SISTEMAS

ELECTRÓNICOS

DE NAVEGACIÓN

ÍNDICE

CAPÍTULO I: PRINCIPIOS DE RADIONAVEGACIÓN. PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Introducción (101).
Historia (102).
Clasificación de los equipos de Navegación Electrónica (103).
Ventajas e inconvenientes (104).
Propagación de las ondas electromagnéticas (105).
Características (106).
Efectos atmosféricos (107).
Estructura de la atmósfera (108).
Modos de propagación (109).
Modos de propagación en función de la frecuencia de emisión y la distancia (110).

CAPÍTULO II: PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Radiogoniometría. Introducción (201).
Tipos de Radioayudas (202).
Radiodemora en la Carta Mercatoriana (203).
Convergencia de meridianos (204).
Semiconvergencia o corrección Givry (205).
Línea Isoazimutal (206).
Trazado de la línea de posición en la Carta Mercatoriana (207).
Radiogoniómetros (208).
Forma de tomar una Radiodemora (209).
El Radar (210).
Diagrama de bloques (211).
Parámetros de un Radar (212).
Pantallas PPI (213).
Limitaciones Radar (214).
Circuitos especiales del Radar (215).
Rádares anticolisión (216).
Sistema ARPA (217).
Ayudas Radar a la navegación (218).
Ayudas pasivas (219).
Ayudas activas (220).
RAMARK (Radar mark) (221).

RACON (Radar beacon) (222).
Estaciones Radar en tierra (223).

CAPÍTULO III: SISTEMAS DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE. GPS.

Introducción (301).
Nociones de geodesia: geoide y elipsoide (302).
Leyes de Kepler (303).
Órbitas y sus parámetros (304).
Sistemas de referencia (305).
Coordenadas GEOREFF, WGS-84 y ED-50. Transformaciones entre ellas (306).
Mensajes de navegación (307).
Métodos de seguimiento de un satélite (308).
El GPS: historia, fases de su desarrollo y diferentes segmentos (309).
El tiempo GPS (310).
Estructura de la señal emitida. Observables (311).
Mensaje de navegación (NAV DATA) (312).
Receptores GPS (313).
Sistemas de posicionamiento (314).
Errores sistemáticos y aleatorios presentes en las observaciones GPS (315).
Dilución de la precisión (DOP) (316).
El GPS diferencial (DGPS) (317).
Estructura y precisión del DGPS (318).
Mensaje de correcciones diferenciales (319).

CAPÍTULO IV: INTRODUCCIÓN A LA NAVEGACIÓN INERCIAL

Introducción (401).
Principio básico de la navegación inercial (402).
Movimientos inerciales (403).
La plataforma estable (404).
Sistemas de coordenadas (405).
Precisión de la navegación inercial (406).
Ventajas de la navegación inercial (407).
Sistema de sonar Doppler (408).

CAPÍTULO V: AYUDAS ELECTRÓNICAS A LA NAVEGACIÓN AÉREA

Introducción (501).
Descripción de las ayudas (502).
Sistemas de corto alcance (503).
Sistemas de larga distancia (504).
Sistemas de aproximación y aterrizaje (505).
El ILS (Instrumental Landing System) (506).
El MLS (Microwave Landing System) (507).
Aproximación de precisión. El GCA (Ground Controlled Approach) (508)
El vuelo instrumental (509).
El espacio aéreo (510).

Vuelo visual y vuelo instrumental (511).
Preparación del vuelo (512).

CAPÍTULO I

PRINCIPIOS DE RADIONAVEGACIÓN. PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Introducción (101).
Historia (102).
Clasificación de los equipos de Navegación Electrónica (103).
Ventajas e inconvenientes (104).
Propagación de las ondas electromagnéticas (105).
Características (106).
Efectos atmosféricos (107).
Estructura de la atmósfera (108).
Modos de propagación (109).
Modos de propagación en función de la frecuencia de emisión y la distancia (110).

INTRODUCCIÓN (101).

Desde siempre se conocen los problemas que los sistemas tradicionales de navegación astronómica tienen para situarse en la mar. El exacto conocimiento del tiempo, la dependencia de los factores meteorológicos, la falta de continuidad en la obtención de una situación precisa, y los engorrosos cálculos, han sido importantes limitaciones.

En un intento por resolver o al menos disminuir estas limitaciones surgieron, con la invención de la radio, las primeras ayudas electrónicas a la navegación.

Desde entonces el avance ha sido continuo, motivado en gran parte por los requisitos cada vez más exigentes de los modernos sistemas de armas.

La **Radionavegación** tiene por objeto el aprovechamiento de las características de las emisiones radioeléctricas para obtener cualquier dato que sea útil para la navegación.

Esta definición, que parece tan simple, encierra un muy amplio abanico de medios que pueden proporcionar al navegante información de muy diferentes tipos: señales horarias, partes y predicciones meteorológicas, datos sobre tráfico marítimo, avisos radiados a los navegantes, datos sobre el buque propio (velocidad, rumbo y posición) y sobre otros buques próximos.

La Radionavegación, que debemos incluirla en un concepto más amplio conocido como **navegación electrónica**, viene a completar y no a sustituir los conocimientos, ya adquiridos, de navegación de estima, costera y astronómica, colaborando a un manejo más racional y seguro del barco y las armas que monta.

HISTORIA (102).

Desde el año 1887 en que Heinrick Hertz demostró la existencia de ondas electromagnéticas capaces de transmitir energía a través del éter, y en 1896 en que Marconi transmitió el primer radiotelegrama, los avances en radionavegación han sido constantes.

El primer equipo que cumple los objetivos de la radionavegación es el propio invento de Marconi, un receptor radio instalado a bordo capaz de recibir inicialmente radiotelegrama en los que se informa del tráfico portuario, situación meteorológica, operaciones marítimas en tiempo de guerra que impliquen peligro para el tráfico mercante, etc. A partir de aquí, y con la instalación en tierra de estaciones emisoras que radian, de forma continua o programada, información de muy diverso contenido, es fácil imaginar el gran avance que supone en los inicios de la radionavegación: emisiones de señales horarias que facilitan los cálculos astronómicos, partes meteorológicos, avisos radiados a los navegantes, control de tráfico marítimo, etc.

Los equipos radioemisores y radiorreceptores se fueron mejorando, disminuyendo su coste y tamaño, y haciéndolos más potentes, lo que crea la necesidad de conocer con mayor profundidad las características de propagación de las ondas; de estos estudios y de una serie de necesidades militares, surge en la 1ª Guerra Mundial los equipos radiobuscadores de dirección o radiogoniómetros, equipos radiorreceptores normales que incorporan una antena direccional mediante la cual se puede obtener la marcación o demora en la que se recibe un máximo de señal de una estación radioemisora, que aplicado a la navegación permite disponer de una línea de posición, demora trazada desde una estación cuyas coordenadas y modo de emisión se conoce, o de la situación del barco si las estaciones gonio están situadas en tierra y son ellas las que marcan simultáneamente, previa emisión de una señal por parte del barco.

Los mismos estudios de propagación de las ondas, y algunas ideas ya expresadas en su día por Marconi, permiten, antes de la 2ª Guerra Mundial, iniciar el desarrollo de los equipos RADAR, cuyo principio básico se asienta en los efectos de la reflexión de las ondas, se mide así el tiempo que tarda un frente de ondas en ir y volver desde el emisor hasta un obstáculo (superficie reflectora) para obtener una distancia y con ello una línea de posición, esta vez circular.

La 2ª Guerra Mundial fue el gran banco de pruebas de nuevos sistemas de radionavegación. Gran Bretaña desarrolló el sistema denominado GEE, precursor del DECCA, consistente en tres estaciones sincronizadas que emitían ciertas señales en un orden preestablecido, midiendo la diferencia de tiempos en la recepción de las señales se obtiene una diferencia de distancias, y con ello una línea de posición, ahora una hipérbola. Estados Unidos desarrolló, casi simultáneamente, un equipo similar, el LORAN A. Al finalizar la guerra estos sistemas pasaron a ser de uso público, y fueron aprobados por la Conferencia Internacional de La Haya, potenciándose la investigación en ese terreno, así van surgiendo ayudas como las radiobalizas RAMARK y RACON, el sistema DECCA, el LORAN C; y finalmente el sistema OMEGA, primero en ofrecer cobertura mundial, desarrollado conjuntamente por Británicos y Norteamericanos, contando con ocho estaciones y con emisiones en la banda VLF. Este sistema ha sido uno de los más importantes hasta el 30 de Septiembre de 1997 en que dejó de prestar servicio.

Por último, en 1957 y a raíz del lanzamiento del primer satélite artificial, el SPUTNIK, comienza el desarrollo de los sistemas de radionavegación por satélite, basándose en la

determinación de un punto terrestre mediante medidas Doppler, supuesta conocida la órbita del satélite. El primero fue el TRANSIT, en servicio desde 1964 para la Armada de los Estados Unidos, constituyendo un excelente banco de pruebas, y de los resultados obtenidos nació el sistema GPS, que mejora sustancialmente a su predecesor, ofreciendo, con 24 satélites, cobertura mundial continua en tres dimensiones, en cualquier condición meteorológica, con unos niveles de exactitud realmente inimaginables a finales de los años 80.

CLASIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS DE NAVEGACIÓN ELECTRÓNICA (103).

Los sistemas de radionavegación se caracterizan con relación a sus transmisiones por la radiofrecuencia de la onda portadora, la potencia y el tipo de señal, igualmente también se caracterizan por como son analizadas sus señales al ser recibidas, por la naturaleza de las líneas de posición que ellas proporcionan, su alcance o zona de cobertura, su disponibilidad para el usuario, su exactitud, etc. Cada una de estas características da lugar a una posible clasificación de los equipos:

1. Dependiendo de que requieran el uso de una señal de transmisión por parte del utilizador o no: **activos** y **pasivos**.

2. En función de la naturaleza de las líneas de posición proporcionadas:

   Direccionales: Proporcionan una demora. En general todos los equipos radiogoniómetricos son de este tipo.

   Circulares: Tienen diferentes procedimientos para medir la distancia. Ejemplos de estos son el RADAR. El GPS y el TACAN.

3. Con relación a la cobertura que dan:

   De **corta distancia** o de **navegación costera o recalada:** Si su capacidad de posicionamiento está limitada a regiones costeras o para zonas de recaladas. Se incluyen aquí la mayoría de los radiofaros, balizas radar, el TACAN y el VOR-DME.

   De **larga distancia** o **cobertura oceánica:** Aquellos que permiten obtener situaciones en alta mar más allá de los de cobertura costera. Ejemplos son algunos radiofaros.

   De **cobertura mundial** o **global:** Cubren toda la superficie terrestre. Entre ellos destacan los de navegación por satélite.

4. Dependiendo que el número de usuarios que pueden hacer uso del sistema simultáneamente sea limitado o no: **saturables** y **no saturables**.

5. Teniendo en cuenta la disponibilidad o solución en el tiempo: **continuos**, **discontinuos** y **a petición**.

6. Dependiendo de la frecuencia de la señal utilizada: **muy baja frecuencia (VLF)**, **baja frecuencia (LF)**, **frecuencia media (MF)**, etc.

VENTAJAS E INCONVENIENTES (104).

Los sistemas de navegación electrónica solo pueden considerarse como ayudas a la navegación, ya que estos sistemas han introducido a su vez una nueva fuente de errores, tales como todos los posibles fallos, que serán tanto más probables y frecuentes cuanto más complicados son los equipos utilizados.

Las **ventajas** que proporcionan los sistemas de navegación electrónica son los siguientes:

- ✓ Utilización en caso de escasa o nula visibilidad, con lo que se consigue una mayor seguridad en el conocimiento de la situación del buque.

- ✓ Rapidez y continuidad en la obtención de la situación verdadera, lo que permite hallar de forma exacta y puntual los normalmente desconocidos efectos del viento y la corriente.

- ✓ Facilita y simplifica el trabajo del navegante, descargándole parcialmente de la realización de largos cálculos matemáticos, y al mismo tiempo elimina una fuente de posibles errores.

Los **inconvenientes** que proporcionan podrían ser las siguientes:

- Los pasivos, que dependen de emisiones electrónicas externas, no son autónomos, por lo que pueden ser anulados o interferidos en caso de conflictos. Los activos, que emplean emisiones propias del utilizador, son indiscretos, por lo que pueden dar información al enemigo sobre la situación propia, intenciones, etc.

- Algunos sistemas pueden verse afectados por condiciones meteorológicas atmosféricas reinantes.

- La complejidad de los componentes de los diferentes equipos requiere personal cualificado para llevar a cabo los mantenimientos preventivos y correctivos.

PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS (105).

Se llama **inducción electromagnética** al proceso por el cual una corriente que circula por un conductor (antena emisora) crea un campo magnético a su alrededor. Al mismo tiempo un campo magnético produce una corriente en un conductor (Fig. 101).

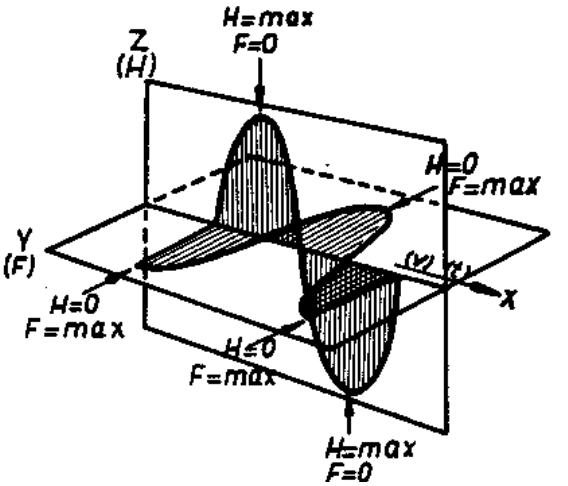


Fig. 101

La variación del campo eléctrico produce una variación del campo magnético, y viceversa. Estos campos están en cuadratura de fase en el tiempo y en el espacio, y su combinación da lugar al campo electromagnético, donde una mínima parte de la energía se disipa como calor en el circuito, y el resto se propaga en dirección perpendicular a los campos eléctricos y magnéticos.

CARACTERÍSTICAS (106).

La formación y desaparición (o el crecimiento y disminución) de los campos eléctrico y magnético son proporcionales al seno de la porción de ciclo completada. Esta representación ha inducido al uso de la palabra **"onda"** cuando nos referimos a la propagación electromagnética (Fig. 102).

El punto más alto de la curva es la **cresta** y el punto más bajo el **seno**, designándose estos puntos de la curva como **pico**.

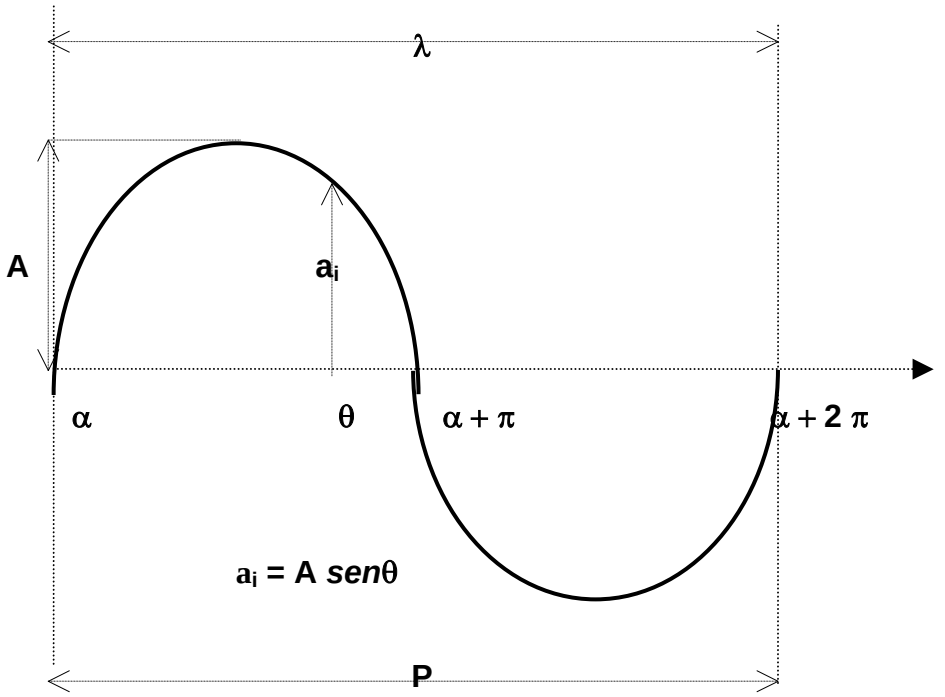


Fig. 102

Se conoce como **amplitud (A)** al desplazamiento hasta el pico desde cero, o lo que es lo mismo, el máximo valor o intensidad que alcanza el campo.

Se denomina **frente de onda** a la parte anterior de cualquier onda.

Definimos el **ciclo** como la secuencia completa de valores desde una cresta hasta la consecutiva.

Longitud de onda (λ) es la distancia recorrida por la energía durante un ciclo, conociéndose como **frecuencia (f)** el número de ciclos que se repite en la unidad de tiempo, y su unidad básica es el ciclo por segundo o **hertzio (Hz)**. La magnitud inversa a la frecuencia se denomina **periodo (P)**, pudiendo definirse como el tiempo de duración de un ciclo.

La relación ente longitud de onda, la frecuencia y el periodo viene determinada por la **velocidad de propagación (c)** de las ondas electromagnéticas en el espacio, y que tiene por valor aproximado 300.000 Km/sg.

$$c = \lambda / P = f \lambda$$

Se denomina **fase (θ)** de una onda a la cantidad que ha progresado el ciclo desde un origen dado, o el ángulo recorrido por la función sinusoidal que da el valor instantáneo del campo. Para la mayoría de los casos se ha establecido una medida circular, considerándose un ciclo completo como 360º. Generalmente el origen no es importante, radicando el interés principal en la fase relativa de una onda con otra, de tal modo, que si dos ondas tienen sus crestas separadas ¼ de ciclo, se dirá que están desfasadas 90º.

El margen que comprende todas las frecuencias de radiación electromagnéticas se conoce como **espectro electromagnético**. El margen de frecuencias adecuado para las transmisiones radio se conoce como **espectro radio**, extendiéndose aproximadamente desde los 10 KHz hasta los 300.000 MHz, dividiéndose por conveniencia en una serie de bandas.

DENOMINACIÓN	DESIGNACIÓN BANDA	BANDA FRECUENCIA LONGITUDES ONDA	ALCANCE DÍA/NOCHE	MODO PROPAGACIÓN	USO
Audio frecuencia	AF	20 Hz a 20 KHz 15.000 a 15 Km			
Radio frecuencia	RF	10 KHz a 300.000 MHz 30 Km a 0,1 cm			
Frecuencia extremadamente baja	ELF	30 a 300 Hz			Potencia eléctrica
Frecuencia vocal	VF	300 Hz a 3 KHz		Depende onda terrestre. Intensidad decrece con distancia	Sonar. Radiodifusión.
Muy baja frecuencia	VLF 4	3 a 30 KHz 30 a 10 Km	Medio / Medio	Onda superficial o terrestre. Gran estabilidad y alcance	Radionavegación. Emisiones horarias.
Baja frecuencia	LF 5	30 a 300 KHz 10 a 1 Km	Medio / Medio	Onda superficial o terrestre. Máximo alcance 1.000 MN. Absorción diurna.	Radionavegación. Loran C Homing ADF
Frecuencia media	MF 6	300 a 3.000 KHz 1.000 a 100 m	Medio / Medio	Onda superficial o terrestre. Algo de onda celeste. Baja atenuación noche / alta día	Loran A
Alta frecuencia	HF 7	3 a 30 MHz 100 a 10 m	Medio a largo / Medio a largo	Distancias considerables. Onda celeste (Ionosférica). Alcance hasta 12.000 MN.	Frecuencia socorro
Frecuencia muy alta	VHF 8	30 a 200 MHz 10 a 1 m	Corto / Corto	Propagación celeste baja. Alcance 1,5 el visual.	Navegación corta distancia
Frecuencia ultra alta	UHF 9	300 a 3.000 MHz 1 m a 10 cm	Corto / Corto	Onda espacial y dispersión troposférica. Propagación por conducto.	Radionavegación. RADAR (Banda S). GPS.
Frecuencia super alta	SHF 10	3 a 30 GHz 10 a 1 cm	Corto	Alcance visual.	RADAR (Banda X). Enlaces microondas.
Frecuencia extremadamente alta	EHF 11	30 a 300 GHz 1 a 0,1 cm	Muy corto	Atenuación oxígeno libre	RADAR navegación Polar.
Infrarrojo		10^6 a 3,9 10^8 MHz			

DENOMINACIÓN	DESIGNACIÓN BANDA	BANDA FRECUENCIA LONGITUDES ONDA	ALCANCE DÍA/NOCHE	MODO PROPAGACIÓN	USO
Espectro visible		$3{,}9\ 10^{8}$ a $7{,}9\ 10^{8}$ MHz			
Ultravioleta		$7{,}9\ 10^{8}$ a $2{,}3\ 10^{10}$ MHz			
Rayos X		$2\ 10^{9}$ a $3\ 10^{13}$ MHz			
Rayos Gamma		$2{,}3\ 10^{12}$ a $3\ 10^{14}$ MHz			
Rayos cósmicos		> $4{,}8\ 10^{15}$ MHz			

Se llama **polarización** (Fig. 103) del campo electromagnético a la dirección de la componente eléctrica. A una distancia considerable de la antena transmisora, el frente de ondas esférico puede considerarse, para pequeñas porciones, como una superficie plana. Las líneas de fuerza de los campos eléctricos y magnéticos son perpendiculares entre sí, y también a la dirección de propagación. Las líneas del campo eléctrico tienen la misma dirección que la antena, y su posición en el espacio determina el tipo de polarización, pudiendo ser vertical, horizontal, circular, elíptica, etc.

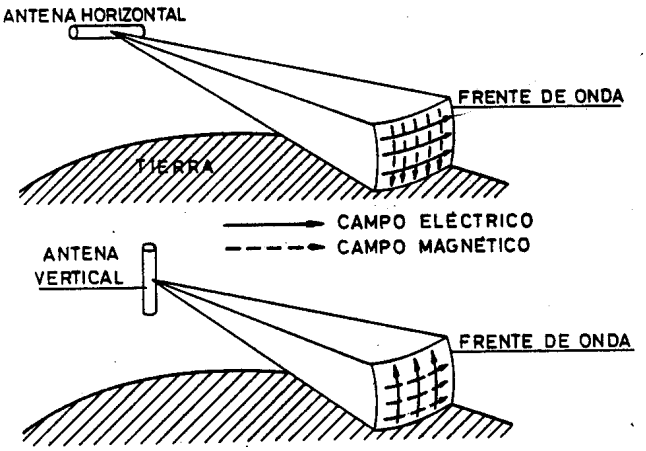
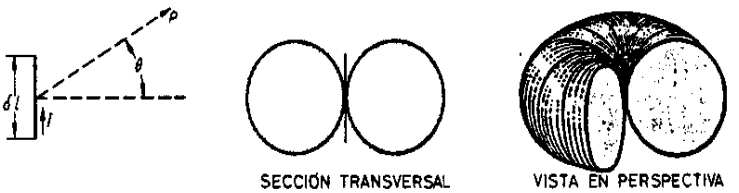


Fig. 103

Se llama **directividad** a la concentración del máximo de energía en un plano o dirección dada. Como norma general la radiación se efectúa por igual en todas las direcciones del espacio como esferas concéntricas que van expandiéndose con una velocidad próxima a la de la luz y en línea recta en condiciones ideales, esta transmisión multidireccional será el caso de la **antena omnidireccional**, pero si se utiliza como elemento radiante una **antena dipolo**, se concentra toda la energía en el plano mediatriz de la misma en detrimento de los extremos (Fig. 104).



DIPOLO ***DIAGRAMA DIRECCIONAL***

Fig. 104

Si se utiliza una **antena direccional** la radiación se efectúa en una sola dirección.

Se define como **potencia de transmisión** a la energía de la onda al salir de la antena y **atenuación** como la pérdida de potencia y amplitud de la señal debido a la expansión de la onda en las tres dimensiones, siendo esta pérdida mayor conforme aumenta la distancia al transmisor.

Ajeno a la onda en sí, pero de importancia para su estudio, es el **efecto Doppler**, por el cual un receptor aprecia una frecuencia distinta a la de transmisión debido a la velocidad relativa entre el emisor y el receptor.

EFECTOS ATMOSFÉRICOS (107).

Las ondas electromagnéticas, en ausencia de efectos externos distorsionadores, se propagan en línea recta. Pero el medio en que normalmente nos desenvolvemos, la atmósfera, no es uniforme ni en el tiempo ni en el espacio, por lo que su camino entre el transmisor y el receptor sufrirá una serie de vicisitudes que harán que la dirección de transmisión varíe. Estas posibles variaciones son: la refracción, la reflexión, la difracción, la absorción, la dispersión y el ruido.

Refracción:

Una señal que pasa a través de dos masas de aire con distinta densidad altera su dirección. La principal causa de la refracción en la atmósfera es la diferencia de temperatura y presión que existe entre masas de aires situadas a distintas alturas (Fig. 105). Para frecuencias inferiores a los 30 MHz su efecto es pequeño en comparación con otros factores, pero para frecuencias superiores, la refracción en las capas más bajas de la atmósfera extiende el horizonte de transmisión hasta una distancia un 15% mayor que el horizonte visible.

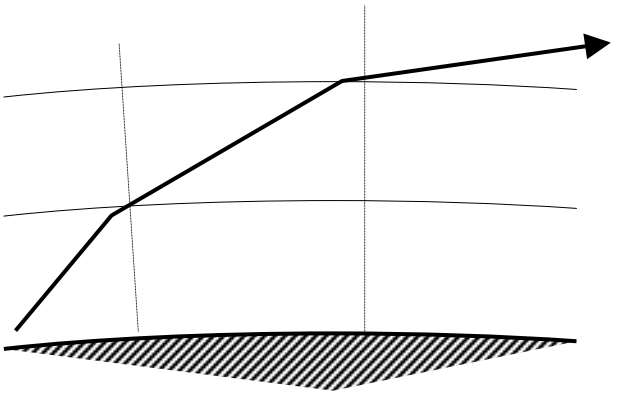


Fig. 105

Algunas veces las capas bajas de la atmósfera se estratifican en capas horizontales presentando unos cambios de humedad y temperatura anormales de tal forma que el gradiente temperatura / altura se invierte y se forma un conducto horizontal o canal de propagación paralelo a la superficie terrestre. Las ondas que en origen iban dirigidas paralelamente a la tierra, queda atrapada en este conducto y se propaga a mayores distancias. Este fenómeno se conoce como **superrefracción** o **propagación por conducto**.

Reflexión:

Cuando la ondas electromagnéticas inciden sobre una superficie, son reflejadas de la misma forma que las ondas luminosas lo son por un espejo, si las condiciones son favorables para ello. La energía de la onda reflejada depende el **ángulo que forma el rayo incidente con la superficie reflectora**, de la **frecuencia**, de las **propiedades reflectantes** de la superficie y de la **divergencia** del rayo reflejado.

La reflexión, dependiendo de la superficie, puede efectuarse de dos formas:

- **Especular**, cuando la superficie es lisa. La onda incidente no cambia, y el ángulo de reflexión es igual al incidente.

- **Difusa**, cuando la superficie es rugosa. La onda así reflejada lo hace en diferentes ángulos.

La capacidad de reflexión de una superficie depende de la magnitud de las irregularidades de ésta respecto a la longitud de onda.

Cuando una onda es reflejada por la superficie de la tierra tiene lugar una cambio de fase. El valor o cantidad de este cambio varía con la conductividad del terreno y con la polarización de la onda. Cuando la onda directa y reflejada llegan al receptor, la señal total es el vector suma de las dos, esta onda resultante se conoce como **onda de interferencia**. La diferencia de fase con la que llegan al receptor es debida a dos causas, al cambio de fase ocurrido en la reflexión y a la diferencia de distancias recorridas por ambas ondas.

En la atmósfera existen diversas superficies reflectantes, a altas frecuencias aparecen reflexiones en las gotas de lluvia, a muy altas frecuencias en las nubes, igualmente pueden aparecer reflexiones en fronteras bien definidas entre dos masas de aire con distinta temperatura o humedad. La principal fuente de reflexión de la atmósfera es la **ionosfera**.

Difracción:

Cuando una onda radio encuentra un obstáculo, su energía es absorbida o reflejada, produciendo una zona de sombra más allá del obstáculo. Sin embargo, parte de esta energía entra en dicha zona de sombra por el fenómeno de difracción, y el cual se explica por el principio de Huygen-Fresnel, el cual establece que cada punto de la superficie de un frente de onda es a u vez una fuente de radiación, transmitiendo energía en todas direcciones delante de la onda (Fig. 106). Mientras una onda no encuentre un obstáculo la difracción no tiene lugar, pero una vez que lo encuentra, desde los bordes del obstáculo se radia energía en la zona de sombra y por fuera de la misma. Esta última produce una radiación secundaria que puede reforzar o anular la energía de la radiación principal.

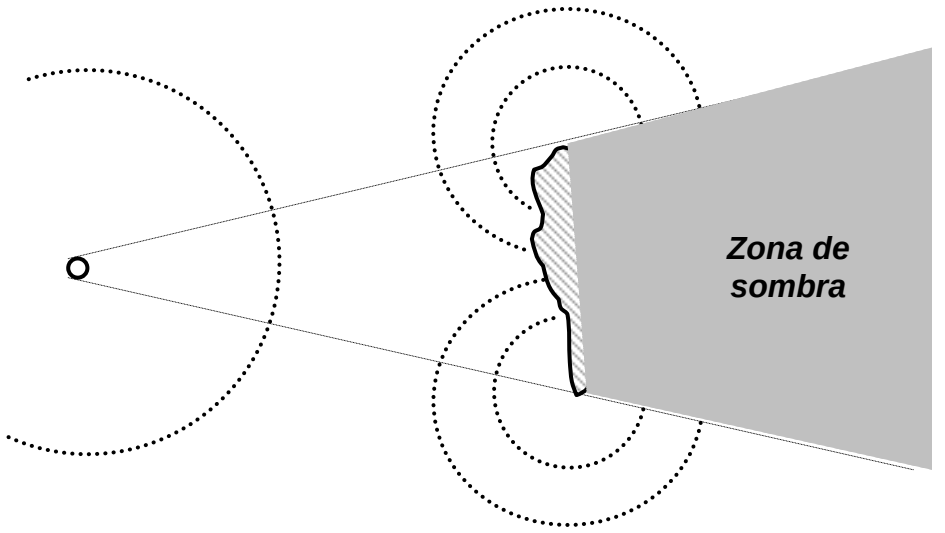


Fig.106

Absorción y dispersión:

Una onda propagándose a lo largo de la superficie terrestre pierde una cierta cantidad de energía, ya que parte de esta onda se difracta hacia abajo y es absorbida por la tierra. Esta absorción provoca que el resto del frente de onda se vuelva a inclinar hacia abajo repitiéndose el proceso de absorción, y por lo tanto de pérdida de energía.

La absorción será mayor cuanto peor características de conductor tenga la superficie sobre la que se desplaza la onda, obteniéndose una absorción menor en el caso de que la superficie sea el mar, ya que la mar es un conductor relativamente bueno.

Una onda que se propaga en las capas altas de la atmósfera sufrirá una pérdida de energía, atenuación, debido a los fenómenos de absorción en la ionosfera y además está atenuación se verá aumentada por el fenómeno de la dispersión debido a la reflexión que produce las partículas en suspensión que se encuentran en el aire.

Ruido:

Las señales perturbadoras que aparecen en un receptor se denominan interferencias, si son intencionadas para obstaculizar las comunicaciones se conocen como *"jamming"* y si no son intencionadas se conocen como ruido.

El ruido puede originarse dentro del propio receptor, ya que la presencia de circuitería que aportan componentes de corriente alterna pueden producir ruido por inducción, de la misma forma, la existencia de contactos defectuoso o componentes averiados del propio receptor será también causa de la aparición de ruidos. Estas fuentes de ruidos limitan la sensibilidad del receptor, que es la misma para todas las frecuencias.

El ruido que se origina fuera del receptor puede deberse a causas naturales o no. Entre las causas no naturales se pueden destacar las debidas a aplicaciones eléctricas que originan señales electromagnéticas.

Los ruidos naturales son producidos en su mayoría por la descarga de electricidad estática en la atmósfera, que se debe a la carga eléctrica de partículas en la atmósfera, las cuales se acumulan en superficies determinadas, y que si vencen las propiedades aislantes normalmente reinantes, se descargan, pudiendo en ocasiones hacerse visibles tales como el fenómeno de fuegos de San Telmo. El ruido atmosférico disminuye conforme aumenta la frecuencia.

ESTRUCTURA DE LA ATMÓSFERA (108).

La atmósfera es la capa gaseosa que envuelve la Tierra hasta una altura de 400 Km y es el medio normal en el que se verifica la propagación de las ondas electromagnéticas. Por tanto interesa conocer sus característica, en lo que afecta al comportamiento de estas ondas. Desde este punto de vista existen tres zonas perfectamente definidas: Troposfera, Estratosfera e Ionosfera.

Troposfera:

Es la zona comprendida entre la superficie terrestre y los 10/15 Km de altura. Dentro de ella se propagan las denominadas **ondas terrestres**. Los fenómenos que sufren las ondas en esta capa son los de reflexión sobre la superficie terrestre, difracción y refracción, siendo este último el más acusado, y por el cual las ondas se curvan adaptándose a la superficie y haciendo que los alcances sean mayores que el horizonte visible o geométrico.

Estratosfera:

Es la capa inmediatamente superior a la troposfera, alcanzando hasta los 32/40 Km de altura. Es una zona de calma relativa que no suele afectar de forma apreciable a la propagación de las ondas.

Ionosfera:

Es la región de la atmósfera comprendida entre la estratosfera y los 400 Km de altura, recibiéndose este nombre a que las partículas se ionizan por radiación solar.

Recordemos que un ión es un átomo o grupo de átomos que están cargados eléctricamente, bien positiva o negativamente, por la pérdida o ganancia de uno o más electrones. En la atmósfera generalmente se forman iones por el choque de los átomos con partículas que se mueven rápidamente o por la acción de los rayos cósmicos o de la luz ultravioleta. En la parte baja de la atmósfera también existen iones, pero en un número muy bajo debido a la rápida recombinación de los mismos.

Pero en la Ionosfera el fenómenos de los iones se da con particular intensidad y en cantidad variable con la altura, ya que los átomos están más separados y el proceso de recombinación es más lento.

Dependiendo del grado de ionización y de la altura, la ionosfera se divide en diversas capas (Fig. 107).

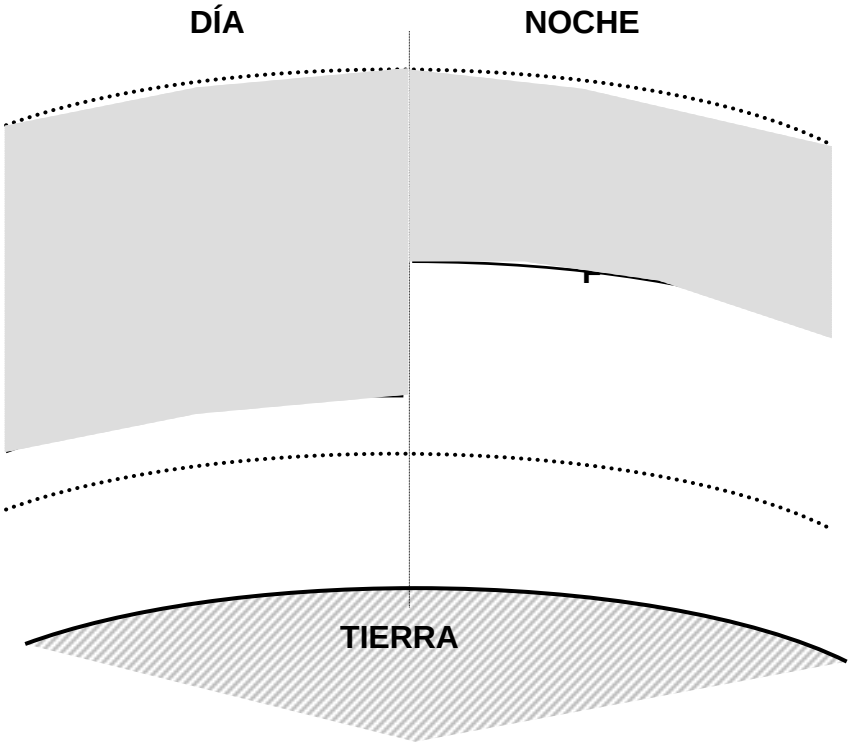


Fig. 107

En las regiones más alejadas la densidad es tan baja que los átomos de oxígenos permanecen como átomos independientes, así mismo los niveles de energía son bajos y la ionización por radiación solar es muy intensa, esta parte de la ionosfera se conoce como

capa F. Durante las horas diurnas se detectan dos capas o niveles de máxima ionización, la **capa F2**, situada entre los 250 y 400 Km; y la **capa F1**, situada entre los 150 y los 250 Km.

La capa F1 puede reflejar frecuencias hasta el rango de HF y la F2 refleja las de VHF y superiores, siendo esta última capa la base de las comunicaciones a larga distancia.

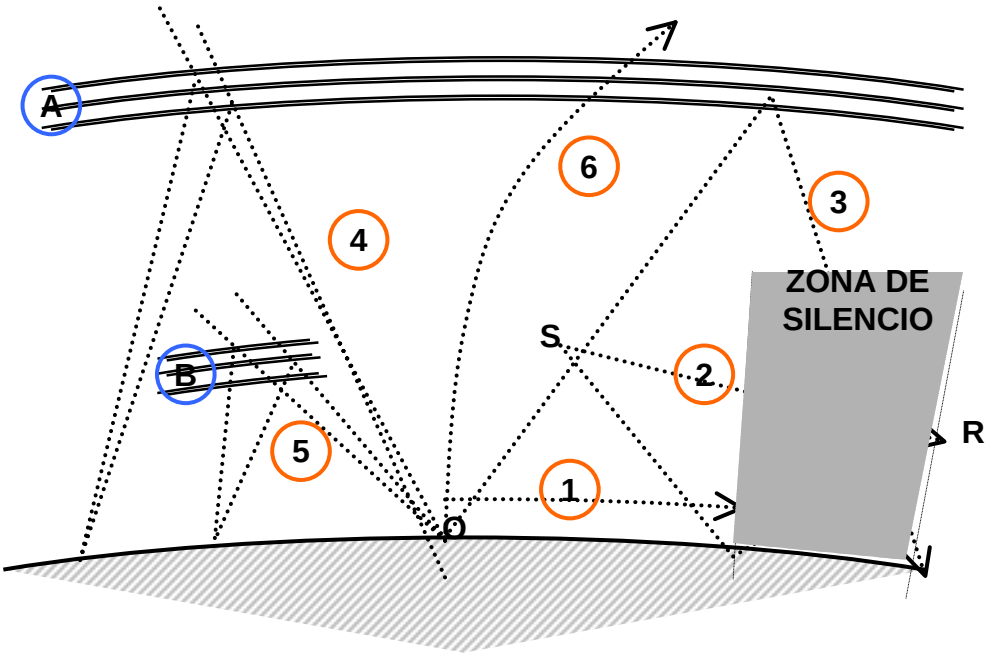
Aproximadamente a los 100 Km de altura la radiación que no ha sido absorbida por la capa F encuentra una gran concentración de moléculas de oxígeno, formándose una nueva capa de ionización denominada **capa E**, la cual puede reflejar ondas de frecuencias bajas y que se hace muy débil durante la noche.

A una distancia entre los 60/90 Km la radiación solar encuentra por vez primera moléculas de ozono, determinándose la **capa D**, que desaparece durante la noche. Es en esta capa donde principalmente se absorben las ondas de HF y se reflejan las ondas de LF y VLF.

MODOS DE PROPAGACIÓN (109).

Una onda electromagnética que viaja desde un transmisor hasta un receptor se ve afectada por la presencia de tierra y de la atmósfera por donde se desplaza, pudiendo seguir diferentes caminos dependiendo de la **frecuencia de emisión** y de las **características de las masas de aire** que atraviesa.

En un principio ya se dijo que la propagación se efectúa en línea recta en condiciones ideales, igualmente se han estudiado los efectos que la presencia de la atmósfera produce en una onda. Así, según todos estos factores y dependiendo del camino que siga la señal desde el transmisor al receptor, o modo de propagación, clasificaremos las ondas de la siguiente forma:



Onda terrestre:
Superficie
1 Espacial Directa
2 Espacial Reflejada
3 **Ionosférica**

Propagación por dispersión
4 Ionosférica
5 Troposférica
6 **Propagación por conductos magnetoiónicos**
A Ionosfera
B Troposfera

Onda Terrestre:

Está directamente afectada por la superficie de la Tierra, en especial por su **conductividad**. Puede ser:

Superficial: Si se propaga en contacto con la superficie terrestre siguiendo la curvatura de la Tierra.

Espacial: La cual a su vez se divide en:

Directa: Si sigue un camino recto en el espacio.

Reflejada: Si sufre alguna reflexión en la superficie de la Tierra.

Onda Ionosférica o Celeste:

Es aquella que se propaga mediante la reflexión en la zona ionizada de la atmósfera. Si el ángulo de incidencia el punto de vuelta o reencuentro con la Tierra ocurrirá a mayor distancia del emisor, llamada **distancia de salto**.

Llamaremos **zona de silencio** o de **sombra** al área comprendida entre el alcance máximo de la onda de tierra y la distancia de salto.

Propagación por Dispersión:

Mecanismo basado en la difusión en una zona no homogénea de la atmósfera. Según la capa de la atmósfera donde se de este fenómeno tendremos:

- Dispersión Troposférica.
- Dispersión Ionosférica.

MODOS DE PROPAGACIÓN EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA DE EMISIÓN Y LA DISTANCIA (110).

La frecuencia de una señal es uno de los factores más importantes a la hora de estudiar la propagación de una onda. Veamos los principales efectos asociados con las distintas bandas de frecuencia en que se divide el espectro convencional.

