entre 10 y 20 m para al menos cuatro satélites. Esto puede apreciarse la Figura 2.6 donde la desactivación de la SA disminuye considerablemente el error de posicionamiento.

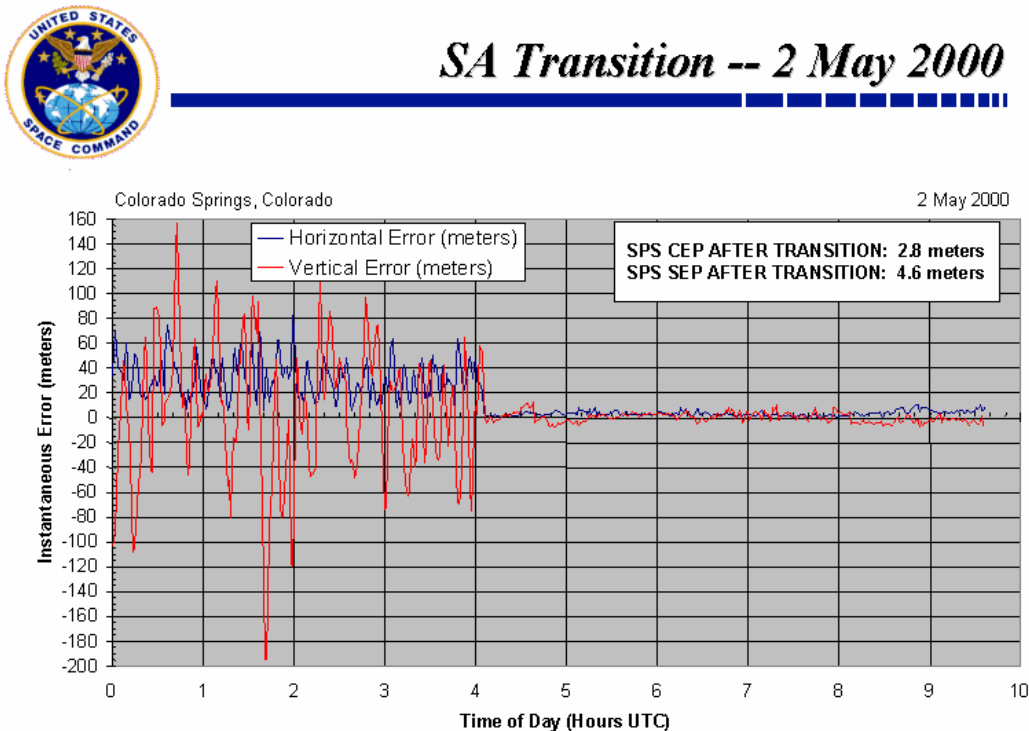


FIGURA 2.6 Precisión del GPS con y sin SA (disponibilidad selectiva) ^[32]

- **PPS:** es el servicio militar de alta precisión, velocidad y servicio temporal, dirigido sólo a los usuarios autorizados por los EEUU. Permite una precisión de 2.2 metros horizontal, 27 metros vertical. Su uso militar excluye a los usuarios no autorizados encriptando dicha información.

¹³ Información oficial en <http://tycho.usno.navy.mil/gpsinfo.html>

¹⁴ **Coordinated Universal Time** es un estándar de precisión temporal atómica definido por el TAI (**Temps Atomique International**) para su uso civil. Por tanto el sistema temporal del GPS se basa en la rotación de la Tierra y no en el sistema de tiempo estándar (días de 24 horas).

2.4 GLONASS: Global Navigation Satellite System

La contrapartida rusa al GPS es el GLONASS, desarrollado en conjunto por el Ministerio de Defensa ruso, Academia de las Ciencias y la Armada Soviética entre 1968 y 1969.

El propósito oficial de este nuevo sistema es dotar de posicionamiento espacial y temporal, y medida de velocidad en toda la Tierra así como en el espacio cercano, a un número ilimitado de usuarios bajo cualquier circunstancia.

Sería siete años después en 1976 cuando se aprobó en el Comité del Partido Comunista Soviético y el Consejo de Ministros de la URSS el plan de desarrollo de GLONASS.

2.4.1 Historia

Desde su inicio, el desarrollo de GLONASS corrió a cargo de Applied Mechanics NPO, contratista principal, que desarrolló e implementando todo el sistema. Ha sido la compañía que ha diseñado los satélites y las instalaciones para su lanzamiento, así como los centros de control automatizados.

El sistema se desarrolló en 3 fases:

- **Fase 1 (1983-1985):** fase experimental del programa, en la que se refinó el concepto del sistema y se pusieron en órbita seis satélites.
- **Fase 2 (1986-1993):** se completa la constelación con 12 satélites, lo que lo hace operativo pero no a nivel global.
- **Fase 3 (1993-1995):** desarrollo de la constelación nominal de 24 satélites y finalización del sistema.

Aunque el sistema se desarrolló entre 1982 y 1991, y se planeó para estar operativo completamente por entonces, la caída de la Unión Soviética paralizó el desarrollo del sistema, que fue retomado por la Federación Rusa, que lo declaró oficialmente operativo en 1993, si bien no fue hasta 1995 cuando se completó la constelación.

Sin embargo, debido a problemas económicos durante los años 1996 a 2002 Rusia fue incapaz de mantener su propio sistema de navegación, manteniendo solamente ocho satélites operativos, lo que lo convirtió en prácticamente un sistema inútil a nivel global.

Plan de renovación

En la actualidad con el nuevo plan de modernización y restauración (Figura 2.7), coordinado por Roscosmos (Agencia Espacial Rusa), prevé la modernización completa del sistema.

Se pretenden alcanzar acuerdos internacionales de cooperación para captar nuevos fondos, y se ha decidido promover el uso civil de GLONASS para la obtención de futuros beneficios económicos. Además se van a firmar acuerdos internacionales para que sea compatible con GPS y Galileo, y de esta manera lograr un GNSS robusto.

El plan de modernización como se puede apreciar en la Figura 2.7 consta de cuatro fases:

- **Primera fase (1982-2007):** estado actual de GLONASS, todavía no es capaz de prestar una Capacidad Inicial Operativa como GNSS.
- **Segunda fase (2003-2015):** planificada a medio plazo, implica el lanzamiento de satélites más modernos y el comienzo de la modernización del segmento de control, así como la puesta en marcha de nuevos servicios a través de nuevas señales.
- **Tercera fase (2008-2025):** pretende dotar de una Capacidad Plenamente operativa a GLONASS, consolidar el desarrollo del mercado civil y completar los sistemas de aumento, así como la puesta en marchas del servicio SoL.
- **Cuarta fase (2015-...):** todavía no definido el plan más allá de 2025. Implicará el mantenimiento del sistema existente.

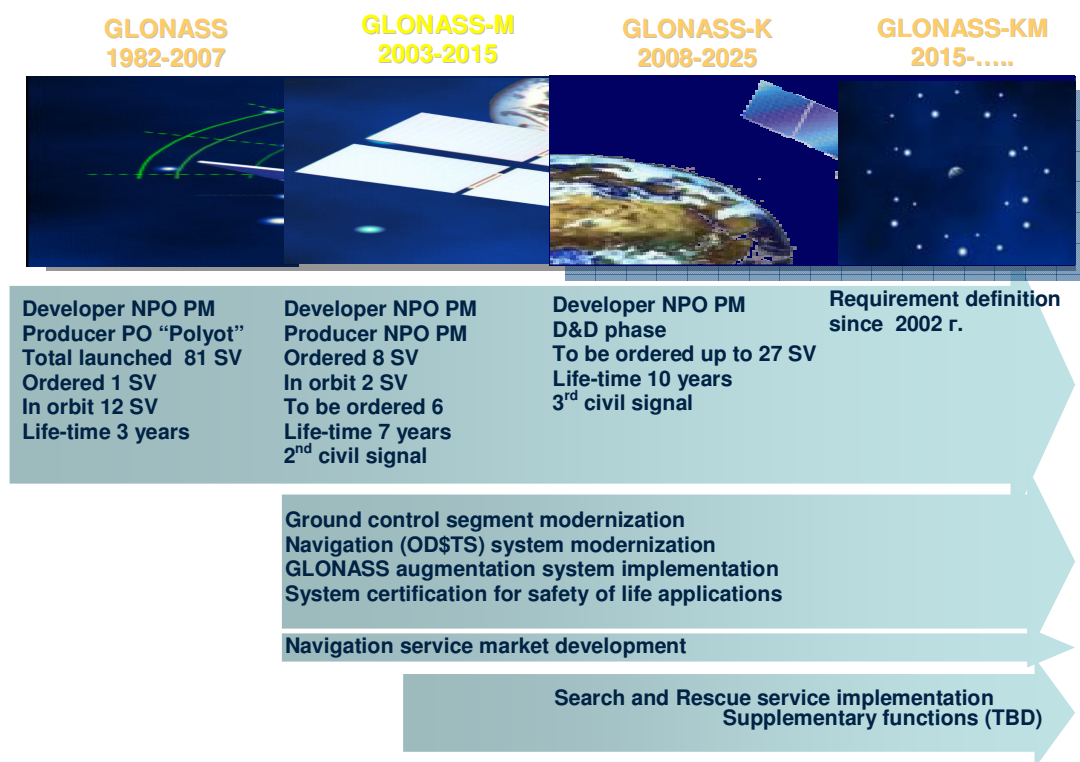


FIGURA 2.7 Plan de renovación de GLONASS ^[6]

2.4.2 Composición del sistema

El GLONASS al igual que el GPS se compone de tres segmentos, aunque el diseño adoptado para cada uno de ellos es distinto que el de GPS, si bien guardan muchas similitudes:

- **Segmento espacial:** constelación de satélites GLONASS. Originalmente se planteó una constelación de 24 satélites.

- Segmento de control: estaciones de control repartidas por el territorio ruso.
- Segmento de usuario.

Pudiendo considerar un cuarto segmento que sería el complejo de lanzamiento espacial. En la Figura 2.8 se puede observar la interrelación de los distintos elementos que componen el sistema que es la que se ha descrito en el Capítulo 1 (Punto 1.5): la plataforma espacial pone en órbita los satélites que serán controlados por estaciones de tierra que forman el segmento de control, y éstos transmitirán la información al segmento usuario.

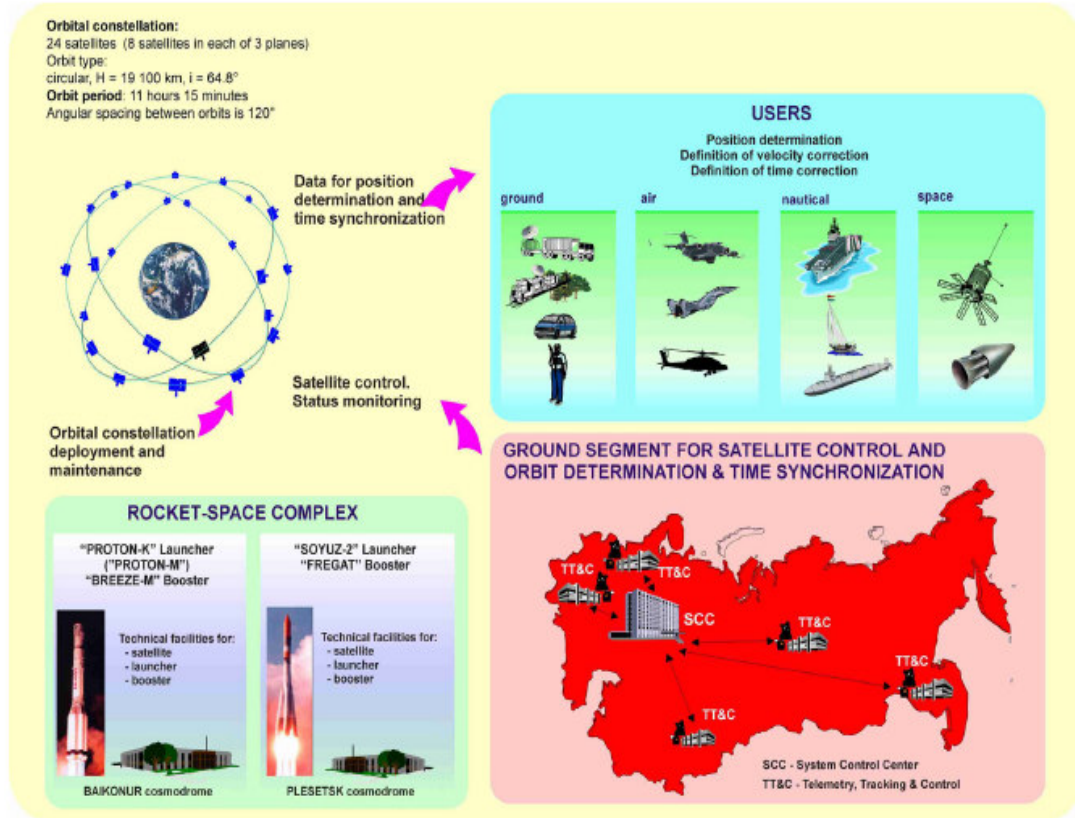


FIGURA 2.8 Composición de GLONASS ^[33]

2.4.2.1 Segmento espacial

El segmento espacial de GLONASS está formado por una constelación de 24 satélites en órbita, estando 21 en activo y 3 de repuesto. Estos están distribuidos en 3 planos orbitales separados 120° , que contienen 8 satélites a $19\,100\text{ Km}$ de altura con una inclinación de 64.8° y que tarda 11 horas y 15 minutos en completar un período.

Se ha diseñado de tal manera que cuando la constelación esté completa podremos ver cinco satélites desde cualquier punto del planeta en cualquier momento, y tal que siempre pase un satélite por el ecuador cada día sideral.

En la actualidad hay 16 satélites en órbita de los cuales 10 son operativos y 6 están apagados de forma temporal.¹⁵ Están distribuidos de manera no uniforme estando por ejemplo completo el primer plano y casi vacío el segundo.

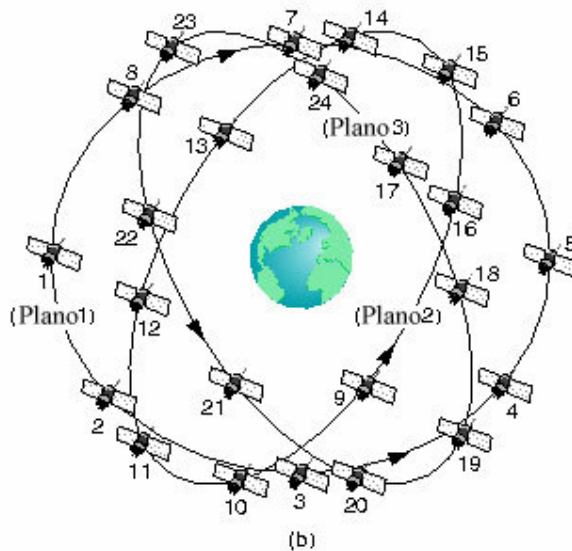


FIGURA 2.9 Constelación GLONASS ^[34]

Satélites GLONASS

Al igual que con el GPS, se han ido desarrollando distintos vehículos espaciales o satélites que componen el segmento espacial de GLONASS. Su desarrollo ha corrido a cargo de Applied Mechanics NPO en colaboración con el Institute for Space Device Engineering ruso, y una tercera compañía, el Russian Institute of Radio navigation and Time, ha sido la encargada de sincronización y desarrollo de otro equipo de apoyo.

Desde que se empezó a desarrollar el sistema en 1982 se han desarrollado cuatro modelos de satélites.

Bloque I de satélites

La primera generación de satélites conocida como Block I se lanzó entre 1982 y 1985, diseñados con un tiempo de vida de 14 meses sirvieron como prototipos para la validación del GLONASS.

Bloque II de satélites

Subdividido en distintos bloques, ha sido la más numerosa hasta ahora. Entre 1985 y 1986 se lanzaron seis satélites de Bloque IIa, tenían nuevos estándares de tiempo y frecuencia que mejoraban, con respecto de los prototipos, la estabilidad en frecuencia. Además tenían un tiempo de vida mayor, de unos 16 meses.

¹⁵ Esta información puede estar desactualizada, para conocer el estado actual de la constelación GLONASS vea <http://www.glonass-ianc.rsa.ru/> en el apartado GLONASS

El siguiente fue el Bloque I Ib, lanzados en 1987, con un tiempo de vida de dos años y algunas mejoras, un total de doce fueron lanzados aunque la mitad se perdieron en accidentes de lanzamiento.

El modelo actual es el Bloque IIv, lanzados desde 1988 hasta el 2000 con un tiempo de vida de tres años, han llegado a durar más de 65 meses en órbita apagándolos de manera temporal.

Uragan M

Constituyen la segunda generación de satélites GLONASS, con un tiempo medio de vida de 7 años. Han sido lanzados entre 2001 y 2007, con un total de catorce lanzamientos programados.

Uragan K

La tercera generación de satélites, con un tiempo de vida de 10 años con lanzamientos programados para 2009, es más ligera e incluye mejoras con respecto a su generación anterior.

2.4.2.2 Segmento de control

El segmento de tierra cumple una función análoga a la del GPS, y provee de control y monitorización de los satélites. El sistema de control central (CCS), se encuentra cerca de Moscú, mientras que las estaciones de Telemetría, Posicionamiento y Control (TT&C) están distribuidas a lo largo del territorio ruso (San Petersburgo, Schelkovo, Yenissey, Komsomolsk-Amur, Moscú).

El segmento de control lleva a cabo las siguientes tareas:

- Monitorización del normal funcionamiento de la constelación orbital de satélites.
- Ajuste de parámetros orbitales de los satélites de forma continua.
- Generación y carga de programas, comandos de control, e información especial.

2.4.3 Servicios GLONASS

En la actualidad, Rusia ha otorgado gran importancia al desarrollo de su GNSS, consciente de las ventajas políticas y económicas que le otorga a un país poseer su propio sistema de navegación. Considerado como patrimonio nacional ruso, el GLONASS ha de ser mantenido incondicionalmente por el Gobierno Ruso, que en la actualidad busca ampliar el número de usuarios civiles de su sistema.

Al igual que el GPS, GLONASS ofrece dos tipos de servicio: una señal de precisión estándar (conocido como CSA), y una señal de alta precisión (CHA).

El Gobierno Ruso ha decidido poner a disposición civil la señal estándar, para que pueda ser utilizada una vez esté completado todo el sistema. La señal se emite también en la banda L1 de frecuencias.

La señal CSA permite obtener la posición horizontal con una precisión de entre 57 y 70 metros (99.7% de probabilidad), la posición vertical con una precisión de 70 metros (99.7% de probabilidad).

2.5 Galileo: el nuevo sistema europeo de navegación

Galileo es la respuesta europea al nuevo panorama internacional de GNSS, constituye el primero de los llamados GNSS-2, y se espera que genere multitud de beneficios económicos y puestos de trabajo en la Unión Europea.

Galileo se ha planteado como un sistema que permita ser independiente a Europa del GPS y el GLONASS, pero que sea complementario a ambos y que permita la interoperabilidad con éstos. Cuando el proyecto esté completado se dispondrá de 30 nuevos satélites que conjuntamente con GPS y GLONASS permitirá obtener un posicionamiento muy preciso.

El escenario de Galileo es particularmente interesante porque implica a diferentes países que han buscado la forma de actuar conjuntamente para desarrollar el nuevo sistema. Con el acuerdo del 30 de noviembre de 2007 se alcanzó un consenso entre los 27 países de la Unión Europea. En dicho acuerdo España obtuvo un centro de control del sistema dedicado a tareas “safety-of-life”, que se emplazará en Madrid, que trabajará en red con los centros de control de Alemania e Italia y que podrá elevar su cualificación técnica para ser equiparable a los otros dos centros y realizar las mismas funciones. En este acuerdo además se fijó el presupuesto comunitario con el que se financiará el proyecto.

2.5.1 Historia

El programa Galileo es una iniciativa conjunta de la Comisión Europea conjuntamente con la Agencia Espacial Europea, en la que han participado multitud de empresas de distintos países de la Unión Europea a los que se ha realizado concesiones para distintas partes del proyecto.

Fue la Comisión Europea la que creó una organización que se hiciera cargo del proyecto y sus aspectos legislativos, la GJU. Esta organización se hizo cargo de la definición y desarrollo del sistema hasta el 1 de enero de 2007 momento en que otro organismo, la GNSS Supervisor Authority, tomó el relevo de la primera, y que velará por el cumplimiento de los objetivos del programa hasta que Galileo esté plenamente operativo, y a partir de entonces, por la explotación del sistema en la fase operativa.

El proyecto Galileo se desarrolla actualmente en tres fases definidas por la Dirección General de Energía y Transportes de la Comisión Europea. Estas fases que aquí se presentan fueron definidas al inicio del proyecto, pero han sufrido modificaciones ya que el desarrollo del sistema se ha ido retrasando por el desacuerdo entre los países

miembros de la UE y la falta de fondos de financiación del proyecto. En la actualidad se espera que Galileo esté operativo para 2013.

▪ **Definición del sistema (1999-2002)**

Esta fase, la Comisión Europea (EC) y la Agencia Espacial Europea (ESA) movilizaron gran parte de la industria europea para las distintas partes del programa, formándose alianzas a nivel nacional e internacional para participar en el proyecto Galileo.

Entre los estudios y proyectos llevados a cabo por las distintas compañías, cabe destacar:

- GALA: encargado de suministrar los requisitos de la misión, diseñar la arquitectura global de Galileo, estudiar su conexión con otros sistemas y definir los elementos no espaciales necesarios.
- GEMINUS: estudio para la definición de servicios de Galileo en función de las necesidades de los usuarios.
- INTEG: estudio para integrar el sistema de aumento EGNOS en el proyecto Galileo.
- SAGA: proyecto para la estandarización de Galileo.
- GalileoSat: estudio sobre el segmento espacial del sistema.

Como resultado de la fase de definición, la Comisión Europea en conjunto con la ESA editaron el Documento de Definición de Galileo en el que se resumen los hitos que se han alcanzado en esta fase del proyecto.

▪ **Desarrollo del sistema (2002-2013)**

Para la fase de desarrollo del sistema, la EC y la ESA decidieron crear la GJU, como responsable de dicha fase. Dicha organización supervisó el trabajo de distintas empresas con el fin de desarrollar el sistema, tanto los segmentos espacial como de tierra, y validar el funcionamiento del mismo hasta 2007, momento en que la GNSS Supervisor Authority tomó el relevo.

En concreto para el desarrollo de sistema, que se van a llevar a cabo diversas tareas en la actualidad, que son:

- GNSS Supervisor Authority: La GSA se encargará de establecer y supervisar las PPP (Public Private Partnerships), entre el sector público y privado con el fin de financiar el proyecto Galileo.
- Galileo in Orbit Validation: GNSS Supervisor Authority se encargará junto con la ESA de supervisar el funcionamiento de los primeros satélites que se lancen al espacio (GIOVE) que demuestren la capacidad operativa del sistema. El primer satélite puesto en órbita fue supervisado por la GJU en 2005.
- 6FP Galileo Related Activities: GJU proveerá de una gestión técnica de proyectos que serán la base del funcionamiento de Galileo.
- Integración con EGNOS: GJU se encargará de gestionar la integración del nuevo sistema con el SBAS EGNOS ya desarrollado.

La fase de desarrollo lleva un retraso de tres años con respecto a la planificación original, por los motivos comentados anteriormente.

- **Funcionamiento y explotación comercial del mismo (2013-en adelante)**

La explotación del sistema se llevará a cabo por la GNSS Supervisor Authority descrita anteriormente. Dicho organismo se encargará de la explotación comercial del sistema, permitiendo obtener unos mayores beneficios económicos por el desarrollo de aplicaciones comerciales, una gestión efectiva y la obtención de fondos para la financiación del proyecto.

En la actualidad Galileo Industries SA es uno de las principales consorcios formados por distintas empresas, que se encarga de dicha fase. Está compuesta por Alcatel Space, Alenia Spazio, Astrium GMBH, Atrium Ltd y la española GSS, que agrupa distintas empresas (Hispasat, GMV, Alcatel Espacio, Sener, EADS- CASA, Indra, AENA).

2.5.2 Composición del sistema

Galileo se compone de tres segmentos al igual que el GPS y GLONASS. Aunque todavía no están completos, vamos a describir los hitos alcanzados y la planificación de cada uno.

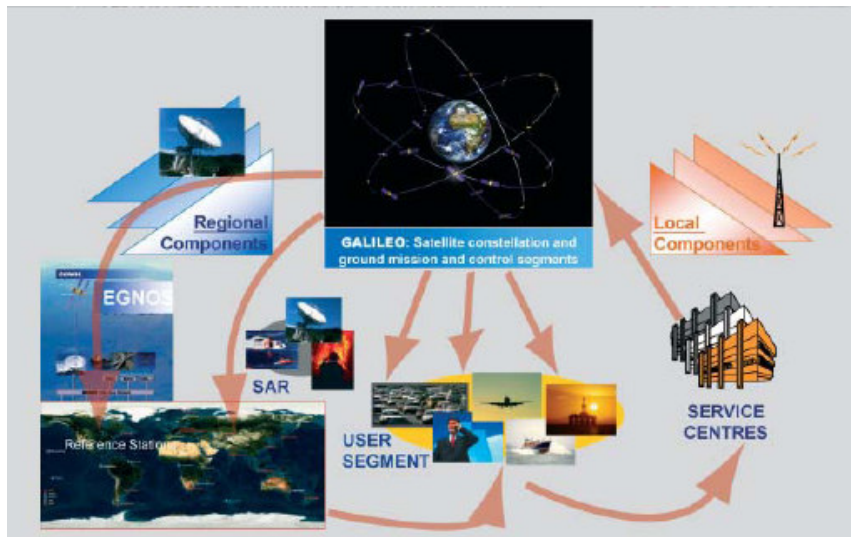


FIGURA 2.10 Composición del sistema Galileo © 2006 European Space Agency [17]

En la figura 2.8 podemos observar en detalle los componentes planificados por la ESA para el proyecto Galileo. Estos son:

- **Componentes Globales:** son el núcleo del sistema Galileo, consiste en los satélites (tanto de navegación como de comunicación), centros de misión y de control.
- **Componentes regionales:** comprenderá los conocidos como External Region Integrity Systems (ERIS), situados fuera de la Unión Europea, implementados y

operados por organizaciones de países o grupos de países, que se encargarán de monitorizar la integridad de los servicios de Galileo.

- **Componentes locales:** desarrollados para mejorar las prestaciones de Galileo en aquellas zonas donde la señal no puede ser recibida. Serán desarrolladas por proveedores de servicios.
- **Segmento usuario:** recibe las señales de los satélites para distintas aplicaciones.

2.5.2.1 Segmento espacial

El segmento planificado de Galileo constará de 30 satélites, distribuidos en tres planos de los cuales 3 serán de repuesto. Estarán situados a una altura de 23.222 km, con una inclinación de 56° sobre el ecuador, tardando 14 horas en completar una órbita a la Tierra, de tal forma que cada 24 horas se repita la constelación, que posee además simetría esférica.

Dicho segmento además será interoperable con el GPS americano y el GLONASS ruso, y podrán verse al menos 4 satélites en cualquier parte del planeta con un 90% de probabilidad, si bien en la mayor parte de las zonas del planeta entre 6 y 8 satélites serán visibles.

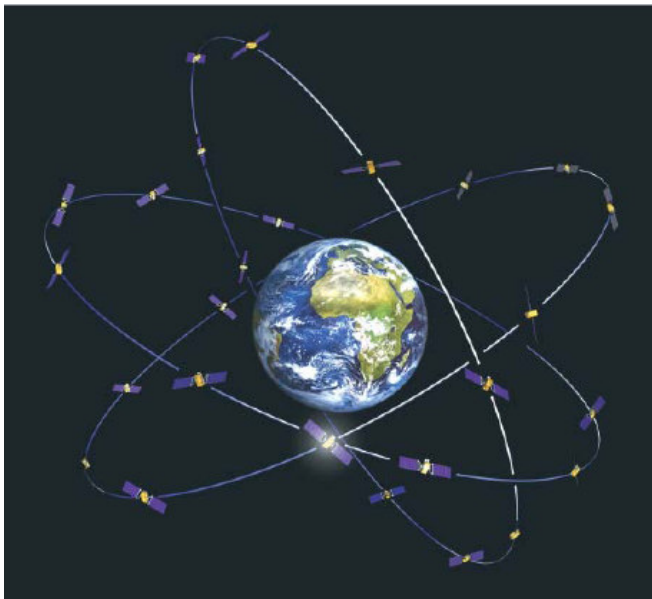


FIGURA 2.11 Constelación Galileo ^[14]

Satélites Galileo

El primer satélite que fue lanzado al espacio, GIOVE-A (Galileo In Orbit Validation Element), desarrollado por la ESA, sirvió para comprobar las tecnologías críticas desarrolladas por la ESA. El lanzamiento se produjo el 28 de Diciembre de 2005.

