

## **CAPÍTULO TERCERO**

# **POSICIONAMIENTO Y NAVEGACIÓN**

# POSICIONAMIENTO Y NAVEGACIÓN

Por LUIS A. MAYO MUÑIZ

## Perspectiva histórica

El diseño de los Sistemas de Navegación por Satélite estuvo originalmente basado en Sistemas de Radionavegación similares, aunque basados en tierra, como el Loran o el Decca, desarrollados en los primeros años cuarenta y utilizados incluso durante la Segunda Guerra Mundial. Los primeros sistemas son de origen militar, de hecho, el Sistema de Navegación por Satélite de la Armada norteamericana conocido como Transit, y el Sistema ruso Tsikada (1). Ambos proporcionaban un servicio de posicionamiento en superficie (por ejemplo navegación en dos dimensiones).

Transit se probó con éxito por primera vez en el año 1960. Utilizaba una constelación de cinco satélites, y la frecuencia a la que podía proporcionar una solución de posición dependía de la latitud del usuario: en el ecuador, se obtenía una cada 110 minutos en media, mientras que a 80 grados de latitud, la frecuencia podía mejorarse hasta una media de una solución cada 30 minutos. Además, tanto Transit como Tsikada estaban muy limitados por el tiempo necesario para procesar las señales y estimar la posición del usuario, que ascendía hasta aproximadamente 10 o 15 minutos.

Lógicamente, estas prestaciones podían ser suficientes para la navegación marítima, por las bajas velocidades de los barcos, pero no para

---

(1) El Sistema Transit se mantuvo operativo hasta el año 1996. El Sistema Tsikada ruso seguía aún en uso en el año 2006.

la aviación o para otros usuarios de dinámica más rápida. Ello llevó a la Armada norteamericana a desarrollar el primer satélite *Timation* en el año 1967, que demostró la capacidad de poner en órbita relojes de alta precisión, de modo que pudiera pasarse de una tecnología de posicionamiento basada en el desplazamiento *doppler* de las frecuencias de transmisión del satélite a otra basada en triangulación.

Algunas de las aplicaciones civiles y militares de este tipo de sistemas de navegación con cobertura potencialmente universal fueron obvias desde el primer momento. Sin embargo, casi ninguna de ellas se percibía como suficiente para justificar el coste de billones de dólares en Investigación y Desarrollo (I+D), despliegue y operación de una constelación de satélites de navegación. Durante la carrera armamentística de la guerra fría, la amenaza nuclear mutua fue el único motivo capaz de convencer a la Administración norteamericana de la utilidad de desarrollar el GPS (*Global Positioning System*). De hecho, la última razón fue su efecto disuasivo. La triada nuclear en Estados Unidos consistía en los misiles balísticos lanzados desde submarinos, SLBM (*Submarine Launched Ballistic Missiles*), junto con la flota de bombarderos estratégicos de las Fuerzas Aéreas y los Misiles Balísticos Intercontinentales, ICBM (*Intercontinental Ballistic Missiles*).

Considerados vitales para la política de disuasión nuclear, la determinación precisa de la posición de lanzamiento de los SLBM era un multiplicador de fuerza. La navegación precisa permitiría a los submarinos norteamericanos disponer de una determinación precisa de su posición previa al lanzamiento de sus misiles que, indudablemente, mejoraría el cálculo de su trayectoria y la posibilidad de impacto en el blanco seleccionado. También la Fuerza Aérea, que controlaban dos tercios de la capacidad de respuesta nuclear norteamericana, tenían requisitos similares en cuanto al posicionamiento: para mejorar la capacidad de supervivencia de sus ICBM se planteó una propuesta para utilizar bases de lanzamiento móviles que tendría requisitos similares a los impuestos por los SLBM.

De ese modo, tanto la Fuerza Aérea como la Armada continuaron desarrollando en los años sesenta y primeros de los setenta estas ideas. Mientras la Armada continuaba con el desarrollo de los Sistemas Transit y Timation (2), las Fuerzas Aéreas desarrollaban el proyecto 621B que ya anticipaba algunas de las tecnologías que se incorporarían después en GPS (por ejemplo, el uso de la modulación en Ruido Pseudo Aleatorio (PRN) para

---

(2) El cuarto satélite *Timation*, embarcando por primera vez un reloj atómico fue lanzado en el año 1974.

determinar distancias. En el año 1969, la Oficina del Secretario de Defensa (OSD) estableció el Programa de Sistema de Navegación por Satélite para Defensa, DNSS (*Defense Navigation Satellite System*), para consolidar los esfuerzos de los diferentes servicios militares en un solo sistema de uso común.

La OSD también constituyó el Grupo Ejecutivo de Seguimiento de la Navegación por Satélite, al que se encargó con el planeamiento y control del Programa DNSS. A partir de estos trabajos, en el año 1973 nace el Programa Navstar, que queda bajo la responsabilidad de una oficina de programa conjunta. Con los satélites individuales asociados al nombre Navstar (como con sus predecesores *Transit and Timation*), hubo que buscar un nombre más amplio que designará al conjunto de la constelación, que fue bautizada como Navstar-GPS y, más tarde, abreviada simplemente a GPS. El primer satélite fue lanzado en el año 1989, y el vigésimo cuarto, completando la capacidad operativa total, en el año 1994.

Nacido como un sistema de defensa, a consecuencia del incidente del vuelo 007 de Korean Airlines que fue derribado en el año 1983 con 269 personas a bordo por violar el espacio aéreo ruso cerca de las islas Sakhalin y Moneron, Ronald Reagan promulgó una directiva presidencial para poner a disposición del uso civil gratuitamente el Sistema, una vez que estuviera suficientemente desarrollado, como un «bien común».

Pese a ellos, GPS reservó desde el comienzo las señales de mayor calidad para usos exclusivamente militares, distribuyendo una señal de menor precisión para usos civiles, que además podía ser intencionadamente degradada, la capacidad conocida como Disponibilidad Selectiva, SA (*Selective Availability*). Esto cambió el 1 de mayo de 2000, en que el presidente Clinton ordenó la desconexión de la disponibilidad selectiva. En esas fechas, los militares norteamericanos tenían ya la capacidad de denegar el servicio GPS a enemigos potenciales sobre áreas regionales.

El desarrollo de los Sistemas de Navegación por Satélite en la antigua Unión Soviética fue paralelo al norteamericano. El Sistema Tsikada o Tsiklon, nació con idéntico propósito, facilitar el lanzamiento de SLBM. Entre los años 1967 y 1978, se lanzaron 31 satélites. Sin embargo, el Sistema, como su competidor americano Transit, adolecía de la necesidad de largos tiempos de observación para obtener una solución de posición, lo que le hacía inutilizable para muchos propósitos de navegación y para el guiado de las nuevas generaciones de misiles balísticos. Entre los años 1968 y 1969, los soviéticos concibieron un nuevo sistema

que pudiera soportar no sólo las necesidades navales, sino también las de las Fuerzas Aéreas y el Ejército. Los requisitos formales del sistema se completaron en el año 1970, y en 1976 el Gobierno autorizó el lanzamiento del Sistema Unificado de Navegación Espacial (GLONASS).

Los primeros tres satélites GLONASS, designados *Kosmos-1413*, *1414* y *1415*, se lanzaron con un cohete *Proton* en el año 1982. Dos de estos satélites eran simples «maquetas» que carecían de capacidad operativa: un síntoma temprano de las dificultades técnicas y económicas que han plagado el posterior despliegue del sistema. Entre los años 1982 y 1991, la Unión Soviética lanzó con éxito un total de 43 satélites relacionados con GLONASS, más cinco satélites de prueba. Sin embargo, cuando el país se desintegró en el año 1991, sólo 12 satélites distribuidos en dos planos orbitales permanecían operativos, lo que reducía drásticamente la utilidad del Sistema (sólo para cubrir suficientemente el territorio ruso hubieran sido necesarios 18 satélites).

La Federación Rusa se hizo cargo del Sistema a la caída de la Unión Soviética, concluyendo el despliegue de la constelación hasta los 24 satélites operativos en el año 1995. Sin embargo, la corta vida útil de los satélites de las primeras generaciones y las dificultades económicas que atravesó Rusia en la década de los años noventa, que condujeron a recortes de hasta el 80% de los presupuestos espaciales, hicieron imposible mantener la red de 24 satélites en operación, cayendo hasta un mínimo de seis satélites operativos en el año 2001. La desmilitarización del sistema en esas fechas, trasladando la responsabilidad desde el Ministerio de Defensa a la Agencia Espacial civil *Rovkosmos* y el empuje decidido del gobierno Putin, que lanzó el Programa Federal Sistema de Navegación Global 2002-2011, reimpulsaron el programa. En diciembre de 2003, se lanzó el primer satélite GLONASS-M, de segunda generación, que incluía dos señales de uso civil.

En el año 2007, el Gobierno ruso levantó todas las restricciones de uso de las señales GLONASS, poniendo a disposición de los usuarios civiles incluso las señales previamente reservadas para uso militar. En la actualidad, hay 26 satélites en órbita, si bien sólo 20 de ellos son completamente operativos (hay dos de reserva, tres en proceso de aceptación y uno en mantenimiento).

Al estar originalmente reservadas a usuarios militares las señales de mayor precisión y calidad, los Sistemas GPS y GLONASS, como se conci-

bieron originalmente, no proporcionaban prestaciones suficientes para algunas aplicaciones en el mundo civil, muy notablemente en el campo de la aviación. Los mayores problemas estaban relacionados con la estabilidad de la señal, la robustez y la continuidad del servicio en las señales civiles, sobre todo habida cuenta de la limitación que suponía la disponibilidad selectiva. Esto condujo al desarrollo de sistemas complementarios, conocidos como sistemas de aumentación, que permitían mejorar las prestaciones de estos Sistemas tanto en términos de precisión, como en términos de integridad, elemento este último crítico para el desarrollo de aplicaciones en el mundo de la aviación civil. Los primeros sistemas desarrollados tenían un alcance limitado y estuvieron a menudo relacionados con aplicaciones civiles de alta precisión, como por ejemplo el posicionamiento de plataformas petrolíferas.

Este fue el caso de la red SkyFix, probablemente el primer sistema de aumentación regional que proporcionaba un servicios de correcciones diferenciales en el mar del Norte que permitía mejorar la calidad del servicio de posicionamiento en aquella zona. El primer esfuerzo por desarrollar un sistema de aumentación de cobertura amplia, basado en satélite, fue promovido por la Autoridad Federal de Aviación (FAA) norteamericana a partir del año 1994, el denominado WAAS (*Wide Area Augmentation System*). Su equivalente europeo, el EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay System*) nació de la cooperación entre la Comisión Europea, la Agencia Europea del Espacio (ESA) y Eurocontrol a partir del año 1996. La contrapartida japonesa, el MSAS (*Multifunctional Satellite Augmentation System*) data también de esas fechas. Posteriormente, se han multiplicado esfuerzos similares en otras regiones del mundo (por ejemplo el indio GAGAN o el ruso SDCM).

El primer Sistema de Navegación Global por satélite promovido con fines civiles es el europeo Galileo, que se encuentra en desarrollo en estos momentos. Galileo pretende dotar a Europa de autonomía en materia de navegación por satélite, asunto que se ha considerado como una cuestión de soberanía estratégica por parte de los países miembros de la Unión Europea. El Programa fue oficialmente adoptado por la ESA y por la Unión Europea en el año 2003, aunque los trabajos se iniciaron ya en el año 1999.

También de carácter regional es el Sistema Beidou-1 chino, que proporciona servicios de posicionamiento por satélite basados en una red de satélites geoestacionarios con cobertura sobre aquel país. Se han

lanzado cuatro satélites de esta red a partir del año 2000 de los que –presumiblemente– sólo dos permanecen operativos. Su sucesor, el Sistema Beidou-2 o COMPASS, es sin embargo un sistema de cobertura global, cuyo primer satélite se lanzó en el año 2003 y que espera alcanzar su capacidad operativa final en el año 2020.

Aunque fueran originalmente diseñados para permitir el posicionamiento de baterías y submarinos para el lanzamiento de misiles durante la guerra fría, la primera utilización masiva de los Sistemas de Navegación por Satélite en un escenario de conflicto se produjo en la primera guerra del golfo Pérsico en el año 1991. Durante esta guerra, más de 60 tipos de sistemas y vehículos diferentes utilizaron terminales GPS, incluyendo aviones de combate del Sistema de Alerta y Control Aerotransportado (AWACS), helicópteros, tanques, lanzadores de misiles, e incluso misiles, incluyendo por cierto los mismos *Scud* iraquíes. En aquellos días, los fabricantes habían suministrado a la Fuerza Aérea norteamericana aproximadamente 4.000 unidades, y se suministraron 10.000 adicionales. También la Marina envió 5.000 terminales de mano que había adquirido y que estaba utilizando para el entrenamiento de sus fuerzas. La introducción del GPS supuso una revolución en la estrategia de las fuerzas aliadas en conflicto.

La combinación de precisión, rango de empleo, prestaciones en todo tiempo y flexibilidad operativa, todo ello a un coste reducido, permitió a las fuerzas aliadas sorprender al Ejército iraquí, que no esperaba maniobras como el famoso *Left Hook* de febrero de 1991, que permitió a los aliados desplazar el equivalente a ocho divisiones acorazadas y dos aerotransportadas por el desierto, a gran velocidad y sin utilizar las rutas establecidas. Desplazar estas unidades por un desierto hostil a más de 50 kilómetros por hora, evitando que colisionen entre sí, pierdan contacto o, simplemente, se disparen unas a otras por las dificultades para la identificación, era una proeza improbable sin el recurso a esta tecnología. Entretanto, el Ejército iraquí limitó el uso de los Sistemas de Navegación por Satélite al posicionamiento de sus baterías de misiles *Scud*, es decir, una utilidad similar a la que originalmente favoreció el desarrollo del GPS, pero se vio rápidamente desbordado.

Ya en la primera guerra del Golfo comenzaron también otras de las aplicaciones que indirectamente se han visto más beneficiadas en el teatro de operaciones de los Sistemas de Navegación por Satélite. La primera es la identificación de tropas amigas para evitar el llamado «fuego ami-

go». Aunque durante este conflicto aún buena parte de las bajas que sufrieron las tropas aliadas se debieron a ello, todas las crónicas coinciden en afirmar que la incidencia de este problema fue muy inferior a la que se produjo en otros conflictos anteriores (por ejemplo Vietnam). La segunda es la cartografía. Al comienzo de la guerra, los aliados no disponían de cartografía precisa con la que navegar por el terreno o con la que identificar blancos. El despliegue de terminales GPS sobre el terreno permitió mejorar rápidamente los mapas disponibles y la precisión con la que se empleaban las armas de largo alcance. También permitió apoyar con gran precisión las operaciones de desminado. La tercera es el rescate de unidades. El uso de terminales de mano permitió dirigir con gran eficacia las misiones de rescate en territorio enemigo.

Para entender hasta qué punto los Sistemas de Navegación por Satélite han modificado la estrategia y la táctica militar, baste considerar que apenas ocho años después, en el año 1999, prácticamente cualquier avión o misil empleado por la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN) en la campaña de Kosovo disponía de un GPS como elemento de guiado. Las armas guiadas no se limitaban a los misiles de crucero, como los *Tomahawk*, que ya se habían empleado contra Serbia en la campaña de Bosnia en el año 1995, sino que había una amplia panoplia de arma de ataque directo JDAM (*Joint Direct Attack Munitions*) guiadas por GPS. Aproximadamente un 15% de la munición empleada disponía de este tipo de sistemas de guiado de precisión. De nuevo cuatro años después, durante la segunda guerra del Golfo, la proporción de armas guiadas había aumentado hasta el 85%. Es evidente que la utilización de los Sistemas de Navegación por Satélite ha trascendido mucho más allá de su objetivo original, y que sus áreas de aplicación en el moderno campo de batalla van mucho más allá del mero guiado de armas de largo alcance.

## **Aplicaciones de Seguridad y Defensa de los Sistemas de Posicionamiento y Navegación por Satélite en la actualidad**

### *Navegación y guiado*

Es un hecho bien conocido que los Sistemas de Navegación por Satélite son cruciales hoy en día para todos los Sistemas de Navegación y Guiado de todo tipo de vehículos militares y sistemas de armas. No se trata pues de dar aquí un detalle exhaustivo de este tipo de aplicaciones, sino más bien de exponer cuáles son las dificultades, limitaciones y,

por supuesto, ventajas de esta tecnología en este campo. Prestaremos especial atención al impacto que estas tecnologías pueden tener sobre el futuro desarrollo de sistemas como vehículos no tripulados, desde Sistema Terrestre no Tripulado (UGS) hasta Vehículo Aéreo no Tripulado de Combate (UCAV).

Los Sistemas de Navegación por Satélite se desarrollaron originalmente para facilitar el guiado de los SLBM, pero únicamente mediante el posicionamiento preciso del punto de lanzamiento. En los primeros Sistemas (por ejemplo el Transit y el Tsiklon) el tiempo necesario para determinar una posición los hacía prácticamente inútiles para aplicaciones de navegación, sobre todo en vehículos de dinámica rápida como aviones, no digamos ya en misiles o en municiones guiadas.

GPS o GLONASS presentan ventajas sustanciales con respecto a aquellos primeros Sistemas y hoy en día, es prácticamente inconcebible que cualquier vehículo militar no disponga de un Sistema de Navegación GPS como medio básico de posicionamiento y navegación, ya sea un barco de guerra o un avión de combate.

Las prestaciones del sistema están sin embargo, limitadas por diversos factores. Pese a tratarse de sistemas de cobertura global que no ven limitada su precisión por el alcance de la misión, como sucede por ejemplo con los Sistemas de Navegación Inerciales, cuya precisión se degrada cuando aumenta la distancia de uso, existen otras múltiples limitaciones que afectan a la utilización militar de estos Sistemas:

- La primera de ellas es la dinámica del propio vehículo. Los Sistemas de Navegación por Satélite proporcionan excelentes prestaciones en sistemas o plataformas de dinámica «baja», esto es, no sujetas a aceleraciones excesivas. No es sencillo utilizar receptores GPS para posicionar aparatos como cohetes durante su fase de lanzamiento o misiles durante su fase terminal de vuelo. Lo mismo sucede con los proyectiles estabilizados por rotación, donde la dificultad tiene que ver con la instalación de las antenas para permitir disponer de cobertura permanente, o incluso con los aviones de caza, que durante las maniobras de combate pueden perder la visibilidad de los satélites momentáneamente por ocultación de las antenas o por fallo del lazo de navegación del receptor debido a las altas aceleraciones. Estos problemas no son en absoluto críticos, y pueden resolverse en muchas ocasiones con un diseño adecuado de los sistemas embarcados, y con la combinación de estos Sistemas con otros que proporcionen prestaciones

- adecuadas durante las fases críticas de la misión. Por ejemplo, las fases terminales del vuelo de las municiones guiadas rara vez se apoyan en este tipo de sistemas, sino que con frecuencia emplean otro tipo de guiado activo (por ejemplo guiado por televisión o por láser), o simplemente se limitan en la última fase a un guiado inercial.
- El segundo problema tiene que ver con la posibilidad de perturbar las señales de navegación por satélite, tanto el código civil C/A, como el más robusto código Y, reservado a aplicaciones militares. Una idea de cómo esto puede afectar a las prestaciones del sistema nos la da lo sucedido en una operación conjunta anglo-americana contra las defensas aéreas iraquíes durante la segunda guerra del Golfo. La fuerza consistía en USAF F-15E *Strike Eagles* armadas con misiles aire-tierra AGM-130; US Navy F-18C *Hornets* armados con AGM-154.<sup>a</sup> JSOW (*Joint Stand-Off Weapons*), misiles antirradiación de alta velocidad HARM (*High-speed Anti Radiation Missile*), y misiles SLAM (*Stand-Off Land Attack Missile*); y cazas *Tornado* de la Fuerza Aérea con bombas guiadas por láser *Paveway*. En tanto que los *Paveway*, SLAM, HARM y AGM-130 cumplieron con su cometido sin problemas, las 18 bombas planeadoras guiadas por GPS los JSOW fueron otra cuestión. Casi de la mitad de sus blancos se libraron sin daño, al dispensar sus cargas útiles CEM (*Combined Effect Munition*) a más de 30 metros del blanco. La desviación fue probablemente provocada por algún tipo de perturbador (*jammer*) que degradó las prestaciones de la señal de navegación por satélite militar hasta el equivalente a las de la señal civil de código abierto. Aunque las sucesivas generaciones de satélites de navegación han reforzado la robustez de las señales de acceso restringido, no cabe duda de que un sistema que está diseñado para funcionar con relaciones señal-ruido muy bajas esta inevitablemente sujeto a este tipo de ataque.
  - Hay aún otra limitación que si bien no es inherente al propio Sistema si tiene que ver con su utilización: su eficacia como sistema de guiado hacia un blanco o cualquier otro destino depende de la precisión con que se conozca la posición del propio destino tanto como de la precisión del sistema de guiado. En el conocido incidente del bombardeo por parte norteamericana de la Embajada china en Belgrado, el Gobierno norteamericano argumentó que el ataque no había sido dirigido originalmente contra este edificio, sino contra la Dirección Federal de Suministros Militares serbia, que ocupaba un edificio cercano. Una serie de errores que incluían el uso de mapas obsoletos y con una



**Figura 1.—** La famosa «lata de soda» construida por el Centro de Pruebas de Armas Navales de China Lake. Este dispositivo de tan sólo un watt puede anular la recepción de señales GPS para la mayor parte de los receptores civiles a línea de vista. Fotografía cortesía de la Oficina Conjunta del Programa GPS.

escala inadecuada para ser utilizada en el apuntamiento de armas de precisión provocaron la catástrofe. Pero es obvio que la precisión del ataque basado en una referencia GPS es sólo tan buena como sea ésta. El GPS no proporciona ventaja alguna en las fases de guiado terminal, donde otras tecnologías, incluso más veteranas pueden reportar ventajas superiores.

