

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA DE CARTAGENA



**Trabajo Fin de Grado**

## **Estudio y análisis de los sistemas de radionavegación en aeropuertos**



AUTOR: Yaroslav Marchukov

DIRECTOR(ES): Juan Pascual Garcia

Julio 2012



<b>Autor</b>	Yaroslav Marchukov
<b>E-mail del Autor</b>	yarikm@hotmail.es
<b>Director(es)</b>	Juan Pascual García
<b>E-mail del Director</b>	juan.pascual@upct.es
<b>Título del TFG</b>	Estudio y análisis de los sistemas de radionavegación en aeropuertos
<b>Resumen</b>	
<p>El presente trabajo tiene como objetivo el estudio y análisis de los sistemas de ayuda a la aproximación y aterrizaje que son empleados en los sistemas de comunicaciones en los aeropuertos. Estos sistemas están basados en la obtención de la posición, a partir de un equipo puesto en tierra, de la nave para el cálculo del rumbo para una aproximación segura.</p> <p>Todos los sistemas a tratar son sistemas radio, puesto que esta frecuencia de funcionamiento es óptima para este tipo de naves. Se utilizan equipos de baja frecuencia, del orden de los MHz, como es el caso de ILS (Instrument Landing System), hasta equipos del rango de las microondas como el MLS (Microwave Landing System).</p> <p>Así pues, en este trabajo se pretende enumerar los sistemas de radionavegación en funcionamiento, sus características, destacar las principales ventajas e inconvenientes y hacer un estudio del futuro de dichos sistemas.</p>	
<b>Titulación</b>	Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación
<b>Departamento</b>	Departamento de Tecnologías de la Información y Comunicaciones
<b>Fecha de Presentación</b>	Julio - 2012

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	3
2. ILS (Instrument Landing System) .....	5
2.1. Localizador.....	5
2.2. Senda de planeo.....	7
3. MLS (Microwave Landing System).....	9
3.1. Principio de funcionamiento .....	9
3.2. Ventajas frente a ILS.....	10
4. PAR (Precision Approach Radar).....	12
5. DME (Distance Measuring Equipment) .....	14
6. VOR (VHF Omnidirectional Range) .....	16
7. TACAN (TACTical Aerial Navigation).....	18
8. LORAN (LONg RANge Navigation).....	20
9. Conclusiones .....	22
10. Bibliografía .....	24

## 1. INTRODUCCIÓN

En el año 1902 se patentaba el primer sistema de detección de dirección. Dicha patente la realizaba John Stone Stone, un famoso inventor de la época sobre todo por su trabajo en la telegrafía inalámbrica. Su intención era crear un sistema capaz de detectar la dirección de la cual procedía un mensaje enviado. Estaba pensado para transmisiones de largo alcance, de entre 20 y 70 millas, que pretendía poder ser utilizado sobre todo en los barcos. Este invento era innovador, ya que era un sistema de localización más eficiente frente a condiciones meteorológicas desfavorables que los sistemas usados en aquella época [1].

A partir del año 1930, este invento fue implementado y desarrollado por el científico escocés Robert Watson-Watt para su posterior uso por parte de la RAF (Royal Air Force) Inglesa en la Batalla de Inglaterra (1940). De esta manera nacía el primer sistema de radionavegación, llamado Radio Direction Finder (RDF), y que más tarde iba a conocerse como RADAR [2].

A lo largo de la Segunda Guerra Mundial tuvo una gran importancia, ya que permitió adquirir ventaja táctica de las fuerzas aéreas inglesas frente al ejército alemán, pues se podía conocer la posición del enemigo. De esta manera, los sistemas de radionavegación toman un papel fundamental durante la época y los distintos países comienzan a desarrollar el suyo propio: Alemania desarrolla sistemas de radionavegación para bombarderos nocturnos, en 1942 el Reino Unido desarrolla el sistema GEE (primer sistema hiperbólico) y EEUU crea LORAN (el cual todavía está en uso).

