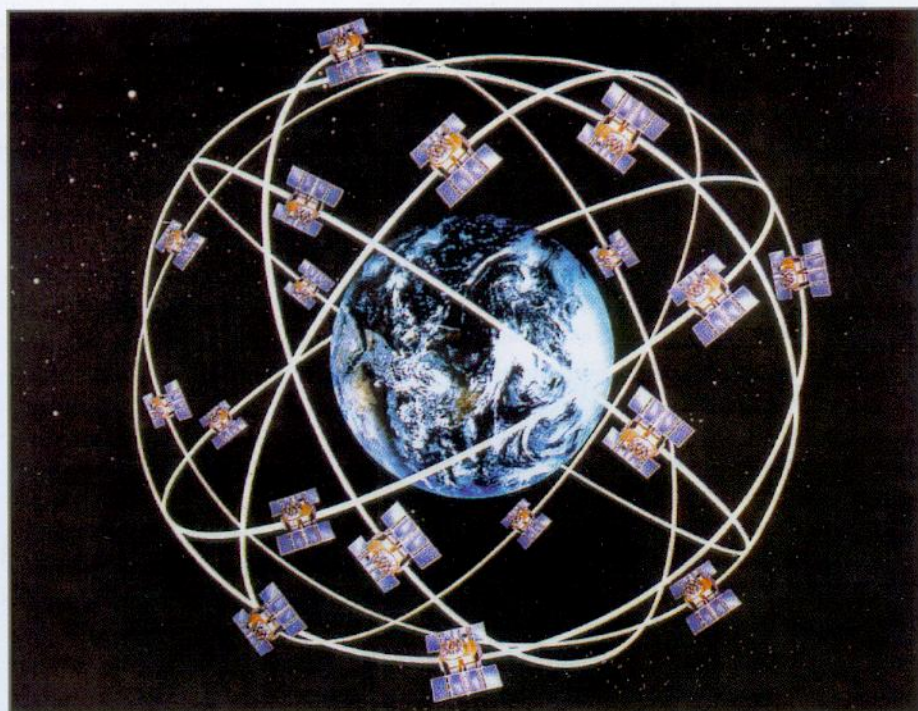


# El Sistema Mundial de Navegación por Satélite (GNSS)

**E**l GNSS (Global Navigation Satellite System), definido por el comité FANS de la OACI, consiste en un sistema con cobertura mundial basado en satélites, que permite determinar con gran precisión la posición y la hora. Tanto los Estados Unidos como Rusia cuentan con un sistema de este tipo. El GPS, operado por el Departamento de Defensa (DOD) de los Estados Unidos, fue declarado operacional en febrero de 1994. Por su parte, está previsto que el sistema ruso, el GLO-NASS, sea declarado operacional en 1996, una vez completada su constelación. En octubre de 1994, los Estados Unidos, formalmente y mediante carta dirigida a la OACI, ofrecieron la utilización gratuita de su sistema. El Consejo de la OACI aceptó dicha oferta, y así se lo hizo saber a los países contratantes. Los sistemas satélite que proporcionen funciones de navegación a los usuarios de la aviación civil internacional, deberán cumplir con la referencia geodética común aprobada por la OACI, denominada WGS84 (World Geodetic System 84). Hay que destacar que el GPS utiliza WGS84; sin embargo, el GLONASS utiliza SGS85 (Sovietic Geocentric System 1985). La compatibilidad entre ambos se resuelve mediante una simple conversión de coordenadas, aunque ello conlleva una cierta degradación de precisión, resultado de las imprecisiones de conversión de una referencia a otra.

## EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO MUNDIAL (GPS)

El GPS (Global Positioning System) es un sistema de radionavegación que se



La constelación GPS está formada por 24 satélites girando en órbitas circulares.

basa en la medida de la distancia a cuatro satélites, y permite determinar la posición y la velocidad en tres dimensiones, así como la hora, todo ello con gran precisión. Proporciona tanto un servicio normal de determinación de la posición (SPS = Standard Positioning Service), como un servicio de determinación precisa de la posición (PPS = Precise Positioning Service). El SPS, que no está encriptado, se suministra gratuitamente a la aviación civil, comercial y otros usuarios a nivel internacional. El GPS está constituido por tres segmentos principales: el espacial, el de control y el de usuario.