De ahí que la mayor parte de las municiones guiadas inteligentes combinen el guiado GPS y el Sistema de Navegación Inercial (INS) durante las fases de cruce de la misión con otras tecnologías (por ejemplo láser, IR o microondas) para el guiado terminal, figura 1.

Una de las razones que sin duda determinará el despliegue de Sistemas de Navegación y Posicionamiento preciso de cobertura global es la creciente utilización de sistemas no tripulados en los campos de batalla. De acuerdo con un informe del Departamento de Marina norteamericano de mayo de 1991, «hubo al menos un Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV) en el aire en todo momento durante la operación *Tormenta del Desierto*». Pero durante la primera guerra del Golfo, «sólo» se produjeron 522 salidas, con 1.641 horas de vuelo totalizadas, casi la práctica totalidad por un único aparato, el *Pioneer* (también se utilizó el *Pointer*, pero en mucho menor medida). Mucho más recientemente, en la guerra de Irak, las fuerzas aliadas han empleado más de 10 tipos diferentes de UAV, desde HALE como los *Global Hawk*, o MALE como los *Predator*, hasta los mucho más sencillos RQ-11A *Raven* para reconocimiento. Sólo estos últimos han acumulado más de 150.000 horas de combate en Irak en 2007. Hasta octubre de 2008, los UAS (*Unmanned Aircraft Systems*) de la coalición habían volado más de 500.000 en soporte a las operaciones *Enduring Freedom* e *Iraqi Freedom*, sus Vehículos Terrestres no Tripulados (UGV) habían conducido más de 30.000 misiones, detectando y/o neutralizando más de 15.000 Dispositivos Explosivos Improvisados (IED), y sus Sistemas Marítimos no Tripulados (UMM) patrullaban los puertos utilizados por sus Fuerzas Armadas.

Todas las previsiones futuras apuntan hacia un uso extensivo de los Sistemas No Tripulados para proporcionar todo tipo de capacidades operativas en el campo de batalla: conciencia situacional (*Battlespace Situational Awareness*), aplicación de fuerza, protección, soporte logístico, mando y control, u operaciones centradas en red. Con ello, el crecimiento previsto del mercado de este tipo de sistemas es muy importante.

Pero la introducción masiva de los Sistemas No Tripulados requerirá, como decíamos antes, disponer de sistemas de navegación y guiado autónomos altamente fiables. Especialmente en lo que concierne a los UAV, donde la necesaria integración en el espacio aéreo civil obligará a dotar a estos Sistemas, al carecer de piloto, de medios automáticos de detección y esquivas S&A (*Sense & Avoid*), será necesario disponer de un sistema capaz de reportar automáticamente la posición, basándose en una combinación de GPS y de comunicaciones ADS-B (*Automated Dependent Surveillance-Mode B*).

También en lo que concierne a la navegación y al guiado de vehículos terrestres, tripulados o no, el GPS se configura como la tecnología do-

**Cuadro 1.** — Previsiones de venta de Sistemas Aéreos No Tripulados. La mayor parte del mercado corresponderá a aplicaciones militares.

En unidades	Años										Total
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
Mini-UAVs	2.082	1.525	1.820	2.090	1.667	1.352	1.723	1.961	2.336	2.867	19.423
STUAVs	64	116	216	245	305	395	359	359	70	37	2.166
TUAVs	200	153	123	171	174	127	122	130	176	162	1.538
Naval-UAVs	4	6	4	7	30	37	60	69	64	48	329
MALE	44	71	94	129	126	111	113	120	89	71	968
HALE	11	8	7	10	12	16	16	20	19	18	137
UCAVs	2	1		2	1		2	3	10	15	36
Civil-Small	225	205	275	265	280	288	272	411	434	581	3.236
Civil-MALE	17	17	2	7	6	9	13	11	11	13	106
<i>TOTAL</i>	2.649	2.102	2.541	2.649	2.601	2.335	2.680	3.804	3.209	3.812	27.939

Fuente: Teal Group Corporation.

minante en los próximos años. A ello contribuye no sólo su cobertura global o sus excelentes prestaciones en todo tiempo, sino también el abaratamiento de los costes de este tipo de dispositivos que se ha producido gracias a la introducción masiva de esta tecnología en los mercados civiles. En la actualidad, prácticamente todos los vehículos de gama media y alta están equipados con receptores GPS para aplicaciones de navegación, localización o emergencia.

En diversos países de todo el mundo (por ejemplo, Brasil, México y Holanda) se ha planteado incluso la obligatoriedad legal de dotar a todos los números vehículos por unas u otras razones, desde localización en caso de robo hasta la implantación de esquemas de pago por uso en las carreteras, cuadro 1.

Esto ha facilitado una reducción de costes espectacular de estos dispositivos, lo que ha alimentado a su vez su utilización cada vez más amplia en todo tipo de aplicaciones. Hay que tener presente que en la primera guerra del Golfo, los terminales de mano adquiridos por el Ejército norteamericano tenían un precio superior a los 3.000 dólares, con unas prestaciones claramente inferiores a las que proporciona hoy en día cualquier navegados de 100 dólares. Con esos precios, y con la penetración cada vez mayor en el mercado civil, es previsible que el GPS se convierta en la opción prioritaria para las aplicaciones militares de navegación y guiado en el futuro cercano.

Sin embargo, hemos mencionado ya algunas de las limitaciones que pesan sobre el Sistema, y que obligarán a combinar este con otro tipo de sensores para reducir la dependencia con respecto a una única tecnología. De hecho, la mayor parte de los sistemas militares utilizan en la actualidad una combinación de GPS e INS como medio de navegación primario, que se complementa en los sistemas más avanzados con otros medios de guiado, como por ejemplo sistemas basados en reconocimiento del terreno.

*Posicionamiento, Seguimiento de Fuerzas (FFT)  
y Gestión de Orden de Batalla (BMS)*

Además de las aplicaciones más conocidas de navegación y guiado, los Sistemas de Posicionamiento por Satélite están también en el corazón de las aplicaciones de seguimiento de fuerzas y de muchos de los Sistemas de Mando y Control que se despliegan en teatro de operaciones en la actualidad. Una vez más, no se tratará de ser exhaustivo en las aplicaciones, sino de explicar por qué esta tecnología es crítica para el futuro desarrollo de los Sistemas de Comando, Control, Comunicaciones, Computadoras e Inteligencia.

Conocer y compartir la posición de nuestras propias fuerzas, de los enemigos y los objetivos militares en el teatro de operaciones es fundamental en los escenarios de defensa actuales y previsibles para las próximas décadas. Como indica la Agencia Europea de Defensa:

«La guerra se ha descrito como una mezcla de inteligencia y energía cinética. El inicio de las campañas en Afganistán e Irak ha confirmado más allá de toda duda que estamos pasando de la era industrial a la era de la información en la guerra, que la inteligencia (o el conocimiento, o la información) se convertirán en un recurso cada vez más importante para el éxito de las operaciones, en tanto que la energía cinética tendrá que aplicarse en cantidades cada vez más precisas y limitadas. En la guerra aérea sobre Kosovo sólo el 15% de las municiones vertidas fueron «inteligentes», en la guerra de Irak en el año 2003, las proporciones entre municiones simples e inteligentes se invirtieron. Hay que considerar seriamente la futura utilidad de las municiones no guiadas (y de las aeronaves que no pueden utilizar armas inteligentes), así como de las bombas de racimo, minas y otras armas de efecto indiscriminado.»

En definitiva, los futuros escenarios de conflicto dependerán en gran medida de nuestra habilidad para convertir los datos en información, y los datos de georeferencia jugarán un papel fundamental en la estructuración de esa información. Los Sistemas de Navegación y Posicionamiento por Satélite son críticos en ese proceso:

- Proporcionan una referencia común a los diferentes agentes en el teatro de operaciones, desde los observadores avanzados hasta los estados mayores, de muy alta precisión.
- Permiten el guiado preciso de las municiones, minimizando los posibles daños colaterales y las incidencias causadas por «fuego amigo».
- Permiten establecer una visión conjunta y compartida en tiempo real del campo de batalla, mejorando además la comprensión completa del escenario de operaciones al poner a disposición del mando información precisa sobre la posición de las diferentes unidades.
- Facilita la coordinación de las diferentes fuerzas y armas involucradas en la acción (recordar aquí que hasta la guerra de Kosovo era frecuente que la aviación atacara involuntariamente posiciones amigas por un conocimiento impreciso del orden de batalla).

Ya hemos comentado anteriormente que, obviamente, la tecnología de navegación por satélite tiene sus limitaciones para este tipo de aplicaciones. Esto no impide que la mayor parte de las Fuerzas Armadas de todo el mundo consideren el posicionamiento por satélite como un elemento clave para sus Sistemas de Mando y Control, lo que inmediatamente nos conduce a analizar las posibilidades de evitar el acceso de las fuerzas enemigas a estas señales. Además de la simple posibilidad mencionada a propósito de las aplicaciones de navegación y guiado de interferir la señal de navegación utilizando perturbadores, existe también la de suplantar a los propios satélites de navegación, emitiendo una señal falsa que confunda a los receptores (*spoofing*), figura 2.

Por otra parte, tanto GPS como Galileo contemplan la posibilidad de denegación selectiva de acceso a las señales de navegación en determinadas regiones. Contra lo que sucedió en la primera guerra del Golfo, en la que paradójicamente el Departamento de Defensa americano decidió desactivar temporalmente la disponibilidad selectiva del GPS para facilitar que los terminales de mano que sólo tenían acceso al código C/A pudieran ser utilizados por sus propias fuerzas, hoy sería más previsible que en caso de conflicto, las fuerzas enemigas tuvieran que enfrentarse a la denegación del acceso a la señal civil en el escenario de conflicto



**Figura 2.**— Terminal MSAS (Mobile Situational Awareness System) utilizando posicionamiento GPS para soldado individual o pelotón.

(ni que decir tiene que el acceso a la señal militar continúa restringido exclusivamente a las fuerzas aliadas).

En todo caso, los avances tecnológicos que se producen para evitar o reducir los problemas acusados por el *jamming* y el *spoofing*, limitarán en un futuro cercano el impacto real sobre las operaciones.

De hecho, el modelo de uniformidad que equipa a las Fuerzas Armadas norteamericanas, el MicroDAGR (*Micro Defence Advanced GPS Receiver*), incorpora estas capacidades y las traslada de forma masiva a los más de 300.000 soldados ya equipados con estos aparatos.

La cada vez mayor dependencia de los sistemas de posicionamiento, FFT o BMS con respecto a los Sistemas de Navegación por Satélite no es fruto únicamente de la precisión alcanzable con estos Sistemas, sino de su capacidad para proporcionar esas prestaciones en prácticamente cualquier rincón del planeta y de su muy reducido coste, al que ha contribuido de forma decisiva como ya hemos visto, el éxito de estas tecnologías en los mercados civiles.

Con todo, estas capacidades tendrían una utilidad mucho más limitada si no pudieran utilizarse en combinación con otras tecnologías. Así, es la combinación de las tecnologías de posicionamiento por satélite con el avance de los sensores para identificación y designación de blancos lo que permite una gran mejora en el conocimiento de la posición de las fuerzas enemigas en el campo de batalla. Y es la combinación de las tecnologías de posicionamiento por satélite con las de comunicaciones, las que permiten la completa explotación del conocimiento compartido y común de las posiciones de las fuerzas amigas y enemigas en el campo de batalla.

### *Georeferenciación*

Los Sistemas de Posicionamiento por Satélite son también extraordinariamente relevantes para todas las aplicaciones que requieran una georeferenciación precisa, desde las actividades de vigilancia e inteligencia, hasta la generación de cartografía militar.

De hecho, la cada vez mayor precisión con la que se conoce la posición de las fuerzas propias y enemigas en el campo de batalla gracias los Sistemas de Navegación por Satélite hacen a su vez más necesario disponer de información cartográfica con al menos idéntica precisión.

La mayor parte de los mapas «navegables» disponibles comercialmente en la actualidad han sido generados en mayor o menor medida con ayuda de Sistemas de Navegación por Satélite, que se han utilizado para establecer una referencia geográfica precisa con independencia del sensor utilizado para obtener la información cartográfica o de la plataforma en que éste se encuentre embarcado.

El uso de los Sistemas de Navegación por Satélite como Sistema de Georeferenciación facilita la utilización inmediata de los mapas así generados por las fuerzas militares que, como ya hemos visto, utilizan fundamentalmente aquellos para obtener información de situación.

La capacidad de generar mapas de alta resolución de cualquier territorio es vital para mantener la superioridad táctica en operaciones que requieren el despliegue de fuerzas más allá de las fronteras nacionales. Ya en la primera guerra del Golfo, la capacidad de las fuerzas de la coalición para actualizar la información cartográfica disponible a medida que avanzaban en territorio iraquí, fue fundamental para facilitar el rápido movimiento de las tropas a través del desierto.

Como en otras aplicaciones, tenemos también que señalar las limitaciones que puede tener la tecnología de navegación por satélite en este tipo de aplicaciones, que tienen que ver en este caso probablemente más con las dificultades que pueden encontrarse en el uso de estos Sistemas en terrenos urbanos, donde aparecen con frecuencia problemas de ocultación de señal o efectos de *multipath*, que su utilización para cartografía en campo abierto, donde los límites tecnológicos están posiblemente más relacionados con los impuestos por los sensores que se utilizan para la captura de información cartográfica, figura 3.



**Figura 3.** — La combinación de GPS con sensores de toda índole embarcados sobre diferentes plataformas (en la foto, lidar-3D sobre un vehículo terrestre) facilita la obtención de mapas de muy alta resolución en un tiempo mínimo.

## *Sincronización*

Menos conocidas, pero no menos relevantes que las aplicaciones de posicionamiento, las aplicaciones de los Sistemas de Navegación por Satélite en el ámbito de la sincronización merecen también atención en el ámbito de la Defensa.

Los satélites de navegación actuales son, en esencia, relojes extraordinariamente precisos cuya posición en órbita es también conocida con muy alta precisión, lo que permite determinar la posición de un observador mediante triangulación. Pero dicho esto, lo primero que un Sistema de Navegación por Satélite proporciona es una base de tiempos universal, altamente estable y de mucha precisión, lo que convierte a estos Sistemas en una herramienta óptima para asegurar la sincronización operativa de todo tipo de sistemas en red. La mayor parte de las redes de comunicaciones y de distribución de energía eléctrica de los países desarrollados utilizan receptores GPS para sincronizar sus operaciones. Más aún, las principales normas internacionales de los organismos competentes (por ejemplo Comisión Electrónica Internacional e Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) sugieren utilizar este tipo de Sistemas para la sincronización de redes.

Pero las redes son críticas en la estrategia militar del futuro. La disponibilidad ubicua de información común en tiempo real requiere arquitecturas centradas en la red, y a su vez, como en las aplicaciones civiles, estas arquitecturas requieren una sincronización en tiempos muy precisa, que los GNSS son capaces de proporcionar, para aplicaciones como:

- Comunicaciones de Espectro Ensanchado con Salto de Frecuencia (*Spread Spectrum Frequency Hopping*) para reducir el riesgo de interferencia e interceptación.
- El diagnóstico y recuperación de problemas en la red, incluyendo problemas propios de la sincronización. Esto tiene que ver con la capacidad de los GNSS para proporcionar una referencia de tiempo universal UTC (*Universal Time Coordinated*); aunque a menudo las redes de comunicaciones operativas empleen otras técnicas de sincronización para evitar los problemas derivados de la posibilidad de interferir o falsificar las señales GNSS, la necesidad de coordinar diversas jerarquías dentro de la red obliga a que al menos periódicamente las diferentes subredes se sincronicen a una referencia común universal en tiempo real.
- Procesado distribuido, en la medida en que progresivamente la red tenga mayor capacidad para aprovechar todos los recursos dispo-

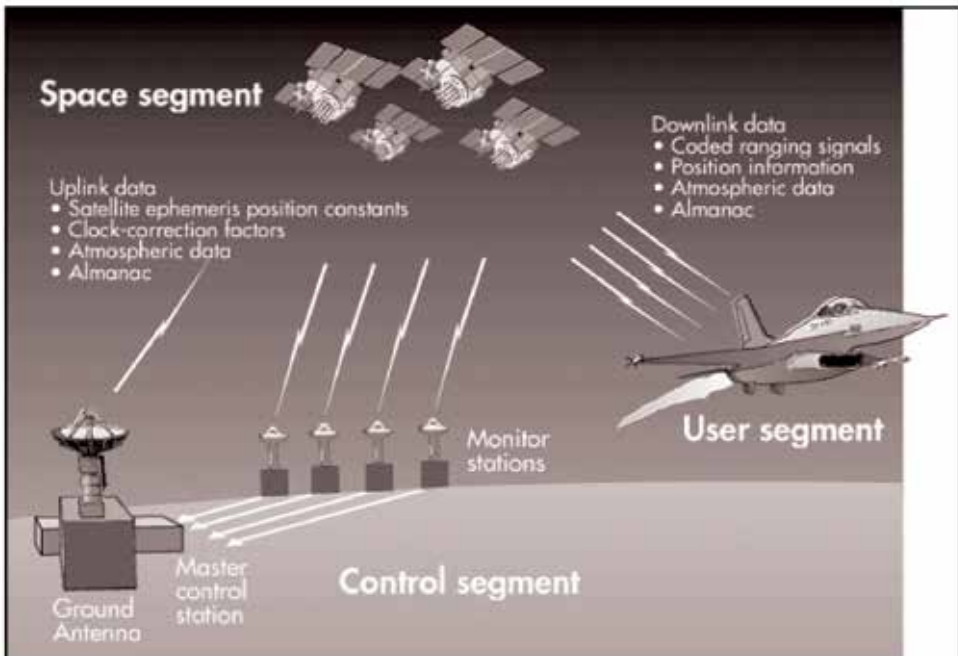
nibles en el teatro de operaciones o incluso también accesibles de forma remota.

- Sincronización de operaciones.
- Seguridad de acceso y autenticación, donde la señal de tiempo GNSS puede utilizarse como elemento de sincronización que permita generar claves de sesión más robusta para el cifrado de las comunicaciones.
- La generación de marcas de tiempo para compartir información en tiempo real, con la seguridad de disponer de una Escena Operativa Común (*Common Operational Picture*) a todos los niveles en la jerarquía de mando y control.