Frecuencia muy baja (VLF 10 a 30 KHz):

Se propagan entre la ionosfera y la Tierra, siendo su modo principal de propagación la **onda superficial**, obteniéndose grandes alcances con baja atenuación.

Al propagarse por las proximidades de la superficie terrestre está muy afectada por el fenómeno de **difracción**.

Necesita grandes antenas para la emisión y al no verse afectados por tormentas magnéticas, pueden ser el único medio de comunicaciones a grandes distancias.

Le influye en gran medida los ruidos atmosféricos, produciéndole interferencias, pero también tienen la ventaja de un gran poder de penetración en el agua.

Baja frecuencia (LF 30 a 300 KHz):

Se propaga principalmente como **onda superficial**, viéndose afectada en menor medida por el fenómeno de difracción.

Con la distancia aumenta la atenuación con lo que los alcances disminuyen, sin embargo sus antenas son de menor tamaño, haciéndose más practicable.

Frecuencia media (MF 300 a 3000 KHz):

Se propaga tanto como **onda superficial** como **ionosférica**, presentando unos alcances medios y que se pueden aumentar elevando la antena.

Alta frecuencia (HF 3 a 30 MHz):

Su propagación más importante es como **onda ionosférica**, obteniéndose grandes alcances, sobre todo usando frecuencias de la parte baja de la banda.

Para un mayor alcance la antena se ha de elevar del terreno, ya que esto permite el optimizar la señal.

Frecuencia muy alta (VHF 30 a 300 MHz):

Su propagación normal es mediante **onda espacial**, tanto directa como reflejada. Su alcance es corto y se mejora con la elevación de la antena.

La difracción es menor que a otras frecuencias más bajas, pero se deja notar cuando la señal atraviesa zonas montañosas o irregulares.

No tiene interferencias por ruidos atmosféricos.

Frecuencia ultra alta (UHF 300 a 3000 MHz):

Al igual que la banda de VHF solo se emplea la **onda espacial**, tanto directa, como la reflejada, su alcance es limitado, pero debido al fenómeno de la refracción puede incrementarse más allá del horizonte visible.

La difracción es despreciable y la recepción está virtualmente libre de desvanecimientos e interferencias por ruidos atmosféricos.

Frecuencia super alta (SHF 3 a 30 GHz):

Es una banda centimétrica o de microondas, que se propaga normalmente como **onda espacial**. No se ve afectada por la difracción ni por el ruido atmosférico, pero la reflexión en las partículas en suspensión aumenta, causando interferencias, desvanecimiento y dispersión de la señal, quedando su alcance limitado al visual.

Frecuencia extremadamente alta (EHF 30 a 300 GHz):

Su único medio de propagación es la **onda espacial directa**, no se ve afectada por la difracción ni ruidos atmosféricos, pero la dispersión y la absorción son elevadas, lo que hace que su alcance sea muy corto.

CAPÍTULO II

PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Radiogoniometría. Introducción (201).
Tipos de Radioayudas (202).
Radiodemora en la Carta Mercatoriana (203).
Convergencia de meridianos (204).
Semiconvergencia o corrección Givry (205).
Línea Isoazimutal (206).
Trazado de la línea de posición en la Carta Mercatoriana (207).
Radiogoniómetros (208).
Forma de tomar una Radiodemora (209).
El Radar (210).
Diagrama de bloques (211).
Parámetros de un Radar (212).
Pantallas PPI (213).
Limitaciones Radar (214).
Circuitos especiales del Radar (215).
Rádares anticolisión (216).
Sistema ARPA (217).
Ayudas Radar a la navegación (218).
Ayudas pasivas (219).
Ayudas activas (220).
RAMARK (Radar mark) (221).
RACON (Radar beacon) (222).
Estaciones Radar en tierra (223).

RADIOGONIOMETRÍA. INTRODUCCIÓN (201).

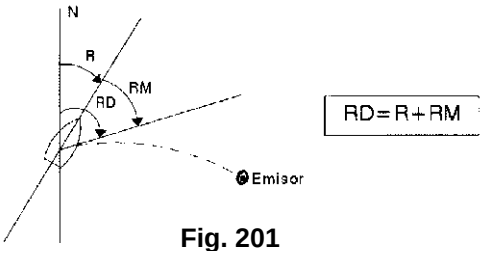


Fig. 201

Las ondas electromagnéticas, en ausencia de efectos externos distorsionadores, se propagan en línea recta. Trasladada esta afirmación a la superficie terrestre diremos que las ondas se propagan dentro del plano que contiene el círculo máximo que determinan las situaciones del transmisor y del receptor.

La dirección definida por este plano es lo que se denomina **Radiodemora**, si está referida al norte verdadero; y **Radiomarcación** si está referida a la proa del barco (Fig. 201).

Se define **Radiogoniometría** como el conjunto de sistemas que obtienen una línea de posición o una situación basándose en la determinación de una o varias Radiodemoras.

Básicamente hay dos procedimientos para la determinación de las Radiodemoras:

- Desde a bordo se determina la demora de un emisor de tierra omnidireccional (radiofaro, estación costera, etc.) por medio de un gonio.

- La demora del barco es determinada desde tierra (estación radiogoniométrica), pudiendo determinarse una situación si el buque es marcado simultáneamente por varias estaciones.

Las ventajas que presenta el gonio a bordo frente al gonio en tierra son:

- ✓ No depende de ningún horario de servicio.

- ✓ Puede repetirse las medidas tantas veces como se estime oportuno.

- ✓ Se puede valorar la exactitud y garantía de la medición.

- ✓ El gonio de a bordo es pasivo y discreto.

- ✓ Se obtienen mayores alcances al tener mayores potencias los emisores terrestres.

Por el contrario tiene los siguientes inconvenientes:

- ❑ Las instalaciones a bordo tienen menor precisión.

- ❑ Los operadores están peor adiestrados.

En Radiogoniometría se trabaja con frecuencias comprendidas entre 250 y 600 KHz, aprovechando las onda de superficie, con el inconveniente de que en las horas nocturnas se producen excesivas interferencias, pudiendo incluso a bloquearse la señal, de esta forma se consiguen alcances entre 200 (a bordo) y 300 (estación de tierra) millas de día y de 25 millas en horas nocturnas, siendo la precisión más alta que se puede obtener con un gonio bien calibrado y un operador adiestrado de ± 2º.

En el procedimiento de marcar el buque desde una estación de tierra, ésta completa la Radiodemora o situación obtenida con una letra para informar del grado de precisión:

LETRA	***RADIODEMORA***	***SITUACIÓN***
A	*± 2º*	*5 MN*
B	*± 5º*	*20 MN*
C	*± 10º*	*50 MN*

TIPOS DE RADIOAYUDAS (202).

Para poder obtener una Radiodemora sólo es necesario que exista un radioemisor y un equipo gonio dentro de su alcance que cubra la frecuencia de transmisión. Estos radioemisores pueden ser de muy diferentes tipos y modos de funcionamiento y suelen venir descritos en publicaciones especiales.

Radiofaros:

Son estaciones transmisoras cuyas emisiones son utilizadas por el navegante con el objeto de obtener una Radiodemora. Para eliminar al máximo el efecto de tierra, se instalan en la línea de costa.

Su situación, además de venir reflejada en las Cartas Náuticas, figura en publicaciones especiales junto con las características de emisión y el tipo de servicio que prestan. Algunas de estas publicaciones son: *"Libro de Radioseñales"* del IHM, *"Admiralty list of radiosignals", "Radionavigational aids",* etc.

Los radiofaros se clasifican en:

Dirigidos o direccionales: Emiten un haz de ondas dirigidas dentro de estrechos límites, en una dirección o en un sector determinado.

Circulares: Producen una emisión omnidireccional.

Conjugados o agrupados: Sistemas de 2, 3 ó 6 radiofaros que trabajan en grupo emitiendo en la misma frecuencia con señales desfasadas en el tiempo de forma que se reciben simultáneamente para permitir obtener Radiodemoras de forma casi simultánea. La duración del ciclo de emisión suele ser de 6 minutos.

Servicio QTG:

Estaciones costeras que, previa petición, transmiten señales a los buques que lo solicitan. La emisión consta de 2 rayas de 10 segundos de duración seguidas del indicativo de llamada, de ser posible en la frecuencia que se indica en la petición, caso contrario han de comunicar previamente la frecuencia en que se va a hacer la emisión. Este servicio suele ser de PAGO.

Radiobalizas:

Son radiofaros de baja potencia para uso local, con un alcance próximo a las 10 MN y que solo pueden identificarse por la frecuencia de transmisión.

Aeroradiofaros:

Son radiofaros de uso aéreo que, por su proximidad a la costa y la regularidad de funcionamiento pueden ser aprovechados para uso por parte de los navegantes: los datos obtenidos de un emisor de este tipo deben ser tomados con cierta reserva ya que al no estar diseñados para uso náutico pueden estar sujetos a errores desconocidos e imprevisibles, tales como: situación inexacta de la estación, efectos de tierra, variaciones en su funcionamiento, etc.

Estaciones Radiogoniométricas:

Son estaciones receptoras que a partir de una emisión del barco obtienen su Radiodemora. O su situación si actúan con varios goniómetros terrestres. Emplean generalmente tres frecuencias:

A: Frecuencia de escucha de la estación, para solicitar sus servicios.

B: Frecuencia de trabajo gonio del barco emisor solicitante.

C: Frecuencia de trabajo de la estación para la transmisión de los datos obtenidos acompañada por la letra de precisión.

RADIODEMORA EN LA CARTA MERCATORIANA (203).

La Radiodemora es una dirección definida por un plano que contiene un círculo máximo, lo que es lo mismo, la dirección de la ortodrómica emisor - receptor. Como tal ortodrómica su representación sobre una Carta Mercatoriana vendrá determinada por una línea curva, que será recta para distancias pequeñas (Fig. 202).

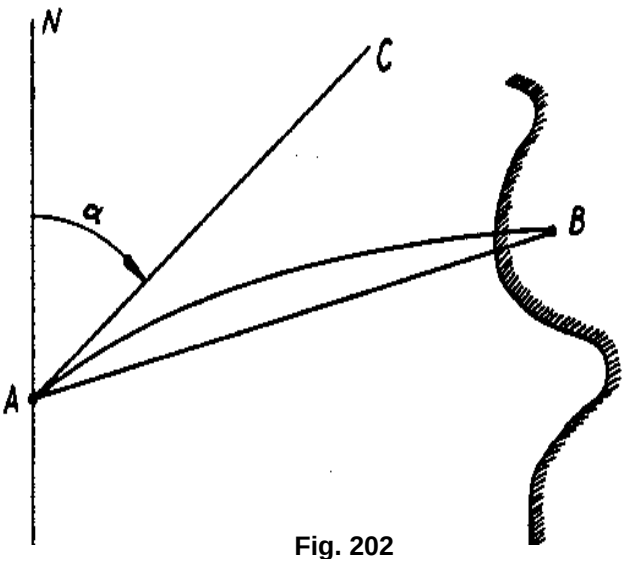


Fig. 202

La Radiodemora que determina el gonio es el ángulo NAC, que es precisamente el rumbo inicial (R_i) para ir de A a B. Su trazado directamente en la carta mercatoriana con su valor "α" sólo coincide con el círculo máximo en un trozo muy pequeño.

Para distancias mayores entre A y B, la Radiodemora hay que corregirla antes de trazarla en la carta Mercator. En cualquier caso, la línea de posición obtenida, o su inversa, hay que trazarla por un punto, que puede ser la estación en tierra, de situación conocida, u otro punto calculado analíticamente a partir de ella.

CONVERGENCIA DE MERIDIANOS (204).

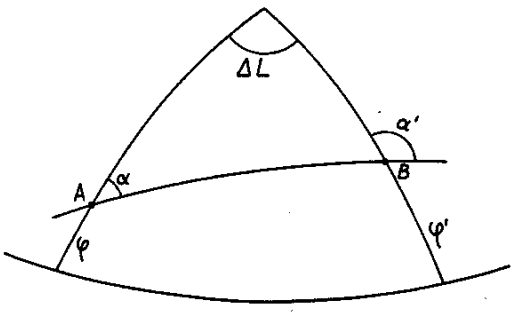


Fig. 203

Se llama **Convergencia de Meridianos** a la diferencia entre los ángulos (α – α') que forma un círculo máximo con los dos meridianos que pasan por dos puntos del mismo (Fig. 203). Su valor es necesario para trazar la Radiodemora en la Carta Mercatoriana.

En el triángulo P_NAB, aplicando las analogías de Neper se obtiene:

$$\frac{\operatorname{tg} \tfrac{1}{2}\left[\alpha + (180^{\circ} - \alpha')\right]}{c \operatorname{tg} \tfrac{1}{2} \Delta L} = \frac{\cos \tfrac{1}{2}\left[(90^{\circ} - \varphi') - (90^{\circ} - \varphi)\right]}{\cos \tfrac{1}{2}\left[(90^{\circ} - \varphi') + (90^{\circ} - \varphi)\right]}$$

$$\frac{\operatorname{tg}\left[90^{\circ} - \tfrac{1}{2}(\alpha' - \alpha)\right]}{c \operatorname{tg} \tfrac{1}{2} \Delta L} = \frac{\cos \tfrac{1}{2}(\varphi - \varphi')}{\cos\left[90^{\circ} - \tfrac{1}{2}(\varphi + \varphi')\right]}$$

$$\frac{c \operatorname{tg} \tfrac{1}{2}(\alpha' - \alpha)}{c \operatorname{tg} \tfrac{1}{2} \Delta L} = \frac{\cos \tfrac{1}{2}(\varphi - \varphi')}{\operatorname{sen} \tfrac{1}{2}(\varphi + \varphi')}$$

Si se consideran puntos suficientemente cercanos su diferencia de latitudes tendrá valor próximo a cero, y su coseno valdrá uno. Asimismo la semisuma de las latitudes es el valor de la latitud media de ambos puntos:

$$\frac{c \operatorname{tg} \tfrac{1}{2}(\alpha' - \alpha)}{c \operatorname{tg} \tfrac{1}{2} \Delta L} = \frac{1}{\operatorname{sen} \varphi_m}$$

De donde se obtiene la expresión del valor de la **convergencia de meridianos**:

$$\operatorname{tg} \tfrac{1}{2}(\alpha' - \alpha) = \operatorname{tg} \tfrac{1}{2} \Delta L \operatorname{sen} \varphi_m$$

Caso de que ΔL sea pequeño se puede igualar la tangente al ángulo, con lo que resulta que la convergencia es igual al producto de la diferencia de longitudes por el seno de la latitud media:

$$(\alpha - \alpha') = \Delta L \operatorname{sen} \varphi_m$$

SEMICONVERGENCIA O CORRECCIÓN GIVRY (205).

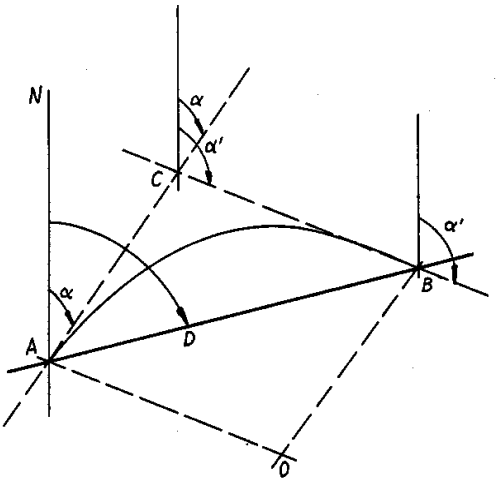


Fig. 204

Consideremos un goniómetro situado en A y una estación emisora en B. Desde A se recibe la señal de B con una Radiodemora RD, que marca A con un ángulo α. Interesa conocer que corrección se ha de aplicar para obtener la demora D loxodrómica y así poder trazar una línea de posición en la carta Mercator (Fig. 204).

Dadas las distancias usuales de empleo del gonio no se comete ningún error apreciable, si el arco de círculo máximo entre A y B se sustituye por el arco del círculo osculador de centro O.

Según lo anterior el ángulo CAB será igual al CBA y si llamamos D a la demora loxodrómica NAB, se tendrá:

$$CAB = CBA = NAB - NAC = D - \alpha$$

En el triángulo isósceles CAB se tiene:

$$\alpha' - \alpha = CAB + CBA = 2CAB = 2\,(D - \alpha)$$

Luego:

$$\boldsymbol{CAB = D - \alpha = \tfrac{1}{2}\,(\alpha' - \alpha)}$$

Por lo tanto, la corrección que se debe aplicar a la Radiodemora para convertirla en una demora loxodrómica es igual a la mitad de la convergencia de meridianos, este valor se denomina **Semiconvergencia** o **corrección Givry**.

Su valor se obtiene sustituyendo el valor de la convergencia previamente calculado:

$$\operatorname{tg} SC = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \tfrac{1}{2} \Delta L \operatorname{sen} \varphi_m$$

La expresión anterior viene resuelta en las tablas incluidas en la Publicación de "Radioseñales" y en las TTNN XLVIII, donde se obtiene la **Semiconvergencia** en grados y se ha de seguir el siguiente criterio de signos para operar con la misma:

♦ Demora de una estación terrestre tomada desde a bordo:

	Latitud media	
	N	**S**
Gonio al E de la emisora	-	+
Gonio al W de la emisora	+	-

♦ Demora del buque tomada desde una estación terrestre radiogoniométrica:

	Latitud media	
	N	**S**
Buque al E de la estación	+	-
Buque al W de la estación	-	+

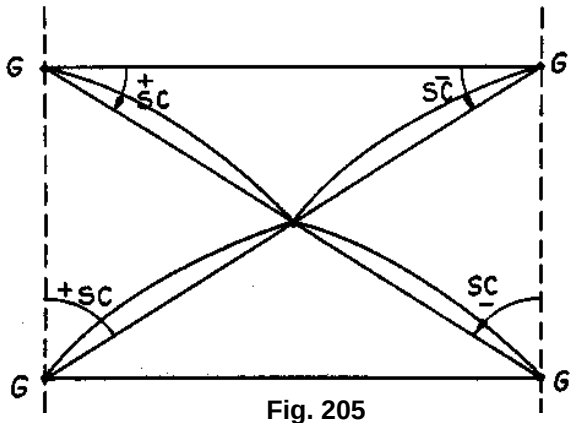


Fig. 205

También se puede determinar el signo dibujando las líneas loxodrómica y ortodrómica aproximadamente; y analizando la convexidad de la ortodrómica (Fig. 205).

LÍNEA ISOAZIMUTAL (206).

La Radiodemora obtenida a partir de la marcación del gonio de a bordo no es suficiente para trazar directamente la línea de posición, ya que se trata de una situación estimada. Si α es el valor medido en A se ve que el mismo lo verifican una serie de puntos tales como A', A", etc., que están sobre una línea curva llamada **Isoazimutal**, que se define como el lugar geométrico de los puntos de la Tierra que marcan a una estación emisora en una misma demora, y que tiene siempre la convexidad hacia el Ecuador, que es lo contrario de lo que le ocurre a la ortodrómica con respecto a su convexidad (Fig. 206).

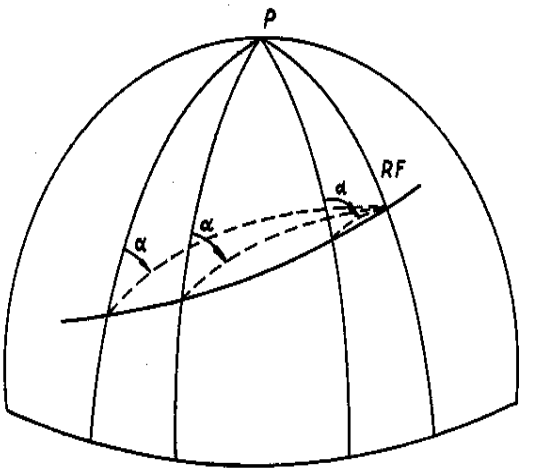


Fig. 206

La tangente a ella en A es la **línea de posición Isoazimutal**, quedando a distinto lado que la Radiodemora, respecto a la loxodrómica, con la que forma un ángulo igual o muy próximo a la Semiconvergencia (Fig. 207).

Por ello, para distancias mayores de 300 MN entre el emisor y el receptor se traza en la carta Mercator la línea de posición Isoazimutal, que queda a distinto lado con respecto a la loxodrómica, aplicándole a la Radiodemora el valor íntegro de la convergencia.

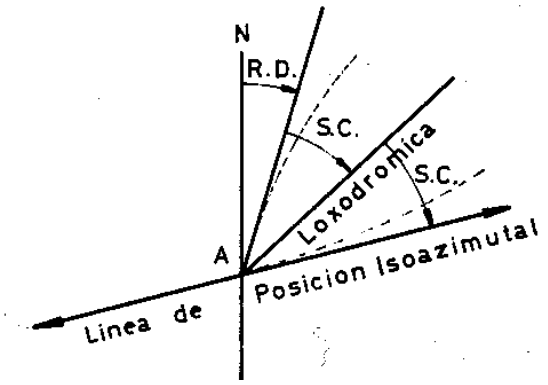


Fig. 207

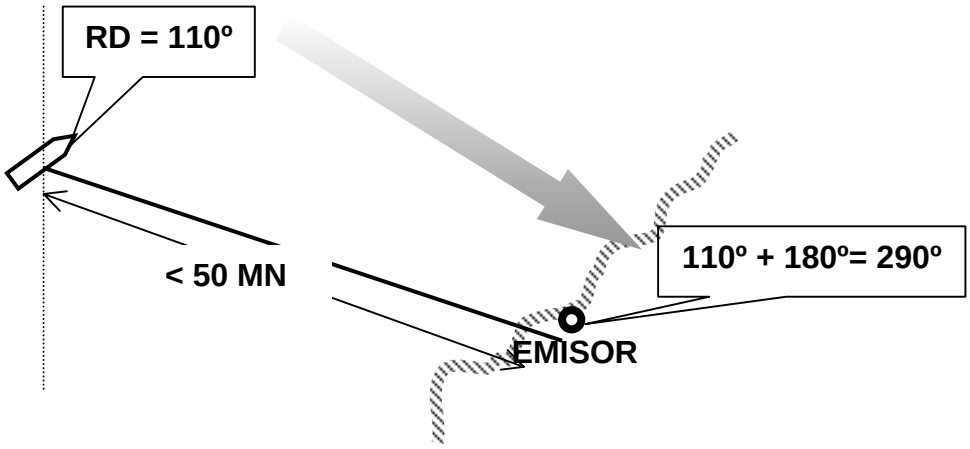
Para las distancias en la que se emplea el trazado gráfico, menores de 300 MN, no es necesario tener en cuenta el lugar geométrico Isoazimutal, ya que se puede considerar confundido con la loxodrómica correspondiente.

TRAZADO DE LA LÍNEA DE POSICIÓN EN LA CARTA MERCATORIANA (207).

Dependiendo de la distancia entre el emisor y el receptor, y con el objeto de conjugar exactitud con rapidez, se pueden distinguir tres casos, en los que en cada uno de ellos solo se verá la posibilidad del **gonio a bordo**:

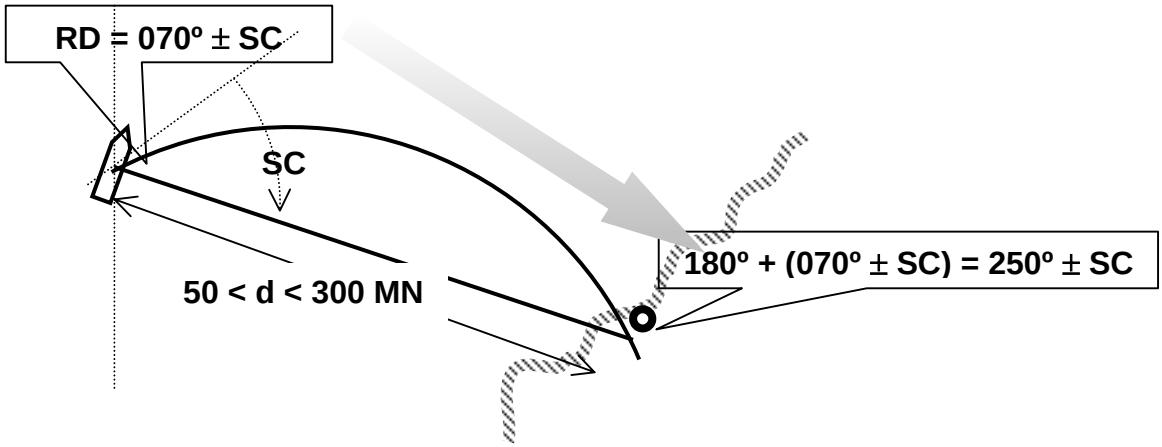
Distancia Inferior a 50 MN:

No se corrige por Semiconvergencia, confundiéndose la Radiodemora con su tangente, que es una loxodrómica. Para trabajar en la carta Mercator se traza desde el punto de tierra marcado u observado la inversa a la Radiodemora.



Distancia entre 50 y 300 MN:

La Radiodemora se corrige por Semiconvergencia. La línea de posición es la loxodrómica obtenida, trazando su inversa en la carta Mercator desde el punto de tierra marcado u observado.



Ejemplo:

Un barco en situación estimada: φ = 40º 08' N; L = 14º 02' W, navegando al 180, toma RM (Radiomarcación) = 241º,5 al radiofaro de Cabo Silleiro: φ' = 42º 06'2 N; L' = 8º 53'8 W. Calcular la demora loxodrómica para su trazado en la Carta Mercatoriana.

φ =	40º 08'	N	L =	14º 02'	W
φ' =	42º 06'2	N	L' =	08º 53'8	W
$\Delta\varphi$ =	01º 58'2	N	ΔL =	05º 08'2	E

φ_m = 41º,1

Tablas ΔL = 5º
φ_m = 41º

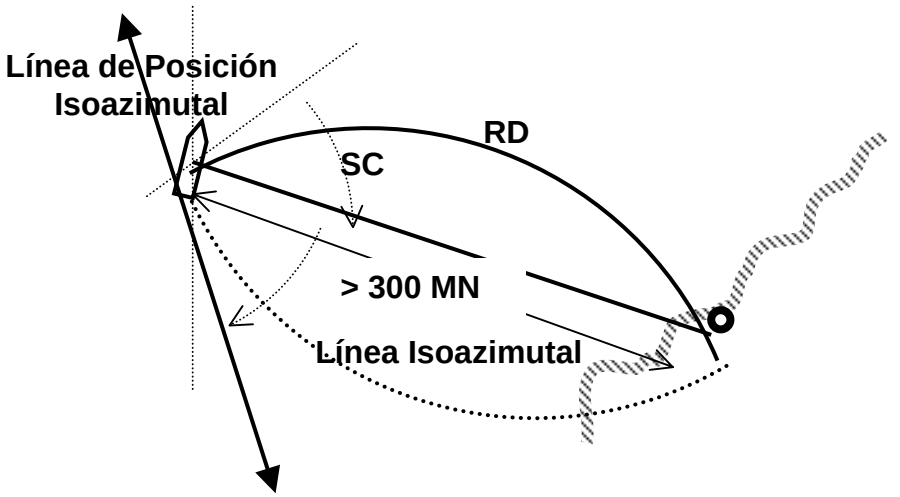
SC = 1º,6 (+)

RM =	241º,5
Rv =	180º
RD =	061º,5
SC =	001º,6 (+)
D =	063º,1

Demora desde C. Silleiro = 063º,1 + 180 = 243º,1

Distancia superior a 300 MN:

Para estas distancias lo que procede es trazar la línea de posición Isoazimutal.



La solución a este problema está basado en la determinación del punto de corte de la demora loxodrómica con el meridiano o paralelo de estima según proceda. El criterio es la

elección de la línea con la que forme un ángulo comprendido entre los 45º y 90º. Por el punto así obtenido se traza la línea de posición Isoazimutal (Fig. 208).

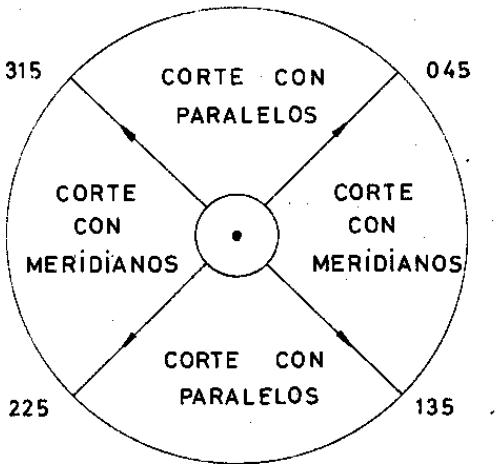


Fig. 208

Este procedimiento tiene la suficiente precisión hasta distancias de 1.000 MN.

Si en la fórmula de la estima:

$$\operatorname{tg} R = \frac{A}{\Delta\varphi}$$

sustituimos R por la demora loxodrómica (D), se tiene:

$$\operatorname{tg} D = \frac{A}{\Delta\varphi}$$

pero como

$$A = \Delta L \cos\varphi_m$$

$$\operatorname{tg} D = \frac{\Delta L \cos\varphi_m}{\Delta\varphi}$$

de donde se obtiene el valor de $\Delta\varphi$ o ΔL.

$$\Delta\varphi = \Delta L \cos\varphi_m c \operatorname{tg} D \qquad \Delta L = \Delta\varphi \sec\varphi_m \operatorname{tg} D$$

Aplicando estos incrementos a la latitud o longitud de la estación, según sea el caso corte con el meridiano o corte con el paralelo, se obtiene la latitud o longitud del punto de corte. La otra coordenada es la longitud o la latitud de estima.

Si φ' y L' son las coordenadas de la estación terrestre, y φ_1 y L_1 a las del punto de trazado, se tendrá:

Corte con el meridiano L_1: $\varphi_1 = \varphi' + \Delta\varphi$

Corte con el paralelo φ_1: $L_1 = L' + \Delta L$.

Ecuaciones a las que se aplica la regla de signos de la estima en el sentido de la demora.

Calculado el punto se tiene el **determinante** fijado para este punto y la dirección de la línea de posición Isoazimutal:

Determinante corte con el Paralelo
- Latitud de estima φ_1
- Longitud calculada L_1
- IsoAz

Determinante corte con el Meridiano
- Latitud calculada φ_1
- Longitud de estima L_1
- IsoAz

Procedimiento:

1. La Radiodemora obtenida a bordo se corrige por SC, con lo cual se tendrá la demora loxodrómica.

2. Con la inversa de la loxodrómica se calcula el punto de corte con el meridiano o el paralelo, según proceda.

3. Por el Punto Obtenido, punto determinante, se traza la línea Isoazimutal, cuya orientación se obtiene volviendo a aplicar la SC, con el mismo signo, a la demora loxodrómica.

Ejemplo:

Un barco en situación estimada: φ = 58º 30'' N; L = 18º 10' W, navegando al 160, toma RM (Radiomarcación) = 48º Br. A un radiofaro de situación: φ' = 55º 22' N; L' = 7º 20'5 W. Calcular los datos para el trazado de la línea de posición en la Carta Mercatoriana.

φ =	58º 30'	N	L =	18º 10'	W
φ' =	55º 22'	N	L' =	07º 20'5	W
$\Delta\varphi$ =	3º 08'	S	ΔL =	10º 49'5 649'5	E

φ_m = 56º,9

Tablas ΔL = 10º,8 φ_m = 56º,9 SC = 4º,6 (+)

Rv =	160º
RM =	48º (-)
RD =	112º
SC =	004º,6 (+)
D =	116º,6

Demora desde Radiofaro (D_i) = 116º,6 + 180 = 296º,6 = N 063,4 W

Aplicando criterio de corte: corte con el meridiano. Cálculo de la latitud.

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta L \cos \varphi_m}{tg\ D_i} = \frac{649{,}5 \cos 56^o{,}9}{tg\ 63^o{,}4} = 177'5 \quad = 2^o\ 57'5\ N$$

φ' =	55º 22'	N
$\Delta\varphi$ =	2º 57'5	N
φ_1 =	58º 19'5	N

D =	116º,6
SC =	004º,6 (+)
IsoAz =	121º,2

Determinante $\begin{cases} \varphi_1 = 58^o\ 19'5\ N \\ L_1 = 18^o\ 10'\ W \\ IsoAz = 121^o,2 \end{cases}$

RADIOGONIÓMETROS (208).

Para obtener una Radiodemora o Radiomarcación de una emisión de transmitida desde una estación de tierra o radiofaro se utilizan los **Radiolocalizadores** o **Radiogoniómetros** o, simplemente, **Gonios**.

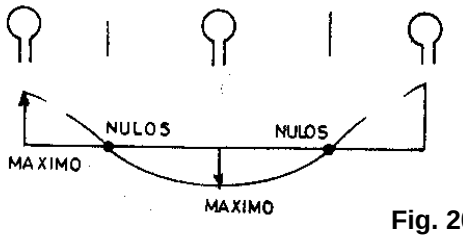
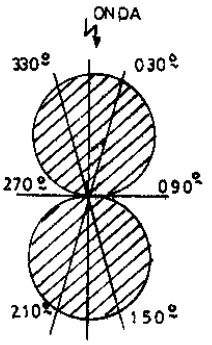


Fig. 209



Consiste en un receptor superheterodino con una antena de anillo o de cuadro giratoria, de tal forma, que una vez seleccionada la frecuencia del emisor, si el plano de la antena coincide con el de la onda, la señal recibida es máxima. Si se gira la antena, la intensidad de la señal decrece hasta encontrar un valor nulo cuando el plano es perpendicular al de la onda. Si se continuara girando se alcanzaría un máximo negativo volviendo a decrecer hasta el siguiente valor nulo (plano perpendiculares) (Fig. 209).

Actualmente, y con el objeto de eliminar las averías de las partes móviles, la antena giratoria se sustituye por dos antenas perpendiculares, efectuándose el giro del plano de la antena por medios eléctricos.

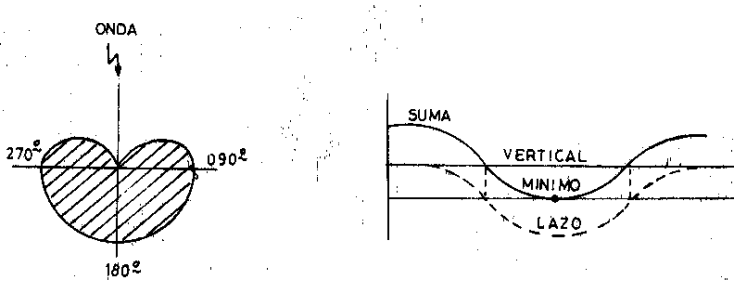
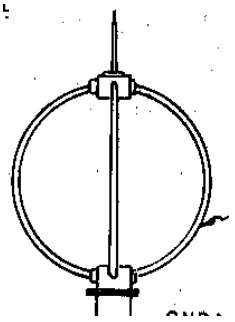


Fig. 211



De la misma forma, con el objeto de una vez determinada la dirección de la Radiodemora o Radiomarcación, eliminar la ambigüedad del sentido, ya que los máximos se producen en la misma dirección y sentido contrario, la antena va dotada de una antena vertical omnidireccional (Fig. 210) de inducción prácticamente constante, determinándose un nulo donde antes había un mínimo (Fig. 211).

Fig. 210

FORMA DE TOMAR UNA RADIODEMORA (209).

1. Se elige el radiofaro teniendo en cuenta que la Radiodemora no incida muy oblicuamente en la costa, para evitar fenómenos extraños en la propagación sobre tierra. Si se trata de obtener una situación, el corte de las Radiodemoras debe ser con ángulos comprendidos entre 90º y 60º.

2. En la Publicación de Radioseñales se consulta la frecuencia del radiofaro, indicativo, alcance, horario, etc.

3. Se sintoniza y se comprueba por el indicativo que es la elegida.

4. Se determina la Radiomarcación o Radiodemora de acuerdo con las instrucciones de uso del equipo, anotando simultáneamente la hora, el rumbo y la corredera.

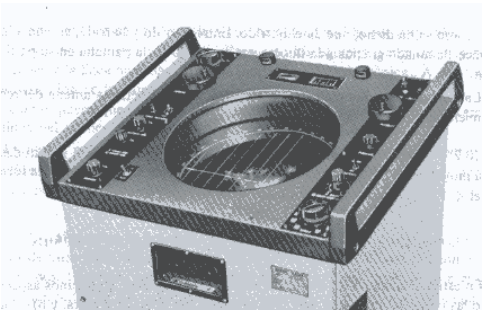
5. Se determina la orientación poniendo en marcha la antena omnidireccional.

El RADAR (210).

El RADAR (Radio Detection And Ranging) consiste básicamente en un emisor de ondas electromagnéticas que al incidir en los obstáculos que se encuentran en su camino se reflejan, recibiéndose los ecos a bordo en donde se materializan sobre una pantalla en sus direcciones respectivas y con espaciamientos proporcionales a los reales, lo cual permite la determinación de las demoras o marcaciones y distancias.

En forma elemental consiste en una antena transmisora direccional, que emite la energía electromagnética generada en un oscilador. Una parte de dicha energía transmitida es interceptada por el blanco y reirradiada en todas las direcciones. La antena receptora, que generalmente es la misma que la transmisora, recoge parte de esta energía y la conduce al receptor. Este amplifica la señal y la pasa, en forma conveniente, a los equipos de explotación de la información.

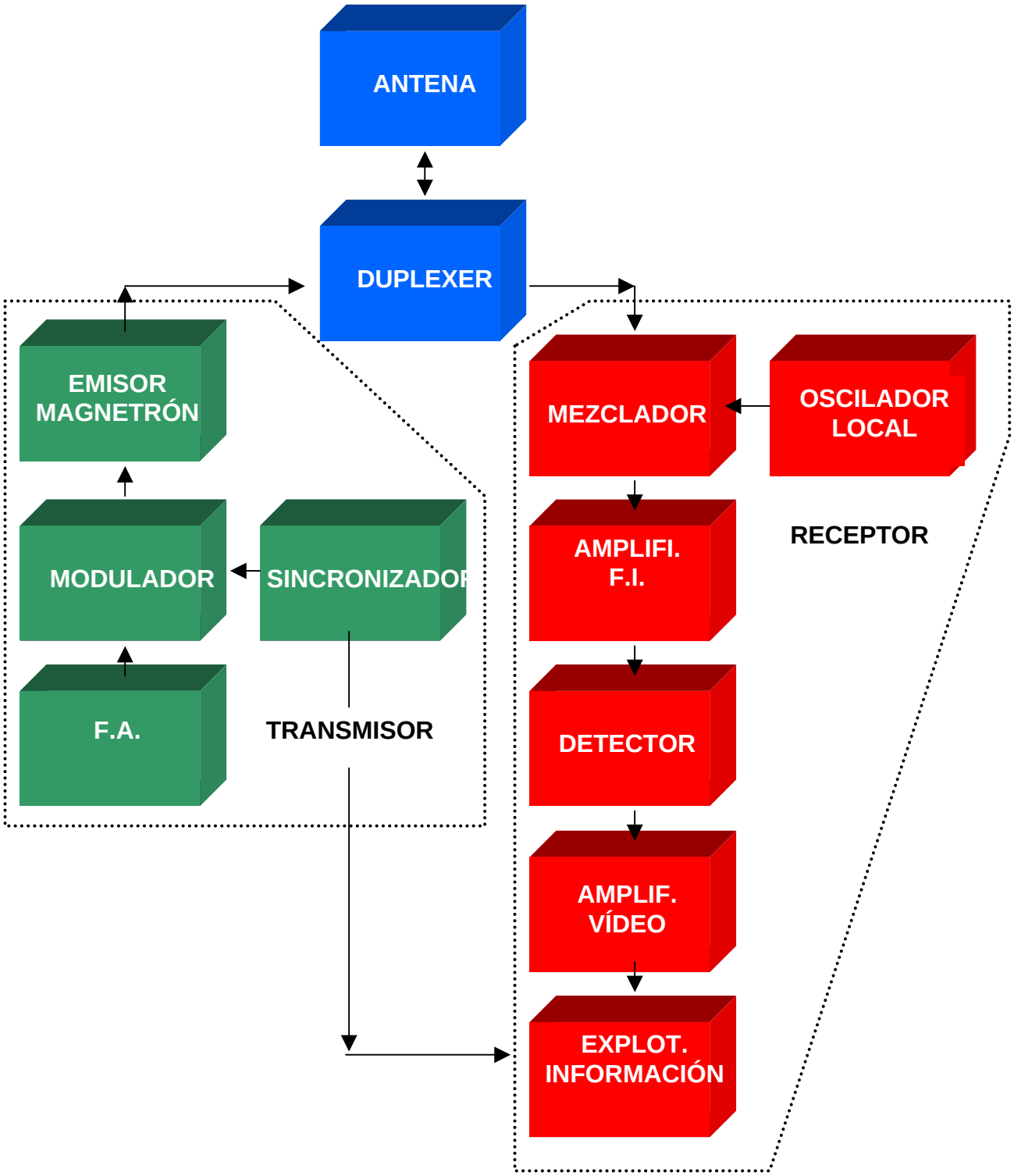
De la medida del tiempo transcurrido entre la emisión y recepción y la velocidad de las ondas se deducirá la distancia que separa antena / blanco.



De la reflexión sobre un objeto de parte de la energía radiada, y su consiguiente recepción por la antena permite, mediante el conocimiento de la orientación de la misma, deducir la marcación relativa del blanco.

DIAGRAMA DE BLOQUES RADAR (211).

Veamos el diagrama básico de bloques básico de una RADAR:



La antena:

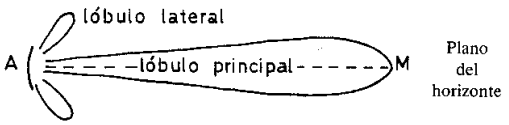


Fig. 212

Es normalmente direccional y concentra la energía de emisión en lóbulos estrechos y giratorios, con lo que cubre todo el horizonte (Fig. 212 y 213).