A raíz de su gran utilidad durante el transcurso de la guerra, los sistemas de radionavegación fueron adaptados a su uso civil. A lo largo de las siguientes décadas fueron creados algunos sistemas para la ayuda de aproximación y de aterrizaje de aeronaves, de los cuales algunos siguen en uso. Entre los más importantes se pueden destacar [4]:

- Sistema DECCA: creado en el año 1945, utilizado sobre todo para uso marítimo.
- VOR: creado en el año 1950, utilizado como una radiobaliza para aviones.
- DME: desarrollado a partir del año 1960, consiste en un transpondedor para la medida de distancias hasta las naves.

- OMEGA: año 1968, el primer sistema de navegación global desarrollado por los Estados Unidos basado en tan solo 8 transmisores.
- TRANSIT/NAVSAT: fue el primer sistema de navegación por satélite creado en 1969 y en funcionamiento hasta 1996.
- Sistema GPS: operatividad completa del sistema en el año 1995, sustituyendo a TRANSIT.

Así pues, en el presente trabajo fin de grado se va a hacer un estudio de los sistemas de ayuda a la aproximación y aterrizaje, los denominados sistemas de radionavegación aérea, que son utilizados en los sistemas de comunicaciones en los aeropuertos. Se realizará, a modo de introducción, un breve repaso de la evolución histórica de cada sistema mencionado. Se va a tratar de describir cada uno de los sistemas de la manera más gráfica posible, explicando su arquitectura y su modo de funcionamiento general. Asimismo, se hará el análisis de las características más importantes de los sistemas de radionavegación con el fin de ayudar a entender mejor sus ventajas e inconvenientes.

## 2. ILS (Instrument Landing System)

Tras realizarse el primer vuelo de los hermanos Wright y con los primeros pasos de la aviación comercial, empezó a sentirse la necesidad de un sistema de ayuda que facilitara en aterrizaje de los aviones. En el año 1928, en Estados Unidos, es cuando se pone en funcionamiento este sistema. Un sistema que podemos denominarlo “rudimentario” pero que reunía las condiciones previstas. Consistía en una serie de instrumentos que permitía saber la altura y lejanía de la pista. Esto permitió que el 29 de Septiembre de 1929 el Teniente James Doolittle realizase una serie de aterrizajes sentado en el asiento trasero con la cabina completamente cubierta y guiándose exclusivamente con los instrumentos de abordo. Podemos decir que había comenzado el aterrizaje instrumental, que permitía ayudar a los pilotos a realizar maniobras ante unas situaciones meteorológicas desfavorables [3].

Como ya se ha mencionado se trata de un sistema de aterrizaje instrumental. Es el sistema de ayuda a la aproximación y el aterrizaje establecido por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) como sistema normalizado en todo el mundo. Define una trayectoria rectilínea de débil pendiente dada por la intersección de dos superficies más un sistema de información de la distancia a la pista [5][6].

Todo sistema ILS está formado por los siguientes elementos [8]:

- Localizador: define el plano vertical en el eje de la pista.
- Senda de planeo (GS, glideslope): define el plano de descenso.
- DME (Distance Measuring Equipment): informa de la distancia a la pista interrogando a la estación terrestre (este elemento será descrito con mayor profundidad a lo largo de los apartados siguientes).

A continuación se van a describir, con más detalle, los subsistemas localizador y la senda de planeo.

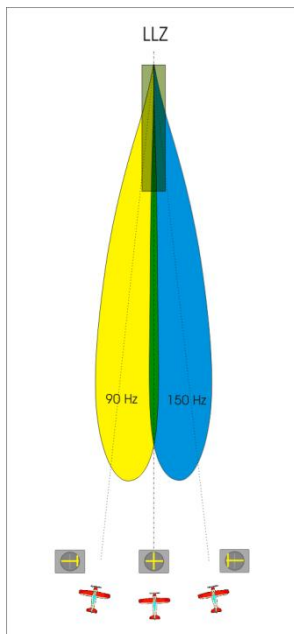
### 2.1. Localizador

El subsistema localizador es el encargado de proporcionar el plano vertical que pasa por el eje de la pista y su prolongación. De esta forma ofrece a la nave información acimutal respecto al eje de la pista durante la maniobra de aproximación [4].