El satélite comenzó a transmitir señales de forma exitosa el 12 de Enero de 2006. Estas señales sirvieron para:

- Verificar las tecnologías desarrolladas: incluyendo el reloj atómico de Rubidio, el generador de señales de navegación
- Caracterización de las señales enviadas: incluyendo la verificación de los receptores de usuario y su resistencia a la recepción multipath, en un entorno real.
- Caracterización de la radiación de la órbita terrestre media: ya que ésta podría añadir campos electromagnéticos que condicionaran el diseño del sistema.

Un nuevo satélite de pruebas GIOVE-B, será lanzado a finales de 2007 y otro más, GIOVE-A2, será lanzado a partir de 2008. Después de esto se lanzarán los cuatro primeros satélites operacionales.

Debido a los continuos retrasos, no se sabe con exactitud cuando estará el sistema plenamente operativo, situándose la fecha de capacidad operativa inicial entre 2011 y 2014.

2.5.2.2 Segmento control

Como se ha explicado antes el sistema Galileo cuenta con una serie de elementos que poseen distintas funciones, elementos globales, regionales y locales explicados anteriormente.

Componente global

En cuanto al segmento de control el componente global de Galileo comprende dos estaciones maestras GCC que llevan a cabo funciones de control y de misión con dos segmentos dedicados en exclusiva a cada una de estas funciones:

- **Ground Control Segment (GCS):** red de cinco estaciones TT&C distribuidas por todo el mundo que prestarán el servicio necesario a los GCC para que puedan llevar a cabo sus funciones de control.

Los dos GCC son los encargados de administrar los satélites y su mantenimiento en órbita. Se comunicarán con cada satélite de manera regular y programada, para ello cada estación cuenta con una antena de 13 metros capaz de operar en la banda de 2 GHz. Son el equivalente a la MCS de GPS.

- **Galileo Mission Segment (GMS):** formada por una red global de 30 estaciones, Galileo Sensor Stations (GSS), encargadas de monitorizar las señales emitidas por los satélites.

Las GSS se encargarán de dos funciones; determinar la órbita y sincronización temporal de los satélites (OD&TS), y monitorizar la integridad de la señal emitida por los satélites, retransmitiendo dicha información a satélites multidifusión que enviarán la información de integridad de la señal al segmento usuario.

La información de los mensajes de navegación e integridad se enviará a las instalaciones GMS que poseen los GCC, donde se procesará dicha información y se enviará a los satélites de Galileo a través de los Mission Uplink Stations instalados en cinco puntos, a través de antenas de 3 metros en la banda de 5 GHz.

2.5.3 Servicios Galileo

Como primer Sistema de Navegación de nueva generación, Galileo ha sido diseñado para ofrecer una mayor cantidad de servicios que aquellos que fueron definidos para GPS y GLONASS. Galileo va a soportar los siguientes servicios de usuario, basados en distintas señales de navegación, descritas más adelante:

- **Open Service (OS):** el Servicio Abierto estará cubierto mediante dos señales de navegación de diferente frecuencia. El Servicio Abierto será gratuito para todos los usuarios provistos de un receptor Galileo. Este servicio está pensado para aplicaciones de uso masivo como por ejemplo: navegación automovilística e hibridación con teléfonos móviles.
- **Comercial Service (CS):** el Servicio Comercial es un servicio de pago que proporcionará información de posición y tiempo para productos profesionales y comerciales de valor añadido.
- **Public Regulated Service (PRS):** la naturaleza de las señales PRS, implican un servicio robusto y resistente a las interferencias o cualquier otra agresión accidental o deliberada. La información PRS será cifrada.
Aunque las aplicaciones y los usuarios no están todavía definidos pueden establecerse los siguientes grupos:
 - Aplicaciones públicas dedicadas a la seguridad, como policía, protección civil, aplicaciones judiciales (control o seguimiento de personas, etc.).
 - Aplicaciones en sectores críticos como energía, transporte y comunicaciones.
 - Actividades económicas o industriales consideradas de interés estratégico para Europa.
 - Aplicaciones militares.
- **Safety of Live Service (SoL):** los Servicios relacionados con la seguridad para la vida proporcionan una señal de integridad, que puede estar cifrada, ligada a un tiempo límite de alarma, como ejemplo típico puede considerarse la aviación comercial. Este servicio permitirá aterrizaje de precisión CAT- I. La combinación de Galileo con GPS podría hacer que pudieran ser utilizados conjuntamente como medio único de navegación.

Las prestaciones de cada servicio son distintas como se puede ver en la siguiente tabla, y dependerá del tipo de señal y de los sistemas de aumento a nivel local. Además de las diferencias de precisión, la diferencia más notable entre los distintos tipos de señales serán los radioenlaces que emplee cada una (serán transmitidas en distintas bandas de frecuencia), y la codificación de las mismas. Los servicios de pago serán encriptados con un algoritmo comercial, que será descryptado mediante un receptor especial que posea los códigos necesarios.

Tabla 2.1 Prestaciones de los servicios Galileo

	Open Service (OS)	Comercial Service (CS)		Public Regulated Service (PRS)		Safety of Life Service (SoL)
Cobertura	Global	Global	Local	Global	Local	Global
Precisión horizontal (h) vertical (v)	Frecuencia dual: h=4 m v=8 m Frecuencia mono: h=15 v=35	Frecuencia dual <1 m	Sistemas de aumento: <10 cm	h=6,5 v=12	Sistemas de aumento: <1m	Frecuencia dual: 4-6 m
Disponibilidad	99.8%	99.8%		99% - 99.8%		99.8%
Integridad	No	Servicio de valor añadido		Si		Si

2.6 Comparativa de GPS, GLONASS y Galileo

A modo de resumen de este capítulo vamos a estudiar las diferencias en cuanto a composición y servicios de los tres sistemas. Vamos a ver las diferencias de sus segmentos y de los servicios que prestan a los usuarios de forma gratuita.

Tabla 2.2 Comparativa de segmento espacial

	GPS	GLONASS	Galileo
Satélites	30	24 (21+3 de repuesto)	30(27+3 repuesto)
Altitud	20200km	19100km	23222km
Período	11h 56 min	11h 15 min	14 h
Inclinación	55º	64.8º	56º
Planos	6	3	3
Satélites/plano	hasta 6	hasta 8 (7 y 1 de repuesto)	hasta 10 (9 y 1 repuesto)

En el segmento espacial podemos apreciar diferencias en:

- **Planos orbitales:** mientras que el GPS tiene seis planos con el fin de que al menos seis satélites sean visibles en cada punto del planeta, GLONASS y Galileo distribuyen sus satélites en tres planos. GLONASS está diseñado además para que no pase por el ecuador más de un satélite al mismo tiempo.
- **Período:** los satélites GPS recorren dos orbitas completas cada día sidéreo por lo que pasan el mismo punto una vez al día. Los satélites Galileo están diseñados sin embargo con un período mayor para lograr la simetría esférica desde cualquier parte de la Tierra.

- **Altitud:** para que los tres sistemas puedan coexistir, deben encontrarse a distintas alturas de tal forma que puedan completar sus constelaciones sin problemas con los otros dos sistemas.

Tabla 2.3 Comparativa del segmento de control

	GPS	GLONASS	Galileo
Estación maestra	Base Falcon US Air Force (Colorado)	System Control Center (Moscú)	Dos Estaciones en Europa
Estación monitora	5 estaciones monitoras distribuidas en todo el planeta	5 estaciones monitoras repartidas por territorio ruso	5 estaciones monitoras repartidas por todo el planeta
Antenas de transmisión	3 repartidas en las estaciones monitoras (TT&C links).	5 antenas. Distribuidas en Mission Up-Links (TT&C links)	5 antenas. Distribuidas en Mission Up-Links (TT&C links)

El segmento de control es muy similar en todos los sistemas, con una estación maestra y estaciones de monitorización repartidas por un amplio territorio geográfico, así como antenas de tierra que transmiten información a los satélites. En los tres sistemas se prevé ampliar este segmento añadiendo más estaciones de monitorización y antenas de tierra.

Tabla 2.4 Comparativa de Prestaciones

	GPS (SPS)		GLONASS (SP) ¹⁶		Galileo (OS) ¹⁷	
Cobertura	Global	Local	Global	Local	Global	Local
Precisión horizontal (H) vertical (V)	H < 20 m V < 20 m	Sistema de aumento (EGNOS): H < 1m V < 2m	H < 50 m V < 70 m	Similar al GPS	Frecuencia dual: H=4 m V=8 m Frecuencia mono: H=15m V=35m	Sistema de aumento (EGNOS): H < 1m V < 1m
Disponibilidad	95%	95- 99.7%	99.7%	99.7%	99.8%	99.8%
Integridad	No	Sí	No	Sí	No	Sí

Las prestaciones de uso civil de los tres sistemas son muy similares, viéndose claramente mejoradas cuando se emplean sistemas de aumento. A priori Galileo ofrece mejores prestaciones debido al empleo de dos canales de frecuencia, pero esto se igualará con los planes de renovación de GPS y GLONASS que también añadirán más frecuencias de transmisión a sus sistemas.

¹⁶ Dato previsto para cuando la constelación de satélites esté completa

¹⁷ Dato previsto para cuando la constelación de satélites esté completa

3 Normativa

3.1 Introducción

En este capítulo vamos a abordar el estudio de la normativa de los GNSS, y de cada uno de los tres sistemas existentes que hemos presentado en el capítulo anterior: GPS, GLONASS y Galileo. El estudio de este capítulo se organiza de la siguiente manera:

- **Normativa GNSS:** todos los aspectos y estándares definidos para que puedan coexistir los distintos GNSS. Dichos aspectos son dictados por la ITU a través de distintas conferencias.
- **Interfaces GNSS:** el interfaz de un GNSS especifica los parámetros que establecen la comunicación entre el segmento espacial y los equipos de los segmentos de control y de usuario. Define los enlaces de radiofrecuencia utilizados, así como los códigos de posicionamiento y datos necesarios que conforman la señal de navegación para que los satélites provean señales de cobertura global y puedan llevar a cabo su misión. Dichos interfaces están definidos en los documentos de control de interfaz (ICD) de los distintos sistemas. A su vez el estudio se organiza en:
 - **Definición del interfaz:** se establecen las características básicas, radioenlaces que conforman el interfaz y servicios que se prestan, así como la estructura de la señal y de su contenido.
 - **Descripción del interfaz:** se definen las características RF de cada enlace, en cuanto a frecuencia y potencia necesaria en recepción.
 - **Implementación del interfaz:** estudio de la implementación del interfaz en los segmentos espacial y de control.

El objetivo de este capítulo es por tanto, estudiar la normativa definida por organismos internacionales y la normativa adoptada en cada caso (GPS, GLONASS, Galileo), dictada por los organismos involucrados en cada proyecto, así como cubrir los aspectos técnicos fundamentales del proyecto en este capítulo. Se recomienda leer los apéndices A y B que contienen la base teórica de los conceptos presentados en este capítulo.

3.2 Normativa ITU

El hecho de que existan distintos GNSS, implica que deben poder coexistir sin interferir unos con otros, esto es así en todos los niveles:

- **Interfaz:** las señales definidas para cada GNSS no deben interferir con las de los demás, es decir, deben estar alocadas en distintas bandas de frecuencia o dentro de una misma banda ocupando su ancho convenientemente.
- **Segmento espacial:** las comunicaciones del segmento espacial no debe interferir con otro tipo de comunicaciones, como los satélites de comunicaciones móviles, u otras señales de radio. Además los satélites deben distribuirse en distintos planos orbitales y alturas para no interferir con los de otros sistemas.

- **Segmento de control:** las señales que emita no deben interferir con otras comunicaciones y debe ser compatible con otros elementos como radares de radiolocalización.

Todos estos aspectos se regulan en las World Radiocommunication Conference (WRC) organizadas por la ITU, en concreto la ITU-R. Estas conferencias se celebran cada dos o tres años y su labor consiste en examinar y, en caso necesario, modificar el Reglamento de Radiocomunicaciones, que es el tratado internacional por el cual se rige la utilización del espectro de frecuencias radioeléctricas y de las órbitas de los satélites geoestacionarios y no geoestacionarios.

El espectro quedó aprobado en la WRC 2000 para los tres sistemas de la siguiente manera:

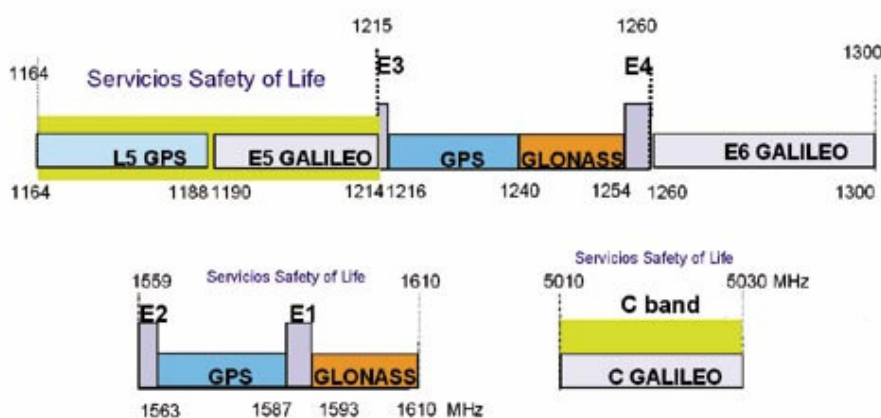


FIGURA 3.1 Distribución de frecuencias aprobada por la ITU ^[35]

Dicha aprobación se hacía efectiva el 3 de junio del 2000. La nueva distribución de frecuencias permite garantizar protección a GPS y GLONASS para desarrollar sistemas de nueva generación (GNSS-2) a la vez que garantiza a Europa el desarrollo de Galileo. Esta normativa tiene además implicaciones económicas, ya que con el desarrollo de nuevos sistemas, aumenta la competencia y se desarrolla un nuevo mercado.

En la WRC 2003 se ratificó la localización de frecuencias y se estudiaron aspectos de compatibilidad entre GNSS y otras tecnologías:

- Protección de servicios de radioastronomía en relación a la banda 4990 - 5000MHz de las emisiones de la banda C de Galileo.
- Compatibilidad entre ARNS (Aeronautical Radio Navigation System Service) y los GNSS.
- Protección de los sistemas de radar con respecto a los servicios de navegación en la banda de 1215 – 1300 MHz.

En la WRC 2007 se van a plantear aspectos de la anterior conferencia como la compatibilidad de distintas tecnologías ARNS localizadas en la misma banda de frecuencia (1559-1610 MHz) que el GNSS, con el fin de poder utilizar de manera óptima los servicios GNSS sin interferencias de ningún tipo.

3.3 GPS: Requisitos

3.3.1 GPS: Definición del interfaz

El interfaz de GPS define dos enlaces RF, L1 y L2, por los que se transmiten las señales GPS. Dichos enlaces proveen de los códigos de posicionamiento y los datos necesarios, contenidos en el mensaje de navegación, para que el GPS lleve a cabo sus funciones.

Los dos enlaces se encuentran en la banda L de frecuencias, y proveen de los dos servicios GPS, que son el SPS y el PPS. La señal SPS se transmite por L1, mientras que la PPS es transmitida por ambos enlaces, lo que hace este servicio más robusto frente a errores, al transmitir de forma redundante la información por L1 y L2.

Plan de modernización de los satélites y segmento espacial

Dado la gran cantidad de aplicaciones desarrolladas para el GPS en los últimos años, el Gobierno estadounidense ha decidido actualizar el GPS para convertirlo en un GNSS-2. Los nuevos satélites (BLOCK-IIRM, BLOCK-IIF) incorporarán nuevas señales que presten nuevos servicios:

- La banda L2C, destinada a la transmisión de información para aplicaciones civiles permitirá mayor precisión de posicionamiento, y actuará de forma redundante. Sus características tanto de potencia y como de información transmitida son distintas a L1.
- La banda L5, destinada al uso de aplicaciones Safety of Life al igual que Galileo, ocupa parte de la banda destinada a navegación aeronáutica con el fin de facilitar la recepción de señales de navegación por satélite a las aeronaves.

Las señales de navegación de los enlaces L1 y L2 se transmiten en espectro ensanchado¹⁸ y están moduladas por uno o más trenes de bits modulados en cuadratura, cada uno de los cuales está formado normalmente por la suma en módulo 2 del código de posicionamiento Pseudo Random Noise (PRN) y el mensaje de navegación.¹⁹

El GPS utiliza la técnica de CDMA²⁰ como método de acceso múltiple al canal en cada uno de sus enlaces para poder distinguir que satélite transmite la información, ya que cada satélite tiene un código PRN periódico propio.

3.3.1.1 GPS: Estructura los códigos PRN²¹

El interfaz de GPS define dos códigos PRN: P(Y) empleado para PPS, y C/A empleado en SPS.

Código C/A

¹⁸ Ver Apéndice A

¹⁹ Las señales L2C y L5 no se estudian en este proyecto.

²⁰ Ver Apéndice A

²¹ Ver Apéndice C

Se genera con dos registros de desplazamiento de 10 bits, a partir de la suma en módulo-2 de dos secuencias que conforman el código Gold de cada satélite: G_1 , común a todos los satélites y $G_{2i}(t)$, particular de cada uno, que permite la identificación del satélite que envía la señal. El código Gold tiene una longitud de 1023 chips ($2^{10}-1$ chips).

Este código se transmite a 1.023 Mbps, con un período de 1 ms. Tiene las características necesarias de autocorrelación²². Al ser un código corto para permitir la rápida adquisición del código por parte del usuario.

Código P

Se trata de un código PRN secreto dedicado al uso militar. Se genera con dos registros de desplazamiento de 37 bits, a partir de la suma en módulo-2 de dos secuencias: X_1 , común a todos los satélites y $X_{2i}(t)$, particular de cada uno. La longitud es de 15.345.037 chips ($2^{37}-1$ chips). Se transmite a 10.23 Mbps y se repite cada 1 s.

El código P gana en propiedades de correlación respecto al C/A (la correlación cruzada con otros códigos es mínima), pero pierde en cuanto a propiedades de adquisición (es mucho más largo que C/A). Para solucionar este problema se emplea el código C/A, que es adquirido previamente para reducir el número de posibilidades y permitir de este modo la adquisición del código P de forma más rápida. Esto es posible debido a que el código P se transmite exactamente a una velocidad 10 veces superior a la del código C/A.

Código Y

Se emplea en vez del código P cuando el GPS funciona en modo anti-spoofing (AS).

3.3.1.2 GPS: Estructura del mensaje de Navegación

Cada satélite retransmite los datos requeridos para llevar a cabo el proceso de posicionamiento a través del mensaje de navegación. El mensaje de navegación consiste en un conjunto de 25 tramas de 1500 bits cada una, formadas a su vez por un conjunto de cinco subtramas etiquetadas de 300 bits cada una. Cada trama se transmite en 30 segundos por lo que la tasa es de 50 bps, y el tiempo de transmisión de un mensaje de navegación (25 tramas) es de 12.5 minutos.

Cada subtrama contiene distinta información:

- **Subtrama 1:** datos de corrección de reloj.
- **Subtrama 2 y 3:** datos de efemérides, que describen la órbita de cada satélite por un espacio de tiempo. Dicha órbita es calculada por el satélite en base a unos parámetros y ecuaciones.
- **Subtramas 4 y 5:** páginas con datos del sistema como información UTC (tiempo de transmisión del satélite) o datos de almanaque de todos los satélites que nos dan una posición aproximada de la órbita de cada uno y que ayudan a

²² Ver Apéndice A

calcular los errores de propagación, así como a determinar el estado de la constelación y buscar los satélites más apropiados para recibir señales. Cada satélite es capaz de almacenar datos de navegación de los últimos 60 días (tiempo mínimo de comunicación con el segmento de tierra).

De manera adicional cada trama contiene dos cabeceras que son la Telemetry Word (TLM) y la Handover Word (HOW) de 30 bits cada una generadas por cada satélite. La primera contiene datos de telemetría y la segunda información sobre la entrega de códigos C/A y P(Y). Contienen además bits de paridad para detectar posibles errores en la recepción del mensaje o generados por el propio satélite. El mensaje de navegación se transmite MSB, empezando por TLM.

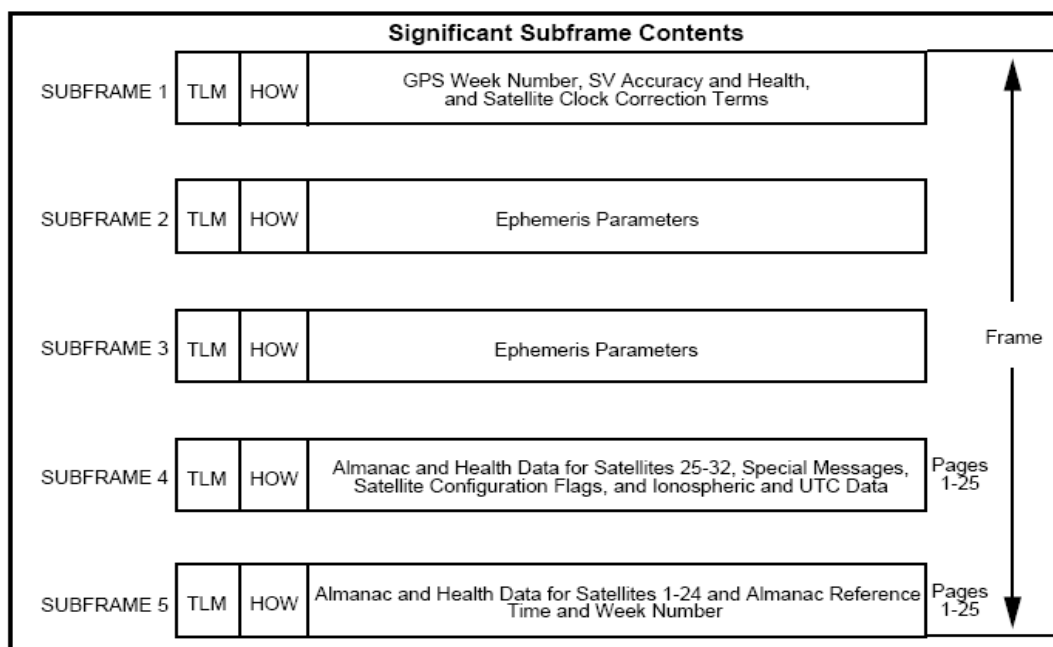


FIGURA 3.2 Mensaje de navegación GPS ^[3]

3.3.1.3 GPS: Estructura de las señales de navegación

La señal a frecuencia portadora L1 tiene dos componentes que están moduladas en cuadratura la una con la otra. Cada componente es una señal BPSK (Tabla 3.1) modulada por un tren de bits. En la Tabla 3.1 se presenta de forma resumida las posibles modulaciones que se dan en las bandas L1 y L2.

En el caso de SPS, este tren de bits es la modulación resultante (señal PRN) de la suma en Módulo-2 del mensaje de navegación D(t), de 50 bps, junto con el código C/A, de 1.023 Mbps, en cuadratura (Tabla 3.1 columna L1 quadrature-phase).

En el caso de PPS se transmite la suma en Módulo-2 del código P(Y) de 10.23 Mbps, junto con el mensaje de navegación en fase para la banda L1 (Tabla 3.1 columna L1 In-phase). En L2 pueden transmitirse hasta tres posibles trenes de bits.

Tabla 3.1 Configuración de la señal ^[2]

SV Blocks	L1		L2**	
	In-Phase*	Quadrature-Phase*	In-Phase*	Quadrature-Phase*
Block II/IIA/IIR	$P(Y) \oplus D(t)$	$C/A \oplus D(t)$	$P(Y) \oplus D(t)$ or $P(Y)$ or $C/A \oplus D(t)$	Not Applicable
Block IIR-M***	$P(Y) \oplus D(t)$	$C/A \oplus D(t)$	$P(Y) \oplus D(t)$ or $P(Y)$	$L2\ CM \oplus D(t)$ with L2 CL or $L2\ CM \oplus D'(t)$ with L2 CL or $C/A \oplus D(t)$ or C/A
Block IIR-M/IIF	$P(Y) \oplus D(t)$	$C/A \oplus D(t)$	$P(Y) \oplus D(t)$ or $P(Y)$	$L2\ CM \oplus D_C(t)$ with L2 CL or $C/A \oplus D(t)$ or C/A

En la actualidad, en L1 estas modulaciones están definidas, mientras que en L2 sólo está definida la modulación en fase para el bloque de satélites II/IIA/IIR. Dicha modulación está formada por un tren de bits de entre los posibles (Tabla 3.1, fila II/IIA/IIR), que se selecciona en el segmento de control.

En los nuevos satélites (Bloque IIR-M, IIF) debido a las nuevas aplicaciones civiles se han planificado nuevos códigos para nuevas modulaciones, y se comenzará a transmitir dos portadoras en fase y cuadratura al igual que en L1 (Tabla 3.1 columna L2 quadrature-phase).

3.3.2 GPS: Criterios del interfaz

3.3.2.1 GPS: Plan de frecuencias

Tabla 3.2 Planes de frecuencia para señales GPS

Banda	Señal portadora	Fase	Uso Actual	Uso Futuro
L1	1575.42 MHz (154*f ₀)	En fase (I)	Código P(Y)	Código P(Y) y M de uso militar
		En cuadratura (Q)	Código C/A	Señal L1C con código C/A de uso civil
L2	1227.60 MHz (120*f ₀)	En fase (I)	Código P(Y)	Código P(Y) y M de uso militar
		En cuadratura (Q)		Señal L2C con código C/A de uso civil
L5	1176.45 MHz (115*f ₀)	En fase (I)		Señal piloto SoL
		En cuadratura (Q)		Señal de datos SoL

En la Tabla 3.1 se define el plan de frecuencias para las señales GPS, tanto las bandas existentes (L1, L2) como la nueva L5, se han diseñado para que sean múltiplo de $f_0=10.23\text{MHz}$ que es la frecuencia de reloj de los satélites GPS. En todos los casos la señal transmitida está polarizada circularmente con el sentido de la mano derecha.

Se considera que las señales GPS tienen un ancho de banda de 20.46 MHz para los dos enlaces L1 y L2, si bien para el código C/A es de 2.046 MHz el código P(Y) que se transmite por ambos enlaces tiene un ancho de 20.46 MHz.

3.3.2.2 GPS: Nivel de potencia recibida

El nivel de Potencia en recepción de la señal RF emitida por los satélites GPS está definida para un ángulo de observación de 5° y una antena polarizada linealmente de 3dBi de ganancia.

Tabla 3.3 Características de potencia de las señales GPS ^[2]

SV Blocks	Channel	Signal	
		P(Y)	C/A or L2 C
II/IIA/IIR	L1	-161.5 dBW	-158.5 dBW
	L2	-164.5 dBW	or -164.5 dBW
IIR-M/IIF	L1	-161.5 dBW	-158.5 dBW
	L2	-161.5 dBW	-160.0 dBW

En la Tabla 3.2 se dan las especificaciones para cada radioenlace y para cada servicio. Las especificaciones requeridas varían para cada bloque de satélites, exigiendo para los nuevos bloques IIR-M/IIF mejores prestaciones en L2. Como se puede observar en la Tabla, el código P(Y) es más robusto que el C/A, ya que exige una menor sensibilidad.

3.3.3 GPS: Implementación del interfaz

En el anterior capítulo hemos presentado los segmentos espacial y de control, presentando su historia y composición, así como una breve descripción de las funciones que realizan. En este capítulo vamos a abordar de manera específica cómo se realizan dichas funciones, es decir vamos a realizar un estudio técnico de los dos segmentos, de tal manera que, complementado con el capítulo 2, obtendremos una visión completa de cada segmento.

3.3.3.1 GPS: Estudio técnico del segmento espacial

En el capítulo anterior se ha presentado el segmento espacial del GPS, que consta de 30 satélites lanzados en distintos bloques (Block II,IIA,II-R).