El **segmento espacial** del GPS está compuesto por 24 satélites. Situados a

20.200 Km. de altitud, ejecutan órbitas circulares de 12 horas, situadas en seis planos orbitales inclinados 55° con respecto al Ecuador. El espaciamiento entre los satélites se ha ajustado para que al menos haya 5 satélites visibles al usuario a nivel mundial (figura 1).

Todos los satélites GPS utilizan dos frecuencias portadoras, 1575.42 MHz (L1) y 1227.6 MHz (L2), moduladas por dos tipos de códigos (serie de impulsos) pseudoaleatorios, que se corresponden respectivamente con el SPS y el PPS, mencionados anteriormente. También incluyen ambas portadoras un mensaje de navegación, transferido a 50 bits/s, que contiene información con respecto a las

posiciones de los satélites (efemérides), desviaciones de sus relojes atómicos, estado del sistema en general, etc. La frecuencia L1 soporta tanto el SPS como el PPS, y la L2 solamente el PPS.

Como ya hemos dicho, cada satélite emite una serie de impulsos pseudoaleatorios, perfectamente sincronizados en el tiempo, para lo cual dispone de un reloj atómico ultraestable, que adelantaría o atrasaría, como mucho, un segundo cada tres millones de años. Dicha serie de impulsos se repite periódicamente, y es diferente para cada satélite, al objeto de que se pueda identificar de cual de ellos proviene. El receptor de la aeronave, que trae almacenado de fábrica una copia de las series de impulsos emitidas por

cada satélite, las reproduce internamente en perfecto sincronismo (simultáneamente) con las emitidas por éstos. Cuando el receptor recibe una serie de impulsos transmitida por un satélite determinado, la compara con la correspondiente a ese satélite que el receptor genera internamente. Si la aeronave y el satélite se encuentran situados en la misma posición en el espacio, ambas series de impulsos se superpondrían, ya que el receptor y el satélite generan exactamente el mismo impulso en el mismo nanosegundo. Si no fuera así, y estuvieran en diferentes posiciones, habría un desfase entre impulsos tanto mayor cuanto más grande fuese la distancia existente entre el satélite y la aeronave. Dicho desfase es evidentemente consecuencia del tiempo que tarda la serie de impulsos emitida por el satélite en viajar hasta el receptor de la aeronave, que es donde se realiza la comparación (figura 2).

La distancia entre la aeronave y el satélite viene dada por la fórmula  $e = v \cdot t$ , siendo:

$e$  = distancia entre satélite y la aeronave.

$v = 300.000$  Kms./seg. (velocidad de la propagación electromagnética).

$t$  = desfase en tiempo entre las dos series de impulsos.

La medida de la distancia a un satélite permite determinar que la aeronave se encuentra en algún punto de la superficie de una esfera cuyo centro es el satélite y su radio dicha distancia (figura 3).

La medida de la distancia a un segundo satélite permite determinar que la aeronave



Figura 1. Uno de los 24 satélites de la Constelación GPS

se encuentra en algún punto de la circunferencia resultante de la intersección de la esfera anterior con la esfera correspondiente a la nueva medición (figura 4).

La medida de la distancia a un tercer satélite permite asegurar que la aeronave se encuentra en uno de los dos puntos resultantes de la intersección de la esfera correspondiente a la nueva medición con la circunferencia anterior. Ya que uno de los dos puntos se descarta, porque implicaría que la aeronave estaría volando muy

por debajo del nivel del mar, o bien fuera de la atmósfera, la posición de la aeronave queda unívocamente determinada (figura 5).

¿Por qué hace falta, pues, un cuarto satélite? La razón es que hasta ahora habíamos supuesto que tanto el receptor de la aeronave como el satélite generaban los mismos impulsos en el mismo instante (nanosegundo), pero esto no es exactamente así, ya que para ello el receptor de la aeronave debería disponer de un reloj atómico similar al del satélite, para que ambos estuviesen perfectamente sincronizados.

Como esto es muy costoso, se optó por instalar en el receptor un reloj de cuarzo mucho más barato, pero también menos preciso. El error del reloj de la aeronave constituye, pues, otra incógnita ( $\Delta t$ ) que debe tenerse en cuenta a la hora de calcular las distancias.