El array localizador se coloca a unos 300m aproximadamente del final de la pista y suele estar formado por conjuntos de 8, 14 o 24 antenas direccionales. El equipo opera en la banda de frecuencias comprendida entre los 108.1 MHz y 111.975 MHz (según se establece en el Anexo 10 de OACI). Las señales de navegación transmitidas consisten en dos tonos: uno de 90 Hz y otro de 150 Hz, que modulan en AM a la portadora con un porcentaje de modulación del 20% cada uno de ellos. Estas señales pueden ser tres [4][5]:

- CSB (Carrier Side Band): señal resultante de la suma de los dos tonos (90+150).
- SBO (Side Band Only): señal resultante de la resta de los dos tonos.
- CLR (Clearance): se transmite con 8 kHz de diferencia respecto a la frecuencia de trabajo del localizador. Sirve de relleno para evitar que las aeronaves intercepten falsos nulos y evitar así que se crea el estar interceptando el eje de pista cuando en realidad no se está haciendo.

Las señales, emitidas por el array de antenas, se suman en el espacio obteniendo una diferencia de modulación diferente de las señales de navegación de 90 y 150 Hz en cada punto del espacio. De esta manera se obtiene un diagrama de radiación de las



**Figura 1: Diagrama de radiación del localizador**

antenas, que radian con polarización horizontal, que proporciona un sector de rumbo en el que predomina uno de los tonos a un lado del rumbo y el otro tono al otro lado. El diagrama de radiación compuesto se generará de forma que cuando un observador se encuentre mirando al Localizador desde el umbral, a su derecha predominará el tono de 150 Hz y a su izquierda el de 90 Hz (Figura 1) [4][5][7].

Además de las señales de navegación, el Localizador transmite el indicativo de la estación ILS consistente en dos o tres letras en código Morse. Esta información se transmite modulando en amplitud a la portadora con un tono de 1020 Hz [4].

El rango de recepción del localizador es próximo a los 50 km dentro de los  $\pm 10$  grados a cada lado del eje, y unos 25 km en un sector de  $\pm 35^\circ$  [7].

El receptor embarcado en las aeronaves, suele ser un receptor de VHF superheterodino, el cual recibe y procesa la señal aplicándose la resultante a un medidor diferencial llamado CDI. Cuando la diferencia es cero, la aguja vertical del CDI se posiciona en el centro indicando que la aeronave está situada sobre el eje de la pista. Además el CDI dispone de un indicado adicional llamado bandera, el cual sólo se activa para avisar que el nivel de señal que se recibe es demasiado bajo y la medida mostrada en el CDI debe ser ignorada [5].

## 2.2. Senda de planeo

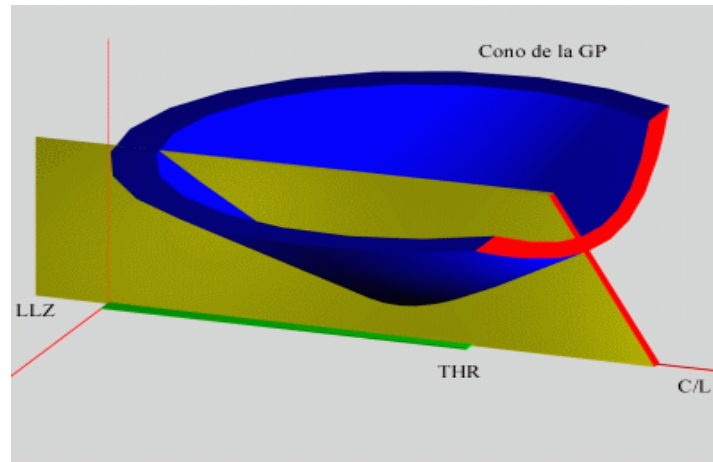
El subsistema senda de planeo es el elemento encargado de proporcionar la elevación respecto a la superficie de aproximación durante la maniobra de aterrizaje. Es decir, obtiene la superficie de descenso que, con una pendiente de entorno a los  $3^\circ$  respecto a la horizontal, pasa por el punto de contacto sobre la pista.