Para el SPS cada satélite retransmite un mensaje de navegación basado en datos que se actualizan periódicamente desde el segmento de control, y al que añade el código PNR-C/A. Como se ha visto cada código C/A es único y permite identificar cada satélite dentro de la constelación mediante técnicas CDMA cuando se recibe la señal en tierra. Para el PPS el proceso es idéntico pero sumando al mensaje de navegación el código P(Y).

El satélite modula la secuencia de código resultante en la portadora de la banda correspondiente, L1 para SPS, L1 y L2 para servicio PPS, creando así una señal de posicionamiento en espectro expandido, que es retransmitida al segmento usuario. Esto es lo que se conoce como señal de navegación.

Como ya se ha visto, el Bloque II está preparado para tener un tiempo medio de vida de 7.5 a 10 años, dependiendo de la versión, a través de una combinación de piezas espaciales cualificadas, subsistemas críticos con redundancia múltiple, y una lógica de diagnóstico interno.

El Bloque II de satélites requiere una mínima interacción con el segmento de tierra para sus operaciones de mantenimiento. Las cargas periódicas de dicha información en los satélites están diseñadas para que no interrumpen las señales de navegación, si bien en el Bloque IIA, los satélites pueden interrumpir su retransmisión de 6 a 24 segundos.

En la Figura 3.1 se observa cómo funciona el proceso de transmisión de la señal SPS que se genera en el satélite:

- **Sintetizador de frecuencia:** reloj atómico que funciona a 10.23 MHz.
- **Unidad de Datos de Navegación:** recibe los datos de navegación del segmento de control a través de las estaciones TT&C.
- **Banda base de Navegación:** se genera el código C/A, se modula la señal de navegación a 1.023 MHz, y se suman código y datos para transmitir la secuencia en espectro expandido.
- **Subsistema de Banda-L:** modula la señal de espectro expandido a 1575.42 MHz (154 veces 10.23 MHz).
- **Antena Helix Array:** transmite la información al segmento de tierra.

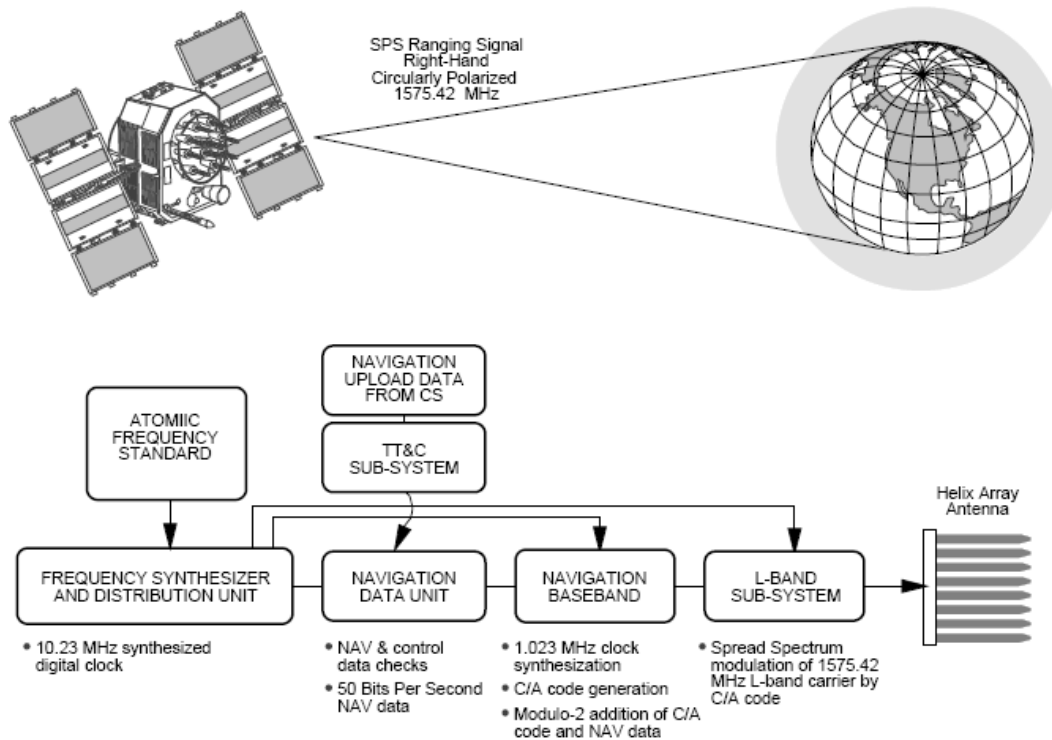


FIGURA 3.3 Generación y transmisión de la señal de posicionamiento SPS ^[3]

3.3.3.2 GPS: Estudio técnico del segmento de control

El segmento de control definido en el tema 2 de este proyecto, consta de una serie de estaciones de monitorización, antenas de tierra, y una estación de control maestra (MCS) más otra de reserva en caso de fallo de la primera, Backup Master Control Station (BMCS). En este punto se aborda cómo realiza las funciones descritas en el tema 2.

La MCS de Colorado es el nodo central de toda la red de estaciones y funciona 24 horas al día los 7 días de la semana. Es la responsable de todos los aspectos de control y comando de la constelación, y sus funciones son:

- Monitorización del estado de la carga y la órbita de los satélites.
- Mantenimiento de los mismos y resolución de anomalías.
- Gestión del comportamiento del SPS para cumplir con los estándares requeridos.
- Envío de datos de navegación al satélite para mantener el comportamiento de acuerdo con los estándares requeridos.
- Detección y respuesta inmediata ante fallos de servicio.

Las antenas de tierra proveen de un interfaz de Telemetría, Posicionamiento y Comando (TT&C) en tiempo casi real entre la MCS y el segmento espacial. Las estaciones de monitorización proveen de datos de medidas de posicionamiento de satélites en tiempo casi real a la MCS y monitorean de manera constante la constelación.

En la Figura 3.2 se puede ver como se relacionan entre sí todos los elementos del segmento de control y el segmento espacial. Las funciones que realizan los distintos elementos del segmento de control están estructuradas en paralelo y las funciones específicas de la MCS, de manera jerárquica. El funcionamiento del segmento de control es el siguiente:

- **Control de la Red (Network Control Function):** la estación maestra gestiona el tráfico de datos del segmento de control. Recibe parámetros de navegación de las estaciones monitoras, así como sus medidas de posicionamiento de satélites. La MCS procesa esta información y produce como resultado los nuevos parámetros que se pasarán a los satélites a través del enlace TT&C que forman las antenas de tierra.
 - **Control del comportamiento (Performance Assess Function):** se encarga de comprobar el funcionamiento de los satélites y responder en caso de fallo.
 - **Control de Satélites (Satellite Control Function):** genera los comandos necesarios que se enviarán al satélite, procesa la telemetría con los satélites y controla que los datos lleguen a los satélites.
 - **Posicionamiento y temporización (Positioning & Timing Function):** se encarga del procesamiento de las medidas de posicionamiento de cada satélite, de la estimación de órbitas y trayectorias y generar los nuevos datos de navegación de cada satélite.

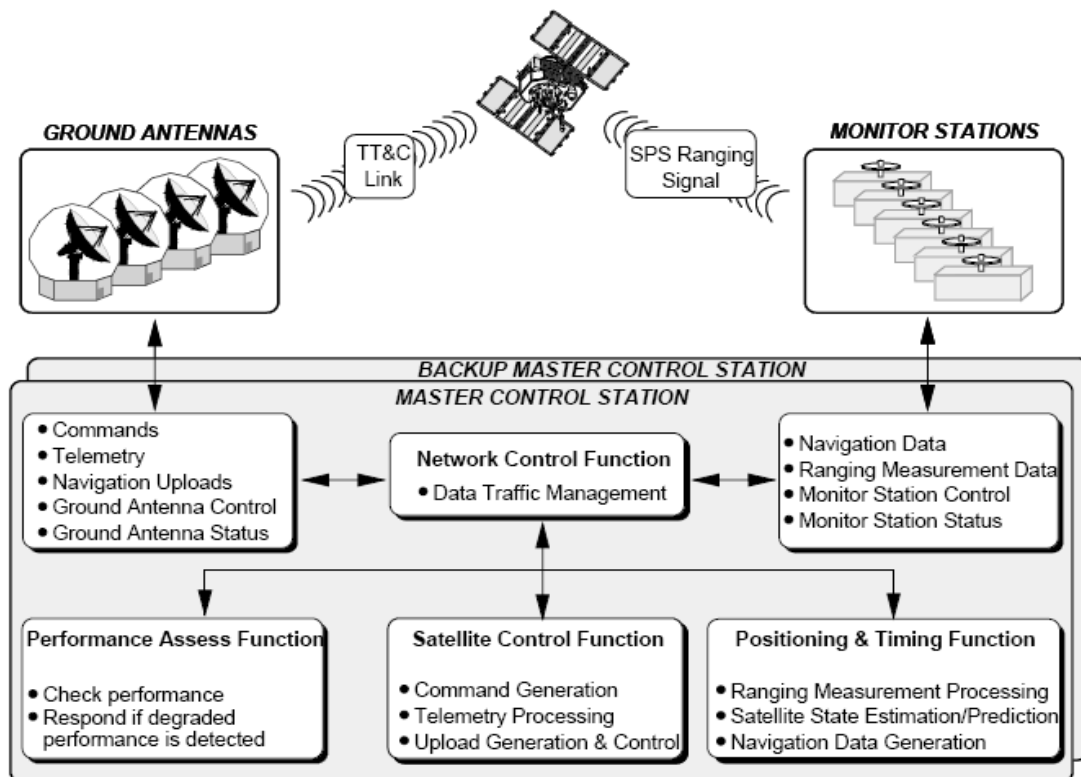


FIGURA 3.4 Estructura del segmento de control GPS ^[3]

3.4 GLONASS: Requisitos

3.4.1 GLONASS: Definición del interfaz

El interfaz de GLONASS entre el segmento espacial y el segmento de control y usuario consiste, al igual que en el GPS en el uso de dos enlaces RF, situados en la banda L, L1 y L2.

GLONASS utiliza la técnica de multiplexación por división en frecuencia (FDMA) en ambas bandas. Esto implica que cada satélite transmite la señal de navegación con su propia portadora, siempre distinta del resto de satélites de la constelación.²³

GLONASS provee dos tipos de señales en las bandas L1 y L2, que ya se han visto en el Capítulo 2 (Apartado 2.4.3) conocidas como señal estándar (CSA), que presta el servicio civil, y señal de alta precisión (CHA) para uso militar. El CSA comenzó como servicio prestado en la banda L1 al igual que el SPS del GPS, si bien los satélites GLONASS-M han incorporado dicho servicio a la banda L2 (igual que el plan de modernización GPS).

Plan de modernización de los satélites y segmento espacial

Con el lanzamiento de nuevos satélites GLONASS-K y los requisitos de las nuevas aplicaciones GNSS, se pretende modernizar el segmento espacial, así como el interfaz, añadiendo nuevos enlaces RF, como el caso de L3 que se encargará de prestar los servicios SoL, así como una nueva señal civil.

Las señales de navegación de los enlaces L1 y L2 se transmiten en espectro ensanchado y están moduladas por uno o más trenes de bits, cada uno de los cuales está formado normalmente por la suma en módulo 2 del código de posicionamiento Pseudo Noise Random (PNR) y el mensaje de navegación y una secuencia auxiliar.²⁴

A diferencia de los satélites GPS, todos los satélites GLONASS transmiten los mismos códigos. Esto es así porque en GLONASS la identificación de los satélites se hace por la FDMA²⁵ y no por el PRN de los códigos como se hace en GPS.

3.4.1.1 GLONASS: Estructura los códigos PRN

Los códigos de posicionamiento PRN de GLONASS son al igual que los de GPS el C/A y el P.

GLONASS transmite el código P en ambas bandas L1 y L2 y el código C/A, de momento sólo en la banda L1, pero está programado que la Constelación GLONASS-M lo transmita también en la banda L2 para uso civil.

²³ Puede transmitir en la misma portadora que otro satélite si se encuentran en la parte opuesta del mismo plano orbital.

²⁴ La señal L3 no se estudia en este proyecto.

²⁵ Ver Apéndice A

Código C/A

Se genera con un registro de desplazamiento de 9 bits, lo que proporciona una longitud de 511 chips (2^9-1 chips). Este código se transmite a 0.511 Mbps, con un período de 1 ms. Tiene las características necesarias de autocorrelación, y se elige un código corto para permitir la rápida adquisición del código por parte del usuario.

Código P

Se trata de un código PRN secreto dedicado al uso militar, por lo que la información disponible sobre éste código es poca. Es un código generado mediante un registro de desplazamiento de 25 bits, por lo que la longitud es de 3355431 chips ($2^{25}-1$ chips). Se transmite a 5.11 Mbps y se repite cada 1 s.

El código P gana en propiedades de correlación respecto al C/A, pero pierde en cuanto a propiedades de adquisición ya que hay 511 millones de cambios de fase posibles. Para solucionar este problema se emplea el código C/A, que es adquirido previamente para reducir el número de posibilidades y permitir de este modo la adquisición del código P de forma más rápida. Esto es posible debido a que el código P se transmite exactamente a una velocidad 10 veces superior a la del código C/A, por lo que no es necesario el empleo de la palabra HOW utilizada en GPS.

3.4.1.2 GLONASS: Estructura del mensaje de Navegación

A diferencia del GPS, el GLONASS emplea dos mensajes de navegación diferentes que van sumados en modulo 2 a los códigos C/A y P respectivamente. Ambos mensajes de navegación son transmitidos a 50 bps, y su función primaria es la de proporcionar información a cerca de las efemérides de los satélites y la distribución de los canales.

Cada mensaje de navegación proporciona dicha información a través de dos tipos de datos conocidos como datos inmediatos y no inmediatos. Los inmediatos son aquellos que proveen de información del satélite, y los no inmediatos son aquellos que proveen de información relacionada con la constelación de GLONASS (datos de almanaque).

El Mensaje de Navegación C/A

Está constituido de manera jerárquica, por un patrón de bits que se repite. Dicho patrón es una trama que tarda 2.5 minutos en transmitirse y que está formada por 5 subtramas de 30 segundos cada una, y éstas a su vez por 15 cadenas de 2 segundos de duración. La información contenida en palabra del mensaje es:

- Las cuatro primeras palabras de cada subtrama contienen las efemérides propias del satélite. Al igual que en GPS, las efemérides tiene varias horas de validez, por lo que el receptor no necesita estar leyendo continuamente el mensaje de navegación para calcular la posición exacta.
- El resto de palabras contiene información de efemérides aproximadas del resto de satélites de la constelación (almanaque). Cada subtrama tiene la información del almanaque de 5 satélites, por lo que es necesario leer todas las subtramas para conocer las efemérides aproximadas de todos los satélites, lo que lleva 2.5 minutos.

El orden en que se lee el mensaje es MSB y cada palabra se divide en: información (bits 9-84), bits de control (KX) del código Hamming y marca de tiempo (MB) que separa las palabras y el chip vacío (bit 85, que es “0”).

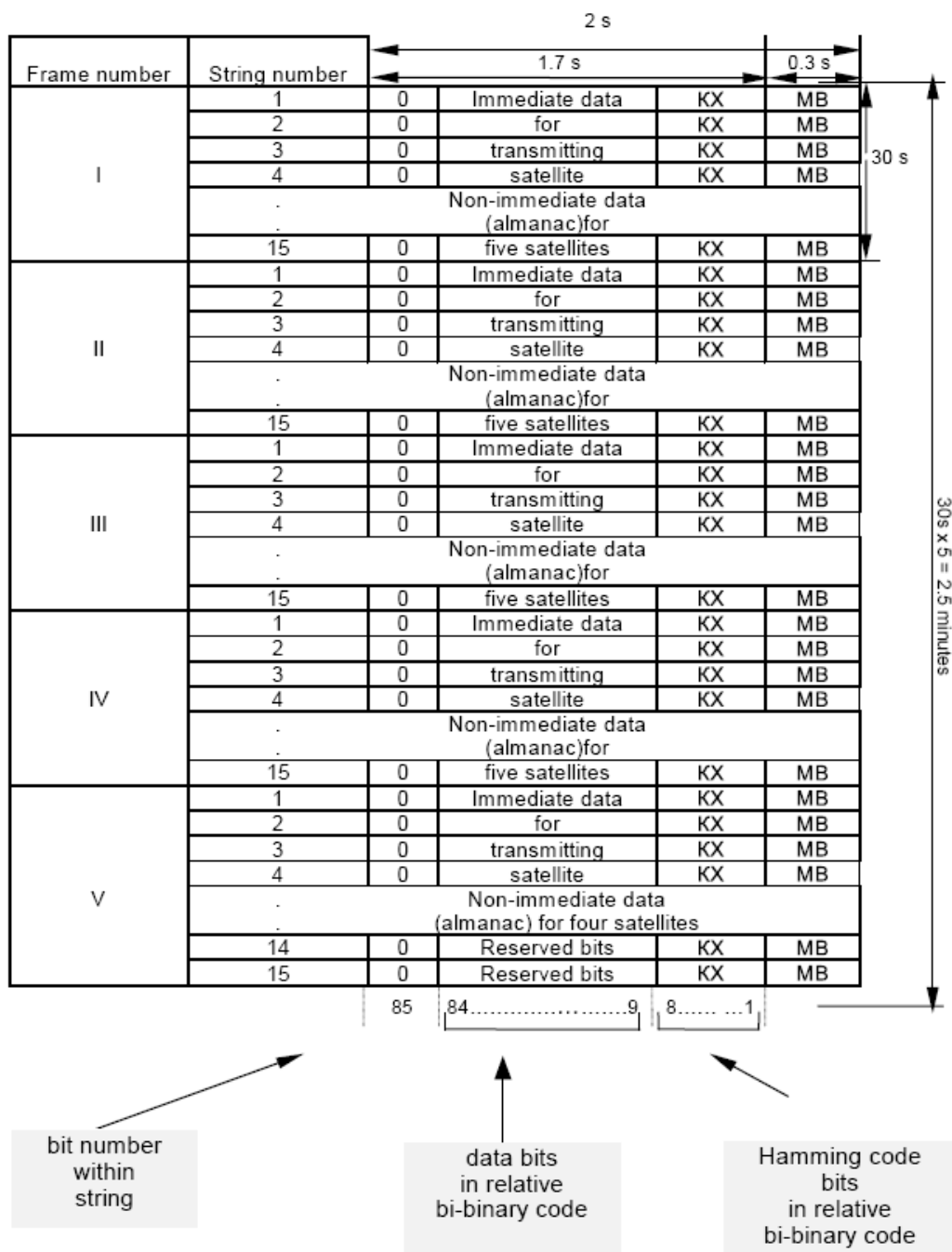


FIGURA 3.5 Estructura del mensaje de Navegación C/A GLONASS ^[5]

3.4.1.3 GLONASS: Estructura de la señal de Navegación

Las señales de navegación transmitidas en ambos enlaces son señales BPSK moduladas por un tren de impulsos. Para la transmisión de sus señales la diferencia de fase de portadora es de π radianes.

En el enlace L1 empleado la señal se compone de:

- Código PNR C/A sumado en módulo-2 con el mensaje de navegación C/A y una secuencia auxiliar: $C/A \oplus D_{C/A}(t) \oplus A(t)$, empleado para uso civil.
- Código PNR P sumado en módulo-2 con el mensaje de navegación P y una secuencia auxiliar: $P \oplus D_P(t) \oplus A(t)$, empleado para uso militar.

El enlace L2 se compone del código PNR P sumado en módulo-2 con una secuencia auxiliar: $P \oplus A(t)$, empleado para uso militar.

La actualización de los servicios y enlaces incluyen que L2 incorpore pronto la señal civil, y el nuevo L3 para señal civil y SoL.

3.4.2 GLONASS: Criterios del interfaz

3.4.2.1 GLONASS: Plan de frecuencias

Tabla 3.4 Planes de frecuencia para señales GLONASS

Band	Señal portadora	Fase	Uso Original	Uso tras la modernización
L1	1602 MHz	Fase (I)	Código Militar	Militar
		Cuadratura (Q)	Código Civil	Señal L1 civil
L2	1246 MHz	Fase (I)	Código Militar	Militar
		Cuadratura (Q)		Señal L2 civil
L3	1201.5 MHz	Fase (I)		Portadora Señal L3 civil
		Cuadratura (Q)		Señal L3 civil

En la Tabla 3.4 se presentan las frecuencias portadoras definidas por el interfaz de GLONASS. Todas ellas se derivan de una frecuencia fundamental de 5 MHz. Como hemos visto a diferencia de GPS, cada satélite transmite en su propia frecuencia portadora, que se deriva de cada una de estas.

Para la banda L1:

$$f_{K1} = f_{01} + K \Delta f_1, \text{ donde } K = (-7, 13)$$

$$f_{01} = 1602 \text{ MHz}; f_1 = 562.5 \text{ kHz}$$

Para la banda L2:

$$f_{K2} = f_{02} + K \Delta f_2, \text{ donde } K = (-7, 13)$$

$$f_{02} = 1246 \text{ MHz}; f_2 = 437.5 \text{ kHz}$$

Tabla 3.5 Portadoras para señales GLONASS ^[5]

No. of channel	Nominal value of frequency in L1 sub-band, MHz	No. of channel	Nominal value of frequency in L2 sub-band, MHz
13	1609.3125	13	1251.6875
12	1608.75	12	1251.25
11	1608.1875	11	1250.8125
10	1607.625	10	1250.375
09	1607.0625	09	1249.9375
08	1606.5	08	1249.5
07	1605.9375	07	1249.0625
06	1605.375	06	1248.625
05	1604.8125	05	1248.1875
04	1604.25	04	1247.75
03	1603.6875	03	1247.3125
02	1603.125	02	1246.875
01	1602.5625	01	1246.4375
00	1602.0	00	1246.0
-01	1601.4375	-01	1245.5625
-02	1600.8750	-02	1245.1250
-03	1600.3125	-03	1244.6875
-04	1599.7500	-04	1244.2500
-05	1599.1875	-05	1243.8125
-06	1598.6250	-06	1243.3750
-07	1598.0625	-07	1242.9375

Estas frecuencias se han escogido porque las señales GLONASS creaban interferencias con las señales astronómicas de radio, que usan las bandas de frecuencia de 1610.6 - 1613.8 y 1660 - 1670 MHz, y para satélites de comunicaciones móviles.

Aunque las frecuencias sean menores que el número de satélites, dos satélites antipodales de un mismo plano, esto es, satélites separados 180° de latitud, pueden transmitir a la misma frecuencia ya que la transmisión de ambos no podría ser recibida simultáneamente.

3.4.2.2 GLONASS: Nivel de potencia recibida

El nivel de Potencia en recepción de las señales RF emitidas por los satélites GLONASS está definido para un ángulo de observación de 5° y una antena polarizada linealmente de 3dBi de ganancia.

En la banda L1 para el servicio CSA el nivel es de -161dBW. Para los nuevos satélites GLONASS-M se ha definido además que la potencia mínima en la banda L2 para el mismo ángulo debe ser de -167dBW.

3.4.3 GLONASS: Implementación del interfaz

3.4.3.1 GLONASS: Estudio técnico del segmento espacial

El segmento espacial de GLONASS transmite la información siguiendo un procedimiento análogo al GPS. Cada satélite de la constelación retransmite la señal de navegación por cada uno de los enlaces definidos L1 y L2 prestando los dos servicios, CSA y CHA, a través de éstos.

Los satélites retransmiten la información en las frecuencias asignadas, entre todas las posibles utilizando la técnica FDMA, lo que permite distinguir que satélite está transmitiendo.

El proceso de transmisión de las señales que se genera en el satélite es el siguiente:

- **Sintetizador de frecuencia:** reloj atómico que funciona a 5 MHz.
- **Unidad de Datos de Navegación:** recibe los datos de navegación del segmento de control a través de las estaciones TT&C.
- **Banda base de Navegación:** se genera el código C/A, y el P se modula la señal de navegación C/A o P a 0.511 MHz y 5.11MHz respectivamente, y se suman código y datos para transmitir la secuencia en espectro expandido.
- **Subsistema de Banda-L:** modula la señal de espectro expandido a la frecuencia portadora de cada satélite.
- **Antena:** transmite la información al segmento de tierra.

3.4.3.2 GLONASS: Estudio técnico del segmento de control

El segmento de control de GLONASS formado por la red de estaciones TT&C distribuidas por toda Rusia y la estación de control maestra de Moscú se encarga de monitorizar el segmento espacial y se comunica con este a través del interfaz definido.

Las funciones que lleva a cabo son las mismas que el GPS, a través de los datos aportados por las señales definidas en el interfaz, el segmento de control es capaz de:

- Establecer el tiempo de reloj de cada satélite, y su diferencia relativa con respecto al sistema.
- Determinar las efemérides.
- Determinar el estado de la constelación.
- Aplicar correcciones temporales u orbitales.
- Detectar fallos en los satélites.

En la Figura 3.5 se puede ver como se relacionan entre sí todos los elementos del segmento de control y con el segmento espacial:

- La red de estaciones de monitorización (Tracking Stations Network) proveen de datos de medidas de posicionamiento de satélites en tiempo casi real a la estación de control y monitorean de manera constante la constelación así como los sistemas de aumento.
- A través de un enlace, dicha información se envía al centro de procesamiento de Moscú.
- El centro de procesamiento y análisis de datos vigila la integridad de la información de cada satélite y las correcciones orbitales que debe aplicar.
- La red de antenas de tierra (Uplink Stations) proveen de un interfaz de Telemetría, Posicionamiento y Comando (TT&C) en tiempo casi real entre la MCS y el segmento espacial y permiten aplicar las correcciones.

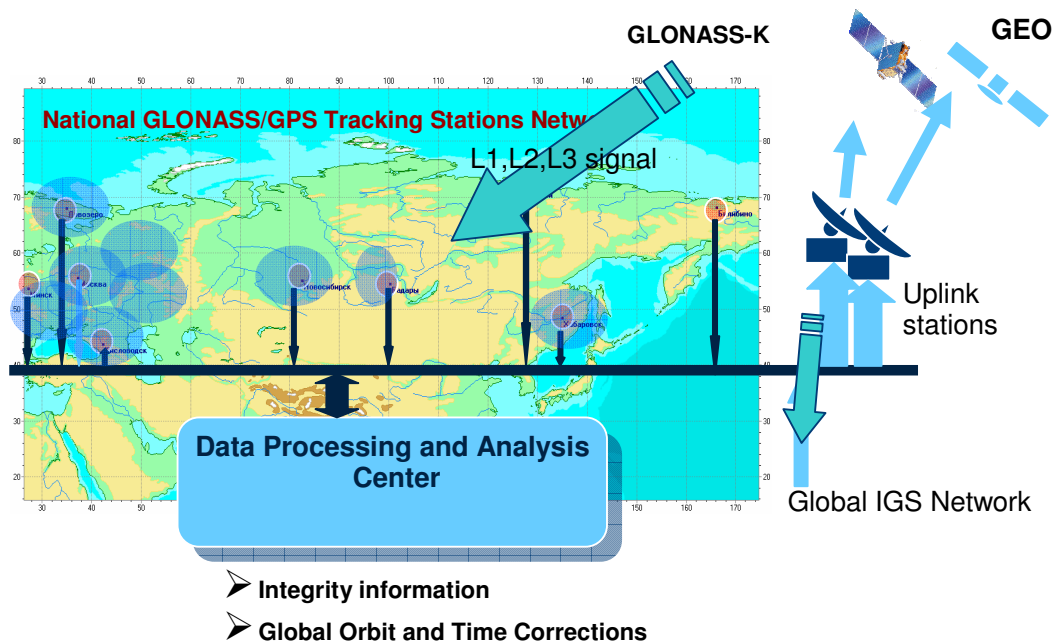


FIGURA 3.6 Estructura del segmento de control GLONASS ^[6]

3.5 Galileo: Requisitos²⁶

3.5.1 Galileo: Definición del interfaz

El interfaz de Galileo define cuatro radioenlaces a través de los cuales establece sus servicios. Dichos enlaces se conocen como E1-L1, E5 (que se divide en E5a y E5b) y E6. Cada enlace está dividido en sub-bandas (E5a, E5b, E6-A, E6-B, E6-C, E1-A, E1-B, E1-C). Por cada sub-banda del enlace se transmiten una o más señales que prestan

²⁶ La información extraída en este apartado así como Figuras y Tablas ha sido parcialmente traducida de documentos con copyright "©, 2006, European Space Agency / Galileo Joint Undertaking". La información no es en ningún caso definitiva puesto que está extraída del Borrador del Interfaz de Galileo. Ref [4]

los distintos servicios. Estos servicios se han presentado en el punto 2.5.3. El interfaz de Galileo se muestra en la Tabla 3.6 donde se puede observar el mapeo entre servicios y canales por los que se transmiten, así como una breve descripción de las bandas de frecuencias y la estructura de cada señal.