La medida de la distancia a un cuarto satélite origina una nueva esfera, cuya superficie corta en dos puntos a la circunferencia obtenida anteriormente. El hecho de que dichos dos nuevos puntos no coincidan con los obtenidos por la intersección de la citada circunferencia con la esfera correspondiente al tercer satélite, es debi-

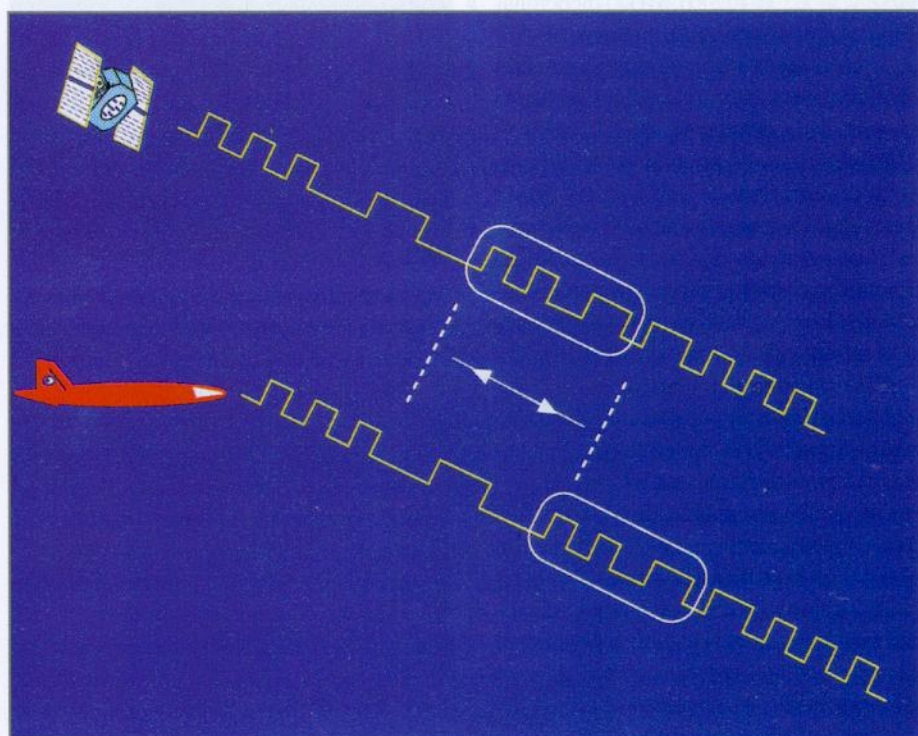


Figura 2. El desfase entre impulsos permite determinar la distancia a un satélite.

do al error del reloj del receptor de la aeronave ( $\Delta t$ ). Si no existiese tal error, deberían coincidir. Variamos pues el reloj ( $\Delta t$ ), hasta conseguir que éstos coincidan. De esta manera no solamente habremos determinado la posición con gran precisión, sino ,además, la hora (figura 6)

En realidad, todos estos procesos que se han explicado mediante un símil, los realiza el receptor resolviendo cuatro ecuaciones (una por cada satélite), con cuatro incógnitas ( $x, y, z, \Delta t$ ). Como vemos, la utilización de un cuarto satélite permite calcular la posición y la hora con mucha precisión, sin necesidad de utilizar costosos relojes atómicos a bordo de las aeronaves. Aparte del error causado por la falta de sincronización entre el reloj del satélite y la aeronave, que, como hemos visto, se resuelve mediante la utilización de un cuarto satélite, existen otros errores que pueden afectar mínimamente a la determinación de la distancia. El más importante es el error de propagación atmosférica, que puede llegar hasta los 4 metros, y es debido a que la señal de radio se curva y frena cuando atraviesa la ionosfera. Como el retraso producido es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia de la señal de radio, este problema se solventa mediante la transmisión en dos frecuencias distintas de la banda L. Dichas frecuencias son la  $L1 = 1575,42$  MHz y la  $L2 = 1227,6$  MHz, mencionadas ya anteriormente. Dicho error se calcula mediante la resolución de dos sencillas ecuaciones con dos incógnitas donde el error es una de ellas.

El segmento de control del GPS realiza el seguimiento de los satélites desde tierra, para poner en hora sus relojes y calcular sus desvíos orbitales. Consiste en cinco estaciones monitoras de seguimiento, repartidas por todo el mundo, una estación maestra de control, y tres estaciones terrenas transmisoras con capacidad para transferir datos a los satélites. Las estaciones monitoras de seguimiento utilizan receptores GPS muy estables que recopilan datos de navegación de los satélites. Estos datos son enviados a la estación maestra de control, que determina el estado de los relojes y de las órbitas, y actualiza el mensaje de navegación (efemérides) de cada satélite. Las correcciones de reloj y los mensajes de navegación actualizados son enviados a las estaciones terrenas transmisoras para su envío a los satélites.

