

## Navegación por satélite

LUIS MESON

Coronel de Aviación

Ex Representante de España en el Consejo de la (OACI)

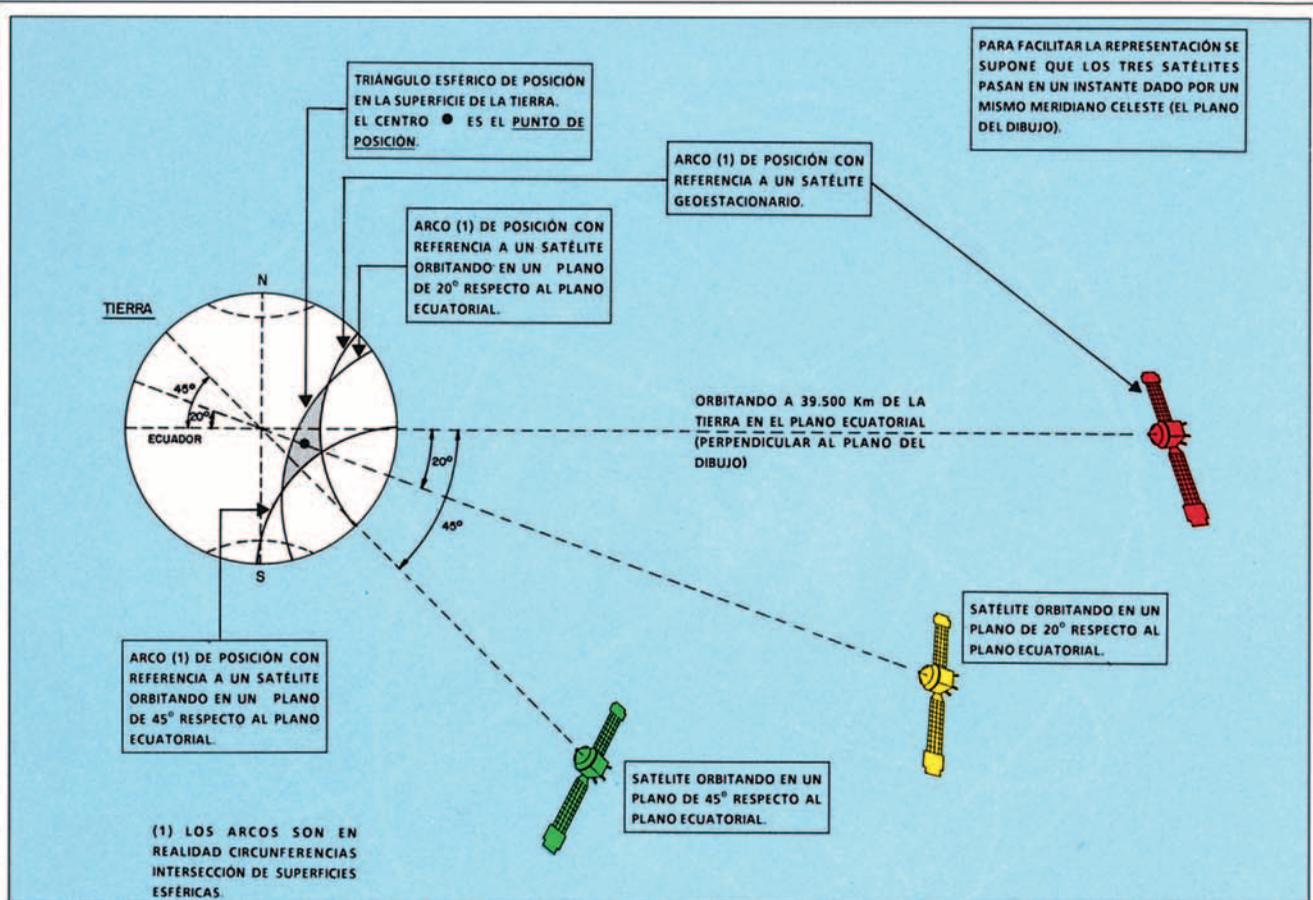
*La Tierra está explorada hasta los últimos rincones.  
Ya no puede prometer nuevos continentes ni tierras perdidas.  
Pero la Tecnología moderna nos permitirá descubrir y habitar  
regiones más remotas y aventurarnos en el espacio lejano. Cart Sagan (Cosmos)*

### GENERALIDADES

El concepto de navegar nace con el hombre, cuando abandona la caverna y se desplaza en busca de nuevos medios de vida y subsistencia; es muy posible que en los albores de la humanidad, el hombre instintivamente se orientase tomando como referencia los accidentes del terreno, o simplemente observando la trayectoria del sol.