Para cada sub-banda del enlace se definen dos canales, uno de datos y otro de portadora que conforman la señal transmitida. El canal de datos es el resultado de la modulación del código PRN, una subportadora si está presente, y una cadena de datos de navegación. El canal de portadora está formado por el código PRN y la subportadora.

Al igual que GPS, los satélites Galileo transmitirán sobre las mismas frecuencias en espectro ensanchado. Galileo empleará la técnica CDMA para distinguir la información de cada satélite. Las señales en espectro expandido serán transmitidas incluyendo códigos PRN diferentes para distintas señales y satélites.

Tabla 3.6 Definición del interfaz de Galileo ^[16]

Signal			Central Frequency MHz	Chip rate Mchip/s	Ranging Code Encryption	Data rate symbol/s (bit/s)	Data encryption	Reference Service
Id	Name							
1	E5a-I	data	1176.45	10	None	50 (25)	None	OS/SoL
2	E5a-Q	pilot	1176.45	10	None	No data	~	OS/SoL
3	E5b-I	data	1207.14	10	None	250 (125)	some	OS/SoL/CS
4	E5b-Q	pilot	1207.14	10	None	No data	~	OS/SoL/CS
5	E6-A	data	1278.75	5	Government	tbd	Yes	PRS
6	E6-B	data	1278.75	5	Commercial	1000 (500)	Yes	CS
7	E6-C	pilot	1278.75	5	Commercial	No data	~	CS
8	E2-L1-E1-A	data	1575.42	M	Government	tbd	Yes	PRS
9	E2-L1-E1-B	data	1575.42	2	None	250 (125)	Some	OS/SoL/CS
10	E2-L1-E1-C	pilot	1575.42	2	None	No data	~	OS/SoL/CS
11	L6 downlink	data	1544.10	~	~	~	~	SAR

3.5.1.1 Galileo: Estructura los códigos PRN

Los códigos PRN se generan a partir del desplazamiento de dos secuencias binarias conocidas como secuencia primaria y secuencia secundaria que se emplea para modificar las repeticiones de la primera secuencia. Dichos códigos varían en función del enlace en cuanto a número de chips, y también de un satélite a otro, a los que se asignarán distintos códigos.

Los códigos primarios se pueden generar de dos maneras distintas:

- Secuencias pseudo-aleatorias basadas en el desplazamiento lineal de registros.
- Secuencias pseudo-aleatorias optimizadas a partir de dos secuencias-M o de una secuencia almacenada en memoria.

En la Tabla 3.7 se muestra la longitud de cada código en función del canal por el que se transmite. Podemos calcular la tasa a la que se transmite cada uno como la longitud del código entre el tiempo que tarda en transmitirse. Así en el canal E5a-I si se transmite un código con una longitud total de 10230×20 chips en 20 ms, su tasa es de 10.23 MHz, el canal E1 con un código de 4092 chips que se transmite en 4 ms tendrá una tasa de 1.023 MHz, y así para el resto.

Tabla 3.7 Longitud de los códigos PRN ^[4]

Channel	Code Length (ms)	Code length (chips)	
		Primary	Secondary
E5a-I	20	10230	20
E5a-Q	100	10230	100
E5b-I	4	10230	4
E5b-Q	100	10230	100
E1-B	4	4092	-
E1-C	100	4092	25

3.5.1.2 Galileo: Estructura del mensaje de Navegación

Tipos de mensajes

Los mensajes de navegación son distintos para cada servicio que ofrece Galileo, y podemos distinguir cuatro:

- **Mensaje I/Nav:** transmitido a 125 bps contiene datos de integridad lo que le permite prestar servicios SoL, y datos encriptados, lo que le permite prestar servicio comercial, además del servicio abierto que presta.
- **Mensaje G/Nav:** mensaje encriptado con un algoritmo gubernamental.
- **Mensaje C/Nav:** mensaje encriptado por un algoritmo comercial transmitido a 500 bps.
- **Mensaje F/Nav:** mensaje transmitido a 25 bps con información básica de posicionamiento espacial y temporal.

Tabla 3.8 Mapeo de mensajes - servicios - canales Galileo

Mensaje	Servicio	Canal
I/Nav	OS/CS/SOL	E5b-I
F/Nav	OS	E5a-I E1-B
G/nav	PRS	E6-A E1-A
C/Nav	CS	E1-B, E1-C E6-B, E6-C E5b

En la Tabla 3.8 podemos ver que servicios presta cada uno y por que canales se transmiten. De todos estos sólo se pueden estudiar el I/Nav y el F/Nav por ser el resto de acceso restringido. Por ser demasiado complejo el I/Nav, sólo se estudia el F/Nav a modo de ejemplo, que sería el equivalente al mensaje de navegación civil de GPS.

Estructura general

Todos los mensajes de navegación de Galileo se organizan de manera jerárquica como una estructura de tramas que se dividen en subtramas compuestas de páginas, estructura básica del mensaje.

Cada página se compone de un campo de sincronización y otro de datos. El campo de sincronización permite sincronizarse a los receptores mientras que el campo de datos es el resultado de la transmisión del mensaje de información junto con una codificación de canal FEC²⁷ convolucional. La transmisión de cada página se realiza MSB.

Mensaje F/Nav

El mensaje se compone de una trama de 30000 bits que tarda 10 minutos en transmitirse, y que consta de 12 subtramas de 5 páginas cada una, en total 2500 bits por subtrama. Cada página consta de 500 bits y tarda 10 segundos en transmitirse, de lo que se deduce que se transmite a 50 bps. Cada página consta de:

- **Bits de sincronización:** un total de 12.
- **Bits de datos:**
 - **Bits de cola:** permiten la decodificación FEC en recepción.
 - **Palabra:** contiene los datos útiles:
 - **Tipo de página:** especifica que información aporta los datos de navegación.
 - **Datos de Navegación:** 208 bits que pueden contener cualquier tipo de dato indicado en el campo anterior: datos de efemérides, de reloj, correcciones ionosféricas etc.
 - **CRC:** que permite detección de errores.

Sync	Symbols			Total [symbols]
12	488			500

Word			Tail	Total [bits]
Page type	Navigation Data	CRC	6	244
6	208	24		

FIGURA 3.7 Estructura de página F/Nav ©, 2006, European Space Agency / Galileo Joint Undertaking [4]

La información que se transmite en cada subtrama incluye cinco de los seis tipos de páginas posibles quedando completa la información de cada trama con la de la siguiente. Los tipos de página que puede haber son:

1. Contiene datos de estado del satélite y correcciones.
2. Contiene parte de datos de las efemérides y del GST.
3. Contiene parte de datos de las efemérides y del GST.
4. Contiene parte de datos de las efemérides y del GST, así como la conversión de GST a UTC, que es la base de tiempos de GPS, y el TOW.
5. Datos de almanaque de un satélite y parte de datos de otro.
6. Parte de datos de almanaque de un satélite y datos completos de otro.

Como se puede apreciar en la Figura 3.8 la información de almanaque para 3 satélites se completa cada dos subtramas hasta completar las 12. Cada trama contiene la

²⁷ Ver apéndice A

información de 18 satélites (cada 2 subtramas tenemos la información de 3 satélites y hay un total de 12). Por lo que la información de la constelación completa (30 satélites) se recibiría en 20 minutos, siendo posible llegar a transmitir la información de 36 satélites.

	Page type	Page content
Subframe 1	1	SVID, clock correction, SISA, Ionospheric correction, BGD, Signal health status, GST and Data validity status
	2	Ephemeris (1/3) and GST
	3	Ephemeris (2/3) and GST
	4	Ephemeris (3/3), GST-UTC conversion, GST-GPS Conversion and TOW
	5	Almanac for satellite k and almanac for satellite (k+1) part 1
Subframe 2	1	SVID, clock correction, SISA, Ionospheric correction, BGD, Signal health status, GST and Data validity status
	2	Ephemeris (1/3) and GST
	3	Ephemeris (2/3) and GST
	4	Ephemeris (3/3), GST-UTC conversion, GST-GPS Conversion and TOW
	6	Almanac for satellite (k+1) part 2 and almanac for satellite (k+2)
Subframe 3	1	SVID, clock correction, SISA, Ionospheric correction, BGD, Signal health status, GST and Data validity status
	2	Ephemeris (1/3) and GST
	3	Ephemeris (2/3) and GST
	4	Ephemeris (3/3), GST-UTC conversion, GST-GPS Conversion and TOW
	5	Almanac for satellite (k+3) and almanac for satellite (k+4) part 1
Subframe 4	1	SVID, clock correction, SISA, Ionospheric correction, BGD, Signal health status, GST and Data validity status
	2	Ephemeris (1/3) and GST
	3	Ephemeris (2/3) and GST
	4	Ephemeris (3/3), GST-UTC conversion, GST-GPS Conversion and TOW
	6	Almanac for satellite (k+4) part 2 and almanac for satellite (k+5)

FIGURA 3.8 Estructura del mensaje F/Nav ^[4]

3.5.1.3 Galileo: Estructura de la señal de Navegación

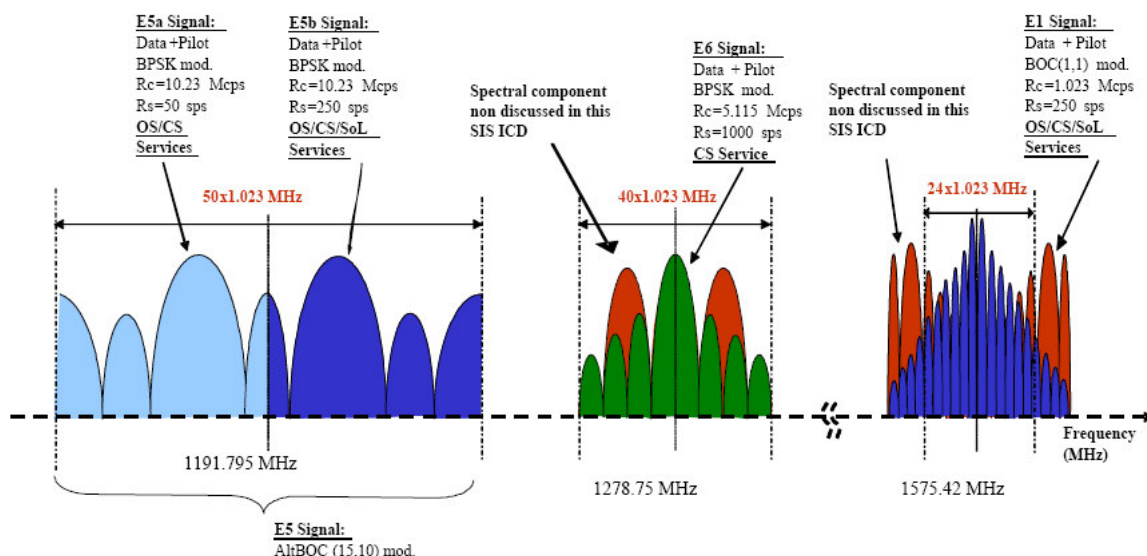


FIGURA 3.9 Estructura de las señales Galileo ©, 2006, European Space Agency / Galileo Joint Undertaking [4]

El sistema Galileo transmite seis señales que conforman los distintos enlaces por los que prestará sus servicios. Cada señal tiene unas determinadas características en cuanto a su estructura, a la modulación empleada y la tasa de datos. En la Figura 3.9 se muestra el espectro de cada una de las señales que se van a transmitir y la banda en que se ubican.

Las señales que transmite cada satélite son:

- **Señal E1:** es una señal de acceso abierto que comprende un canal dedicado a datos y otro a la portadora (L1-B y L1-C respectivamente). Se compone de códigos PRN y un mensaje de navegación (I/Nav) no encriptados a los que pueden acceder todos los usuarios. Contiene mensajes de integridad no encriptados, así como datos comerciales encriptados. Su tasa de datos es de 125 bps. La señal E1 ofrece los servicios OS, CS y SoL.
- **Señal LP1:** es una señal de acceso restringido que se transmite por el canal L1-A. Tanto los códigos PRN como el mensaje de navegación, que se conoce como G/Nav están encriptados y prestan servicios gubernamentales.
- **Señal E6:** es una señal de tipo comercial que posee dos canales, uno de datos y otro de portadora (E6-B, E6-C). Sus códigos de posicionamiento y el mensaje de navegación están encriptados mediante un algoritmo comercial. Su mensaje de navegación es el C/Nav. Su tasa de datos es de 500 bps. Se usa para CS.
- **Señal E6P:** es una señal de acceso restringido que se transmite por el canal E6-A. Sus códigos PRN y el mensaje de navegación están encriptados mediante un algoritmo gubernamental. El mensaje de navegación es del tipo G/Nav.
- **Señal E5a:** es la señal de servicio abierto que se ofrece por la banda E5 e incluye los canales de información y portadora (E5b-I y E5b-Q). Sus códigos de posicionamiento y su mensaje de navegación (F/Nav) no están encriptados. Provee de información básica de apoyo a la función de navegación y función de tiempo. Se usa para OS y su tasa es de 25 bps.
- **Señal E5b:** es una señal de acceso abierto que comprende un canal dedicado a datos y otro a la portadora (E5b-I y E5b-Q respectivamente). Se compone de códigos PRN no encriptados y un mensaje (I/Nav) de navegación a los que pueden acceder todos los usuarios. Contiene mensajes de integridad no encriptado y datos comerciales encriptados. Ofrece CS, OS y servicio SoL.

Cada enlace emplea un tipo de modulación distinta. En función del tipo de modulación la tasa de chips variará:

- Las bandas E5a y E5b se procesan como un solo ancho de banda. Las señales de E5 se transmiten usando la técnica AltBOC(15,10) con tasa de chips $10 \cdot f_0 = 10.23$ Mcps.
- Para E6 se utiliza la técnica BPSK con una tasa de chips de $5 \cdot f_0 = 5.115$ Mcps.
- Para E1 la técnica BOC con tasa $f_0 = 1.023$ Mcps.

En la Tabla 3.7 tenemos resumida la información de la Figura 3.9: las modulaciones así como la tasa de chips y la de símbolos para cada señal de datos. Como se puede apreciar, cada señal transmite los datos en fase y la portadora en cuadratura.

Tabla 3.9 Modulación de las señales Galileo ©, 2006, European Space Agency / Galileo Joint Undertaking [4]

Signal name	Channel	Modulation Type	Chip Rate [Mcps]	Symbol Rate [sps]
E5	E5a data	AltBOC(15,10)	10.23	50
	E5a pilot			N/A
	E5b data			250
	E5b pilot			N/A
E6	E6-B data	BPSK(5)	5.115	1000
	E6-C pilot			N/A
E1	E1-B data	BOC(1,1)	1.023	250
	E1-C pilot			N/A

3.5.2 Galileo: Criterios del interfaz

3.5.2.1 Galileo: Plan de frecuencias

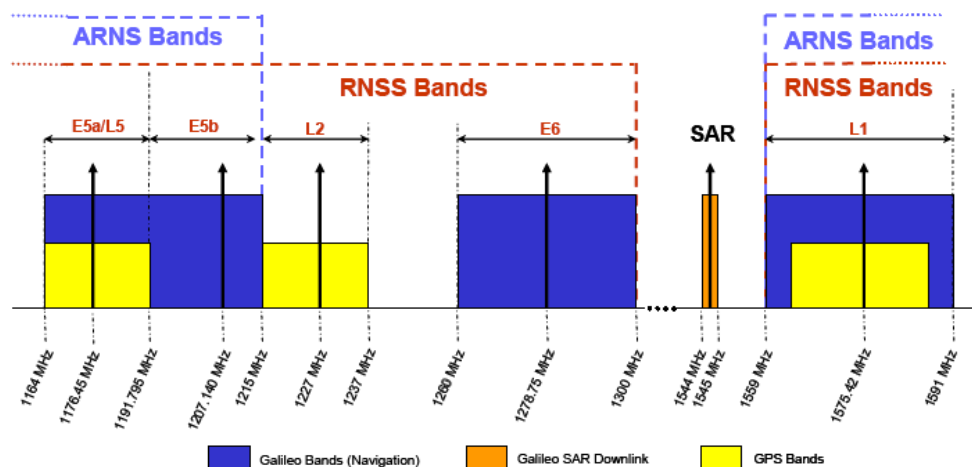


FIGURA 3.10 Plan de frecuencias Galileo ©, 2006, European Space Agency / Galileo Joint Undertaking [4]

La distribución de frecuencias del sistema Galileo se ha realizado como se ha visto antes en tres bandas (cuatro si consideramos E5a y E5b por separado). Todas comparten el espectro con los otros dos RNSS, GPS y GLONNAS, mientras que dos de ellas, E5 y L1 comparten el espectro con los servicios ARNS usados en aviación civil, lo que permite el uso de Galileo para aplicaciones de seguridad críticas.

La frecuencia central de cada enlace así como el ancho de banda en recepción se define en la Tabla 3.10. Todos los anchos de banda así como las frecuencias de portadora se han diseñado como múltiplos de $f_0 = 1.023\text{MHz}$.

El reloj de Galileo trabaja a 10.23 MHz mediante divisores en frecuencia es capaz de trabajar a distintas frecuencias generando así los códigos PRN con las tasas de chips

vistas en la Tabla 3.8. Dependiendo del código PRN variará el ancho de banda de la señal.

Tabla 3.10 Ancho de banda en recepción de los enlaces Galileo

Señal	Frecuencia central	Ancho de banda
E5	1191.795 MHz (1165 f_0)	51.150 MHz (50 f_0)
E6	1278.75 MHz (1250 f_0)	40.920 MHz (40 f_0)
E1	1575.42 MHz (1540 f_0)	24.552 MHz (24 f_0)

3.5.2.2 Galileo: Nivel de potencia recibida

Las especificaciones de potencia recibida para las señales Galileo de los distintos enlaces se han hecho presuponiendo un ángulo de elevación de 10° para una antena isotropa con 0 dBi de ganancia y sin pérdidas atmosféricas.

Tabla 3.11 Potencia en recepción de Galileo

Señal	Nivel de Potencia Recibida (dBW)
E5	-155
E6	-155
E1	-157

3.5.3 Galileo: Implementación del interfaz

3.5.3.1 Galileo: Estudio técnico del segmento espacial

Los satélites Galileo desarrollados en la actualidad, conocidos como GIOVE, se han desarrollado para implementar el interfaz y validar el funcionamiento del sistema.

Cada satélite retransmite las señales de navegación correspondientes a cada banda de frecuencias. Como ya se ha visto dichas señales se componen de un código PRN propio de cada satélite y pueden llevar datos o la portadora. Emplean CDMA como método de acceso al medio y modulan la señal a la frecuencia correspondiente resultando una señal de navegación en espectro expandido.

El funcionamiento del satélite depende de cuatro relojes que determinan la frecuencia a la que funciona el sistema. Hay dos de cada tipo:

- **Passive Hydrogen Maser Clock (PHM):** es el reloj principal del sistema dotado de gran precisión.
- **Rubidium Atomic Frequency Standard (RAFS):** reloj secundario que entra en funcionamiento en caso de fallo del primero.

Los elementos de los que se componen los satélites Galileo necesarios para la transmisión de la señal de navegación y la recepción de señales de tierra son los siguientes:

- **Clock Monitoring and Control Unit (CMCU):** actúa como interfaz entre los relojes del sistema y la NSGU y se asegura de que el reloj maestro del satélite esté coordinado con los de reserva.
- **Navigation Signal Generation Unit (NGSU):** se encarga de generar los mensajes y códigos de navegación, así como las señales de cada una de las bandas, usando el tipo de modulación correspondiente a cada banda y el CDMA.
- **Frequency Generation and Modulation Unit (FGMU):** modula la señal resultante del NSGU a la frecuencia de transmisión, formando así la señal de navegación.
- **Telemetry, Tracking and Command (TT&C) Transponder:** demodula tanto para una señal de espectro expandido como para una normal las señales procedentes del segmento de control, y se encarga de la telemetría del satélite.
- **Solid-State Power Amplifier (SSPA):** se encarga de amplificar cada señal manteniendo los requisitos de linealidad para optimizar la transmisión.
- **Output Multiplexer (OMUX):** combina las señales que salen de SSPA con bajas pérdidas y alta estabilidad para el retardo de grupo.

El proceso de transmisión de la señal de navegación se muestra en la Figura 3.11. En el diagrama de bloques se relacionan estos elementos a través de conexiones. A la salida del multiplexor se conecta la antena que transmite las señales por los distintos enlaces.

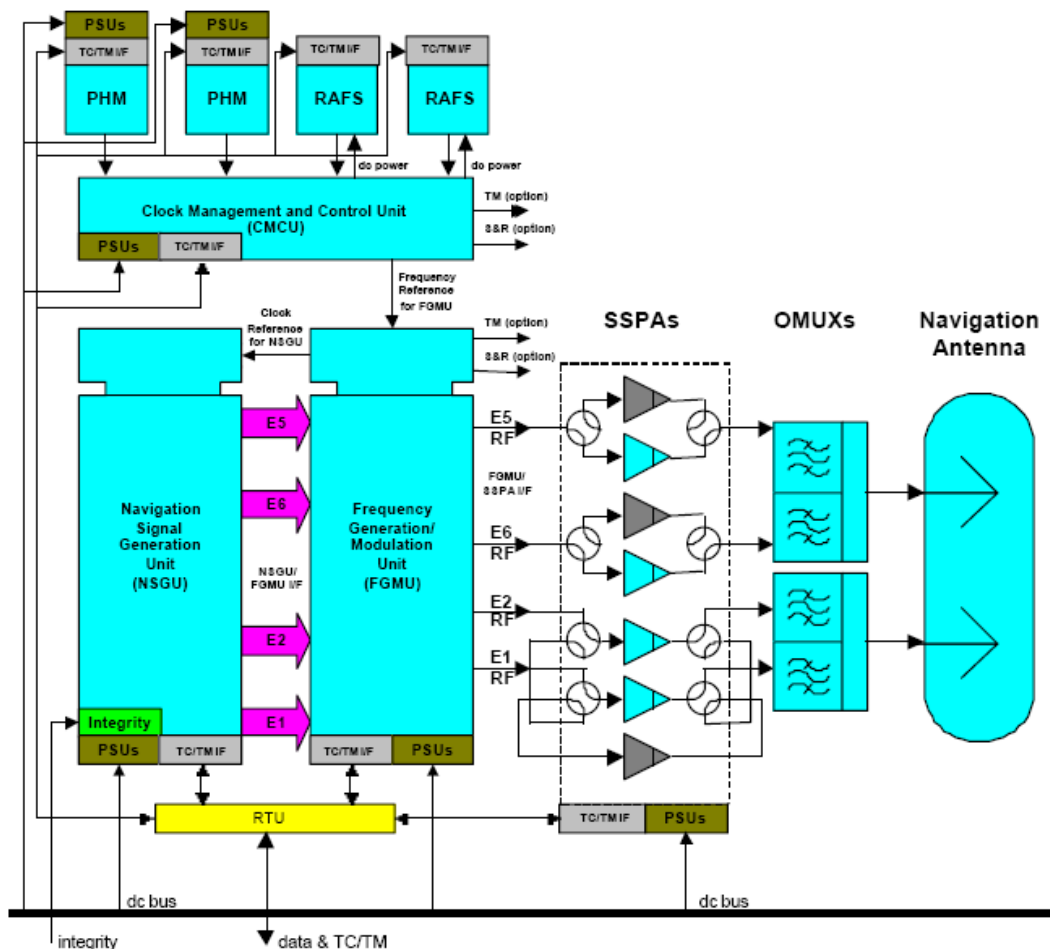


FIGURA 3.11 Diagrama de bloques de información del satélite Galileo ^[36]

3.5.3.2 Galileo: Estudio técnico del segmento de control

La arquitectura básica del segmento de control definida para el proyecto Galileo es similar a la de los sistemas GPS o GLONASS. Como se ha presentado anteriormente en el Capítulo 2, consta de dos partes diferenciadas: GMS y GCS. La forma en que Galileo implementa el interfaz que permite comunicarse al segmento espacial con el segmento de control y viceversa se presenta a continuación.

En la Figura 3.12, el GCC se presenta como NSCC, mientras que las GSS del GMS se presentan como OSS. Las funciones que cada una realiza son las mencionadas en el Capítulo 2. La forma en que se relacionan dichas estaciones y el segmento del espacio es la siguiente:

- **OSS data:** las estaciones GSS (u OSS) reciben datos de los satélites visibles en ese momento y envían dicha información junto con estimaciones suyas de la constelación y otros datos como condiciones meteorológicas a los GCC.
- **Navigation Control:** los dos GCC reciben información de los satélites a través del enlace con las GSS del GMS. Dichas información es procesada en las distintas partes que componen el GCC que llevan a cabo la función de control de navegación:
 - Orbitography and Synchronisation Processing Facility (OSPF): controla los datos de efemérides y de reloj de cada satélite y predice la evolución de estos parámetros. Envía sus datos directamente al SCF.
 - Precision Timing Station (PTS): genera el sistema de tiempos a través de relojes atómicos de Galileo.
 - Navigation Control Facility (NCF): monitoriza de forma global el comportamiento de las OSPF, PTS y OSS.
- **Satellite Control:** llevado a cabo por la Satellite Control Facility (SCF) de cada GCC proveen de mantenimiento de la constelación, de cada satélite y telemetría a través de los enlaces TT&C. Recibe la información de la NFC a través de un interfaz, así como los datos procesados en la OSPF. Envía los datos de navegación a las estaciones TT&C, que actualizan cada satélite a través de sus antenas de tierra.

Como se puede apreciar en la misma figura, el centro de control tiene una estructura jerárquica para realizar las distintas funciones antes mencionadas. Las distintas instalaciones se comunican entre sí a través de distintos enlaces que se muestran en colores diferentes:

- **Enlace naranja:** los Navigation Control Facility y Satellite Control Facility se comunican entre sí para conocer su estado y coordinar sus datos.
- **Enlace morado:** los datos de navegación recibidos, correspondientes a cada satélite, se envían a las distintas instalaciones donde son tratados.
- **Enlace azul:** corresponde al enlace TT&C, que se comunica con los satélites, enviando el resultado de dicha actualización desde el NCF al centro de control.

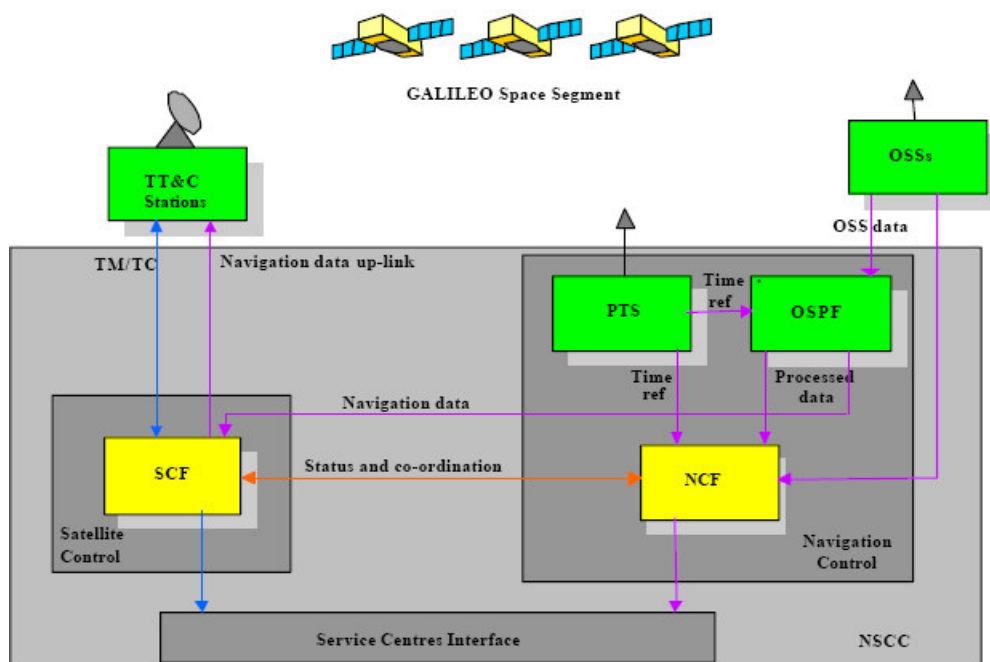


FIGURA 3.12 Arquitectura del segmento de control Galileo ^[36]

4 Estudio de viabilidad de un proyecto: el caso Galileo

4.1 Introducción

Entendemos por proyecto un esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto servicio o resultado de carácter único. Todos los proyectos de ingeniería que se llevan a cabo deben tener un beneficio social o económico tangible para quien lo promueve. La planificación económica y financiera de cómo afrontar el proyecto es de vital importancia para tomar la mejor decisión posible.