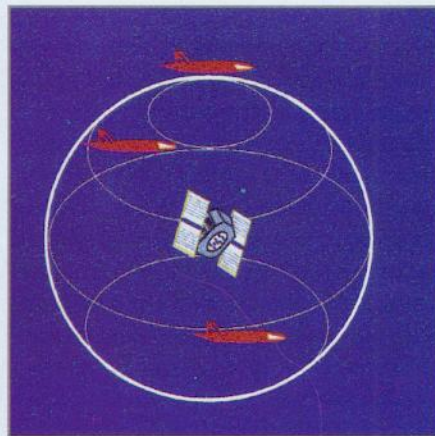


Figura 3. La aeronave se encuentra en algún punto de la superficie de la esfera

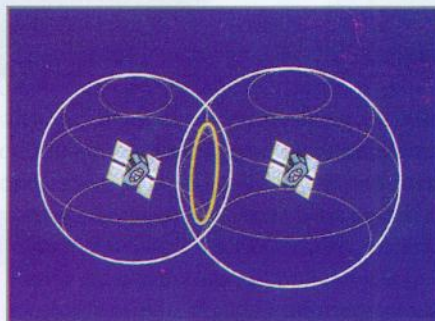


Figura 4. La aeronave se encuentra en algún punto de la circunferencia resultante de la intersección de las dos esferas.

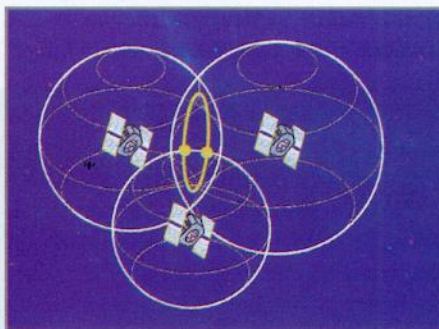


Figura 5. La aeronave se encuentra en alguno de los dos puntos.

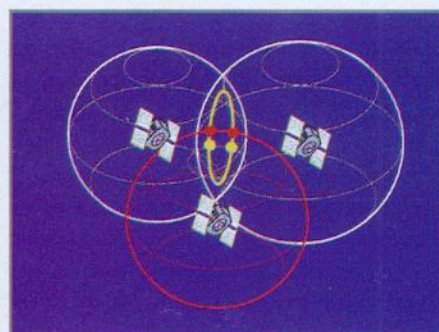


Figura 6. Ajustamos el reloj hasta que las dos parejas de puntos coincidan.

Cada satélite recibe datos actualizados de hora y navegación (efemérides) al menos una vez al día (figura 7).

El segmento de usuario está constituido por el receptor-calculador de a bordo, encargado de realizar los cálculos y comparaciones necesarios para corregir la hora y determinar la posición de la aeronave. Para ello, dispone de una base de datos, donde tiene almacenadas las señales (series de impulsos pseudoaleatorios) de cada satélite, así como sus efemérides. Como en el espacio exterior no hay nada que pueda perturbar el movimiento continuo y uniforme de los satélites, y, además, como sus órbitas y su distribución en ellas es totalmente conocido, el receptor sabe en cada instante con exactitud cuales son su latitud, longitud y altitud (efemérides). El receptor-calculador también procesa el mensaje de navegación de cada satélite por si fuese necesario actualizar sus efemérides (figura 8).

### SISTEMA ORBITAL MUNDIAL DE NAVEGACIÓN POR SATELITE (GLONASS)

El GLONASS es un sistema de navegación por satélite similar en prestaciones al GPS, y basado en los mismos principios fundamentales de funcionamiento (ver tabla de características que se adjunta).

### SISTEMAS DE AUMENTACIÓN

Aunque tanto el GPS como el GLONASS son sistemas muy potentes, presentan limitaciones en cuanto a su capacidad para avisar a los usuarios respecto a fallos, y, además, no resultan lo suficientemente precisos como para poder ser utilizados en aproximaciones de precisión.

