



## Navegación por satélite. Evolución, tendencias tecnológicas y aplicaciones

**FÉLIX PÉREZ**

DIRECTOR DEL DEPARTAMENTO DE SEÑALES, SISTEMAS Y RADIOCOMUNICACIONES,  
E.T.S.I.T. (UPM)

---

*El primer sistema de navegación por satélite fue concebido en el Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopking mientras determinaban la órbita del primer satélite artificial –el Sputnik 1–, a partir de la recepción de la señal que éste emitía: una simple portadora de frecuencia 20 MHz. Cuando al doctor F. T. McClure se le ocurrió invertir el problema que estaban resolviendo en aquel momento no podía imaginar que estaba abriendo las puertas a una revolución tecnológica cuyas aplicaciones sólo están limitadas por nuestra imaginación.*

### UN POCO DE HISTORIA...

El primer sistema de navegación por satélite (en adelante SNS) nació de la coincidencia de una "necesidad vital" de la Marina de Estados Unidos y de la aparición de un avance tecnológico sin precedentes: la capacidad de situar satélites artificiales en órbita alrededor de la Tierra.

En efecto, en 1957 en plena Guerra Fría, la Marina norteamericana inició el programa Polaris cuyo objetivo era el despliegue de misiles intercontinentales ocultos bajo el agua, embarcándolos en submarinos dispersos en los océanos. Cada misil apuntaba a un objetivo estratégico seleccionado y el éxito del proyecto dependía de la capacidad de determinar con precisión la posición de los submarinos en cualquier punto de la Tierra, lo que requería un sistema de navegación global (utilizable en todo momento y en cualquier punto).

Por otro lado, los investigadores de la Universidad Johns Hopking habían comprobado la posibilidad de determinar con gran precisión la órbita del Sputnik 1, a partir del desplazamiento Doppler sufrido por la señal que emitía (como consecuencia del movimiento del satélite) y del conocimiento preciso de la posición del receptor que la sintonizaba.

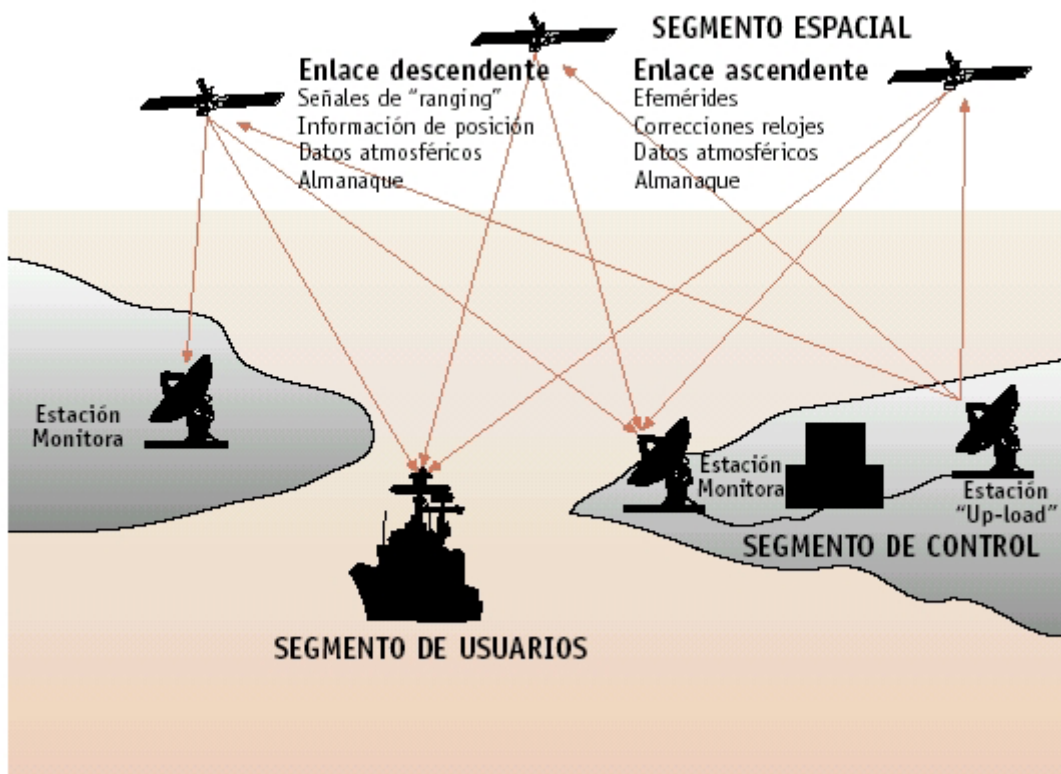
En una conversación casual entre investigadores de ambos proyectos el doctor McClure comentó la posibilidad de invertir el problema: si se conociese la posición de un satélite de forma precisa, sería posible determinar la de un receptor situado en el submarino de posición desconocida, midiendo el desplazamiento Doppler sufrido por una señal emitida desde el satélite. Había nacido el TRANSIT, el primer SNS.

El programa TRANSIT comenzó en 1958 y se declaró operacional en 1964, tras el lanzamiento de 10 satélites. Posteriormente, en 1967, se permitió su utilización civil, estando en servicio durante 33 años y habiendo sido utilizado por 250.000 usuarios, un éxito sin precedentes. Por su parte, la Unión Soviética desarrolló el CICADA, un sistema muy similar al de la Marina norteamericana.

A pesar de su sencillez y sus limitaciones –por ejemplo no se podía utilizar en navegación aérea–, el sistema TRANSIT estableció todos los conceptos básicos de los SNS's: estructura del sistema, fuentes de error, técnicas de navegación y geodésicas, etc. De hecho, el GPS

(Global Positioning System) no es más que su evolución lógica de la mano de nuevos desarrollos tecnológicos que permitieron la superación de dichas limitaciones.