Más tarde, milenios después, el hombre se aventura a adentrarse en el mar que tenía como límite, pero sin perder de vista la costa que constantemente le servía de referencia... y de refugio; los navegantes polinesios y fenicios ya se situaban por las estrellas, el sol y la luna.

Dando un paso de gigante en la historia de la Humanidad, nos encontramos en el siglo XII cuando aparece la brújula en su forma más rudimentaria,



Cuadro 1. Determinación Teórica de la posición de un móvil en la superficie de la Tierra mediante tres satélites

con la cual el hombre podía saber "hacia dónde iba" pero *no* podía saber con exactitud "en dónde estaba". Era necesario medir el tiempo y la lenta velocidad de desplazamiento, para poder situarse con grandes errores, que, a decir verdad, influían poco en sus exigencias de vida.

Amanece el siglo XX y el *avión* como medio de transporte y de guerra, revoluciona los procedimientos de navegación existentes, aunque en sus comienzos utilizase los mismos principios del hombre prehistórico: La observación de los accidentes del terreno sobre el que volaba. Pero el vertiginoso desarrollo de la aviación exigía más... mucho más.

Se empezó a navegar a la estima, tomando como base la utilización del reloj (tiempo-velocidad) y de la brújula (rumbo); pero de todos modos era necesario observar el terreno (o superficie) sobre el que se volase a fin de determinar la deriva y calcular la dirección e intensidad del viento en altura, y en función de ello, hallar la velocidad sobre el suelo y la corrección de deriva.

La navegación astronómica, aplicada a la navegación aérea, fue un paso muy importante en la evolución del arte de navegar, pero gracias a los avances de la técnica, nacieron las ayudas radioeléctricas, de inestimable valor en los sistemas actuales de navegación y aterrizaje.

Lo anteriormente expuesto es una simple introducción y no vamos a entrar en detalles sobre los sistemas NDB, VOR/DME, ILS, MLS, o sistemas Hiperbólicos (LORAN), porque nos saldríamos de los límites de este trabajo, en el cual nos vamos a detener solamente en los sistemas de navegación mediante la utilización de satélites artificiales, y más concretamente, en los sistemas que hoy día están en pleno desarrollo o en proceso de experimentación y utilización.

Antes de entrar en la descripción de los mismos, es conveniente recordar que los principios operativos de la navegación por satélite, son semejantes a los utilizados en la navegación astronómica, variando tan sólo los medios y los procedimientos para conseguir un mismo fin: HALLAR LA POSICION DEL MOVIL.

En la navegación astronómica se medían los ángulos con que eran observados los astros cuya posición en la esfera celeste era conocida y se encontraba perfectamente determinada en las Tablas Astronómicas. En la navegación por satélite, se miden DISTANCIAS a que se encuentran los satélites cuya posición es perfectamente conocida. (Cuadro 1). En este sistema, el móvil halla su posición en un espacio tridimensional, con las ventajas que de ello se derivan (comunicaciones, navegación, vigilancia,

aproximación, e incluso, aterrizaje).

Quizás un esquema ilustre mejor el concepto:

Supongamos que en un momento dado, un móvil conoce la posición exacta de un satélite (S-1) y mide la distancia que le separa del mismo (D-1). Es evidente que estará situado en el lugar geométrico de los puntos que en el espacio equidistante (D-1), del satélite; puntos contenidos en la superficie esférica (E-1) cuyo centro es el satélite y el radio es la distancia medida. (Figura 1).