## Los Sistemas de Posicionamiento y Navegación por Satélite en la actualidad

### GPS

El Sistema GPS consta de tres segmentos: la constelación de satélites, la red de control y monitoreo en tierra, y los terminales de usuario.



**Figura 4.—** Arquitectura del Sistema GPS. En realidad la arquitectura de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite es la misma más allá de diferencias en la nomenclatura empleada para designar a los diferentes segmentos.

La terminología de la Oficina de Programa Conjunta GPS (GPS-JPO) formal designa estos componentes como segmento espacio, segmento de control y segmento de equipos de usuario.

El segmento espacio consiste en el conjunto de satélites en órbita que proporcionan señales de distancia (*ranging*) y mensajes de datos a los usuarios, figura 4.

El segmento de control sigue y mantiene a los satélites en el espacio, monitoreando su salud y configuración orbital, así como la integridad de la señal de navegación. Además, el segmento de control actualiza las correcciones de los relojes y las efemérides de los satélites, así como otros numerosos parámetros que son necesarios después para la determinación de las soluciones de Posición, Velocidad y Tiempo (PVT).

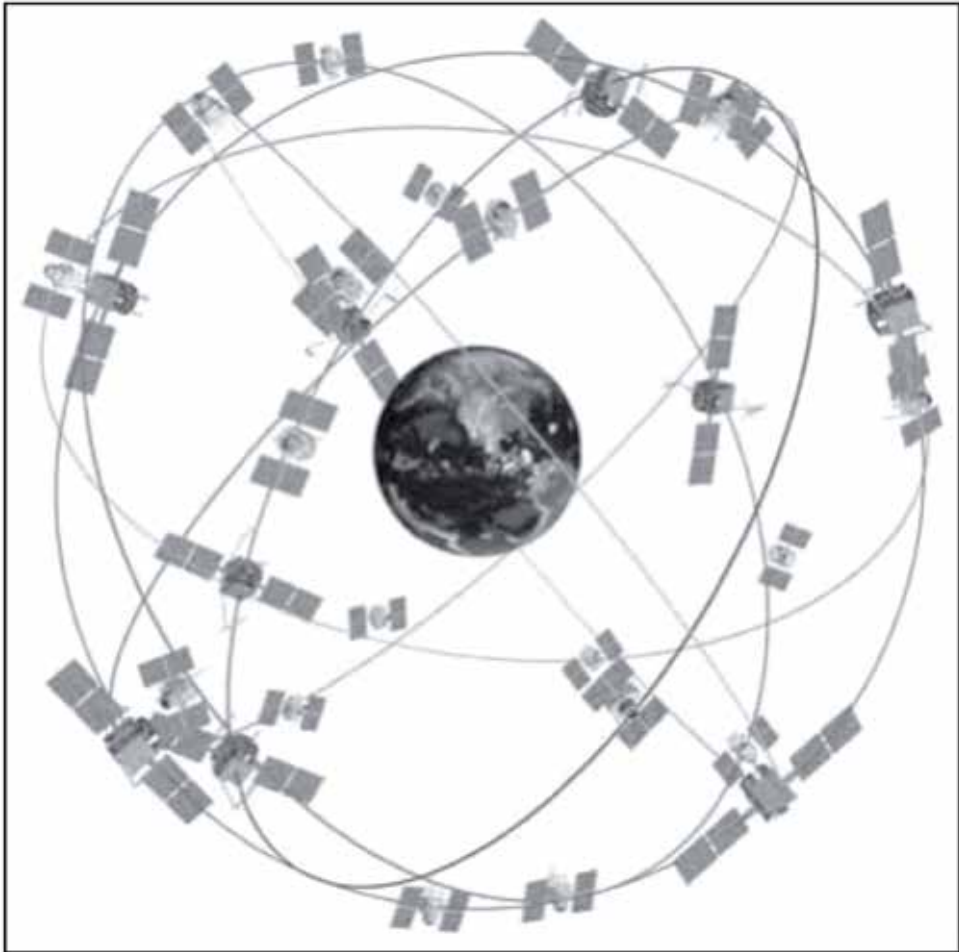
Finalmente, el segmento de usuario, por ejemplo, el receptor GPS, realiza las funciones de navegación, posicionamiento o sincronización de tiempos requeridas.

#### DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SEGMENTO ESPACIO

El segmento espacio es la constelación de satélites desde los que los usuarios hacen medidas de distancia para triangular su posición. Los satélites de la constelación emiten una señal codificada en PRN de la que se deriva la distancia entre el usuario y el satélite emisor. Este concepto hace del GPS un sistema pasivo desde el punto de vista del usuario, puesto que él únicamente recibe las señales transmitidas, de modo que un número ilimitado de ellos pueden hacer uso simultáneamente de la señal de navegación. La señal transmitida por los satélites va modulada con datos que incluyen información que define la posición del satélite emisor, lo que permite completar la solución de posición mediante triangulación.

Cada uno de los satélites de la constelación incluye la plataforma, con sus subsistemas de control, y las cargas útiles. La carga útil principal es la de navegación, que soporta la misión de posicionamiento, navegación y tiempo del sistema, pero existe una carga útil secundaria para la Detección de Detonaciones Nucleares (NUDET), que soporta la detección y reporte de fenómenos de alta radiación sobre la superficie terrestre.

La configuración nominal del Gobierno norteamericano para la constelación consta de 24 satélites, aunque hay 31 en órbita en la actualidad.



**Figura 5.** — *La configuración nominal de la constelación GPS en la actualidad.*

En su configuración nominal, los satélites están dispuestos en seis planos orbitales alrededor de la Tierra con cuatro satélites en cada plano. El periodo nominal de la órbita de cada uno de ellos es medio día sidéreo u 11 horas y 58 minutos. Las órbitas son casi circulares y están igualmente espaciadas alrededor del ecuador a 60 grados de separación y con una inclinación relativa al plano del ecuador de 55 grados, tal y como se muestra en la figura 5.

El radio de la órbita es de aproximadamente 26.600 kilómetros. Esta configuración permite proporcionar cobertura global en posición, velocidad y tiempo las 24 horas del día.

El segmento espacio se ha desplegado en sucesivos bloques que tienen prestaciones diferentes y cuyo suministro fue encargado a diferentes fabricantes. La siguiente figura 6 resume el estado actual de la constelación y de los diferentes bloques en órbita o previstos en la actualidad.

El diseño de la constelación está sujeto a diferentes compromisos de diseño. Uno de los criterios principales es el de minimizar la contribución de la geometría al error de navegación; en otras palabras, se pretende asegurar que la disposición de los satélites es lo suficientemente diversa en términos geométricos para asegurar una buena observación a los usuarios sobre toda la superficie terrestre. Esta geometría de observación se mide por un parámetro denominado Dilución de la Precisión (DOP), y el diseño actual responde en gran medida al criterio de optimizarlo, aunque lógicamente pesan también otras consideraciones, como la robustez de la configuración nominal al fallo de los satélites o






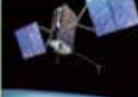
1978-1985	1989-1997	1997-2004	2005-2009	2010-presente	2014-2024
					
Rockwell	Boeing (Rockwell)	Lockheed Martin	Lockheed Martin	Boeing	Lockheed Martin
Bloque I	Bloque II/IIA	Bloque IIR	Bloque IIR-M	Bloque IIF	Bloque III
<b>11 satélites Operativos</b>	<b>28 satélites 11 operativos</b>	<b>13 satélites 12 operativos</b>	<b>8 satélites 7 operativos</b>	<b>12 satélites 1 operativo</b>	<b>32 satélites previstos</b>
Sistema de demostración	GPS básico Proporciona Capacidad Inicial de Navegación		Capacidades anteriores más...	Capacidades anteriores más...	Capacidades anteriores más...
<ul style="list-style-type: none"> <li>Señal de navegación L1 (CA)</li> <li>Señales de navegación L1 &amp; L2 (código P)</li> <li>Vida útil de diseño 5 años</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Servicio estándar: <ul style="list-style-type: none"> <li>Una sola frecuencia (L1)</li> <li>Código de navegación C/A</li> </ul> </li> <li>Servicio de precisión: <ul style="list-style-type: none"> <li>Doble frecuencia (L1 &amp; L2)</li> <li>Código de navegación P(Y)</li> </ul> </li> <li>Vida útil de diseño 7.5 años</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>2ª señal civil en la banda L2 (L2C)</li> <li>Cobertura terrestre del código M en L1/L2</li> <li>Demostración L5</li> <li>Potencialmente anti-perturbación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2ª señal civil en la banda L5</li> <li>Procesador de navegación reprogramable</li> <li>Mejora de la precisión</li> <li>Vida útil de diseño 12 años</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IIIA <ul style="list-style-type: none"> <li>Mayor precisión</li> <li>Mayor potencia de cobertura terrestre</li> <li>Vida útil de diseño 15 años</li> <li>4ª señal civil (L1C)</li> </ul> </li> <li>IIIB <ul style="list-style-type: none"> <li>Comunicaciones en tiempo real</li> </ul> </li> <li>IIIC <ul style="list-style-type: none"> <li>Señal de integridad</li> <li>Haz estrecho para capacidad anti-jamming</li> </ul> </li> </ul>

Figura 6. — Despliegue del segmento espacio y características diferenciales de los distintos bloques lanzados o previstos en la actualidad.

**Cuadro 2.** — Estructura de la señal GPS tradicional.

Prioridad de la señal	Primaria	Secundaria
Designación de la señal	L1	L2
Frecuencia de la portadora (MHz)	1.575,42	1.227,60
Códigos PRN (Mchip/s)	P(Y) = 10,23 y C/A = 1,023	P(Y) = 10,23 y C/A = 1,023*
Modulación del mensaje de datos de navegación (bps)	50	50**

\* Normalmente el segmento de control selecciona únicamente el código P(Y) en la banda L2.

\*\* El mensaje de navegación a 50 Hercios se utiliza normalmente para modular la señal L2 P(Y), pero puede evitarse desde el segmento de control. Hay tres posibilidades pues en L2: código P(Y) con datos de navegación, código P(Y) sin datos y código C/A con datos.

la «observabilidad» de los satélites desde las estaciones de tierra para permitir el mantenimiento de las efemérides de la constelación y el envío de datos a aquéllos.

En cuanto a las señales de navegación transmitidas por los satélites GPS «tradicionales» –esto es, hasta los pertenecientes al bloque IIR– se emiten en dos frecuencias portadoras denominadas L1, la frecuencia primaria, y L2, la frecuencia secundaria. Las frecuencias portadoras están moduladas por códigos de espectro ensanchado con secuencias directas de PRN únicas para cada satélite DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) y por un mensaje de datos de navegación común. Todos los satélites emiten en las mismas frecuencias portadoras –a diferencia como veremos del esquema GLONASS– utilizando un esquema de acceso Múltiple por División de Códigos (*Code Division Multiple Access*). Así, para engancharse a un satélite cuando están a la vista varios de ellos utilizando la técnica Acceso Múltiple por División de Código (CDMA), el receptor debe replicar la secuencia PRN junto con la réplica de la señal portadora, incluyendo los efectos doppler. El cuadro 2 resume las características de estas señales.

A las señales tradicionales, se han añadido a partir del bloque IIR otras adicionales: dos nuevas señales civiles, una de ellas en la banda L2 (denominada por tanto L2C) y otra en la banda de 1.176,45 Megahercios, designada como L5, y una nueva señal militar con un código denominado M, añadida en L1 y L2. La figura 7, p. 276, ilustra la distribución de potencia en el espectro radioeléctrico de la señales GPS actuales.

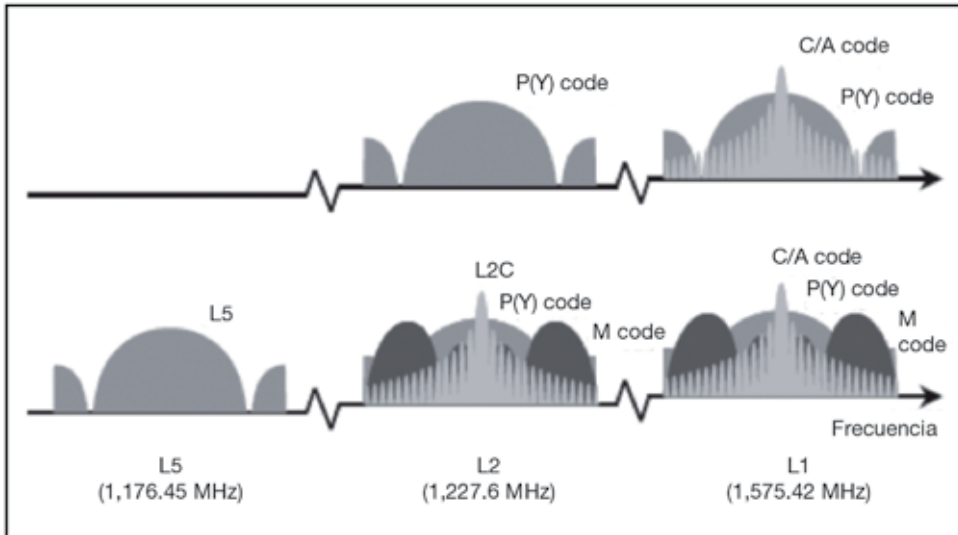


Figura 7.— Las señales GPS tradicionales (arriba) y actuales (abajo).

#### DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SEGMENTO DE CONTROL

El Segmento de Control (CS) tiene a su cargo el monitoreo, mando y control de la constelación de satélites. Funcionalmente, el CS vigila las señales de navegación en banda L emitidas, actualiza los mensajes de navegación y resuelve las anomalías detectadas a bordo. Además, el CS controla el estado de salud de cada satélite, gestiona las tareas relacionadas con las maniobras de control de estación (control de posición sobre la órbita) de los satélites y con la recarga de las baterías, y comanda las cargas útiles como sea necesario.

Los principales elementos del CS son el centro de control maestro MCS (*Master Control Station*), las estaciones de monitoreo en banda L, y las estaciones de tierra en banda S. Las funciones principales del CS se realizan en el MCS, que está localizado en la base de la Fuerza Aérea norteamericana de Schriever, en Colorado Springs. Existe un Centro de Control Maestro de Respaldo (*Alternate Master Control Station*) en la base aérea de Vandenberg (California), que proporciona redundancia total a las funciones del MCS. Los elementos fundamentales del CS y su distribución funcional se muestran en la figura 8.

En su configuración actual, el segmento de tierra incluye seis estaciones de monitoreo y cuatro antenas en tierra, como se muestra en la siguiente

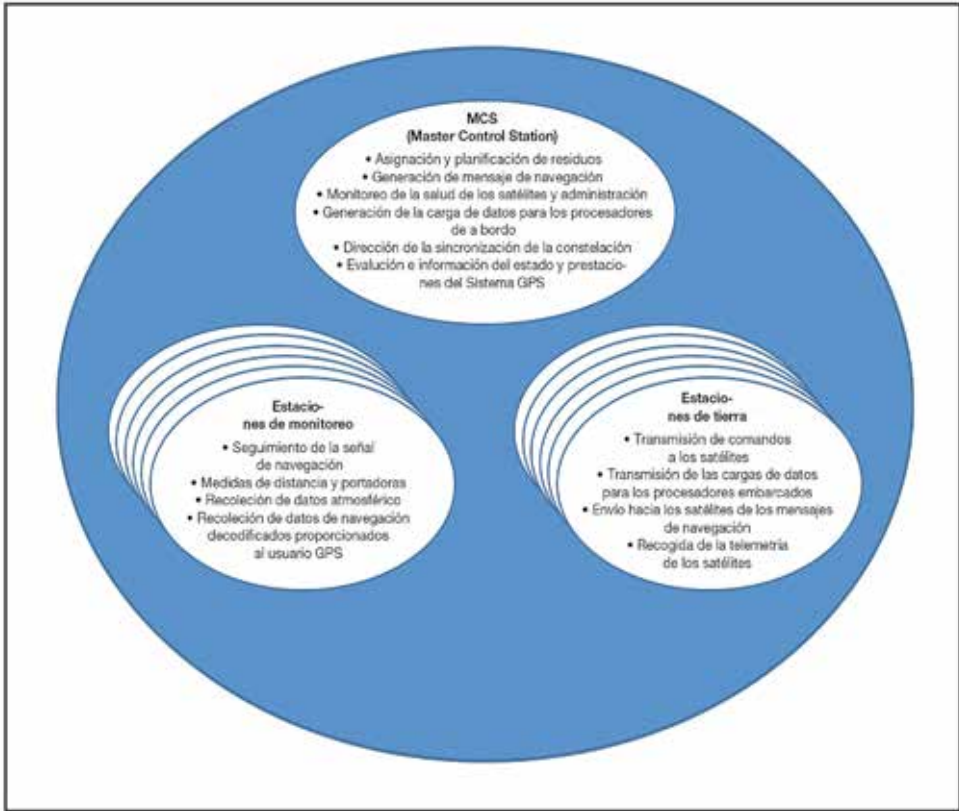


Figura 8. — Arquitectura funcional del segmento de control.

figura. A estas estaciones se han añadido recientemente 10 estaciones de monitoreo adicionales operadas por la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA) norteamericana, con objeto de reducir los periodos durante los que se podía perder anteriormente contacto con alguno de los satélites, que podía llegar a ser de dos horas, figura 9, p. 278.

La MCS es el auténtico corazón del segmento de control. Su tarea fundamental es generar y distribuir el mensaje de navegación, figura 10, p. 278. Para ello, la MCS procesa los datos de distancia y diferencia de fase de las portadoras obtenidos en las estaciones de monitoreo y determina las efemérides precisas de los satélite.

También estima las correcciones necesarias para los relojes de a bordo AFS (*Atomic Frequency Standards*) de modo que se pueda mantener una sincronización precisa del tiempo GPS. Al mismo tiempo, la MCS moni-



Figura 9.— Antenas en tierra y estaciones de monitoreo GPS operadas por la Fuerza Aérea norteamericana.

torea la integridad de la señal de navegación, para asegurarse de que no se introducen errores en el Sistema. Por último, la MCS se encarga de la coordinación con otras fuentes de datos externas, como por ejemplo NGA o USNO (para la coordinación UTC).

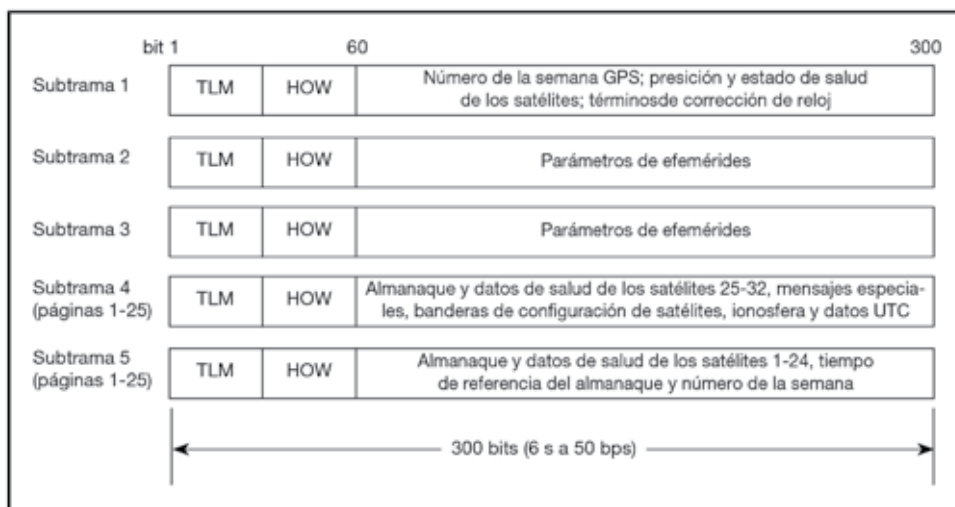


Figura 10.— Estructura del mensaje de navegación.