Gracias al **Duplexer** se utiliza una sola antena para la transmisión y la recepción, ya que permite la transmisión mientras dura el pulso e impide la recepción hasta que finalice la emisión, y permite la recepción durante el periodo de silencio.

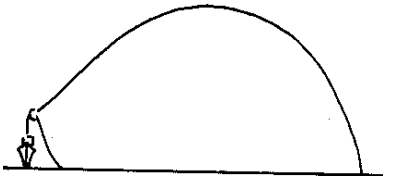


Fig. 213

Los parámetros de una antena son:

- *Ganancia:* Relación entre la potencia radiada en una dirección determinada y la potencia que radiaría en esa dirección una antena isotrópica (omnidireccional) que recibiera la misma potencia del transmisor.

- *Ancho de lóbulo:* Define la discriminación angular, o capacidad del equipo de distinguir dos contactos en la misma distancia y marcaciones o demoras próximas.

- *Velocidad de giro:* Compromiso entre la actualización que se desee obtener de la posición del blanco, y la posibilidad de detectar señales de ecos débiles.

El transmisor:

Está compuesto por el **emisor**, el **modulador**, el **sincronizador** y la **fuente de alimentación**:

- *Emisor:* Es una válvula osciladora, conocida como magnetrón, que se dispara al recibir un pulso de corta duración y alta potencia procedente del modulador. Su misión es generar la onda electromagnética con la potencia necesaria.

- *Modulador:* Durante los periodos de silencio almacena la energía necesaria para excitar el magnetrón.

- *Sincronizador:* Crea las señales de sincronismo necesarias tanto para el transmisor como para el receptor.

El receptor:

Su misión es detectar las señales de los ecos útiles, en presencia de ruido, interferencias y clutter, separando las señales no deseadas de las deseadas, y amplificando estas últimas hasta un nivel adecuado para que la información de los blancos pueda ser presentada ante el operador, o utilizada por un procesador automático de datos.

Sus principales parámetros son:

- *Sensibilidad:* Capacidad de detectar la señal útil aún en presencia de ruido.
- *Ganancia:* Capacidad de amplificar la señales útiles para su explotación.
- *Respuesta dinámica:* Capacidad de adaptarse a las características de las señales de entrada.

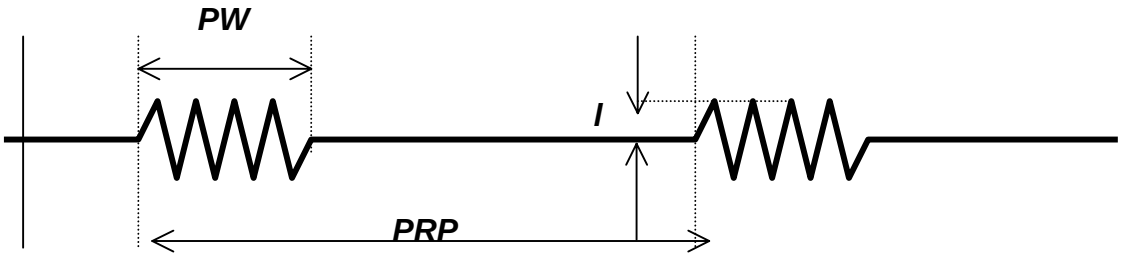
Está compuesto el **mezclador**, el **oscilador local**, el **amplificador de frecuencia intermedia**, el **detector**, el **amplificador de vídeo** y **la unidad de explotación de la información**:

- *Mezclador:* Traslada la radiofrecuencia de recepción, señal modulada, hasta la frecuencia intermedia al combinarla con la señal sin modular generada por el oscilador local.
- *Oscilador local:* Genera una señal, sin modulación, desplazada en frecuencia de la de radiofrecuencia de recepción una cantidad igual a la frecuencia intermedia.
- *Amplificador de frecuencia intermedia:* Su misión es, además de la amplificación, actuar como filtro con el objeto de obtener la mejor relación señal/ruido.
- *Detector:* Tiene como misión convertir los pulsos de frecuencia intermedia en pulsos de vídeo.
- *Amplificador de vídeo:* Permite, mediante la amplificación, un mejor discernimiento y presentación de la señal.
- *Unidad de presentación o de explotación de la información:* Presenta la información de la situación de los objetos reflectores ó la explotación de la información obtenida, para el tratamiento por microprocesadores, bien para adquisición como para seguimiento automático.

PARÁMETROS DE UN RADAR (212).

La señal está formada por una serie de pulsos sucesivos de radiofrecuencia, de una potencia prácticamente constante durante la duración de cada pulso, y transmitidos con un intervalo de tiempo constante.

Los parámetros que definen la firma de una RADAR son:



- *Frecuencia de transmisión (f):* Es la frecuencia de la onda electromagnética transmitida.

- *Ancho de pulso (PD o PW):* Tiempo en microsegundos que dura la transmisión de un pulso.

- *Periodo de repetición de pulsos (PRP):* Tiempo que transcurre desde que se inicia la transmisión de un pulso hasta que comienza la transmisión del siguiente. Su inverso es la *frecuencia de repetición de pulsos (PRF)*, que se define como el número de pulsos transmitidos en la unidad de tiempo.

$$PRP = 1 / PRF$$

- *Ciclo de trabajo (DC):* Es la relación entre el ancho de pulso y el periodo de repetición de pulsos y da una idea del tiempo que dura la transmisión.

$$DC = PW / PRP$$

- *Potencia de pico (I):* Es la potencia del pulso de RF.

- *Potencia media (I_m):* Es la potencia de pico por ciclo de trabajo

$$I_m = I / DC$$

- *Alcance mínimo de detección:* Distancia próxima al emisor en la que el RADAR no recibe, al estar la antena conectada al transmisor mientras que el receptor está desconectado por el Duplexer.

- *Discriminación en distancia:* Capacidad de distinguir contactos próximos en distancia.

- *Polarización de la antena:* Dirección del campo eléctrico.

- *Velocidad de giro de la antena.*

- *Ancho del lóbulo de radiación.*

PANTALLAS PPI (213).

La pantalla es el elemento con que cuenta el navegante para extraer toda la información posible y poder manejarla de la forma más adecuada a su trabajo.

La pantalla PPI es la más extendida en navegación, aunque actualmente las Unidades están siendo dotadas de presentaciones del tipo RASTE, similar un monitor de televisión.

Este sistema está basado en la presentación de un spot luminoso en un TRC, de tal forma que los blancos corresponden a un haz de electrones intensificado.

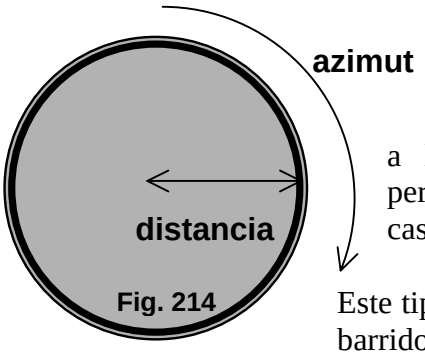


Fig. 214

Normalmente el equipo dispone de conexión con la aguja giroscópica y de un sector exterior graduado de 0º a 360º. El origen se orienta al norte de la giroscópica, o a la proa del barco, según la posición de un selector, permitiendo la medida de demoras o de marcaciones, según el caso (Fig. 214).

Este tipo de pantallas suelen facilitar la posibilidad de descentrar el barrido, de tal forma que el origen de éste se pueda llevar al sitio que más convenga.

Las pantallas permiten los siguientes tipos de presentaciones:

El RADAR en movimiento relativo:

- ✓ El buque propio no se mueve, tanto si la presentación está centrada como si no.
- ✓ Los ecos de otros buques se mueven en la pantalla como la resultante de los vectores de su movimiento y del buque propio.
- ✓ La imagen que aprecia el navegante corresponde con la realidad, pudiendo medir demoras y distancias entre sí, a puntos de tierra, etc.

El RADAR en movimiento absoluto:

El buque propio es un móvil más y, como lo ecos de los otros barcos, se desplaza por la pantalla según su rumbo y velocidad. Como es lógico, el origen del barrido se desplaza con él.

LIMITACIONES RADAR (214).

Las limitaciones a las que se ve sometido el funcionamiento de un RADAR son de dos tipos:

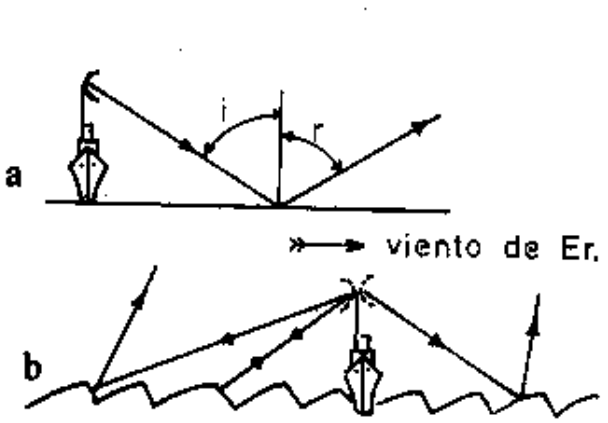
1. **Exteriores:**

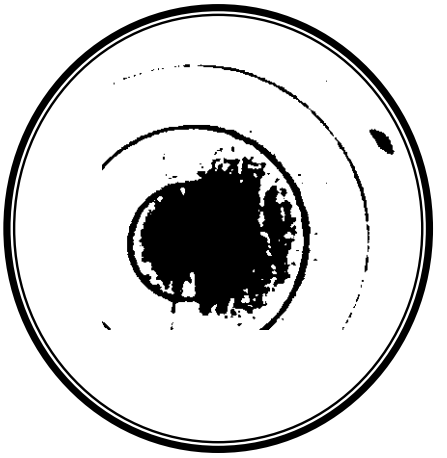
   Son aquellas debidas a los fenómenos meteorológicos y de propagación:

   - La *difracción* sobre la curvatura de la Tierra.
   - La *atenuación* de le energía electromagnética producida por los gases contenidos en la atmósfera.
   - El *ruido externo*.
   - La *reflexión* de las ondas en la superficie terrestre, que puede variar la intensidad del eco recibido, independientemente de la distancia o tamaño del blanco.

- La *curvatura de la superficie de la mar* que limita la detección de blancos más allá del horizonte RADAR de la antena. Depende de las alturas del blanco y de la antena.

- El *estado de la mar*, ya que las olas se comportan como blancos que reflejan las ondas del RADAR.

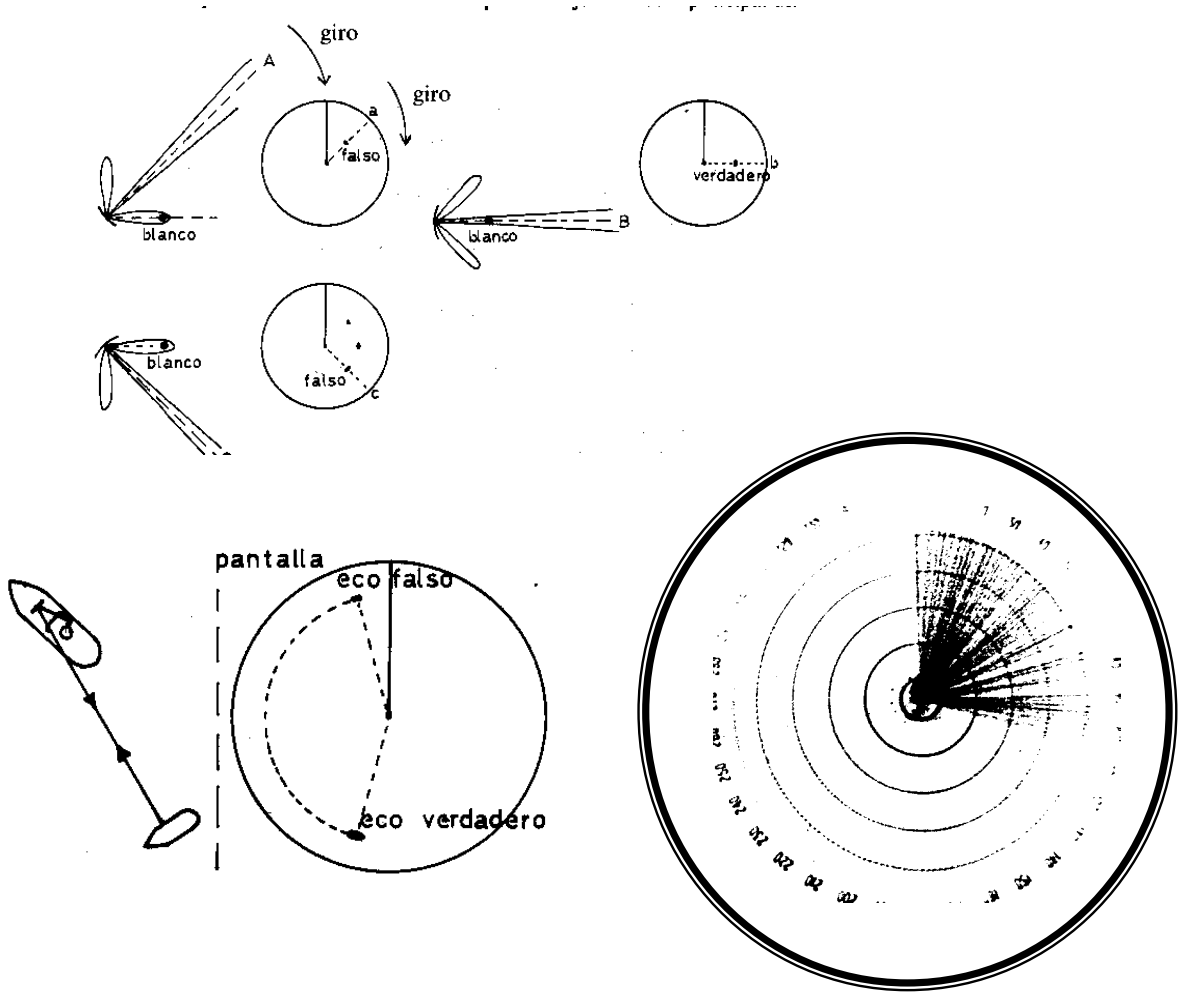




- La *lluvia y la niebla*, ya que llenan la pantalla de multitud de puntos luminosos.

2. **Estructurales:**

- *Ecos espúreos* debidos a rebotes en la estructura del barco, proximidad de obstáculos, interferencias de otros RADARES, ecos recibidos por los lóbulos laterales de la emisión, etc.



- El *alcance mínimo*, función de la duración del pulso emitido, ya que en ese corto periodo de tiempo se desconecta el receptor del emisor, por lo que los ecos reflejados a corta distancia del RADAR no aparecen en pantalla.

- El *alcance máximo*, que depende de la potencia de transmisión, elevación y ganancia de la antena, sensibilidad del receptor, características del blanco, etc.

- La *discriminación en demora*; capacidad de distinguir varios ecos próximos en marcación y misma distancia. Depende del ancho del lóbulo.

- La *discriminación en distancia*; capacidad para distinguir varios ecos próximos en distancia y en la misma marcación. Depende del ancho de pulso.

CIRCUITOS ESPECIALES DEL RADAR (215).

Normalmente los diseñadores de RADARES de navegación tratan de disminuir las limitaciones y mejorar el rendimiento de los equipos seleccionado los parámetros más favorables, o bien permitiéndole al operador la posibilidad de trabajar con diferentes valores.

Los circuitos especiales más comunes son:

- La *ganancia*:

  Actúa sobre el amplificador de vídeo variando la amplitud de la señal de vídeo por igual. Aumenta la presentación de los ecos pequeños pero reduce el contraste entre los ecos y el ruido.

- El *anticlutter rain (FTC, fast time control):*

  Actúa sobre la señal de vídeo, reduciendo el ancho de pulso sin modificar la amplitud. En la pantalla se presenta el borde delantero de los ecos, eliminando el retorno de tierra, ya que elimina los ecos grandes y presenta solo la línea de costa, así como la reflexión en los chubascos.

- El *anticlutter sea (STC, sensitive time control)*:

  Se usa para reducir el reflejo de la mar a corta distancia. Actúa sobre el amplificador de frecuencia intermedia, disminuyendo la ganancia al principio del barrido y aumentándola a lo largo del tiempo de forma exponencial.

RÁDARES ANTICOLISIÓN (216).

Es un RADAR cuya unidad de presentación muestra los movimientos verdaderos y materializa, con un trazo luminoso, el rumbo relativo de los ecos.

Recordemos que el CPA (Closest Point of Approach) es la mínima distancia en las derrotas de dos barcos, y para calcularla, se traza desde el buque propio una perpendicular a la derrota del otro buque (Fig. 215).

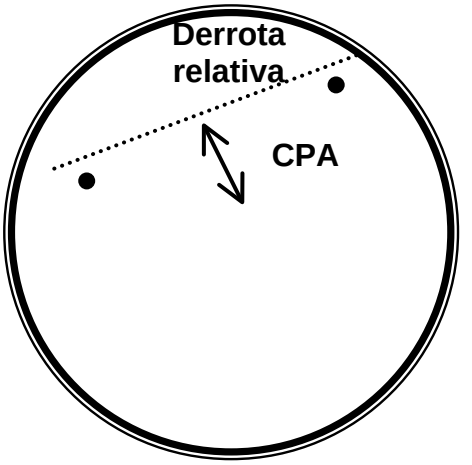


Fig. 215

SISTEMA ARPA (217).

El sistema ARPA (Automatic RADAR Plotting Aids) surge ante el aumento del tráfico marítimo y del número de accidentes en la mar.

En general facilita lo siguiente:

- ✓ Detección y seguimiento de gran número de contactos que entren en una zona seleccionada, descargando de trabajo al navegante.
- ✓ Distancia CPA y tiempo que falta para el mismo (TCPA).
- ✓ Velocidad y rumbo de los contactos que se seleccionen.
- ✓ Demoras y distancias instantáneas a los contactos que se seleccionen.
- ✓ Resultado de la simulación de una maniobra.
- ✓ Presentación en movimiento relativo o absoluto.
- ✓ Alerta al usuario de situaciones de peligro.
- ✓ Posibilidad de detectar el efecto de la corriente.
- ✓ Entrada de otros sistemas de ayudas a la navegación, tal como el GPS.

El ARPA consta esencialmente de un RADAR que facilita vídeo tratado. Un ordenador memoriza la señal de vídeo por cada revolución de antena, y por comparaciones sucesivas detecta la presencia de un blanco, efectuando seguimiento sobre él. Los valores de demora y distancia de estos blancos son procesados por el ordenador para calcular el rumbo, velocidad y demás datos.

El navegante se comunica con el ordenador mediante un JOYSTICK o una BALL TAB, que mueve un STROBE en la pantalla. Con ello puede adquirir manualmente los blancos, u obtener los datos de aquellos que estén en seguimiento.

AYUDAS RADAR A LA NAVEGACIÓN (218).

La considerable experiencia en el uso del RADAR como ayuda a la navegación, ha demostrado la necesidad de información adicional sobre la pantalla, para identificar, previamente, los puntos que se utilicen para calcular la situación.

Las ayudar RADAR son elementos, normalmente instalados sobre boyas o balizas, que permiten al navegante identificar positivamente los puntos que utiliza sobre la pantalla RADAR.

Básicamente existen dos tipos de ayudas RADAR:

Las ayudas pasivas:

- Triedros reflectores, cuyo efecto es aumentar la intensidad del eco RADAR.
- Distribución de boyas según un conjunto geométrico, de tal forma que proporcionan sobre la pantalla una figura fácil de reconocer.

En general no es fácil obtener una identificación inequívoca de este tipo de ayudas, mientras que el elevado coste de los conjuntos de boyas fondeados y su mantenimiento es desproporcionado con los servicios limitados que pueden facilitar.

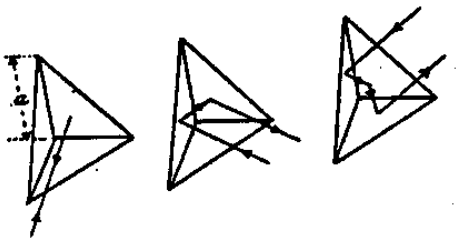
Las ayudas activas:

Son radiobalizas denominadas RAMARK y RACON, que en razón de su alcance pueden dividirse en:

- De corto alcance (de 5 a 10 MN), dedicadas a la navegación por aguas restringidas.
- De gran alcance (30 MN) para reconocer puntos de recalada.

AYUDAS PASIVAS (219).

Reflectores RADAR:



Están formados por tres planos metálicos o reflectantes generalmente triangulares, que se cortan perpendicularmente entre sí. Su propiedad fundamental es que, dentro de cierto límite del ángulo de incidencia, todo rayo que penetre en el reflector es reflejado especularmente en dirección opuesta a la de llegada. La efectividad depende de su altura y de su tamaño.

Normalmente para mejorar su respuesta se asocian en grupos de triedros, denominados clusters, consiguiéndose una optimización en todo el horizonte.

Las ventajas que tienen los reflectores son:

- ✓ Aumento de la intensidad del eco de determinadas marcas de balizamiento, así como embarcaciones menores y botes salvavidas, haciéndolos más fácilmente detectables sobre el clutter de la mar.
- ✓ Mejora el alcance de detección.
- ✓ Coste relativamente bajo.

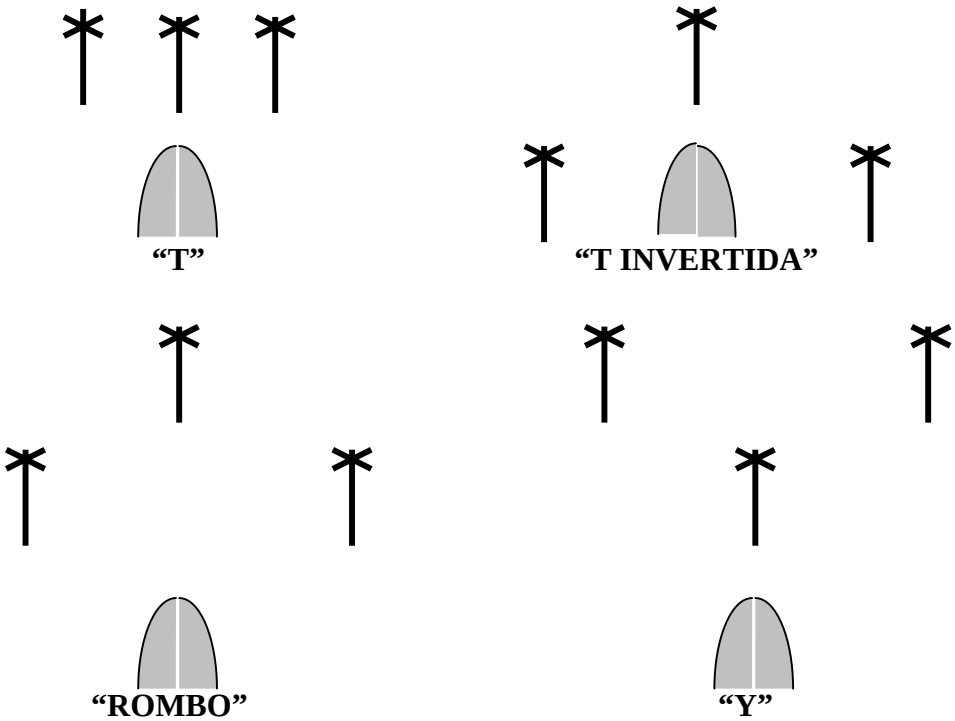
Entre sus inconvenientes destacan:

- Sufren mucho en las zonas combatidas por el viento y la mar.
- Susceptibles de confundirse visualmente con las marcas de tope convencionales de balizamiento.

Estas desventajas pueden solucionarse con boyas construidas de tal forma que la misma boya, conservando su forma característica, se convierta en reflector.

Asociación o distribución de boyas.

Colocación de grupos de boyas, generalmente con reflectores RADAR, formando figuras geométricas fácilmente identificables y separadas aproximadamente 250 m (discriminación RADAR en demora y distancia).



AYUDAS ACTIVAS (220).

Las ayudas están constituidas por balizas, dotadas de transmisores que producen señales distintivas, que pueden ser identificadas por las imágenes que producen en las pantallas de los Radares de a bordo.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (U.I.T.) prevé un cierto número de bandas para ser utilizadas por los radares de navegación, y puesto que un equipo radar se puede sintonizar en cualquier frecuencia, dentro de las bandas asignadas, la emisión de la baliza Radar deberá cubrir una determinada gama dentro de las bandas RADAR.

El tiempo que emplea la baliza RADAR en recorrer las frecuencias de cobertura, es el **periodo de barrido** y cada vez que las frecuencias del RADAR y de la baliza coinciden, la pantalla RADAR presenta una respuesta de 3 a 5 sg. de duración según la señal de identificación de la baliza.

Actualmente se está extendiendo el uso de las balizas que trabajan en toda la gama de frecuencias RADAR llamadas **balizas de frecuencia ágil** obteniéndose una respuesta por cada giro de la antena.
Las radiobalizas pueden ser todo horizonte o transmitir en un determinado sector y su alcance, que viene reflejado en la publicación de Radioseñales, es una indicación aproximada, ya que en la práctica dependerá del alcance efectivo del Radar de a bordo, de la potencia y elevación del transmisor de la radiobaliza.

Existen dos tipos de ayudas activas: RAMARK y RACON.

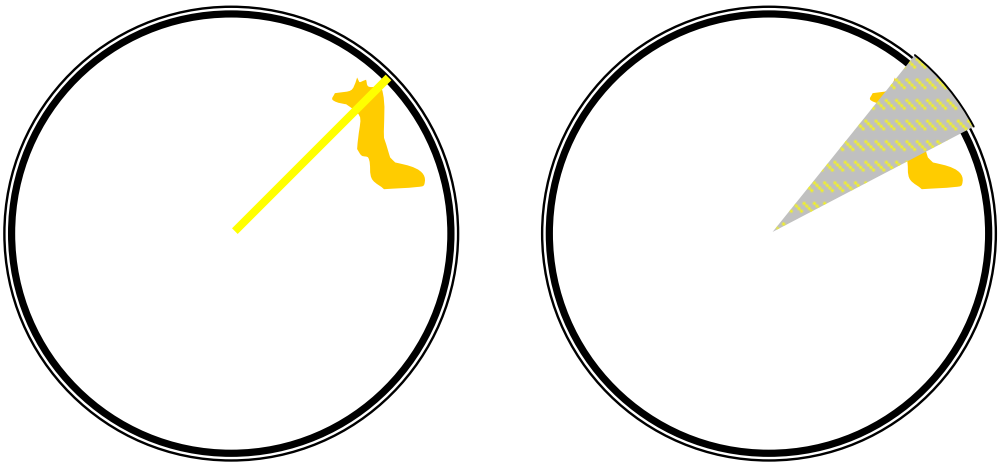
RAMARK (RADAR Mark) (221).

Es una baliza RADAR que transmite continuamente en todas direcciones, facilitando, en la unidad de presentación RADAR, la demora en que se encuentra. Puede ser utilizada por un número ilimitado de barcos y la señales que emite son independientes de las emisiones del RADAR de a bordo.

Cuando la emisión RAMARK coincide con la frecuencia RADAR del buque y está dentro de los límites de la antena, aparece en la pantalla una línea radial brillante o un estrecho sector desde el centro hasta el borde exterior en la orientación de la baliza. La demora se obtiene, en el segundo caso, promediando el sector.

La distancia sólo se puede medir cuando se aprecia el eco de la baliza.

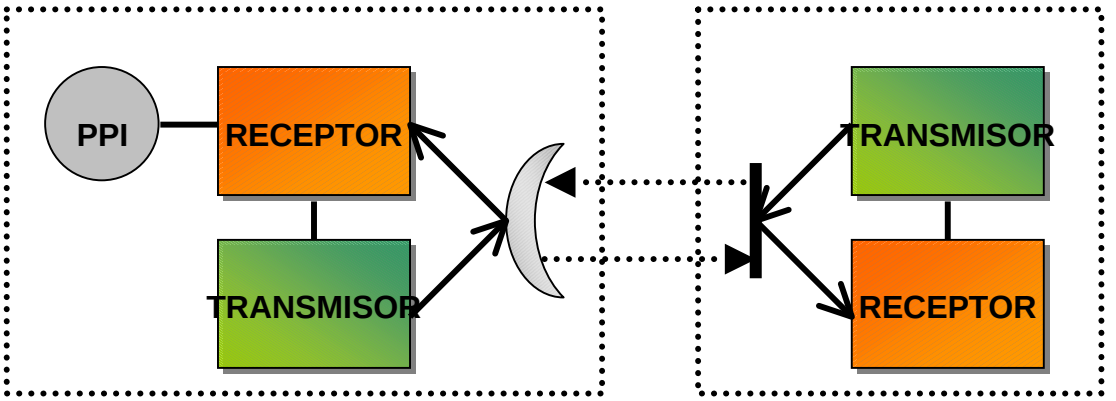
Actualmente sólo se encuentran en funcionamiento en el Pacífico.



RACON (RADAR Beacon) (222).

Es una baliza de respuesta (trasponder) RADAR que se activa por la emisión del RADAR de a bordo, devolviendo la señal ampliada, con características especiales que permiten su identificación en la pantalla RADAR, permitiendo información de demora y distancia.

El diagrama de bloques de una baliza RACON es como sigue:



El funcionamiento de la RACON es simple. El pulso radiado por el RADAR se recibe por la antena RACON, y llega al receptor donde amplifica. De aquí pasa al transmisor, que vuelve a radiarlo al éter.

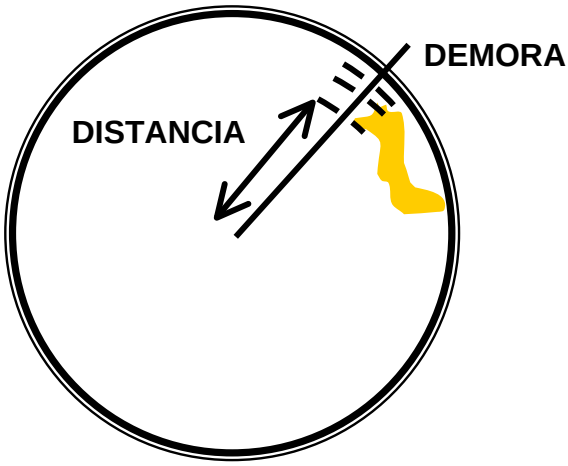
La potencia de la señal recibida a bordo no está determinada por la potencia de su transmisor, ni por la superficie equivalente RADAR del blanco, sino por la potencia radiada por el transmisor RACON.

Existen dos tipos de RACON según su respuesta a la señal procedente del RADAR:

- Las que presentan en la pantalla RADAR una serie de segmentos de arcos concéntricos sobre un determinado sector. El número de segmentos que aparecen en la pantalla, y la distancia que los separan forman la clave de identificación de la baliza

  La demora se mide uniendo la línea que parte del centro de la pantalla y pasa por el centro del arco RACON.

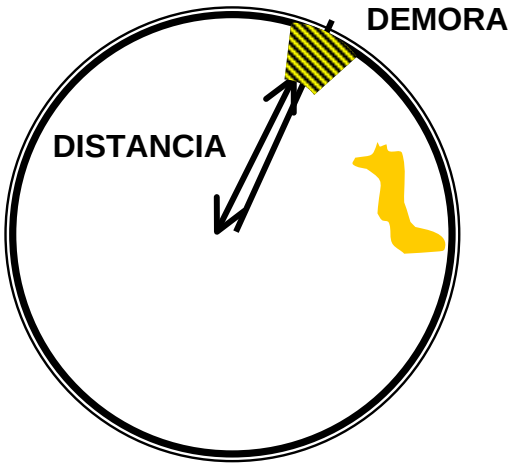
La distancia se mide en la pantalla RADAR, entre el centro de la misma y el borde interior del arco más próximo a dicho centro. Esta medida de la distancia debe ser corregida, pues la pulsación interrogante del RADAR tarda un tiempo apreciable en pasar a través del receptor y transmisor RACON, y este retraso hace que la distancia aparente sea mayor que la real; para hallar ésta hay que restar, por lo tanto, a la distancia aparente este retraso inevitable, constante para cada instalación RACON.



- Las que presentan un destello radial a partir de un punto más alejado del eco (si lo hay) hasta el borde de la pantalla en la dirección de la baliza.

  La demora se mide uniendo la línea que parte del centro de la pantalla y pasa por el centro del destello RACON.

  La distancia se mide en la pantalla RADAR, entre el centro de la misma y el punto de arranque del destello RACON. En este caso también hay que tener en cuenta el retardo en la repuesta RACON.



Las limitaciones de este tipo de balizas son las siguientes:

- A diferencia de la RAMARK, sólo puede operar con un número limitado de RADARES, al tener que responder a cada pulso que le llega.
- Pueden crear interferencia por las respuestas que envía a otros equipos RADAR dentro de la zona.
- Si se halla cerca de costa, la identificación puede verse dificultada al aparecer la respuesta sobre la tierra.
- Genera errores en distancia, debido al retardo.
- Puede generar errores en demora.

ESTACIONES RADAR EN TIERRA (223).

Son RADARES instalados en tierra para asegurar la vigilancia y regular el tráfico marítimo en zonas cuya intensidad así lo aconsejan o las dificultades de la navegación lo recomiendan. Dan información a los buques, cuando lo soliciten, en periodos de mala visibilidad.

Las informaciones dadas por estas estaciones no se deben considerar como controles, la responsabilidad es totalmente del buque, en lo concerniente a la seguridad en la navegación.

En ESPAÑA actualmente existen tres estaciones RADAR costeras, en TARIFA, FINISTERRE y Cº de GATA, con el objeto de regular el tráfico en los dispositivos separadores. Su localización y características figuran en el libro de Radioseñales

Algunos puertos de cierta entidad disponen de estaciones radar portuarias, las cuales asisten al servicio de practicaje y a la dirección del puerto para la vigilancia del tráfico portuario.

CAPÍTULO III

SISTEMAS DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE. GPS.

Introducción (301).
Nociones de geodesia: geoide y elipsoide (302).
Leyes de Kepler (303).
Órbitas y sus parámetros (304).
Sistemas de referencia (305).
Coordenadas GEOREFF, WGS-84 y ED-50. Transformaciones entre ellas (306).
Mensajes de navegación (307).
Métodos de seguimiento de un satélite (308).
El GPS: historia, fases de su desarrollo y diferentes segmentos (309).
El tiempo GPS (310).
Estructura de la señal emitida. Observables (311).
Mensaje de navegación (NAV DATA) (312).
Receptores GPS (313).
Sistemas de posicionamiento (314).
Errores sistemáticos y aleatorios presentes en las observaciones GPS (315).
Dilución de la precisión (DOP) (316).
El GPS diferencial (DGPS) (317).
Estructura y precisión del DGPS (318).
Mensaje de correcciones diferenciales (319).

INTRODUCCIÓN (301).

Los sistemas de posicionamiento surgen de la idea de que: si desde una estación de tierra se puede predecir la órbita de un satélite, también se puede determinar la posición de un punto de la tierra si la órbita del satélite se conoce.

NOCIONES DE GEODESIA: GEOIDE Y ELIPSOIDE (302).

La superficie de nuestro planeta presenta multitud de irregularidades por lo que a la hora de trabajar sobre ella con fórmulas y planteamientos matemáticos se presentan multitud de inconvenientes. A lo largo de la historia estos problemas se han idos reduciendo a base de realizar concesiones e hipótesis lo más próximas a la realidad posibles, se dice reduciendo porque todavía hoy no existe un acuerdo a nivel global y se realizan estudios en muy diversos campos: gravimetría, magnetometría, etc.

La primera aproximación matemática que se realiza es la del GEOIDE, donde se considera nuestro planeta sin continentes, con una superficie formada exclusivamente por el mar en

equilibrio, sin mareas, vientos, etc. Podemos definir al **GEOIDE** como **"una superficie de nivel (equipotencial), normal en todos sus puntos a la dirección de la gravedad".**

A pesar de la gran aproximación matemática que supone el GEOIDE, se ha demostrado, por estudios efectuados durante años, que esta superficie no es regular, y por tanto no puede simplificarse con una fórmula matemática.

La figura matemática que más se aproxima al GEOIDE es el ELIPSOIDE DE REVOLUCIÓN, figura engendrada por una elipse que gira sobre su eje menor.

Este ELIPSOIDE se supone tangente en un **punto fundamental** o **Datum** con el GEOIDE, y se determina las desviaciones entre el Elipsoide y el Geoide a medida que nos separamos del punto (Fig. 301).

Con esto, se pueden determinar infinidad de Elipsoides según el punto fundamental que se considere. Al variar el punto fundamental, variarán los parámetros de Elipsoide.

Cada Elipsoide determinará un sistema propio de referencia.

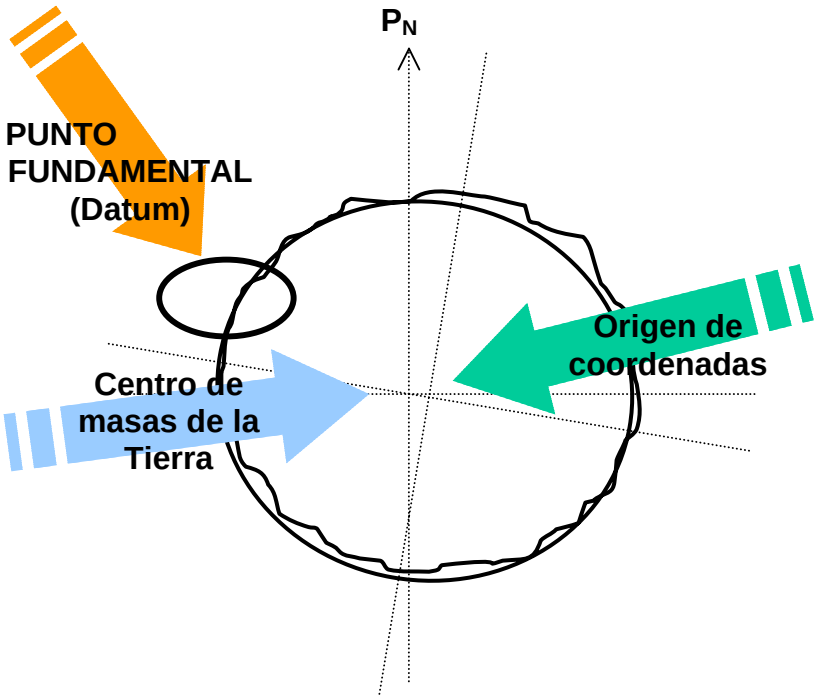


Fig. 301

LEYES DE KEPLER (303).

Las Leyes de Kepler aplicadas los satélites, se enunciarían de la siguiente forma:

1. Los satélites describen órbitas elípticas, con el centro de masas de la Tierra en uno de sus focos.

2. Las áreas barridas por la recta que une el satélite con el centro de masas de la Tierra son proporcionales a los tiempos empleados en recorrerlas.

3. Los cuadrados de los tiempos que emplean los satélites en recorrer las órbitas son proporcionales a los cubos de los semiejes mayores de estas órbitas.

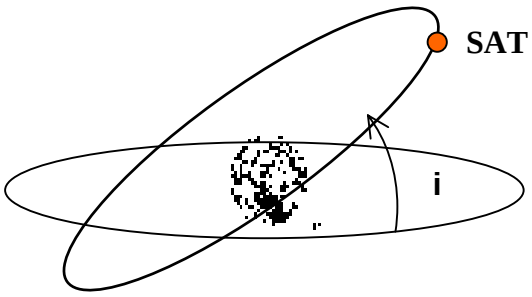
Los movimientos y órbitas de los satélites están gobernadas por estas Leyes junto con la Ley de Gravitación Universal, y estas órbitas están afectadas por la influencia de la Luna, Sol, rozamientos (mínimos a esas alturas), etc.

ÓRBITAS Y SUS PARÁMETROS (304).

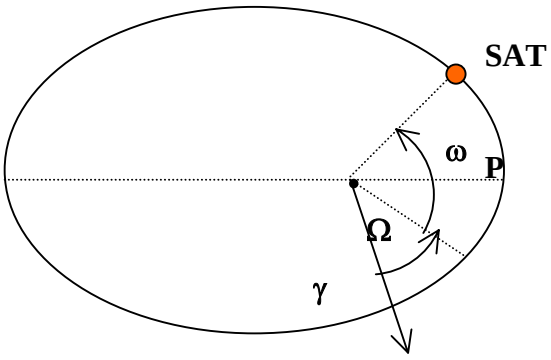
Cinco parámetros independientes son necesarios para describir la forma y el tamaño de la órbita de un satélite, y un sexto para definir la posición del satélite en un tiempo dado. Estos seis parámetros son conocidos con el nombre de parámetros orbitales y son los siguientes:

1. Determinación del plano de la órbita:

   - **Inclinación del plano de la órbita (i)** o ángulo del plano de la órbita con el plano ecuatorial.



   - **Longitud del nodo ascendente (Ω)**, que es el ángulo medido sobre la órbita del satélite, entre el punto de γ y el punto donde el satélite corta al plano ecuatorial en dirección Norte (nodo ascendente), medido en la dirección contraria a las agujas del reloj.



2. Orientación y dimensión de la elipse en su plano:

   - **Argumento del perigeo (ω)**, que define la orientación del eje mayor de la elipse en su plano respecto a la orientación del nodo ascendente.

- **Semieje mayor (a)**, que define el tamaño de la órbita.

- **Excentricidad (e**), que define la forma de la órbita.

3. Origen de tiempos en la ley de movimiento del satélite:

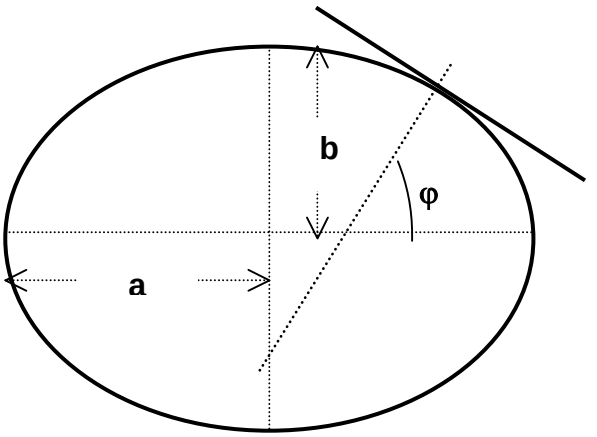
   - **Instante (t_0)**, de paso del satélite por el perigeo.