**FIGURA 1** ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE



### PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE

Las medidas básicas que pueden realizarse, a partir de las señales transmitidas desde los satélites, son la distancia de la línea de visión directa observador-satélite y la velocidad de variación con el tiempo de esta distancia. La primera se obtiene del tiempo que tarda la señal en alcanzar al observador o del desfase que sufre la portadora, y la segunda del desplazamiento Doppler que sufre esta misma portadora.

La medida en un cierto instante o en un intervalo de tiempo de una de las dos magnitudes permite establecer una superficie en la que está el observador (en el primer caso un esferoide y en el segundo un hiperboloide). Para establecer la posición del observador se requieren varias superficies cuya intersección es la posición buscada. Además estas superficies deben cortarse adecuadamente, lo que exige que los satélites ocupen posiciones muy alejadas entre sí en el espacio. Para ello, existen dos soluciones:

- Utilizar un solo satélite y realizar las medidas en diferentes instantes o intervalos de tiempo a lo largo de la trayectoria. En este caso, la posición se obtiene de forma discontinua, pero con pocos satélites se puede cubrir toda la superficie terrestre. Así se concibió el sistema TRANSIT.
- Utilizar varios satélites y realizar simultáneamente las medidas de distancia y/o velocidad de variación de la distancia del receptor a los satélites. En este caso, la posición se obtiene de forma casi continua, lo que permite su utilización por móviles de gran dinámica (aeronaves), pero son necesarios muchos más satélites. Así está diseñando el sistema GPS.

En el primer caso, se utilizan satélites de baja altura (denominados LEO: órbita baja) para que cambien rápidamente su posición respecto del observador. Por ejemplo, el sistema TRANSIT utilizaba 6 satélites con órbitas polares a 1.100 kilómetros de altitud con un período de revolución de 107 minutos. Por el contrario, el sistema GPS usa 24 satélites con órbitas a 20.000 kilómetros de altura (denominados MEO: órbita media) y períodos de revolución de 12 horas.

La implementación práctica de estas ideas tan simples es muy compleja. De hecho, un SNS está constituido por tres partes o segmentos (figura 1):

- **Segmento espacial.** Son los satélites, encargados de generar y transmitir las "señales de navegación". Se usan satélites no geoestacionarios que sobrevuelan todos los puntos de la superficie terrestre y cuyas órbitas deben ajustarse para que, en cualquier punto, se vea un número mínimo de satélites con una periodicidad adecuada para permitir, en recepción, el cálculo de la posición con una determinada precisión.
- **Segmento de control.** Está constituido por las estaciones terrenas de seguimiento. Dado que su emplazamiento es conocido, determinan los parámetros orbitales con mucha precisión a partir de las señales transmitidas por los satélites. Los datos se envían, junto con señales de tiempo para sincronizar el sistema, a los satélites mediante un enlace radio en banda S para, posteriormente, retransmitirlos a los usuarios. En los sistemas actualmente en funcionamiento, dichos datos se envían modulando en fase las portadoras utilizadas para las medidas de distancias y desplazamientos Doppler. Las efemérides utilizadas en el sistema GPS, los datos que permiten al receptor calcular la posición de los satélites, son calculadas y difundidas por varias organizaciones ([www.igscb.jpl.nasa.gov](http://www.igscb.jpl.nasa.gov)).
- **Segmento de usuarios.** En los SNS, los equipos de a bordo consisten básicamente en un receptor y un calculador. El receptor permite obtener los desplazamientos Doppler y/o los retardos temporales así como los datos orbitales y las señales de sincronismo. El calculador, con estos datos y otros que se introducen directamente desde la nave, calcula la posición y corrige los errores introducidos por diversas causas como la propagación por la ionosfera y troposfera, movimiento de la nave, fenómenos relativistas, etc. Según la aplicación, los equipos incluyen capacidades adicionales (presentación de mapas, almacenamiento de datos...), disponiéndose de una variada oferta en el mercado ([www.gpsnow.com](http://www.gpsnow.com)).

## EL SISTEMA GPS

El sistema GPS fue aprobado por el Departamento de Defensa de Estados Unidos en 1973 como síntesis de los esfuerzos desarrollados en tres proyectos independientes de los que se transfirieron tres elementos tecnológicos básicos:

- El programa **TRANSIT** aportó la experiencia práctica de un sistema en operación.
- El programa **TIMATION**, también desarrollado por la Marina de Estados Unidos para suministrar posición y tiempo precisos a observadores terrestres pasivos, aportó fundamentalmente la tecnología de relojes atómicos embarcados en satélites.
- El programa **621-B** de las Fuerzas Aéreas de Estados Unidos demostró las capacidades de un nuevo tipo de señales basadas en el uso de códigos seudo aleatorios. Una técnica que permitía usar la misma frecuencia para todos los satélites y detectar señales de varios órdenes de magnitud por debajo del nivel de ruido, siendo además señales muy fáciles de generar. En definitiva las técnicas CDMA de amplia utilización en las próximas generaciones de sistemas de telecomunicación, eso sí, con 20 años de adelanto.

## PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

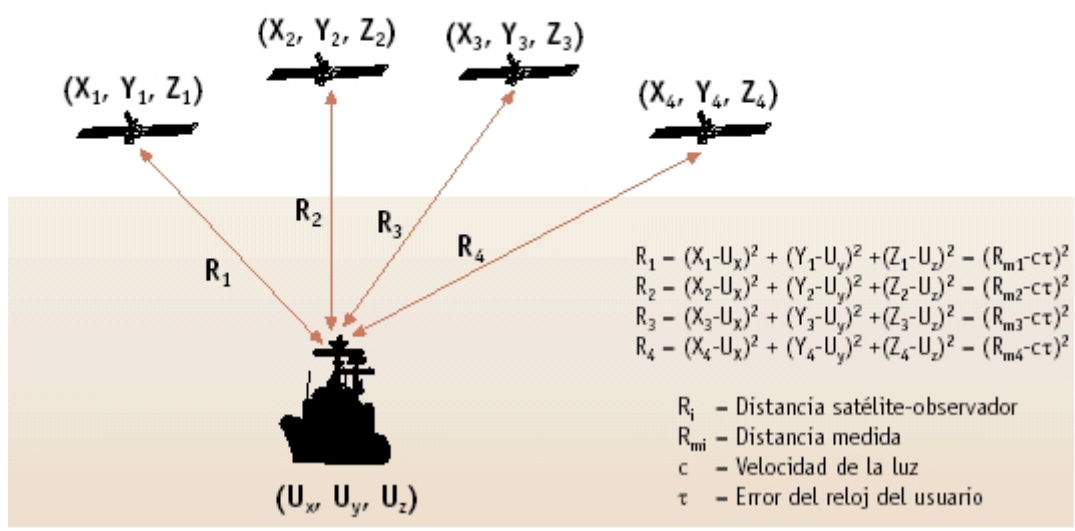
El fundamento básico de la técnica de navegación empleada en el GPS es la medida simultánea de las distancias a varios satélites cuya posición es estimada a partir de las efemérides que ellos mismo envían modulando las señales utilizadas para la determinación de las distancias.

Ello permite establecer varias ecuaciones, al menos cuatro, cuya solución permite obtener la latitud, longitud, altitud del receptor, así como corregir su reloj (figura 2).

La determinación de las distancias se hace a partir de la medida del retardo que sufre la señal al recorrer la trayectoria satélite-observador, lo que se realiza correlando las señales recibidas de los satélites (una portadora común modulada por códigos seudo aleatorios) con réplicas desplazadas de las mismas que genera el receptor. Una descripción completa de la constitución y del principio de funcionamiento del sistema puede encontrarse en [www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps.html](http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps.html).

Se usan dos tipos de códigos, los denominados C/A, utilizables por usuarios civiles que emplean una velocidad de código de 1.023 MHz y los denominados códigos P o de precisión, solo permitidos para uso militar, que trabajan a 10.23 MHz. La precisión instrumental (sin considerar otras fuentes de error) depende de la velocidad de código. De hecho, inicialmente, se estimó que la precisión instrumental obtenida en la medida de las distancias era de varias decenas de metros con códigos C/A de algunos metros con códigos P.

**FIGURA 2** PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE



## PRECISIÓN

Son varias las fuentes de error que degradan la precisión en la medida de las distancias a los satélites, pero todas ellas están acotadas y, en gran medida, pueden ser corregidas. Las más importantes son:

- **Errores en los relojes de los satélites.** Las derivas de los relojes atómicos pueden producir errores significativos, sin embargo el sistema transmite a los usuarios datos que permiten su corrección hasta reducirlos a uno o dos metros.
- **Errores en la estimación de la posición de los satélites.** Con los modelos empleados en la medida y predicción de las órbitas este error se traduce en pocos metros en la estimación de las distancias.
- **Errores por propagación en la troposfera e ionosfera.** Especialmente el efecto de la ionosfera produce errores en torno a la decena de metros que pueden ser reducidos en un orden de magnitud si se hacen las medidas de distancias con dos frecuencias simultáneamente, algo que por ahora sólo pueden hacer los usuarios militares.
- **Errores instrumentales.** Inicialmente previstos como una de las principales fuentes de error, el desarrollo de las técnicas de tratamiento de las señales CDMA ha reducido su valor a alrededor de un metro, sorprendiendo a los diseñadores del sistema.

En total, el error cometido en la medida de las distancias a los satélites, para usuarios civiles, está entre 15 y 20 metros y es inferior a 5 metros para los militares.

Los gestores militares del sistema consideraron inaceptable esta precisión por lo que decidieron degradar artificialmente la precisión del GPS introduciendo lo que se conoce como Disponibilidad Selectiva o SA (Selective Availability), haciendo que la precisión en la medida de la distancia, para uso civil, fuese de 50 metros para códigos C/A. En estas condiciones para el Servicio de Posicionamiento Estándar (uso civil) la precisión estimada en la determinación de la posición es 100 metros en el plano horizontal y 156 metros en vertical. La precisión en el tiempo transferido es de 340 nanosegundos. Valores que son cuatro veces inferiores desde que, en mayo de 1999, las autoridades de Estados Unidos decidieran eliminar la SA.