Sigamos el mismo proceso con otro satélite (S-2), cuya distancia (D-2), determinará otra esfera (E-2), cuya superficie cortará a la primera según una circunferencia\*, en cuyos puntos PUEDE estar el móvil. (Figura 2)

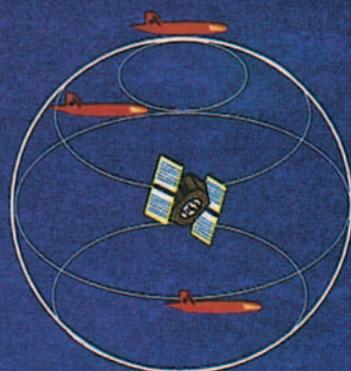
Repetiendo (o simultaneando) la misma operación con un tercer satélite (S-3), obtendremos otro lugar geométrico cuya intersección con los otros dos satélites nos determinará DOS puntos posibles de posición en el espacio tridimensional.

Uno de estos puntos lo eliminaremos por absurdo en función de nuestra posición anterior; o bien se utilizará un cuarto satélite (S-4) (que no se representa por dificultad de dibujo), el cual resolverá la indeterminación y comprobará la exactitud del resultado obtenido. Para que todo el sistema funcione es imprescindible la utilización de relojes atómicos perfectamente sincronizados (móvil-satélite), ya que las distancias (D), se hallan en función de las diferencias de tiempos. Por lo tanto, por ser la velocidad de desplazamiento de las ondas electromagnéticas igual a  $3 \times 10^8$  km/segundo, la inexactitud de un solo segundo produciría errores de... ¡¡300.000 kilómetros!! (Cuadro 2).

La navegación por satélite, no excluye la utilización de otros sistemas, principalmente el inercial

\* Es un error conceptual, considerar un CIRCULO como lugar geométrico de los puntos intersección de DOS SUPERFICIES esféricas, error que se desliza con frecuencia en diversas publicaciones.

## DETERMINACION DE LA POSICION



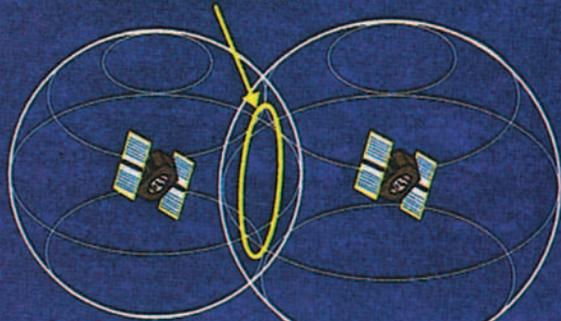
El avión está en alguna parte de la superficie de esta esfera

Posicionamiento con 1 Satélite

Fig. 1

## DETERMINACION DE LA POSICION

El avión está en alguna parte de esta circunferencia

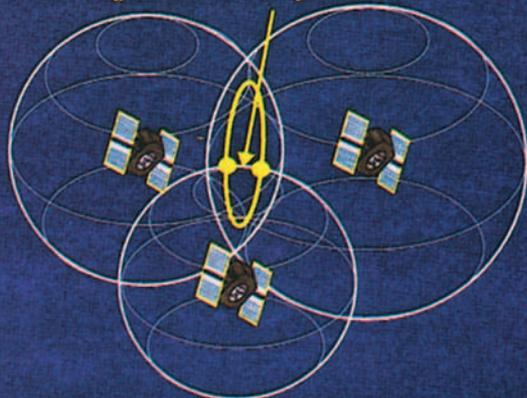


Posicionamiento con 2 Satélites

Fig. 2

## DETERMINACION DE LA POSICION

El avión se encuentra en alguno de estos dos puntos



Posicionamiento con 3 Satélites

Fig. 3

(INS), hoy en uso, cuyas características no vamos a mencionar por estar fuera del marco de este trabajo.

Después de este pequeño comentario de carácter general, vamos a describir someramente los DOS sistemas principales que en la actualidad utilizan satélites artificiales como elementos básicos de referencia. Antes de entrar en esta materia debemos recordar que a principios de 1960 los EE.UU. lanzaron una serie de satélites denominados TRANSIT, con el fin de establecer un sistema mundial de navegación marítima. Estos satélites tenían una órbita polar a unos mil kilómetros de altura con un período de 90 minutos. El sistema se abandonó, o cayó en desuso, porque estaba basado en el efecto DOPPLER, en el cual, como es sabido, una pequeña incertidumbre en la velocidad real del móvil, introduce grandes errores en la posición. Es evidente que en aviación no tenía aplicación alguna.