   Sin embargo el satélite está sometido a una serie de fuerzas perturbadoras, gravitacionales y no gravitacionales, que provocan que su órbita se aleje de la ideal para masas puntuales.

   Para aquellas fuerzas perturbadoras cuyos efectos son apreciables se han diseñado modelos matemáticos más o menos fieles que permiten predecir, con un cierto grado de aproximación, como y cuanto se va a apartar la órbita real del modelo kepleriano. Estos modelos originan 9 nuevos parámetros.

SISTEMAS DE REFERENCIA (305).

Recordemos los siguientes parámetros en la cónica definida como elipse:



Ecuación de la elipse; $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$

Una elipse queda definida por los dos semiejes mayores **a** y **b**.

Parámetros suyos son la **excentricidad (e)**, relación entre la distancia focal y el semieje mayor: $e^2 = \dfrac{a^2 - b^2}{a^2}$

El **aplanamiento (p)**, relación entre la diferencia de los semiejes y el semieje mayor: $p = \dfrac{a-b}{a}$

La **Gran Normal (N)**: $N = \dfrac{a}{\sqrt{1 - e^2 \operatorname{sen}^2 \varphi}}$

A lo largo de la historia, múltiples medidas efectuadas han ido dando diferentes valores a los parámetros del elipsoide, de tal forma que conjunto de valores ha dado origen a sistemas de referencia diferentes.

En 1.924 el Bureau Hidrográfico Internacional, reunido en Madrid, adopta el elipsoide Hayford de 1.909, dándole el nombre de ELIPSOIDE INTERNACIONAL, de parámetros *a = 6.378.388* metros y *p = 1/297*.

En 1.950 se ajusta el Elipsoide Internacional, al establecer el Datum o punto fundamental en la localidad alemana de Postdam, dando origen al nuevo ELIPSOIDE INTERNACIONAL ED-50.

Con la aparición de los primeros satélites artificiales, los medios para el estudio de la gravedad se ampliaron de forma notable, llegándose a una mejor definición del GEOIDE, lo que permite realizar nuevas aproximaciones en el estudio de los ELIPSOIDES.

El Sistema de Satélites TRANSIT dio origen al ELIPSOIDE WGS–72, y el Sistema GPS originó el actual ELIPSOIDE WGS-84, base de los actuales levantamientos hidrográficos.

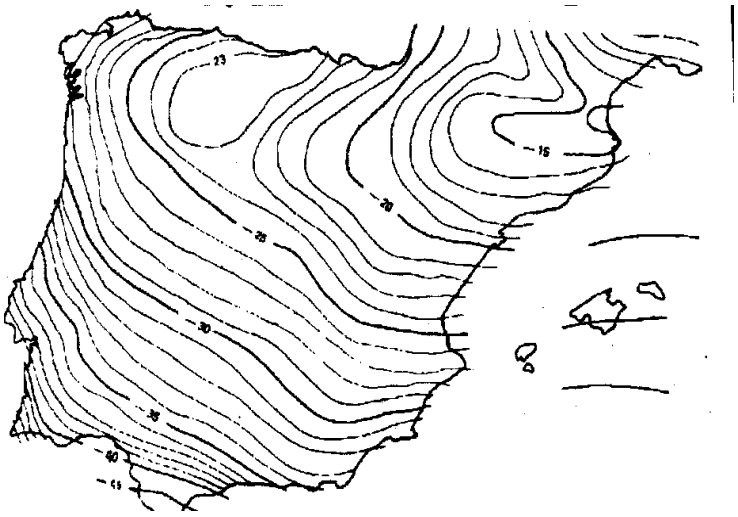


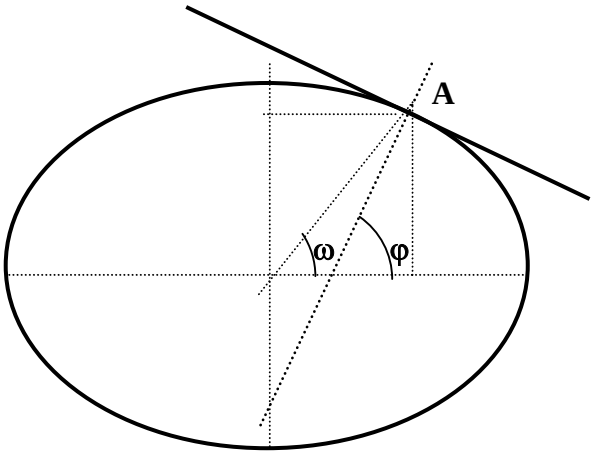
Fig. 302

Cada uno de estos sistemas compuestos por Elipsoide y un Datum, llamados Sistemas de Referencia, da unas coordenadas específicas para cada punto de la Superficie Terrestre.

El WGS-84 se puede definir como un sistema de referencia que tiene por DATUM el centro de la Tierra y con dirección de su eje de rotación el que tenía la Tierra entre los años 1900 a 1905.

Se llama *latitud geodésica (φ)* de un punto A, al ángulo formado por la normal en el punto con el diámetro ecuatorial, o también, el ángulo que forma la vertical con la dirección normal al eje de rotación de la Tierra.

Se llama *latitud geocéntrica (ω)* de un punto A, al ángulo formado por la línea que une el punto con el centro de la tierra y el plano ecuatorial.



Se llama *longitud geodésica* al ángulo formado por el plano meridional del lugar con el plano meridiano origen de las longitudes.

La coordenada Z, por otra parte, ha sido tradicionalmente referida a la superficie equipotencial denominada Geoide. Es decir, un punto del espacio, en este sistema convencional de coordenadas venía definido por dos sistemas complementarios de valores: sus coordenadas planimétricas (latitud y longitud) y su cota ortométrica, o distancia que separa el punto en cuestión de la superficie del Geoide, medido a lo largo de la vertical (Fig. 303).

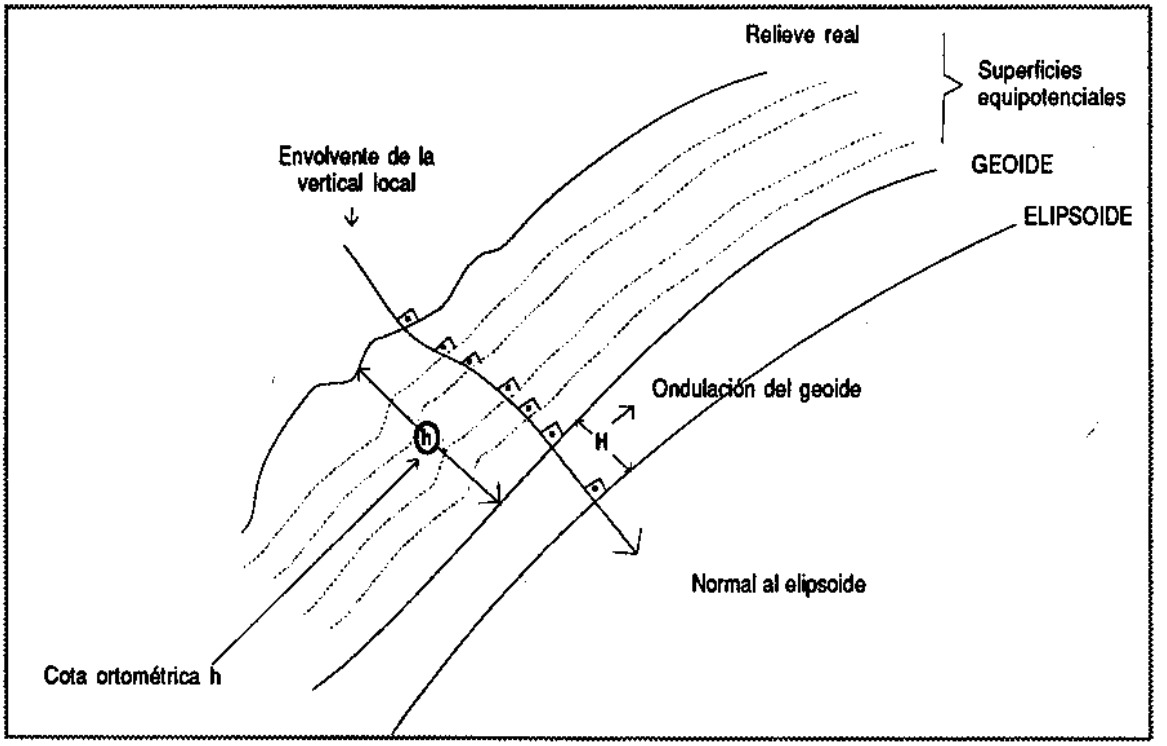


Fig. 303

Por tanto, parea conocer las coordenadas absolutas del punto, tomando como origen el centro del elipsoide, es necesario conocer la ondulación local del Geoide.

El Geoide, como sabemos, es una superficie ideal equipotencial, su conocimiento es algo que se va mejorando día a día a medida que nuevas observaciones gravimétricas se van añadiendo a las ya existentes.

COORDENADAS GEOREFF, WGS-84 Y ED-50. TRANSFORMACIONES ENTRE ELLAS (306).

El sistema de coordenadas GEOREF es un sistema de coordenadas cartesianas (X, Y, Z), que al igual que el Elipsoide WGS-84 tiene su origen en el centro de masas de la Tierra.

La transformación de un sistema de coordenadas a otro es sencilla, basta pasar unas coordenadas de latitud, longitud y altura a un sistema cartesiano (x, y, z); y de aquí por medio de un giro y traslado de ejes a otras coordenadas cartesianas (x’, y’, z’), y finalmente se obtiene la latitud, longitud y altura en el nuevo sistema.

Esta transformación contiene 7 parámetros:

- Coordenadas x, y, z del origen de un sistema con relación al otro (Traslación de un Sistema hacía el otro).
- Ángulo de giro alrededor de los tres ejes.
- Factor de escala, originado por los diferentes tamaños de los elipsoides.

El nexo de unión entre los distintos sistemas de referencia va a ser el Geoide y las coordenadas de su centro de masas.

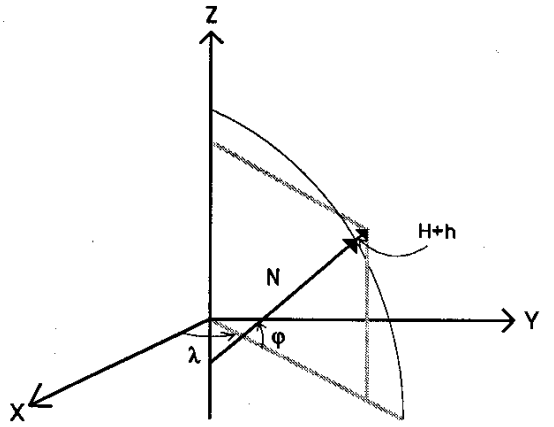


Fig. 304

Las fórmulas de transformación, expresadas en forma matricial vienen dadas por BAADEKAS – MOLOSENSKY.

Supongamos que se quieren transformar las coordenadas elipsoidales $(\varphi, \lambda, h)_{ED50}$ al elipsoide WGS-84 (Fig. 304).

En primer lugar, hay que transformar las coordenadas elipsoidales $(\varphi, \lambda, h)_{ED50}$ a coordenadas cartesianas $(X, Y, Z)_{ED50}$ siguiendo la expresión:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (n+h+H)\cos\varphi\cos\lambda \\ (N+H+h)\cos\varphi sen\lambda \\ \left(\frac{b^2}{a^2}N+H+h\right)sen\varphi \end{bmatrix}$$

Donde ***N*** representa el valor de la Gran Normal, ***H*** la ondulación del Geoide, ***h*** la cota ortodrómica y ***e*** la excentricidad.

A continuación hay que pasar de coordenadas cartesianas ED-50 a cartesianas WGS84.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{WGS84} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \mu[R]\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ED50}$$

Donde X_0, Y_0, Z_0, son las coordenadas del centro de masas, μ es el factor de escala y [R] es la matriz de rotaciones, ya que implica rotación alrededor de los 3 ejes.

Resta efectuar la transformación de las coordenadas cartesianas en WGS-84 a coordenadas elipsoidales en el mismo sistema de referencia.

En el sistema ED-50 existe un nivel de referencia para las cotas ortométricas, por ejemplo en España todas las cotas están referidas al nivel medio del mar en Alicante.

A diferencia del ED-50, en el sistema WGS-84 no existe el concepto de cota ortométrica, es decir las alturas de los puntos del espacio se dan en metros medidos a lo largo de la normal al elipsoide WGS-84 y desde la superficie de éste hasta el punto en cuestión.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (n+h)\cos\varphi\cos\lambda \\ (N+h)\cos\varphi\,\mathrm{sen}\,\lambda \\ \left(\dfrac{b^2}{a^2}N+h\right)\mathrm{sen}\,\varphi \end{bmatrix}$$

Debido a que la ondulación del Geoide sólo puede conocerse con una exactitud muy limitada, los 7 parámetros de transformación no gozan de gran validez para grandes extensiones.

A efectos de navegación, las cartas náuticas en el Sistema de referencia ED-50 incluyen, en su tarjeta, los incrementos de latitud y longitud a sumar a las coordenadas obtenidas por el receptor GPS (Sistema de referencia WGS-84), para obtener las coordenadas en ED-50, es decir, tal como se leen en la carta. Estos parámetros se han demostrado que son válidos, a nivel peninsular, dentro de unos márgenes de ± 7 metros.

MENSAJES DE NAVEGACIÓN (307).

Más adelante se verá la construcción de las señales del satélite. De momento se puede decir que el mensaje de navegación consiste en la codificación digital de una serie de datos que el receptor necesita para determinar: posición del satélite, el estado de su reloj, los modelos de propagación Ionosférica, estado de salud del satélite, etc; y por último una posición "grosera del resto de satélites de la constelación.

MÉTODOS DE SEGUIMIENTOS DE UN SATÉLITE (308).

El problema consiste en comparar las medidas tomadas a un satélite por observación a lo largo de su trayectoria y compararlas a un modelo matemático representando la trayectoria teórica del satélite.

Conocida a priori una estimación de los parámetros orbitales, el problema es corregir estas estimaciones como una función de las medidas obtenidas para la observación. El número de medidas obtenidas es mucho mayor que el número de parámetros orbitales que tienen que ser deducidos, así pues, el proceso de estimación tiene una alta probabilidad y un error mínimo.

Desde los primeros tiempos de la observación celeste utilizando telescopios, cada observación consistía en la medida de dos magnitudes escalares (ascensión recta y declinación) y son necesarias al menos tres observaciones para determinar la órbita del objeto observado. Con el RADAR, además de las dos magnitudes escalares, se puede obtener la medida de la distancia (midiendo el tiempo de ida y vuelta de la señal transmitida por el RADAR y reflejada por el blanco); conocida la posición del RADAR en la superficie

terrestre, se obtiene el vector de posición del objeto observado. Actualmente, los métodos empleados para la determinación de la órbita de un satélite se basan en:

- La medida de la distancia:

  La medida de la doble distancia al satélite (two way) puede ser realizada midiendo el tiempo de tránsito de un pulso muy estrecho o alternativamente midiendo la diferencia de fase entre la señal transmitida y la señal recibida en el punto donde se haga la medida, que puede estar en tierra o a bordo del satélite.

- La medida del Doppler:

  Con la medida del desplazamiento Doppler se pueden conseguir velocidades muy precisas del satélite. Este sistema fue el utilizado en el sistema de Posicionamiento TRANSIT, precursor del GPS.

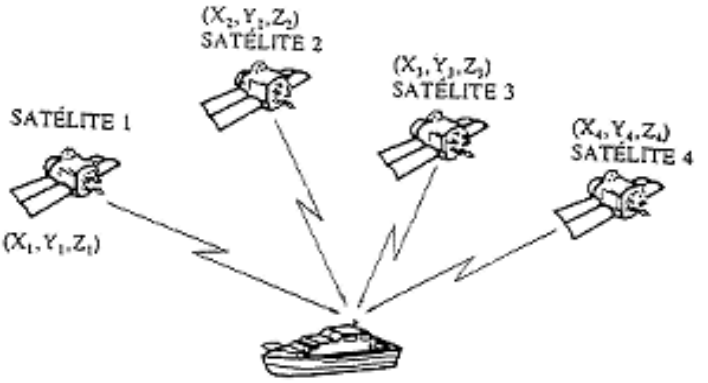
La medida de la distancia es particularmente útil para determinar rápidamente la posición del satélite en su órbita, mientras que la medida Doppler es más útil para medir los cambios de velocidad.

EL GPS: HISTORIA, FASES DE SU DESARROLLO Y DIFERENTES SEGMENTOS (309).

El **Sistema de Posicionamiento Global**, conocido también como GPS, es un sistema militar de navegación basado en 24 satélites, que proporcionan posiciones en tres dimensiones, velocidad y tiempo, las 24 horas del día, en cualquier parte del mundo y en todas las condiciones climáticas. Al no haber comunicación directa entre el usuario y los satélites, el GPS puede dar servicio a un número ilimitado de usuarios.

El sistema se basa en la medida simultánea de la distancia entre el receptor y al menos 4 satélites ofreciendo las siguientes informaciones:

- Posición del receptor.
- Referencia temporal muy precisa.



Las distancias entre el receptor y el satélite se obtienen por medio del retardo temporal entre que el satélite envía la señal hasta que el receptor la recibe:

- Por cada satélite se obtiene la ecuación de un esferoide (1 ecuación por cada satélite).
- La intersección de todos estos esferoides origina la posición del usuario. (Fig. 305).

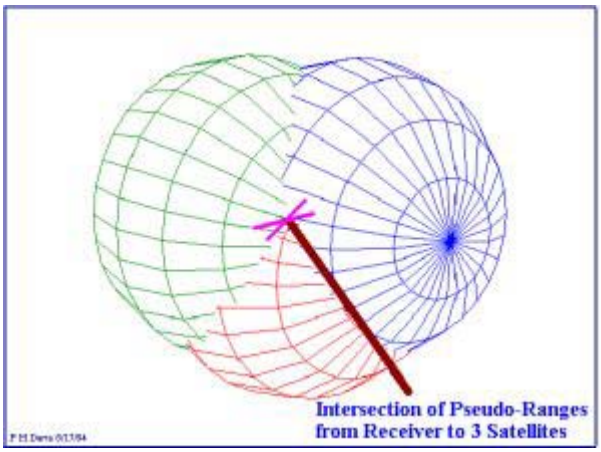


Fig. 305

La navegación satélite surge como un elemento más dentro de la carrera espacial USA-URSS en la época de la guerra fría. En base de las observaciones efectuadas por los norteamericanos de las transmisiones de un satélite SPUTNIK soviético se inicia el primer sistema, conocido como TRANSIT, que comienza a desarrollarse en 1950 y queda operativo en 1.964.

A lo largo de una década se utiliza el sistema para avanzar en el conocimiento de temas fundamentales como son la geodesia, gravimetría, magnetometría, propagación de ondas electromagnéticas, etc.

Se avanza en el estudio del desarrollo del concepto Diferencial, con el establecimiento de estaciones terrestres y emisión de correcciones.

Pero el Sistema TRANSIT poseía una serie de defectos: La situación obtenida no era continua, sucediendo únicamente cuando existe paso de satélite; la situación obtenida es bidimensional, las mediciones únicamente están basadas en el efecto Doppler, en los Polos se carecía de cobertura, etc.

En 1973, dirigido por el Departamento de Defensa de Estados Unidos, y unificando dos proyectos de la Armada y la Fuerza Aérea, comienza el desarrollo de un nuevo sistema de navegación por satélite el ***Sistema de Posicionamiento Global NAVSTAR*** (GPS).

Al ser un sistema que supera las limitaciones de la mayoría de los sistemas de navegación existentes, el GPS consiguió gran aceptación entre la mayoría de los usuarios. Desde los primeros satélites, se ha probado con éxito en las aplicaciones de navegación habituales.

Como puede accederse a sus funciones de forma asequible con equipos pequeños y baratos, el GPS ha fomentado muchas aplicaciones nuevas.

Los satélites GPS llevan relojes atómicos de alto grado de precisión. La información horaria se sitúa en los códigos de transmisión de los satélites, de forma que un receptor puede determinar en cada momento en cuánto tiempo se transmite la señal. Esta señal contiene datos que el receptor utiliza para calcular la ubicación de los satélites y realizar los ajustes necesarios para precisar las posiciones. El receptor utiliza la diferencia de tiempo entre el

momento de la recepción de la señal y el tiempo de transmisión para calcular la distancia al satélite. El receptor tiene en cuenta los retrasos en la propagación de la señal debido a la ionosfera y a la troposfera. Con tres distancias a tres satélites y conociendo la ubicación del satélite desde donde se envió la señal, el receptor calcula su posición en tres dimensiones.

Sin embargo, para calcular directamente las distancias, el usuario debe tener un reloj atómico sincronizado con el Sistema de Posicionamiento Global. Por bueno que sea el reloj del receptor, los errores de éste comprometen seriamente la exactitud de la medición (un error de 1 μseg equivale a 300 metros de error en distancia) (Fig. 306).

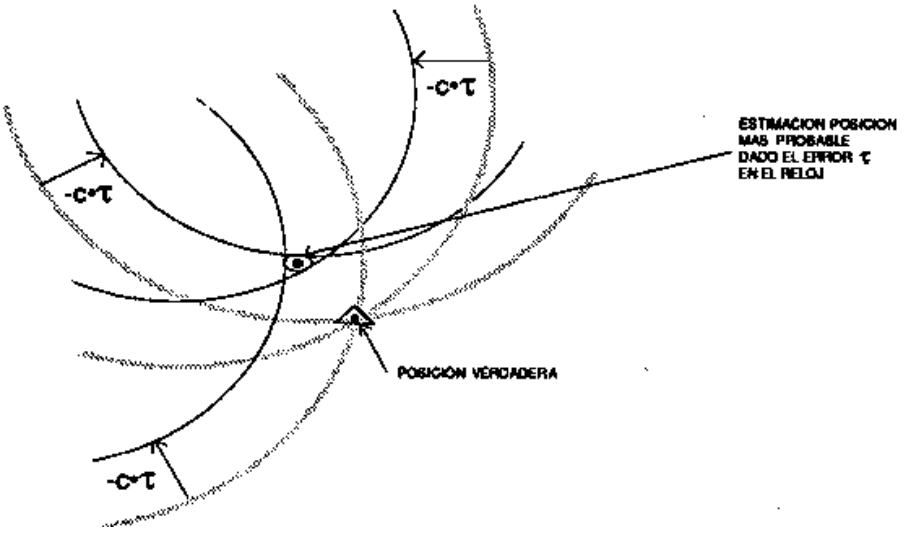


Fig. 306

Obsérvese lo que sucedería si el reloj del receptor estuviera adelantado una cantidad τ; las distancias medidas resultarían cortas en **cτ**, lo que conduciría a otra solución para las coordenadas del observador.

Midiendo desde un satélite adicional se evita que el receptor necesite un reloj atómico. El receptor utiliza cuatro satélites para calcular la latitud, la longitud, la altitud y el tiempo.

El Sistema de Posicionamiento Global consta de tres Segmentos: espacio, control y usuario.

Segmento espacial.

El segmento espacio incluye los satélites, los cohetes Delta y las lanzaderas que lanzan los satélites desde Cabo Cañaveral en Estados Unidos. La energía la proporcionan dos paneles solares, por lo que los satélites se orientan continuamente dirigiendo los paneles solares hacia el Sol, así como también van provistos de baterías de reserva para periodos de corta duración. Las antenas giran hacia la Tierra, emitiendo con una potencia de 700 W. Incorporan cuatro relojes atómicos de cesio, que tiene una estabilidad menor de 1 segundo en 30.000 años.

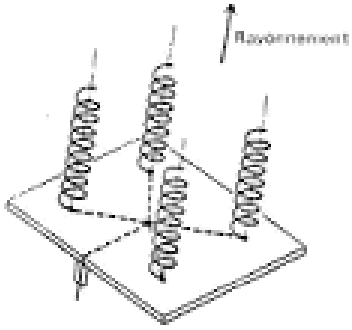


Fig. 307

La antena es un array helicoidal, con polarización a derechas y de 15 dB de ganancia. (Fig. 307)

La vida media de los satélites es de aproximadamente 7.5 años para los satélites del Bloque II, al cabo de este tiempo hay que sustituirlo. Actualmente los satélites son de los bloques II, IIA y IIR.

La constelación de satélites está formado por 24 satélites, 3 de ellos de reserva. En un principio se ideó un sistema de 21 satélites, también con 3 de reservas, pero con esté número la cobertura en algunos puntos de la superficie terrestre no era buena.

Las órbitas de los satélites con casi circulares, con una excentricidad de 0,03 a 0,3, y situadas a una altura media de 20.000 Km. (Semieje a = 26.560 Km) (Fig. 308)

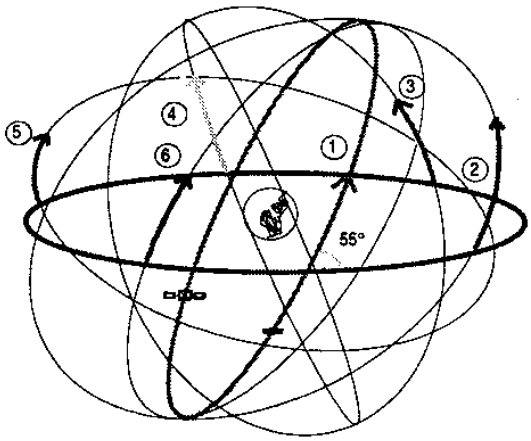
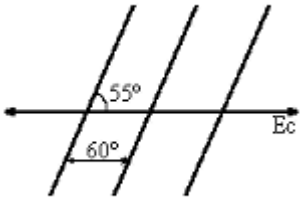


Fig. 308

Los planos orbitales, que son 6 y están uniformemente repartidos por el espacio, 60º de separación; tienen una inclinación de 55º respecto al plano del Ecuador. Dentro de cada plano orbitan 4 satélites equidistantes. Fig. 309

El periodo de rotación de cada satélite es de 12 horas sidéreas, o sea, 11 horas 58 minutos.



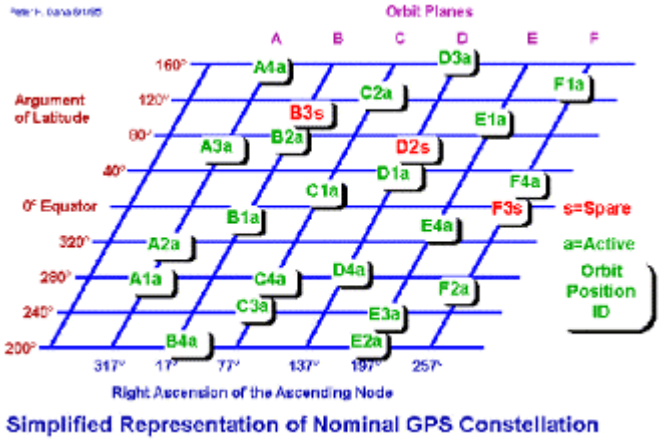
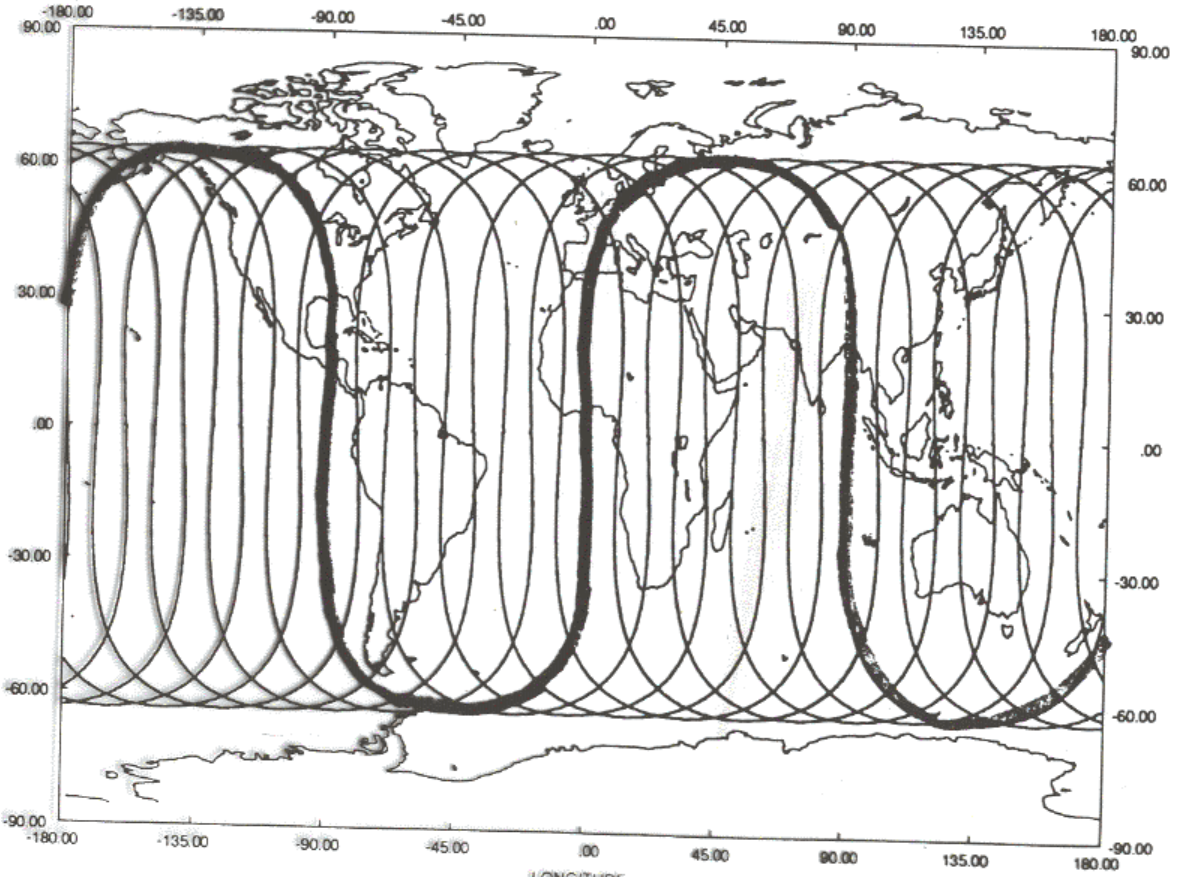


Fig. 309

Con esta distribución espacial:

- El sistema está diseñado de tal forma que sobre cualquier punto de la superficie terrestre se ven al menos 4 satélites, lo que permite obtener siempre situación en tres dimensiones más una ecuación de tiempo. (Fig. 310).



- La altitud minimiza los efectos de rozamiento, lo que permite reducir las variaciones en las órbitas y una mayor vida del satélite; permite concentrar la energía de transmisión hacia la Tierra, mejorando la relación señal / ruido; y reduce los efectos de las perturbaciones locales en el campo gravitatorio.

- La preparación de las observaciones se simplifica, ya que un gráfico de la constelación sirve para varios días, con tal de corregir las horas de paso por tantos múltiplos de 4 minutos como días transcurren.

El Departamento de Defensa Norteamericano asegura la puesta en órbita de los satélites, su mantenimiento y seguimiento, promulgando los formatos de las señales de información a través de documento público, permitiendo a la industria privada el desarrollo y comercio de los receptores.

Fig.

Segmento de Control. (Fig. 311)

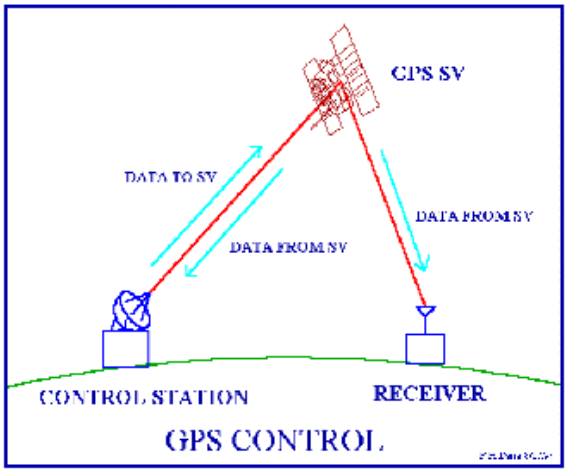


Fig. 311

El segmento de control incluye estaciones situadas próximas al Ecuador:

- ✓ La **estación de control principal** en la base de las Fuerzas Aéreas Falcon, en Colorado Springs, Estados Unidos. Esta estación computa modelos del campo gravitatorio terrestre, así como de los relojes, tanto de los satélites como los de tierra, y modela todos los efectos físicos que producen variaciones de algunos metros en las posiciones de los satélites en sus órbitas con respecto a la órbita de Kepler. En concreto, sobre la base de datos de 6 horas previas, se pueden determinar parámetros orbitales válidos para las siguientes dos horas; estos parámetros orbitales son inyectados a los satélites desde las estaciones de carga, para que a su vez sean difundidos por estos a los navegantes dentro del "mensaje de navegación" que cada satélite emite. Esta estación se encarga, en definitiva, de calcular las efemérides de cada uno de los satélites.

- ✓ Existen **3 estaciones de carga** situadas en Diego García, Isla Ascensión, Kwajalein. Su misión es la de transmitir datos y comandos a los satélites y recibir las señales de los satélites, que luego transmiten a la estación de control principal. Para sus transmisiones emplean la banda S con un canal ascendente en 1783.74MHz, y descendente en 2227.5 MHz.

- ✓ Existen también **5 estaciones monitoras**, situadas en Hawaii y junto a las estaciones de Control y Carga, cuya misión es controlar el estado y posición de los satélites. Reciben las señales transmitidas por los satélites y a partir de ellas obtienen información para poder calcular las efemérides de los mismos. Esta información es transmitida a la estación de control.

Global Positioning System (GPS) Master Control and Monitor Station Network

Segmento de Usuarios.

Está formado por los receptores GPS, siendo las funciones de los mismos:

- ✓ Sintonizar las señales emitidas por los satélites.
- ✓ Decodificar el mensaje de navegación.
- ✓ Medir el retardo de la señal (desde el transmisor hasta el receptor) a partir de los cuales calculan la posición.
- ✓ Presentar la información de la posición en la que se encuentra (3D ó 2D).

EL TIEMPO GPS (310).

En todo el sistema, la sincronización horaria es esencial; por ello, todas las estaciones de control disponen de relojes atómicos extremadamente estables. A su vez, la Estación de Control Principal de Colorado Springs está conectada a una batería de relojes atómicos del Observatorio Naval de Washington (patrón oficial de hora en los EE.UU)

El tiempo oficial del sistema es mantenido por el conjunto de los relojes de las estaciones de control, y se conoce como **sistema de tiempo GPS**. Por comparación continua con la hora UTC, se mantiene una correspondencia constante entre ambos sistemas de tiempo, difiriendo como máximo en 1μ seg.

Los satélites disponen de relojes atómicos de cesio a bordo, como ya se ha dicho, y aunque son extremadamente estables, en especial en un ambiente tan poco perturbado como el que disfrutan, tienen diferentes desviaciones, que son igualmente calculadas por el Segmento de Control. Esto les permite calcular los coeficientes de un polinomio de 2º grado que modela el desvío del reloj del satélite con relación a la hora GPS. Estos datos son también "inyectados" a los satélites para su redifusión en el mensaje de navegación. Todo ello permite que el receptor del usuario pueda corregir, de forma automática, sus mediciones, como si el reloj del satélite estuviera perfectamente alineado con el tiempo GPS.

ESTRUCTURA DE LA SEÑAL EMITIDA. OBSERVABLES (311).

El Sistema GPS fue concebido como sistema de navegación en tiempo real. Por tanto, las señales que transmites los satélites deben cumplir una serie de requisitos mínimos para asegurar ciertos niveles de exactitud en la determinación de la posición del usuario en tiempo real.

Para permitir la determinación de la posición en el espacio es necesario conocer:

- ➢ La identificación del satélite que emite una cierta señal.
- ➢ La posición del satélite en el momento de la emisión de esa señal.
- ➢ Medir la distancia satélite/receptor en la *"época"* de la medición.

Con el empleo de 4 satélites el receptor calcula las distancias respectivas. En realidad no se miden distancias, sino pseudodistancias.

Se llama distancia a:

$$R_i = dist(Sat_i, Rxor)$$
$$R_i = \Delta T \bullet c$$

que será distancia real, sin ningún tipo de desviaciones de los relojes.

Se llama pseudodistancia, a la que mide el receptor sin tener en cuenta el sincronismo entre los relojes del receptor y satélite:

$$R_i' = \Delta T_{medido} \bullet c$$

donde el tiempo medido es:

$$\Delta T_{medido} = \Delta T + \tau$$
$$R_i' = R_i + \varepsilon \Rightarrow \varepsilon = c \bullet \tau$$

Donde $\boldsymbol{\varepsilon}$ es el error producido como consecuencia de la deriva existente entre el reloj del satélite y el reloj del receptor.

Así pues, la distancia real (que es la que realmente interesa) será:

$$R_i = R_i' - c\tau$$

Las coordenadas de cada satélite son conocidas, tenemos 4 ecuaciones de la forma:

$$(x_i - U_x)^2 + (y_i - U_y)^2 + (z_i - U_z)^2 = \left(R_i' - c\tau\right)^2$$

para i = 1,..,4 (x_i,y_i,z_i) coordenadas del satélite se obtienen 4 ecuaciones con 4 incógnitas, obteniéndose una solución única.

Para facilitar su resolución se pide al usuario que introduzca una posición aproximada:

$$\left(U_{x_0}, U_{y_0}, U_{z_0}\right)$$

Desarrollando se llega a un sistema con 4 ecuaciones y 4 incógnitas que se van a calcular conociendo las distancias a 4 satélites.

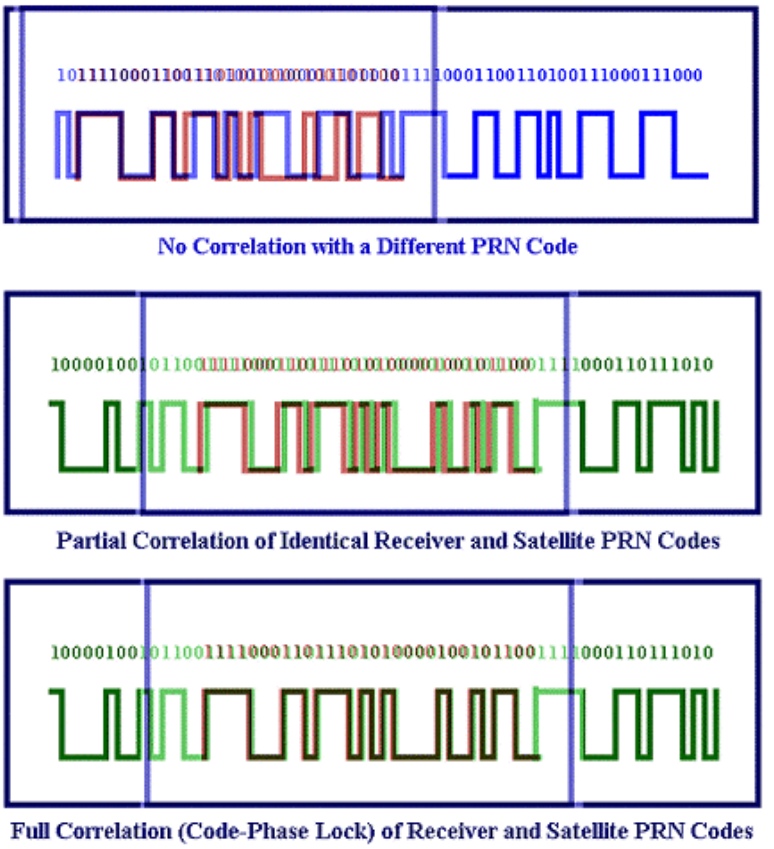
Si hay más de 4 satélites visibles se calculan las pseudodistancias respecto a todos los satélites visibles, obteniendo así un sistema con más ecuaciones que incógnitas, lo que simplifica el cálculo de la posición.

Cada satélite genera un "***código pseudoaleatorio***" o secuencia de transiciones de +1/-1 propio de cada satélite que permite la identificación del mismo. Este código pseudoaleatorio modula una frecuencia portadora que es idéntica para todos los satélites. La transmisión del

código se inicia a determinadas horas exactas (GPS), y a esa misma hora, según el reloj del receptor, éste empieza a generar una réplica del código del satélite en cuestión.

El receptor correla o relaciona la señal recibida con la propia, y el tiempo que tarda en correlacionar ambas señales es el mismo que tarda la señal en trasladarse del satélite al receptor.

Es muy importante que el receptor y el satélite estén sincronizados para que la correlación comience cuando llega la señal procedente del satélite. De esta forma calcularemos el retardo. A continuación vemos unas figuras que representan diferentes instantes de la correlación entre dos códigos:



Además del código pseudoaleatorio, la frecuencia portadora es también modulada por una secuencia de datos digitales que contienen información sobre la posición instantánea del satélite y que se conoce como “mensaje de navegación”.

Por tanto ya disponemos: de identificación del satélite (por su código específico), de la medición (por correlación) y de la posición del satélite (implícito en el mensaje de navegación).

Pero existe aún otra medición: el efecto Doppler sobre la frecuencia de la portadora, medida que va a permitir conocer la velocidad relativa entre emisor y receptor.

Cada satélite transmite realmente dos códigos diferentes: el código C/A (“Coarse/Acquisition” ó “Clear Acquisition”) que admite exactitudes en la medición de

distancias del orden de decenas de metros (< 70 metros); y el código P ("Precision") admite en cambio exactitudes del orden de metros.

Esto se traduce en dos servicios que proporciona el Sistema:

- **SPS ("Standard Positioning Service),** disponible para todos los usuarios, está basado en la utilización exclusiva del código C/A. A la pobre resolución de la medición, recordemos una precisión de decena de metros, se añade la posibilidad que el Departamento de Defensa Norteamericano introduzca la *"disponibilidad selectiva"* (SA, "Selective Availability"), lo que en la práctica se traduce en la inyección al satélite de parámetros orbitales degradados artificialmente, así como errores artificiales en el reloj del satélite.