## **GPS DIFERENCIAL**

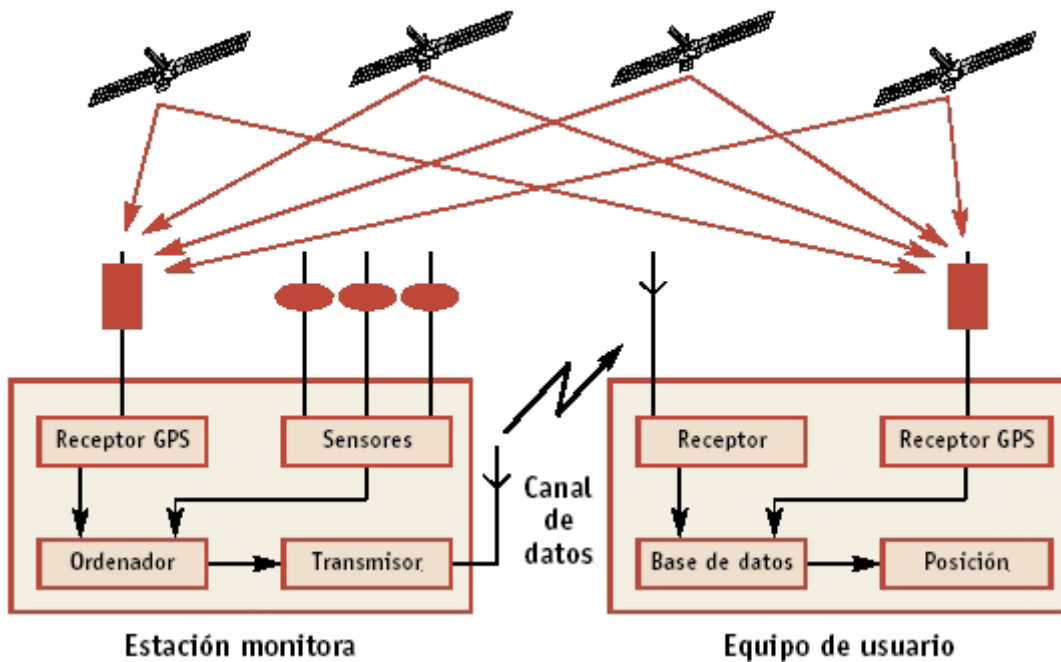
Los errores más importantes, propagación ionosférica y SA, tienen la particularidad de estar correlacionados espacial y temporalmente en amplias zonas. Esto significa que son los mismos para receptores situados en dichas áreas –círculos de más de 100 kilómetros de radio–, lo que abre la posibilidad de reducirlos drásticamente utilizando técnicas diferenciales. De hecho, con estos sistemas las precisiones obtenidas se reducen a algunos metros.

El empleo de estas técnicas fue el siguiente avance tecnológico, forzado en gran parte, por la SA. Un sistema diferencial está constituido por tres elementos (ver figura 3):

- Una estación monitora, cuya posición es conocida con precisión, que incluye un receptor GPS y un ordenador que calcula los errores cometidos en la determinación de las distancias a los satélites y configura la estructura del mensaje difundido a los usuarios.
- Un canal de datos, normalmente unidireccional, compuesto por un transmisor junto a la estación monitora y los receptores de los usuarios. La integridad del enlace es uno de los aspectos críticos del sistema. Se han empleado varios sistemas de radiocomunicaciones para establecer el enlace: los radiofaros costeros, sistemas de comunicaciones por satélite, emisoras comerciales de radiodifusión y TV y comunicaciones móviles terrestres.
- Equipos de usuarios, con un receptor adecuado al canal de datos y un receptor GPS con capacidad de realizar las correcciones diferenciales. Existe un protocolo de comunicaciones estandarizado por la RTCM (Radio Technical Commission Marine) disponible en una buena parte de los receptores comerciales.

Existen numerosos sistemas diferenciales en operación, siendo el más conocido el que mantiene el Servicio de Guardacostas de Estados Unidos ([www.navcen.uscg.gov/dgps/default.htm](http://www.navcen.uscg.gov/dgps/default.htm)).

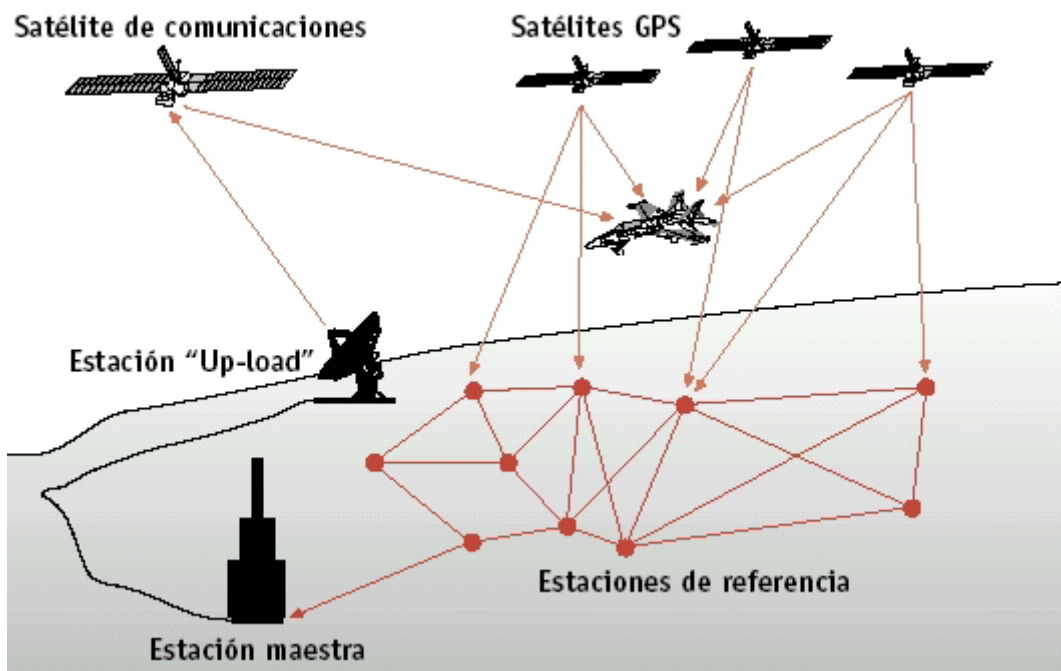
**FIGURA 3** GPS DIFERENCIAL



### EL SISTEMA GLONASS

Finalmente indiquemos que la antigua Unión Soviética desarrolló el sistema GLONASS (Global Navigation Satellite System), actualmente bajo control de la Federación de Rusia cuya filosofía básica es similar a la del GPS ([mx.iki.rssi.ru/SFCSIC/SFCSIC\\_main.html](http://mx.iki.rssi.ru/SFCSIC/SFCSIC_main.html)). La utilización simultánea de ambos sistemas permite aumentar exponencialmente los niveles de fiabilidad e integridad del sistema, de hecho ya existen numerosos receptores GPS-GLONASS en el mercado aunque son bastante más caros que los receptores GPS. Desgraciadamente, todavía no está asegurada la viabilidad futura del sistema.