Las normas OACI que establecen los requisitos de precisión, integridad y disponibilidad, y que son conocidas como Performance de Navegación Requerida (RNP = Required Navigation Performance), son más estrictas cuanto más exigentes se vuelven las operaciones aeronáuticas. Por ejemplo, el aviso de integridad durante una aproximación de no precisión debe comunicarse al piloto dentro de los 10 segundos siguientes al momento de producirse un fallo, mientras que para una aproximación de categoría III, debe comunicarse dentro de los 2 segundos siguientes.

Los sistemas básicos GPS y GLONASS no cumplen las normativas RNP para todas las fases del vuelo, y, por tanto, deberán ser complementados en mayor o menor grado mediante los denominados sistemas de aumentación de a bordo o de tierra.

Las precisiones suministradas por los sistemas básicos GPS y GLONASS son adecuadas para la mayoría de las fases de vuelo, incluidas las aproximaciones de no precisión. Sin embargo, no son lo bastante buenas como para soportar aproximaciones de precisión hasta los límites especificados para CAT I ILS.

La integridad puede ser definida como la probabilidad de que el piloto conozca que el sistema cumple con los requisitos propios de la operación particular que esté llevando a cabo. Tanto el GPS como el GLONASS disponen de un sistema de control de la integridad, pero no está disponible siempre. Para poder determinar la posición en tres dimensiones con el GPS o GLONASS, el usuario debe poder recibir las señales de, al menos, cuatro satélites con una geometría satisfactoria.

A veces no ocurre así, particularmente cuando la aeronave maniobra, y hay satélites que quedan temporalmente ocultos a la antena del receptor. Incluso combinando los 24 satélites del GPS con los 24 del GLONASS, puede darse el caso que en algunos lugares y en determinados momentos, no existan disponibles cuatro satélites con la geometría adecuada. Aunque lo normal será que haya bastantes más de los requeridos, y, por lo tanto, contemos con un alto nivel de redundancia. Para superar algunas, o todas las limitaciones mencionadas, pueden ser utilizados varios sistemas de aumentación. Los podemos clasificar en tres categorías principales: sistemas de aumentación de a bordo, sistemas de aumentación de área local y sistemas de aumentación de gran área.

### SISTEMAS DE AUMENTACIÓN DE A BORDO

Uno de ellos es el denominado control de integridad autónomo del receptor (RAIM = Receiver Autonomous Integrity Monitoring). Este sistema se puede utilizar solamente si hay más de cuatro satélites a la vista con la geometría adecuada. Si, por ejemplo, hay cinco, se pueden calcular dos