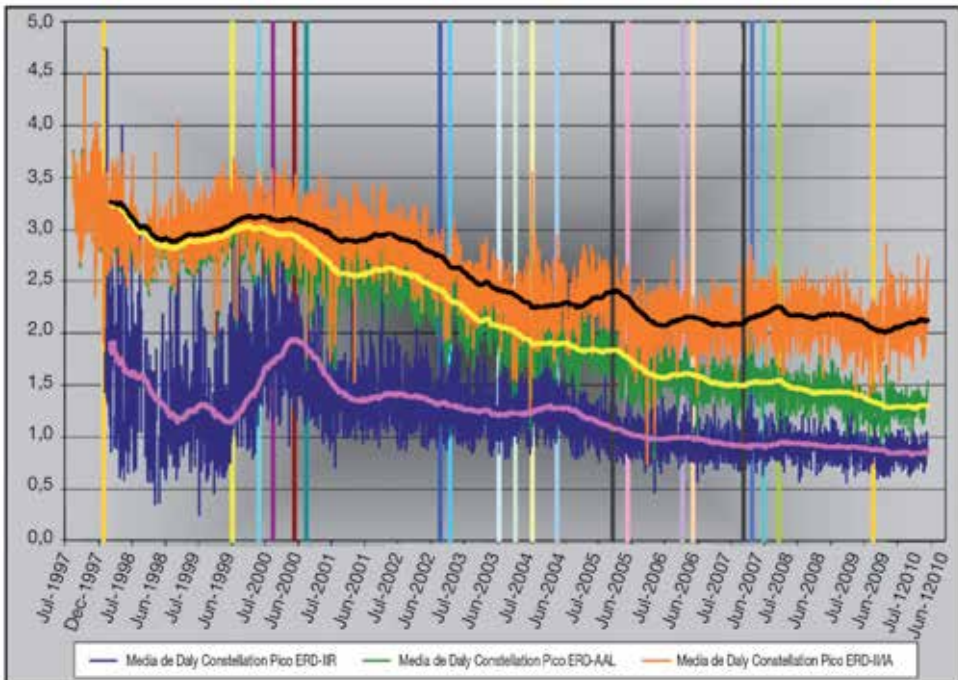
## PRESTACIONES DEL SISTEMA GPS

Las prestaciones de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) deben expresarse no sólo en términos de precisión de la solución PVT, sino también en términos de disponibilidad, integridad y continuidad del servicio.

### PRECISIÓN

De forma general, la precisión de la solución PVT proporcionada por cualquier sistema GNSS viene determinada por la DOP y por el error en la medida de pseudorangos, es decir, de la distancia entre el receptor y el satélite.

La precisión efectiva de los valores de pseudorango se denomina UERE (*User-Equivalent Range Error*). Así, de manera cualitativa podríamos decir que el error en la estimación de las soluciones PVT podría expresarse genéricamente como: error en la solución GPS igual DOP por UERE, figura 11.



**Figura 11.** — Desviaciones Estimadas en Distancia ERD (Estimated Range Deviations) para los bloques IIA, IIR y combinados.

El UERE depende a su vez, fundamentalmente, de:

- Errores de los relojes embarcados, tanto en sesgo como en deriva.
- Errores en el cálculo de las efemérides de los satélites.
- Retardos troposférico e ionosférico en la propagación de la señal.
- Ruido y resolución en el receptor.
- Efectos de *multipath* y ocultación parcial.

Las mejoras introducidas paulatinamente en el Sistema, como por ejemplo la introducción de nuevas frecuencias que permiten estimar los errores debidos a los retardos en la propagación de la señal con mayor precisión o las mejoras en la estabilidad de los relojes embarcados, o en el ruido de los receptores, han permitido que en la actualidad las prestaciones que proporciona el GPS estén muy por encima de las especificaciones de diseño.

#### *DISPONIBILIDAD*

Con carácter general la disponibilidad de un Sistema de Navegación se define como el porcentaje de tiempo en que los servicios del sistema son utilizables, es decir, proporciona una indicación de la capacidad del sistema para rendir un servicio de navegación útil sobre un área de cobertura determinada. Para definir a su vez qué es un servicio de navegación útil habrá que establecer unos valores umbrales para la precisión y/o la integridad del sistema. La disponibilidad es una función de las características físicas del entorno y de las capacidades técnicas de los medios de transmisión.

Para un instante y lugar determinado, la disponibilidad dependerá de la geometría de la constelación y su observabilidad desde ese lugar y en ese instante, y del estado de salud de los diferentes satélites de la constelación y del sistema (por ejemplo, el segmento de control podría no ser capaz de generar mensajes de navegación correctos). Así pues, para un diseño dado de la constelación, las prestaciones en términos de disponibilidad pueden correlarse directamente al tiempo que el sistema permanece fuera de servicio (o con servicios degradados más allá del umbral aceptado) por unas u otras razones.

Desde la entrada en servicio del bloque IIR, la disponibilidad del GPS ha sido del 99,75%. El 0,25% del tiempo restante, el Sistema no ha estado disponible debido a:

- Cortes de servicio planificados del segmento de control (por ejemplo mantenimiento): 0,03%.

- Cortes de servicio no planificados del segmento de control (por ejemplo fallo MCS): 0,07%.
- Cortes de servicio planificados de algún satélite: 0,10%.
- Cortes de servicio no planificados de algún satélite: 0,05%.

#### INTEGRIDAD

Además de proporcionar continuamente una solución PVT, los Sistemas GNSS deben tener la capacidad de advertir a los usuarios en el plazo adecuado de que el Sistema no debe ser utilizado. Esta capacidad se conoce como integridad del Sistema. La integridad es una medida de la confianza que cabe depositar sobre la corrección de la información suministrada por el sistema en su conjunto, de ahí que incluya la mencionada capacidad de enviar alarmas válidas y rápidas a los usuarios sobre cuándo deben dejar de utilizar éste.

Las anomalías en términos de integridad pueden deberse a aberraciones de la señal en el espacio SIS (*Signal-In-Space*) por fallos del sistema o por fallos de alguno de sus componentes. Por ejemplo, el MCS ha detectado anomalías de los relojes de a bordo debida a comportamientos anómalos del AFS, que podían provocar cambios repentinos de la frecuencia del reloj muy importantes. El problema en el caso del GPS es que la red de estaciones de tierra no proporciona cobertura suficiente para detectar este tipo de problemas de forma inmediata, de modo que la alerta del fallo al usuario puede retrasarse de manera intolerable para ciertas aplicaciones. GPS no proporciona ninguna garantía en cuanto al tiempo de alarma del sistema en caso de fallo, pero con la configuración actual de estaciones de monitoreo, incluyendo las asociadas de NGA se ha reducido muy considerablemente.

Se han desarrollado diversas técnicas para mejorar la integridad del Sistema. Muchas de ellas tienen que ver con los sistemas de aumentación. Pero las técnicas RAIM-FDE (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring-Fault Detection and Exclusion*) no depende de elementos externos, sino que puede ser implementadas en el propio receptor. Estas técnicas dependen del número de satélites visibles, pero en la configuración actual lo más frecuente es tener entre 7 y 12 satélites a la vista, lo que permite su utilización.

#### GLONASS

El Sistema GLONASS es la contrapartida rusa al Sistema norteamericano GPS, si bien las dificultades económicas por las que atravesó la

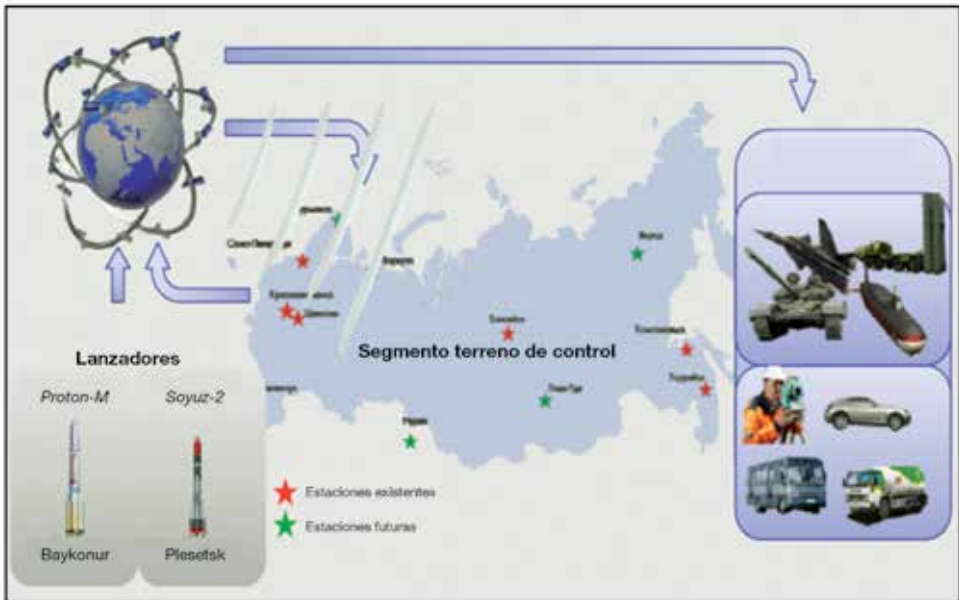


Figura 12– Arquitectura general del Sistema GLONASS.

Federación Rusa tras la caída del muro de Berlín han provocado que, a diferencia del norteamericano, éste no haya llegado a estar completamente operativo hasta hace muy poco tiempo.

Como en el caso de GPS, el Sistema GLONASS consta de un segmento espacial, que difunde las señales de navegación y los mensajes de navegación, de un segmento de control en tierra y de un segmento de usuario. En este sentido, su arquitectura es completamente análoga a la del GPS, figura 12.

#### DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SEGMENTO ESPACIO

La constelación GLONASS se diseñó para consistir en 21 satélites activos, más tres de repuesto en órbita. La figura 13 proporciona una imagen de aquella. Los 24 satélites están uniformemente distribuidos en tres planos orbitales separados 120 grados en ascensión recta. La constelación de 21 satélites garantiza observación continua de no menos de cinco satélites simultáneamente para más del 99% de la superficie terrestre. Utilizando el concepto de 21 satélites operativos, en el caso de GLONASS son sus propios controladores los que determinan las prestaciones de los 24 satélites y activan los «mejores» 21, manteniendo los otros tres

para reserva. Periódicamente se revisa la selección y, si es preciso, se elige un nuevo conjunto de 21 «mejores».

Una vez que se ha establecido el conjunto de 21 satélites operativos y tres de reserva, un único fallo en la constelación no reducirá la probabilidad por diseño de sistema de obtener una solución de navegación por debajo del 94,7%. Si fuera necesario para mantener la precisión del sistema, se recurriría al lanzamiento de nuevos satélites para o bien sustituir a los fallados o bien mantenerlos en reserva para un uso futuro. El concepto operativo es pues diferente al del GPS.

Los satélites GLONASS están en órbitas circulares de 19.100 kilómetros sobre la superficie terrestre, con una inclinación de 64,8 grados. El periodo orbital es de 11 horas y 15 minutos. Esta configuración orbital y el

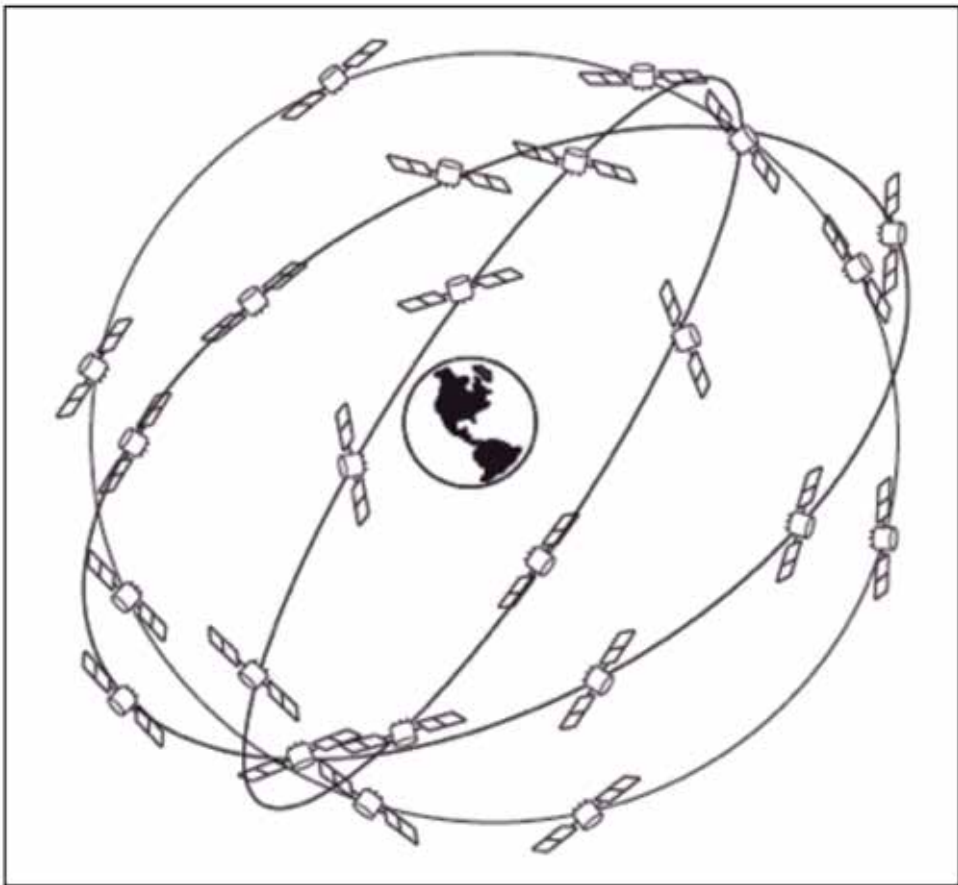






Figura 13. — La constelación GLONASS.

diseño general del sistema (incluyendo los anchos de haz nominales de las antenas de banda L de 35 grados a 40 grados) permiten proporcionar servicios de navegación a usuarios hasta los 2.000 kilómetros de altura sobre la superficie terrestre, figura 14.

A diferencia de GPS, donde cada satélite transmite un par de códigos PRN diferente –C/A y P(Y)– sobre la misma frecuencia en un formato CDMA, cada satélite GLONASS emite el mismo par de códigos PRN pero sobre una frecuencia diferente. Este procedimiento, denominado FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), es el mismo utilizado por las estaciones de radio y televisión comerciales. Cada estación sería análoga a un satélite GLONASS, y cada receptor de radio a un receptor GLONASS. Así, el receptor GLONASS se «sintoniza» a un satélite en particular seleccionando

1982-2005	2003-2012	2010-presente	2013 - ...
			
<b>GLONASS</b>	<b>GLONASS-M</b>	<b>GLONASS-K1</b>	<b>GLONASS-K2</b>
<b>81 satélites</b> <b>0 operativos</b>	<b>28 satélites</b> <b>26 operativos</b>	<b>1 satélites</b> <b>1 operativos</b>	<b>previstos</b>
Sistema original	Sistema mejorado hasta capacidad operativa	Capacidades anteriores más...	Capacidades anteriores más...
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Señales de navegación L1SF, L2SF, L1OF</li> <li>• FDMA</li> <li>• Estabilidad del reloj <math>5 \times 10^{-13}</math></li> <li>• Vida útil de diseño 3 años</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Señales de navegación GLONASS + L2OF</li> <li>• FDMA</li> <li>• Estabilidad del reloj <math>1 \times 10^{-13}</math></li> <li>• Vida útil de diseño 7 años</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Señales de navegación GLONASS-M + L3OC (CDMA) en pruebas</li> <li>• SAR</li> <li>• Despresurizado</li> <li>• Estabilidad del reloj <math>5 \times 10^{-14}</math></li> <li>• Vida útil de diseño 10 años</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Señales de navegación GLONASS-K1 + L1OC, L3OC, L1SC, L3SC (CDMA)</li> <li>• SAR</li> <li>• Despresurizado</li> <li>• Estabilidad del reloj <math>1 \times 10^{-14}</math></li> <li>• Vida útil de diseño 12 años</li> </ul>

**Figura 14.**– Despliegue del segmento espacio y características diferenciales de los diferentes bloques lanzados y previstos.

**Cuadro 3.— Estructura de la señal GLONASS.**

Prioridad de la señal	Primaria	Secundaria
Designación de la señal	L1	L2
Frecuencia de la portadora (MHz)	$9 \times (178,0 + K/16)^*$	$7 \times (178,0 + K/16)^*$
Códigos PRN (Mchip/s)	P(Y) = 5,11 y C/A = 0,511	P(Y) = 5,11 y C/A = 0,511*
Modulación del mensaje de datos de navegación (bps)	50	50

\* En su configuración final, la constelación utilizará 12 frecuencias diferentes para cada portadora, de modo que los satélites antipodas emplearán la misma frecuencia. K es un número entero que varía entre -7 y 4, de manera que las portadoras de GLONASS se distribuirían alrededor de una frecuencia de 1.601,16 Megahercios (L1) y 1.245,34 Megahercios (L2).

la frecuencia asignada a ese satélite. La elección de FDMA frente a CDMA conduce a receptores típicamente más grandes, puesto que requiere componentes adicionales para procesar múltiples frecuencias. Por contra, es más robusto frente a interferencias, y además elimina la necesidad de considerar los efectos de interferencia entre múltiples códigos de señal.

Cada satélite GLONASS emite señales centradas en dos frecuencias de portadora discretas en la banda L. Cada portadora se modula por la suma modulo-2 de una secuencia de códigos PRN bien de 511 kilohercios o de 5,11 Megahercios, y con una señal de datos de 50 bits por segundo, que contiene el mensaje de navegación.

En todo caso, como ya sea indicado anteriormente, las futuras generaciones de GLONASS transmitirán señales de navegación utilizando un esquema CDMA, por lo que habrá que considerar en su momento el cambio de las frecuencias de operación.

#### DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SEGMENTO DE CONTROL

La red de soporte y control en tierra de GLONASS, denominada GBCC (*Ground-Based Control Complex*) es responsable de las siguientes funciones:

- Medida y predicción de las efemérides individuales de cada satélite.
- Envío a los satélites de las efemérides previstas, correcciones de reloj e información de almanaque para su incorporación en el mensaje de navegación.

- Sincronización de los relojes embarcados con el tiempo de Sistema GLONASS.
- Cálculo de la desviación entre el tiempo de Sistema GLONASS y el UTC (Unión Soviética).
- Seguimiento, administración, mando y control de los satélites.

Las funciones del segmento de tierra se realizaban en una serie de centros distribuidos sobre la antigua Unión Soviética. En la actualidad, todos los centros salvo uno (una estación de seguimiento láser) han quedado dentro de la Federación Rusa. Esto es particularmente relevante en lo que se refiere a las coberturas proporcionadas a la constelación desde las estaciones de tierra, y en consecuencia a las prestaciones en cuanto a integridad.

El centro de control del Sistema está emplazado en Golitsyno-2, a unos 70 kilómetros al sur de Moscú. Este centro planifica y coordina todas las funciones del segmento de tierra. Además del mismo, existen:

- Un sincronizador central que genera y distribuye el tiempo de Sistema GLONASS. Las señales del sincronizador se envían a un Sistema de Control de Fase (PCS) que monitorea la fase y el tiempo de reloj tal y como se transmiten en las señales de navegación de los satélites, y genera correcciones que después se envían a éstos. Tanto el sincronizador como el PCS se encuentran en Moscú.
- Tres estaciones de seguimiento y comando de los satélites, que se sitúan en San Petersburgo, Yeniseisk y Komsomolsk. Está previsto el despliegue de estaciones adicionales. Las estaciones de seguimiento y comando se utilizan para determinar las trayectorias individuales de los satélites, para recibir la información de estado a través de la telemetría y para enviar a los satélites datos de configuración y del mensaje de navegación.
- Dos estaciones de seguimiento láser en Komsomolsk y Kitab, que se utilizan para mejorar la precisión en la determinación de la órbita de los satélites. También está previsto el despliegue de estaciones adicionales.
- Dos equipos de control de navegación en campo, emplazados en Moscú y Komsomolsk, que monitorean continuamente la calidad de las señales de navegación recibidas.