**FIGURA 4** GPS EXTENDIDO REGIONAL





## SISTEMAS GPS EXTENDIDOS

El GPS Extendido ("Augmented GPS") nace de la necesidad en ciertas fases de la navegación aérea de alcanzar requisitos de precisión, fiabilidad e integridad que no es capaz de suministrar el GPS. Ello implica la necesidad de incorporar sensores en las aeronaves, estaciones monitoras del sistema, seudolitos, etc. Todo ello es lo que se conoce como sistemas de Navegación Global por Satélite (GNSS: Global Navigation Satellite System), cuya primera generación (GNSS1), basada en el GPS y en el GLONASS operará durante la primera década del siglo XXI y la segunda generación (GNSS2) será la evolución lógica del GPS y la apuesta de Europa de llevar a la práctica un sistema civil que resuelva las actuales incertidumbres asociadas a los sistemas GPS y GLONASS. Para resolver estos problemas se utilizan dos tipos de mejoras o de GPS Extendido: regionales, conocidos como GPS Expandido de Área Extensa (WAAS: Wide Area Augmentation System en denominación estadounidense), y locales, conocidos como GPS Expandido de Área Local (LASS: Local Area Augmentation System).

### GPS EXTENDIDO REGIONAL

Estos sistemas se utilizan en todas las fases del vuelo incluido el aterrizaje de precisión en categoría I (<http://www.gpsinformation.net/exe/waas.html>). Están compuestos por los siguientes elementos (ver figura 4):

- **Estaciones de Referencia.** En número de varias decenas, están distribuidas a lo largo de la zona de control, observan todos los satélites GPS –y en su caso GLONASS– visibles, y determinan las pseudo distancias y las correcciones ionosféricas.
- **Estaciones Maestras.** Utilizan los datos que les envían las estaciones de referencia y generan un mensaje que contiene las correcciones para cada satélite GPS –y en su caso GLONASS–. El mensaje incluye las efemérides del satélite, su reloj y la corrección atmosférica.
- **Satélites Geoestacionarios.** Reciben el mensaje de las estaciones maestras y lo retransmiten a los usuarios utilizando portadoras en la banda de las señales GPS y el formato definido por el Comité Especial 159 de la RTCA. Esta señal puede ser utilizada para establecer una pseudo distancia adicional –la del receptor al satélite geoestacionario– incrementando la precisión, disponibilidad e integridad del sistema.

La señal de "navegación" es similar a la del GPS y se puede recibir con receptores GPS ligeramente modificados. Se trata de una señal a frecuencia L1 que se modula con códigos de espectro ensanchado del mismo tipo que los C/A del GPS. Como ya se ha indicado con anterioridad, la señal incluye los datos de corrección diferencial e información de integridad tanto de los satélites GPS como de las estaciones empleadas.

Nótese que el sistema WAAS realiza, de forma redundante, funciones del segmento de control del GPS, calculando sus propias efemérides y parámetros de los relojes; por tanto elimina la Disponibilidad Selectiva.

La precisión obtenida está en torno a los cuatro metros, garantizándose los siete metros requeridos por la aproximación en categoría I. Asimismo se cumplen los niveles de disponibilidad e integridad requeridas. Ello permite aterrizajes en que el piloto ve la pista a 200 pies del suelo y a una distancia de media milla.

**En estos momentos están en desarrollo tres sistemas cubriendo grandes zonas de América, Europa y Asia, las de mayor tráfico aéreo, bajo las siguientes denominaciones.**

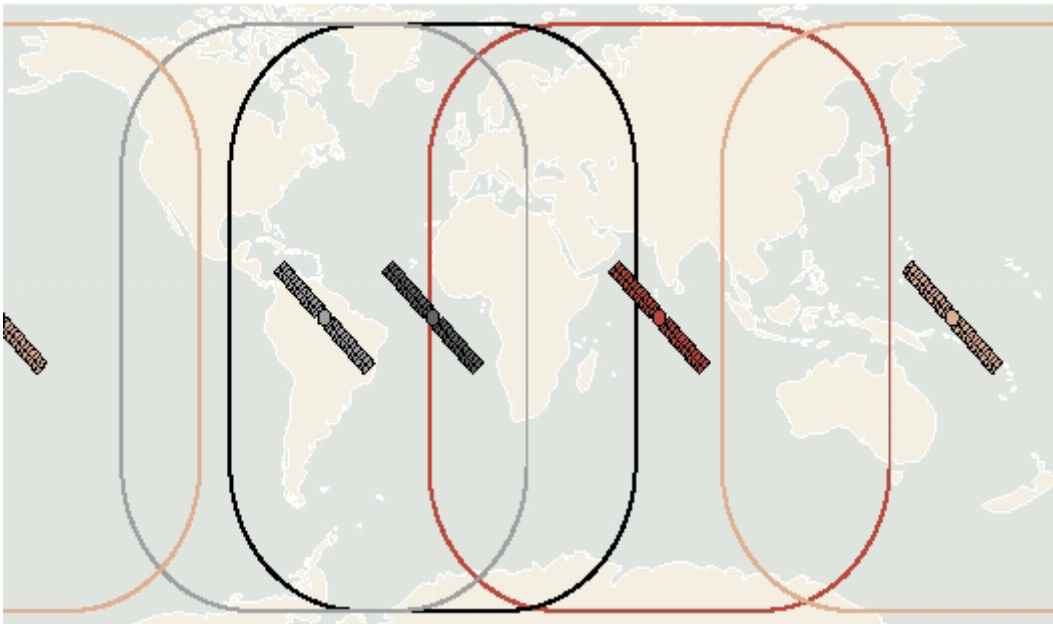
- **WAAS** ([www.gps.faa.gov/Programs/WAAS/waas.htm](http://www.gps.faa.gov/Programs/WAAS/waas.htm)) bajo el control de la FAS, es el proyecto más avanzado con un coste superior a los 1.000 millones de dólares.
- **EGNOS** ([www.esa.int/EGNOS](http://www.esa.int/EGNOS)) (European Geoestationary Navigation Overlay Service) bajo el control conjunto de la Agencia Espacial Europea y EUROCONTROL, está prevista su operación en breve con un presupuesto de 150 millones de ECUS para su desarrollo. Utiliza satélites tipo INMARSAT III a los que se equipa con una pequeña