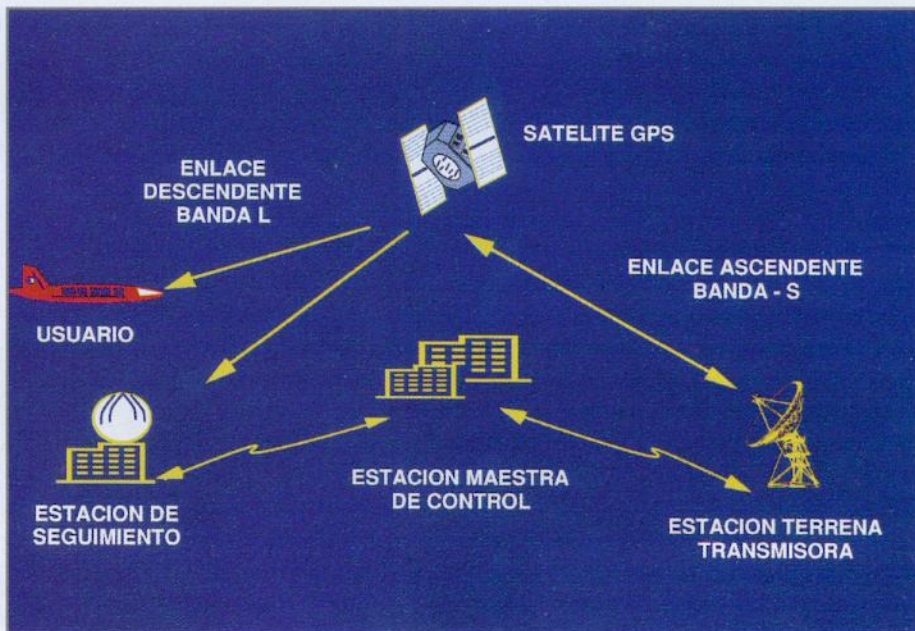


Figura 7. Segmento de control del GPS

posiciones independientes, y si éstas no coinciden, se puede deducir que uno o más satélites están proporcionando información incorrecta. Si hay seis satélites a la vista, se pueden calcular tres posiciones independientes, y el receptor puede ser capaz de identificar uno o más satélites defectuosos y excluirlos del cálculo. Otros sistemas de aumentación de a bordo que pueden ser utilizados son normalmente denominados sistemas de control de integridad autónomo de la aeronave (AAIM = Aircraft Autonomous Integrity Monitoring). El sistema de navegación inercial de la aeronave es un sistema de aumentación muy potente. Puede seguir la pista de la aeronave durante los cortos períodos en que se produzcan apantallamientos de la antena de la aeronave o durante los períodos en que el número de satélites a la vista

es inferior al mínimo requerido.

### SISTEMAS DE AUMENTACIÓN DE AREA LOCAL (LAAS).

En los sistemas de aumentación de área local (LAAS = Local Area Augmentation Systems), denominados frecuentemente sistemas diferenciales de área local, existe una estación fija de referencia instalada en las proximidades del lugar donde suceden las operaciones de precisión, normalmente un aeropuerto. Dicha estación de referencia, cuya posición es conocida con mucha exactitud, está equipada con un receptor (GPS o GLONASS) que permite determinar la posición del emplazamiento mediante satélite. La estación compara esta posición determinada mediante satélite con su posición exacta conocida, para, seguidamente, estimar el error de los satélites. Mediante un enlace de datos, normalmente VHF, la estación de referencia envía continuamente correcciones diferenciales a las aeronaves de las proximidades, que son utilizadas por el receptor de a bordo para corregir las mediciones hechas en base a los satélites y realizar una determinación de la posición más precisa. La estación de referencia envía también normalmente mensajes de

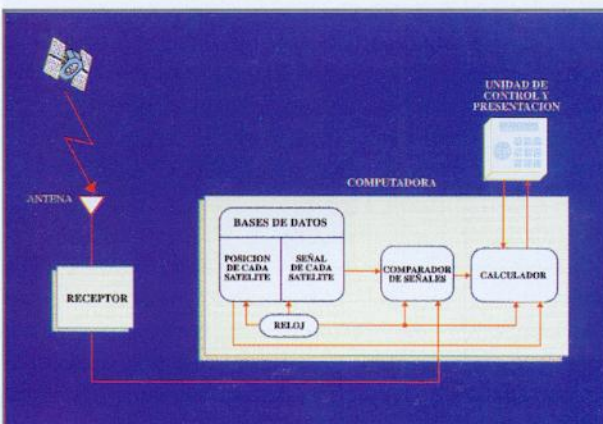


Figura 8. Receptor-calculador de a bordo

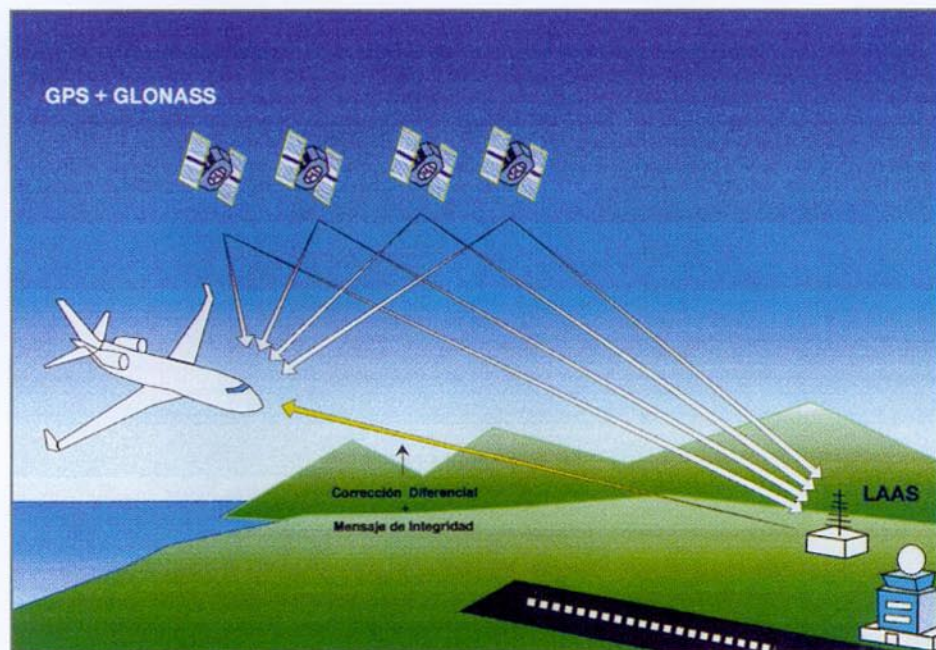


Figura 9. Sistema de aumentación de área local (LAAS) o DGPS

integridad, avisando qué satélites no deben de ser utilizados (figura 9).