A diferencia de GPS, GLONASS tiene dos tipos de mensajes de navegación diferentes, uno para el código C/A y otro para el código P. Ambos mensajes son corrientes de datos a 50 bits por segundo. El propósito

primario de estos mensajes es proporcionar información sobre las efemérides de cada satélite y de las asignaciones de canales. La información de efemérides permite a los receptores posicionar con precisión la posición de cada satélite GLONASS en cualquier instante de tiempo. Además de esta información, se incluyen en el mensaje de navegación otros elementos como:

- Tiempo de la época de la órbita.
- Bits de sincronización.
- Bits de corrección de errores.
- Salud del satélite.
- Antigüedad de la información del mensaje.

Además, los rusos planean proporcionar datos que facilitarán el uso combinado de GPS y GLONASS, muy en particular las diferencias entre el tiempo de sistema GLONASS y el GPS, así como las diferencias entre los sistemas de referencia geodésicos utilizados por ambos, WGS-84 (GPS) y PZ-90 (GLONASS).

#### PRESTACIONES DEL SISTEMA GLONASS

##### *PRECISIÓN*

Según sus operadores, el Sistema GLONASS proporciona en la actualidad prestaciones equivalentes a las de GPS cuando se utiliza el código C/A, situando su precisión en la solución de posición en el plano entre cinco y siete metros (un sigma).

##### *DISPONIBILIDAD*

La disponibilidad del servicio ha mejorado mucho en los últimos años, en la medida en que la Federación Rusa ha sido capaz de financiar la renovación de los satélites y de mantener la constelación con su configuración de diseño. Hoy en día la disponibilidad supera el 98%, lo que permite la utilización global de GLONASS durante la mayor parte del tiempo.

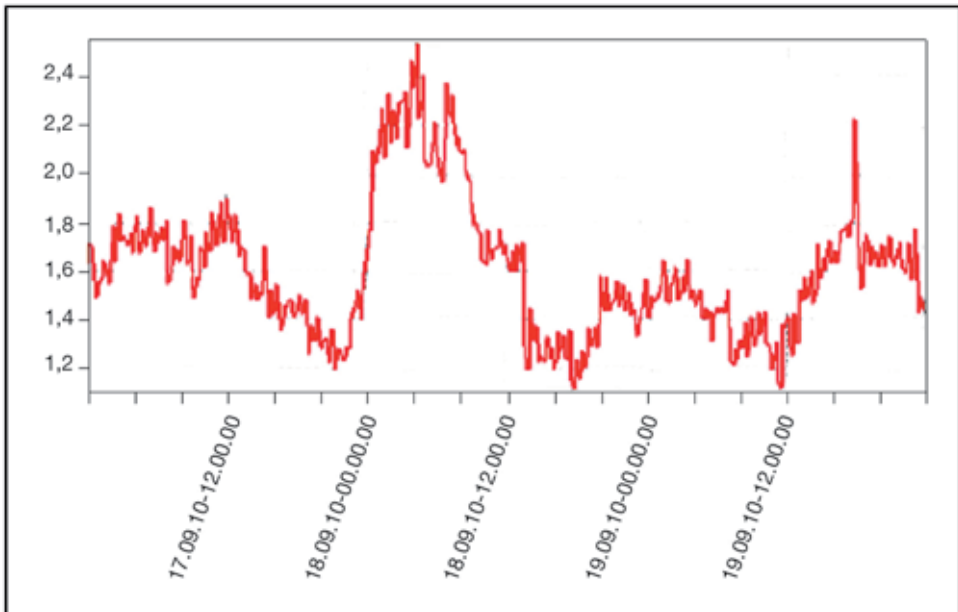
##### *INTEGRIDAD*

Como sucede en el caso de GPS, GLONASS no tiene ningún requisito de diseño sobre la integridad del Sistema. Los frecuentes fallos que plagaron el funcionamiento del sistema en sus primeros años –baste con-

siderar que se lanzaron 81 satélites del diseño inicial– hacían las prestaciones del Sistema en términos de integridad inaceptables. Sin embargo, el incremento de la vida útil de los satélites, la mejora de la estabilidad de los relojes de a bordo y el mayor número de satélites en órbita ha mejorado notablemente sus prestaciones en términos de integridad. Con todo, el número de satélites normalmente a la vista no hace posible la aplicación extensiva de técnicas RAIM sobre la señal GLONASS, por lo que para garantizar prestaciones en términos de integridad es todavía necesario recurrir a sistemas de aumentación locales o regionales. La Federación Rusa de hecho ya ha comenzado el despliegue de un sistema de aumentación por satélite para GLONAS, sobre su propio territorio denominado SDCM, figura 15.

#### *Sistemas de aumentación: WAAS, EGNOS y MSAS*

Un Sistema de aumentación por satélite SBAS (*Satellite Based Augmentation System*) es un Sistema crítico en términos de seguridad que soporta la aumentación regional –incluso a escala continental– de las prestaciones de los sistemas globales de navegación por satélite mediante el



**Figura 15.**— *Errores Instantáneos en Distancia de la Señal en el Espacio (SISRE) en metros. Habría que tener también en cuenta el DOP para estimar el error total.*

uso de Satélites Geoestacionarios (GEO) que distribuyen la información de aumentación. La mejora de prestaciones se obtiene al proporcionar una señal de distancia adicional (GEO *ranging*), información de integridad y correcciones diferenciales. Aunque el objetivo primordial de los sistemas SBAS es proporcionar garantías sobre la integridad del sistema, también se consiguen mejoras importantes sobre la precisión en posición con errores por debajo de un metro (un sigma).

En general, la infraestructura de cualquier SBAS incluye estaciones receptoras cuya posición se conoce con altísima precisión, que reciben las señales (y los datos) de los satélites GNSS primarios (GPS o GLONASS), y de un centro de procesamiento donde se calcula la integridad, las correcciones y la información de posición del GEO, formando la señal en el espacio del sistema. Esta señal se envía a los satélites GEO que la repiten hacia los usuarios para determinar su solución PVT. Para ello, el receptor utiliza las medidas y las posiciones tanto de los satélites de la constelación primaria como las de los propios GEO, así como las correcciones y los datos de integridad calculados por el Sistema.

La información de aumentación proporcionada por un SBAS cubre correcciones sobre errores de posición de los satélites (por ejemplo errores de efemérides), errores de reloj o de tiempo de los satélites, y errores introducidos por la estimación del retardo ionosférico, tanto en términos de precisión como de integridad.

Las prestaciones de los Sistemas SBAS se definen con relación al nivel de servicio para el que se diseña el Sistema. La demanda principal en cuanto a prestaciones de los SBAS viene de los requisitos de seguridad de navegación en aviación civil, y éstos varían dependiendo de las diferentes operaciones. Así, tanto WAAS, como EGNOS o el resto de los sistemas existentes o planeados en la actualidad están diseñados para responder a estos requisitos.

Como se indica en el cuadro 4, p. 290, los requisitos de prestaciones se expresan en los términos habituales para un GNSS, aunque muchos de ellos han de ser interpretados como cifras probabilidad:

1. *Precisión*: se expresa como un Error de Sistema de Navegación (NSE), esto es, la diferencia entre la posición real del avión y la posición proporcionada por el equipo embarcado. Un SBAS asegura el cumplimiento de los requisitos de precisión proporcionando al usuario correcciones a la órbita de los satélites y a los errores de los satélites,

**Cuadro 4. — Requisitos de prestaciones para SBAS impuestos por la Aviación Civil.**

Operación típica	Precisión horizontal (95%)	Precisión vertical (95%)	Integridad	TTA	Continuidad	Disponibilidad
En ruta	3,7 km (2,0 NM)	N/A	1-1 x 10-7/h	15 minutos	1-1 x 10-4/h a 1-1 x 10-8/h	0,99 a 0,999999
En ruta terminal	0,74 km (0,4 NM)	N/A	1-1 x 10-7/h	15 segundos	1-1 x 10-4/h a 1-1 x 10-8/h	0,99 a 0,999999
Enfoque inicial, aproximación intermedia no precisión enfoque (NPA), salida	2,20 m (720 ft)	N/A	1-1 x 10-7/h	10 segundos	1-1 x 10-4/h a 1-1 x 10-8/h	0,99 a 0,999999
Enfoque de la operación con guía vertical (APV-I)	16 m (52 ft)	20 m (66 ft)	1-2 x 10-7 por aproximación	10 segundos	1-8 x 10-6 en cualquier 15 segundos	0,99 a 0,999999
Enfoque de la operación con guía vertical (APV-II)	2,20 m (720 ft)	8 m (26 ft)	1-2 x 10-7 por aproximación	6 segundos	1-8 x 10-6 en cualquier 15 segundos	0,99 a 0,999999
Primera categoría precisión de enfoque	2,20 m (720 ft)	6,0 m a 4,0 m (20 ft a 13 ft)	1-1 x 10-7 por aproximación	6 segundos	1-8 x 10-6 en cualquier 15 segundos	0,99 a 0,999999

así como el error residual de propagación de la señal a través de la ionosfera.

2. *Integridad*: como ya hemos visto, el Organismo de Aviación Civil Internacional define la integridad como la medida de la confianza que puede ponerse en la veracidad de la información proporcionada por el sistema. Los SBAS más concretamente expresan esta confianza como la máxima probabilidad permisible de que el error en la solución de navegación exceda el umbral de alarma y el sistema no alerte al piloto en un tiempo inferior al tiempo de alarma. El SBAS cumple con los requisitos de integridad mediante:

- El suministro al usuario de alarmas relativas al satélite o a los errores de ionosfera para advertirle de la necesidad de evitar el uso de ese satélite o de las correcciones ionosféricas en el cálculo de la solución PVT.
- Proporcionando al usuario información sobre los niveles de protección vertical y horizontal (VPL y HPL), de modo que pueda evaluar la disponibilidad del sistema comparando estos niveles con los límites de alarma para una fase del vuelo determinada. El SBAS calcula y distribuye los límites de integridad para la órbita del satélite y para las Correcciones del Reloj (UDRE), así como para las Correcciones de los Errores Ionosféricos (GIVE), de modo que el usuario es capaz de calcular un nivel de protección que se compara con el requerido.

3. *Continuidad*: es la probabilidad de que las prestaciones especificadas para el sistema se mantengan durante toda la duración de una fase de operación, asumiendo que el sistema estaba disponible al arranque de dicha fase y que se previera que iba a mantenerse operativa durante toda ella. La falta de continuidad, en términos de maniobras aeronáuticas, significaría la necesidad de abortar la operación concreta con el riesgo correspondiente.

4. *Disponibilidad*: es la probabilidad de que el servicio de navegación esté disponible al comienzo de la operación planeada. Un SBAS se considera disponible cuando se cumplen los requisitos de precisión, integridad y continuidad en términos de la probabilidad de que el sistema esté disponible en cualquier momento. En la práctica, la disponibilidad se calcula midiendo la probabilidad de que un nivel de protección esté por debajo de su nivel de alarma correspondiente. Hay que tener en cuenta que la falta de disponibilidad no implica un problema de seguridad, pero impide la operación

nominal del Sistema, e implica un impacto en el estado de operación del servicio.

En cuanto a la arquitectura de los Sistemas SBAS, todos ellos responden al mismo concepto general. Los principales componentes de un Sistema SBAS son:

1. El segmento espacial, que comprende los GEO con las cargas útiles necesarias para transmitir una señal compatible GPS con la información SBAS.
2. El segmento de tierra, incluyendo todos los elementos de tierra encargados de la generación y distribución del mensaje de navegación. Los principales son:
  - La red de estaciones de monitoreo.
  - El centro de procesamiento de datos que genera el mensaje de navegación y la señal de integridad.
  - El centro de control de los satélites GEO.
  - La red de comunicaciones que interconecta todos estos elementos en tierra.
3. El segmento de soporte, que comprende todos los elementos que son necesarios para soportar la operación correcta y el mantenimiento del SBAS: control de configuración, evaluación de prestaciones, mantenimiento y desarrollo, etc.
4. El segmento de usuario, esto es los receptores de navegación por satélite habilitados para recibir la señal SBAS, figura 16.

El segmento espacial de un SBAS consta de varios GEO que se encargan de difundir, sobre el área de cobertura del servicio, el mensaje de navegación. Típicamente, el sistema se apoya en GEO comerciales multipropósito, que portan una carga útil de navegación adicional capaz de generar una señal según el formato GPS que retransmite a los usuarios el mensaje de navegación generado en tierra.

La carga útil de navegación incluye un transpondedor que recibe la señal de navegación generada en tierra utilizando la banda C, y la retransmite a los usuarios en la banda L (en las mismas frecuencias que GPS); en general, los sistemas actuales incluyen un segundo canal de bajada en banda C para mejorar el ajuste del cálculo del retardo de la señal debido a la propagación a través de la atmósfera.

Las futuras generaciones de este tipo de cargas útiles incluirán funcionalidades más avanzadas aún, entre las que se incluirán:

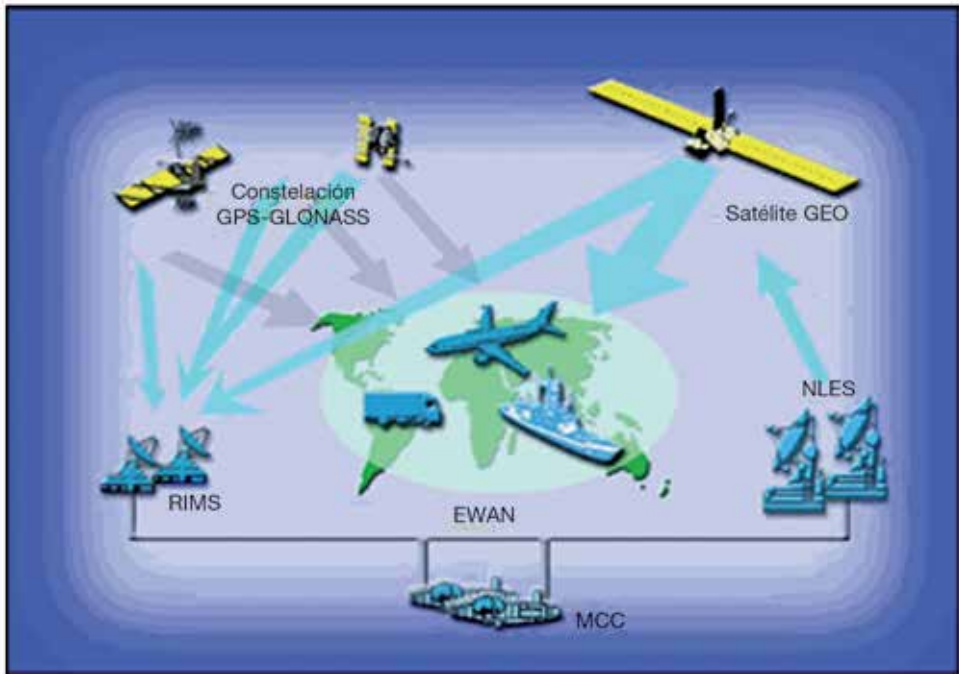


Figura 16. — Arquitectura general de un Sistema SBAS.

- El incremento del ancho de banda de transmisión y de la potencia de difusión.
- La evolución hacia transpondedores en doble frecuencia L1-L5.
- La evolución desde simples transpondedores de señal hacia cargas útiles regenerativas en las cuales la señal de navegación se construye enteramente a bordo, recibiendo de tierra únicamente el mensaje de generación que modula esta señal.

En cuanto al segmento de control en tierra, su propósito principal es generar y enviar al satélite repetidor la señal de aumentación. Para alcanzar este objetivo, el segmento de misión en tierra se descompone típicamente en los elementos ya mencionados anteriormente:

- Las estaciones de monitoreo son en realidad receptores GNSS que capturan la señal que los satélites GNSS primarios están difundiendo en el espacio. En general, estas estaciones tienen las siguientes características:
  - Receptores de doble frecuencia (L1-L2) y calidad geodésica.
  - AFS (cesio, rubidio o H-maser).

- Capaz de seguir todos los satélites GNSS y GEO a la vista.
- Dispuesta en una localización con buenas condiciones en términos de efectos de ocultación y *multipath*.
- Georeferenciadas a WGS-84 (o ITRF) con una precisión de uno a tres centímetros.
- Capaz de proporcionar las siguientes capacidades de procesado:
  - Adquisición de datos a un hercio.
  - Comprobaciones de calidad de datos embebidas en el sistema para eliminar datos erróneos.
  - Capacidad para procesar y distribuir datos en unos pocos milisegundos.
  - Robustez contra amenazas conocidas (por ejemplo detección de formas de onda falsas, *antispoofing*).

Cuanto más densa es la red de estaciones de monitoreo dentro del área de servicio, mayores las prestaciones del Sistema SBAS, aunque es conveniente mantener algunas estaciones fuera del área de servicio. Además hay que asegurar la redundancia para evitar puntos únicos de fallo, e incluso prever que diferentes conjuntos de estaciones alimenten cadenas de procesado paralelas e independientes para minimizar la probabilidad de fallo (y así asegurar las prestaciones en términos de integridad).

El centro de procesado de datos es el verdadero corazón del Sistema SBAS, puesto que está a cargo de generar la información de aumentación para los usuarios a través de las siguientes funciones:

- Procesar los datos capturados por la red de estaciones de monitoreo de la señal de navegación.
- Estimar las correcciones de satélite, los parámetros del modelo de ionosfera y los términos de variación del error.
- Hacer la evaluación dedicada de la integridad de la información proporcionada por el sistema a los usuarios.
- Preparar la salida de acuerdo con las normas de señal SBAS.

El centro de proceso de datos está sujeto a una carga de cálculo muy exigente, puesto que tiene que responder a desafíos extremadamente exigentes, que incluyen:

- Modelos muy sofisticados de determinación de la órbita de los satélites, que están realmente en el estado del arte de esta tecnología.
- Determinación de la referencia de tiempo SBAS y de las correcciones de reloj con una precisión superior a los dos nanosegundos.

- Estimación de los errores ionosféricos utilizando una red de receptores muy densa y en un tiempo capaz de responder a fenómenos locales y rápidos.
- Estimación de la integridad válida para áreas extensas y con requisitos muy exigentes.

El centro de control del GEO tiene como función retransmitir al componente espacial del SBAS los mensajes de navegación calculados por el centro de procesado de datos. Para ello es necesario:

- Codificar la señal de navegación, incluyendo la generación de los códigos PRN.
- Modular la señal con la información del mensaje de navegación (hay que tener en cuenta que la actual generación de cargas útiles para el segmento espacial SBAS se limita a retransmitir la señal recibida desde tierra con un simple cambio de frecuencia de la portadora).
- Controlar la sincronización de tiempos entre las componentes de código y portadora de la señal de *uplink*.
- Cerrar el bucle de control estación de *uplink*-satélite GEO, recibiendo y procesando las señales transmitidas por el GEO, tanto en banda C, como el banda L.

La red de comunicaciones de tierra tiene como única misión interconectar los diferentes componentes en tierra del Sistema, si bien esto requiere altísimos requisitos en cuanto a prestaciones en términos de fiabilidad de las líneas, disponibilidad de ancho de banda suficiente para intercambiar importantes volúmenes de datos, y exigentes demandas en cuanto a redundancia y seguridad.

El segmento de soporte de misión incluye elementos que si bien no son críticos para la provisión del servicio en tiempo real, son necesarios para asegurar el buen funcionamiento del Sistema en el largo plazo y para permitir los diversos procesos auxiliares para la certificación del Sistema, y para permitir su mantenimiento y mejora.