carga de pago para navegación. Está previsto el uso de dos satélites denominados AOR-E e IOR.

- **MSAS** ([www.nasda.go.jp/index-e.html](http://www.nasda.go.jp/index-e.html)) (MTSAT Satellite-based Augmentation System), desarrollado bajo responsabilidad del Dpto. de Aviación Civil de Japón (JCAB: Japan Civil Aviation Bureau), persigue los mismos objetivos y filosofía que los anteriores pero sobre el área controlada por Japón. Como su nombre indica se basa en el satélite japonés MTSAT (Multi-functional Transport SATellite).

Cuando todos ellos estén operativos cubrirán una buena parte de la superficie terrestre (figura 5)

**FIGURA 5** COBERTURA DE LOS GPS EXTENDIDO REGIONALES



### GPS EXTENDIDO LOCAL

Estos sistemas, conocidos como LAAS, intentan completar a los WAAS para permitir el uso de la navegación aérea por satélite en todas las fases del vuelo. En definitiva, lo que se pretende es que en ciertas áreas (de unos 50 kilómetros de radio) se puedan alcanzar los requerimientos asociados a la aproximación de precisión en categorías II y III ([www.gps.faa.gov/Programs/LAAS/laas.htm](http://www.gps.faa.gov/Programs/LAAS/laas.htm)).

Todavía es un sistema en fase experimental, apoyado fundamentalmente por las FAA, con el que se espera obtener precisiones en torno a un metro y disponibilidad e integridad prácticamente del 100%. Se utilizará tanto para maniobras de aproximación, aterrizaje y despegue como para operaciones de superficie en el aeropuerto.

La filosofía es conceptualmente idéntica a la de los sistemas descritos en el apartado anterior pero retransmite el mensaje con las correcciones mediante estaciones terrenas en la banda VHF. Contiene los siguientes elementos (figura 6):

- **Estaciones de Referencia de Área Local.** Típicamente se usan cuatro y están instaladas en posiciones precisas alrededor del aeropuerto. Su función es recibir las señales GPS, calcular las pseudo distancias y enviarlas a la estación central de proceso.
- **Estación Central de Proceso.** Es la encargada de calcular los errores del sistema GPS y de enviarlas a los transmisores de VHF.



- **Transmisores de Datos en VHF** con el formato especificado por el RTCM.
- **Seudolitos**. Se emplean si se requieren para alcanzar la categoría. Como su nombre sugiere son básicamente satélites GPS situados sobre el suelo.
- **Sensores adicionales embarcados** (radioaltímetros).

El coste previsto para uno de estos sistemas es de 300.000 dólares, del mismo orden que otras alternativas como el sistema MLS. En estos momentos la FAA apuesta claramente por su desarrollo, por el contrario Europa, cuyas industrias han hecho fuertes inversiones en MLS, no ha tomado ninguna decisión y preferiría una introducción más lenta.

## **EL SISTEMA GALILEO**

El GALILEO se postula como el futuro sistema europeo de navegación por satélite ([www.esa.int/navigation/pages/gnss/intro.htm](http://www.esa.int/navigation/pages/gnss/intro.htm)). Su filosofía es similar a la del GPS, incorporando, entre otras mejoras, las técnicas asociadas a los sistemas extendidos, el uso de 4 señales de "navegación", un transponder para servicios de salvamento y una optimización de las órbitas para mantener la precisión hasta latitudes de 70° N. Su despliegue está previsto para el año 2008.