El final de la década de los años 70 marca un hito en la historia de la navegación, al poner en órbita satélites destinados a este fin. Es el nacimiento de los sistemas mundiales de NAVEGACION POR SATELITE, entre los cuales nos referimos a los dos más avanzados: el GLONASS, desarrollado por la URSS, y el GPS (Sistema de posición global), desarrollado por los EE.UU.

Ambos sistemas, con una adecuada configuración orbital, proporcionan una cobertura integral en todo el planeta con características capaces de satisfacer las exigencias de la aviación civil y militar. La técnica en que se basan estos sistemas es distinta e independiente del efecto "Doppler" al que antes nos hemos referido, y consiste en medir con la máxima

**Cuadro 2. RELOJ ATOMICO**

El reloj atómico es un instrumento que utiliza la frecuencia de resonancia de los átomos, para medir el tiempo con extraordinaria exactitud. Su comportamiento se regula mediante la medida de las radiaciones electromagnéticas emitidas o absorbidas por un cambio de energía mínimo (quantum) de un átomo.

El reloj atómico de Cesio-133 es el más exacto que hasta ahora se conoce y sirvió de base para que en 1967, la 13 Conferencia Internacional del Instituto de Pesas y Medidas volviese a definir la unidad de Tiempo, *el segundo*, como: "la duración de 9.192.631.770 períodos, de la radiación correspondiente a la transición de dos niveles hiperfines del estado fundamental del átomo de CESIO-133".

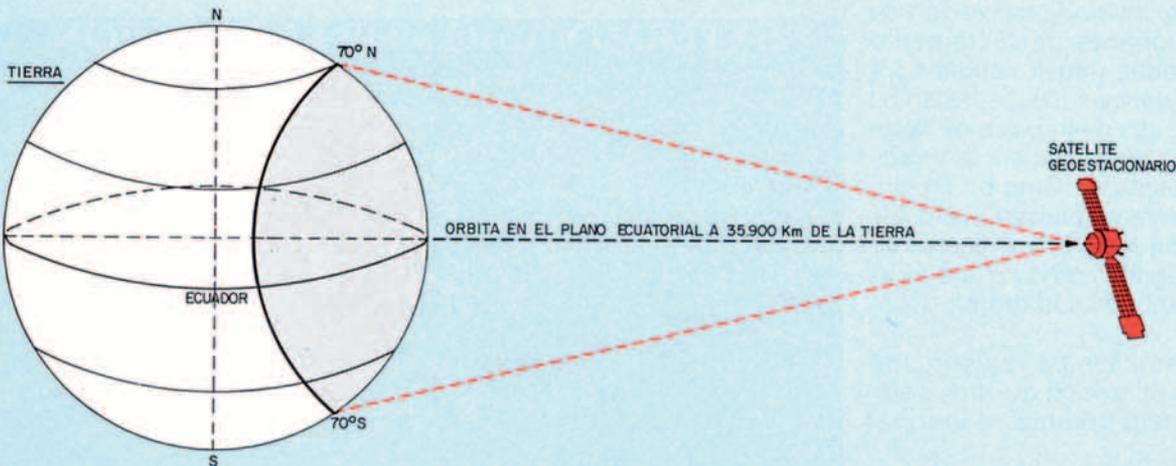
Un reloj atómico de este tipo, puede cometer errores del orden de 1/1013 de segundo; lo que significa que una variación de *un segundo* podría tener lugar al transcurrir ... ¡317. Mil años!

exactitud la *distancia* (tiempo) existente entre el móvil y el satélite cuya posición relativa se conoce en todo momento. Esto es: se trata de determinar las coordenadas de posición y la altura, así como otros componentes, entre los que se encuentra el vector velocidad.

Los dos sistemas son independientes de las condiciones meteorológicas y de la altitud a que vuela la aeronave y el grado de precisión es muy similar: del orden de 100 m en las coordenadas de posición y de 150 m en altitud.