  La idea de este error intencionado es asegurar que las fuerzas hostiles a los EE.UU. no utilicen el GPS contra sus propios intereses.

  La Disponibilidad Selectiva se originó el 25 de Marzo de 1990 con la puesta en órbita de los satélites del Bloque II. El nivel de degradación fue reducido en septiembre de 1990 durante el conflicto del Golfo, siendo reactivado a pleno nivel el 1 de julio de 1991.

  El Departamento de Defensa puede:

  - Introducir ruido en los relojes de los satélites, reduciendo la precisión de la medida del posicionamiento.

  - Manipular los datos enviados por las efemérides de los satélites

  Con la SA activada la exactitud en la posición horizontal es menor de 100 metros con un 98% de nivel de confianza.

  La disponibilidad selectiva fue eliminada, temporalmente, el 1 de Mayo del 2000.

- **PPS (Precise Positioning Service")**, destinado inicialmente a las FAS's de los EE.UU y de aquellos países aliados, que bajo acuerdo intergubernamental, sean autorizados.

  Este servicio utiliza el código P en combinación con el C/A, permitiendo una mejor resolución en la medida.

  El código P es también de libre acceso, pero puede estar sujeto a restricciones para su utilización, mediante medidas antidecepción (A-S, "Antispoofing"), que encripta el código, pasando a denominarse código Y. A partir de entonces, únicamente los receptores que disponen del mecanismo decodificador pueden beneficiarse del máximo nivel de exactitud del PPS.

  El PPS garantiza exactitudes de 16 metros de error esférico probable. Obsérvese la precisión que está dada en tres dimensiones, en tanto que el SPS lo estaba únicamente en dos.

Por todo lo visto, se observa que la señal GPS es ciertamente compleja, toda vez que debe satisfacer multitud de requerimientos:

- Permitir dos servicios con distintos niveles de exactitud.
- Identificar al satélite que envía la señal.
- Transmitir información sobre posición, reloj, etc. del satélite en cuestión.
- Anular, en los posible, los efectos de propagación de la señal, a través de la atmósfera, sobre la medición.
- Permitir la medición tanto de la distancia como la velocidad relativa satélite/receptor.

Existe una frecuencia básica o patrón de **f_0 = 10,23 MHz**, generada en un oscilador controlado por los relojes atómicos del satélite, de ella se obtendrán todas las frecuencias y señales.

Los efectos relativistas son importantes en el Sistema GPS, pero afortunadamente pueden solucionares. La frecuencia patrón f_0 se ve afectada tanto por la llamada relatividad especial (la velocidad del satélite), que atrasaría los relojes de los satélites; y la relatividad general, de más peso, y que viene dada por la diferencia de potencial gravitacional entre la posición relativa del satélite y la superficie terrestre, que adelantaría los relojes de los satélites. El resultado final es que los relojes adelantarían 38,3 μseg. diariamente, lo que equivaldría a un error de 11 Km en distancia. Este efecto se corrige variando la frecuencia en una cantidad Δf = 0 0,0045674, obteniéndose una frecuencia de reloj de 10,22999999545 MHz (Frecuencia nominal 10,23 MHz).

Frecuencias de transmisión:

Existen dos **portadoras**, ambas en la banda L de microondas, en la zona del espectro reservada a sistemas de navegación.

Ambas se obtienen de multiplicar por 154 y 120, respectivamente, la frecuencia f_0.

PORTADORA	FRECUENCIA	LONG. DE ONDA
L1	154 x f_0= 1575,42 MHz	19,04 cm.
L2	120 x f_0= 1227,60 MHz	24,44 cm.

Se han escogido éstas dos frecuencias porque, estando en la zona del espectro menos afectada por alteraciones en la propagación a través de la ionosfera, están lo suficientemente separadas como para permitir, en receptores bifrecuencia, el cálculo del retraso ionosférico.

Todos los satélites transmiten con las mismas dos frecuencias, por lo que no es necesario sintonizar cada uno de los satélites.

Sobre estas frecuencias se modulan el resto de señales.

Códigos pseudoaleatorios:

Como ya se ha visto existen dos códigos C/A y P ó Y.

Un código pseudoaleatorio consiste en una secuencia ordenada y fija de transiciones entre dos estados (1, -1). Se llama "duración del chip" al intervalo entre transiciones y *"frecuencia del código"* a la inversa de la duración del chip. Los códigos se generan de forma automática y se repiten una vez que llegan a su fin.

Código C/A:

Está modulado sobre la portadora L1 y para obtenerlo se multiplica la salida de dos códigos de 1023 bits, empleando una frecuencia de reloj de $f_0/10$ = 1,023 MHz.

La duración del chip será:

$$1/f = \frac{1}{1{,}023 \times 10^6} = 1\mu seg$$

El tiempo de duración del código es:

$$T_c = 1023 \frac{10^{-6}}{1{,}023} = 1ms$$

Existen tantos códigos C/A como satélites estén operando, y teniendo en cuenta la duración del código (1 mseg), ya todos los satélites se autorrepiten, inicialmente existe una ambigüedad en distancia entre el satélite y el receptor, con un valor de ambigüedad de:

$$R_{\max noambigua} = c \bullet T_c = 300km$$

Este es motivo por el cual cuando se inicializa el Sistema, en el receptor hay que introducir una situación estimada que diste menos de 150 Km de la verdadera.

La distancia equivalente a la duración de un bit es:

$$R_{1bit} = c \bullet T \cong 300m$$

La precisión en la medida del retardo está asociada con el tiempo duración de 1 bit. Si se ha estimado que la precisión medida del retardo es de 1% aproximadamente, entonces el error instrumental en el cálculo de las pseudodistancias es de 3 metros.

Código P:

El código P modula ambas portadoras L1 y L2. La frecuencia de reloj que se emplea es f_0 = 10,23 MHz, y es único para todos los satélites

La longitud de los dos códigos que se multiplican para obtener el código P es de:

P_1: 15345000 bits
P_2: 15345034 bits

Obteniéndose una longitud del código de:

$$P_1 \text{ x } P_2 = 2{,}35\ 10^{14} \text{ bites}$$

La duración del chip será:

$$1/f = \frac{1}{10{,}23 \times 10^6} = 0{,}1 \mu seg$$

El tiempo de duración del código es:

$$T_c = 2{,}35 \times 10^{14} \frac{10^{-6}}{10{,}23} = 266{,}4 d$$

Debido a la extremada duración del código, 266,4 días, se fragmenta en segmentos de una semana de duración, resultando 37 segmentos diferentes que se asignan, cada uno de ellos, a un satélite. Al finalizar el segmento asignado al satélite repite de nuevo.

Con el código P no hay ningún tipo de ambigüedad, y el receptor únicamente corre una determinada parte del código.

La distancia equivalente a la duración de un bit es,

$$R_{1bit} = c \bullet T \cong 30m$$

La precisión en la medida del retardo está asociada con el tiempo duración de 1 bit. Si se estima que la precisión medida del retardo es de 1% aproximadamente, entonces el error instrumental en el cálculo de las pseudodistancias es de 0,3 metros.

Debido a la longitud de los segmentos del código P, los receptores que miden los dos códigos, cuando se inicializan, utilizan el código C/A para hacer una medición inicial grosera, transfiriéndose posteriormente al código P. Hay que tener en cuenta que ambos códigos están sincronizados, ya que son generados a partir de la frecuencia patrón f_0.

En la siguiente tabla se resumen las características de los códigos pseudoaleatorios generados en el sistema GPS.

CODIGO	FRECUENCIA	DURACION DEL CHIP	LONGITUD	DURACION
C/A	$f_0/10$ = 1,023 MHz	1µs (~ 300 m)	1023 chips	1 ms
P	f_0 = 10,23 MHz	0,1µs (~ 30 m)	$2{,}35 \cdot 10^{14}$ chips	266,4 días

La precisión del Sistema depende de dos parámetros:

- Exactitud en la determinación de las pseudodistancias.
- Geometría de los satélites.

La precisión se define dentro de un radio de la esfera o círculo (3D/2D) en la que estarán el 50% de las medidas.

	C/A (con disp select)	P
3D --	75.7 m	13.5 m
2D --	43 m	7.7 m
Vertical	49.7 m	8.8 m

MENSAJE DE NAVEGACIÓN (NAV DATA) (312).

A ambas modulaciones (códigos P y C/A) de las dos portadoras se añaden los datos que constituyen el llamado *"mensaje de navegación"*, el cual está constituido por los siguiente elementos:

- Efemérides, parámetros orbitales del satélite, que permiten el posicionamiento del receptor.
- Información de tiempo (GPS) y estado absoluto del reloj del satélite.
- Modelo para la corrección de los errores del reloj del satélite.
- Modelo para la corrección de los errores producidos por la propagación en la ionosfera y la troposfera.
- Información sobre el estado de salud del satélite, información sobre el grado de fiabilidad de los datos transmitidos por el satélite.
- Almanaque, información de los parámetros orbitales de la constelación de satélites.

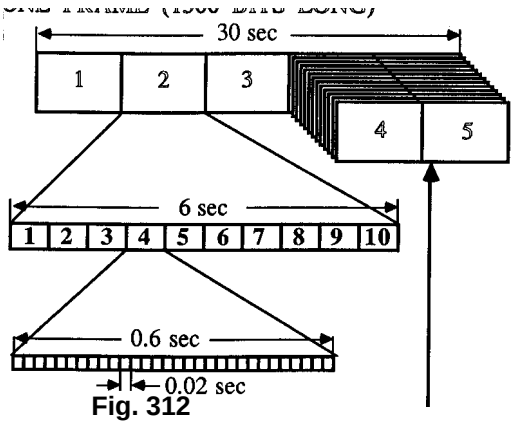


Fig. 312

El mensaje de navegación es generado en una frecuencia fundamental de $f_0/204600$ = 50 Hz o 50 bits por segundo.

Un mensaje completo está compuesto por 25 bloques de 1500 bits cada uno, repitiéndose cada bloque por completo cada 30 seg (Fig. 312).

Cada bloque está dividido en 5 páginas de 300 bits cada una de ellas y de 6 seg de duración.

Cada página está su vez subdividida en 10 palabras de 30 bits.

Luego a una velocidad de transmisión de 50 bits se tarda 6 seg en transmitir una página, 30 seg en un bloque y 12,5 min. en transmitir el mensaje completo.

Las páginas 1, 2 y 3 se transmiten en cada bloque. Las páginas 4 y 5 se renuevan y transmiten 25 veces, una en cada uno de los bloques.

Cada página se inicia con la palabra *"telemetría"* (TLM) que contiene los datos de sincronización de códigos y mensajes de diagnósticos. (Fig. 313)

La segunda palabra de cada página es *"hand over"* (entrega)(HOW), que permite identificar en que fragmento del código P ó Y se encuentra la generación del código, en múltiplos de 1,5 seg, desde que se inició su generación, a las 00 horas del domingo previo, se conoce como efemérides difundidas. Permiten calcular la situación del satélite con una precisión de entre 5 y 10 metros.

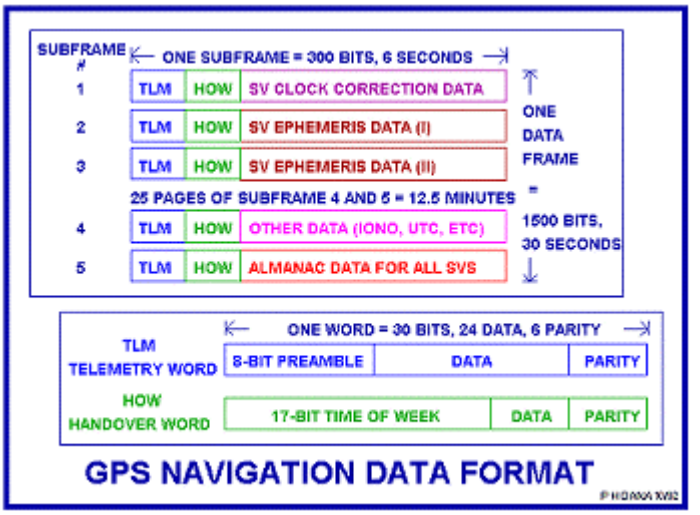


Fig. 313

El resto de la *primera página* contiene los coeficientes de un polinomio de 2º grado que permiten modelar el estado absoluto del reloj del satélite, así como la edad de los datos (última actualización).

La *segunda y tercera páginas* consisten en todos los parámetros que definen la órbita del satélite, es lo que se conoce como efemérides difundidas. Permiten calcular la situación del satélite con una precisión de entre 5 y 10 metros.

El cálculo de las efemérides difundidas está basado en los datos adquiridos por las estaciones de control durante más de 6 horas. La predicción tiene una validez de 4 horas, aunque se actualiza cada dos horas.

Otro dato contenido en estas páginas es el que se conoce como "URA" (User Range Accuracy), que permite calcular un error estimado en la medida de la distancia debido a los errores en la posición del satélite y en el reloj del mismo. Esta cifra es solo estimativa, para el periodo de validez de las efemérides, expresada en metros, al 68% de probabilidad; es

decir, se estima que en el 68% de los casos, el segmento espacial contribuirá al error en la distancia medida una cantidad entre ± URA mt.

La *cuarta y quinta páginas* contiene información de ámbito militar, por lo tanto restringida y no accesible, además de los datos de *"almanaque"* de toda la constelación. Estas dos páginas van cambiando en cada bloque, cada 30 segundos, de tal manera que en cada transmisión presenta los datos de almanaque de cada uno de los satélites. (en la 4ª página del SVN 25 al 32 y en la 5ª del 1 al 24). Así por tanto serán necesarios 12,5 min. Para recibir datos de toda la constelación.

En la página 4ª también están contenidos los datos de un modelo de propagación de la señal a través de la ionosfera, de manera que permite al receptor minimizar sus efectos; así como una indicación si la opción A-S ("Antispoofing") está activada, y por tanto si ha de esperarse el código P o el Y.

Ambas páginas también dan indicación del estado de salud de los satélites, para decidir acerca de la utilización de sus mediciones.

Mensajes y avisos exteriores:

Conocida la constelación en un momento dado se puede calcular para otro instante sabiendo que se repite cada 24 horas sidéreas. Pero, a veces, los satélites han de ser recolocados de cuando en cuando, y mientras dura esta maniobra el estado de salud pasa a *"unhealthy"*. Esta circunstancia, junto con los parámetros de la órbita final en que va a quedar se publica por medio de Boletines, NANU's (Notice Advisory to Navstar Users).

Otro aviso que se publica regularmente son los eclipses de satélites, los cuales suelen tener una duración de 1 hora y se producen durante varios días seguidos.

RECEPTORES GPS (313).

Dada la estructura de la señal GPS:

$$L1(t) = a_1 P(t) D(t) \cos(f_1 t) + a_1 C/A(t) D(t) \text{ sen } (f_1 t)$$
$$L2(t) = a_2 P(t) D(t) \cos(f_2 t)$$

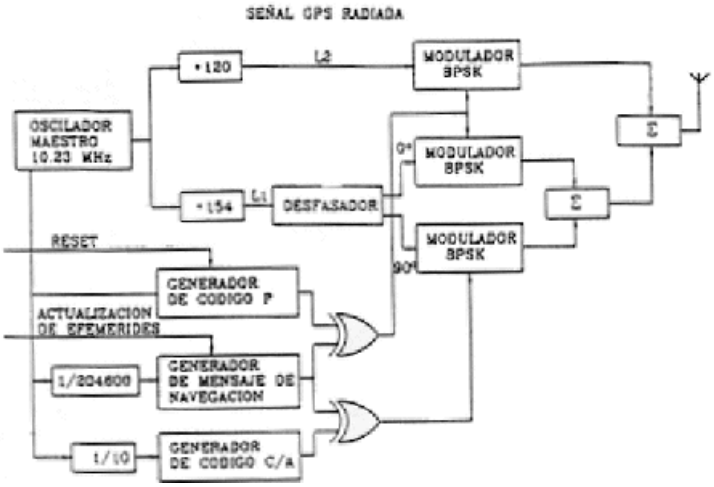
a_1 a_2 Amplitud de las ondas continuas L 1 y L2
f_1 f_2 son las frecuencias L1 y L2
P(t) y C/ A(t) representan los códigos P y C/ A
D(t) representa los datos de navegación

hasta 7 observables pueden ser determinados en un momento dado:

- ✓ Fase de las portadoras ϕ_{L1} y ϕ_{L2}.
- ✓ Desplazamientos Doppler sobre ambas portadoras.
- ✓ Pseudistancia sobre código C/A sobre portadora L1.
- ✓ Pseudistancia sobre código P portadoras L1 y L2.

Por tanto, hasta 7 mediciones **independientes**, en teoría, se pueden efectuar. De hecho, dependiendo del tipo de receptor, así podrán medirse unos u otros observables.

A la vista de la información de la señal GPS se puede dar una idea de los diferentes tipos de receptores.



Con relación a los observables:

1. *Receptores con canales de correlación de códigos (multicanales).* (Fig. 314)

   El satélite emisor de la señal es identificado por el receptor y genera la réplica del código correspondiente.

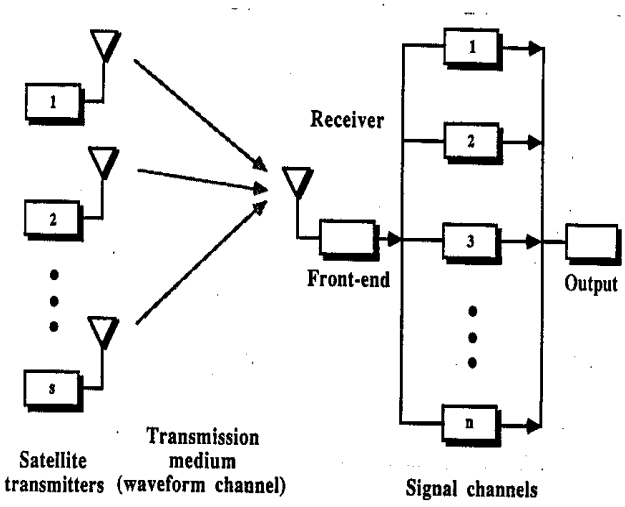


Fig. 314

Suelen estar compuestos por 5 canales, por los que recibe por cada uno las señales de los satélites que está siguiendo. Caso de seguimiento sobre 4 satélites, por el quinto recibe correcciones de error ionosférico.

Pueden trabajar sobre el código C/A ó sobre el C/A y P. En el caso de receptores bajo especificaciones militares, los canales asignados al código P han de estar dotados de los elementos necesarios para el seguimiento del código P encriptado (Código Y).

   Este tipo de receptores son los más comunes y pueden, generalmente, medir la fase de la portadora, con el objeto de suavizar la medida del código.

2. *Receptores que no emplean la medida del código.*

   Se han diseñado dos tipos de receptores que, al no efectuar la medida del código, no son capaces de identificar al satélite emisor de la señal que está midiendo:

2.1. *Los que elevan al cuadrado la señal recibida o de cuadratura ("Squaring Channel Receiver")* (Figs. 315 y 316):

La señal recibida modulada por códigos y datos, se multiplica en el receptor por sí misma, obteniéndose una señal continua de doble frecuencia en la que desaparecido la modulación.

Sobre esta continua se determina la fase.

El principal inconveniente de este tipo de receptores es que, al elevar al cuadrado la señal, también se eleva al cuadrado el ruido, con lo que se pierde precisión en la medida.

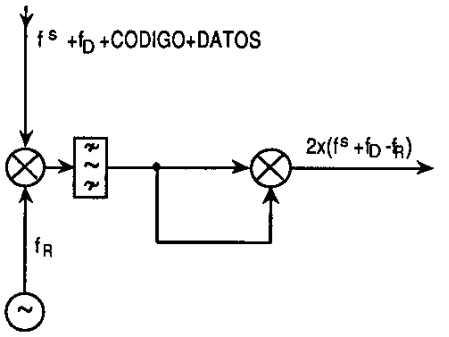


Fig. 315

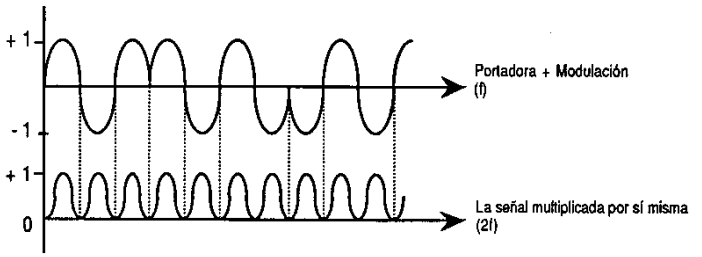


Fig. 316

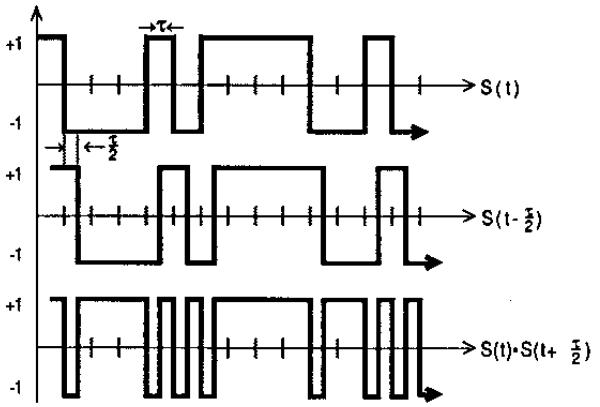


Fig. 317

2.2. *Los que miden la fase del código ("Code Phase Channel Receiver)* (Fig. 317):

Su funcionamiento está basado en la medida instantánea de la fase del código sea P o C/A. Consiste en multiplicar la señal recibida por sí misma, con un retardo equivalente a la mitad de la duración del "chip" del código correspondiente.

Un algoritmo permite determinar la frecuencia de esta señal producto.

Una onda continua de esta frecuencia, sincronizada con las transiciones de la señal producto, permite determinar la fase instantánea de esta señal, en momentos determinados por el reloj del receptor.

De esta forma se conoce la distancia al satélite dentro de los 300 metros para el código C/A y 30 metros para el P.

Con relación al tipo de seguimiento:

1. *Seguimiento continuo* de al menos cuatro satélites.

   Tienen capacidad para hacer seguimiento sobre, al menos, cuatro satélites, asignando un satélite a cada canal, continuamente. El proceso de la medición, ya sean medidas sobre el código o sobre la fase de la portadora, se efectúa al ritmo que se desee. Debidos a estas características de seguimiento continuo, los receptores de este tipo son muy complejos de diseño, y por tanto muy caros.

2. *Canales conmutados* que tienen uno o varios canales que hacen un seguimiento discontinuo de varios satélites (Fig. 318).

   Son receptores de arquitectura más sencilla, por lo que son más baratos; y el seguimiento del código se efectúa vía software. Dentro de este grupo existen dos tipos:

   2.1. *Multiplexados:*

   El tiempo que cada canal, normalmente suele llevar uno, dedica al muestreo de todas las señales a las que está dedicado es de 20 mseg., exactamente el periodo de duración de un bit del mensaje de navegación, por ello puede decodificar los mensajes de navegación de todos los satélites que está siguiendo en cierto tiempo. Suele tener 4 o más bucles de seguimiento (software), con lo que puede observar todos los satélites visibles.

   La complejidad software es mayor y se necesita un microprocesador muy potente.

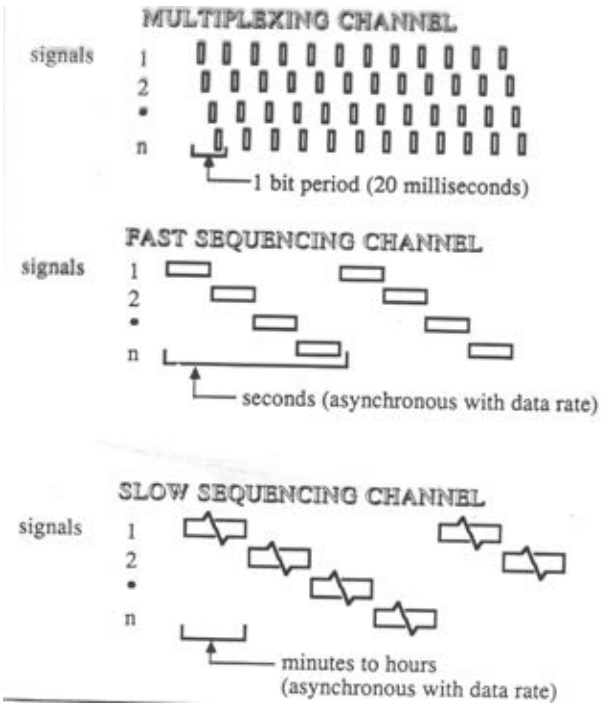


Fig. 318

   2.2. *Secuenciales:*

   Los pocos canales que posee están programados para que, siguiendo una secuencia, siga al mejor satélite a la vista extrayendo la medida. El tiempo que dedica el canal a cada satélite varía entre varios segundos (canal secuencial rápido) hasta varios minutos e incluso horas (canal secuencial lento). Las medidas suelen tener mejor resolución pero la recepción del mensaje de navegación no es completa. Para eliminar este inconveniente, suelen llevar un canal extra dedicado a recibir el mensaje de navegación. También puede dedicarse un periodo inicial del seguimiento para la lectura de los datos de todos los satélites, tras lo cual el proceso de medición puede iniciarse. Suele emplearse en aplicaciones de baja dinámica (barcos, navegación terrestre...).

Con relación a la frecuencia de la portadora:

1. *De frecuencia única ("single frequency receiver"):.*

   Sueles usar la frecuencia L1, y si son de correlación, trabajan únicamente sobre el código C/A. La mayoría de los receptores civiles son monofrecuencia. Son, por tanto, más baratos, y están influenciados por el retardo ionosférico.

2. *De Frecuencia doble ("dual frequency receiver"):*

   Suelen ser receptores bajo especificaciones militares y que trabajan con dos frecuencias L1 y L2, pudiendo, por tanto, efectuar medidas sobre los códigos C/A y P y sobre ambas portadoras. Suelen tener la posibilidad de descifrar el código Y. Por ello son más caros y corrigen el retardo ionosférico.

   Algunos receptores civiles, utilizados para fines geodésicos o hidrográficos son también bifrecuencia, pero adolecen de la posibilidad del descifrar el código Y en caso de activación de A-S ("antispoofing").

SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO (314).

Existen diferentes métodos de empleo del GPS para el posicionamiento:

- Los que emplean medición de Distancia sobre Código:
  - Modo de Punto o Absoluto:
    - ✓ Estático.
    - ✓ Cinemático.
  - Modo Diferencial.
- Los que emplean medición sobre Fase:
  - Relativo:
    - ✓ Estático.
    - ✓ Cinemático.
    - ✓ Semicinemático.
    - ✓ Pseudocinemático.
    - ✓ Estático Rápido.

Se debe distinguir entre posicionamiento *instantáneo*, cuando se usan las observables de una sola época de la observación para el cálculo de la posición y el tiempo de procesado es despreciable; y el posicionamiento *en tiempo real*, el cual requiere el procesado de observaciones efectuadas durante más de una época de observaciones. El GPS fue concebido como un instrumento de posicionamiento instantáneo, aunque puede efectuarse postprocesado de los datos adquiridos durante una sesión de observación

Para la resolución de la posición los receptores del Sistema GPS pueden utilizar dos modos de posicionamiento, principalmente, dependiendo de observación que haga a la señal que el satélite emite. Estos dos métodos son la medida sobre los códigos, correlación, o la medida de la fase de la señal.

Modo de Punto o Absoluto:

El posicionamiento de punto es la determinación de las coordenadas de un único punto, mediante observaciones de código de 4 o más satélites, utilizando un solo receptor.

- ✓ *Estático (Static point positioning):*

  Suele emplearse en receptores geodésicos para la determinación de un punto fundamental, por tanto están en posición estática, obteniéndose exactitudes de unos metros, dependiendo de la parte de la señal observada, tras un periodo determinado de observación. La solución que se obtiene es en tiempo real (postprocesado).

- ✓ *Cinemático (Kinematic point positioning):*

  Se usa para determinar la trayectoria del vehículo receptor. La exactitud esperable varía entre 10 y 100 metros dependiendo de factores tales como el código empleado, disponibilidad selectiva, "antispoofing".

Modo Diferencial:

Posicionamiento relativo basado en mediciones de código, con generación y transmisión instantánea de correcciones a las distancias medidas en el receptor de referencia; estas correcciones son automáticamente aplicadas a las medidas efectuadas en el receptor remoto.

Su exactitud está en el orden de algunos metros.

Modo Relativo:

El posicionamiento relativo se efectúa utilizando dos receptores que miden fase a los mismos satélites simultáneamente. Las coordenadas de uno de los receptores son conocidas, de manera que las del otro pueden determinarse con relación al primero. Implica postprocesado.

- ✓ *Estático (Static relative positioning):*

  Se utiliza para la determinación de redes geodésicas (sin movimiento). Los receptores efectúan mediciones de fases a los mismos satélites, uno de ellos situados en un punto de situación conocida. Cuando se utilizan dos receptores, el proceso se llama determinación de una línea de base simple; cuando hay más de dos receptores en operación, el proceso se conoce como determinación de múltiples líneas de base. Las exactitudes que se esperan van de 1 a 0,1 ppm (partes por millón) (1 mm en líneas de base de 10 Km), con periodos de observación de 1 a 2 horas.

- ✓ *Cinemático (Kinematic relative positioning):*

  Implica un receptor de referencia, fijo en un punto, y un segundo receptor móvil, efectuando ambos observaciones simultáneas de fase de la portadora. Pueden esperarse exactitudes de algunos centímetros y su utilidad está en la determinación continua de la posición de un vehículo. Necesita un proceso previo de inicialización.

✓ *Semicinemático ("Stop and go", "Semikinematic"):*

El receptor móvil se detiene en los puntos de interés por un tiempo breve, lo que permite hallar un promedio de las posiciones obtenidas en diferentes épocas, en cada estación. La trayectoria entre los puntos no tiene interés, pero hay que asegurar el "enganche" continuo de 4 o más satélites. Es un procedimiento muy empleado, puesto que cubre una gran cantidad de puntos de observación por sesión, con exactitudes centimétricas.

✓ *Pseudocinemático ("Pseudokinematic") o Estático Intermitente ("Intermittent static"):*

En este caso no es necesario mantener "*enganchados*" los satélites, pero se ha de estacionar en los puntos una segunda vez, una hora después de la inicial. El receptor puede incluso apagarse en el intervalo entre observaciones. Basta con unos 10 minutos de observación en cada extremo para obtener decímetros de exactitud.

✓ *Estático Rápido ("Rapid Static"):*

Combina la observación de ambos códigos y fase de ambas portadoras con lo que reduce el periodo de observación del posicionamiento relativo estático a 10 minutos, asegurando exactitudes del orden de 1ppm.

ERRORES SISTEMÁTICOS Y ALEATORIOS PRESENTES EN LAS OBSERVACIONES GPS (315).

Al igual que cualquier fenómeno susceptible de ser medido, la observación GPS está sujeta a distintos errores, sean sistemáticos o aleatorios, que condicionan y limitan la validez de los resultados obtenidos (Fig. 319).

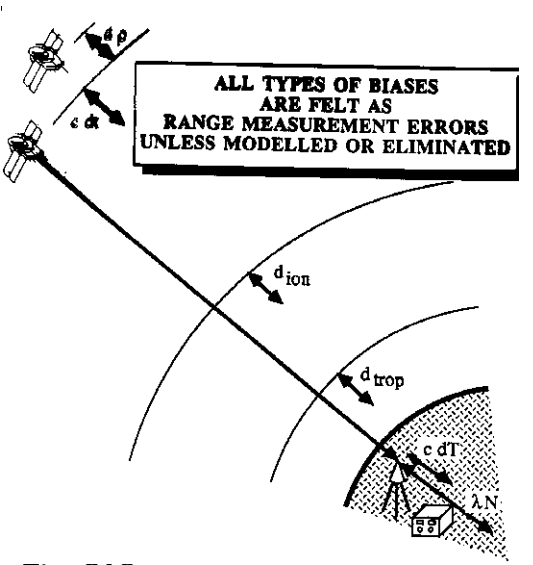


Fig. 319

Cualquier tipo de error origina un error en el posicionamiento.

Los errores, básicamente, se clasifican en:

Sistemáticos.

Aquello cuyas causas son conocidas y tienen corrección, sea por medio de una operación adecuada del instrumento de medida, sea aplicando un modelo matemático del error.

Accidentales o aleatorios:

De causas desconocidas o no, pero su comportamiento, en un instante determinado, no puede preverse de antemano. El único recurso que se tiene es cuantificar su alcance, lo que implica una limitación en la precisión de la medida. Esta limitación normalmente se expresa en forma de intervalo dentro del cual se encuentra el resultado de la medición, a un cierto nivel estadístico de significación.

Dentro de los errores **Sistemáticos** presentes en la medición GPS, se tiene:

1. **Errores orbitales.**
2. **Errores en el reloj del satélite.**
3. **Errores en el reloj del receptor.**
4. **Errores dependientes del Medio de Propagación.**
5. **Ambigüedad en la fase de la portadora.**

Los errores **Accidentales** son:

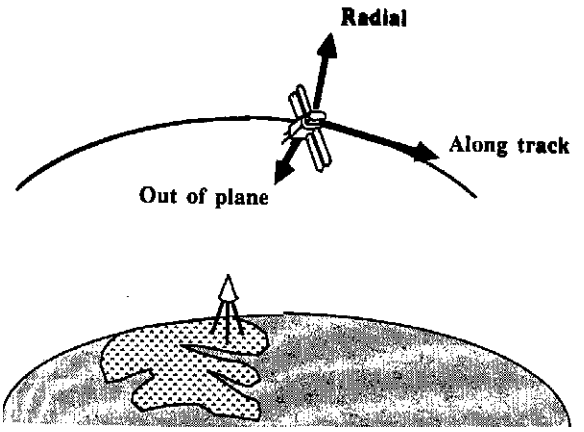
1. **Ruidos electrónicos en el receptor.**
2. **Errores de Multipaso.**
3. **Error en el centro de fase de la antena receptora.**
4. **Errores aleatorios de la observación.**

Sistemáticos:

Errores orbitales:

Las órbitas de los satélites se predicen con una observación previa de los mismos de 6 horas.

Esta predicción contiene unos errores residuales del orden entre 10 y 20 metros.



Los satélites se desvían de las órbitas calculadas por diferentes razones, entre ellas:

- Por la variación del campo gravitatorio.
- Debido a variaciones en la presión de la radiación solar.
- Debido a la fricción del satélite con moléculas libres.

Para disminuir esta fuente de error se han construido varios algoritmos basados en datos experimentales, los coeficientes de estos algoritmos se transmiten al usuario a través del mensaje de navegación para que se reduzca el error debido a esta fuente de error, reduciéndose el error aproximadamente a la mitad.

Con la disponibilidad selectiva (SA) activada, modificando los parámetros orbitales, los errores se estiman entre 30 y 50 metros.

Errores en el reloj del satélite.

La perfecta medida del tiempo es esencial en el sistema GPS, por ello los satélites montan una batería de relojes muy estables que están controlados por el Segmento de Control del Sistema.
Un error en los relojes de 1 mseg origina un error en la medición de la distancia de 300 Km.

El segmento de Control calcula el estado absoluto de los relojes, junto con la posición del satélite, para cada instante de observación. Este conjunto de datos permite modelar una ecuación para eliminar el error en el tiempo. Estos parámetros son inyectados al satélite, que a su vez los retransmite en el mensaje de navegación.

Independientemente de lo anterior, el reloj del satélite presenta también un ruido aleatorio, por tanto no modelable, que puede alcanzar el orden de los 30 nseg, lo que se traduce en errores de 10 metros en la medida de distancias.

Con la disponibilidad selectiva (SA) activada, el truncado de los relojes puede producir errores en la medida de distancias del orden de 30 a 50 metros.

Errores en el reloj del receptor.

Los receptores GPS suelen disponer de osciladores de cuarzo cuya estabilidad oscila entre 10^{-8} y 10^{-11} dependiendo de su calidad. El precio del receptor está determinado por el precio de su oscilador.

Normalmente el reloj del receptor, se autocorrige para mantenerse dentro de 1 mseg dentro de la hora GPS, lo que implica un error en distancia de 300 Km, por ello el receptor, siempre que tenga al menos 4 satélites enganchados, calcula el estado absoluto de su reloj, obteniéndose un error en distancia entre 10 y 100 metros, dependiendo del oscilador del receptor.

Errores dependientes del Medio de Propagación.

Los satélites GPS transmiten la información a través de señales electromagnéticas que son retardadas en su paso por la atmósfera, ya que las señales cruzan la ionosfera a través de partículas cargadas y la troposfera a través del vapor de agua. Las velocidades no son constantes cuando se propagan por ambos medios y además dependen de las condiciones meteorológicas del momento. Estos fenómenos introducen errores que pueden corregirse.

Retardos en la propagación Ionosférica.

La ionosfera es un medio dispersivo para las radiaciones electromagnéticas; esto quiere decir que la velocidad de propagación de la señal depende de la frecuencia de ésta.

La señal GPS es una señal compleja y, aunque centrada en la frecuencia de la portadora, tiene un cierto ancho de banda, es decir, la energía transmitida se distribuye en un espectro continuo de frecuencias alrededor de la portadora.

Cada parte de este espectro, dependiendo de su frecuencia, se transmiten a velocidades diferentes que se llaman velocidades de grupo. Produciéndose un retardo en la recepción de las señales que se denomina retardo ionosférico.

Dependiendo de la posición del satélite, este retardo producirá un error en la medida de distancia, durante el día de:

- ✓ Hasta 50 metros si el satélite se encuentra sobre el Zenit del receptor.
- ✓ Hasta 150 metros si se encuentra sobre el horizonte.

Durante la noche el error se reduce en 1/5 de su valor.

Aquellos receptores bifrecuencias (generalmente militares) corrigen el retardo ionosférico al recibir las frecuencias L1 y L2:

$$D = \rho - \frac{A}{f^2}$$

Donde D = *Distancia real.*
ρ = *Pseudistancia medida.*
A = *Parámetro dependiente de las condiciones particulares.*

Si se tienen dos frecuencias,

$$D = \rho_1 - \frac{A}{f_1^2} \qquad D = \rho_2 - \frac{A}{f_2^2}$$

Operando se obtiene que:

$$D = \frac{\rho_1 f_1^2 - \rho_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}$$

Si sólo se recibe una frecuencia el sistema GPS emplea modelos de predicción ionosférico globales o bien utilizan modelos paramétricos enviados por los satélites, que reducen el retardo, en el mejor de los casos a 1 ppm.

Retardos en la propagación troposférica.

La troposfera, a diferencia de la ionosfera, no es un medio dispersivo, por lo que las velocidades de grupo son idénticas, dependiendo el retardo de la señal de la concentraciones variables de vapor de agua y de otros componentes.

El error en distancia debido al retardo troposférico son los siguientes:

- ✓ Hasta 2,3 metros cuando el satélite se encuentra en el Zenit.
- ✓ Hasta 20 metros cuando el satélite tiene una elevación de 20º sobre el horizonte.

Dentro del retardo troposférico haya que distinguir entre:

- Componente seca (DRY):

  Responsable del 90% del retardo troposférico, pero de fácil predicción, por lo que es fácil de modelar paramétricamente.

- Componente húmeda (WET):

  Responsable del 10% del retardo troposférico, debido exclusivamente al contenido de agua en la atmósfera. Esta componente es de más difícil predicción, aunque existen modelos paramétricos que tienen en cuenta los condicionamientos locales atmosféricos.

Los modelos incorporados por los receptores se estima que anulan entre el 92% y el 95% del retardo troposférico, esperándose unos errores en distancia de 2 decímetros a 1 metros para satélites bajos.

Para efectuar medidas de precisión, receptores geodésicos, y minimizar los retardos ionosféricos y troposféricos se utiliza un ángulo límite de elevación de 15º a 20º (MASK) de aceptación de satélites.

Ambigüedad en la fase de la portadora.

En aquellos equipos que utilizan como medida de Pseudistancia la medida de la fase de la portadora, existe una ambigüedad en el número total de longitudes de onda de la portadora en el momento que el canal adquirió al satélite.

El error en distancia estará normalmente comprendido entre 10 y 20 centímetros.

Numerosos procedimientos se han propuesto para resolver esta ambigüedad, sea en postprocesado y más recientemente, incluso casi en tiempo real (solución conocida como OTF (“on the fly”)).

Accidentales:

Ruidos electrónicos en el receptor.

Inherentes a todo aparato de medición y a todo proceso de cálculo. En cualquier caso no puede hacerse más que refinar la calidad de los circuitos y de los algoritmos de cálculo. Los errores de este tipo raramente exceden de 1 centímetro en la medición de la distancia y generalmente son ignorados.

Errores de Multipaso.

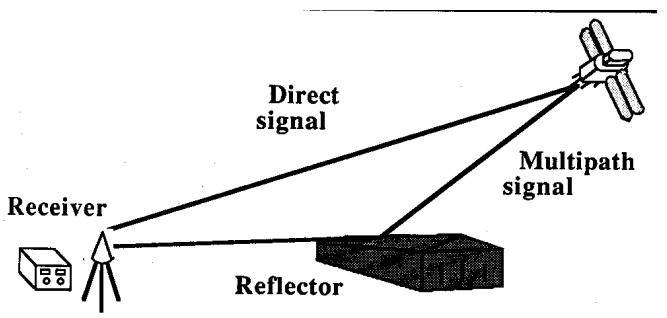


Fig. 320

El efecto multipaso *"multipath"* consiste en un fenómeno de interferencia entre la señal directamente recibida del satélite y la señal que se refleja en alguna superficie próxima a la antena receptora (Fig. 320).

Su efecto es notable cuando la antena receptora se encuentra cerca de edificios, antenas, estructuras metálicas o superestructuras de barcos.