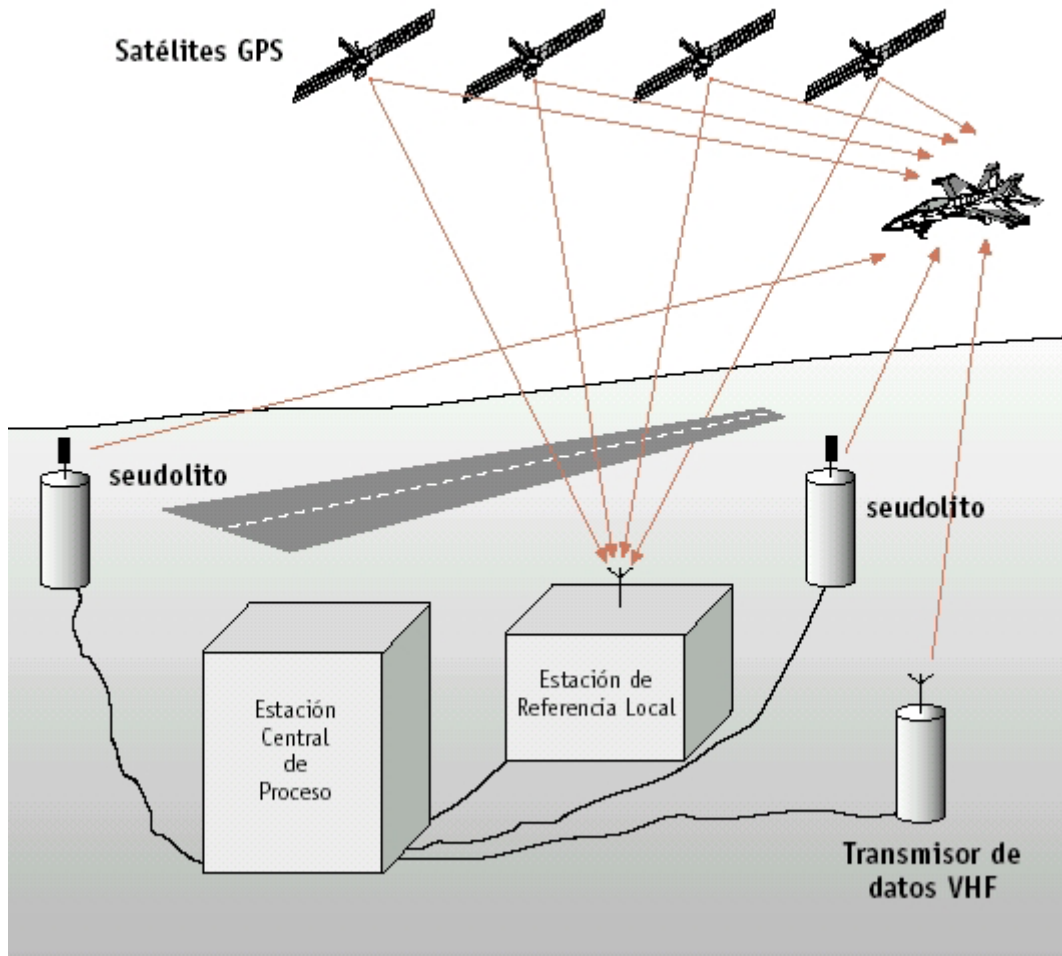
Dejando aparte los aspectos estratégicos, las principales diferencias entre el GALILEO y el GPS no son de carácter tecnológico sino conceptuales: se ha diseñado con criterios estrictamente civiles, optimizando los servicios suministrados y garantizando su interoperabilidad con el GPS y el GLONASS.

El sistema es la respuesta europea a la enorme ventaja de Estados Unidos en el campo y constituirá el elemento sobre la que se desarrollará su sector aeroespacial. El proyecto pretende implementar todos los segmentos, incluyendo el mantenimiento de una constelación de 30 satélites, un segmento de control con 14 estaciones monitoras y el desarrollo de diferentes equipos de usuario. Todo ello con un coste de 2.900 millones de euros, que serán financiados inicialmente por la Unión Europea y la Agencia Espacial Europea y posteriormente por el sector privado en base a la utilización de los servicios suministrados.

Una completa descripción del sistema puede encontrarse en [www.iies.es/teleco/pulicac/pub1bit/bit127/especial3.htm](http://www.iies.es/teleco/pulicac/pub1bit/bit127/especial3.htm) .

FIGURA 6

GPS EXTENDIDO LOCAL



## APLICACIONES DE LOS SISTEMAS DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE

En estos momentos son numerosas las aplicaciones operativas del GPS, pero serán muchas más las que se desarrollarán en los próximos años, algunas de ellas todavía no han sido ni imaginadas ([www.gpsworld.com](http://www.gpsworld.com)).

### NAVEGACIÓN

La navegación marítima ya se basa en el sistema GPS. El coste de los equipos (los más baratos están en torno a los 500 dólares), garantiza su instalación incluso en barcos de pequeño tonelaje.

En navegación terrestre se consideran tres grandes mercados: los automóviles (integrando el GPS con sistemas gráficos avanzados), los receptores personales de muy bajo precio y los sistemas orientados a la gestión de flotas. Las estimaciones indican que, en pocos años, se habrán instalado millones de receptores para tráfico rodado y decenas de millones de los segundos. El tercer campo corresponde a aplicaciones más profesionales como el control de flotas de vehículos de transportes internacionales, redes de autobuses, policía, ambulancias, etc. Son sistemas bidireccionales, en muchos casos diferenciales, en los que la posición de los móviles debe ser transmitida a una estación central. La dificultad y coste del sistema radica en buena parte en la red de comunicaciones y la gestión de la información. Como red de comunicaciones existen varias alternativas: las redes privadas de comunicaciones móviles (en

la banda VHF), los sistemas trunking, los sistemas públicos de comunicaciones móviles (GSM en Europa), comunicaciones por satélite, etc.

La complejidad de la navegación aérea ha hecho que el proceso de implantación en este campo haya sido más lento. A ello ha contribuido también el elevado costo, entre 3.000 y 10.000 dólares, requerido para equipar a una aeronave con GPS. El futuro está, como ya se ha indicado, en el desarrollo de los GNSS, estando en estudio la posibilidad de sistemas de Vigilancia Automática basada en ellos. Inicialmente se aplicaría en áreas de bajo tráfico, donde no es posible o no está justificado el uso de radares y posteriormente se pasará a áreas terminales. La integración de GPS en los actuales sistemas ATC (Control de Tráfico Aéreo) permitiría reducir la separación de las aeronaves en vuelo, con un incremento sustancial de la eficacia de los sistemas de importante transcendencia económica. En áreas terminales, se están experimentando sistemas GPS diferenciales, integrados con otros sistemas o no, que faciliten las maniobras de aproximación y aterrizaje. Asimismo, se podrán utilizar para controlar las aeronaves y los vehículos terrestres sobre las pistas. Todo ello se inscribe en los ya mencionados sistemas extendidos.