Este tipo de sistema permite, por tanto, resolver el problema de integridad, así

como mejorar considerablemente la precisión. Se ha demostrado la capacidad de este sistema para soportar aproximaciones de precisión en CAT I y CAT II. Un

pequeño transmisor de baja potencia conocido como pseudolito, también situado en las cercanías del aeropuerto, en una posición bien conocida (con mucha precisión), puede suministrar a la aeronave una réplica de la señal GPS/GLONASS, incrementando así el número de satélites a la vista del receptor. Los pseudolitos pueden también proporcionar integridad, así como correcciones diferenciales. Una técnica diferencial denominada cinemática, que se apoya también en pseudolitos, ha permitido a la Universidad de Standford, USA, demostrar la viabilidad del GPS para aproximaciones CAT III.

### SISTEMA DE AUMENTACIÓN DE GRAN ÁREA (WAAS)

No sería económicamente viable instalar sistemas de aumentación del área local, con sus correspondientes enlaces de datos VHF, en todos y cada uno de los lugares donde se quisiera complementar el GPS/GLONASS.

Una solución muy efectiva es la de utilizar satélites geoestacionarios para la transmisión de la información de aumentación. En esta caso, que se conoce como sistema de aumentación de gran área (WAAS = Wide Area Augmentation System), tres satélites adecuadamente distribuidos proporcionan cobertura mundial, con excepción de las regiones polares extremas. Los cinco satélites de comunicaciones INMARSAT-3, y los dos japoneses MTSAT, que se espera entren en operación en 1996 y 1999, respectivamente, llevarán un transpondedor de navegación. Otras entidades están considerando también instalar transpondedores de navegación en satélites de oportunidad. Estos satélites proporcionarán aumentación de integridad, precisión y disponibilidad a los sistemas GPS/GLONASS, y constituirán lo que se puede considerar como los primeros bloques de construcción de un futuro GNSS completamente civil. Los transpondedores de estos satélites retransmitirán señales de navegación exactamente en la misma frecuencia L1 utilizada por el GPS. Esto implica que receptores GPS convencionales, ligeramente modificados para reconocer la señal, podrán recibir y decodificar la información que contiene. Esta información permitirá comunicar a la aeronave el estado de cada uno de los satélites GPS y GLONASS, y suministrar correcciones diferenciales que permitirán a ésta determinar su posición con mucha más precisión. Los transpondedores se comportarán, además, como si fuesen satélites GPS adicio-

## CARACTERÍSTICAS DEL GLONASS

<b>1.- Satélites (Segmento Espacial)</b>	
Constelación	24 satélites (8 sat. x 3 órbitas)
Altitud	19.100 Km.
Período	11 horas y 15 minutos
Inclinación	64.8 grados
Vida de satélite	3 años (en el futuro 5 años)
<b>2.- Estaciones Terrenas (Segmento de Control)</b>	
Estaciones Maestras de control	1
Antenas Terrenas Transmisoras	4
Estaciones de Seguimiento Laser	5
Estaciones Monitoras	3
<b>3.- Señal RF</b>	
Banda de Frecuencia	(1.602,5625 - 1.615) ± 0.5 MHz (L1)
Nivel de potencia de señal	-160 dBW (en la superficie de la Tierra)
Potencia del Enlace Radio	(39-44) dB. Hz
Polarización	Derecha -Circular
<b>4.- Precisión (SPS)</b>	
Posición	50-70 m. (prob. 99.7%)
Vertical	70m. (prob. 99.7%)
Vector velocidad	15 cm/s (prob. 99.7%)
Hora	1 micro-segundo
<b>5.- Cobertura</b>	
	Mundial
<b>6.- Capacidad (nº de usuarios)</b>	
	Ilimitada
<b>7.- Sistema de Coordenadas</b>	
	Sistema Geocéntrico Soviético 1985 (SGS85)
	Centrado en la Tierra, Fijado a la Tierra