Existen proyectos que simplemente generan un beneficio social, llevados a cabo por distintos gobiernos, aunque de alguna forma puedan reportar también beneficios económicos por el impacto que tienen. Este es el caso de los sistemas de navegación como GPS o GLONASS que se diseñaron en un principio pensando en los beneficios militares, pero con el paso del tiempo dichos sistemas han generado nuevos beneficios sociales y económicos.

Para saber si es rentable llevar a cabo un proyecto debemos realizar un estudio de viabilidad de dicho proyecto. Todo estudio de viabilidad sigue la metodología de evaluación de proyectos de inversión desarrollada en el Apéndice D. Dicha metodología se basa en distintos estudios multidisciplinarios que componen el estudio de viabilidad y que llevan a la toma de la decisión de realizar o no el proyecto:

- **Estudio de mercado:** analiza los segmentos de mercado y la penetración que podría tener el futuro proyecto en los mismos.
- **Estudio técnico:** estudios preliminares que sirvieron para definir de manera preliminar la arquitectura del sistema.
- **Estudio económico:** En dicho estudio se van a analizar las inversiones, los costes y beneficios que se esperan de dicho proyecto y cómo se va a gestionar el mantenimiento del mismo, buscando la estructura más adecuada que garantice su financiación una vez puesto en marcha.
- **Estudio estratégico:** ver como el proyecto beneficia estratégicamente a las entidades que lo subvencionan. En un ámbito empresarial el proyecto debe tener un componente estratégico para la empresa, como puede ser penetrar en un nuevo mercado, ampliar el existente o crear un nuevo segmento de mercado.

Este capítulo estudia la aplicación de dicha metodología a un caso concreto, el proyecto Galileo. A lo largo del capítulo, se van a emplear distintos estudios que cubren los cuatro puntos vistos anteriormente, y que han sido llevados a cabo para la UE por distintas organizaciones y empresas. Dichos estudios se encuentran citados en la Bibliografía, y aquí se muestra su contenido resumido. Conjuntamente dichos estudios componen el estudio de viabilidad, siguiendo la metodología del Apéndice D, y permiten extraer conclusiones sobre los beneficios de la realización del proyecto Galileo.

4.2 Dimensiones del proyecto Galileo

El proyecto Galileo promovido por la Comisión Europea, en concreto la dirección de de Energía y Transporte, en conjunto con la Agencia Espacial Europea, responde a las necesidades de un nuevo GNSS para Europa, que la dote de independencia del GPS y que garantice nuevos servicios y beneficios para el conjunto de la sociedad. En concreto las razones por las que se plantea el proyecto son:

- **Estratégicas:** garantizar un servicio de navegación por satélite a los países de la Unión Europea frente a otros sistemas que pueden dejar de emitir señales. Un GNSS propio permitiría aumentar la seguridad y fiabilidad y pondría a Europa como uno de los principales actores en el ámbito de los sistemas de radionavegación.
- **Comerciales:** el mercado de navegación por satélite ha crecido de manera espectacular en los últimos 10 años. El mercado de GNSS se va a convertir en uno de los pilares básicos de la economía mundial, especialmente a partir de 2010. El desarrollo de Galileo permitirá a Europa obtener una cuota sustancial de dicho mercado.
- **Económicos:** la participación en el desarrollo del sistema y de aplicaciones por parte de las empresas europeas traerá beneficios económicos para éstas y beneficios sociales para la UE ya que se crearán nuevas PYMES que generarán nuevos puestos de trabajo.

Sus múltiples aplicaciones permitirán también generar beneficios sociales al conjunto de la UE, a través, por ejemplo, de la gestión de flotas de vehículos que aumenten la eficiencia del servicio (reportando así también beneficios económicos a las empresas), estableciendo el camino más corto y descongestionando el tráfico.

Galileo es por tanto una pieza clave en la economía de la UE y que reportará múltiples beneficios económicos y sociales. La UE debe tomar un papel activo y consolidar su posición a nivel mundial como proveedor de GNSS.

4.3 Objetivos del estudio de viabilidad del proyecto

La Comisión Europea de Energía y Transporte ha elaborado diversos estudios que corroboren la viabilidad del proyecto a distintas empresas y organizaciones. El estudio llevado a cabo por PriceWaterHouseCoopers en 2001 tenía como objetivo establecer:

- Los servicios que debe ofrecer Galileo y los beneficios que se espera que generen.
- Las especificaciones y costes del sistema.
- Las inversiones de los sectores público y privado.
- La forma en que se financiará el sistema.
- La estructura público-privada que se encargará del mantenimiento del mismo.

4.4 Estudios de mercado²⁸

4.4.1 Introducción

Un estudio de mercado es el primer paso para determinar el éxito que puede tener un proyecto, la estructura la madurez y la facturación anual del mercado son los aspectos principales para determinar el impacto que el proyecto pueda tener en él, y la rentabilidad del mismo.

4.4.2 Estructura del mercado GNSS

El mercado de los GNSS es cada vez más amplio, pocos mercados han experimentado un crecimiento como este, a un ritmo de crecimiento anual del 27% desde mediados de los 90 hasta principios del siglo XXI. A medida que ha crecido este mercado económicamente, también ha ido creciendo en complejidad, pasando de simples servicios de navegación a sistemas de información más complejos basados en redes de comunicación.

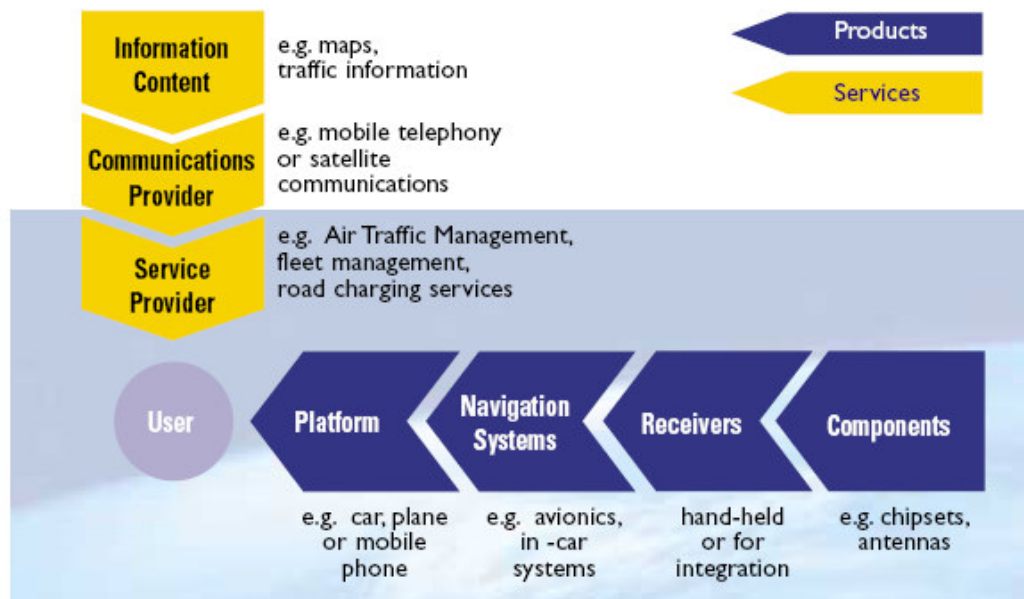


FIGURA 4.1 Evolución del mercado de los GNSS ^[22]

En la Figura 4.1 se muestra la evolución de dicho mercado, por un lado el mercado de productos que empezó obteniendo sus beneficios de la fabricación de receptores, para ir evolucionando hacia sistemas completos de navegación integrados en distintas

²⁸ Información y dibujos de este apartado extraídos del documento de la comisión europea “Business in Satellite Navigation”

plataformas como coches, teléfonos, aviones etc. Por el otro el mercado de servicios, que evoluciona desde servicios de información, a servicios integrados con telefonía móvil o comunicación por satélite ofrecidos por los proveedores de comunicación, y servicios más complejos ofertados por los proveedores de servicios, como la gestión del tráfico aéreo.

4.4.3 Situación del mercado actual

Cada vez surgen más y más aplicaciones para las que en un principio los GNSS no estaban pensados. Esto es debido a las altas prestaciones que ofrecen gracias a las cuales los usuarios reciben la información que necesitan con gran precisión.

El desarrollo de las redes de comunicación y sistemas de información geográfica junto con el abaratamiento de los sistemas receptores ha sido otro de los factores determinantes para el desarrollo del nuevo mercado de aplicaciones en distintos sectores. Los posibles sectores en los que un GNSS puede desarrollar una cuota de mercado se pueden ver en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Tipos de mercados de aplicaciones GNSS

Tipo de mercado	Aplicaciones
Profesional	Temporización, aplicaciones científicas, mediciones, petróleo y gas, ingeniería civil, agricultura, gestión de recursos (como flotas de vehículos) etc
Masivo: usuario común	Navegación, dispositivos de localización
Safety of Life y aplicaciones de seguridad	Servicios de emergencia y seguridad, transporte de pasajeros

Es aquí donde el sector público juega un papel importante en la regulación de los servicios que presta cada sistema, por ello es fundamental tener un GNSS propio para poder ser uno de los principales actores en la toma de decisiones. Así podrían desarrollarse servicios de pago para el sector profesional que ofrezcan mejores prestaciones que las señales destinadas al mercado masivo, y podrían obtenerse beneficios del mercado masivo a través del pago de un impuesto por el uso de esta tecnología que iría grabado en el precio de venta de cada receptor.

4.4.4 Previsiones de evolución

También es necesario conocer la evolución de dichos mercados para poder estimar la importancia que tendrá cada uno. En la Figura 4.2 se muestra la previsión de la evolución del mercado de aplicaciones GNSS entre 2001 y 2015, en ella se puede apreciar la importancia de las nuevas aplicaciones que van surgiendo, mucho mayor de la que se pensó en un principio. De esta manera el mercado de la movilidad personal, donde podrían implantarse servicios de navegación y localización, parece ser que tiene muchas posibilidades en un futuro próximo. Y puesto que este tipo de mercado es masivo y está destinado al usuario común, generará beneficios económicos importantes para las empresas que desarrollen dichas aplicaciones y beneficios sociales al conjunto de la población.

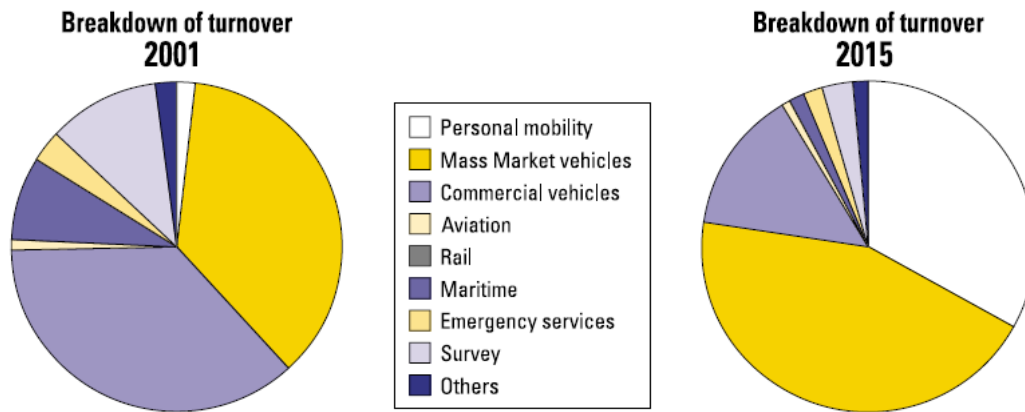


FIGURA 4.2 Evolución del mercado GNSS de aplicaciones entre 2001 y 2015 ^[22]

Por otra parte en la Figura 4.3 se puede observar las previsiones hasta 2020, que denotan un crecimiento espectacular del mercado, ello es debido a que, como se ha explicado en el punto 4.4.1, el mercado crece en complejidad, y si bien en el 2000 los ingresos proceden en su gran mayoría del mercado de productos, en 2020 los ingresos proceden de los productos y de los servicios asociados a dichos productos.

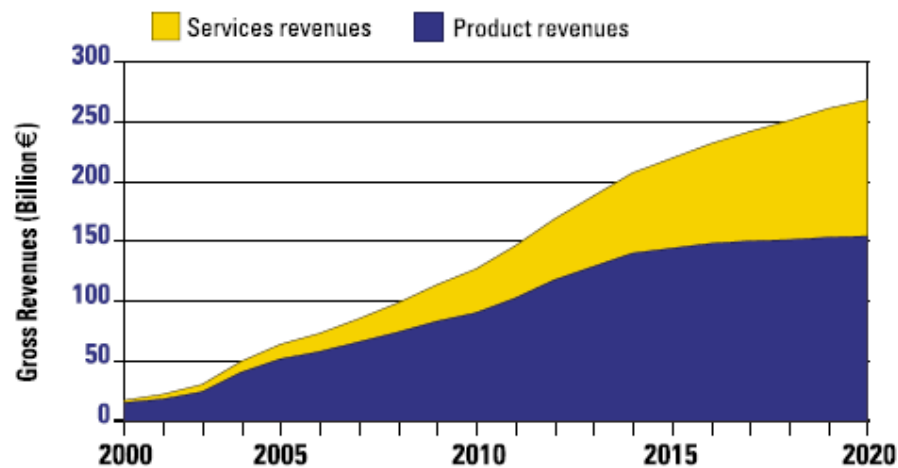


FIGURA 4.3 Previsiones de evolución de mercado GNSS ^[22]

Con unos ingresos previstos de 250000 millones de euros para el año 2020, duplicando las previsiones para 2010, se espera que haya unos 3000 millones de receptores operativos para entonces, lo que nos da una idea de la importancia que puede cobrar esta tecnología.

4.4.5 Conclusiones

Una vez determinados los tipos de segmentos de mercado, las cuotas de dichos segmentos y la evolución de los mismos a través de las distintas aplicaciones que

surgen, hay que estimar la cuota de mercado de Galileo teniendo en cuenta que ya existe un GNSS como el GPS, que tiene una posición de ventaja por ser el primero que surgió.

Esto se puede apreciar en la Figura 4.4, donde se observa bajo una serie de presuposiciones, los ingresos que puede reportar Galileo al mercado de GNSS para las industrias implicadas en el desarrollo de productos de dicho sistema. Es necesario que las empresas vean que Galileo ofrece posibilidad de beneficio real para invertir en el mismo, ya que si las empresas no invierten y no se desarrollan aplicaciones, Galileo no será rentable.

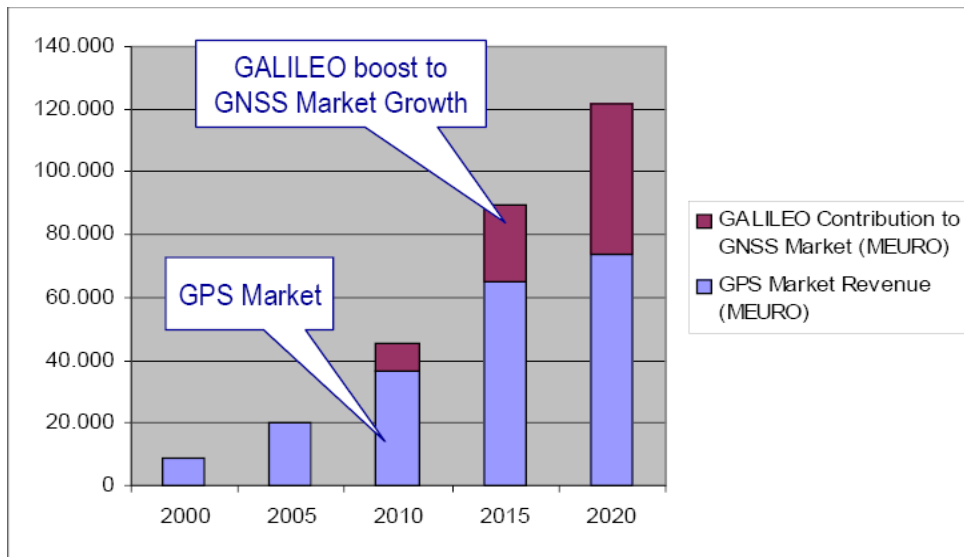


FIGURA 4.4 Estimación de cuota de mercado para las empresas que participen en Galileo ^[20]

Por tanto el estudio de mercado concluye en que:

- Existen distintos segmentos de mercado donde Galileo puede tener un gran impacto, y en base a los cuales debe desarrollarse para generar el máximo beneficio económico y social posible.
- La evolución de las aplicaciones GNSS hace que sea un mercado en constante crecimiento donde las aplicaciones destinadas al mercado masivo son las que mayores beneficios ofrecen a las empresas.
- Galileo es un sistema que ofrece posibilidades reales de beneficios económicos para las empresas que participen en su desarrollo y en el desarrollo de aplicaciones para él. El mercado europeo es lo bastante amplio como para poder atraer inversiones y proyectos de distintas empresas.

4.5 Estudios técnicos

Los estudios técnicos que se llevaron a cabo en la fase de definición del programa incluían los aspectos concernientes a la definición y estandarización del sistema así como de los recursos necesarios para implantarlo. Los estudios llevados a cabo han sido

presentados en el punto 2.5.1 del presente proyecto, y son: GALA, GEMINUS, INTEG, SAGA y GalileoSat. Los hitos alcanzados por dichos estudios fueron:

- Definición de la arquitectura del sistema.
- Requisitos necesarios para llevarla a cabo.
- Interconexión con sistemas existentes.
- Estandarización.
- Definición de servicios.

Todos estos aspectos se han definido y discutido a lo largo de este PFC por lo que no se entrará otra vez en detalle. En base a ellos se estimó una planificación y la inversión necesaria para llevar a cabo el proyecto, y los costes derivados del mismo.

A partir de los dos estudios anteriores se elaboró el estudio económico que determinara si era conveniente o no financiar el proyecto Galileo, su rentabilidad para la UE y los beneficios económicos y sociales que pudiera generar en Europa.

4.6 Estudio económico-financiero del proyecto Galileo²⁹

4.6.1 Introducción

Una vez que se han llevado a cabo los estudios de mercado, que determinan que existe un amplio mercado que se puede explotar, y los estudios técnicos que determinan que es posible realizar el proyecto a partir de una tecnología, hay que ver si es viable económicamente llevar a cabo dicho proyecto, y la rentabilidad de invertir en el mismo. El estudio económico-financiero tiene como objetivo determinar la rentabilidad del proyecto, y la viabilidad económico-financiera del mismo.

En el estudio económico se tiene en cuenta la inversión que se debe realizar para acometer el proyecto, los beneficios económicos que genera y la rentabilidad del mismo mediante herramientas de análisis económico. El análisis económico debe prever además la gestión de riesgos del proyecto donde se evalúen a nivel económico los distintos tipos de riesgo.

El análisis financiero de un proyecto indica la forma más adecuada de financiar el proyecto, de dónde extraer los fondos y si es realmente rentable financiar el proyecto en vez de invertir el dinero en otros que nos ofrezcan mayor rentabilidad.

4.6.2 Costes del proyecto

La inversión del proyecto Galileo se calculo en base a la planificación inicial del mismo, definida en el punto 2.5.1, y en base al estudio técnico que determinaba los

²⁹ Información y dibujos procedentes de: informe de 2001 de PriceWaterHouseCoopers para el proyecto Galileo, y el documento “Bussiness in Satellite Navigation”

elementos necesarios para constituir el GNSS: los 30 satélites del segmento espacial, y los elementos necesarios en el segmento de control.

Tabla 4.2 Costes del proyecto Galileo ^[21]

Costes Millones € 2001³⁰	Desarrollo (2002-05)	Despliegue (2006-07)	Total
Segmento de control	423	354	777
Segmento espacial	562	1270	1832
Costes ESA	99	55	154
Otros costes	127	180	307
Contingencias	166	170	336
TOTAL	1377	2029	3406

El presupuesto estimado en 2001 para acometer el proyecto en las distintas fases se puede observar en la Tabla 4.2, donde se han desglosado los costes de los distintos segmentos, los costes de la ESA, y otros costes. Finalmente se han añadido contingencias del 15% en la fase de desarrollo y 10% en la fase de explotación, como medida de control de posibles riesgos en cada fase.³¹ El coste total estimado del proyecto es de 3406 millones de €.

Los costes estimados en la fase de operación fueron de 100 a 120 millones de € con el VAN de 2001 al año. Además los costes de reemplazamiento que se deberían llevar de 2016 a 2022 del segmento espacial se estimaron en 1800 millones. Conjuntamente ambos costes suponen a la UE un gasto anual de 220 millones durante la fase de operación.

4.6.3 Análisis financiero

Con un mercado lo suficientemente amplio en cuanto a potenciales usuarios (miles de millones) y una facturación anual de miles de millones de euros, la Comisión Europea debe determinar la rentabilidad del proyecto Galileo, y los beneficios que obtendrá de su puesta en marcha. Por un lado los beneficios sociales están claros, mejorará la calidad de vida de sus ciudadanos y generará una gran cantidad de puestos de trabajo. Por otro la rentabilidad económica debe calcularse teniendo en cuenta diversos factores³²:

- La penetración de mercado teniendo en cuenta la posición del GPS, en el estudio encargado por la Comisión Europea se estimó de entre un 13% en 2010 y un 52% en 2020 en la venta de receptores.
- Las posibles fuentes de ingreso del sistema Galileo. En los estudios técnicos se definieron los servicios que prestaría el sistema, y de ellos se deben obtener los ingresos capaces de financiar el proyecto. La Unión Europea podría establecer además un impuesto para todos los productos GNSS que se vendan en Europa, obteniendo así los ingresos necesarios para sufragar el sistema, conjuntamente con los ingresos obtenidos por los servicios de pago.

³⁰ VAN del 2001

³¹ Normalmente las contingencias tienen un valor de entre el 10% y el 20% de los costes

En la Figura 4.5 se muestra la estimación de venta de productos GNSS en distintas partes del mundo, como se puede ver, Europa tiene un amplio mercado del que se podrían obtener ingresos a través del pago de impuestos o royalties en el caso de la fabricación de productos para Galileo.

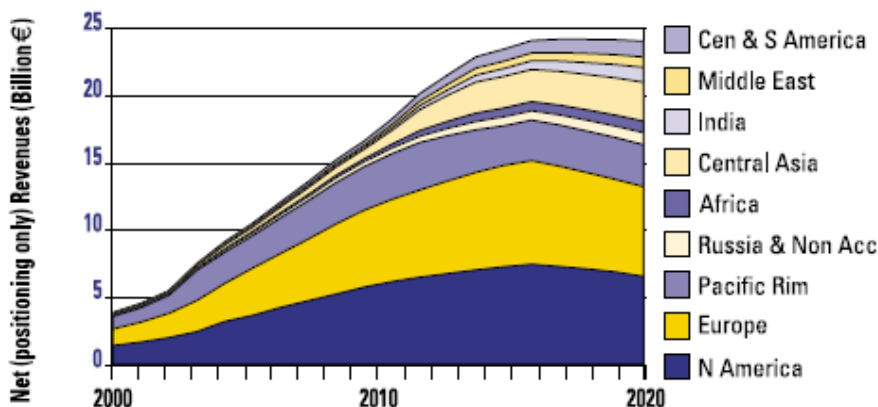


FIGURA 4.5 Estimación de ingresos por venta de productos GNSS en todo el mundo ^[22]

Entre las propuestas de financiación del proyecto recogidas en el informe elaborado en 2001 por PriceWaterHouseCoopers, se incluyen distintas fuentes de ingresos que se pueden ver en la Figura 4.6. Los ingresos provendrían de los royalties en la fabricación de chips en receptores Galileo, de los servicios de pago, en los que los proveedores de dichos servicios pagarían a la UE, y del sector público, es decir de los distintos países de la UE que podrían financiar parte del proyecto. La gestión de los fondos de financiación del proyecto correría a cargo de un consorcio la Galileo Operating Company.

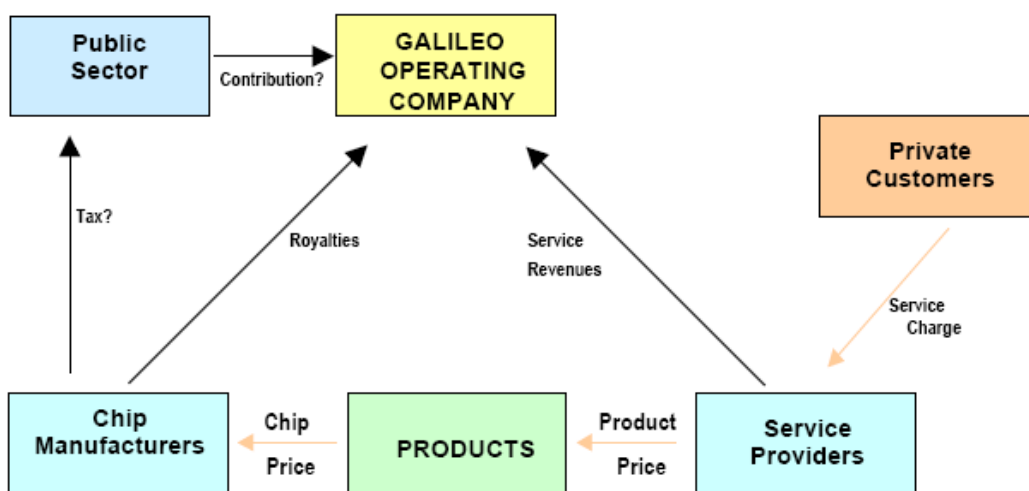


FIGURA 4.6 Fondos de financiación del proyecto Galileo ^[21]

En la siguiente Tabla se recogen bajo estos supuestos las previsiones que se llevaron a cabo en 2001 sobre los ingresos que podría obtener la UE del sistema Galileo. La evolución de estos ingresos sigue la tendencia mostrada por el estudio de mercado, un

mercado que al principio obtiene sus ingresos sobre todo por la venta de productos (año 2010), para evolucionar hacia un mercado de productos y servicios casi por igual.

Tabla 4.3 Estimación de ingresos para la UE de Galileo ^[21]

Millones € 2001	2010	2015	2020
Ingresos por servicios	6	70	200
Ingresos por productos	60	300	315
TOTAL	66	370	515

Ahora hay que analizar si se puede financiar el proyecto a partir de los costes de inversión y los ingresos que se espera obtener de él. Con los costes previstos anteriormente, la proyección financiera del proyecto Galileo se puede observar en la siguiente gráfica, donde se observa el flujo neto operativo, resultado de restar a los ingresos previstos los costes necesarios para poner en marcha el sistema.