En aquellos receptores que efectúa medida de fase de la portadora el error en la medida de distancia es de muy pocos centímetros.

En receptores que emplean correlación de códigos el error en distancia puede llegar al equivalente a la duración de un *"chip"*, aunque normalmente no exceden de:

- ✓ Código C/A: 10 metros en distancia.
- ✓ Código P: 1 metro en distancia.

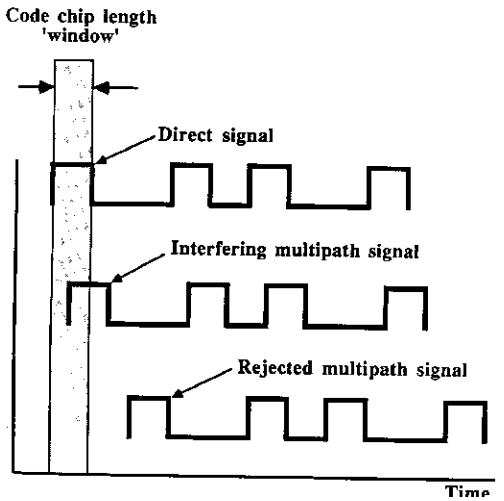


Fig. 321

Estos receptores crean una réplica del código que reciben y una ventana de ancho igual a la duración del *"chip"*, excluyendo por tanto aquellas determinadas por el efecto multipaso (Fig. 321). Si embargo, aquellas señales de poco desfase, que pueden entrar en la ventana, si son aceptadas y determinan el retraso multipaso más corto ("short delay multipath").

El efecto multipaso es prácticamente imposible de modelar y de detectar. Lo más que se puede hacer es escoger un emplazamiento de la antena receptora, alejada al menos 300 metros (Duración de un "chip" en código C/A) de toda superficie susceptible de reflejar radiación electromagnética.

El agua es una superficie reflectante y, por tanto, toda antena es susceptible de efectos multipaso en condiciones normales. Para evitarlo el diseño de las antenas está cuidadosamente estudiado, de manera que el diagrama de radiación presenta una sensibilidad uniforme para inclinaciones positivas, decayendo enormemente bajo el horizonte (Fig. 322).

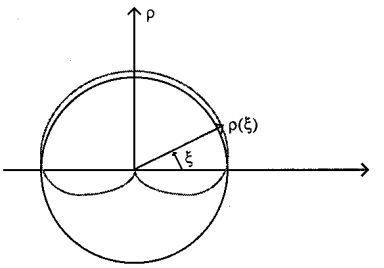


Fig. 322

Error en el centro de fase de la antena receptora.

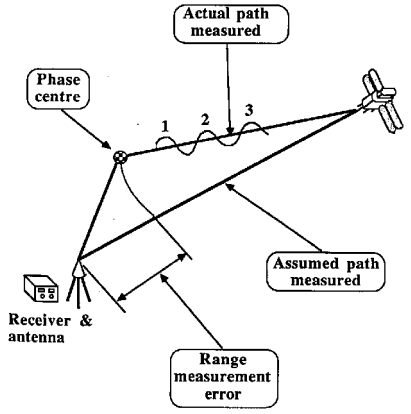


Fig. 323

El centro de fase de la antena receptora es su centro electrónico, al cual están referidas todas las mediciones, y normalmente no coincide con su centro físico. De hecho depende de la orientación (azimut y elevación) de la señal entrante y es diferente de unas antenas a otras (Fig. 323).

Las antenas han de ser calibradas en un banco de pruebas, no excediendo el error de 2 centímetros.

Errores aleatorios de la observación.

En este apartado pueden incluirse infinidad de causas de error, que sólo pueden evitarse utilizando cuidadosos métodos de observación. Como ejemplo puede citarse: el error en la medición de la altura de la antena sobre el punto en cuestión, el error en la determinación de las variables atmosféricas, el error en las coordenadas de la estación de referencia en el posicionamiento relativo, etc.

ERRORES GPS

ERRORES SISTEMÁTICOS	**MAGNITUD**	***CORRECCIONES***
Orbitales	*10 / 20 m.* *30 / 50 m (SA)*	*Reducción ½ valores*
Reloj Satélite	*300 Km*	*10 m* *30 /50 m (SA)*
Reloj Receptor.	*300 Km*	*10 /100 m*
Errores dependientes del Medio de Propagación	*Ionosférico* *50 m Zenit* *150 m* *Noche 1/5 día*	*1 ppm*
	Troposférico *2,3 m Zenit* *20 m con 20º elevación*	*2 dm / 1 m 20º elevación*
Ambigüedad fase portadora	*10 / 20 cm*	
ERRORES ACCIDENTALES		
Ruidos electrónicos receptor	*1 cm*	*Ignorados*
Multipaso	*Portadora: pocos cm* *C/A: 300 m* *P: 30 m.*	*C/A: 10 m* *P: 1 m*
Centro fase antena receptora	*2 cm*	
Errores aleatorios observación		

DILUCIÓN DE LA PRECISIÓN (DOP) (316).

Una vez estudiados los errores que afectan al sistema, se ha de estudiar la precisión del mismo, que va a depender de la geometría de los satélites que van a posicionar en un instante dado al receptor. Esta precisión va a ser directamente proporcional al volumen del tetraedro formado por los vectores unitarios del receptor a los cuatro satélites.

El caso ideal para una buena precisión es tener:

- ✓ Un satélite en el Zenit.
- ✓ Tres satélites sobre el horizonte, con 30º de elevación o más.
- ✓ Separación entre azimutes 120º.

El sistema proporciona un parámetro adiomensional llamado dilución de la posición (DOP) que muestra un índice de la calidad de la geometría de la constelación de los satélites observados, en un momento dado.

$$\sigma = DOP\ \sigma_0$$

donde:

- σ es la precisión en la posición.
- σ_0 es la precisión en la medida.

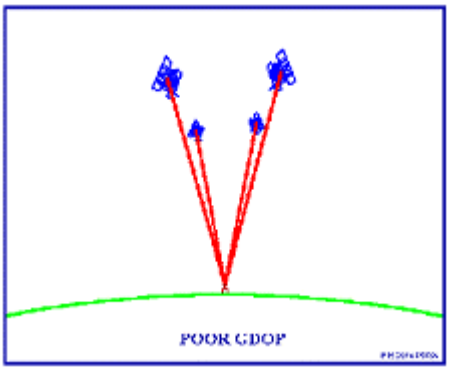
Considerando los tres parámetros de posición y el tiempo, se obtiene:

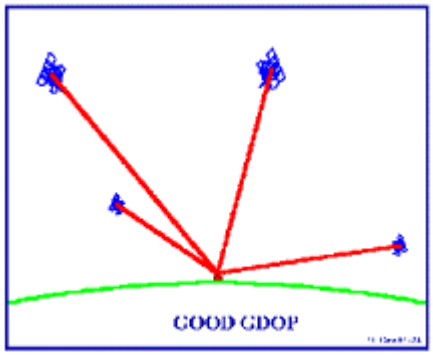
- ✓ GDOP (Geometric DOP), suministra una incertidumbre como consecuencia de la posición geométrica de los satélites y de la precisión temporal.
- ✓ PDOP (Position DOP), incertidumbre en la posición debido únicamente a la posición geométrica de los satélites (3D).
- ✓ TDOP (Time DOP), incertidumbre en la medición del tiempo en el reloj del receptor.

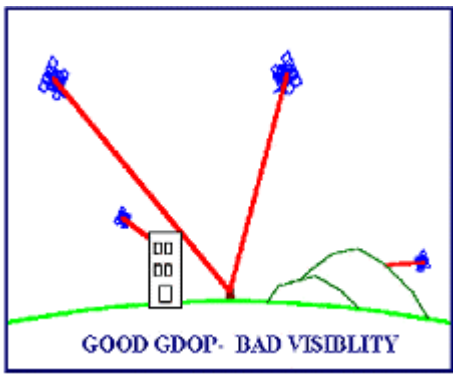
$$GDOP = PDOP + TDOP$$

- ✓ HDOP (Horizontal DOP), incertidumbre en la posición horizontal (2D).
- ✓ VDOP (Vertical DOP), suministra una información sobre la incertidumbre en la posición vertical del usuario.

$$PDOP = HDOP + VDOP$$



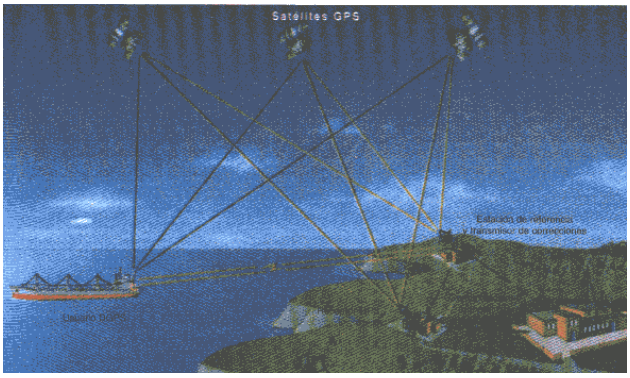




EL GPS DIFERENCIAL (DGPS) (317).

El fundamento radica en el hecho de que los errores producidos por el sistema GPS afectan por igual (o de forma muy similar) a los receptores situados próximos entre sí. Los errores están fuertemente correlados en los receptores próximos (Fig. 324).

Supongamos un receptor, del cual se conoce su posición con gran exactitud, que recibe la posición dada por el sistema GPS, éste será capaz de estimar los errores producidos por el sistema GPS, por comparación de distancias. Si este receptor transmite la corrección de errores a los receptores próximos a él estos podrán corregir también los errores producidos por el sistema.



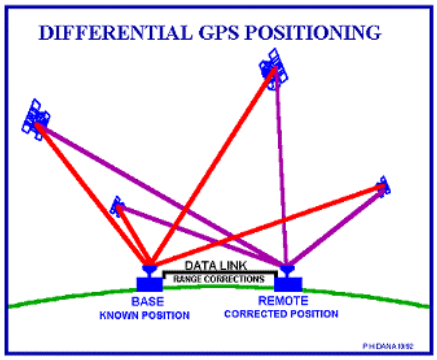


Fig. 324

En la Publicación *"Radioseñales"* vienen recogidas las estaciones que transmiten correcciones diferenciales con las características de las mismas (Fig. 325).

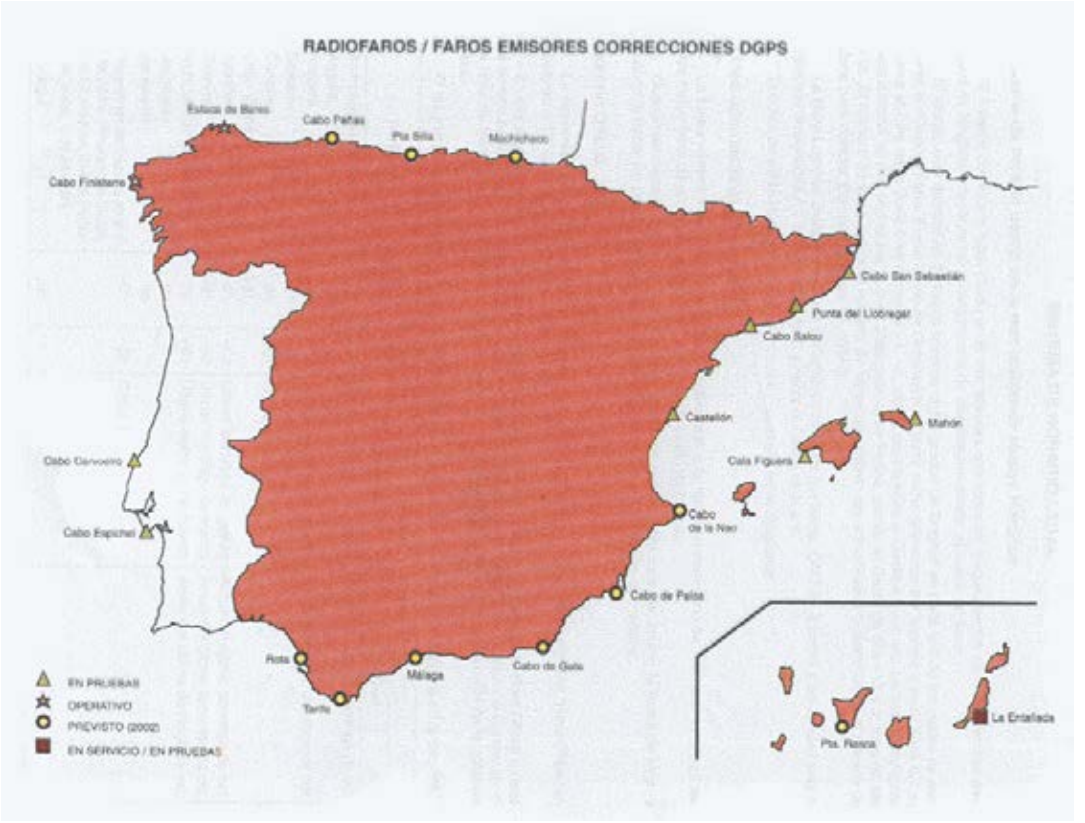


Fig. 325

ESTRUCTURA Y PRECISIÓN DEL DGPS (318).

Un equipo básico de DGPS está compuesto (Fig. 326):

- ✓ Un mínimo de dos receptores.
- ✓ Un sistema de transmisión de correcciones.

Uno de los receptores, llamado *"fijo"* o *"base"*, debe estar posicionado en un punto de coordenadas conocidas. De esta manera, es posible determinar el error con el que se ha medido las pseudodistancias a cada uno de los satélites en un determinado instante.

Error = Pseudistancia calculada – Pseudodistancia medida

Conocido este error, se corrigen del mismo, mediante un mensaje de correcciones originado en la *"base"*, las pseudodistancias medidas por el otro receptor que se denomina *"móvil"* o *"remoto"*, consiguiéndose mejorar notablemente la precisión.

Este incremento de la precisión obedece al hecho de que, para estaciones cercanas, los errores sistemáticos de propagación y de satélites son en buena parte eliminados.

El alcance del sistema, separación base – móvil, vendrá definido por:

- La distancia en que ambos receptores reciben los mismos satélites ya que la curvatura de la Tierra podría bloquear a los satélites que estando sobre el horizonte de un receptor, estaría por debajo del horizonte del otro. El móvil y la base deben emplear los mismos satélites ya que las correcciones se basan en esos mismos satélites.

- El sistema de transmisión de datos, ya que para VHF sería el visual, y para HF dependería del medio de propagación.

Por término medio el Sistema DGPS tiene una cobertura próxima de 2500 Km en torno a la estación terrena. Esta zona es donde los errores están fuertemente correlados.

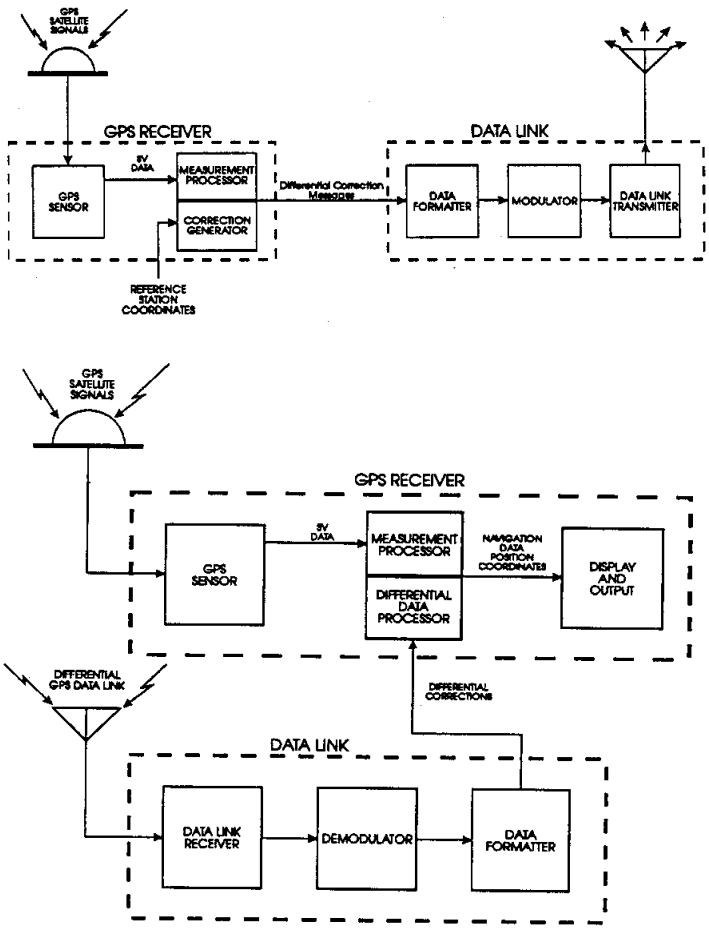


Fig. 326

Los receptores válidos son todos aquellos que midiendo pseudodistancia, correlan el código C/A:

- ✓ Base: Dotados de un procesador que efectúa que mide las correcciones y genera un mensaje de correcciones diferenciales.

- ✓ Móvil: Dotadas de un procesador que aplica las correcciones diferenciales recibidas a la medida de las pseudodistancias.

Con el DGPS la precisión del sistema en la medida de distancias está en el orden de 2 a 6 metros.

En el siguiente cuadro se muestran las influencias de los errores en el GPS y DGPS.

ERRORES GPS / DGPS

ERRORES SISTEMÁTICOS	**GPS**	**DGPS**
Orbitales	*5 /10 m.* *30 / 50 m (SA)*	*0*
Reloj Satélite	*10 m* *30 /50 m (SA)*	*0*
Reloj Receptor.	*10 /100 m*	*0,5 m*
Errores dependientes del Medio de Propagación	*Ionosférico* *1 ppm*	*0,4 m*
	Troposférico *2 dm / 1 m 20º elevación*	*0,2 m*
ERRORES ACCIDENTALES		
Ruidos electrónicos receptor	*1 cm*	*1 cm*
Multipaso	*C/A: 10 m* *P: 1 m*	*0,6 m*
Centro fase antena receptora	*2 cm*	*2 cm*

MENSAJE DE CORRECCIONES DIFERENCIALES (319).

El formato del mensaje general está compuesto por una serie de bloques, cada bloque compuesto por una serie de palabras, cada una de ellas con una longitud de 30 bits.

Las dos primeras palabras de cada bloque contienen información general y las siguientes palabras corresponderán a cada uno de los 16 mensajes tipos.

Palabra 1	*Palabra 2*	*Mensaje (16 tipos)*

Información general

1. **Correcciones diferenciales.**
2. **Delta de correcciones diferenciales (movimiento de la estación de referencia).**
3. **Parámetros de la estación.**
4. **Parámetros hidrográficos.**
5. **Salud de la constelación.**
6. **Bloque nulo.**
7. **Efemérides de una red de radiobalizas DGPS.**
8. **Salud de las distancias.**
9. **Correcciones diferenciales rápidas.**
10. **Correcciones diferenciales sobre el código P.**
11. **Correcciones diferenciales sobre el código C/A.**
12. **Salud del mensaje.**

13-15 Sin uso.

16. **Mensajes especiales.**

Como se ha dicho, cada mensaje tipo comienza con las mismas dos palabras:

1ª Palabra

1 2 3 4 5 6 7 8	9 10 11 12 13 14	15 16 17 18 19 20 21 22 23 24	25 26 27 28 29 30
Preámbulo	*Identificación tipo de mensaje*	*Identificación de la estación*	*Paridad*

2ª Palabra

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14	15 16	17 18 19 20 21	22 23 24	25 26 27 28 29 30
Modificación del contador de tiempo	*Número de secuencia*	*Longitud del bloque*	*Salud estación*	*Paridad*

CAPÍTULO IV

INTRODUCCIÓN A LA NAVEGACIÓN INERCIAL

Introducción (401).
Principio básico de la navegación inercial (402).
Movimientos inerciales (403).
La plataforma estable (404).
Sistemas de coordenadas (405).
Precisión de la navegación inercial (406).
Ventajas de la navegación inercial (407).
Sistema de sonar Doppler (408).

INTRODUCCIÓN (401).

La navegación inercial es el proceso de medir la velocidad, orientación y desplazamiento de un vehículo desde un punto de partida conocida mediante la detección de las aceleraciones que actúan sobre él en direcciones conocidas por medio de instrumentos que mecanizan las leyes del movimiento de Newton.

La navegación inercial se dice que es *"**autocontenida**"*, es decir, independiente de ayudas externas a la navegación. También se dice que es *"**pasiva**"*, porque no se emite ninguna energía para obtener información de fuentes externas.

La navegación inercial es fundamentalmente diferente de otros métodos de navegación electrónica ya que sólo depende de medidas hechas dentro del propio vehículo que navega.

Puede decirse que la navegación inercial es un método de estima, ya que la situación se obtiene midiendo los desplazamientos desde un punto de partida de acuerdo con los movimientos del vehículo, diferenciándose de ésta, fundamentalmente:

- En la estima, el rumbo y la distancia se conocen respecto a la mar, aunque aparte se tenga en cuenta la corriente que afecta al rumbo y a la distancia y también se tenga en cuenta el efecto del viento.

- En la navegación inercial los datos se obtienen midiendo las aceleraciones a que está sometido el buque en movimiento. Calcula las medidas absolutas con independencia de los movimientos de la mar y del viento; es decir, proporciona la derrota efectiva del barco.

El sistema empleado en los buques se denomina **SINS (Ship Inertial Navigation System)**, sistema extremadamente complejo comparado con otros sistemas de navegación.

PRINCIPIO BÁSICO DE LA NAVEGACIÓN INERCIAL (402).

El principio básico es la medida de las aceleraciones que actúan sobre un vehículo, una vez eliminadas aquellas que no estén asociadas con su orientación o movimiento respecto a la Tierra y a la doble integración de estas aceleraciones en direcciones conocidas, para obtener el desplazamiento desde el punto de partida.

Al ser las aceleraciones, a las que está sometido el barco, variables, se han de tomar incrementos de tiempo muy pequeños:

$$v = \int a \bullet dt$$

$$s = \iint a \bullet dt$$

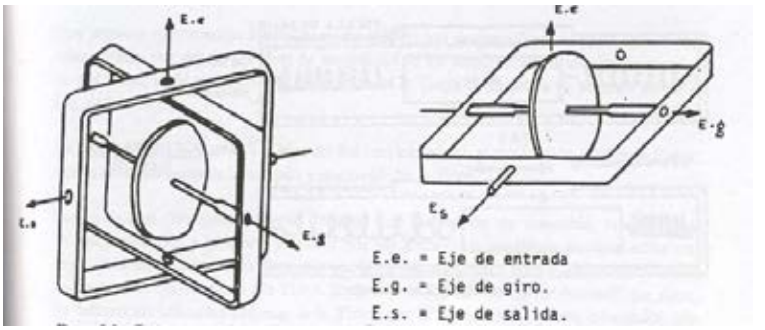
Los sensores inerciales que mecanizan las leyes del movimiento de Newton y que constituyen el navegador inercial son:

- Los **giróscopos** que detectan los movimientos angulares del barco.

- Los **acelerómetros** que detectan las aceleraciones lineales del buque.

Estos sensores acusan todos los movimientos del buque, incluso los de la Tierra, y puesto que se desea la posición y orientación del navegador inercial respecto a la Tierra, es necesario aplicar ciertas correcciones a los movimientos inerciales detectados para obtener los correspondientes valores referidos a la superficie terrestre.

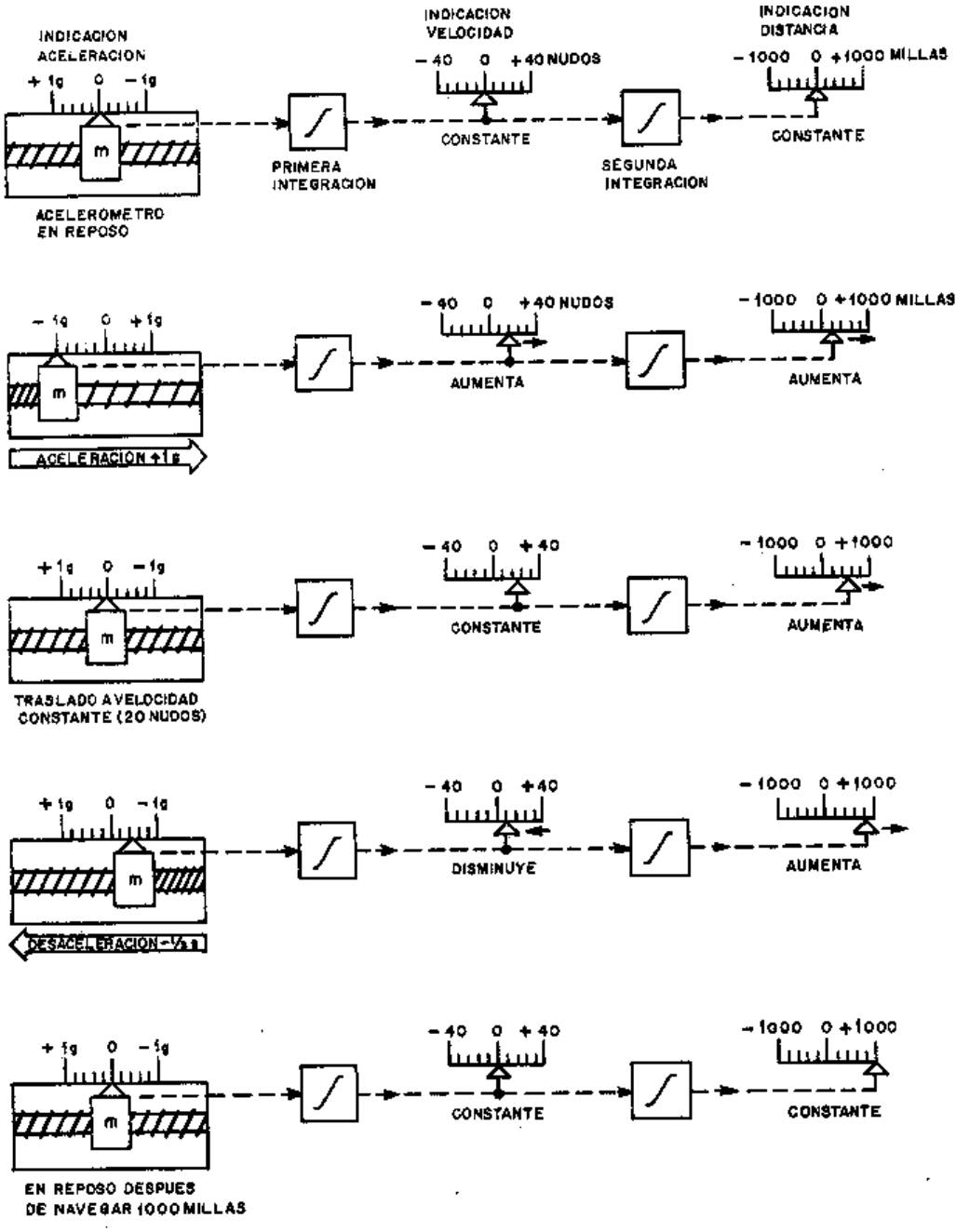
Los giróscopos conocidos y de uso náutico tienen dos grados de libertad, pero la aplicación práctica de un giróscopo a un navegador inercial es más útil un giróscopo diseñado de tal modo, que sólo pueda precesionar alrededor de un eje llamado eje de salida. Tal giróscopo precesionará a rotaciones de la caja, marco o portacuna alrededor de un eje conocido como eje de entrada. Esto permite al giróscopo llevar a cabo una función de control con respecto a un eje.



Con tres giróscopos, de un grado de libertad, montados de tal forma que sus ejes sean perpendiculares entre sí, se lleva a cabo un control de la plataforma en tres dimensiones.

Cualquier componente de rotación alrededor del eje de entrada ocasiona una rotación alrededor del eje de salida y puede ser acusado y utilizado para controlar la orientación de la plataforma, en la cual está montado el giróscopo.

El acelerómetro es el instrumento que mide la aceleración y esquemáticamente está constituido por una masa que puede oscilar suspendida de un péndulo o bien trasladarse a lo largo de una guía rectilínea y horizontal. En el momento en que el móvil, en donde se encuentra instalado, se pone en movimiento o varía su velocidad, la masa del acelerómetro se desplaza con relación a su punto muerto y este desplazamiento es proporcional a la aceleración instantánea.



El acelerómetro mide la cantidad de aceleración a lo largo de un solo eje.

Debe tenerse en cuenta que estos acelerómetros inerciales son sensibles a toda aceleración y no solo a aquellas respecto a la Tierra. Puesto que son sensibles a aceleraciones en el espacio, su salida incluye otras aceleraciones que no son debidas al movimiento sobre la superficie de la Tierra. Es necesario una compensación por estas aceleraciones de tal modo que quede sea la aceleración con respecto a la Tierra.

MOVIMIENTOS INERCIALES (403).

Los movimientos que afecta a los sensores inerciales son:

- Rotaciones:
  - Bandazos, cabezadas y guiñadas de la embarcación.
  - Movimientos de la Tierra (traslación y rotación).
  - Cambios de latitud y longitud.
- Aceleraciones:
  - Aceleración de la embarcación respecto a la Tierra.
  - Aceleración de la gravedad.
  - Aceleración de Coriolis.

Algunos de estos movimientos están relacionados, ya que, por ejemplo, la aceleración de Coriolis, la rotación de la Tierra y el efecto de la gravedad están íntimamente ligados.

***Rotaciones**:*

El navegador inercial trabaja con los valores de **velocidad**, **orientación** y **situación** referidos a la Tierra y como los giróscopos mantienen su orientación con respecto al espacio inerte (estrellas fijas), es necesario que los giróscopos estén controlados para mantener una referencia con respecto a la Tierra. Esta referencia viene determinada por la **vertical local** y la **orientación con respecto al Norte verdadero**.

- La rotación de la Tierra hace que la vertical local, para una determinada situación, cambie su orientación en el espacio, sin embargo la vertical del navegador permanece estacionaria en el espacio debido a la precesión aparente (rigidez giroscópica en el espacio) (Fig. 401).

  Para evitar que la vertical del navegador permanezca estacionaria en el espacio se aplica una señal de velocidad de rotación de la Tierra a la misma velocidad que lo hace ésta, de tal forma que mantiene la orientación deseada respecto a la Tierra mientras ésta gira.

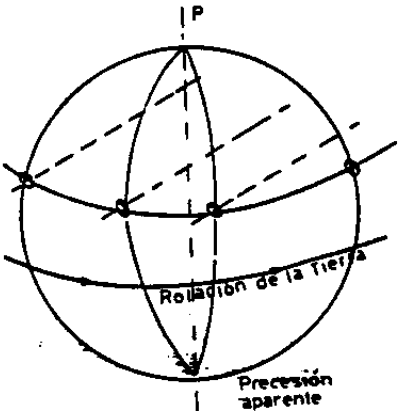


Fig. 401

- El cambio de situación del navegador hace que la vertical local permanezca invariable en el espacio. Para que la vertical del equipo coincida con la vertical local en todo momento, se le aplica a los giróscopos una velocidad de precesión para que ambos ejes verticales coincidan, el local y el del giróscopo (Fig. 402).

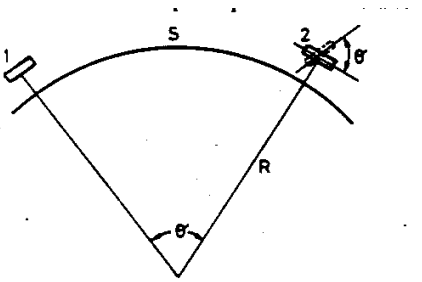


Fig. 402

- A cada giróscopo debe aplicársele también un par a causa de su propia deriva interna respecto al espacio inerte. Esta precesión puede ser causada por varios factores, como pares internos debidos a fricción, y desequilibrio de peso. La compensación aplicada para esta deriva se denomina **girobias**.

***Aceleraciones**:*

- Si el acelerómetro está inclinado estará afectado por la gravedad, produciendo una salida que no es debida a ninguna aceleración del navegador respecto a la Tierra y por tanto debe compensarse.

  Esta compensación se logra situando el acelerómetro de modo que su eje sensible sea perpendicular a la gravedad, de tal forma que las aceleraciones resultantes de un cambio de situación son perpendiculares a la vertical local.

- El SINS consta de dos acelerómetros perpendiculares a la vertical local y perpendiculares entre sí, de tal modo, que pueden medir cualquier aceleración que dé como resultado un cambio en la situación del móvil sobre la superficie de la Tierra. Se necesita un tercer acelerómetro, situado perpendicularmente a los otros dos, que detecta cualquier aceleración del navegador a lo largo de la vertical.

- Otra aceleración que ocurre en el espacio inerte es la de Coriolis que afecta a los acelerómetros y que debe compensarse. Esta compensación se efectúa calculando y suprimiendo la aceleración de Coriolis de la salida de un acelerómetro antes de que dicha salida sea utilizada para proporcionar datos al navegador.

LA PLATAFORMA ESTABLE (404).

La función de los **acelerómetros** del navegador es detectar las aceleraciones respecto a la Tierra, de modo que un calculador puede determinar la velocidad, orientación y situación de la embarcación.

La función de los **giróscopos** es mantener a los acelerómetros en las orientaciones correctas para medir estas aceleraciones.

La función de los **cardans** es proporcionar el soporte físico para los giróscopos y acelerómetros, proporcionándoles tres grados de libertad con respecto a la embarcación.

Los cardans, giróscopos y acelerómetros, junto con sus elementos electrónicos y motores que hacen girar los cardans, conforman la **plataforma estable**.

La función de la plataforma es permitir la estabilidad y mantener un sistema de referencia respecto al cual sean tomadas las medidas necesarias para producir las salidas del navegador. El sistema de referencia que suele ser utilizado está basado en la vertical local y la dirección del Norte verdadero.

En la figura 403 se representa la parte de un navegador correspondiente a un solo eje.

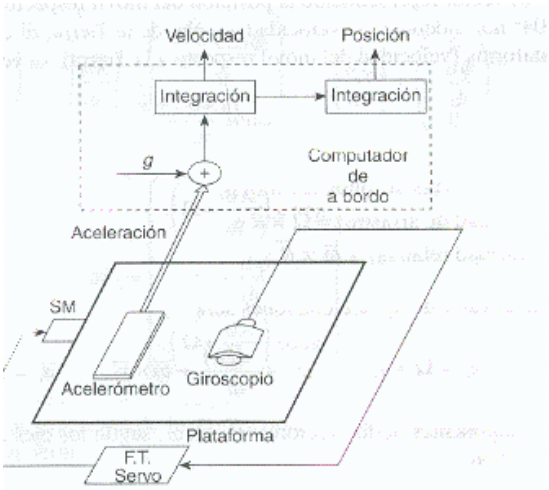


Fig. 403

SISTEMAS DE COORDENADAS (405).

El SINS está mecanizado teniendo en cuenta un elipsoide de referencia, dentro de este elipsoide utiliza dos sistemas de referencia:

- *Sistema X, Y y Z:*

  Los ejes X e Y definen un plano horizontal con el eje X dirigido hacia el Norte verdadero , el Y hacia el Este y el Z verticalmente hacia abajo.

  Este sistema está físicamente representado en la plataforma del "navegador" por la disposición de los giróscopos.

- *Sistema ecuatorial:*

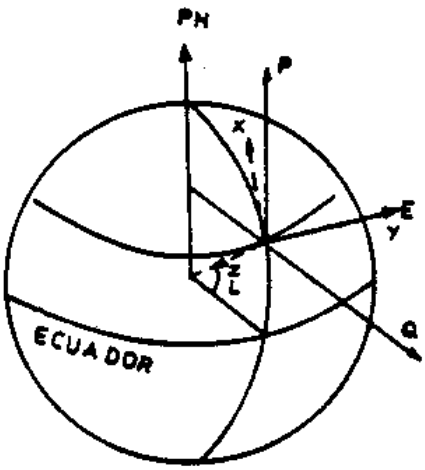


Fig. 404

Consta del eje P (polar) paralelo al eje de rotación de la Tierra, Q (ecuatorial) paralelo al plano ecuatorial y dirigido hacia fuera desde el eje de rotación de la Tierra; y el E (este) coincidente con el Y del otro sistema.

El calculador del navegador mantiene una representación matemática de este sistema.

Las relaciones entre ambos sistemas se representa matemáticamente (Fig. 404):

$$X = P \cos L - Q \operatorname{sen} L$$
$$Y = E$$
$$Z = P \operatorname{sen} L - Q \cos L$$

PRECISIÓN DE LA NAVEGACIÓN INERCIAL (406).

El SINS, a pesar de su gran precisión, presenta un inconveniente grave, la acumulación en el tiempo de pequeñísimos errores instrumentales y de los imprevisibles errores accidentales, debidos principalmente al imperfecto cálculo de la dirección de la gravedad en el lugar (ángulo entre la normal al Geoide y la normal al elipsoide de referencia).

Como la distancia se calcula por una doble integración, proporcional al cuadrado de los tiempos transcurridos, el error aumenta, obteniéndose una precisión suficiente para vehículos muy veloces y de breve duración, pero escasa para vehículos que emplean largo tiempo en desplazarse.

Por ello es imprescindible ir corrigiendo la situación SINS por otros medios después de haber navegado un cierto tiempo, generalmente cada 8 horas.

El SINS se puede enlazar con cualquier otro sistema de navegación: costera, astronómica o electrónica, refrescando la situación inercial.

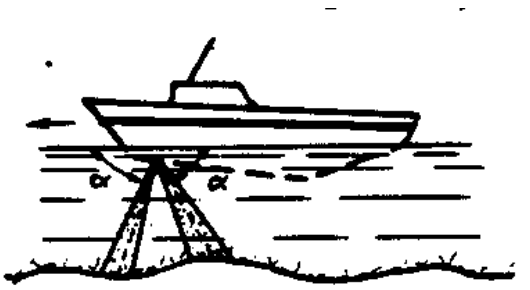
VENTAJAS DE LA NAVEGACIÓN INERCIAL (407).

- ✓ Tener situación continua.
- ✓ Independiente de los efectos de las corrientes y vientos.
- ✓ Sistema pasivo.
- ✓ Independiente del exterior.

SISTEMA DE SONAR DOPPLER (408).

Este sistema utiliza el principio físico del efecto Doppler, midiendo el desfasaje en frecuencia entre la emisión de ondas ultrasonoras por transductor en la quilla, y la recepción de las ondas reflejadas, bien en el fondo o bien en la masa de agua., obteniéndose la medida de la velocidad del móvil.

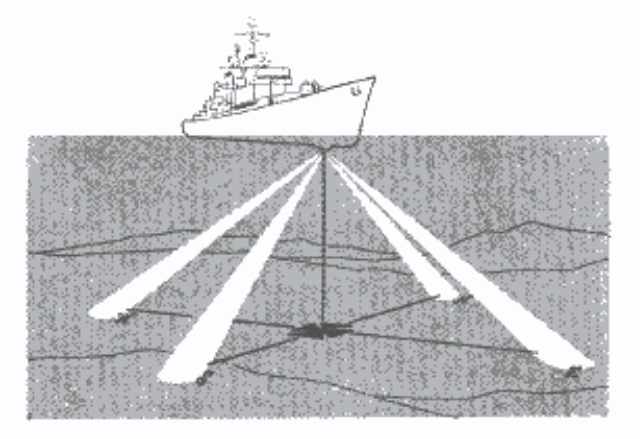
Desde a bordo se transmiten series de señales ultrasonoras de alta frecuencia, que se reflejan en las partículas de suspensión en el agua o el fondo y producen ecos que son recibidos a bordo. Debido al efecto Doppler la **frecuencia** propia de los impulsos se ve modificada por:



- La velocidad del barco.
- La dirección en que realmente se mueve el barco.
- El ángulo que forma la dirección en que se emiten las señales con el vector representativo del barco.

1. Un **transductor**, montado a paño en el fondo del casco y equipado con la **válvula** correspondiente, dispone de dos **elementos activos**, uno de ello ellos emite hacia proa y el otro hacia popa, de tal forma que la transmisión de los impulsos tenga lugar con una cierta inclinación respecto a la vertical, recibiéndose los ecos en los intervalos de silencio entre la emisión de las señales.

2. La **unidad electrónica** contiene todo los circuitos y dispositivos de transmisión, recepción y amplificación de las señales, así como el filtro de calidad que elimina automáticamente los ecos que no ofrecen unas garantías determinadas. Este conjunto está dirigido y controlado por un **microprocesador**.



Normalmente los transductores son cuatro y situados a proa (disposición JANUS) pudiendo el sistema determinar la velocidad, actuando como una corredera, o bien integrar la velocidad mediante un dispositivo integrador y determinar el desplazamiento en los dos ejes perpendiculares, actuando como un equipo para el cálculo de la situación.

Ventajas:

- ✓ El sistema proporciona una situación de estima de gran exactitud, ya que refiere los desplazamientos sobre el fondo.
- ✓ La velocidad se mide con exactitudes del orden de la centésima de nudo.
- ✓ Es autónomo e independiente de emisiones procedentes del exterior.
- ✓ Es integrable con otros sistemas de posicionamiento.

Inconvenientes:

- Errores en el cálculo de la velocidad de sonido en el agua.
- Por reflexiones indeseables en las capas de aguas contiguas al barco no es adecuado para fondos inferiores a 15 metros.
- Para fondos superiores a 400 / 500 metros, y debido a la atenuación de la señal, los desplazamientos se miden sobre la masa de agua, por lo que la estima estará afectada por la corriente.
- Es un sistema indiscreto.

CAPÍTULO V

AYUDAS ELECTRÓNICAS A LA NAVEGACIÓN AÉREA

Introducción (501).
Descripción de las ayudas (502).
Sistemas de corto alcance (503).
Sistemas de larga distancia (504).
Sistemas de aproximación y aterrizaje (505).
El ILS (Instrumental Landing System) (506).
El MLS (Microwave Landing System) (507).
Aproximación de precisión. El GCA (Ground Controlled Approach) (508)
El vuelo instrumental (509).
El espacio aéreo (510).
Vuelo visual y vuelo instrumental (511).
Preparación del vuelo (512).