El segmento de usuario comprende los receptores que hacen uso de la señal SBAS. Hay que tener en cuenta que estos elementos nunca están bajo control del proveedor del servicio SBAS, sino que están disponibles en el mercado de acuerdo con las normas aplicables para los diferentes servicios. En general los SBAS ofrecen un servicio gratuito, de libre acceso, denominado OS (*Open Service*). También ofrecen un servicio SoL (*Safety of Life*) para aplicaciones críticas, como navegación aérea, para

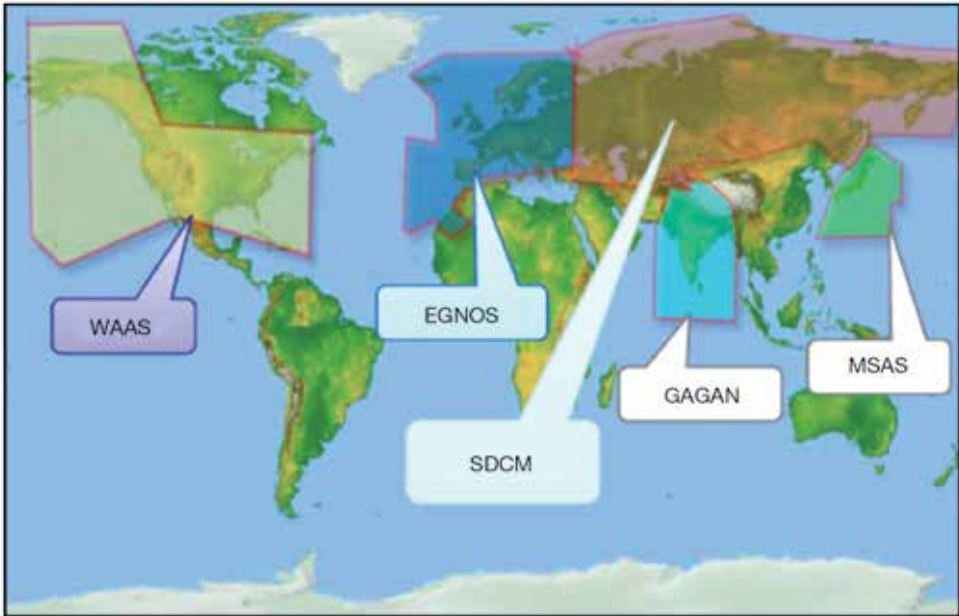


Figura 17.— SBAS en operación o en desarrollo en la actualidad.

cuyo uso los terminales de usuario deben disponer de las certificaciones adecuadas. Eventualmente, algunos SBAS pueden ofrecer servicios comerciales para cuyo acceso el receptor deberá adaptarse a las especificaciones del proveedor de servicio. Es frecuente que el acceso a estos servicios comerciales se haga a través de redes de tierra y no a través del GEO, figura 17.

El primero de los Sistemas SBAS promovidos y desarrollados fue el norteamericano WAAS. El WAAS fue auspiciado por la FAA de Estados Unidos para satisfacer los requisitos de la navegación aérea en su región de responsabilidad, figura 18. Su arquitectura responde al concepto genérico SBAS, con estaciones de monitoreo distribuidas por toda Norteamérica, diferentes centros de procesamiento de datos (*Wide-Area Master Stations*), por razón de redundancia y seguridad, y varias estaciones de *uplink* hacia los GEO, tal y como se ve en la figura 18.

En cuanto al segmento espacial de WAAS, en enero de 2011, empleaba dos satélites comerciales, el INMARSAT-4 F3 y el Telesat Anik F1R, con el INTELSAT Galaxy 15 planeado para volver a participar en el servicio a partir de marzo de este año.

Los requisitos impuestos por la FAA al WAAS son equivalentes a los genéricos mostrados en el cuadro, 3, p. 285. Como se muestra en la figura 19, p. 298, las prestaciones del Sistema en términos de precisión e integridad exceden aquellos requisitos durante la mayor parte del tiempo.

Para establecer una comparación más comprensible en términos de prestaciones para el usuario, habría que comparar los entre 2,5 y 4,7 metros de precisión proporcionados por el sistema GPS (excluidos los errores del receptor y según las medidas recogidas por la propia FAA) y los entre 0,9 y 1,3 metros proporcionados por WAAS.

EGNOS es el equivalente europeo al WAAS. Promovido y financiado por un consorcio constituido por la ESA, Eurocontrol y la Comisión Europea –el llamado grupo tripartito– tiene una arquitectura similar a la de WAAS, desde el punto de vista conceptual, si bien como el lógico los satélites que componen su segmento espacial y el emplazamiento y composición del segmento de tierra varían ligeramente. EGNOS, en su configuración operacional consta de:

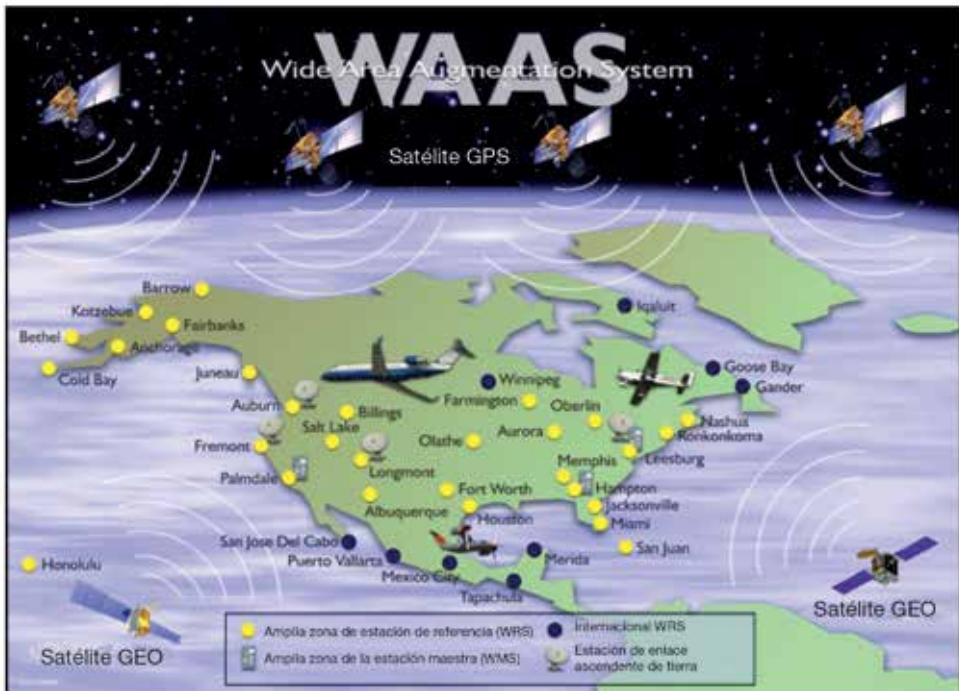
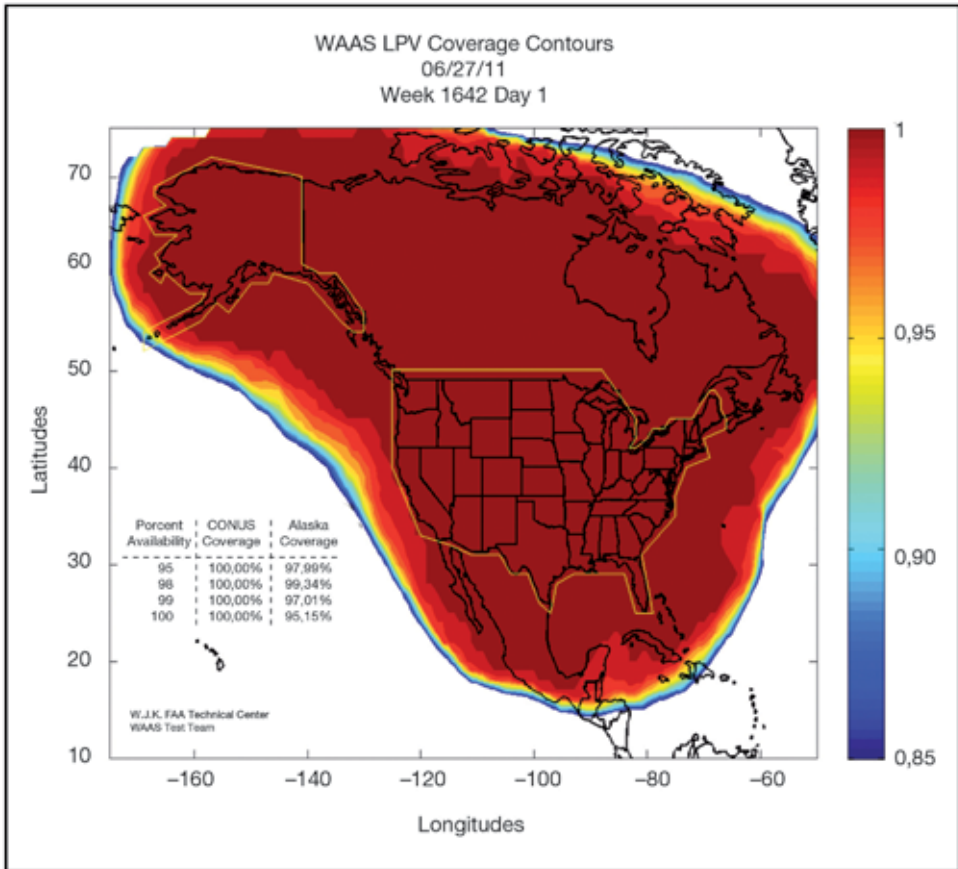


Figura 18.— Arquitectura del WAAS norteamericano.



**Figura 19.** — Prestaciones del Sistema WAAS en términos de probabilidad de cumplimiento de los requisitos de navegación sobre el área de cobertura.

- Un segmento de tierra compuesto por un conjunto de equipos desplegados en 43 lugares diferentes de 22 países, principalmente europeos:
- 40 estaciones de monitoreo de integridad remotas RIMS (*Remote Integrity Monitoring Stations*), que vigilan continuamente las constelaciones GPS y GLONASS, así como los satélites GEO de EGNOS.
- Cuatro Centros de Control de Misión (CCM) que calculan el mensaje EGNOS y operan el sistema continuamente.
- Seis estaciones de *uplink* de la señal de navegación a los GEO NLES (*Navigation Land Earth Stations*).
- Un centro de evaluación de prestaciones y verificación del Sistema PACF (*Performance Assessment and Check-out Facility*), localizado en Toulouse.

- Un centro de certificación de aplicaciones ASQF (*Application Specific Qualification Facility*), emplazado en las proximidades de Madrid.
- Una red de área amplia que interconecta todos estos centros y estaciones entre sí EWAN (*EGNOS Wide Area Network*).
- Un segmento espacial que incluye tres satélites: el *Inmarsat AOR-E*, el *Inmarsat IOR-W* y el ARTEMIS.
- Un segmento de usuario compuesto por receptores compatibles WAAS-EGNOS, figura 20.

EGNOS ha sido formalmente declarado en marzo de 2011 operativo para su uso en aviación civil por las autoridades de certificación competentes, lo que significa que proporciona prestaciones equivalentes a las de WAAS, figura 21, p. 300.

En cuanto a MSAS y GAGAN, son los equivalentes japonés e indio a WAAS y EGNOS. No entraremos en más detalles sobre su arquitectura, que es en todo similar a la de los anteriores. Si que es preciso señalar que mientras que MSAS están ya desplegado y operativo, GAGAN está aún en su fase de desarrollo y sólo estará operativo dentro de unos años.

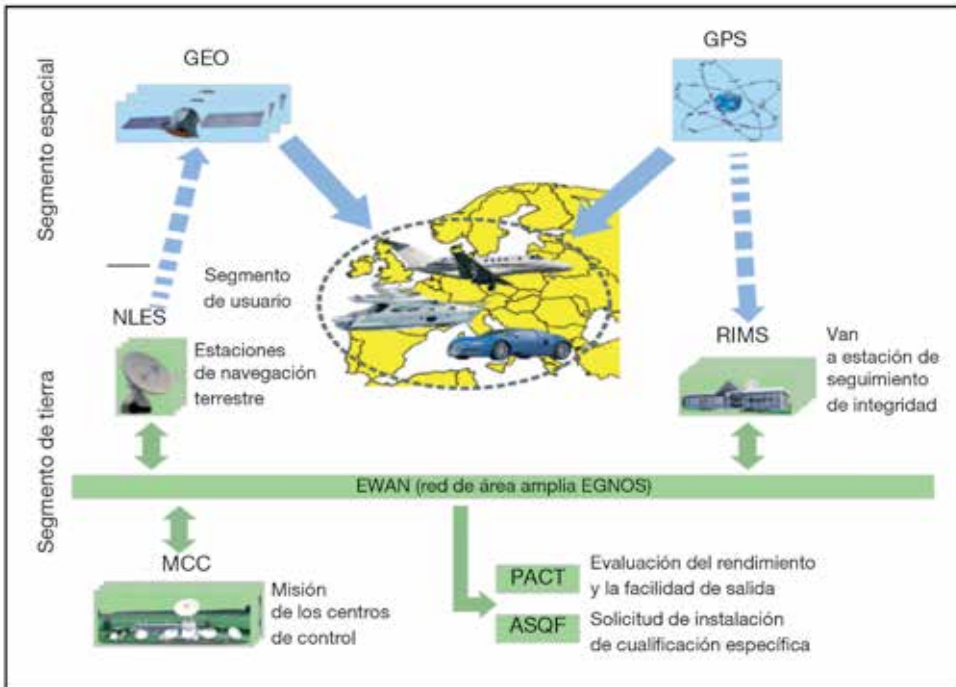


Figura 20. — Arquitectura de EGNOS.

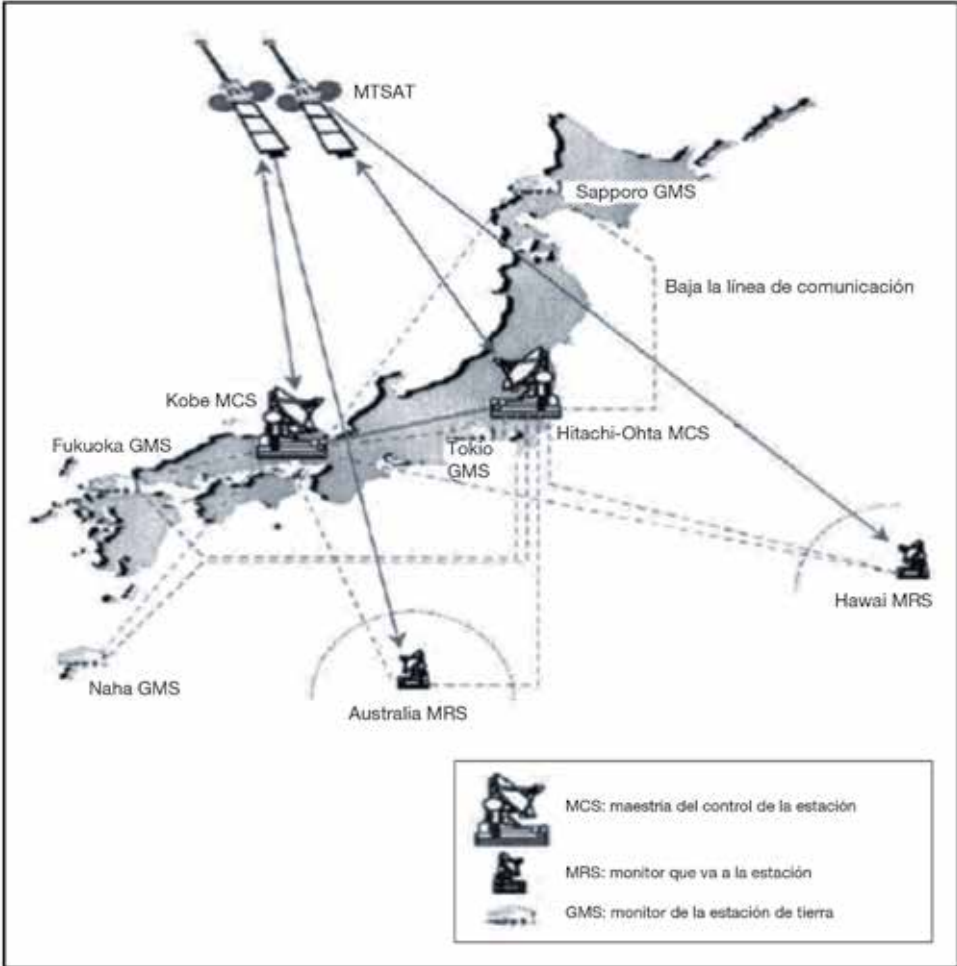


Figura 21.— Arquitectura de MSAS.

En lo que se refiere a los sistemas de aumentación SBAS, es importante referirse aquí al destacado papel que la industria y las instituciones españolas han jugado en el desarrollo de EGNOS. AENA, la autoridad española de navegación aérea fue en su momento uno de los principales impulsores del programa, y forma parte de ESSP (*European Satellite Services Provider*), SAS la compañía que se encargará de proporcionar el servicio sobre la zona de control de tráfico aéreo europea. Por su parte la industria española ha sido responsable principal, o único en algunos casos, del desarrollo y suministro de algunos de los elementos clave del sistema:

- La componente CPF (*Central Processing Facility*) del centro de control de misión, que es el auténtico corazón del sistema, donde se generan las señales de navegación, corrección e integridad distribuidas por el sistema. Este elemento fue suministrado por GMV.
- Los elementos PACF y ASQF, ambos componentes suministrados por GMV, en colaboración con Thales y Sener.
- Parte de las RIMS –se utilizaron diversos proveedores por razones de seguridad en el diseño– que fueron suministradas por Indra Espacio, que también contribuyó al desarrollo y suministro de algunas NLES.

A ellos habría que añadir otros participantes con papeles menos relevantes en el desarrollo del Sistema (por ejemplo Mier o Crisa en las cargas útiles de navegación).

Además España alberga buena parte de la infraestructura de tierra del sistema: diversas RIMS, un MCC –Torrejón de Ardoz (Madrid)–, el ASQF y una NLES, también en esa localización.

La importante participación española en el programa ha permitido además a la industria española desarrollar una importante tecnología en el área de aplicaciones, fundamentalmente orientada a los usos civiles de las señales EGNOS, en nichos en que la integridad de señal es crucial, como por ejemplo, esquemas de pago por uso en el transporte por carretera o guiado automático de vehículos terrestres.

Es necesario hacer una reflexión sobre los posibles usos militares de las señales SBAS. Aunque como es lógico la tecnología SBAS es susceptible de doble uso, no aporta ventajas decisivas a los usuarios militares que tengan acceso al código P(Y), puesto que las prestaciones de ambos sistemas son en el mejor de los casos equivalentes. Sin embargo, el despliegue de este tipo de sistemas si obliga a considerar la posibilidad de que las fuerzas enemigas tengan acceso a una señal de navegación prácticamente global –el solapamiento de los diversos Sistemas SBAS existentes o previstos y su mutua compatibilidad prácticamente garantiza la cobertura global– de muy alta precisión y muy alta integridad, susceptible de ser utilizada para usos militares (por ejemplo para guiar un misil hasta un blanco en nuestro territorio). Así pues, se refuerza la necesidad de disponer de medios para denegar de manera selectiva el acceso a las señales de navegación a las fuerzas enemigas.

## *Galileo*

El Sistema Galileo constituye la iniciativa europea para dotarse de un sistema de navegación global completamente independiente. Esta fue la razón fundamental que condujo a la Comisión Europea y a la ESA al lanzamiento del programa a finales de los años noventa del siglo pasado. A diferencia de sus precursores, GPS y GLONASS, Galileo se concibe como un Sistema orientado de forma primaria a satisfacer los requisitos de la comunidad de usuarios civil. Sin embargo, no puede negarse su potencial utilidad para aplicaciones de seguridad y defensa, cuando se complete su despliegue.

Aunque la independencia europea es la razón primordial para embarcarse en este empeño, existen otras razones subsidiarias para su lanzamiento:

- Asegurando la interoperabilidad con GPS y GLONASS, Galileo se convertirá en piedra angular del futuro Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS en sus siglas inglesas). Este futuro sistema estará bajo control civil y permitirá determinar con gran precisión la posición sobre la mayor parte de la superficie terrestre, incluyendo el interior de los «cañones urbanos» en las grandes ciudades donde los edificios pueden ocultar las señales de aquellos satélites que se encuentren relativamente bajos sobre el horizonte. Esto será posible al disponer de un número muy superior de satélites disponibles para la triangulación, gracias a esa interoperabilidad.
- La mayor inclinación de las órbitas de los satélites *Galileo* con respecto al plano ecuatorial que en el caso de los GPS permitirá mejorar la cobertura del Sistema en regiones de alta latitud, lo que permitirá mejores prestaciones en los países del norte de Europa, un área no demasiado bien servida por GPS.
- Europa espera que el desarrollo de *Galileo* permita a su industria explotar en su totalidad las oportunidades proporcionadas por la navegación por satélite, desde los fabricantes de receptores y equipos hasta los suministradores de aplicaciones y servicios de valor añadido.