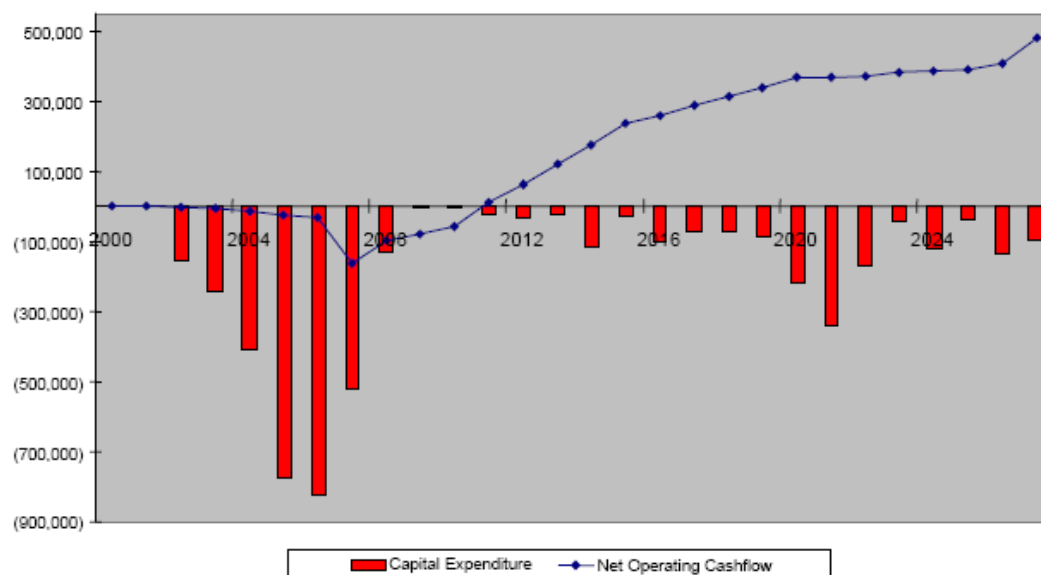


FIGURA 4.7 Flujo de caja previsto para Galileo ^[21]

El proyecto comenzaría a dar beneficios en 2011 suponiendo que tuviese la FOC en 2008, y la TIR prevista es del 4.1%. No es muy elevado y por tanto sería recomendable para las fases de despliegue y operación se creara un estructura público privada que financiase el proyecto y diversificara entre ambos sectores los costes y riesgos. Es necesario por tanto buscar una fórmula de financiación que permita a la UE llevar a cabo el proyecto de la forma más óptima posible.

4.6.4 Análisis coste beneficio

Cuando un gobierno decide acometer un proyecto que tendrá un gran impacto social, debe cuantificar dicho impacto económicamente como medio de cuantificación del impacto o beneficio social que este produce. El proyecto Galileo tendría un impacto

importante en la sociedad, como se ha visto en el estudio económico se espera que en 2020 el mercado de receptores sea de unos 3000 millones, y que especialmente en Europa haya un gran número de ellos.

Dado la gran cantidad de aplicaciones de los GNSS, los distintos sectores en los que tendrá impacto son muy amplios, en el estudio llevado a cabo en 2001 se cuantificó dicho impacto de la siguiente manera.

Tabla 4.4 Estimación de beneficios de Galileo ^[21]

Beneficio Millones € 2001	Valor anual		VAN
	2010	2020	2008-2020
Tráfico aéreo			
Ahorro para compañías	166	3381	7476
Ahorro para pasajeros	82	1667	5447
Navegación marítima	81	2638	4864
TOTAL	329	7686	17787

Los principales sectores que en los que se producirán beneficios son los sectores de navegación marítima, aérea y terrestre, en especial en los dos primeros. La UE con una flota de más de 10000 barcos mercantes y 25000 empleados en las primeras compañías de Ferrys se beneficiará de la gestión del tráfico, el trazado de rutas, y actividades como la pesca o la oceanografía se beneficiarán de las aplicaciones de Galileo. El sector de la aviación con más de 5000 aviones de pasajeros se beneficiará de los sistemas de guiado más precisos incluso en la pista de aterrizaje. También diversos sectores como el energético, agrícola, de telecomunicaciones, o banca se beneficiarán del sistema Galileo. Todas estas aplicaciones tienen un impacto económico positivo a través del abaratamiento de costes por el uso más eficiente de recursos, y el desarrollo de un nuevo mercado con múltiples oportunidades de negocios. Los GNSS mejorarán la calidad de vida en los países que inviertan en el desarrollo de proyectos basados en esta tecnología.

Como se puede ver el VAN en 2001 era de 17800 millones de euros aproximadamente, teniendo en cuenta que el coste del proyecto se estimó en 3400, se estimó en el estudio que para un coste de 3900 millones (siendo conservadores), el ratio beneficio:coste era de 4.6. Lo que es un ratio más que suficiente para justificar los beneficios que aportaría un sistema de navegación propio para la UE.

4.6.5 Conclusiones

En el estudio económico realizado se han estimado costes, proyecciones financieras del proyecto y se ha llevado a cabo un análisis coste beneficio. De todo ello se concluye que:

- El proyecto Galileo ofrece un ratio beneficio-coste lo suficientemente amplio como para llevarlo a cabo.
- Los ingresos de su explotación son elevados dado la gran cantidad de aplicaciones que tiene y las distintas fuentes de las que se puede obtener financiación (Figura 4.6).

- La financiación del proyecto ofrece una TIR baja, por lo que la UE debe financiarlo con capital público en las fases de desarrollo y/u operación. No se puede esperar que el sector privado se haga cargo del sistema por completo.
- Permitirá que diversos sectores de la economía europea se beneficien de él a través del desarrollo de diversas aplicaciones, abaratando costes e impulsando un nuevo mercado de aplicaciones GNSS.

4.7 Estudio estratégico del proyecto Galileo

Los estudios previos de mercado y económico-financieros demuestran que los sistemas de navegación son una tecnología avanzada que evoluciona rápidamente y que el mercado está en el momento adecuado para invertir en ella. Europa a través de la Comisión Europea y en conjunto con la ESA debe apostar por un sector lleno de posibilidades por diversas razones estratégicas:

- Europa debe ser un actor de peso en el panorama internacional a la hora de tomar decisiones referentes a esta tecnología, en cuanto a regulación internacional, ya sea a través de la ITU, o prestaciones de servicios, así como convenios con distintos países.
- Europa debe ser independiente de otros sistemas. La importancia de esta tecnología que proveerá de multitud de servicios y aplicaciones en un futuro, hace necesario el desarrollo de un sistema propio que evite que las prestaciones de éstos estén comprometidas por la dependencia de terceros. Galileo garantiza independencia política, respecto de otros países propietarios de GNSS, a la UE.
- Galileo dará un impulso económico a los países de la UE, fomentando la creación de empresas y puestos de trabajo.
- Galileo ayudará a mejorar la vida de los ciudadanos mediante diversos servicios como LBS, SoL o gestión de flotas.
- Por otro lado, las posibles aplicaciones tendrán un profundo impacto en diversos sectores mejorándolos positivamente: permitiendo optimizar desde la distribución de energía en una red eléctrica, a la mejora de redes de comunicaciones, la gestión más efectiva del transporte, o la monitorización de recursos para su uso más eficiente.

Son múltiples y muy distintas las razones que hacen que Galileo sea un sistema no sólo recomendable sino necesario para el futuro de la UE.

5 Conclusiones y trabajo futuro

En el presente proyecto se han estudiado los sistemas de navegación por satélite. A lo largo del mismo se ha presentado la historia de estos sistemas, porqué surgieron, como evolucionó el campo de posibles aplicaciones de los mismos, y la historia de cada sistema. Posteriormente se han analizado y comparado la composición de cada sistema en sus distintos segmentos y se han abordado aspectos técnicos concernientes a la regulación internacional de esta tecnología y a la normativa de cada sistema en particular. Por último se ha abordado un estudio de viabilidad de un sistema en particular, que pretende demostrar la rentabilidad que supone desarrollar un sistema de este tipo.

Si bien en la actualidad nuevos GNSS están siendo desarrollados, como el COMPASS chino, en el proyecto se ha optado por presentar los GNSS-1, es decir, la primera generación de GNSS formada por GPS y GLONASS, y el primer GNSS-2, Galileo, el sistema europeo, que encabeza la segunda generación de estos sistemas. Esto es así porque el estudio de los GNSS-1 permite tener una visión global de los sistemas de navegación en la actualidad, mientras que el estudio de un GNSS-2 permite entender hacia dónde evoluciona esta tecnología, mediante la prestación de nuevos servicios a través de nuevas señales de navegación.

La estructura del proyecto es la propia de un libro. El proyecto se ha dividido en capítulos de forma que permita un acercamiento a esta tecnología sin tener conocimientos previos. Cada uno de ellos presenta una introducción en la que se han expuesto los objetivos del capítulo y su posible relación con otros, facilitando así la lectura del proyecto en su totalidad, ya que el lector puede optar por leer la parte que más le interese en un momento dado.

El proyecto también pretende mostrar la relación de los sistemas de navegación con asignaturas estudiadas en la carrera a través de los apéndices, en los que se explica brevemente contenido teórico necesario para entender algunas partes del proyecto. Sería interesante en algunas asignaturas citar estos sistemas como ejemplos de aplicación de la teoría vista en la carrera.

Para elaborar este proyecto, se ha llevado una tarea de investigación exhaustiva, se han consultado multitud de referencias que se citan en la Bibliografía, algunas de las cuales son bastante útiles para propósitos académicos. Sería conveniente que la Escuela adquiriese algunos de ellos para cubrir así el campo de los sistemas de navegación. En concreto las Referencias [51], [52], [53] de la presente Bibliografía.

Como trabajo futuro se propone un seguimiento de esta tecnología, ya que está evolucionando rápidamente en cuanto a servicios y señales. Se propone también trabajos de tipo técnico, bien sea desarrollo de sistemas receptores o de aplicaciones para estos sistemas, para ello es necesario consultar el Documento de Interfaz de cada sistema que especifica todas las características de las señales emitidas. También es posible realizar trabajos más sencillos a partir de simulaciones en el ordenador, sobre las prestaciones de estos sistemas o sobre aplicaciones de los mismos.

Los sistemas de navegación ofrecen, por tanto, un futuro lleno de posibilidades para los ingenieros de telecomunicación, ya que es un sector multidisciplinar en el que existen multitud de posibles trabajos en organismos de regulación, empresas dedicadas a la fabricación de hardware, prestación de servicios y aplicaciones, o agencias internacionales como la ESA. Existen ya distintos cursos formativos impartidos en universidades de todo el mundo sobre esta tecnología, así como Masters de especialización en GNSS, un ejemplo es el Master on Navigation and Related Applications que se imparte en el Politecnico di Torino en colaboración con la ONU y en el que participa el centro de investigaciones de Motorota.

Estos años son el momento clave de desarrollo de una tecnología que revolucionará nuestra vida al igual que lo hicieron Internet o la telefonía móvil, tecnologías junto con las que se integrarán los GNSS para ofrecer distintos servicios.³³ Con el reciente acuerdo firmado por los distintos países de la Unión Europea para llevar a cabo Galileo en noviembre de 2007, por el cual España obtiene un centro destinado a misiones “Safety-of-Life” pero con posibilidad de ser un centro de control maestro como los de Alemania e Italia, el sector de los GNSS se transforma en una realidad que cobrará cada vez más importancia y puede generar multitud de puestos de empleo en España. Un conocimiento previo de la misma será una ventaja competitiva para encontrar trabajo en este sector y conocer las posibilidades de desarrollo profesional que existen en él.

³³ Ejemplos de integración de los GNSS con las telecomunicaciones en [43]

6 Apéndice A. Teoría de la Información

6.1 Definiciones matemáticas

6.1.1 Capacidad de canal

Se conoce en Teoría de la Comunicación a la Capacidad de un canal, como la velocidad por la que se pueden transmitir los datos a través de este o el flujo de datos que por él se puede transmitir.

La fórmula de la Capacidad máxima de canal la definió Shanon en 1949:

$$C = W \cdot \log\left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

De ella se deduce que el canal está limitado por 3 parámetros que son W (ancho de banda), S (potencia de la señal emitida), N (potencia de ruido del canal). Suele medirse en bits/s o en Baudios (símbolos/s).

6.1.2 Función de autocorrelación

La función de autocorrelación es una fórmula matemática que permite medir la correlación entre dos variables. La función de autocorrelación tiene la siguiente expresión:

$$R_f(\tau) = f^*(-\tau) \circ f(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t + \tau) f^*(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) f^*(t - \tau) dt$$

Donde $f(t)$ es la función, $f^*(t)$ su conjugado ($f^*(t) = f(t)$ para señales reales) y la función de autocorrelación la convolución de ambas.

La función de autocorrelación permite encontrar patrones repetitivos dentro de una señal, como por ejemplo, la periodicidad de una señal enmascarada bajo el ruido o para identificar la frecuencia fundamental de una señal que no contiene dicha componente, pero aparecen numerosas frecuencias armónicas de ésta.

Se dice que dos señales son ortogonales si su función de autocorrelación cumple que $R_f(\tau) = 1$ si $\tau = 0$ y $R_f(\tau) = 0$ si τ no es 0. Este tipo de señales son muy útiles a la hora de discriminar distintos patrones mediante la correlación cruzada de dos señales (correlar dos señales distintas) cuando una de las señales es desconocida.

6.2 Tipos de modulación

6.2.1 BPSK

La modulación BPSK es una modulación digital que se basa en el cambio de fase de la portadora cuando cambia el dato que le llega. Es el caso más simple de todas las posibles modulaciones PSK ya que posee sólo dos estados que se corresponden con el valor de un bit: “0” y “1”. Esto se aprecia en la siguiente Figura.

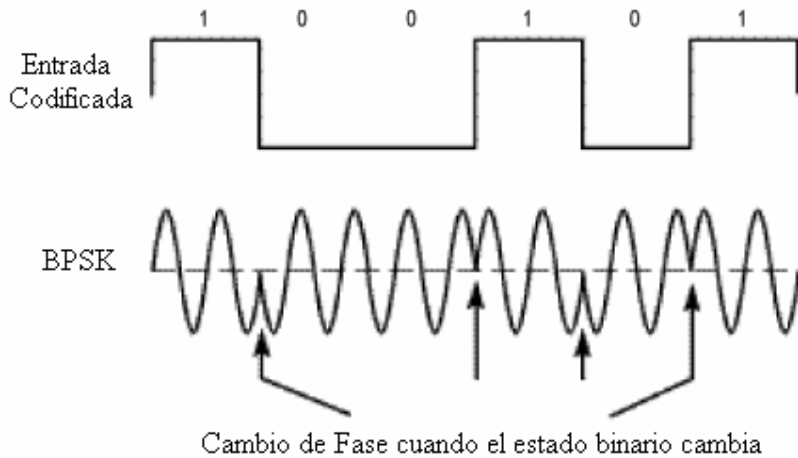


FIGURA 6.1 Modulación BPSK ^[37]

En las señales de navegación el cambio de fase viene dado por un tren de bits que está formado por normalmente por la suma en módulo-2 de la secuencia PRN y el mensaje de navegación.

6.2.2 BOC

La modulación BOC es una modulación de espectro expandido que surge con los nuevos GNSS, la segunda generación GPS y Galileo. Las señales BOC surgen principalmente debido a las propiedades de autocorrelación que tiene, que la hacen más resistente frente a los efectos del multitrayecto y mejor frente a ruido que la modulación BPSK. Además permite compartir de esta forma el ancho de banda con un mayor número de señales, ya que en un futuro habrá tres GNSS compartiendo el mismo ancho de banda.

Una señal modulada con la técnica BOC consiste en una portadora sinusoidal, una subportadora, un código PRN y la secuencia de datos. La modulación BOC proviene de la modulación BPSK introduciendo la subportadora.

Toda modulación BOC se define en base a dos parámetros f_s o frecuencia de la subportadora y f_c o frecuencia de chip. Ambas se diseñan siempre como múltiplo de f_0 , que es la frecuencia a la que funciona el reloj atómico del satélite:

$$f_s = m \cdot f_0, f_c = n \cdot f_0$$

La modulación BOC(f_s , f_c) estándar define una función:

$$s(t) = \exp(-i\theta) \sum_j a_j \cdot \mu_{kT_s}(t - jkT_s - t_0) \cdot c_{T_s}(t - t_0)$$

donde $s(t)$ es el resultado de la modulación de:

- $\exp(-i\theta)$ es la senoide que envuelve el tren de bits.
- $c_{T_s}(t)$ donde $c_{T_s}(t)$ es la subportadora de período $2T_s$.
- $\mu_{kT_s}(t)$ el símbolo resultado del código PRN y la señal de datos con duración $T_c = kT_s$ siendo k la relación entre el tiempo de chip y el tiempo de portadora.

En la Figura se puede observar el tren de bits resultado de una modulación BOC para $f_s=5$ y una $f_{\text{chip}}= 3$. En este caso sólo se habría empleado el código PRN para la modulación, es decir el canal estaría dedicado a la portadora.

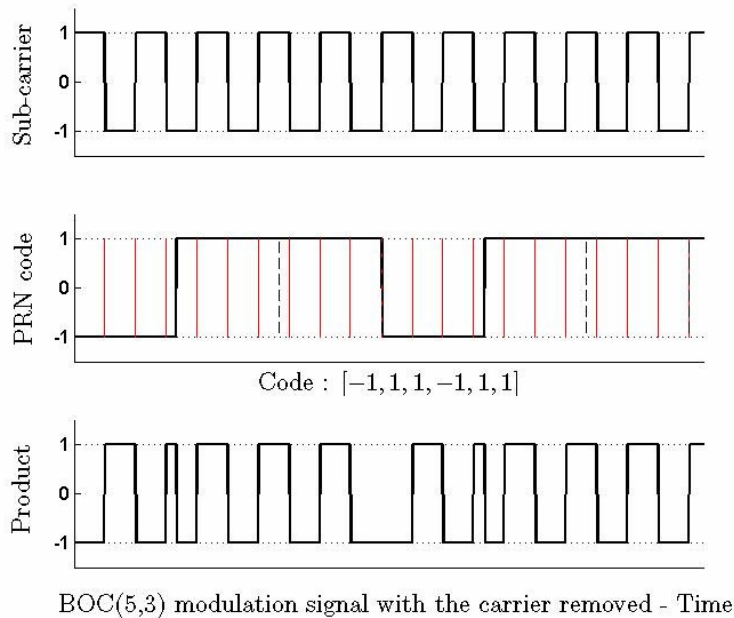


FIGURA 6.2 Modulación BOC sin portadora ^[38]

En el sistema Galileo se emplea dicho tipo de modulación y la notación BOC(15,10) hace referencia a una señal cuya frecuencia es $15 \cdot f_0$ y de tasa de chips $10 \cdot f_0$, siendo $f_0=1.023$ MHz.

6.2.3 Espectro ensanchado

El espectro ensanchado es una técnica para transmitir señales con muy poca potencia en un gran ancho de banda. Esta técnica se basa en la definición de capacidad de canal, ya que se puede intercambiar un parámetro como es el ancho de banda W , por otro como la potencia transmitida S , sin perder capacidad de transmisión.

Las técnicas de modulación de espectro ensanchado son poco óptimas en cuanto al uso de ancho de banda en el que se transmite la señal, pero presentan una serie de ventajas:

- Resiste a interferencias.
- Capacidad de compartir el ancho de banda con otras señales.
- Inmune al multitrayecto.
- Privacidad debido a la codificación de su información.

Es por ello que el espectro ensanchado es muy adecuado para la transmisión de información por satélite, donde las pérdidas de propagación son muy altas, y el ancho de banda es compartido por distintos satélites. Existen distintas técnicas para modular una señal en espectro ensanchado: GPS y Galileo usan DSSS, Y GLONASS usa FHSS.

- **DSSS:** la señal que se desea expandir se multiplica por un código de frecuencia mayor que ésta. Se puede observar en la siguiente Figura.
- **FHSS:** la señal se modula con una portadora cuya frecuencia varía en función del código.

Los códigos en ambos casos deben tener unas propiedades de autocorrelación y correlación cruzada que permitan que sólo el usuario conocedor del código recupere la información modulada para él. Cuanto más se aproxime la autocorrelación de un código a la de los códigos ortogonales mejor será el código, ya que se podrá distinguir más fácilmente del resto.

En el caso de los sistemas de navegación el método empleado es el DSSS siendo el código empleado la secuencia PRN. Los anchos de banda empleados varían de un sistema a otro.

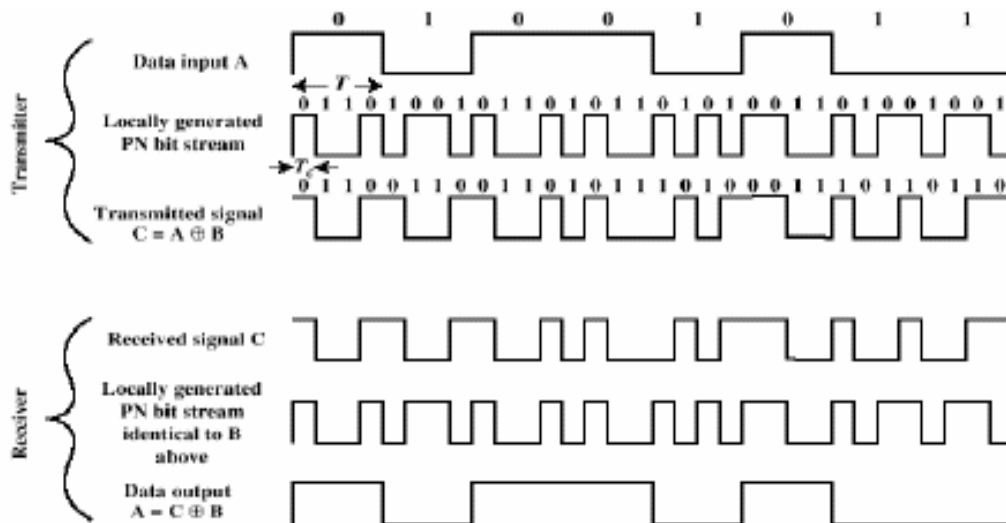


FIGURA 6.3 Codificación DSSS ^[40]

6.3 Técnicas de acceso múltiple

Las técnicas de acceso múltiple son aquellas que permiten hacer uso de un recurso, el espectro de radiofrecuencia, a múltiples usuarios al mismo tiempo. Existen diversas técnicas teniendo en cuenta que toda comunicación tiene un volumen tridimensional en tiempo (lo que dura la comunicación) en espacio (la potencia con la que se irradia la señal y que abarca un cierto espacio) y frecuencia (la banda del espectro que se usa para establecer la comunicación).

Se han diseñado tres técnicas que dividiendo uno de estos recursos permiten compartir el canal a múltiples usuarios:

- **SDMA:** Space Division Multiple Access. Utilizado en comunicaciones por satélite ya que estos prestan cobertura en un segmento de la Tierra.
- **TDMA:** Time Division Multiple Access. Utilizado en redes GSM conjuntamente con FDMA.
- **FDMA:** Frequency Division Multiple Access. Utilizado en comunicaciones por satélite.

Un cuarto método diseñado es el CDMA que permite compartir el espectro sin tener que dividir ninguno de los recursos anteriores, sino que permite el acceso múltiple a través de códigos. Esto tiene una serie de ventajas que ya se han citado en la técnica de espectro ensanchado. CDMA es muy utilizado en telefonía móvil y comunicaciones por satélite.

En los sistemas de navegación hemos visto que se emplean las técnicas FDMA en GLONASS, donde cada satélite transmite a su propia frecuencia, y CDMA en GPS y Galileo.

6.3.1 FDMA

El acceso múltiple por multiplexación en frecuencia consiste en dividir un rango de frecuencias en canales de tal manera que se puedan transmitir distintas señales a la vez por diferentes portadoras sin que interfieran la una con la otra.

Los sistemas FDMA son fáciles de implementar, pero por el contrario su configuración es rígida ya que cada transmisor sólo puede usar su frecuencia conocida para enviar las señales.

En el caso de GLONASS el ancho de banda asignado se divide entre los satélites que forman la constelación, transmitiendo cada satélite en su propia portadora.

6.3.2 CDMA

Esta técnica de acceso múltiple emplea códigos digitales únicos para diferenciar a los distintos usuarios, en lugar de frecuencias separadas. La técnica CDMA es una técnica que hace uso de la modulación por espectro ensanchado, y su funcionamiento es igual al de DSSS ya que los códigos de cada comunicación se transmiten a una frecuencia (bps) mucho mayor que la de los datos que porta. La Figura 6.3 es igualmente válida para comprender como funciona CDMA.

CDMA ofrece las ventajas de la modulación de espectro ensanchado pero permite además usar el espectro de frecuencias de manera óptima ya que las distintas comunicaciones en espectro expandido se transmiten por un mismo canal o banda de frecuencia sin que unas interfieran con las otras.

Tanto GPS como Galileo hacen uso de esta técnica a través del uso de los códigos PRN propios de cada satélite. Los receptores deben identificar dichos códigos para recibir la información de cada satélite. La información de este proceso se encuentra en el Apéndice C.

6.4 Codificación de canal

La codificación de canal es un método que nos permite detectar o corregir fallos que se producen en la transmisión de la información debido a las perturbaciones de un canal. El proceso que se lleva a cabo en el emisor consiste en añadir bits a la secuencia generada de tal forma que el receptor sea capaz de detectar o corregir los fallos que se han producido gracias a ese código.

Existen dos tipos de mecanismos de corrección de errores:

- **ARQ:** son códigos capaces de detectar errores y pedir la retransmisión de la información al emisor.
- **FEC:** códigos detectores capaces de corregir fallos en recepción.

También es necesario hacer una diferenciación entre los distintos tipos de códigos:

- **Códigos sistemáticos:** aquellos códigos en los que la palabra de información aparece de forma explícita en la palabra codificada.
- **Códigos no sistemáticos:** aquellos códigos en los que la palabra de información no aparece de forma explícita en la palabra codificada.
- **Códigos de bloque:** aquellos códigos en los que todas las palabras tienen la misma longitud y la codificación se hace de forma estática.
- **Códigos lineales:** aquellos en los que cualquier combinación lineal de palabras de código válida (por ejemplo la suma módulo 2) produce otra palabra válida.
- **Códigos cíclicos:** aquellos en los que cualquier desplazamiento cíclico de una palabra de código da lugar a otra palabra de código.
- **Códigos convolucionales:** son códigos lineales, donde la suma de dos palabras de código cualesquiera también es una palabra de código. Y al contrario que con los códigos lineales, se prefieren los códigos no sistemáticos.

De estos dos métodos los sistemas de navegación utilizan el método FEC, ya que es un sistema sin retorno y es cada receptor el que debe corregir los errores debido al canal, con códigos convolucionales.

6.4.1 FEC con codificación convolucional

El método de corrección de errores FEC se emplea en los sistemas de navegación con un esquema de codificación convolucional. Este tipo de esquema es muy apropiado para entornos donde se producen gran cantidad de errores debido al ruido del canal. Este es el caso de las comunicaciones por satélite.

En la codificación convolucional los bits se van codificando tal y como van llegando al codificador. Es una codificación con memoria, es decir la codificación de un bit depende de los anteriores.

La decodificación para este tipo de código es compleja ya que en principio, es necesaria una gran cantidad de memoria para estimar la secuencia de datos más probable para los bits recibidos. En la actualidad se utiliza para decodificar este tipo de códigos el algoritmo de Viterbi, por su gran eficiencia en el consumo de recursos.

A continuación vamos a analizar los códigos convolucionales a partir de un ejemplo. La información que se muestra ahora, así como las Figuras y Tablas han sido extraídas de la referencia [39] de la Bibliografía, y lo que se ofrece es un resumen de esta referencia con un breve comentario sobre la aplicación de los códigos convolucionales en comunicaciones por satélite al final de la misma.

Un código convolucional queda especificado por tres parámetros (n,k,m) :

- **n** es el número de bits de la palabra codificada.
- **k** es el número de bits de la palabra de datos.
- **m** es la memoria del código o longitud restringida.

El esquema de codificación es el siguiente:

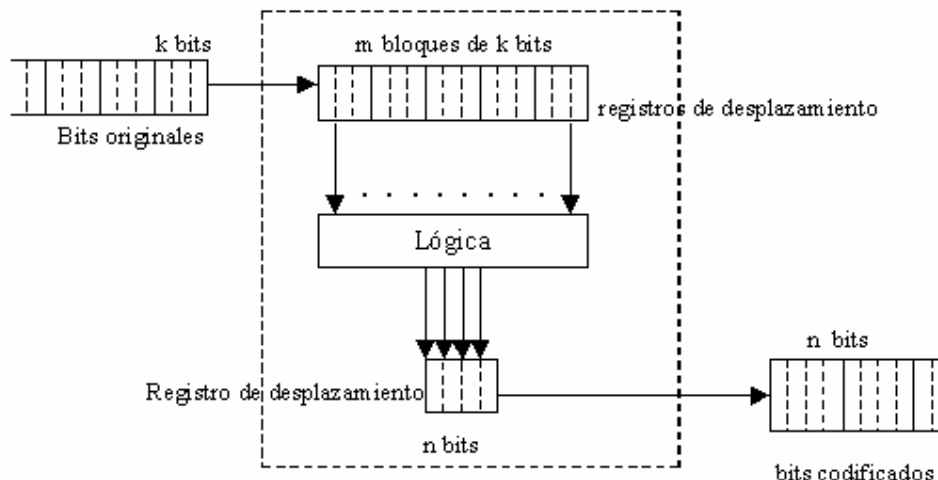


FIGURA 6.4 Codificación convolucional ^[39]

Veamos un ejemplo de cómo funciona un codificador convolucional (2,1,3). En la siguiente Figura se puede observar el diagrama de bloques en el que S1,S2,S3 representan los 3 bits de entrada y O1,O2 las salidas que estos producen.