El sistema transmisor de senda de planeo está constituido por un conjunto de antenas (normalmente dos o tres) situadas en vertical sobre un mástil y que se sitúa a unos 300 m del principio de la pista y separado 120 m (aproximadamente) del eje de la misma. Cabe destacar que las antenas utilizan el terreno que se encuentra frente a ellas como plano de reflexión, por lo cual el terreno forma parte del sistema y su influencia en la señal obtenida es muy importante como veremos más adelante [4][7].

Su principio de funcionamiento es semejante al del sistema localizador. Al igual que antes las señales están formadas por dos tonos de 90 y 150 Hz que modulan en AM a la portadora, con la diferencia que el porcentaje de modulación en este caso es del 40% cada uno de ellos [4]. La senda de planeo trabaja en una banda de frecuencias de 328.6 a 335.4 MHz, estando sus frecuencias apareadas con las del sistema localizador según se establece en el Anexo 10 de OACI [5].

El rango de operación es de unos 18 km en un sector de  $\pm 8^\circ$  a cada lado del eje de pista y hasta un ángulo de  $5.25^\circ$  en vertical.





**Figura 2: Trayectoria de aproximación**

Tal y como se ha mencionado anteriormente, la incorporación del terreno como parte del sistema es un factor clave para un funcionamiento óptimo de la senda de planeo. Esto es debido a que la configuración de las antenas y el plano de reflexión (el terreno) generan una superficie de aproximación cónica con vértice en la base del mástil y perpendicular al plano de reflexión. Mediante la intersección de esta superficie cónica y el plano vertical del localizador se obtiene la verdadera trayectoria de aproximación, como se puede apreciar en la Figura 2 [4][7].

### 3. MLS (Microwave Landing System)

Como su propio nombre indica se trata de un sistema de aterrizaje por microondas. Su funcionamiento es muy semejante al del ILS, salvo que opera en un rango de frecuencias de entorno de los 5 GHz.

El sistema MLS surge como un sustituto del ILS, con el fin de paliar las limitaciones de su antecesor. En el año 1986 se formó un comité especial dentro de la Comisión Radiotécnica para la Aeronáutica (Radio Technical Commission for Aeronautics, RTCA) que representaba tanto a autoridades civiles como militares y que intentó definir los requisitos y las especificaciones de un nuevo sistema de aproximación y aterrizaje. Cuatro años más tarde la ICAO comenzó un proceso de selección. Las propuestas más destacadas fueron una por parte de EE.UU. denominada Time Reference Scanning Beam (TRSB) y una británica llamada Doppler Scan (DS). Pero, durante la década de los 90 su desarrollo se estancó y nunca se llegó a implementar en los aeropuertos. Esto era debido a la irrupción del GPS con su promesa de una gran exactitud en conjunción con los llamados sistemas extendidos o de aumentación como el WAAS (Wide Area Augmentation System) en EE.UU., EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) en Europa y MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System) en Asia. La ventaja de esta alternativa era que no era necesaria la instalación de ningún equipo de tierra en los aeropuertos.

No obstante, en el año 2003, el aeropuerto londinense Heathrow invirtió 20 millones de euros en la instalación de equipos MLS de tierra y algunos aviones incorporan sensores que combinan ILS, GPS y MLS. Después de la implantación de los primeros sistemas, muchos otros aeropuertos británicos decidieron incorporar equipos MLS [9][12].