INTRODUCCIÓN (501).

Todos los medios usados para proporcionar las necesarias referencias al navegante aéreo constituyen lo que se ha definido como *"**ayudas a la navegación aérea**"*.

En los primeros tiempos de la navegación aérea las ayudas estaban constituidas por las apreciaciones visuales directas del piloto sobre la superficie terrestre y los mapas elaborados como referencia. Este modo de navegación se denominó *"**navegación observada**"*.

Con el aumento del radio de acción de los vuelos se hizo más patente la necesidad de prescindir del contacto visual con la superficie, introduciéndose en la navegación aérea los instrumentos usados en la navegación marítima: la brújula y los anemómetros. Sobre estas ayudas se basó la *"**navegación de estima**"*, sujeta a los errores propios de trabajar sobre velocidades respecto a la masa de aire.

La tendencia a eliminar estos errores hizo, como en la navegación marítima, el utilizar como referencia para el posicionamiento la bóveda celeste, apareciendo la *"**navegación astronómica**"*.

La aparición y desarrollo de los equipos de radio aportó un nuevo sistema de referencia para el posicionamiento de las aeronaves, estableciéndose la *"**navegación radioeléctrica**"*.

La evolución tecnológica y la exigencia de unos grandes niveles de seguridad, derivó en la aparición de instrumentos de navegación a bordo de los aviones no sólo capaces de

determinar la posición sino también de hacer reaccionar los controles de vuelo de los aparatos para adaptarse a un plan de vuelo prefijado. Este modo de navegar se define como *"**navegación guiada**"*.

Navegación de estima
(Travectoria según indicadores de la aeronave: brúiula y anemómetros)

Navegación por determinación de posición
- *Astronómica (referencias celestes)*
- *Radioeléctrica (radiofaros)*

Navegación guiada
(Servosistemas de control de travectoria)

DESCRIPCIÓN DE LAS AYUDAS (502).

La Organización Internacional para la Aviación Civil (OACI) clasifica los sistemas de navegación, según su cobertura, de la forma siguiente:

- **Sistemas de corto alcance.**

  Generalmente basadas en estaciones terrestres que proporcionan una gran precisión tanto en rumbo como en distancia, para un alcance inferior a 500 Km:
  - ADF.
  - VOR.
  - DME.
  - TACAN.

- **Sistemas de larga distancia.**

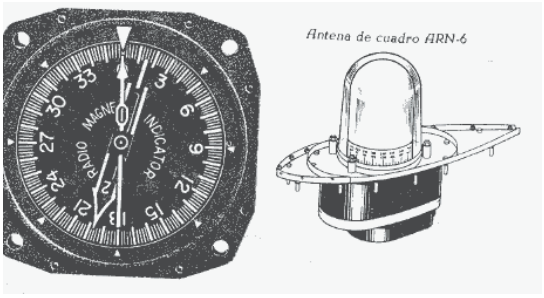
  Aplicables a fases de vuelo que no requieren una gran precisión y constituidos principalmente por sistemas autónomos de estima y por sistemas de posicionamiento por satélites:
  - GPS.
  - Navegación inercial.
  - Navegación Doppler.

- **Sistemas de aproximación y aterrizaje.**

  Sistemas que proporcionan una gran precisión de posicionamiento, tanto vertical como horizontal en cualquier tipo de condiciones meteorológicas:
  - ILS.
  - MLS.
  - GCA.

SISTEMAS DE CORTO ALCANCE (503).

El ADF:



El ADF (Automatic Direction Finding) es el sistema más sencillo de navegación radioeléctrica con emisión desde tierra. El sistema lo integran un emisor terrestre omnidireccional (NDB) y una instalación a bordo que proporciona al piloto información del ángulo que forma el eje del avión con la línea avión – estación emisora. Está basado en la recepción simultánea de dos antenas, una que funciona según el principio de la antena de cuadro, detectando la dirección de procedencia de la emisión, y otra omnidireccional que resuelve la ambigüedad de 180º, tal como ocurría en la Radiogoniometría. La indicación del ADF se da en el indicador del tablero, y ha de tomarse cuando el avión tenga los plano nivelados en línea de vuelo.

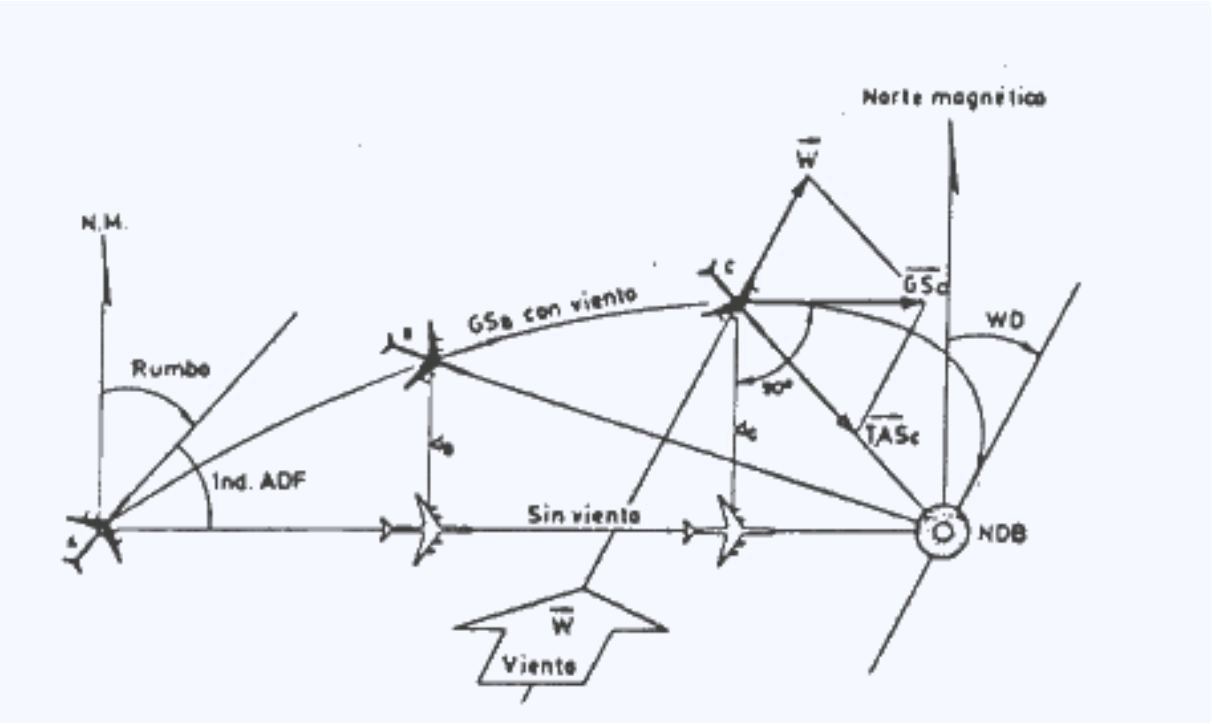


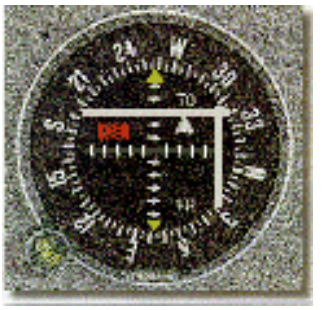
Fig. 501

El ADF trabaja entre 190 y 1750 KHz, ofreciendo una precisión de unos 3º con una cobertura de 250 MN. En una maniobra de arribada a un emisor NDB con el equipo ADF, el avión describirá una trayectoria rectilínea si no hay viento de costado.

Una componente lateral de viento de valor constante durante todo la aproximación a la estación provocará una desviación tal que el centro de gravedad del avión describirá una tangente a la dirección del viento en el punto de destino (Fig. 501).

Este efecto obligaba a mantener el ancho de las aerovías con márgenes de seguridad comprendidos entre 8 y 12 MN y a incrementar los tiempos de vuelo.

El VOR:



Al incrementar la circulación aérea hubo que reducir los márgenes laterales de las aerovías aumentando la precisión de los equipos de navegación y evitando en lo posible las desviaciones provocadas cuando hay fuerte viento.

Esto impuso el desarrollo del radiofaro VHF omnidireccional VOR (VHF Omnidireccional Range), desarrollado en los EEUU, y fue reconocido como estándar internacionalmente en el año 1.949; en la actualidad es la base de la navegación a corta distancia y junto al DME constituyen los vértices de las líneas poligonales que determinan las aerovías.

Tiene dos funciones:

- Función de navegación: suministra información direccional (azimut del radial que une la aeronave y la estación emisora).
- Función de guiado: permite hacia o desde el VOR seguir un radial que pasa por el mismo (Fig. 502).

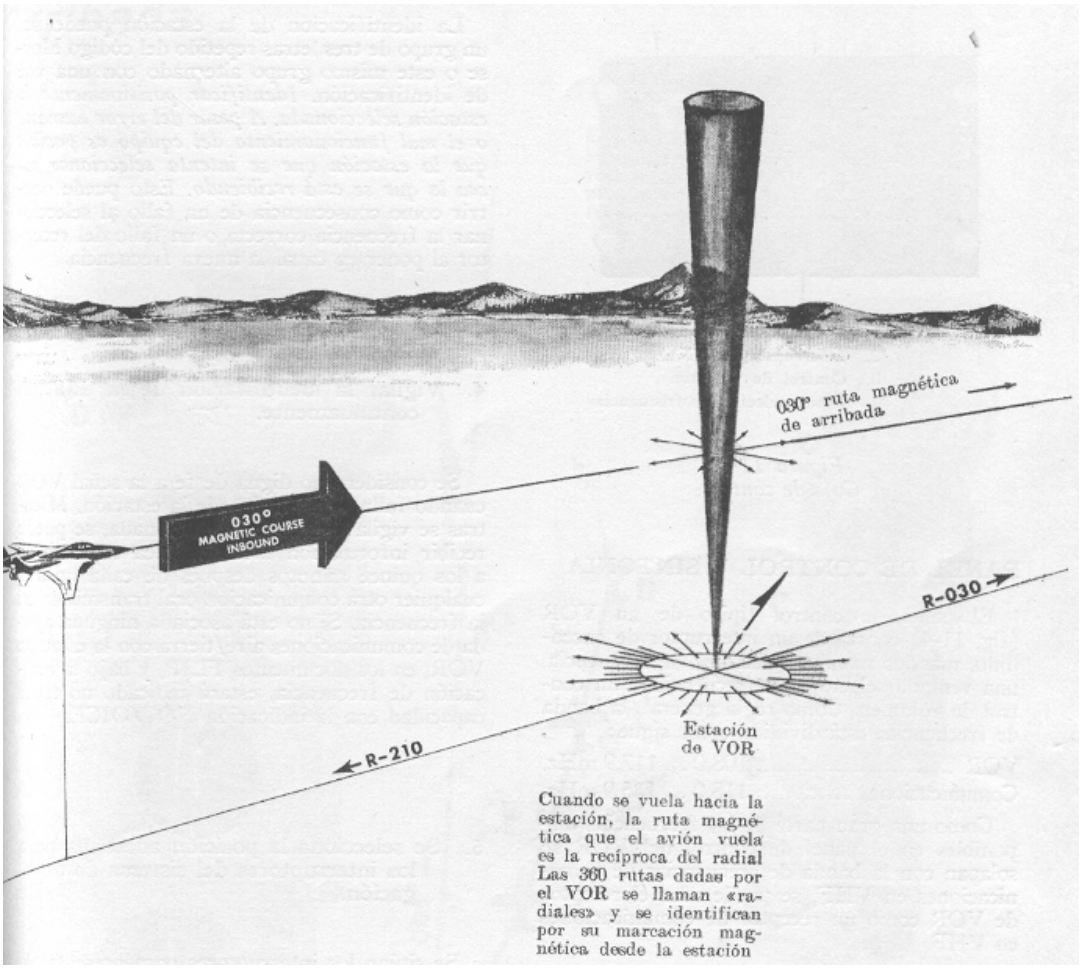


Fig. 502

Trabaja en la banda VHF con la siguiente asignación de frecuencias:

- Aerovías: 112,1 a 118 MHz.
- Aproximación: 108 a 112 MHz (120 canales separados 50 KHz).

El sistema informa a la tripulación del azimut de posición del avión, con respecto a la estación emisora, siendo la línea de referencia el Norte magnético, y está basado en la medida de la diferencia de fase entre dos señales.

El alcance está limitado por la curvatura terrestre y variando, por tanto, con la altitud, siendo aproximadamente de 200 MN a 25.000 pies de altitud; y con una precisión de ± 3º.

El sistema consta de:

- ✓ Una antena receptora a bordo.
- ✓ Una estación emisora en tierra compuesta de cinco antenas; una central situada en un plano superior que emite la frecuencia de portadora, y otras cuatro simétricas, para las bandas laterales. El conjunto radia energía electromagnética de forma omnidireccional.

La estación emisora lanza tres señales sobre la misma frecuencia de portadora (Fig. 503):

- Señal de Referencia (SR) de 30 Hz radiada por la antena central omnidireccional.
- Señal variable (SV) también de 30 Hz radiada por el resto de antenas y cuya fase cambia un grado por cada grado de cambio en azimut alrededor del VOR, coincidiendo ambas señales en fase cuando coinciden en la dirección del Norte magnético.

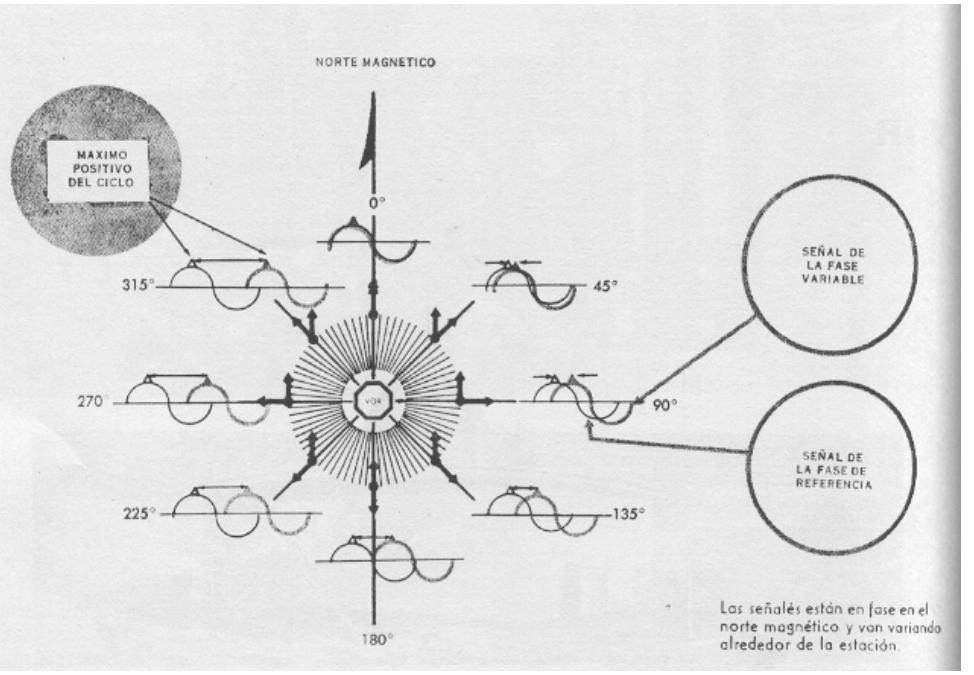


Fig. 503

- Señal de identificación (SI) de 1020 Hz, sobre la misma portadora, que proporciona el indicativo acústico de la estación por código Morse.

El DME:

Normalmente, junto a una estación VOR va situado un equipo radiotelemétrico DME (Distance Measurement Equipment). El equipo DME es un sistema medidor de distancias, adoptado en 1960 por la OACI para su empleo en la aviación civil internacional. El funcionamiento se basa en la medida del tiempo entre la interrogación iniciada por la aeronave y la respuesta generada por el equipo de tierra.

La banda de trabajo es de 960 a 1215 MHz, los canales están separados 1 MHz y para la interrogación se usa la banda de 1025 a 1150 MHz, y cada interrogación consta de dos impulsos de 3,5 μs (Fig. 504).

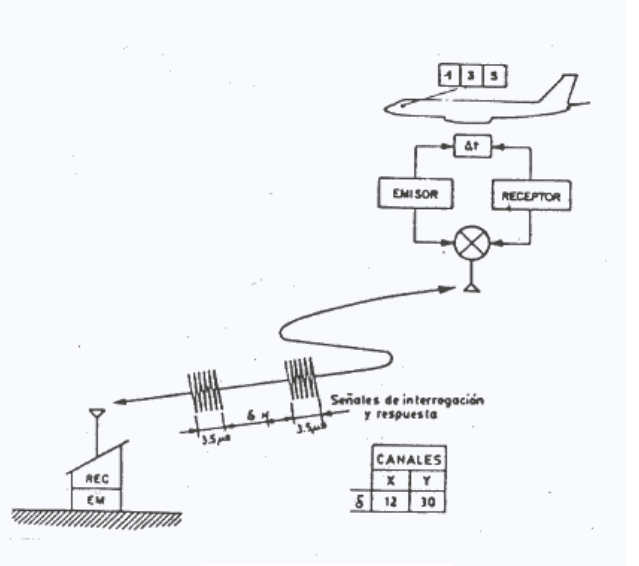


Fig.

Para cada frecuencia de interrogación se dispone de dos frecuencias de respuesta:

- ✓ **Modo "X":** 63 MHz más alta y los impulsos de interrogación y respuesta están separados 12 μs.

- ✓ **Modo "Y":** 63 MHz más baja y los impulsos están separados 36 μs para la interrogación y 30 μs para la respuesta.

Con estos dos modos se consiguen 252 canales.

Cada DME trabaja en las mismas frecuencias para todas las aeronaves, por lo que el interrogador, con el fin de conocer las respuestas que corresponden a las propias interrogaciones, hace variar aleatoriamente el periodo de repetición de las interrogaciones.

El inconveniente más grande del sistema es que el equipo de tierra ha de atender a las aeronaves una a una, por lo que es necesario seguir un procedimiento establecido en dos fases con el objeto de evitar la saturación, ya que su capacidad de respuesta es de 100 aeronaves al mismo tiempo:

- ***Búsqueda****:* El equipo de a bordo interroga a un ritmo de 150 veces por segundo, determinando la distancia aproximada con un error del 10%.

- ***Seguimiento****:* La velocidad de interrogación pasa a 30 veces por segundo.

El error en distancia puede llegar a ± 100 metros, ya que el respondón de tierra transmite al avión 50 μs después de haber recibido la interrogación. Esto no es un problema para la navegación por ruta, pero sí para las fases de aproximación y aterrizaje, para las cuales se

seleccionó por la OACI el DME/P, que trabaja en las mismas frecuencias que el DME convencional, pero cambia la forma de los pulsos y mejora el procedimiento de detección.

En la figura 505 se representa el equipo a bordo correspondiente al VOR y DME.

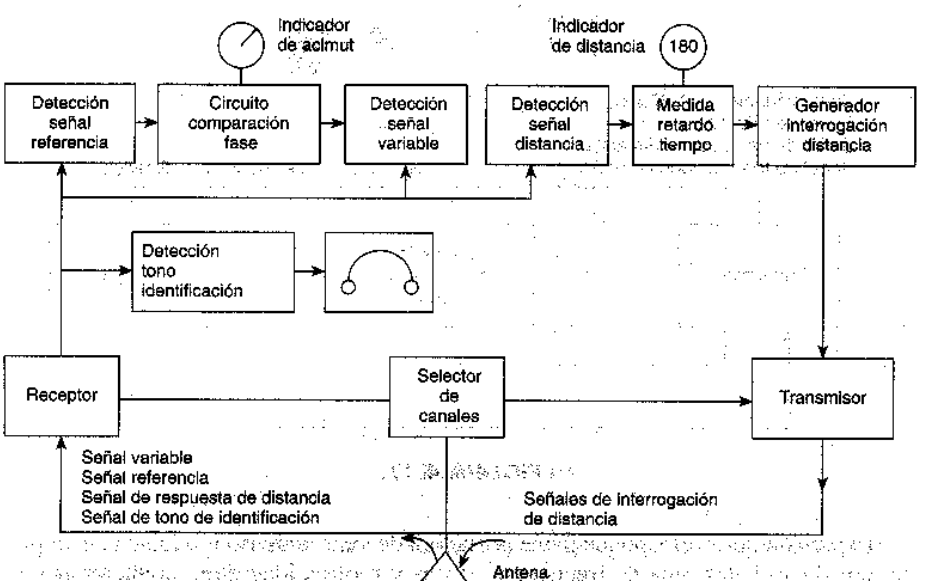


Fig. 505

El TACAN:

El TACAN (Tactical Air Navigation) es un sistema de utilización militar, en Europa, usado también civilmente en EEUU.

Debido a que el TACAN utiliza las frecuencias de la banda 962 a 1213 MHz, el sistema de antenas es más pequeño que el utilizado por el emisor VOR y por tanto, es mucho más adecuado para ser utilizado en barcos militares.

La información que proporciona el TACAN es similar a la del conjunto VOR / DME, es decir, indicación de demora y distancia, siendo fiable su utilización hasta las 200 MN.

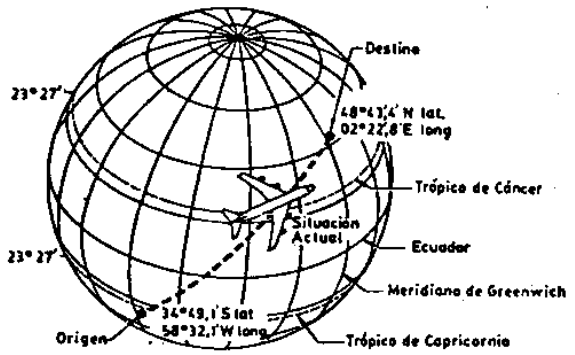
Para la ***determinación del azimut*** el emisor TACAN trabaja en las frecuencias de 962 a 1024 MHz y de 1151 a 1213 MHz, emitiendo trenes de impulsos y midiéndose a bordo el tiempo transcurrido entre dichos trenes.

Para la ***determinación de la distancia*** el TACAN funciona como los DME trabajando en las frecuencias para el interrogador de 1025 a 1150 MHz, disponiendo de 126 canales en cada una de las bandas de transmisión del emisor TACAN.

SISTEMAS DE LARGA DISTANCIA (504).

Sistemas de Navegación Inercial:

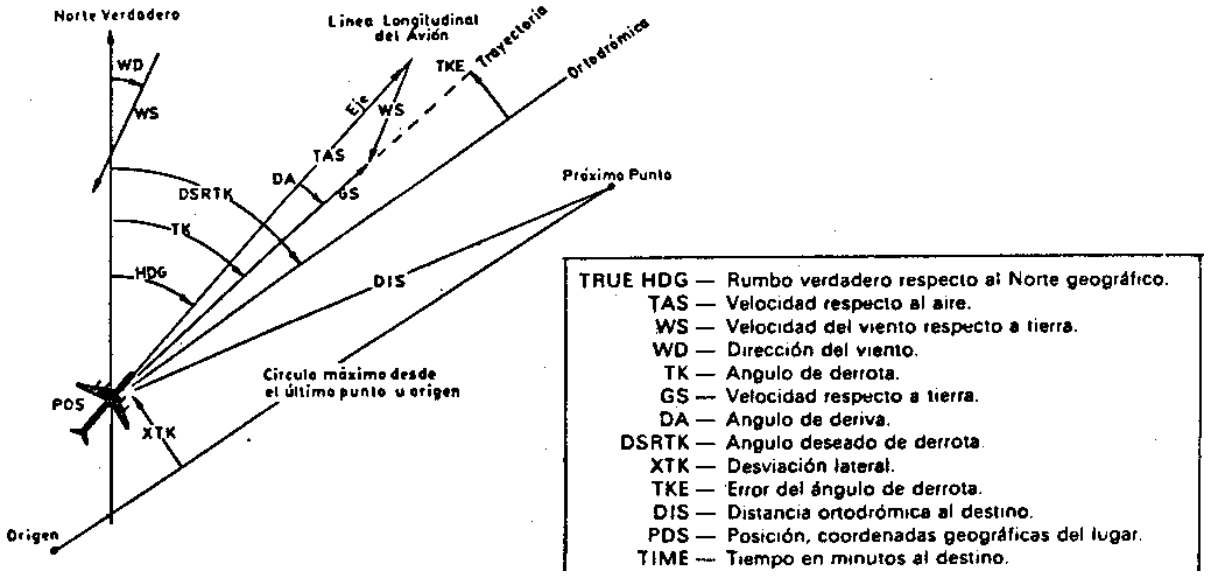
Es un sistema de navegación autónomo de navegación que determina la posición y la velocidad de la aeronave por integración de la aceleración según tres ejes y dos condiciones iniciales; coordenadas del punto de partida y velocidad inicial nula.



Como elemento sensor, el sistema utiliza una plataforma estable, perpendicular en todo momento a la vertical local, con tres giróscopos que proporciona información angular de las aceleraciones medidas en tres acelerómetros.

El calculador del sistema permite realizar la navegación ortodrómica entre los puntos que se introduzcan.

El sistema de navegación inercial proporciona los siguientes datos:



El Sistema DOPPLER:

Es un sistema autónomo de navegación que permite determinar la velocidad respecto al suelo y el ángulo de deriva, que es el formado por el eje longitudinal del avión con la trayectoria seguida.

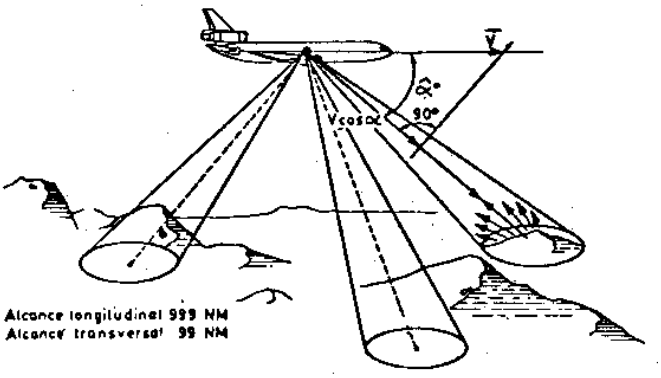


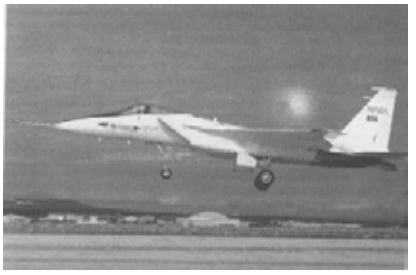
Fig. 506

Trabaja con una antena directiva que emite oblicuamente tres o cuatro haces en las frecuencias de 8800 a 15800 MHz formando un ángulo pequeño con la vertical. El receptor analiza las diferencias entre las frecuencias emitidas y recibidas para cada haz y calcula el vector velocidad respecto al suelo y el ángulo de deriva (Fig. 506).

SISTEMAS DE APROXIMACIÓN Y ATERRIZAJE (505).

El final del vuelo de una aeronave comienza en la fase de aproximación; se entiende por aproximación la parte del vuelo en la que la aeronave realiza la transición de las condiciones de vuelo normales (vuelo de crucero) hasta el comienzo del aterrizaje.

El aterrizaje comienza en el instante de la toma de contacto del tren de aterrizaje de la aeronave con la pista y termina cuando ésta ha reducido la velocidad lo suficiente para abandonar la pista o parar en la misma; así pues, la fase de aterrizaje se realiza totalmente en la pista.



Cuando la visibilidad es buena y la operación de aproximación y aterrizaje es realizada con la información visual recibida, se dice que es realiza bajo las condiciones **VFR** (Visual Flight Rules).

Cuando las condiciones de estar reglas no se cumplen, la aproximación y el aterrizaje se realizan bajo condiciones **IFR** (Instrument Flight Rules).

La maniobra de aproximación y aterrizaje en condiciones meteorológicas adversas constituyen el obstáculo más grande para la aviación.

Existen dos procedimientos básicos de aproximación IFR dependiendo de las ayudas utilizadas:

- ***De precisión:***

  Las ayudas utilizadas son el ILS, el MLS y el GCA. En los tres sistemas el guiado de la aeronave lo realiza el piloto, pero mientras que con los dos primeros la información la recibe directamente de los instrumentos, en el caso del GCA la información la recibe del controlador en tierra.

- ***Poca precisión:***

  Las ayudas utilizadas son el VOR, DME y el ADF.

  En una aproximación IFR la transición de vuelo en ruta al punto de aproximación inicial IAF (Initial Approach Fix) se realiza a una altitud de seguridad determinada; más tarde, el piloto desciende al punto de aproximación final FAF (Final Aproach Fix), a una determinada distancia del final de pista, y comienza la aproximación final para el aterrizaje. Es en esta fase cuando la aeronave utiliza los sistemas de aproximación.

  Las alturas mínimas en las aproximaciones finales son establecidas por las autoridades:

  En el caso de una aproximación de **precisión**, los mínimos para el aterrizaje se conocen como altura de decisión HD (Decision Height), que es la altura por encima del nivel del mar en la que el piloto debe decidir si continúa la aproximación o aborta.

  En caso de **poca precisión**, el mínimo se conoce como MDA (Minimum Descent Altitude), que es definido como el nivel más bajo de altitud sobre el nivel del mar autorizado para comenzar la aproximación final para el aterrizaje.

EL ILS (INSTRUMENTAL LANDING SYSTEM) (506).

Es un sistema que permite realizar la aproximación final con márgenes reducidos de visibilidad, tanto horizontal como vertical, siempre que sean superiores a unos límites que dependen del tipo de instalación embarcada o en tierra, y de las características topográficas del entorno.

Se basa en la materialización mediante señales radioeléctricas de una trayectoria de aproximación como intersección de dos superficies, una de ellas vertical que contiene el eje de la pista y otra perpendicular a la anterior e inclinada con respecto a la horizontal el ángulo de descenso estipulado para la maniobra. El sistema proporciona indicación de la desviación de la trayectoria del avión respecto a estas dos superficies.

El sistema ILS, adoptado por la OACI en el año 1949, está formado por tres subsistemas (Fig. 507):

- Localizador (LDC).
- Trayectoria o senda de planeo (GP o GS).
- Tres radiobalizas o un equipo medidor de distancias DME que las sustituye.

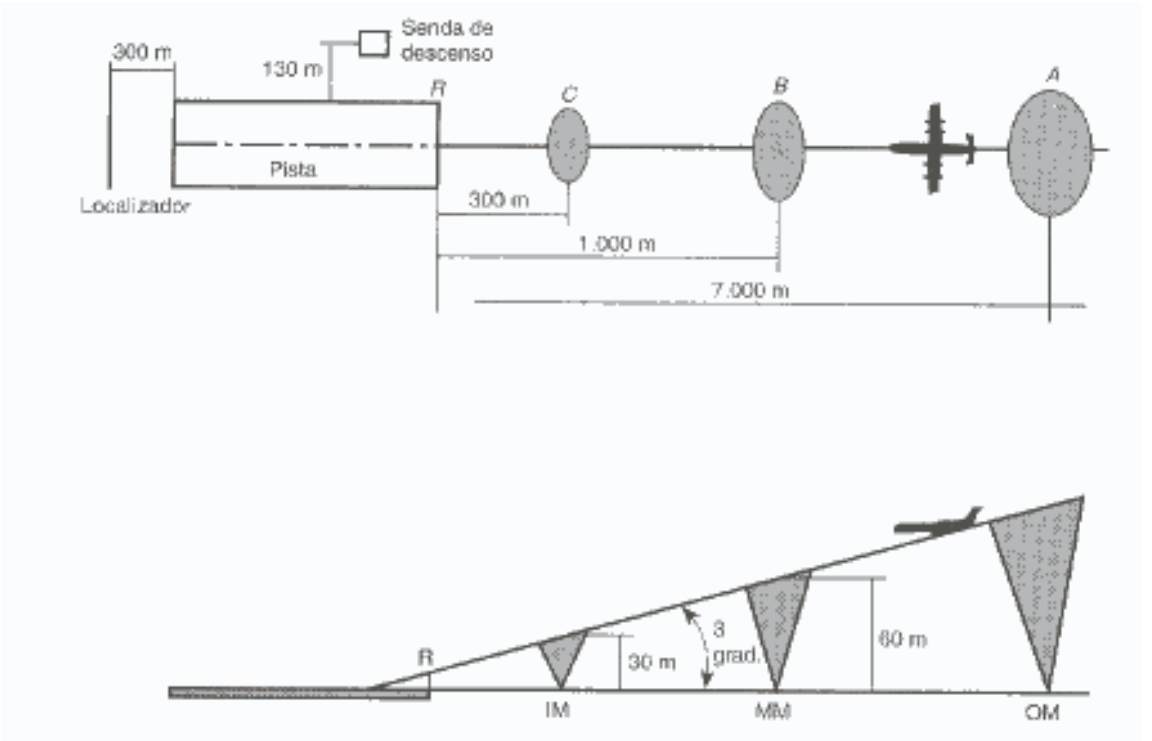


Fig. 507

Localizador:

Proporciona información de la desviación lateral respecto al plano vertical que contiene el eje de la pista, trabaja en VHF emitiendo una portadora comprendida entre 108 y 112 MHz, de 40 canales espaciados 50 KHz, estando cada canal asignado a una estación (Fig. 508).

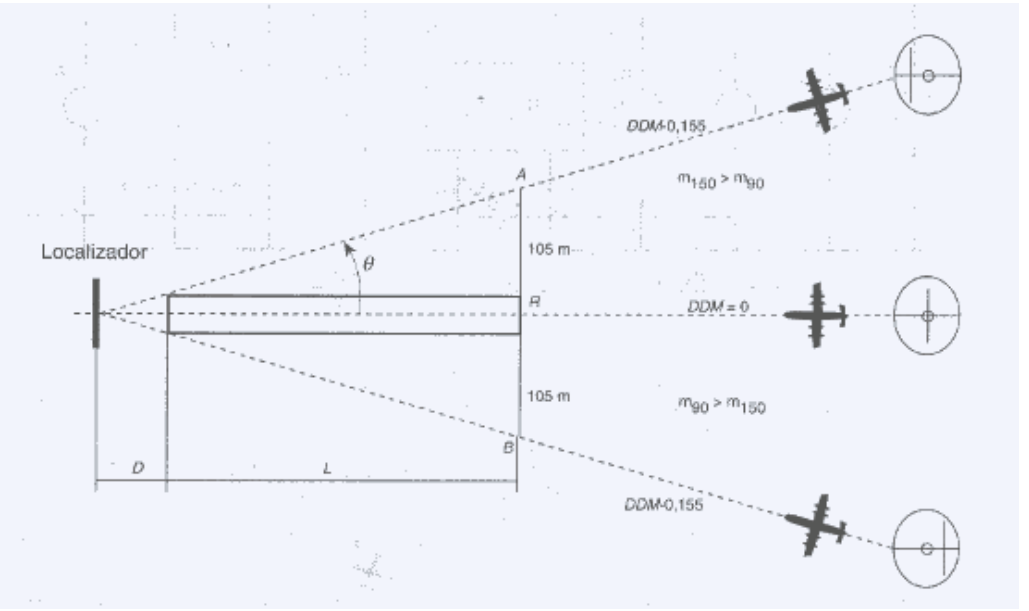


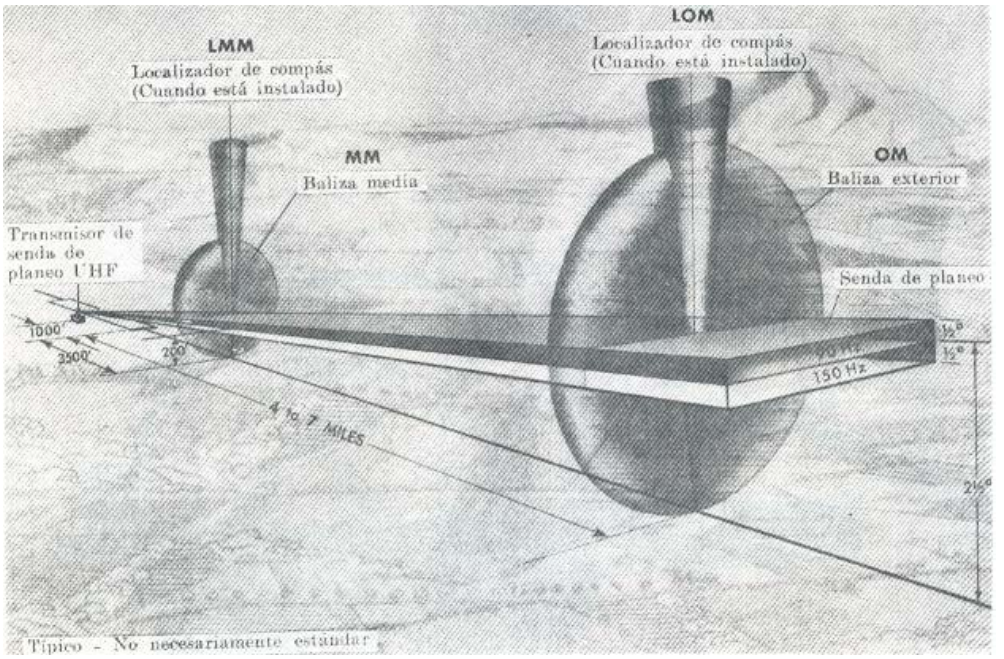
Fig. 508

La portadora está modulada por dos bandas laterales de 90 Hz y 150 Hz, de tal forma que a cada lado del eje de la pista una modulación es más profunda que la otra, a la izquierda de la pista es más fuerte la modulación de 90 Hz, mientras que a la derecha es más profunda la de 150 MHz. En el eje de la pista ambas modulaciones se equilibran. Esta diferencia de profundidad determinará la desviación lateral de la aeronave con respecto a eje de la pista.

El Localizador se instala en el eje de la pista a una distancia aproximada de unos 300 metros y su cobertura es de 25 MN en un sector de 20º.

Junto con las bandas laterales se emite otra señal de 1020 Hz que modula en amplitud a la portadora para identificar a la estación.

La senda de planeo (Glide Path o Glide Slope):



La antena de la senda se instala desplazada del eje de la pista entre 120 y 180 metros y a una distancia del umbral de pista dependiente del ángulo de descenso que se especifique.

La frecuencia de trabajo está comprendida entre 328,6 y 335,4 MHz. Para cada canal asignado al Localizador existe una frecuencia correspondiente de la senda.

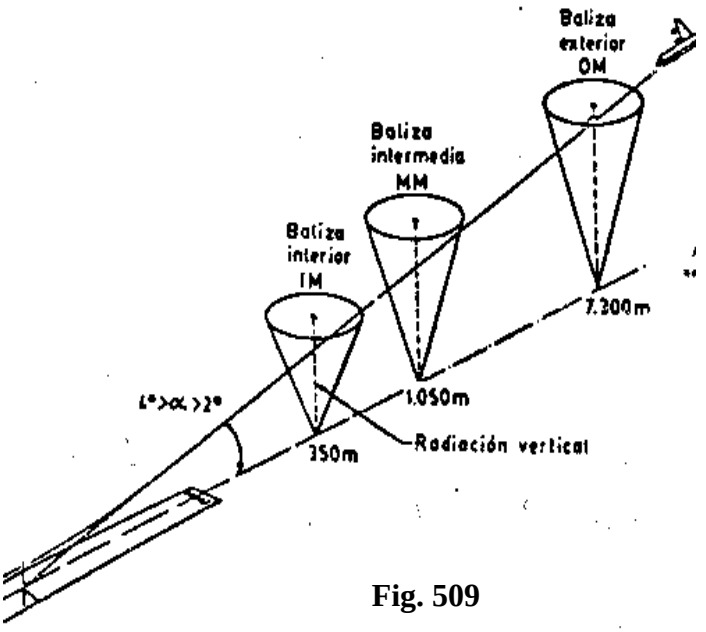
También está modulada en amplitud por dos señales de 90 y 150 Hz. Por debajo del plano inclinado que contiene la trayectoria de descenso teórico predomina la modulación de 150 Hz, y por encima la de 90 Hz, de tal forma que se equilibran en el plano citado.

La diferencia de profundidad de modulación determinará la separación vertical con respecto al plano de descenso.

La senda de planeo forma un ángulo con la horizontal comprendiendo entre 2º y 4º, tiene una cobertura de 10 MN en un ángulo de 8º.

Cuando el piloto selecciona la frecuencia del Localizador se sintoniza automáticamente la frecuencia de la senda.

Las radiobalizas IM, MM y OM (Fig. 509):



El equipo se complementa con tres radiobalizas (o un equipo medidor de distancia DME) situadas sobre la vertical de la trayectoria que dan al piloto una indicación de distancia a la pista. Son equipos que transmiten en 75 MHz con un diagrama de radiación de gran directividad vertical. Al sobrevolarlas el avión recibe una señal codificada en Morse que se traduce, en el tablero de instrumentos, en una indicación cromática distinta para cada baliza.

Fig. 509

Los equipos ILS se clasifican en tres categorías según los valores mínimos de visibilidad horizontal y vertical para los que se pueden realizar un aterrizaje de precisión.

Categoría I:

Es la operación correspondiente a la aproximación normal básica del ILS que pueden realizar, sin restricciones, todos los pilotos con calificaciones IFR.

La operación está limitada a una altura de decisión (HD) de 200 pies (60 metros). Con un alcance visual en pista no inferior a 800 metros.

Categoría II:

En esta categoría la operación está limitada hasta una HD de 100 pies (30 metros) con un alcance visual en pista no inferior a 400 metros.

Categoría III A:

La operación no tiene limitación en cuanto a la HD y el alcance visual en pista no debe ser inferior a 200 metros. La aeronave puede aterrizar sin referencias visuales, pero a continuación, durante el recorrido de aterrizaje, el piloto debe conducir el avión con referencias visuales.