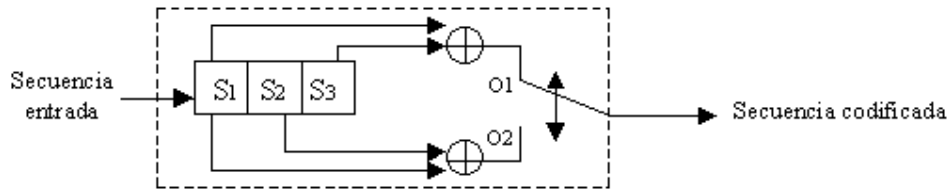


FIGURA 6.5 Codificador convolucional (2,1,3) ^[39]

- El conmutador con las dos entradas hace el papel de un registro de desplazamiento de dos estados.
- El código convolucional es generado introduciendo un bit de datos y dando una revolución completa al conmutador.
- Inicialmente se supone que los registros intermedios contienen ceros.

Los datos entran por S1 y cada vez que entra un dato se produce en la salida O1 y O2 como resultado de la suma de módulo-2 de los tres registros intermedios. Las secuencias de salida para el código anteriormente descrito son:

Tabla 6.1 Secuencia de salida para un codificador convolucional ^[39]

Entrada (S3,S2,S1)	Salida (O1,O2)
000	00
001	11
010	01
011	10
100	10
101	01
110	11
111	00

La información de los posibles estados del codificador se recoge en el diagrama de Trellis, que es un diagrama en forma de red. Cada línea horizontal se corresponde con uno de los estados del codificador, se supone que las entradas $S_1 \dots S_n$ están a 0 lógico y que desde el estado A podemos movernos al siguiente estado con 0 ó 1 y así sucesivamente en cada estado j-ésimo al siguiente. Cada línea vertical se correspondería con una de las posibles transiciones de ese estado al siguiente.

El diagrama de Trellis se aplica a la secuencia recibida y permite seguir las posibles secuencias origen que dan lugar a dicha secuencia. Para averiguar cual es la secuencia origen más probable, se aplica el algoritmo de Viterbi que pondera cada secuencia posible de origen con un valor igual a la distancia que tiene a la señal original en cada etapa, escogiendo la señal que tenga una menor distancia con respecto a la recibida. Este algoritmo se explica a continuación.

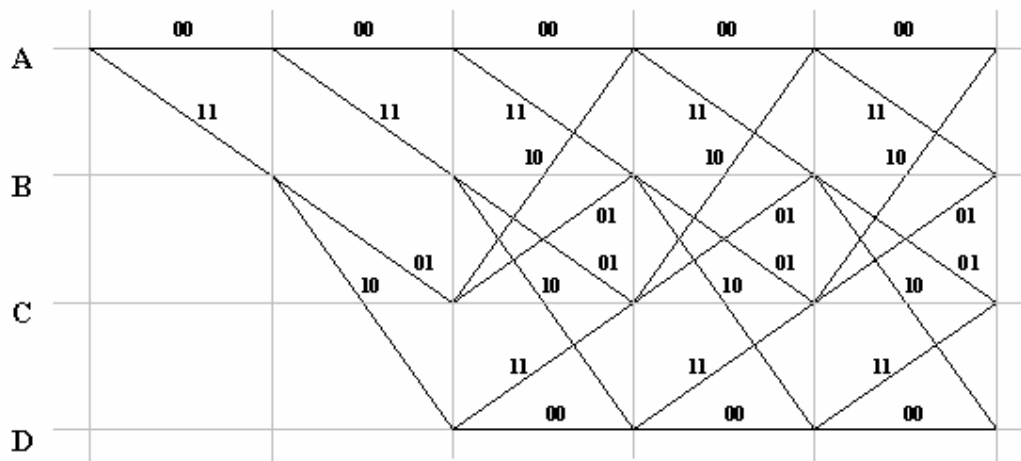


FIGURA 6.6 Diagrama de Trellis ^[39]

Para realizar la decodificación se utiliza un algoritmo denominado Algoritmo de Viterbi como hemos mencionado anteriormente. El fundamento de este algoritmo está en que no se almacenan todas las secuencias a las que da lugar el codificador. Se basa en el principio de optimalidad: el mejor camino a través del diagrama de Trellis que pasa por un determinado nodo, necesariamente incluye el mejor camino desde el principio del diagrama de Trellis hasta este nodo. El principio anterior implica que para cada uno de los nodos del diagrama de Trellis sólo es necesario guardar el mejor camino (secuencia) hasta ese nodo.

Descripción del algoritmo de Viterbi:

- **Paso 1:** en el nivel j , calcular la distancia de Hamming de cada camino entrante en cada nodo (estado) desde el nodo del nivel $j-1$ hasta el nodo del nivel j a través del camino superviviente.
- **Paso 2:** para cada nodo (estado) del diagrama de Trellis en el nivel j , descartar todos los caminos que entran en el nodo, excepto el de distancia mínima. Cuando a un nodo llegan dos caminos con la misma distancia se toma el superior.
- **Paso 3:** pasar al nivel $j+1$ y repetir los pasos 1 y 2.

Elaboramos el Diagrama de Trellis poniendo en la parte superior la señal recibida y siguiendo este algoritmo de Viterbi resolvemos.

Siguiendo el ejemplo anterior, si para la secuencia recibida tenemos “11 01 00 11 11 00 11”, aplicando el algoritmo de Viterbi para calcular la secuencia origen obtendríamos “11 01 10 11 10 00 11”, que sería la que tiene una menor distancia de Hamming ($d_H=2$) con respecto a la señal recibida. Sin embargo la señal origen real es “00 11 01 10 10 01 11 00” cuya distancia es mucho mayor. Por tanto el algoritmo de Viterbi no nos garantiza recuperar la señal original sino la más cercana sin error.

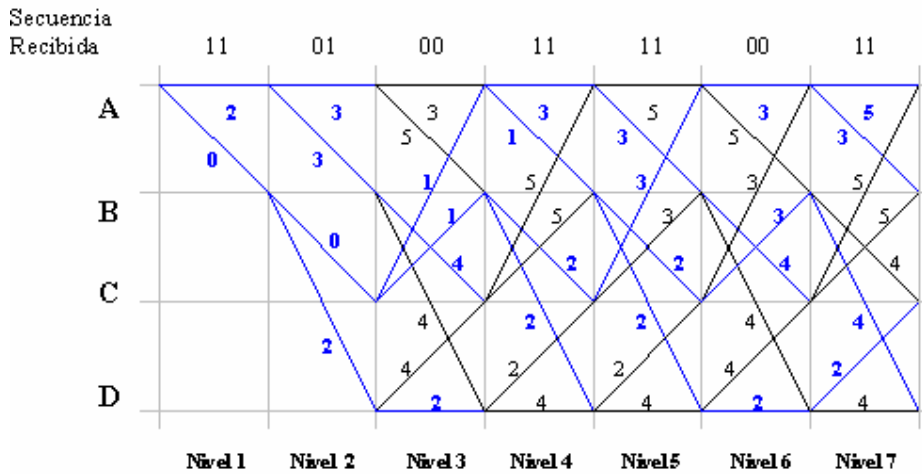


FIGURA 6.7 Diagrama de Trellis con todos los caminos posibles para una secuencia recibida ^[39]

Una vez hemos llegado al final, escogemos el camino que nos da la distancia más corta en el último nivel, en este caso 2. Seleccionado el camino, eligiendo el bit que provoca la transición de estado entre dos niveles comenzando desde el primer nivel hasta el último se obtiene la secuencia de bits que es la cadena decodificada.

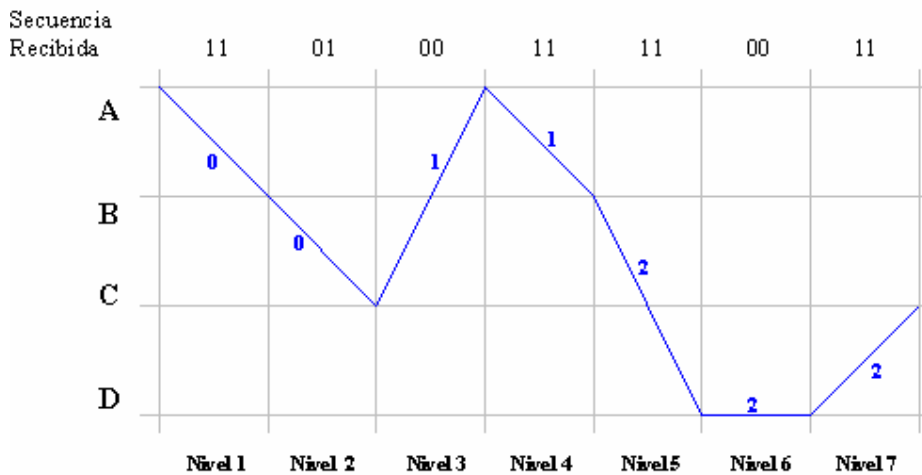


FIGURA 6.8 Diagrama del camino más corto ^[39]

El esquema FEC con codificación convolucional 1/2 es empleado en GPS y Galileo como método de codificación de canal, y emplea el algoritmo de Viterbi para decodificar la información recibida.

7 Apéndice B. Radiación y Radiocomunicación

7.1 Radiopropagación

Los sistemas de navegación por satélite son sistemas que emiten señales electromagnéticas localizadas en distintas partes del espectro de frecuencias, que, como ya se ha visto en 3.2, son repartidas por la ITU. En el mismo capítulo se ha visto también las especificaciones técnicas de cada radioenlace definido para cada uno de los sistemas vistos (GPS, GLONASS y Galileo) en cuanto a frecuencia y potencia en recepción, de tal manera que estas especificaciones son las que deben cumplir las señales transmitidas para que, en el segmento de tierra y usuario, teniendo el equipo adecuado, dichas señales puedan ser decodificadas.

En este primer apartado del apéndice se examinan los aspectos relacionados con la propagación de dichas ondas en el espacio, en lo relativo a pérdidas que existen desde que se emite la señal hasta que se recibe. El contenido de este apartado está relacionado con [27].

7.1.1 Propagación de la onda en el espacio

Las ondas electromagnéticas que son emitidas por los satélites deben atravesar el espacio y la atmósfera hasta llegar a la antena receptora GNSS. En el espacio la velocidad de propagación es la de la luz, mientras que en las distintas capas de la atmósfera, la ionosfera y la troposfera, la velocidad es menor, lo que causa retardo y por tanto errores de multitrayecto. Además en la ionosfera la concentración de iones causa perturbaciones que también introducen cierto error en la señal.³⁴

El balance de potencia en el enlace se obtiene a través de la fórmula:

$$\frac{E_b}{N_o}(dB) = PIRE(dBW) - L_{bf}(dB) - L_{ad}(dB) + \left(\frac{G}{T}\right)(dB) + 228,6 - 10 \log V_b(b/s) + G_p(dB)$$

Donde:

- $L_{bf}(dB)$ se obtiene a través de la fórmula de Friis como las pérdidas de propagación en espacio libre. Se calcula a partir de la distancia de los satélites a Tierra.
- $L_{ad}(dB)$ son las pérdidas adicionales de propagación, debidas a la atmósfera, lluvia, obstáculos hasta el receptor, polarización, pérdidas intrínsecas de transmisor y receptor o condiciones del terreno. Las pérdidas debidas a la atmósfera dependen de la inclinación del satélite.

³⁴ Más información en [42] y [44]

- $V_b(b/s)$ es la velocidad de datos de la señal en bits por segundo, que en el caso de los sistemas GNSS viene determinado por la velocidad a la que se transmite el mensaje (50bps en GPS).
- $PIRE$ (dBW) es la potencia isotrópica radiada por la antena. Es la propia de cada satélite. Típicamente es de 25 dBW en los primeros satélites GPS y GLONASS y en los de nueva fabricación se pretende que sea de 28 dBW.
- $G_p(dB)$ es la ganancia de proceso que se obtiene como $10\log(W_c/W_d)$, donde W_c es la tasa de chips y W_d la tasa binaria V_b .
- $\left(\frac{G}{K}\right)_{dB} = 10 \log\left(\frac{g}{K}\right)$ Es la ganancia de la antena receptora con respecto a la temperatura a la que se encuentra en grados K.

A partir de esta fórmula se puede calcular la potencia en recepción de la señal de cada satélite. La variación de dichos parámetros provocará que la señal en recepción sea mayor o menor que el umbral establecido en el documento de interfaz de cada sistema, si es mayor se podrá extraer la información de la señal, mientras que si es menor, será imposible extraer información de dicha señal.

7.1.2 Potencia recibida

En la siguiente Tabla se puede observar el balance de potencia de las señales L1 y L2 del sistema GPS. En ella se muestran la Potencia Umbral en recepción que puede diferir ligeramente de la presentada en el interfaz del Capítulo 3 por la presuposición en éste de 5° de inclinación del receptor.

Tabla 7.1 Balance de Potencia de las señales de navegación GPS L1 y L2 ^[46]

Parameter	L1 P-Code	L1 C/A-Code	L2 P-Code
User minimum received power	-163.0 dBw	-160.0 dBw	-166.0 dBw
Users linear antenna gain	3.0 dB	3.0 dB	3.0 dB
Free-space propagation loss	184.4 dB	184.4 dB	182.3 dB
Total atmospheric loss	2.0 dB	2.0 dB	2.0 dB
Polarization mismatch loss	3.4 dB	3.4 dB	4.4 dB
Required satellite EIRP	+23.8 dBw	+26.8 dBw	+19.7 dBw
Satellite Antenna gain at 14.3°	13.5 dB	13.4 dB	11.5 dB
worst case Block II off-axis angle			
Required minimum satellite antenna	+10.3 dBw	+13.4 dBw	+8.2 dBw
Input power	10.72W	21.88W	6.61W

Como se puede apreciar las pérdidas debido a las condiciones atmosféricas son muy pequeñas en comparación con las pérdidas de propagación en el espacio libre. La PIRE de los satélites ronda los 25dBW como habíamos anticipado, y la antena del mismo tenga entre 8 dBW y 13.5 dBW. Para la antena receptora, se presupone una ganancia de 3 dB. De la Tabla se extra la misma conclusión que en 3.3.2.2, y es que el código P(Y) es más robusto que el C/A.

7.2 Electrónica de comunicaciones

En este apartado se va a tratar el esquema de transmisor y receptor de GNSS, es decir, el diagrama de bloques de un equipo de comunicaciones necesario para transmitir y recibir la señal de navegación según las especificaciones de potencia y frecuencia dadas en el Documento de Interfaz. El contenido de este apartado está relacionado con [27].

7.2.1 Transmisor GNSS

En la Figura 3.3 se ha mostrado el proceso de generación de la señal de navegación de un satélite GPS a través de su radioenlace L1, a partir de los datos de navegación de éste. El esquema de generación de dicha señal, es el propio de un receptor heterodino, que genera primero la señal de información y la modula a frecuencia dada por el código PRN, y a continuación la modula en la frecuencia definida por el enlace. Sin embargo el transmisor de un satélite GNSS es más complejo, ya que modula información en distintas bandas de frecuencia (enlaces), y con distintos códigos PRN.

Así mismo en la Figura 3.11, se ha mostrado el diagrama de bloques de los satélites de prueba de Galileo, GIOVE, cuyo funcionamiento se ha explicado. Esta Figura ilustra perfectamente la complejidad de transmitir distintas señales, mencionada en el párrafo anterior. El satélite genera los datos de navegación y los modula con los códigos PRN correspondientes al enlace por el que se va a transmitir, posteriormente modula dicha información a la frecuencia correspondiente al enlace, resultando así la señal de navegación final.

7.2.2 Receptor GNSS

En la Figura 7.1 se muestra un diagrama de bloques de un receptor civil GPS. En él se presentan las funciones que éste lleva a cabo desde que recibe la señal hasta que decodifica el mensaje.

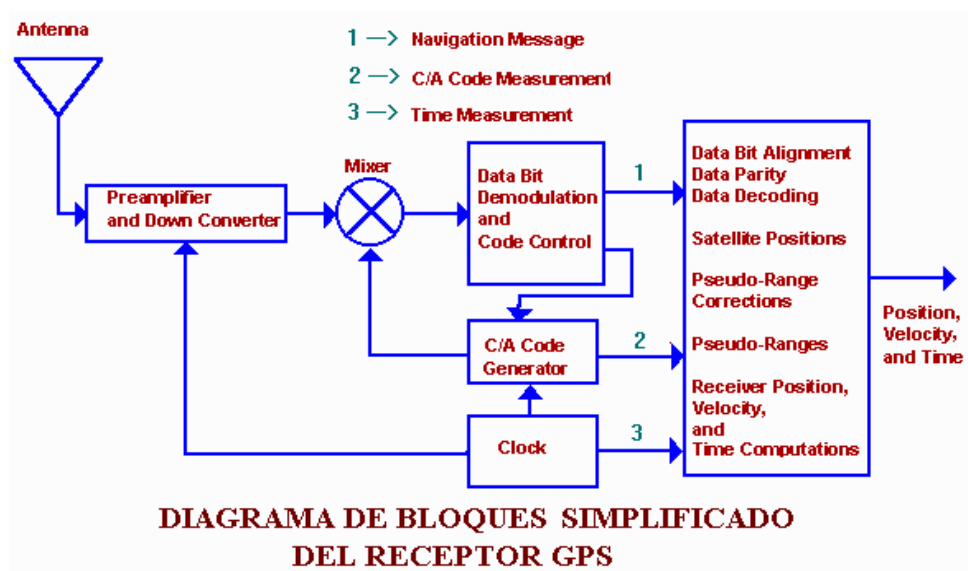


FIGURA 7.1 Diagrama funcional de un receptor GPS ^[11]

Como se puede observar la señal recibida es demodulada a la frecuencia de reloj (bloque 3), a través de osciladores, y se decodifica con el código que corresponda a ese satélite de entre los que tiene almacenado el receptor en el bloque 2. Cuando se obtiene la correlación máxima (autocorrelación), el bloque 1 se comienza a extraer la información del mensaje de navegación. En el Apéndice 8 se explica en detalle el proceso de adquisición del código PRN.

Se puede encontrar información más detallada sobre el proceso de recepción de una señal GPS en las Referencias [30] y [51] de la presente Bibliografía.

7.2.3 Ejemplos de receptores GNSS

En la actualidad existen multitud de fabricantes de receptores GPS. Dichos receptores varían en cuanto a número de satélites de los que pueden obtener una señal (conocido como número de canales) y en cuanto a memoria e interconexión del receptor con otros dispositivos, que determinan el conjunto de aplicaciones para las que sirve ese receptor (geodesia, servicios de localización, navegación, sincronización de equipos).

Como ejemplos se pueden citar receptores como el receptor GPS MN1818 de Micromodular Technologies, capaz de recibir señales de hasta 12 satélites distintos y adquirir dichas señales a gran velocidad. Sus especificaciones técnicas se pueden ver en la hoja de datos, Referencia [49] de la Bibliografía.

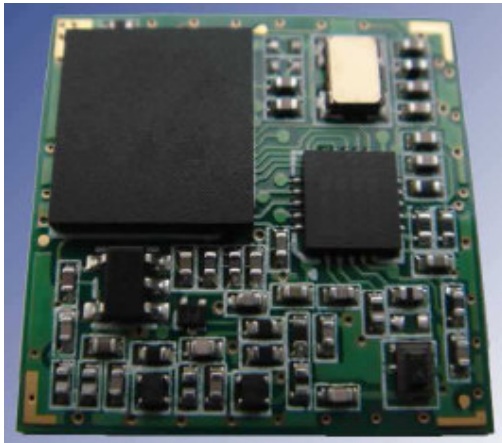


FIGURA 7.2 Receptor GPS MN1818 ^[49]

Otro ejemplo es el receptor MAX2742 de Maxim, cuyo diagrama de bloques se muestra en la Figura 7.3 y sus especificaciones se pueden encontrar igualmente en la bibliografía, Referencia [50].

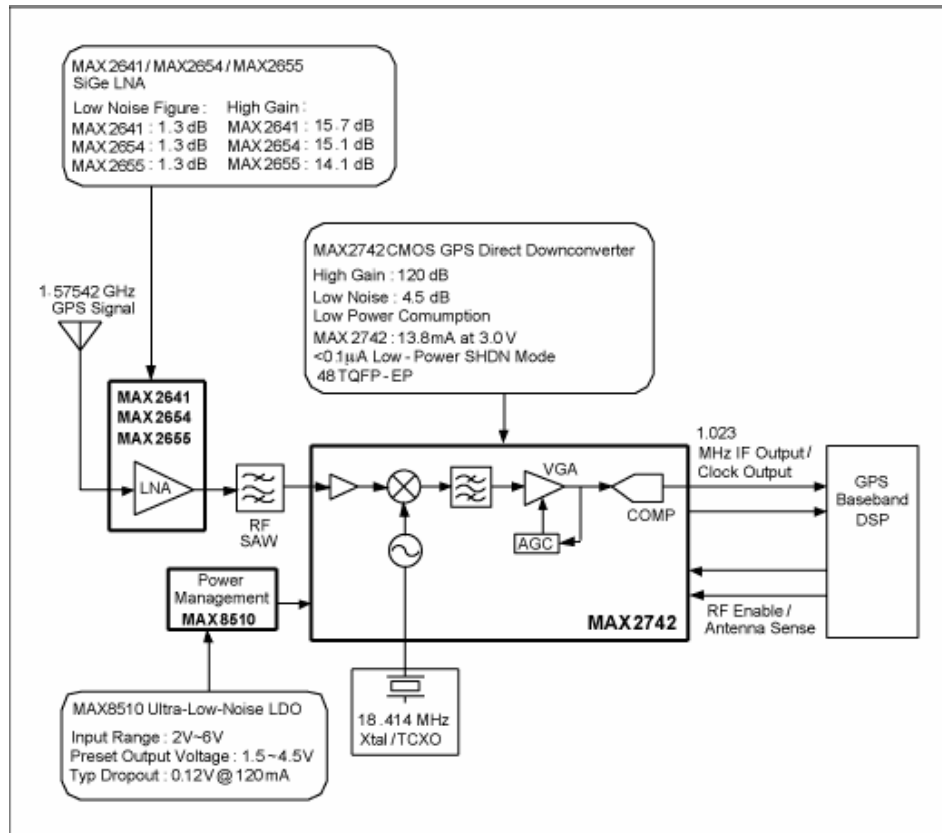


FIGURA 7.3 Diagrama de bloques del receptor MAX2742 ^[50]

8 Apéndice C. Transmisión de señales GNSS

8.1 Introducción

El proceso de adquisición de una señal GNSS por parte de un receptor implica que este sea capaz de captar dichas señales a la frecuencia que éstas funcionan y que además sea capaz de interpretar las señales y poder distinguirlas del ruido. Se puede resumir esto en:

- Sincronización en fase y frecuencia del satélite y el receptor.
- Sincronización de los códigos PRN del satélite y los del receptor.

Los satélites GNSS poseen códigos PRN para generar las señales de espectro ensanchado. Dichos códigos permiten mejorar las prestaciones del sistema en cuanto a seguridad y privacidad. Aunque la adquisición de los códigos PRN es necesaria para poder recibir la información de cada señal, puesto que de otra forma recibiríamos sólo ruido.

8.2 Generación de los códigos PRN

Ya se han visto las características de los códigos PRN de cada GNSS en el Capítulo 3. Los códigos que se generan deben cumplir unas características en cuanto a sus propiedades, que tienen que ver con la autocorrelación y correlación cruzada. La correlación cruzada entre un código PRN concreto y cualquier otro código (incluyendo versiones diferidas del mismo código) es mínima. La correlación sólo es máxima cuando se compara el código consigo mismo (autocorrelación). Ello permite enviar múltiples señales en una misma frecuencia, como en GPS y Galileo, mediante el procedimiento de modular cada señal con un código PRN diferente.

Cada sistema genera sus códigos de manera diferente. La forma de generarlos así como su valor se especifican en el ICD de cada uno de los sistemas. GPS y Galileo lo hacen de la misma manera, mientras que GLONASS lo hace de forma diferente, esto es porque los dos primeros utilizan CDMA, por lo que cada satélite necesita un código exclusivo, mientras que GLONASS sólo necesita un código para todos, puesto que emplea FDMA. Por tanto la técnica de acceso al medio condiciona la generación de los códigos. A continuación se presenta de manera breve cómo genera cada GNSS el código PRN de uso civil.

8.2.1 GPS: Generación de los códigos PRN

El código C/A de GPS se genera como la suma de dos registros de desplazamiento, G1 común a todos los satélites, y G2i, propio de cada satélite con un retardo preasignado para distinguir cada satélite del resto.

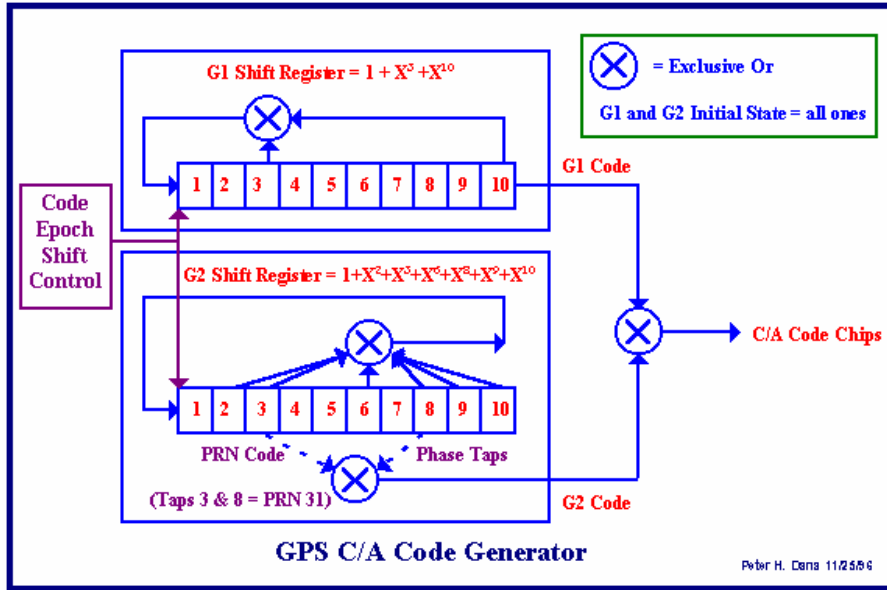


FIGURA 8.1 Generador de códigos C/A ^[30]

8.2.2 GLONASS: Generación de los códigos PRN

La generación del código PRN de GLONASS es el resultado de muestrear el séptimo registro de un banco de nueve registros que se desplazan a una frecuencia de 0.511 MHz.

En la Figura 8.2 se puede apreciar el uso de los divisores en frecuencia para obtener dicha frecuencia, así como el banco de registros y la salida del bit del séptimo registro al modulador.