En su arquitectura, *Galileo* no difiere en lo fundamental de los GNSS anteriores. El Sistema consta de varios segmentos:

- El segmento espacio que comprende un total de 30 satélites distribuidos en tres planos orbitales. El diseño de la constelación prevé nueve satélites operativos más uno de reserva por cada plano.

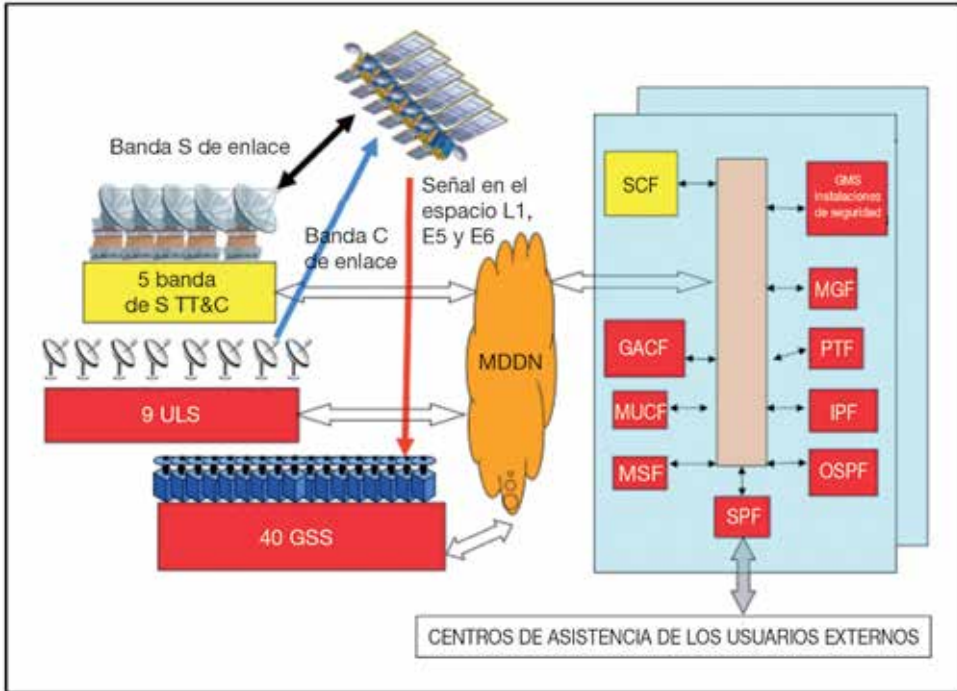


Figura 22. — Arquitectura del Sistema Galileo.

- Un segmento de control en tierra GCS (*Ground Control Segment*) que a su vez incluye las estaciones de subida en banda S –cinco estaciones TT&C en total– para el control y mantenimiento de las plataformas espaciales, figura 22.
- Un segmento de misión en tierra GMS (*Ground Mission Segment*) que consta de los elementos necesarios en tierra para monitorizar de manera continúa las prestaciones de la misión –40 GSS (*Galileo Sensor Stations*) distribuidas por la superficie del planeta–, generar los mensajes de navegación e integridad, y distribuirlos a los satélites a través de las estaciones de subida, nueve estaciones de subida ULS (*Uplink Stations*). Lógicamente todos los elementos en tierra estarán intercomunicados por una red WAN segura de altas prestaciones.
- El segmento de usuario que incluirá los múltiples receptores que recibirán y explotarán la señal de navegación generada y distribuida por la constelación.

## DESCRIPCIÓN DEL SEGMENTO ESPACIO

El segmento espacio de Galileo consistirá en 27 satélites operativos en una constelación de las denominadas de Walker, con tres planos orbitales equiespaciados y con una inclinación nominal de 56 grados. Cada plano contendrá nueve satélites, separados nominalmente 40 grados. Se planea mantener un satélite de reserva, no operativo en cada plano orbital, de manera que un fallo en la constelación pueda subsanarse rápidamente maniobrando el satélite de reserva en el plano correspondiente para sustituir al fallado, lo que puede completarse en un tiempo de días, sin necesidad de esperar al lanzamiento de uno nuevo, que podría llevar meses, en el mejor de los casos.

La altura de las órbitas es de 23.222 kilómetros sobre la superficie terrestre, y se ha elegido para proporcionar un ciclo de repetición de 10 órbitas en 17 días. Este periodo es suficientemente corto para permitir la repetitividad de las medidas características, siendo a su vez suficientemente largo para evitar resonancias gravitatorias. De esta forma, después de la optimización inicial de la órbita no se requerirán maniobras de control de estación (*station keeping*) a lo largo de la vida útil de los satélites. Las restricciones de posición para cada uno de los satélites individuales vienen dictadas por la necesidad de mantener la uniformidad de la constelación; la especificación del sistema establece que cada satélite deberá situarse dentro de una ventana de  $\pm$  dos grados de su posición nominal relativa a los satélites adyacentes en el mismo plano y no más lejos de dos grados con respecto a su plano orbital.

La precisión de la ventana sobre la órbita es equivalente a una tolerancia de alrededor de 1.000 kilómetros en posición, pero requiere un ajuste muy cuidadoso de la velocidad del satélite para asegurar que el periodo orbital de todos los satélites se mantiene precisamente igual. La tolerancia *across-track* permite sesgar la inclinación y la Longitud del Nodo Ascendente (RAAN) de cada satélite en el lanzamiento, de modo que la deriva natural permanece dentro de tolerancias sin necesidad de cambios de plano orbital que requerirían un mayor gasto de combustible.

El despliegue de la constelación no se ha completado en la actualidad. A decir verdad, los primeros satélites operacionales, cuyo objetivo es la demostración de las prestaciones completas de la constelación, se

lanzarán a lo largo del año 2011. Hasta la fecha sólo se han lanzado dos prototipos con el objetivo de desarrollar y caracterizar las tecnologías críticas para el sistema. El primero de estos satélites, GIOVE-A, se lanzó el 28 de diciembre de 2005, permitiendo asegurar las frecuencias de operación para el sistema frente a la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). Este prototipo porta dos relojes atómicos y un generador de señal con objeto de permitir la validación de las tecnologías correspondientes.

El segundo satélite experimental, GIOVE-B, lanzado en abril de 2008 tiene un diseño más representativo de lo que será el de futuros satélites operacionales e incluye como carga útil un maser pasivo de hidrógeno que será uno de los relojes embarcados en estos satélites.

En su configuración operacional, los satélites *Galileo* portarán dos cargas útiles: una de navegación y otra de búsqueda y rescate SAR (*Search and Rescue*). La carga útil de navegación emitirá mensajes de navegación en cuatro portadoras en la banda L, cada una de ellas modulada con los datos de navegación para proporcionar los diferentes servicios previstos. Los datos de navegación se envían a los satélites por medio de un enlace CDMA en banda C dedicado, lo que permite transmitirles varias señales simultáneamente.

La carga útil de navegación incluye varios relojes embarcados redundantes basados en dos tecnologías diferentes, un Generador de Frecuencias de Rubidio (RAFS) y un Maser de Hidrógeno Pasivo (PHM). El segundo reloj es más estable, si bien ambos exceden sus especificaciones de diseño y permiten mantener las prestaciones nominales del sistema.

Un transpondedor SAR a bordo permitirá detectar señales de alerta de cualquier haz COSPAS-SARSAT emitiendo alarmas en la banda de 406-406,1 Megahercios. El transpondedor SAR de *Galileo* redirigirá esta información a estaciones dedicadas en tierra en la banda L (1.544 Megahercios). En el diseño de esta carga útil, se ha enfatizado evitar efectos negativos mutuos con la carga útil de navegación, que es en todo caso prioritaria. Una vez que la información del haz se ha recibido en tierra, los centros de control de misión COSPAS-SARSAT determinarán la posición del emisor de la alerta y, a diferencia de otras misiones SAR, se comunicará al emisor que su alerta ha sido procesada empleando los propios satélites *Galileo*.

En cuanto a la estructura y plan de frecuencias de la señal de navegación Galileo, las principales consideraciones tenidas en cuenta en la selección de sus características ha sido las siguientes:






- Se transmitirán señales de amplio ancho de banda en la banda L del espectro, que permitan buenas prestaciones de seguimiento (*tracking*) en términos de precisión y robustez, y capacidad de mitigación de los efectos de *multipath*.
- Se minimizarán las interferencias con otros Sistemas de Navegación existentes (por ejemplo GPS y GLONASS) con objeto de asegurar la compatibilidad radioeléctrica.
- La selección de frecuencias favorecerá aquellas con buenas prestaciones y pequeños errores de seguimiento en la parte alta de la banda L con objeto de permitir la compensación del error ionosférico en receptores bifrecuencia.
- Se facilitará la interoperabilidad con GPS.
- Se tendrán en cuenta los aspectos de seguridad relevantes con respecto al código GPS M y a los Servicios de uso Público Restringido (PRS) de Galileo, es decir, se separarán los servicios militares y/o especialmente protegidos, de los servicios de uso civil, figura 23.

Atendiendo especialmente a los dos últimos criterios, la Unión Europea y Estados Unidos cerraron un acuerdo en la cumbre celebrada entre ambos en Irlanda en junio de 2004, por el que las partes se comprometieron a que los dos sistemas trabajaran conjuntamente sin interferir las señales de la contraparte y facilitando la interoperabilidad entre ambas.

Así, finalmente, Galileo proporcionará seis señales de navegación con polarización circular a derechas RHCP (*Right Hand Circular Polarization*) en los rangos de frecuencias 1.164–1.215 Megahercios (banda E5), 1.260–1.300 Megahercios (banda E6) y 1.559–1.592 Megahercios (banda E2-L1-E1, a veces designada por simplicidad como banda L1), que están internacionalmente reservados para servicios de radio-navegación por satélite. El plan de frecuencias de *Galileo* se ilustra en la figura 24, p. 308.

Como en el caso de GPS, todos los satélites harán uso de las mismas frecuencias de portadora, utilizando diferentes códigos de espectro ensanchado en un esquema de transmisión CDMA.

El cuadro 5, p. 308, resume las características de las seis señales de navegación que emitirá el Sistema Galileo.

2005-presente	2008-presente	2011-...	2012-...	2014-...
				
SSTL	Astrium - D	Astrium - D	OHF	
GIOVE-A	GIOVE-B	Galileo IOV	Galileo IOC	Galileo FOC
<b>1 satélite 1 operativo</b>	<b>1 satélite 1 operativo</b>	<b>4 satélites previstos</b>	<b>14 satélites previstos</b>	<b>12 satélites previstos</b>
Demostrador tecnológico	Demostrador tecnológico	Validación en órbita del diseño	Capacidad operativa inicial	Capacidad operativa final
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Señales de navegación L1F, L1P, E6C, E6P, E5a, E5b. Sólo puede transmitir dos simultáneamente. Códigos de prueba</li> <li>• Modulación BOC</li> <li>• CDMA</li> <li>• Rubidium Atomic Frequency Standard (RAFS)</li> <li>• Estabilidad del reloj <math>4 \times 10^{-14}</math></li> <li>• Vida útil de diseño 27 meses</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Señales L1F, L1P, E6C, E5a, E5b. Códigos Gold</li> <li>• Modulación MBOC</li> <li>• RAFS y Maser de Hidrógeno Pasivo (PHM)</li> <li>• CDMA</li> <li>• Estabilidad del reloj (PHM) <math>5 \times 10^{-15}</math></li> <li>• Vida útil de diseño 27 meses</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Señales L1F, L1P, E6C, E5a, E5b</li> <li>• Modulación MBOC</li> <li>• SAR</li> <li>• RAFS + PHM</li> <li>• CDMA</li> <li>• Estabilidad del reloj <math>5 \times 10^{-15}</math></li> <li>• Vida útil de diseño 12 años</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Señales L1F, L1P, E6C, E5a, E5b</li> <li>• Modulación MBOC</li> <li>• SAR</li> <li>• RAFS + PHM</li> <li>• CDMA</li> <li>• Estabilidad del reloj <math>5 \times 10^{-15}</math></li> <li>• Vida útil de diseño 12 años</li> </ul>	

**Figura 23.** — Despliegue del segmento espacio y características diferenciales de los diferentes bloques lanzados y previstos. Salvo los dos satélites de demostración de tecnologías (GIOVE-A y B), el resto corresponden al despliegue inicial de los 30 satélites de la constelación inicial.

L1F es una señal de acceso abierto que incluye un canal de datos y un canal piloto (es decir, únicamente de tonos, sin datos).

El mensaje de datos L1 incluye también datos de integridad e información comercial encriptada.

Al solaparse con la señal L1 de GPS facilita la interoperabilidad entre ambos Sistemas.

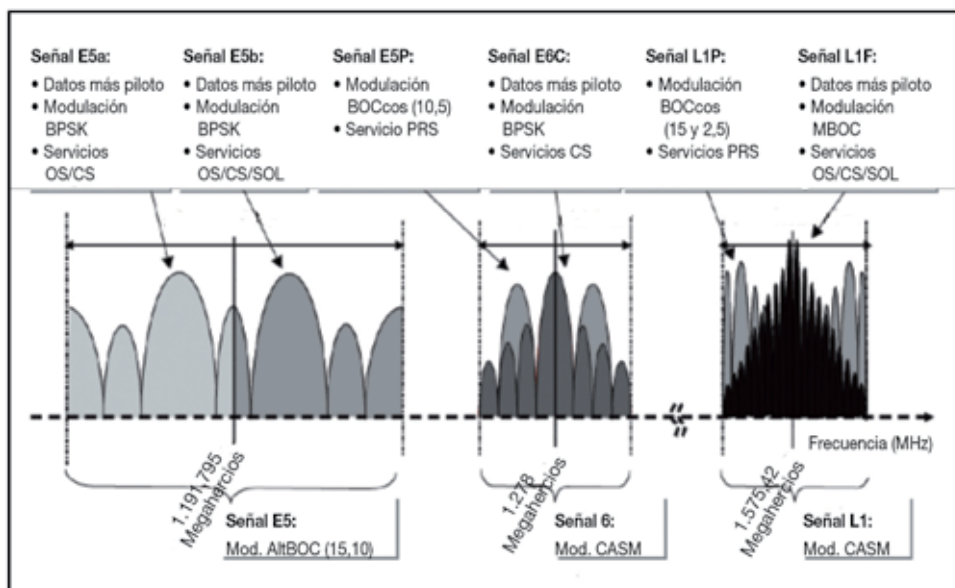


Figura 24.— Plan de frecuencias de la señal de navegación Galileo.

L1P es una señal de acceso restringido para aplicaciones gubernamentales. Tanto los códigos PRN como los datos de navegación se transmiten encriptados con un algoritmo de cifrado restringido a los gobiernos.

E6C es una señal de acceso restringido para aplicaciones comerciales. Como en L1P, tanto los códigos PRN como el mensaje de datos están

Cuadro 5.— Estructura de la señal Galileo.

Designación de la señal	Frecuencia de la portadora (MHz)	Códigos PRN (Mchips/s)	Modulación del mensaje de datos de navegación (bps)
L1F	1.575,42	1.0230	125
L1P	1.575,42	2.5575	A decidir
E6C	1.278,00	5.1150	500
E6P	1.278,00	5.1150	A decidir
E5a	*1.191,795	10.230	25
E5b	1.191,975	10.230	125

\* Las señales E5a y E5b se modulan sobre una única portadora, utilizando una técnica conocida como AltBOC (*Alternate Binary Offset Carrier*). La señal compuesta se designa como E5 y puede procesarse como una señal única de gran ancho de banda si la implementación del receptor es adecuada.

encriptados, pero el algoritmo de cifrado permitirá el uso comercial de la señal.

E6P es otra señal de acceso restringido para aplicaciones gubernamentales, de características análogas en este sentido a L1P.

E5a es una señal de acceso abierto que incluye un canal de datos y un canal piloto. Transmite los datos básicos para soportar las funciones de navegación y sincronización de tiempo, utilizando una velocidad de datos relativamente baja que permite mayor robustez en la demodulación de los datos. Se solapa con la señal L5 del GPS facilitando la interoperabilidad.

E5b es una señal de acceso abierto que también incluye un canal de datos y un canal piloto. El mensaje de datos incluye información de navegación e integridad, e información comercial encriptada.

Conseguir la interoperabilidad de *Galileo* con GPS ha sido uno de los criterios fundamentales en el diseño del primer sistema. En términos de estructura de señal y frecuencias, esta interoperabilidad se consigue mediante la superposición parcial de las señales en frecuencia, con diferentes estructuras de señal o códigos de secuencia. En E5a y E2-L1-E1, las señales de Galileo y GPS se emitirán utilizando frecuencias de portadora idénticas a L5 y L1 respectivamente, lo que permitirá simplificar drásticamente el frontal de radiofrecuencia de los receptores de usuarios.

Sin embargo, esta simplificación tiene costes en términos de interferencia entre los dos sistemas a causa del solape del espectro de señales, incluso teniendo en cuenta las diferentes modulaciones. En la banda L1, el nivel de interferencia inter-sistema entre señales seguras o restringidas y señales de acceso público abierto se ha limitado asegurando una separación espectral suficiente entre ambas. Esto permitirá, por ejemplo, la perturbación (*jamming*) de señales civiles sin afectar al código M de GPS o al servicio PRS de Galileo. Por el contrario, se ha optado por una mayor interoperabilidad entre las señales abiertas Galileo L1F y la L1C del modernizado GPS, utilizando un esquema de modulación común –BOC (1,1) inicialmente, probablemente MBOC finalmente– como resultado de las negociaciones entre Estados Unidos y Europa. Es de esperar que la cooperación entre ambas partes permita en el futuro una optimización de la modulación de sus respectivas señales para maximizar el beneficio común. También se ha mejorado la interoperabilidad de los dos sistemas

a nivel de señal mediante la selección de la familia de códigos PRN. En la actualidad, las señales Galileo E5a y L1F utilizan el mismo esquema de modulación que las señales GPS L5 y L1C del bloque tercero de GPS, respectivamente.

Obviamente, la interoperabilidad entre ambos sistemas también depende de aspectos como la selección de la referencia geodésica y de tiempos seleccionadas, pero en ambos casos, el diseño de Galileo se ha hecho teniendo en cuenta el objetivo de facilitar la interoperabilidad.

Así, el Sistema de Referencia Terrestre de Galileo, GTRF (*Galileo Terrestrial Reference Frame*) es compatible con el WGS-84 utilizado por GPS y las escasas desviaciones, del orden de pocos centímetros, entre ambos sistemas apenas afectan a aplicaciones geodésicas de los GNSS que requieren altísimas precisiones.

En cuanto a la referencia de tiempos, la Unión Europea y Estados Unidos han acordado que los mensajes de navegación de ambos sistemas incluirán la desviación entre los tiempos de referencia de ambos sistemas.

#### DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SEGMENTO DE TIERRA

El segmento de tierra cubre dos funciones clave para el funcionamiento de un Sistema de Navegación Global por Satélite:

- Una primera de control y gestión de la constelación de satélites.
- Una segunda de control de la misión, esto es, de la generación de los productos necesarios para la provisión de los servicios de navegación y SAR, y de la gestión de las interfaces externas necesarias para la generación estos productos.

En el caso de Galileo, ambas funciones se han distribuido entre dos Sistemas denominados respectivamente GCS y GMS.

El GCS proporciona las siguientes funciones en tiempo real:

- Telemetría, Seguimiento y Control de la Constelación (TT&C), es decir, preparación, transmisión y gestión de los telecomandos, verificación de su ejecución y recepción de la telemetría, procesado automático de TM&TC, monitorización de las operaciones a bordo, mantenimiento y actualización remota del SW embarcado, archivado de TM&TC para su posterior análisis y evaluación de prestaciones, mediante análisis de datos de TM&TC.



**Figura 25.**— Localización prevista en la actualidad de las cinco estaciones de TT&C en banda S.

- Gestiona las comunicaciones entre los diferentes centros y elementos físicos en tierra del Sistema.
- Cifrado-descifrado de las comunicaciones, tanto hacia o desde los satélites como entre los diferentes centros de tierra.
- Monitorizado y control del GCS, así como, en caso necesario, mantenimiento remoto de los elementos del GCS.
- Gestión de interfaces con el GMS.