## CARACTERÍSTICAS DEL GPS

<b>1.- Satélites (Segmento Espacial)</b>	
Constelación	24 satélites (4 sat. x 6 órbitas)
Altitud	20.200 Km.
Período	11 horas y 58 minutos
Inclinación	55 grados
Vida de satélite	7,5 años
<b>2.- Estaciones Terrenas (Segmento de Control)</b>	
Estaciones Maestras de control	1
Antenas Terrenas Transmisoras	3
Estaciones Monitoras	5
<b>3.- Señal RF</b>	
Frecuencia portadora	1575.42 MHz (L1)
Nivel de potencia de la señal	-160 dBW (en la superficie de la Tierra)
Polarización	Derecha -Circular
<b>4.- Precisión (SPS)</b>	
Posición	100 m. (prob. 95%) 300 m. (prob. 99.99%)
Horizontal	140m. (prob. 95%)
Vertical	340 ns (prob. 95%)
Hora	
<b>Precisión (PPS)</b>	
Posición	21 m. (prob. 95%)
Horizontal	29 m. (prob. 95%)
Vertical	0.2 m/s por eje (prob. 95%)
Velocidad	200 ns. (prob. 95%)
Hora	
<b>5.- Cobertura</b>	
	Mundial
<b>6.- Capacidad (nº de usuarios)</b>	
	Ilimitada
<b>7.- Sistema de Coordenadas</b>	
	Sistema Geodéntico Soviético 1984 (WGS84) Centrado en la Tierra, Fijado a la Tierra

nales, mejorando así la disponibilidad (nº de satélites a la vista del receptor).

El concepto WAAS ha sido evaluado mediante pruebas con tráfico real, llevadas a cabo en los Estados Unidos y Canadá, transmitiéndose la señal de aumentación a través del satélite INMARSAT-2, situado sobre el Océano Atlántico Oeste.

Las precisiones conseguidas excedieron (fueron mejores que) las requeridas para soportar aproximaciones CAT 1, incluso a distancias de hasta 500 millas náuticas de la estación monitora más próxima. La FAA (Federal Aviation Administration) ha sacado un

concurso para el desarrollo de un sistema WAAS. Canadá está planificando un siste-



Figura 11. Satélite de comunicaciones INMARSAT-3, que portará un transpondedor de navegación. Será utilizado por el WAAS y el EGNOS.

ma de este tipo que utilizará seis estaciones monitoras (estaciones de referencia). Europa tiene también planificado el operar un sistema de este tipo denominado EGNOS (European Global Navigation Overlay System) en el cual AENA jugará un papel muy importante. Otros países, incluidos Australia, Fiji, Italia, Japón, Nueva Zelanda, los Estados de ASECNA, Malasia, Singapur y varios países sur-centroamericanos han expresado interés por este tipo de sistema.

En el plan WAAS de los Estados Unidos, una red de unas 24 estaciones monitoras (estaciones de referencia), repartidas por todo el país, vigilarán los satélites GPS y enviarán la información a dos estaciones maestras, donde será procesada.

Estas generarán el mensaje de aumentación y lo enviarán a una estación terrena transmisora (GES) de INMARSAT para su posterior envío, a través del transpondedor de navegación del satélite, a las aeronaves.

La precisión que puede conseguirse utilizando las correcciones diferenciales dependerá de la distancia de la aeronave a la estación monitora más próxima

### ACTIVIDADES GNSS DE AENA

Además de su participación en el Comité FANS, y en el actual panel GNSSP de la OACI encargado de la estandarización, y en otros grupos de trabajo de EUROCONTROL relacionados con el GNSS, la Dirección de Sistemas e Instalaciones de Navegación Aérea de AENA hace tiempo que viene realizando importantes actividades en este área, y, en concreto, en lo relativo a los sistemas de aumentación.

AENA inició en 1993 un proyecto que comprendía una plataforma experimental construida sobre dos aviones Beachcraft C-90 equipados con receptores GPS, y una estación diferencial (LAAS) situada en el aeropuerto de Salamanca.

Se ha evaluado el sistema para su uso en las fases de ruta, aproximación y aterrizaje, actuando tanto en modo GPS exclusivo como en modo diferencial. Las performances de navegación se han comparado con las de un MLS, también instalado en el mismo aeropuerto.

Por otra parte, AENA está también negociando su participación, muy significativa por cierto, en el programa EGNOS mencionado anteriormente.

DAVID DIEZ FERNANDEZ