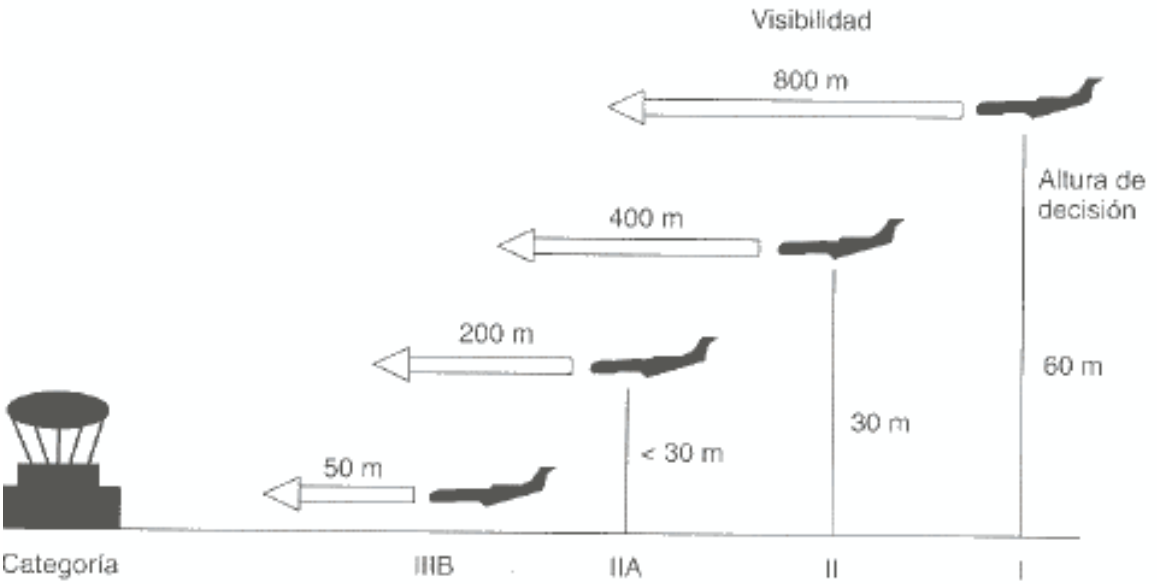
Categoría III B:

No tiene limitación en cuanto a la HD y el alcance visual en pista no debe ser inferior a 50 metros. La aeronave puede aterrizar y efectuar el recorrido de aterrizaje sin referencias visuales. El rodaje se efectúa hacia la zona de aparcamiento se efectúa con referencias visuales.

Categoría III C:

La operación no tiene limitación en cuanto HD ni alcance visual. Efectuándose todas las operaciones, incluso el aparcamiento sin referencias visuales.

Categoría	HD	Alcance visual
I	200 pies (60 m)	800 m
II	100 pies (30 m)	400 m
III A	0	200 m
III B	0	50 m
III C	0	0



EL MLS (MICROWAVE LANDING SYSTEM) (507).

Este sistema se adoptó en 1978 por la OACI como el sustituto del ILS, esperándose su total implantación durante la primera década del siglo XXI, con el objeto de cubrir las necesidades en lo referente a las aproximaciones y aterrizajes de precisión, tales como:

- ✓ Información completa en las tres coordenadas.
- ✓ Cobertura angular amplia.
- ✓ Buenas características aun en sitios difíciles (montañas, etc)
- ✓ Fácil implantación debido al tamaño de sus antenas.
- ✓ Presencia de un enlace da datos tierra – aire.

El sistema proporciona:

1. Información angular:
   - ✓ *Azimut de aproximación.*
   - ✓ *Azimut posterior.*
   - ✓ *Elevación de aproximación.*
   - ✓ *Elevación de enderezamiento.*

2. Datos:
   - ✓ *Básicos.*
   - ✓ *Auxiliares.*

3. Distancia:

   Mediante equipos medidores de distancia DME.

   Mientras el ILS suministra una señal de error con relación a una trayectoria fija, el MLS permite seguir cualquier trayectoria deseada, incluida la curva, para iniciar la aproximación (Fig. 510).

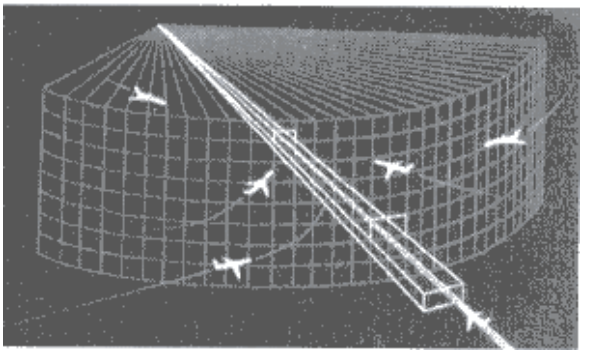


Figura 510

   Características del MLS:

- Frecuencias de trabajo: 5031 a 5090,7 MHz con 200 canales espaciados 300 KHz.

- Cobertura:
  - Azimut = 40º
  - Elevación 0,9º a 15º.
  - Distancia = 20 MN.
- Precisión en el umbral de pista (50 pies de altura):
  - Azimut = Entre 2,2 y 6 metros.
  - Elevación = Entre 0,3 y 0,6 metros.

Información angular:

El sistema consta de 4 radiofaros que emiten haces exploradores estrechos que barren el área de cobertura.

Para la **<u>obtención de la guía de azimut de aproximación</u>**, la antena de azimut de aproximación emite un haz en abanico, estrecho en el plano horizontal y ancho en el vertical, que a velocidad angular constante recorren 40º de un lado al otro de la pista (Fig. 511).

Para la **<u>obtención de la guía de azimut posterior</u>**, la antena utiliza el mismo principio indicado en el párrafo anterior con la diferencia de que el haz recorrido es de 20º a cada lado de la pista. La situación de éste radiofaro es opuesta al de aproximación (Fig.512).

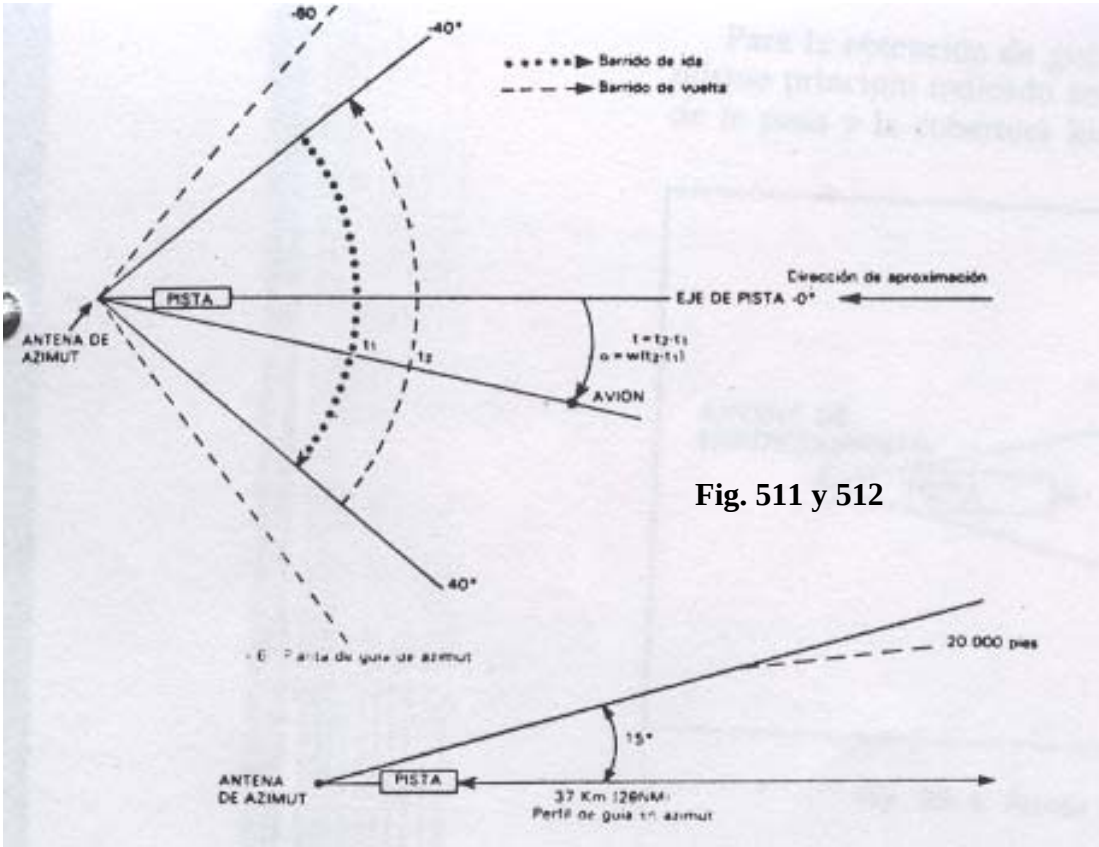


Fig. 511 y 512

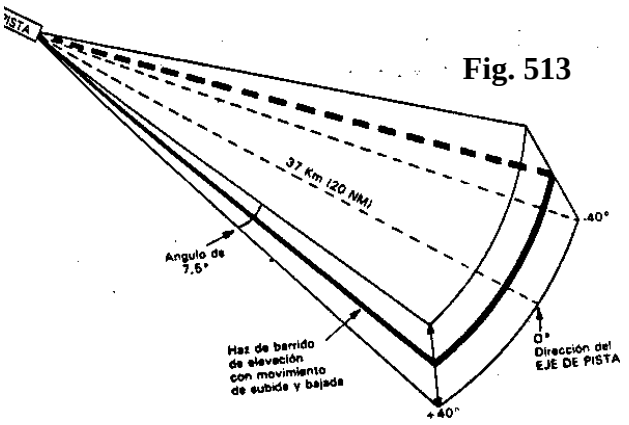


Fig. 513

Para la **<u>guía de elevación de aproximación</u>**, su antena emite un haz en abanico que es estrecho en el plano vertical y ancho en el horizontal, que a velocidad angular constante barre un sector de 15º de elevación (Fig. 513).

Para la obtención de **<u>guía de elevación de enderezamiento</u>**, la antena utiliza el mismo principio anteriormente indicado, pero el haz recorre solo 10º a cada lado de la pista y la cobertura alcanza las 5 MN (Fig. 514).

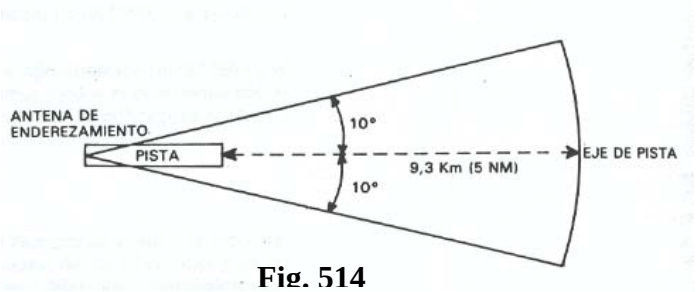
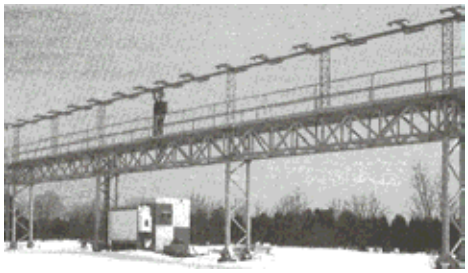


Fig. 514

El receptor identifica cada función de los radiofaros y decodifica su posición midiendo el tiempo que transcurre entre dos pasadas consecutivas de los haces.



La figura muestra la antena del Localizador ILS al ser reemplazada por la antena de azimut del MLS situada justo debajo.

Obtención de datos:

El sistema consta de una Estación Central que transmite los siguientes datos:

- Básicos:
  - Identificación de la estación.
  - Distancia de la antena de azimut de aproximación al umbral.
  - Codificación de las coordenadas DME.
  - Los límites de cobertura de las antenas de azimut de aproximación y posterior.
  - El valor del ángulo de alineación de mínimo descenso.
  - Situación operativa de la función de azimut posterior.

- Orientación de rumbos magnéticos referentes al azimut de aproximación y posterior.

- Auxiliares:
  - Datos meteorológicos y operacionales.
  - Coordenadas de situación del equipo de tierra.
  - Estado de la pista. Información sobre trayectorias de aproximación.

Obtención de la distancia:

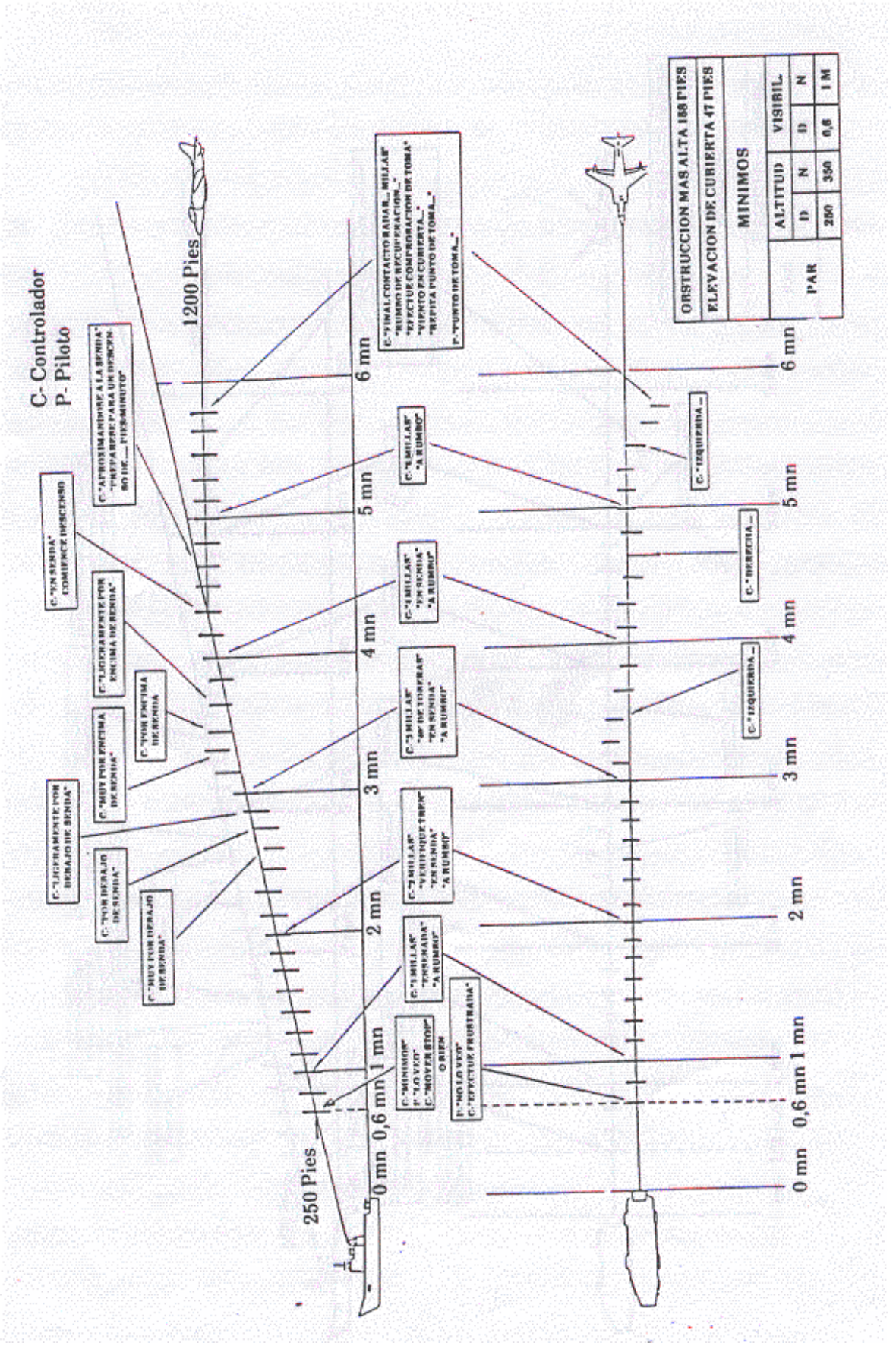
La información de la distancia se obtiene por medio de un DME que puede ser el DME normal (DME/N) o el de precisión (DME/P).

El DME/P puede funcionar en dos modos: el de aproximación inicial (IA) y el de aproximación final (FA). La diferencia entre ambos modos es el aumento considerable de precisión que se obtiene en el modo FA, el cual se utiliza para distancias menores de 7 MN.

APROXIMACIÓN DE PRECISIÓN. EL GCA (GROUND CONTROLLED APPROACH) (508).

El GCA permite a los aviones militares tomar tierra en condiciones de baja o nula visibilidad. Consistiendo, básicamente, en la dirección desde el aeródromo por un controlador de la senda de planeo, desde el inicio de la aproximación final hasta el contacto del avión con la pista (Fig. 515).

El sistema consta de dos radares que proporcionan con gran exactitud indicaciones de elevación y azimut desde el umbral de la pista, de tal manera que el error que se obtiene en el punto de contacto no excede de 30 pies ó 0,2º


C- Controlador
P- Piloto
1200 Pies
250 Pies
0 mn
0,6 mn
1 mn
2 mn
3 mn
4 mn
5 mn
6 mn
C-"APROXIMANDOSE A LA SENDA" "PREPARESE PARA UN DESCENSO DE ___ PIES/MINUTO"
C-"EN SENDA" "COMIENCE DESCENSO"
C-"LIGERAMENTE POR ENCIMA DE SENDA"
C-"MUY POR ENCIMA DE SENDA"
C-"POR ENCIMA DE SENDA"
C-"LIGERAMENTE POR DEBAJO DE SENDA"
C-"POR DEBAJO DE SENDA"
C-"MUY POR DEBAJO DE SENDA"
C-"FINAL CONTACTO RADAR_ MILLAS" "RUMBO DE RECUPERACION_" "EFECTUE COMPROBACION DE TOMA" "VIENTO EN CUBIERTA_" "REPITA PUNTO DE TOMA_"
P-"PUNTO DE TOMA_"
C-"MILLAS" "A RUMBO"
C-"MILLAS" "EN SENDA" "A RUMBO"
C-"MILLAS" "DE DESPEGAR" "EN SENDA" "A RUMBO"
C-"MILLAS" "VEINTIQUATRO" "EN SENDA" "A RUMBO"
C-"MILLAS" "TRES MAS" "A RUMBO"
C-"MINIMOS" P-"LO VEO" C-"MOVER STOP" O BIEN
P-"NO LO VEO" C-"EFECTUE FRUSTRADA"
C-"IZQUIERDA_"
C-"DERECHA_"
C-"IZQUIERDA_"
OBSTRUCCION MAS ALTA 188 PIES
ELEVACION DE CUBIERTA 47 PIES
MINIMOS
PAR
ALTITUD
VISIBIL.
D
N
D
N
250
350
0,6
1 M

EL VUELO INSTRUMENTAL (509).

Existen dos grupos fundamentales de instrumentos:

- **Instrumentos propios del avión:**

  Son aquellos relacionados con el motor, turbina o transmisión:

  - Temperatura de aceite de transmisión y motor.

  - Presión de aceite de turbina y transmisión.

  - Presión y cantidad de combustible.

  - Temperatura de exhaustación.

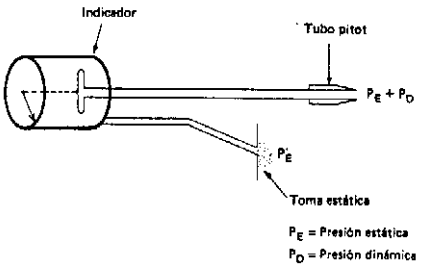
  - Indicador de partículas metálicas en el aceite.
  - Panel de alarmas.
  - Calefacción y refrigeración.

- **Instrumentos de vuelo:**

  Se divide en dos grupos:

  - ***Instrumentos de presión:***

    - **Anemómetro**: Es un medidor de presión calibrada para indicar medidas de velocidad, normalmente en nudos. El sistema está formado por el tubo Pitot, la toma estática y el indicador.



Tipos de velocidades aerodinámicas:

Las variaciones en la presión del aire, como por ejemplo los cambios de altitud, los errores en el sistema Pitot con toma estática y otros factores, hacen no baste con limitarse a leer un número en un indicador que para determinar la velocidad aerodinámica.

- *Velocidad aerodinámica indicada (IAS):*

  Es la lectura tomada directamente del velocímetro. Se trata del número al que señala la aguja en el instrumento. Este valor no está corregido para compensar las variaciones de la densidad atmosférica, los errores de instalación (provocados por la posición del tubo de Pitot y de los puertos estáticos) ni los errores propios del instrumento. La velocidad aerodinámica indicada disminuye a medida que se asciende, ya que al disminuir la densidad del aire con la altitud, un menor número de moléculas de aire chocan contra el tubo de Pitot. Este efecto es más apreciable en aviones de alto rendimiento que operan a grandes altitudes. Por ejemplo, en su altitud de crucero, el velocímetro del Boeing 737-400 puede indicar unos 280 nudos aún cuando la velocidad real del avión a través del aire sea superior a los 400 nudos.

- *Velocidad aerodinámica calibrada (CAS):*

  Es la velocidad aerodinámica indicada, corregida para compensar errores de instalación y del instrumento. La diferencia entre la velocidad aerodinámica indicada y la velocidad aerodinámica calibrada suele ser mayor a bajas velocidades aerodinámicas, cuando el flujo de aire en torno a los puertos estáticos es turbulento.

- *Velocidad aerodinámica real (TAS):*

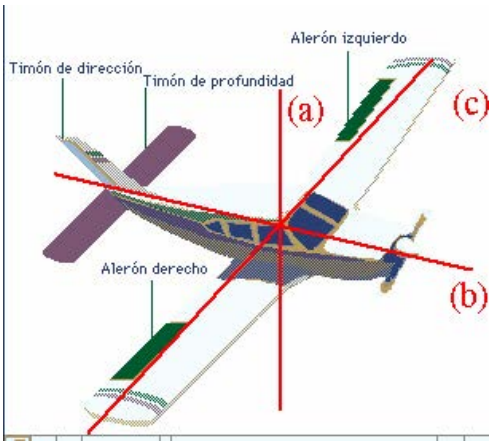
  Es la velocidad real de un avión en el aire que lo rodea. Cuando el avión asciende, el aire circundante se hace menos denso. Por ello, la velocidad aerodinámica indicada (IAS) tiende a disminuir a medida que aumenta la altitud. Para determinar a qué velocidad se mueve realmente el avión por el aire, el piloto calcula la TAS sobre la base de la altitud de presión actual del avión y de la temperatura del aire exterior.

- ➢ **Variómetro**: Este instrumento mide la velocidad vertical del avión, en pies por minutos en función de la variación de la presión atmosférica.

- **Altímetro**: Es un barómetro calibrado para leer en pies, que mide la presión estática y la compara con una cápsula barométrica estanca que permanece siempre a la misma presión. El altímetro está reglado para la presión estándar al nivel del mar, que es de 29,92 pulgadas de mercurio. Cuando varía la presión puede corregirse el reglaje por medio de un botón manejable por el piloto (QNH).

- ***Instrumentos giroscópicos:***

  - **Horizonte artificial**: Utiliza la propiedad de la rigidez giroscópica presentando al piloto la actitud *de "morro bajo"* o *"morro alto"* respecto a la horizontal. Indica también los grados de *"roll"* o *"alabeo de los virajes"*. Muestra al piloto la posición del avión con relación al horizonte terrestre. Indica la posición de dos de los tres ejes de un avión: ejes horizontales (c) y (b).



  - **Bastón y bola**: Utiliza el fenómeno de la presión para su funcionamiento. El bastón indica la cantidad de giro y la bola sometida a la gravedad y fuerza centrífuga, la calidad del giro, es decir, si el giro es coordinado, hay *"derrape"* o *"resbale"*. Viraje coordinado significa que para que el avión gire hacia la derecha o izquierda, deberá rotar de forma coordinada los ejes vertical (b) y perpendicular (a), esto se logra con la bola del nivel centrada.

- **Giro direccional**: La Brújula es el instrumento que le permite al piloto conocer el rumbo magnético en el que el avión se encuentra volando. Es uno de los instrumentos más antiguos que podemos encontrar en nuestros días, y es un instrumento que encontraremos en todos los aviones sin importar el tamaño o el tipo de estos.

El Giro Direccional es un instrumento giroscópico y es lo mismo que la brújula, solo que más estable durante los movimientos de ascenso y descenso del avión, este instrumento también le indica al Piloto el rumbo en el que el Avión se encuentra volando, hay algunos modelos de Giro Direccional que cuentan con un dispositivo adicional para ser acoplados al Piloto automático y así indicarle a éste el rumbo que debe seguir.

EL ESPACIO AÉREO (510).

El espacio aéreo en el que se facilita servicio de tránsito aéreo se clasifica en:

- Espacio aéreo controlado: Se suministra servicio de control de tránsito aéreo.

- Espacio aéreo no controlado: Se suministra servicio de asesoramiento anticolisión, en la medida que los medios técnicos lo permitan.

Espacio aéreo controlado:

Se divide a su vez en:

- ***Espacio aéreo inferior (FIR)*** *(Flying Information Region):* Se extienden desde el nivel del suelo o mar hasta el nivel de vuelo 250 ó 245.

- ***Espacio Aéreo Superior (UIR)*** *(Upper Information Region):* Se extiende desde el límite superior del FIR hacia arriba.

Los límites de estos espacios aéreos vienen definidos en la publicación AIP (Aeronautical Information Publication).

En España existen el FIR Madrid, FIR Barcelona y FIR Canarias, con sus UIR correspondientes.

El FIR se subdivide en (Fig. 516):

- *Área Terminal* (TMA): Es un área de control que abarca dos o más aeropuertos.

- *Área de Control* (CTA): Es un espacio aéreo controlado que se extiende hacia una altura determinada y abarca a un solo aeródromo.

- *Zona de Control* (CTR): Es un espacio aéreo controlado que se extiende desde la superficie hasta los 1000 pies de altura, y que tiene una forma irregular.

- *Zona de Aeródromo* (ATZ): Espacio de dimensiones definidas establecido alrededor de un aeropuerto para la protección del tráfico aéreo.

- *Aerovía* (AWY): Pasillo aéreo de dimensiones definidas y equipados con radioayudas para la navegación.

En la figura se muestra la organización general del espacio aéreo:

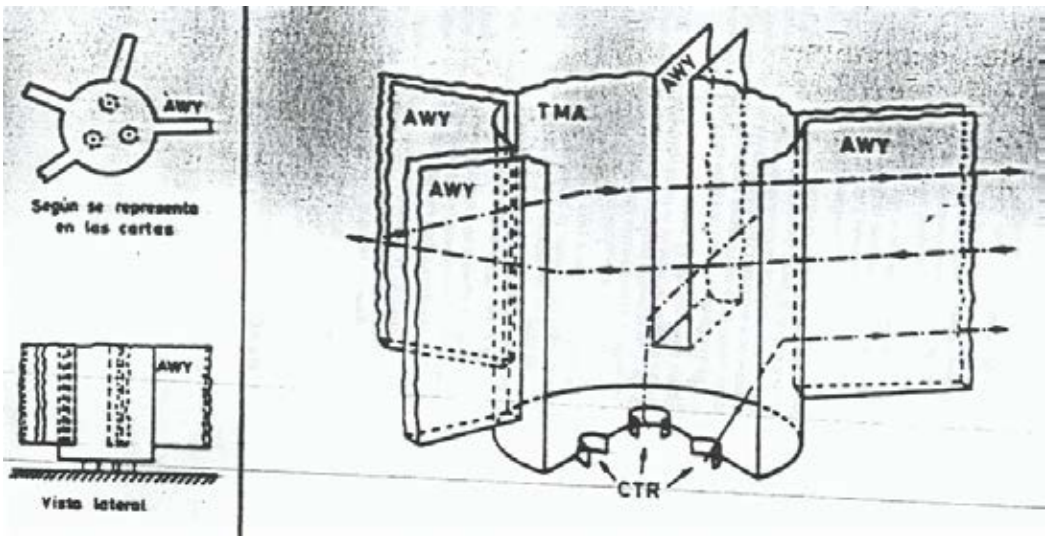
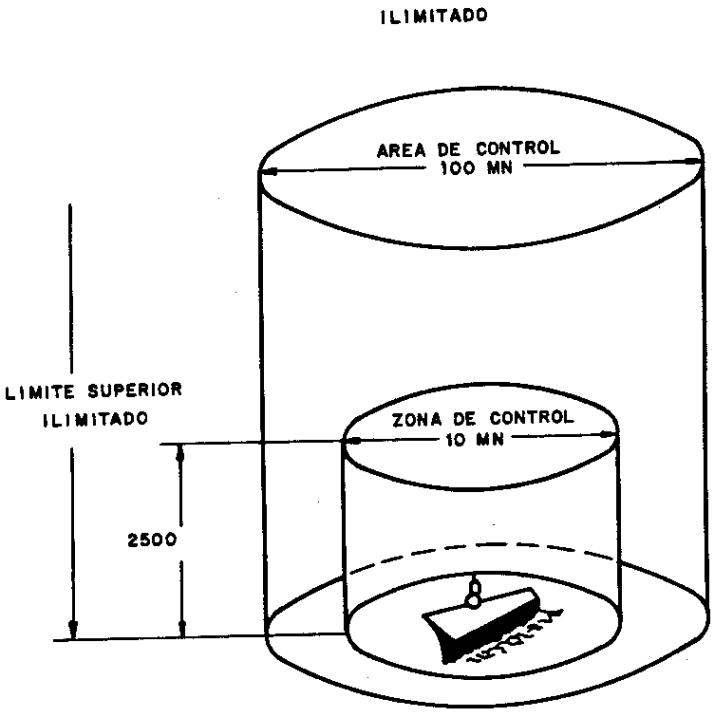


Fig. 516

En España en espacio aéreo controlado queda materializado de la siguiente forma:

UIR	*Barcelona, Canarias y Madrid*
FIR	*Barcelona, Canarias y Madrid*
TMA	*Almería, Asturias, Barcelona, Bilbao, Canarias, Corredor de Melilla, Galicia, Madrid, Palma, Santander, Sevilla, Valencia y Zaragoza*
CTA	*Albacete, Granada, Pamplona, San Sebastián y Vitoria*
CTR y ATZ	*Albacete CTR, Morón CTR, Rota CTR, Talavera CTR, Albacete ATZ, Badajoz/Talavera ATZ, Morón ATZ, Murcia/Alcantarilla ATZ, Rota ATZ, Agoncillo (Logroño) ATZ, Almagro (Ciudad Real) ATZ, Betera (Valencia) ATZ, Colmenar Viejo (Madrid) ATZ, El Copero (Sevilla) ATZ y Getafe (Madrid) ATZ*

El Área y Zona de Control en la mar queda definida:



VUELO VISUAL Y VUELO INSTRUMENTAL (511).

Vuelos VFR:

- Se realizarán de forma que la aeronave vuele en las siguientes condiciones de visibilidad: 8 Km en el nivel de vuelo (FL) 100 y superior y 5 Km por debajo del FL 100.

- Podrán autorizarse visibilidad inferiores de hasta 1500 metros para determinadas velocidades que permitan una adecuada visión con la antelación suficiente.

- No despegarán ni aterrizarán si el techo de las nubes es inferior a 450 metros o si la visibilidad en tierra es inferior a 5 Km.

- Se efectuarán a velocidades subsónicas y en horario de orto a ocaso.

- Excepto cuando sea necesario para el despegue o el aterrizaje no se efectuarán:

- A una altura inferior a 150 metros.

- A una altura inferior a 300 metros sobre aglomeraciones de edificios ni reuniones de personas.

Vuelos IFR:

- Podrán operar en el espacio aéreo controlado y no controlado.

- Se efectuarán a un nivel que no sea inferior a la altitud mínima de vuelo establecida en un determinado espacio aéreo o, en caso de que tal altitud mínima no se haya establecido:

- Por lo menos 300 m por encima del obstáculo más alto que se halle dentro de un radio de 8 Km con respecto a la posición estimada de la aeronave en vuelo.

- Por lo menos 600 m por encima del obstáculo más alto que se halle dentro de un radio de 8 Km con respecto a la posición estimada de la aeronave en vuelo, sobre terreno elevado o en áreas montañosas.

Los vuelos se hacen casi siempre por niveles de vuelo (Múltiplos de 100 pies) referidos a la presión estándar al nivel del mar, que es 29,92. De esta manera todos los aviones vuelan según la isobara correspondiente al nivel de vuelo asignado.

Existen niveles de vuelo diferentes para VFR e IFR, pero cuando una aeronave en vuelo visual se encuentre dentro del espacio aéreo sólo instrumental (aerovía) deberá utilizar in nivel de vuelo IFR.

NIVELES DE VUELO VFR			
RUTA MAGNÉTICA			
De 000 a 179		**De 180 a 359**	
NIVELES DE VUELO IMPARES + 500 pies	35 55 75 95 115 135 155 175 195	NIVELES DE VUELO PARES + 500 pies	45 65 85 105 125 145 165 185 etc.

NIVELES DE VUELO IFR			
RUTA MAGNÉTICA			
De 000 a 179		**De 180 a 359**	
NIVELES DE VUELO IMPARES	10 30 50 70 250 270 310 330 etc.	NIVELES DE VUELO PARES	20 40 60 80 260 280 320 340 etc.

PREPARACIÓN DEL VUELO (512).

Antes de salir a volar, tanto en misión táctica como de adiestramiento, el piloto necesita conocer de antemano una serie de datos que después, los utilice o no, no podrá adquirir en el aire o que en la estrechez de su puesto de pilotaje, si puede adquirirlos, lo distraerán de otras funciones:

- Meteorología.
- Duración del vuelo.
- Punto de toma previsto y alternativos.
- Peso al despegue.
- Radioayudas utilizables.

El piloto ha de preparar su vuelo, instrumental o visual, consultando algunas de estas publicaciones:

✓ Manual de piloto. Baja cota.

✓ Manual de Piloto. Alta cota.

✓ Carta aeronáutica del mundo.

✓ Carta de baja cota de la Península Ibérica.

✓ Carta de alta cota de la Península Ibérica.

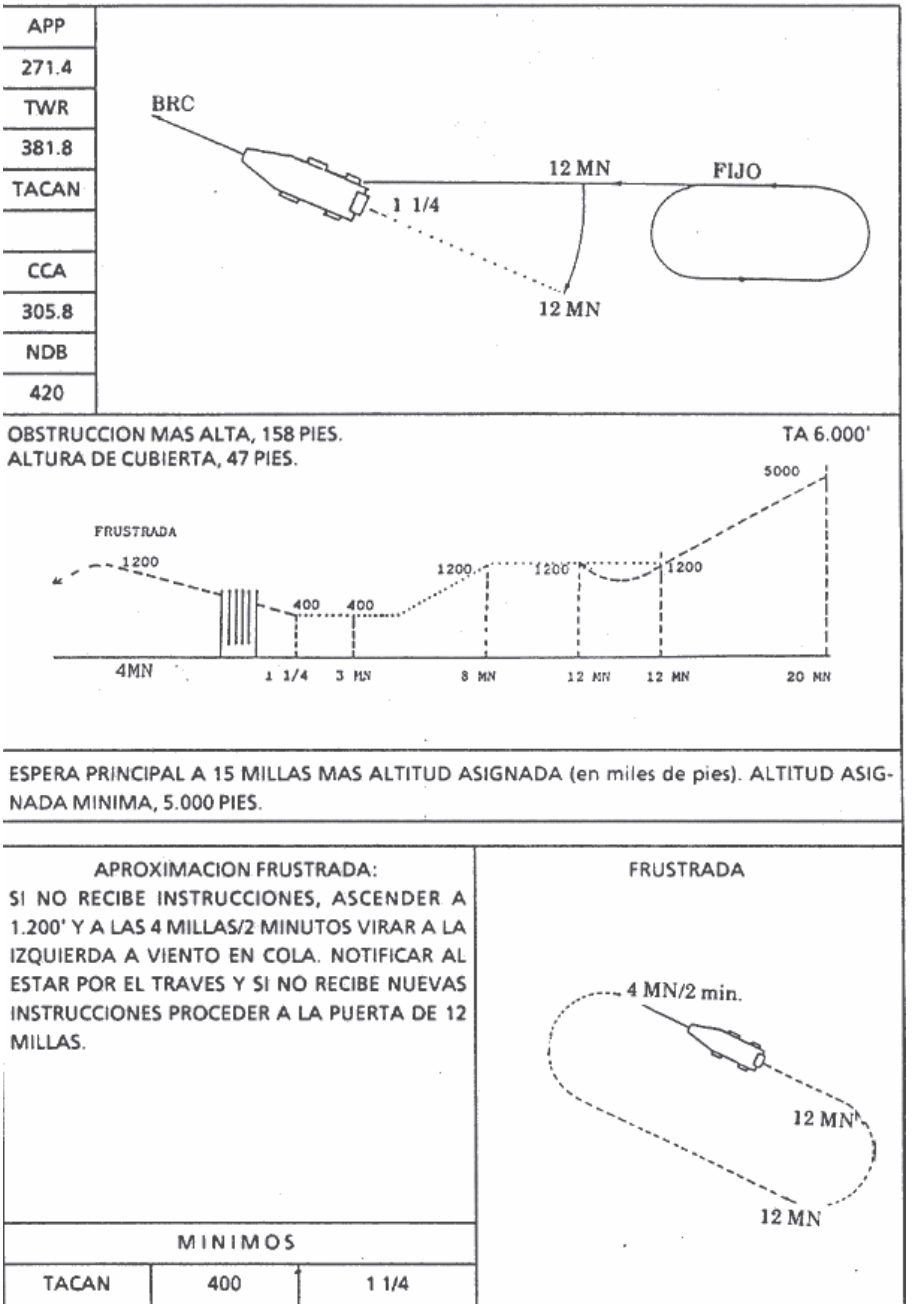
✓ Carta de Áreas Terminales.

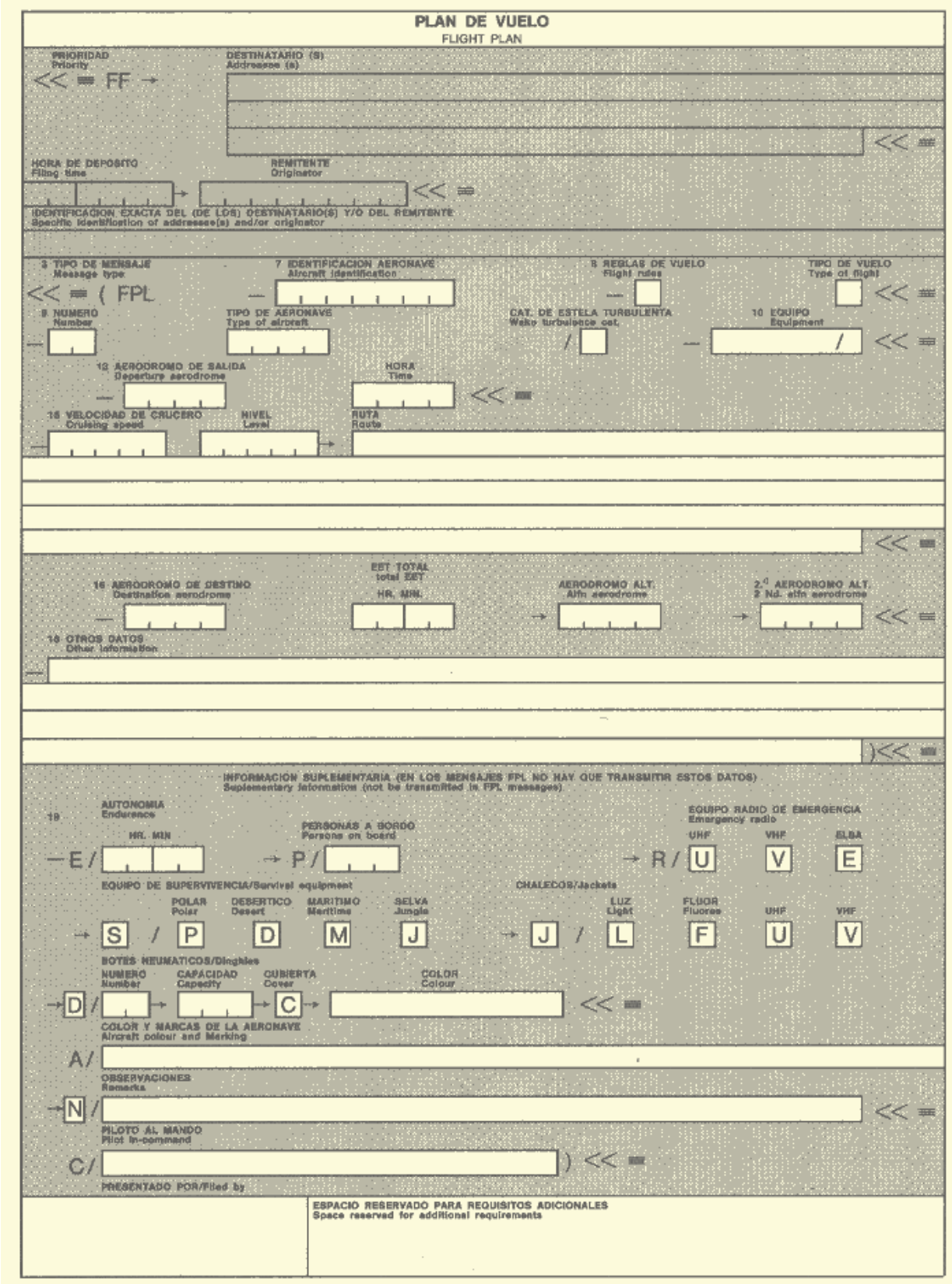
✓ AIP España.

✓ NOTAM'S (Notice to Airmen).

Con la información extraída de estas publicaciones traza en la Carta o en la *"hoja de ruta"* los rumbos a seguir, puntos notables o de cambio de rumbo, puntos de notificación, radioayudas que vaya a utilizar, horas estimadas de llegadas, puntos de decisión de los aeródromos alternativos, zonas prohibidas o restringidas, etc.

Repasará los procedimientos de *"toma"* en el lugar de destino.



Así como también los de espera.

Antes del vuelo, el piloto rellena el “Plan de vuelo”, en el que informa de los datos fundamentales del mismo.