Asimismo, realiza otra serie de funciones en tiempo diferido como la planificación de las operaciones de la constelación, dinámica del vuelo, el desarrollo y validación de procedimientos operativos mediante la simulación de los mismos, el entrenamiento de los operadores, la gestión de las bases de datos del sistema y de su configuración, tanto en lo que se refiere a los elementos en vuelo como a los de tierra.

La figura 25 ilustra la arquitectura del GCS, que incluye, desde el punto de vista físico, dos centros de control –superpuestos con los centros de control de misión– y cinco estaciones de TT&C que se emplazarán en las localizaciones que se muestra también a continuación.

En cuanto al GMS, la cadena de proceso en tiempo real –que se ilustra en la figura 26, p. 312– tiene las siguientes funciones:

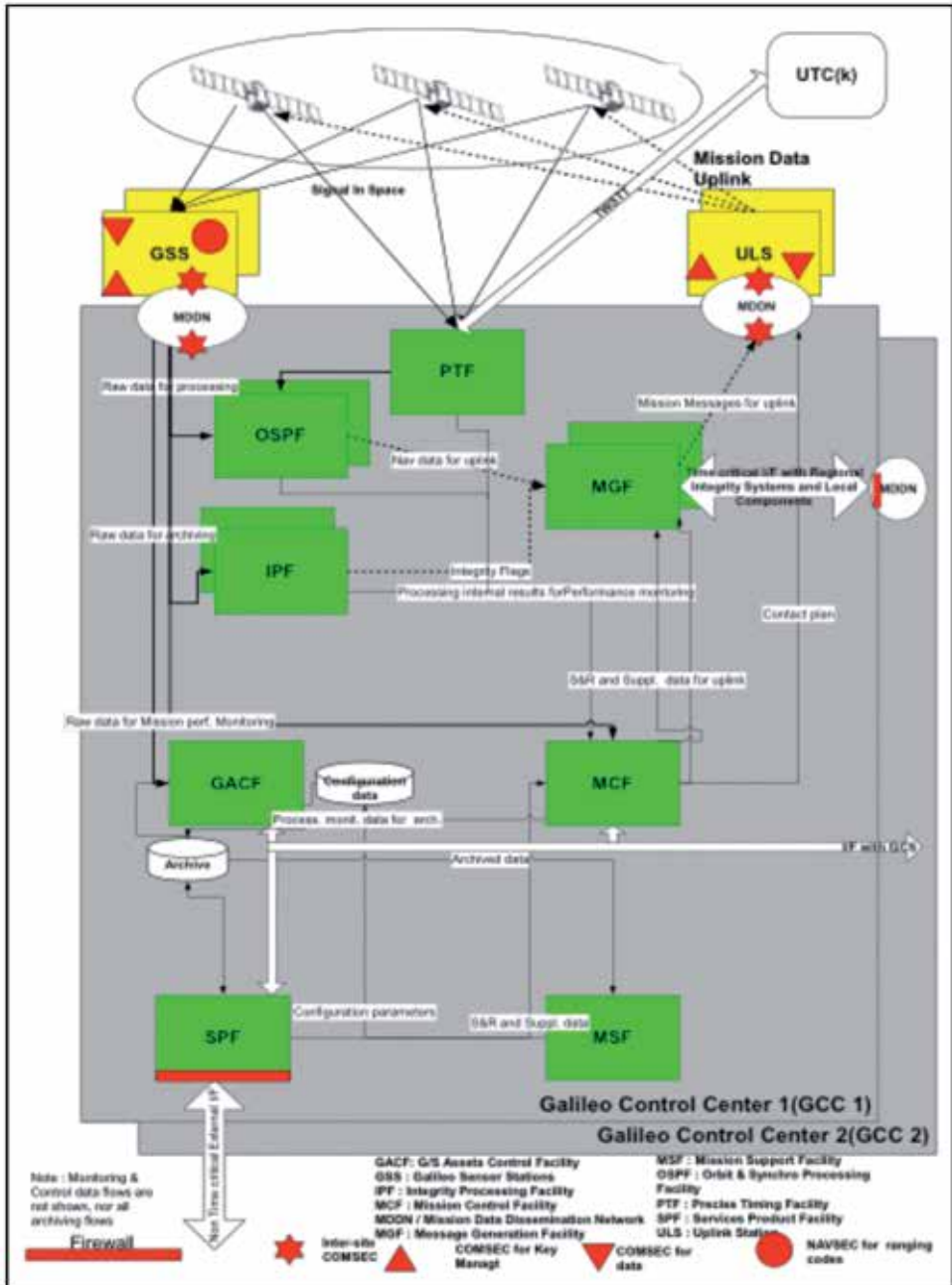


Figura 26. — Localización prevista en la actualidad de las cinco estaciones de TT&C en banda S.

- Adquisición de medidas de la señal de navegación a través de una red de estaciones de monitoreo cuya posición es conocida con muy alta precisión GSS. Estas estaciones de monitoreo reciben información continua sobre la señal de navegación que permite después derivar información sobre los errores actuales del sistema y generar los mensajes de navegación e integridad. El número y distribución de estas estaciones está todavía por determinar, aunque el diseño actual contempla el despliegue de 40 GSS (el número mínimo para garantizar las prestaciones de navegación está en torno a 20; para asegurar la integridad de la señal puede ser necesario aumentarlas hasta 50).
- Generación del tiempo del Sistema.
- Determinación de la navegación, es decir, de la órbita actual y prevista de los satélites, de la sincronización de los relojes embarcados y en las GSS con el tiempo maestro del sistema, de la previsión de los errores de los relojes, del cálculo de las correcciones ionosféricas, de la calibración de retardos en los grupos de satélites y, en definitiva, de la generación de la información –efemérides, correcciones, desviaciones– que debe incluirse como parte del mensaje de navegación, así como del cálculo de indicadores de calidad del mensaje de navegación.
- Determinación de la integridad, es decir, la estimación en tiempo real del error de navegación a nivel de usuario que se debe a errores en la señal transmitida SISE (*Signal-In-Space Error*), así como su comparación con los niveles de alarma establecidos y la generación de los mensajes de integridad correspondientes.
- Generación de mensajes a los usuarios, esto es, de los mensajes de navegación, integridad u otros para servicios comerciales, que se requieran, y envío de estos mensajes a los satélites, utilizando la red de Estaciones de Subida (*Uplink Stations*) en banda C. Esta red se prevé que conste de nueve estaciones distribuidas de forma óptima sobre la superficie terrestre.

Al margen de estas funciones en tiempo real, el GMS tiene también, en tiempo diferido, las funciones de evaluar las prestaciones del sistema y supervisar los niveles de servicio, calibrar los distintos parámetros del sistema (por ejemplo posición precisa de los centros de fase de las antenas de las GSS), gestionar los interfaces externos (por ejemplo con ITRS) o supervisar el estado de la propia infraestructura del GMS.

**Cuadro 6. — Prestaciones de los servicios Galileo.**

Denominación del servicio cobertura	OS global	CS global	SoL global	PRS global
Precisión en posición (horizontal, 2 RMS, 95%) (vertical, 95%)	15 m o 24 m h 35 m v (monofrecuencia) (1) 4 m h 8 m v (bifrecuencia)	30 ns	4 m h 8 m v (bifrecuencia)	15 m o 24 m h 35 m v (monofrecuencia) 6,5 m h 12 m v (bifrecuencia)
Precisión en tiempo (95%)	30 ns	30 ns	30 ns	30 ns
Integridad (2) Límite de alerta Tiempo de alerta Riesgo de integridad	Ninguno	Ninguno	12m h 20 m v 6 segundos 3,5x10-7/150 seg	20 m h 35 m v 10 segundos 3,5 x 10-7/150 seg
Riesgo de continuidad (3) Disponibilidad del servicio (4)	99,5%	99,5%	10-5/15 seg 99,5%	10-5/15 seg 99,5%
Control de acceso	Acceso libre	Acceso controlado a códigos de secuencia y a los datos del mensaje de navegación	Autenticación de la información de integridad en el mensaje de navegación	Acceso controlado a códigos de secuen- cia y a los datos del mensaje de navegación
Certificaciones y garantías de servicio	Ninguna	Posible garantía de servicio	Concebido para certificación y garantía de servicio	Concebido para certificación y garantía de servicio

(1) La precisión depende de la frecuencia utilizada: se alcanzan 15 metros en horizontal utilizando la señal L1 o 24 metros utilizando otras señales (E5a, E5b y E6).

(2) La integridad se define por los siguientes parámetros:

- Límite de alerta: el error máximo permisible en la solución de posición del usuario antes de que deba dispararse una alarma dentro del tiempo de alerta específico.
  - Tiempo de alerta: el tiempo desde que ocurre una condición de alarma hasta que la alarma se recibe a nivel de usuario (incluyendo el tiempo necesario para detectar la alarma).
  - Riesgo de integridad: es la probabilidad, durante cualquier período de operación continuo, de que el error calculado en posición vertical u horizontal exceda el límite de alerta y el usuario no sea advertido de ello dentro del tiempo de alerta especificado (advertirse que en este cuadro, el valor reportado incluye la contribución del propio receptor de  $1,5 \times 10^{-7}/150$  segundos).
- (3) El riesgo de continuidad es la probabilidad de que el sistema cumpla las prestaciones especificadas (precisión e integridad) sobre el intervalo y área de cobertura aplicables, en caso de que se cumplieran al comienzo del intervalo y de que se prevea que se continuarán cumpliendo durante toda la duración de la operación (advertirse que el valor reportado en la tabla incluye una contribución del receptor de usuario de  $0,2 \times 10^{-5}/15$  segundos).
- (4) La disponibilidad de servicio representa el porcentaje de tiempo en promedio sobre la vida útil de diseño (20 años) en que el servicio cumple con las prestaciones especificadas (precisión, integridad y continuidad) en cualquier punto dentro del volumen de servicio. Se deriva de la disponibilidad de cada configuración operacional (nominal, sin fallos, o degradada, con uno o más fallos), ponderada por su probabilidad de ocurrencia, y promediada sobre la vida útil.

## PRESTACIONES DEL SISTEMA GALILEO

Galileo se ha diseñado para satisfacer las necesidades de una amplia variedad de usuarios, para los que se han establecido una serie de servicios que han constituido la base para especificar las características y prestaciones del sistema. Los cinco servicios de referencia son:

1. El servicio de acceso abierto OS, que proporcionará información de posición, velocidad y tiempo de forma pública y gratuita.
2. El servicio comercial CS (*Commercial Service*), que proporcionará información de posición, navegación y tiempo susceptible de ser utilizada para aplicaciones de mayor precisión y, potencialmente, otro tipo de información mediante el acuerdo entre el operador de la constelación y el usuario. Este servicio se suministrará mediante señales cifradas, para acceder a las cuáles será necesario el pago de una cantidad al operador de la constelación.
3. El servicio de seguridad de vidas SoL, que proporcionará información para aplicaciones críticas en términos de seguridad (por ejemplo navegación aérea y marítima, control de tráfico ferroviario). Este servicio se ofrecerá sin cifrado, y el Sistema tendrá la capacidad de autenticar las señales incluidas de modo que el usuario pueda verificar periódicamente, haciendo uso de información cifrada que formará parte de la señal, que las señales recibidas son realmente emitidas por un genuino satélite *Galileo*. Además de la información de navegación y de autenticación, el servicio SoL proporcionará información y notificaciones de integridad (esto es, una advertencia puntual y rápida a los usuarios en caso de que el uso seguro de la señal de navegación SoL no pueda utilizarse conforme a las especificaciones de diseño).
4. El servicio público regulado PRS, que se reservará a usuarios gubernamentales autorizados que requieran un alto nivel de protección en la señal (por ejemplo mayor resistencia y robustez frente a perturbaciones, interferencias o suplantación). El acceso se controlará mediante un mecanismo de distribución de claves controlado por los gobiernos participantes. Obviamente, el PRS abre la puerta a la utilización de Galileo en aplicaciones militares y de «doble uso».
5. El servicio de búsqueda y rescate SAR que se integrará dentro de la iniciativa internacional COSPAS-SARSAT.

Las prestaciones esperadas para cada uno de los servicios de navegación son las que se muestran en el cuadro 6.

## COMPASS

COMPASS es la denominación oficial en la UIT del sistema de navegación por satélite chino también conocido como *BeiDou*. Éste nació como un programa de navegación por satélite concebido en varias fases con el objetivo final de proporcionar servicios de Posicionamiento, Navegación y Tiempo (PNT) precisos y fiables, así como servicios de mensajería corta para usuarios en cualquier parte del mundo, con independencia del instante o de las condiciones meteorológicas. El desarrollo del Sistema se dividió en dos escalones fundamentales: el Sistema de Navegación de Demostración Beidou (también conocido como BNTS (*Beidou Navigation Test System*)) y el Sistema de Navegación por Satélite Beidou (que es el propiamente conocido como COMPASS). Las autoridades chinas consideran el desarrollo de los dos sistemas en tres fases:

1. Fase primera: desde el año 2000 a 2012, tiene por objeto el despliegue del sistema BNTS, que proporciona servicios de posicionamiento RDSS (*Radio Determination Satellite Services*) que, a diferencia de los servicios proporcionados por las constelaciones GNSS habituales, que emplean medidas del tiempo de llegada en una sola dirección, requieren medidas de distancia en dos direcciones. Esto es, el centro de operaciones del sistema envía una llamada (*polling*) a un conjunto de usuarios a través de uno de los satélites *Beidou*; los usuarios responden a la llamada transmitiendo una señal a través de al menos dos de los tres satélites de que consta BNTS; el tiempo de viaje de las señales se mide desde que la señal se envía desde el centro de operaciones al satélite, de ahí al receptor del usuario, y finalmente de vuelta al centro. Con la información de este lapso de tiempo, las localizaciones conocidas de los dos satélites y una estimación de la altitud del usuario, la localización de éste se puede determinar en el centro de operaciones. Una vez calculada, el centro de operaciones transmite la información de posicionamiento al usuario. El procedimiento es factible toda vez que se trata de un sistema de cobertura regional y que dispone de un servicio adicional de mensajería que permite el envío de información de posición al usuario. BNTS también incluye un servicio RNSS (*Radio Navigation Satellite Service*) de tipo SBAS, pero el estado de este servicio es incierto en la actualidad.

En la fase primera, la constelación consta de tres satélites GEO. Los dos primeros se lanzaron entre los meses de octubre y diciembre de 2000, situándose en 80 grados Este y 140 grados Este sobre la órbita

**Cuadro 7.** — *Estado de la constelación Beidou-2.*

Fecha de lanzamiento	Tipo	Órbita operacional
14 de abril de 2007	MEO	Inclinada, 55 grados. Altitud 21.500 kilómetros
15 de abril de 2009	GEO	En mantenimiento en la actualidad
17 de enero de 2010	GEO	144,5 grados Este
2 de junio de 2010	GEO	84 grados Este
1 de agosto de 2010	IGSO	Ascending node, 118 grados Este
1 de noviembre de 2010	GEO	160 grados Este
17 de diciembre de 2010	IGSO	Ascending node, 118 grados Este
10 de abril de 2011	IGSO	Ascending node, 118 grados Este
26 de julio de 2011	IGSO	Ascending node, 98 grados Este

geoestacionaria y portando como carga útil un transpondedor RDSS. Estos transpondedores operaban en la banda L (1.610-1.626,5 Megahercios) para la señal de subida y en la banda S (2.483,5-2.500 Megahercios) para la de bajada. El tercer satélite se lanzó en mayo de 2003 y se situó en la longitud 110 grados Este. Incluye, además de la carga útil RDSS, un transpondedor SBAS, que opera en las bandas de frecuencia L1 y L2 de GPS y que, presumiblemente, puede emplearse para proporcionar servicios de aumentación regionales para GPS y GLONASS.

2. Fase segunda irá desde el año 2012 hasta 2020: el servicio de navegación RNSS se incrementará desde el SBAS proporcionado por BNTS hasta proporcionar un servicio de navegación regional autónomo. La constelación prevista constará de cinco satélites GEO (en 58,75 grados Este, 80 grados Este, 110,5 grados Este, 140 grados Este y 160 grados Este); cinco geosíncronos inclinados (IGSO) en dos órbitas con una inclinación de 55 grados y con una longitud del nodo

**Cuadro 8.** — *Estructura de la señal Beidou-2 en la actualidad.*

Designación de la señal	Frecuencia de la portadora (MHz)	Códigos PRN (Mchips/s)	Ancho de banda (MHz)	Tipo de servicio
B1(I)	1.561,098	2,046	4,092	Abierto
B1(Q)	1.561,098	2,046	4,092	Restringido
B2(I)	1.207,14	2,046	24,000	Abierto
B2(Q)	1.207,14	10,23	24,000	Restringido
B3	1.268,52	10,23	24,000	Restringido

ascendente de 118 grados Este y 98 grados Este respectivamente; y cuatro satélites en órbitas medias con un semieje mayor de 27.878 kilómetros y una inclinación de 55 grados. La configuración de la constelación en la actualidad se resume en el cuadro 7.

Los satélites MEO e IGSO de la fase II tienen diferente configuración de la carga útil con respecto a los GEO, que además de los transpondedores y antenas para las bandas de operación B1/B2/B3 y del retroreflector laser que se emplea para la determinación de órbita precisa, incluyen un transpondedor RDSS con una antena en banda C y otra antes en banda L/S, que se utiliza también la transferencia de tiempo y frecuencias en dos direcciones para la sincronización de tiempos entre las diferentes estaciones de tierra.

Durante la fase segunda, el segmento de control en tierra consta de una Estación de Control Maestra (MCS), Estaciones de Subida (ULS) y Estaciones de Monitoreo (MS). Las principales tareas del MCS son:

- La recogida de datos de seguimiento de los satélites obtenidos por las estaciones.
- El procesado de estos datos para generar a su vez todos los datos de navegación, tales como órbitas y efemérides de los satélites, desviaciones de los relojes, retardo ionosférico y correcciones diferenciales, etc.
- El control de los satélites para completar la misión.

Por su parte, las ULS se hacen cargo de la sincronización de los relojes embarcados y de la subida de los mensajes de navegación. Las MS proporcionan medidas para la determinación de la órbita de los satélites y para la generación de correcciones diferenciales de área amplia, recogiendo medidas de pseudorange y fase de portadora que se remiten en tiempo real al MCS. Durante la fase segunda, sólo se dispondrá de MCS en territorio chino, lo que obviamente limita las prestaciones del servicio fuera de esa región.

Beidou-2 emite durante la fase tres señales de navegación, B1, B2 y B3, con las características que se resumen en el cuadro 8.

3. Durante la fase tercera, se completará la constelación MEO, pudiendo alcanzarse hasta 27 satélites distribuidos según una constelación Walker 24/3/1. La precisión de posición estimada será superior a 10 metros, con una precisión en tiempo de 20 nanosegundos. El diseño del sistema, que se denomina propiamente COMPASS, contempla

**Cuadro 9.** — Estructura de la señal COMPASS.

Designación de la señal	Canal componente	Frecuencia portadora (MHz)	Chip rate (Mchip/s)	Modulación de datos (bps)		Tipo de servicio	
B1-C	B1-C <sub>D</sub>	1.575,42	1,0230	50	MBOC(6,1,1/11)	Abierto	
	B1-C <sub>P</sub>			No			
B1	B1 <sub>D</sub>		2,0460	50	50	BOC(14,1)	Restringido
	B1 <sub>P</sub>				No		
B2a	B2a <sub>D</sub>	1.191,80	10,2300	25	AltBOC(15,10)	Abierto	
	B2a <sub>P</sub>			No			
B2b	B2b <sub>D</sub>			50			
	B2b <sub>P</sub>			No			
B3	B3	1.268,52	10,2300	500	QPSK(10)	Restringido	
B3-A	B3-A <sub>D</sub>			2,5575	50	BOC(15, 2,5)	Restringido
	B3-A <sub>P</sub>						

la distribución de seis señales de navegación como se muestra en el cuadro 9, aunque el ICD definitivo para la señal no ha sido todavía publicado.