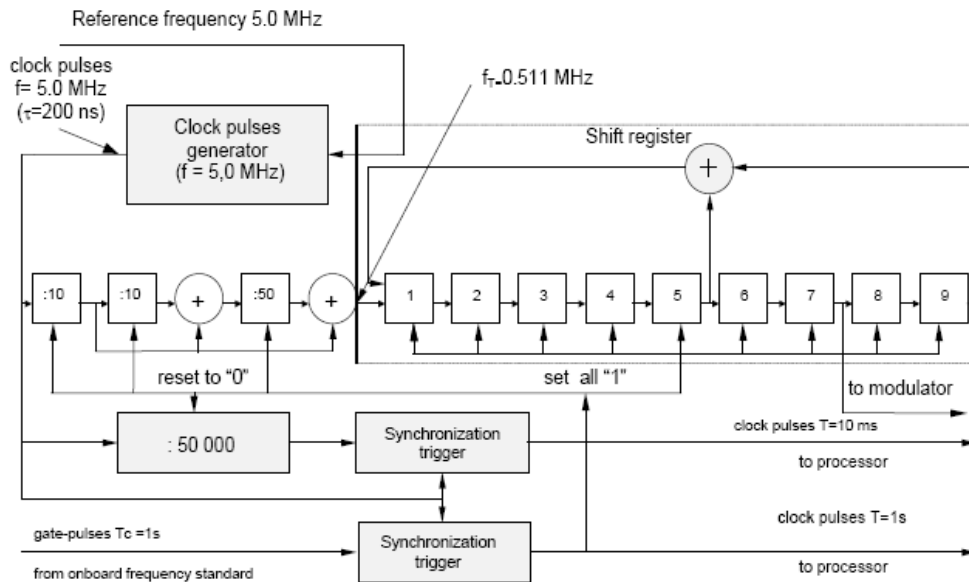


FIGURA 8.2 Generador de código PRN de GLONASS ^[5]

8.2.3 Galileo: Generación de los códigos PRN

El sistema Galileo genera los códigos en dos etapas sucesivas. Primero genera el código primario a partir de secuencias combinadas o desplazamiento lineal de registros. En la Figura se observa el primer método.

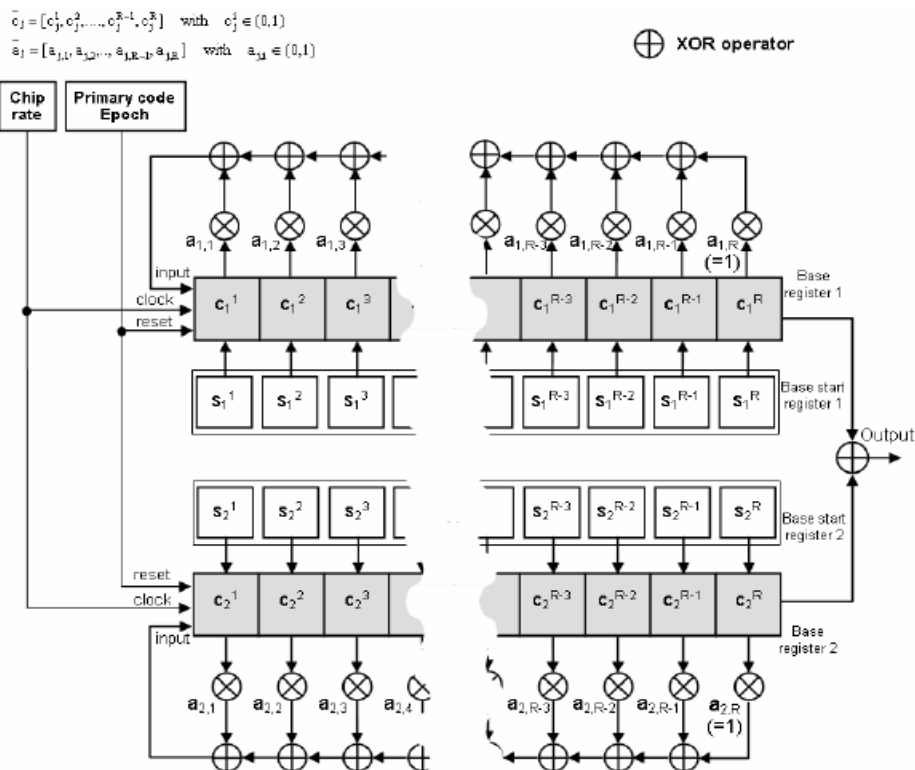


FIGURA 8.3 Desplazamiento lineal de registros basados en secuencias de longitud M ©, 2006, European Space Agency / Galileo Joint Undertaking [4]

Posteriormente a dicha secuencia se le añade el código secundario que cambia la polaridad de cada período de código primario aumentando la longitud del código total.

Primary code length N

Secondary Code length N_s

Primary code chiprate f_c

Secondary code chiprate $f_{cs} = f_c/N$

(1 Chip per primary code period)

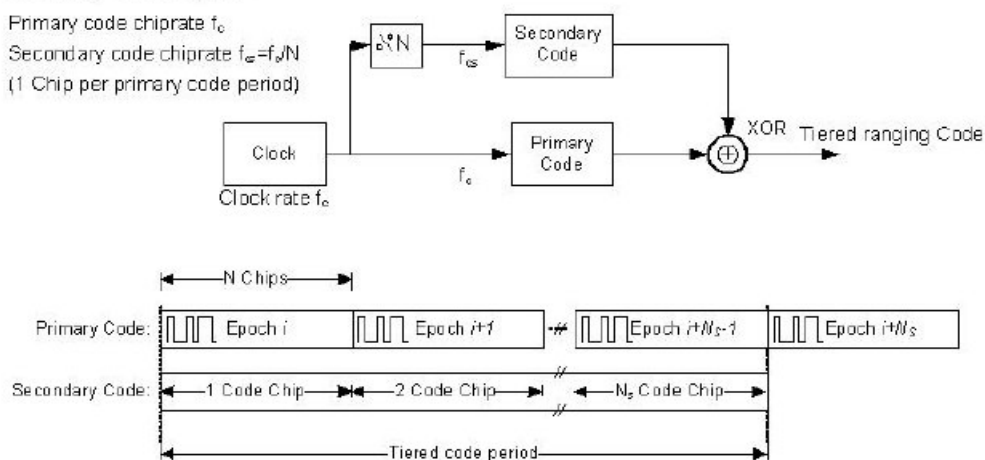


FIGURA 8.4 Código PRN Galileo formado de construcción jerárquica ©, 2006, European Space Agency / Galileo Joint Undertaking [4]

8.3 Identificación de los códigos PRN

La función de autocorrelación es de vital importancia para la recepción de la información transmitida por los satélites de navegación. Los satélites transmiten una señal en espectro expandido utilizando técnicas de acceso al medio como CDMA o FDMA, dichas señales son identificadas en recepción a través de la función de autocorrelación.

Los códigos PRN que se generan deben tener la máxima autocorrelación posible:

- Para $t=0$ debe haber un pico lo más acusado posible (el código será mejor cuanto más largo).
- El nivel de los lóbulos secundarios debe ser bajo (el código será mejor cuanto más aleatorio sea).

De manera discreta la función de autocorrelación se define como la convolución en tiempo discreto de la función anterior:

$$R(j) = \sum_n x_n x_{n-j}.$$

Siendo x_n el símbolo n -ésimo del código PRN en cuestión y siendo máxima la autocorrelación para $n=j$.

De esta forma el receptor es capaz de discriminar los códigos que le llegan identificando el código correcto a partir de la correlación cruzada de dicho código periódico de longitud N con los códigos que el receptor posee almacenados o que es capaz de generar.

Se pueden dar tres posibles casos en la detección de los códigos PRN:

1. No existe correlación ninguna entre códigos puesto que el receptor emplea un código distinto al de la señal.

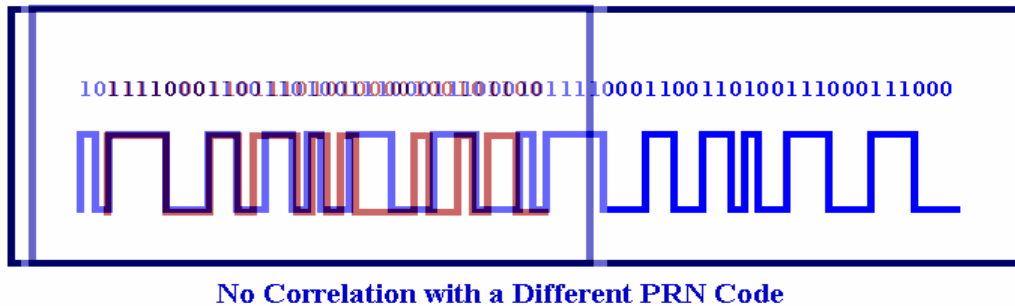


FIGURA 8.5 Correlación nula entre códigos ^[30]

2. Existe correlación parcial, puesto que emplean el mismo código pero no están en el mismo instante, es decir n es distinto de j .

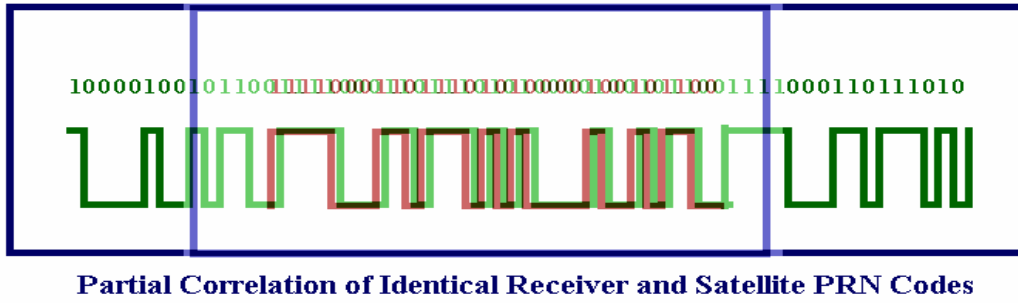


FIGURA 8.6 Correlación parcial entre códigos ^[30]

3. Existe correlación entre ambas secuencias ya que se emplea el mismo código con $n=j$.

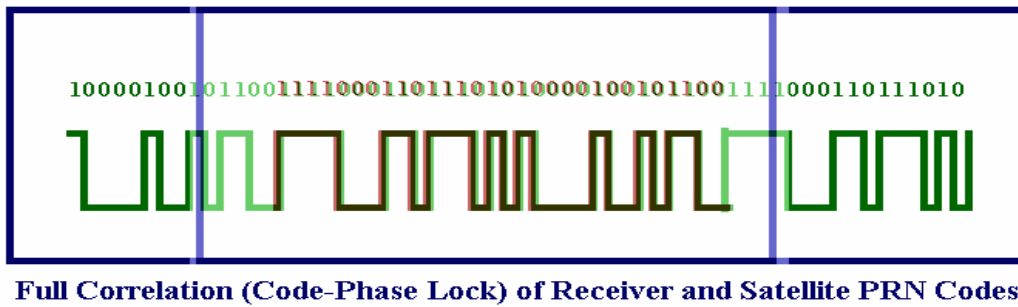


FIGURA 8.7 Correlación completa entre códigos ^[30]

9 Apéndice D. Evaluación de Proyectos de inversión

9.1 Conceptos fundamentales de inversión

Desde el punto de vista económico una inversión es el desembolso de recursos financieros, destinados a la adquisición de capitales que proporcionarán beneficios económicos y/o servicios durante un tiempo. En todo proceso de inversión se da:

- Sujeto que invierte los recursos.
- Objeto en el que se invierte.
- Coste que supone.
- Recompensa que se espera.

Cuando se inicia un proceso de inversión se espera generar un mayor capital del que se dispone al principio. Dicho capital puede tener distinta naturaleza, puede ser jurídico, económico o financiero. En lo que a proyectos se refiere vamos a tratar sólo el capital económico y jurídico.

Las inversiones se pueden clasificar siguiendo diversos criterios. Dichos criterios se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla 9.1 Tipos de inversión

FUNCIÓN	SUJETO	OBJETO
Inversiones de renovación	Inversiones efectuadas por el Estado	Inversiones financieras
Inversiones de expansión		
Inversiones de innovaciones	Inversiones efectuadas por particulares	Inversiones reales
Inversiones estratégicas		

La inversión que ha realizado la Unión Europea con el proyecto Galileo podemos concluir que es de innovación, puesto que se trata de crear un nuevo sistema de navegación, además ha sido efectuada por un conjunto de países que forman la Unión y otros que se han añadido, y es una inversión de tipo real puesto que se invierte en capitales económicos y jurídicos con los que se espera producir el sistema.

9.2 Proyectos de inversión

Un proyecto de inversión es un plan al que, asignado de determinado capital, se espera que una vez llevado a cabo produzca un beneficio social, y normalmente un beneficio económico.

Con el término plan se indica que el proyecto se estructura, analiza y considera en todos sus aspectos. Requiere de un análisis multidisciplinario por parte de especialistas en cada uno de los factores que participan y afectan al proyecto. Un plan de proyecto debe tener una metodología que defina los pasos que se deben seguir en los distintos ámbitos disciplinares y los coordine entre sí para llevarlo a cabo de la mejor manera posible.

9.3 Metodología de evaluación de proyectos de inversión

La evaluación de un proyecto de inversión tiene por objeto conocer su rentabilidad económica y social, de manera que asegure resolver una necesidad de forma eficiente y rentable. Para evaluar un proyecto es clave un planteamiento correcto del mismo que se desarrollará posteriormente a partir de estimaciones de distintos parámetros.

La metodología que permite evaluar un proyecto consta de los siguientes pasos:

- **Estudios Previos:** son estimaciones previas a estudios más detallados que sirven para evaluar distintos aspectos del proyecto.
 - **Análisis del mercado:** es el primer estudio que se hace en el cual se analiza la capacidad de penetración del proyecto en el mercado y las posibilidades de éxito que puede tener. Se cuantifica la oferta, la demanda y los precios.
 - **Análisis técnico:** se estudia cómo se va a realizar el proyecto, la estructura que va a tener, los recursos necesarios para acometerlo, procesos etc.
- **Análisis económico y financiero:** se analizan la inversión, los costes y beneficios y la forma en que se va a financiar el proyecto. Se evalúa la viabilidad económica del proyecto.
- **Análisis estratégico:** se trata de un análisis cualitativo a diferencia del análisis económico y trata de evaluar el éxito del proyecto a partir de factores estratégicos como compatibilidad de objetivos del proyecto con los del inversor o de riesgo estratégicos.
- **Decisión sobre el proyecto**

En el capítulo 4 se ha presentado la evaluación del proyecto Galileo a partir de estudios ya desarrollados. En dicho capítulo se ha aplicado la metodología aquí descrita:

- Se han llevado a cabo estudios de mercado previos que garanticen un mercado lo suficientemente amplio como para que el proyecto pueda generar beneficios económicos.
- Se ha planteado la estructura y los recursos necesarios sin entrar demasiado en detalle, para desarrollar un sistema de navegación por satélite. Si el estudio económico es favorable a la realización del proyecto, se desarrollará el sistema de acuerdo a un plan.
- Teniendo en cuenta estos factores se ha elaborado un estudio económico. En él se han usado una serie de herramientas para evaluar el proyecto de las múltiples que hay para llevar a cabo un estudio de este tipo. Las herramientas escogidas para un estudio económico se basan en criterios fundamentados en el tipo de proyecto que se analiza.

- El estudio estratégico que se ha desarrollado en paralelo ha demostrado la conveniencia de desarrollar un proyecto de este tipo y la compatibilidad del mismo con los objetivos de la Comunidad Europea, así como la posibilidad de éxito frente a sistemas existentes como GPS o GLONASS.
- Se han evaluado los resultados de los análisis realizados y se ha tomado la decisión de financiar el proyecto Galileo.

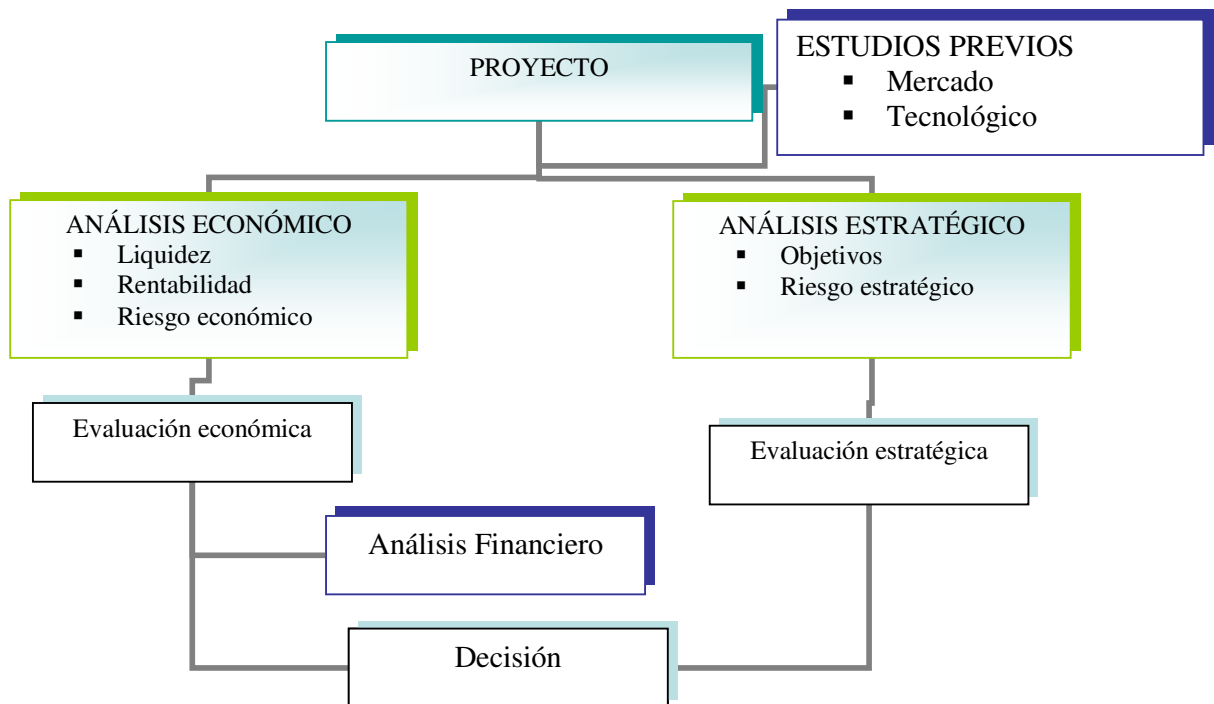


FIGURA 9.1 Planteamiento del análisis de inversiones en un proyecto

9.4 Herramientas de análisis económico-financiero

Para analizar la rentabilidad de un proyecto y los beneficios que éste genera, existen distintas herramientas de análisis económico-financiero de proyectos de inversión. Dichas herramientas analizan el proyecto como un conjunto de inversiones encaminadas hacia un mismo fin, que deben ser evaluadas globalmente, y un conjunto de gastos, necesarios para poner en marcha el proyecto, y beneficios de los que se espera obtener normalmente ingresos.

Por tanto, todas las herramientas de análisis económico-financiero permiten evaluar la viabilidad de un proyecto a partir de:

- **La inversión inicial:** capital económico que es necesario para comenzar a realizar el proyecto y que se amortizará con el mismo.
- **Los flujos netos de caja** o cash flow: la diferencia entre los ingresos y gastos en un período de tiempo determinado.

En el estudio económico presentado en el capítulo 4 se han empleado métodos de análisis dinámicos, es decir que tienen en cuenta el valor del dinero con el tiempo, aplicando tipos de interés y la inflación al análisis de los flujos netos de caja en un período de tiempo. Dichos métodos son:

- **VAN:** Valor Actual Neto, también conocido como Valor Presente Neto (VPN).
- **TIR:** Tasa Interna de Retorno.

Existen también métodos estáticos que no tienen en cuenta el valor del dinero en el tiempo, más simples que los anteriores, que son:

- Criterio del plazo de recuperación (**Pay Back**).
- Criterio del **Flujo Neto Total** por unidad monetaria invertida.
- Criterio del **Flujo Neto Medio** por unidad monetaria invertida.

9.4.1 Métodos dinámicos de análisis económico: VAN y TIR

En el capítulo 4 se ha mencionado el VAN y el TIR como herramienta que demuestra la rentabilidad del proyecto Galileo. Ambos conceptos muestran rentabilidad desde puntos de vista diferentes.

La obtención del VAN constituye una herramienta fundamental para la evaluación de proyectos. Permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros. El método tiene en cuenta la variación del valor del dinero en el tiempo mediante el tipo de interés. La fórmula que nos permite calcular el Valor Actual Neto es:

$$VAN = \sum_{n=0}^N \frac{I_n - E_n}{(1 + i)^n}$$

I_n representa los ingresos y E_n representa los gastos o egresos, su resta es por tanto el flujo de caja durante un período considerado de longitud N . El tiempo actual es $n=0$ el siguiente $n=1$ y así hasta los N . El tipo de interés es i .

Si el VAN es positivo indica que la variación de los flujos de caja en ese período es favorable y que por tanto convendría invertir. Cuando se iguala el VAN a 0, i pasa a llamarse TIR (tasa interna de retorno):

$$VAN = -I + \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{(1 + TIR)^i} = 0$$

Donde Q_i es el Flujo de Caja en el periodo i , e I la inversión inicial realizada. Otra forma de ver la TIR es que es el tipo de interés que permite que el valor actual de los costes sea igual al de los ingresos, es decir que el Beneficio Actual Neto (BAN) sea 0. Cuanto mayor sea la TIR mejor será la inversión, ya que un tipo de interés elevado indica que se recupera la inversión realizada con una alta rentabilidad económica para el período estudiado.

Bibliografía

- [1] IFATCA. *"A Beginner's Guide to GNSS in Europe"*. EVP Europe, 1999.
- [2] *"INTERFACE SPECIFICATION IS-GPS-200D Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces"*. GPS JOINT PROGRAM OFFICE, 2004.
- [3] *"GLOBAL POSITIONING SYSTEM STANDARD POSITIONING SERVICE STANDARD"*. OASD, 2001
- [4] *"Galileo Open Service Signal In Space Control Document (OS SIS ICD). Draft 0"*. ©, European Space Agency / Galileo Joint Undertaking, 2006.
- [5] *"GLONASS INTERFACE CONTROL DOCUMENT Version 5.0"*. 2005.
- [6] *"GLONASS: Status and Perspectives"*. Federal Space Agency of the Russian Federation, 2005.
- [7] Gregory T. French. *"Understanding the GPS. An introduction to the Global Positioning System, What is and how it works"*. GeoResearch, 1996.
- [8] Scott Pace, Gerald P. Frost, Irving Lachow, David R. Frelinger, Donna Fossum, Don Wassem, Monica M. Pinto. *"The GPS Assessing National Policies"*. RAND, 1995.
- [9] <http://tycho.usno.navy.mil/gps.html> *"USNO GPS Timing Operations"*
- [10] <http://pagesperso-orange.fr/jean-paul.cornec/gnss.htm> *"GNSS"*
- [11] Universidad Politécnica de Valencia
<http://www.upv.es/satelite/trabajos/pracGrupo4/inici.htm> *"GPS: Global Positioning System"*
- [12] <http://www.spaceandtech.com/spacedata/constellations/constellations.shtml> *"Satellite Constellations"*
- [13] http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/galileo/index_en.htm *"GALILEO"*
- [14] <http://www.esa.int/esaNA/galileo.html> *"The Future - Galileo"* European Space Agency.
- [15] <http://www.glonass-ianc.rsa.ru/> *"Information – Analytical center"*. Federal Space Agency of the Russian Federation.
- [16] GALILEI Consortium. *"The GALILEI Project"*. Comisión Europea, 2003.
- [17] European Space Agency / Publications. *"The First Galileo Satellites"*. ESA Publications 2006.
- [18] Andrew Wilson. *"Galileo. The European Programme for Global Navigation Services"*. ESA, ESTEC, 2005.
- [19] Félix Pérez Martínez. *"GALILEO. EL FUTURO SISTEMA DE NAVEGACIÓN EUROPEO"*. Departamento de Señales Sistemas y Radiocomunicaciones, Universidad Politécnica de Madrid, 2005.
- [20] P. Flament. *"GALILEO Opportunities"*. Comisión Europea, Dirección General de Transporte y Energía, 2000.
- [21] *"Inception Study to support the Development of a Business Plan for the GALILEO programme Executive Summary"*. PriceWaterHouseCoopers, 2001.
- [22] Dirección general de Energía y transporte de la Comisión Europea.
http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/galileo/doc/business_in_satnav.pdf *"Business in Satellite Navigation"*. GJU, 2003.
- [23] Andrés S. Suárez. *"Decisiones óptimas de inversión y financiación en la empresa"*. Ed. Pirámide 1996.

- [24] Centro de Estudios Financieros “*Casos prácticos de finanzas*”. Edición Cinco Días, 1999.
- [25] “*Communication from the Commission to the European Parliament and the Council: Progressing GALILEO: re-profiling the European GNSS Programmes*”. Comisión Europea, 2007.
- [26] Antonio Aguilar. Apuntes de la asignatura “*Proyectos*” 2006-2007.
- [27] Bazil Taha. Apuntes “*Radiocomunicaciones I y II*”. 2006-2007.
- [28] Jorge A. Ruiz. Apuntes “*Temas Avanzados en Comunicaciones*”. 2006-2007.
- [29] <http://www.cira.colostate.edu/cira/RAMM/hillger/gps.htm> “*GPS / Navstar Satellites*”
- [30] University of Colorado
http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html “*Global Positioning System Overview*”.
- [31] US Department of State
<http://www.state.gov/g/oes/rls/fs/2006/71631.htm> “*US Global Positioning System. GPS*”.
- [32] The National Space-Based Positioning, Navigation, and Timing (PNT) Executive Comite <http://pnt.gov/public/sa/diagram.shtml> “*GPS Fluctuations over time May 2, 2000*”..
- [33] “*THE GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM GLONASS: DEVELOPMENT AND USAGE IN THE 21ST CENTURY*” 34th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting.
- [34] <http://html.rincondelvago.com/glonass.html> “*GLONASS(GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM)*”
- [35] COIT. <http://www.coit.es/publicac/publbit/bit127/especial3.htm> “*Galileo: el sistema europeo de navegación por satélite*”. COIT y AEIT.
- [36] J. Benedicto, S.E.Dinwiddy, G. Gatti, R. Lucas, M. Lugert. “*GALILEO :Satellite System Design and Technology Developments*”. ESA, 2000.
- [37] J.Ruque, D. Ruiz, C. Carrión,
<http://www.monografias.com/trabajos33/implementacion-bpsk/implementacion-bpsk.shtml> “*Simulación e implementación de la modulación BPSK en una FPGA Xilinx Spartan 3 xcs200-4ftp256, usando Simulink y el blocset System Generador para DSP/FPGA*”
- [38] Benoit Muth.
<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/loadFile.do?objectId=12829&objectType=file> “*Binary Offset Carrier (BOC) signal generator*”
- [39] Universidad de Valladolid, Departamento de ingeniería de sistemas y automática. <http://www.isa.cie.uva.es/proyectos/codec/teoria4.html> “*Códigos de codificación del canal*”
- [40] Trabajo Wi-fi Asignatura Transmisión de Datos. 2004-2005.
- [41] ESA. http://www.esa.int/esaEO/SEMUPAWLDMD_index_0.html “*Observing the Earth*”
- [42] Universidad de Valladolid, Departamento de ingeniería de sistemas y automática <http://www.isa.cie.uva.es/gps/> “*Navegación GPS*”
- [43] Dirección general de Energía y transporte de la Comisión Europea. http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/galileo/documents/brochure_en.htm “*GALILEO Application Sheets*”
- [44] Javier Peñafiel, Jorge Zayas. “*Fundamentos del sistema GPS y aplicaciones en la topografía*”. COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS

TECNICOS EN TOPOGRAFIA, DELEGACION TERRITORIAL DE
MADRID-CASTILLA-LA MANCHA, 2001.

- [45] M^a Paz Holanda Blas, Juan Carlos Bermejo Ortega.
http://mayerwin.free.fr/telechargement/gnss_GGesp.pdf “GPS & GLONASS,
descripción y aplicaciones”. 1998.
- [46] Joe Mehaffey <http://gpsinformation.net/gpsclouds.htm> “*Rain, Snow,
Clouds and GPS Reception*”. Gpsinformation.net.
- [47] US Government <http://www.gps.gov/> “*Global Positioning System:
Serving the World*”
- [48] <http://www.tecnologia.carrefour.es/>
- [49] Micromodular Technologies [http://www.micro-
modular.com/docs/MN1818/MN1818%20Data%20Sheet%20-%20071019.pdf](http://www.micro-modular.com/docs/MN1818/MN1818%20Data%20Sheet%20-%20071019.pdf)
“MN1818 GPS receiver Datasheet”
- [50] MAXIM <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX2742.pdf>
“MAX2742 GPS Receiver front-end”
- [51] Kaplan, Elliott D. “*Understanding GPS: Principles and Applications*”.
Artech House Publishers, ed. 2006
- [52] Jacobson, Len “*GNSS markets and applications*”. Artech House, 2007.
- [53] El-Rabbany, Ahmed “*Introduction to GPS: the global positioning
system*”