La exactitud en la medida de la distancia (en función del tiempo) aeronave-satélite, es tan fundamental, que un error de 0,01 de segundo, supone

**Cuadro 3 COBERTURA CON UN SATELITE GEOESTACIONARIO**



- PARA UNA COBERTURA TOTAL DE LA TIERRA ENTRE LOS 70°N Y LOS 70°S SON NECESARIOS TRES Y CONVENIENTES CUATRO SATELITES SOLAPADOS GEOESTACIONARIOS
- PUEDE OBSERVARSE QUE LAS ZONAS POLARES NECESITAN SATELITES ORBITANDO EN PLANOS DISTINTOS AL PLANO ECUATORIAL.

un error de posición de 3.000 km, como antes se mencionó. (Cuadro 3 y 4).

No obstante lo expuesto, los sistemas citados tienen ciertas características diferentes. El GPS\* utiliza una constelación de 21 satélites, más 3 de repuesto, situados en órbitas circulares en seis planos, con una inclinación de 55 grados respecto al plano ecuatorial y un período de 12 horas a una altitud de 19.600 km. El GLONASS utiliza una constelación de 24 satélites más 3 de repuesto, orbitando en tres planos con una inclinación de 64 grados a una altitud de 11.000 km y un período de rotación de 11 horas y 15 minutos. El conjunto de cada sistema se completa con estaciones terrestres situadas en diversas partes del mundo, las cuales tienen diferentes cometidos.

Quizás la diferencia más significativa entre el GLONASS y el GPS, la cual podría ser un obstáculo para su utilización conjunta, es el sistema de transmisión de señales de navegación y las bandas utilizadas. Pero el tema de las comunicaciones es motivo de otro trabajo en este mismo Dossier y por ello, deliberadamente, omitimos toda consideración a este respecto.

Volviendo al tema de las órbitas cabe señalar que con el enjambre de satélites que se menciona anteriormente, se encontrarán sobre el horizonte entre 4 y 7, por cada sistema, proporcionando una cobertura TOTAL de la superficie de la Tierra.

La conveniencia de cambiar los DOS sistemas expuestos fue motivo de consideración y análisis por parte del Comité FANS, el cual en el Informe de su cuarta Reunión, que presentó al Consejo de la OACI, señaló que con ello se cumplirían los requisitos operacionales de la aviación civil y militar y se podría alcanzar el concepto de capacidad requerida de performance de navegación (RNPC). El ideal sería llegar algún día a disponer de un sistema único de navegación por satélite.

Aunque hemos centrado nuestra atención en los sistemas GLONASS y GPS, también están en estudio, y algunos en desarrollo, otros sistemas de navegación por satélite, como el GEOSTAR, LOCSTAR, GEO-HEO, en los cuales no nos detendremos por ser variantes, más o menos, sobre el mismo tema. Es evidente que sea el que fuere el o los sistemas empleados, se debe tender a que el equipo de la aeronave posea una gran interfuncionalidad en su aviónica, y a tal efecto, expertos de la URSS y de EE.UU. han acordado llevar a cabo una serie de trabajos conjuntos con el fin primordial de diseñar un modelo de aviónica común, que aparte de otras ventajas operativas, reportará un gran beneficio económico. Y decimos ventajas operativas, puesto que es indiscutible la posibilidad de alcanzar una más exacta precisión al poder seleccionar el mayor

\* Nota del autor.- Este sistema ha sido tratado extensamente en la Revista Aeronáutica nº 607, siendo su autor el Capitán de Aviación José Toledano

#### Cuadro 4. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE ORBITAS

##### Órbitas circulares inclinadas

Este tipo de sistema se sirve de una serie de satélites (GPS-24; GLONASS-24) distribuidos simétricamente en varios planos orbitales. En estos sistemas se explota la posibilidad de predecir las características de las órbitas de los satélites.