Por último también se están considerando diversas aplicaciones en el campo espacial, por ejemplo el control de la posición de las constelaciones de satélites LEO, navegación de las lanzaderas espaciales, etc.

## **CIENCIAS GEOGRÁFICAS**

El GPS ha abierto en este campo un amplio abanico de aplicaciones al permitir, trabajando en modo estático y diferencial, y comparando las fases de las señales transmitidas por los satélites la localización de posiciones con precisión de centímetros ([www.ngs.noaa.gov](http://www.ngs.noaa.gov)). A modo de resumen citaremos alguno de ellas:

*Geodesia*: observación de redes de cualquier orden de redes de control, con capacidad para determinar el geode utilizándolo conjuntamente con otras técnicas.

*Geodinámica*: determinación de deformación de la corteza terrestre (estudio de la rotación terrestre, movimiento de las placas tectónicas, predicción de terremotos,...).

*Topografía y Fotogrametría*: densificación de redes geodésicas y batimétricas y apoyo fotogramétrico en escalas medias y altas.

*Obra civil*: realización de obras de alto recorrido: carreteras, redes eléctricas y telefónicas, conducciones de agua, oleoductos, etc.

## **APLICACIONES MILITARES**

El GPS se está introduciendo con gran rapidez en campos tan diversos como navegación militar (aérea, marítima y terrestre), guiado de misiles, control y guiado de sistemas de armas, posicionamiento de tropas, un largo etc. De hecho, el mercado militar ha sido el primer mercado profesional en desarrollarse. Por otro lado, la generalización del uso del GPS ha supuesto la modificación drástica en las doctrinas militares actuales, tanto estratégicas como tácticas.

## **SINCRONIZACIÓN DE SISTEMAS**

Como se ha indicado con anterioridad el sistema GPS permite obtener una referencia temporal común precisa con receptores fijos o móviles en cualquier punto de la tierra. Es una de las posibilidades más importantes y menos apreciadas del sistema. Entre ellas está la posibilidad de sincronizar las infraestructuras de telecomunicaciones del mundo. La referencia temporal GPS se transmite directamente en el mensaje de navegación obteniéndose una precisión de unos 300 nanosegundos, con la Disponibilidad Selectiva conectada y utilizando un solo satélite. Si se trabaja en modo diferencial –como es el caso de las aplicaciones de sincronización– y

utilizando varios satélites simultáneamente, la precisión resultante es del orden de nanosegundos.

## OTRAS APLICACIONES

Existen usos de carácter específico pero de gran importancia económica por su elevado valor añadido, entre otros: *defensa civil*, localización y delimitación de zonas afectadas por grandes desastres, control y guiado de vehículos de auxilio; *gestión y catalogación de recursos ("mapping")*, a un receptor GPS conectado a un ordenador se le hace recorrer una superficie extensa y se van anotando los datos de interés en cada punto; *agricultura*, trabajo automático de los campos de cultivo; *ocio y turismo*, sustitución de los tradicionales guías turísticos por cintas de audio y vídeo asociadas a receptores GPS..., y un largo etc.

## FUTURO DE LOS SISTEMAS DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE

En el año 2000 más de 10 millones de receptores GPS estaban operando, tras cinco años de crecimiento exponencial en su número y rango de aplicaciones. Las principales limitaciones del sistema son de carácter institucional: la dependencia del DOD (Departamento de Defensa de Estados Unidos), la posibilidad de su degradación artificial y la interrupción del servicio en situaciones de crisis. Sin embargo nadie duda que el GPS será la base de la navegación del primer cuarto del siglo XXI, en competencia con el GALILEO y, quizás, con el GLONASS. Los principales hechos que avalan esta afirmación son las siguientes:

- Estados Unidos ha hecho pública su intención de mantener gratis el uso del sistema y ha eliminado la Disponibilidad Selectiva. De hecho, el DOD debe asegurar, por ley, el mantenimiento del servicio de Posicionamiento Estándar (SPS: Standard Positioning Service) tal como la ha definido el Plan de Radionavegación Federal (con Disponibilidad Selectiva) y, si se suspendiese el servicio –algo que parece absurdo en estos momentos–, se daría un preaviso con seis años de antelación. Por otro lado, se está procediendo a la modernización del GPS ([www.navcen.uscg.gov/modernization/default.htm](http://www.navcen.uscg.gov/modernization/default.htm)). Esta incluye la introducción de dos nuevas frecuencias de uso civil. La primera a 1.227,60 MHz, la incorporarán los satélites lanzados a partir del 2003 y la segunda, a 1.176,45 MHz, a partir del 2005. Esto significa que para el año 2010 se dispondrá de 18 satélites con la primera frecuencia y, por tanto, ya se podrá operar con ella.
- El esfuerzo invertido, la rapidez con que se están desplegando los sistemas GPS extendidos y el hecho de que tanto la Unión Europea como Japón estén desarrollando sus propios sistemas prueba la confianza depositada en su futuro. Detrás de estos proyectos se esconden grandes iniciativas tecnológicas e importantes apuestas por el sector aeroespacial.
- A más largo plazo, la perspectiva de tres constelaciones de satélites sobrevolando la tierra –más de 70–, emitiendo "señales de navegación", abre un potencial de aplicaciones casi inimaginables. De hecho, la propia denominación de sistemas de navegación se está quedando obsoleta, dado el crecimiento e importancia económica de sus usos alternativos.

En definitiva, en los próximos años el espacio se poblará de emisoras en movimiento cuya posición se podrá calcular con extraordinaria precisión y que transmitirán señales de banda ancha a disposición de todo aquel que sepa qué hacer con ellas... El resultado desbordará la imaginación de los más atrevidos.