##### Órbitas geoestacionarias

Los sistemas de satélites basados en configuraciones de órbita geoestacionaria pueden proporcionar servicios regionales de navegación y de determinación de posición con un pequeño número de satélites (un mínimo de dos). Puede lograrse "cobertura mundial" con un número suficiente de satélites convenientemente emplazados alrededor del Ecuador. Los satélites están a una altitud aproximada de 37.000 km pero, puesto que a grandes latitudes el ángulo de elevación del satélite es pequeño, no es posible proporcionar cobertura para latitudes por encima de unos 70°. La precisión disminuye notablemente en el Ecuador y cerca del Ecuador como consecuencia de la desventajosa configuración geométrica de satélite/usuario.

##### Órbitas inclinadas extremadamente excéntricas

Los satélites en órbitas inclinadas de gran excentricidad (HEO) tienen, desde el punto de vista del usuario, una velocidad relativamente baja (variación de la posición) cerca del apogeo y si esto se acopla a la velocidad rotacional de la tierra, parecerá que los satélites son casi estacionarios en una determinada zona geográfica durante una parte importante de su período orbital ("permanencia en el apogeo"). Aunque se prevé que los conceptos puramente HEO se apliquen primariamente para fines de comunicaciones, podrían también aplicarse a la navegación.

##### Sistemas híbridos

Los sistemas híbridos de navegación por satélite pueden comprender una mezcla de satélites geoestacionarios y satélites HEO. Una de las principales ventajas aducidas en favor de tales sistemas es que pueden proporcionarse servicios a una región seleccionada con un número relativamente pequeño de satélites y que, por consiguiente, se prestan a un desarrollo progresivo e incluso hasta proporcionar cobertura mundial. Por ejemplo, dos satélites geoestacionarios estratégicamente situados y dos o más satélites HEO podrían cubrir la región del Atlántico septentrional y más tarde podrían ponerse en órbita otros dos satélites geoestacionarios para dar cobertura total al Pacífico septentrional.

número de satélites que más favorezcan las mediciones en función de su posición relativa respecto a la aeronave.

Por lo tanto, conseguir la integración de los dos sistemas más avanzados, el GLONASS y el GPS, es de vital importancia para el futuro de la aviación y permitirá ampliar el marco de su empleo, incluyendo las maniobras de aproximación e incluso de aterrizaje, en aquellos aeródromos en donde no se dispongan de otras ayudas de precisión, como el ILS y el MLS.

## ASPECTO CARTOGRAFICO

Hasta ahora hemos hablado de satélites, de sus órbitas y de puntos de posición, identificados normalmente por sus coordenadas respecto a la Tierra. Es evidente que la breve reseña expuesta está incompleta. Somos conscientes que faltan por tratar muchos aspectos conexos, primordialmente los que se refieren a las comunicaciones y vigilancia, los cuales serán motivo de otros trabajos monográficos en este mismo Dossier. Pero sería un error no señalar algo que estaba más o menos resuelto en los sistemas actuales de navegación: La representación de toda o una parte de la superficie de la Tierra en una Carta o Mapa. Hasta ahora el problema estaba en representar en un plano una superficie esférica, lo cual, como es sabido, es matemáticamente imposible. Los cartógrafos resolvieron el problema mediante representaciones modificadas en las que

se sacrificaban valores básicos como áreas, ángulos, superficies o distancias, construyendo mapas adecuados a los fines a que se destinasen. El navegante sabía cómo compensar los errores de los mapas o cartas a la hora de determinar su posición. No es nuestra intención hacer consideraciones sobre este tema cartográfico, pero sí queremos señalar que otro de los errores pocas veces mencionado es el tomar como referencia matemática un elipsoide de revolución cuando en realidad la tierra es un geode de forma muy específica.

La navegación por satélite exigirá nuevas fórmulas para resolver los problemas cartográficos inherentes a la necesidad de tomar el centro de la Tierra como referencia para su representación, ya que las coordenadas de posición en la cartografía actual no coincidirán exactamente con las coordenadas que se determinen mediante la utilización de satélites. (Cuadro 5).

En consecuencia: La conversión de las coordena-

**Cuadro 5. REFERENCIAS GEODESICAS Y SISTEMAS DE NAVEGACION**

Las coordenadas de latitud y longitud que normalmente se han utilizado y se utilizan, en las cartas aeronáuticas, se determinan mediante cálculos, a veces empíricos, de modelos matemáticos de referencia. Estos modelos tratan de "planificar" una superficie esférica correspondiente a una zona determinada de la tierra. Este sistema de referencia geodésico, no satisface las exigencias de la navegación inercial (INS) ni de la navegación por satélite, en los cuales la referencia es el centro de la tierra (referencia geocéntrica), o "Sistema Geodésico Mundial" (WGS-84).

Si bien las diferencias pueden no ser sustanciales en la navegación en ruta, podrían repercutir gravemente en la seguridad de la navegación en las áreas terminales o en maniobras de aterrizaje. Por ello, la OACI adoptó la recomendación del Comité FANS, que presentada en su IV reunión dice lo siguiente:

Recomendación 3,2/1-Adopción de la referencia WGS-84 "Que la OACI adopte, como norma, el sistema de referencia geodésico (WGS-84) y que elabore textos adecuados de la OACI, particularmente para los Anexos 4 y 15, con el fin de asegurar una implantación rápida y completa del sistema WGS-84 de referencia geodésica".

Las diferencias con los sistemas locales hasta ahora empleados, se reflejan en la siguiente tabla, con puntos elegidos aleatoriamente:

### Implantación y transición

Para poner en práctica la adopción de esta referencia normalizada, el Comité propone que todos los datos de navegación aeronáutica publicados estén en armonía con el WGS-84. Con este enfoque no sería necesario incorporar correcciones de soporte lógico a todos los sistemas RNAV de a bordo y podría procederse a la implantación por fases:

a) Corrección de los datos actualmente en función de sistema seleccionado de coordenadas, a base de procedimientos convencionales de cambio de coordenadas, después de que se hubieran corregido errores de posición conocidos mediante la calibración de errores de posición entre puntos de referencia cercanos;

b) Cuando para un punto de referencia se cuente con datos originales de levantamientos topográficos se corrige la referencia mediante un nuevo cálculo de la posición, a partir de la posición corregida de referencia; y

c) A medida que se definan los procedimientos RNAV se efectúa una calibración de los puntos necesarios de los campos de aviación y de las ayudas terrestres de navegación, mediante sistemas de calibración de precisión.

Para la mayoría de los datos de las publicaciones de información aeronáutica (AIP) solamente se necesitaría desde un principio efectuar la fase a), probablemente la fase b) sería solamente necesaria en caso de que en la triangulación se hubieran cometido errores importantes. Progresivamente sería necesario realizar la fase c) a medida que se definan procedimientos de aproximación RNAV.

**Diferencia de valores si se pasa de las coordenadas geodésicas locales a las coordenadas del WGS**

Lugar	Latitud	Longitud
Tokio (Narita)	+ 11,3 segundos	-11,6 segundos
Melbourne (Melbourne Int'l)	- 5,5 segundos	+ 4,5 segundos
Francfort (Frankfurt Int'l)	- 2,9 segundos	- 4,1 segundos
Johannesburg (Jan Smuts)	+ 1,9 segundos	- 1,0 segundos
Estados Unidos (General)*	< ± 1,5 segundos	< ± 2,5 segundos

En consecuencia: La conversión de las coordenadas de longitud y latitud de un sistema de referencia geodésico a otro geocéntrico, será indispensable para lograr una mayor exactitud en la navegación aérea; y esto es ya una realidad. A este respecto en el informe de la IV Reunión del Comité FANS, se presentó la Resolución 3.1/2 proponiendo la utilización del sistema WGS-84, Resolución que fue adoptada por el Consejo de la OACI en marzo de 1989, disponiendo que las *normas* y los *Métodos* recomendados pertinentes, debieran de estar dispuestos para ser incluidos en el Anexo 15 (Servicio de información aeronáutica) en el año 1994; y en el Anexo 4 (Cartas aeronáuticas), en 1995. A partir de estas fechas el uso del sistema cartográfico con referencia geocéntrica quedará unificado y de obligatoria utilización en todos los países que forman la *comunidad aeronáutica internacional*.

### ASPECTO ECONOMICO

Es sabido que entre lo deseable y lo posible, a veces se abre un abismo difícil de superar. Y aquí surge una pregunta ¿Podrán los estados enfrentarse a las cuantiosas inversiones necesarias para hacer realidad los nuevos sistemas...?

Para contestar a esta pregunta, el Comité FANS hizo un estudio *coste/beneficio* basado en dos objetivos principales:

a) Calcular los beneficios previstos con la utilización de los nuevos sistemas y compararlos con el coste de fabricación, instalación y mantenimiento de los elementos que los integran.

b) Asegurar mediante un detallado análisis, que si un nuevo sistema ofrece grandes ventajas para una determinada zona geoeconómica, *no* incide negativamente en otra.

Para llevar a cabo este estudio se elaboró un método de valoración definiendo escenarios geográficos específicos, unos con gran densidad de tráfico y otros con marcada escasez del mismo. El análisis de los *costes* comprendía tres elementos principales:

- Sistemas de satélites.
- Sistemas terrestres.
- Equipo de aviónica.

Sería prolijo detallar cómo se realizaron los estudios de forma exhaustiva en los diferentes escenarios, mediante procesos de simulación de ambientes, máximos y mínimos de operaciones diversas en los diferentes conceptos valiéndose de modernas técnicas de investigación operativa. El lector que esté interesado en este importante tema, puede consultar el Informe de la IV Reunión del Comité FANS (Documento 9.524 de la OACI) donde en su Apartado 4, se encuentra una interesante y detallada exposición sobre esta materia.

Como síntesis es suficiente señalar los parámetros utilizados para mejor comprender las dificultades

### Cuadro 6 PRINCIPIOS RECTORES A LOS ASPECTOS INSTITUCIONALES Y JURIDICOS DE LOS SISTEMAS DE NAVEGACION AEREA DEL FUTURO

1. No debe comprometerse la soberanía territorial de los Estados ni sus derechos y responsabilidades en materia de control de las operaciones de aeronaves y en materia de cumplimiento de los reglamentos de seguridad en su territorio.
2. Los sistemas CNS deben ser accesibles a todos los Estados sin discriminación.
3. Los arreglos en materia CNS/ATM deben preservar la función normativa que incumbe a la OACI en relación con la adopción de las normas y métodos recomendados.
4. Los proveedores de servicios CNS deberían cumplir con las normas pertinentes de la OACI y con los requisitos adicionales que estipulen los Estados usuarios.
5. Debe continuar reconociéndose la responsabilidad que incumbe a la OACI en cuanto a la coordinación y al uso de las atribuciones de espectro para el servicio móvil aeronáutico por satélite (R) (SMAS(R)).
6. La prestación de servicios para los sistemas CNS debería estar abierta al concurso de todos los proveedores que cumplan con las normas de la OACI.
7. Siempre que sea posible, deberían conservarse los arreglos institucionales y la reglamentación jurídica existentes.

Nota.- Los principios antedichos fueron preparados y presentados por la Secretaría de la OACI a la 10ª Conferencia de navegación aérea (1991).

#### Recomendación 4/2.- Actividades relacionadas con los aspectos institucionales y jurídicos del sistema de navegación aérea del futuro.

Que:

- a) la OACI debería acelerar la labor del Comité Jurídico sobre los siguientes temas: "Aspectos institucionales y jurídicos de los sistemas de navegación aérea del futuro", en la medida necesaria para lograr la implantación del concepto FANS, y "Aspectos jurídicos de las comunicaciones aeroterrestres mundiales"; y
- b) todos los Estados contratantes deberían prepararse y participar activamente en los estudios del Comité Jurídico. Se considera conveniente que el Comité Jurídico finalice sus tareas con tiempo suficiente para que puedan ser examinadas por la 29ª Asamblea.

des y naturaleza de este estudio:

- a) Capital necesario y coste de los nuevos sistemas.
- b) Depreciación de los satélites en un período de diez años.
- c) Depreciación de otros componentes en un período de veinte años.
- d) Coste de mantenimiento, suponiendo que la restitución de los satélites fuera equivalente a un coste/año del 10% del capital *mas* la depreciación correspondiente.

En resumen podemos decir que según el análisis