#### 3.1. Principio de funcionamiento

Tal y como ya se ha comentado, el MLS utiliza la banda de frecuencias de microondas (5 GHz). EL rango de frecuencias en el que se trabaja está comprendido entre 5031 y 5090.6 MHz, entre las cuales se distribuyen 200 canales de 300 kHz. Al transmitir un haz estrecho que se extiende a través de un área de cobertura a una velocidad de barrido fija (conocida por el avión), tanto el acimut como la elevación pueden ser calculadas por un receptor de abordo que mide el intervalo de tiempo entre barridos.

El avión calcula el acimut como  $\theta=wt$  donde  $t$  es el tiempo entre 2 pasos del haz. Se realiza la misma operación para el cálculo de la elevación [10].

El sistema MLS soporta cinco funciones [9][10][11][12]:

- a) Orientación acimutal: localizada a unos 300 metros del final de la pista. Su haz cubre al menos  $40^\circ$  en acimut a cada lado de la línea central de la pista. Su alcance es de 20 millas náuticas (37 km). La información del acimut en el receptor se renueva a una velocidad de 39 Hz.
- b) Acimut posterior: proporciona un guiado lateral de aproximación frustrada o desviada. Este equipo es esencialmente el mismo que el anterior, salvo que transmite a una velocidad más baja, ya que los requisitos para la aproximación no son tan estrictos. El sector de cobertura es menor:  $20^\circ$  a cada lado de la pista y alcance de 10 km.
- c) Orientación en elevación: está colocada a unos 100 metros a un lado de la pista de aterrizaje entre el umbral de la misma y la zona de contacto. Cubre la misma zona angular y tiene el mismo alcance en distancia que la estación de acimut. Proporciona un sector en elevación de por lo menos  $15^\circ$ .
- d) Alcance: dotado de un DME/P (Precision Distance Measuring Equipment), que es un DME mejorado.
- e) Comunicación de datos: Los datos básicos transmitidos son la identificación de la estación, la localización exacta de las estaciones de acimut, elevación y DME/P, el nivel de calidad del equipo de tierra en ese instante y el canal del DME/P en uso. A veces se incluyen datos adicionales sobre las condiciones meteorológicas.

### 3.2. Ventajas frente a ILS

Como ya se ha mencionado, el MLS presenta una serie de ventajas y cubre las limitaciones frente a su predecesor [9][10][11][12]:

1. Elimina los problemas de interferencias del ILS
2. Ofrece buen rendimiento en sitios geográficos difíciles
3. El tamaño de las antenas es menor
4. Aumenta la capacidad a nivel de canal (200), 5 veces más que en ILS
5. Permite seguir cualquier trayectoria deseada (incluso curvas para iniciar la aproximación)

6. Proporciona orientación en área de aterrizaje reducidas (como helipuertos en la azotea)
7. Provisión de un acimut trasero
8. Mayor eficiencia frente a condiciones meteorológicas desfavorables
9. Menor coste de preparación, reparación y mantenimiento

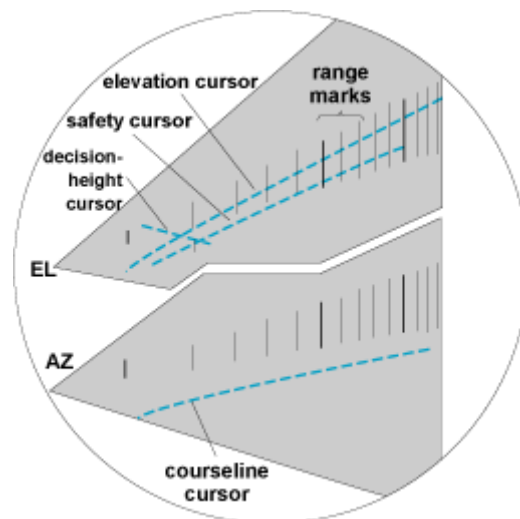
## 4. PAR (Precision Approach Radar)

El radar de aproximación de precisión es un tipo de sistema de guiado vía radar para proporcionar información acimutal, de elevación y la distancia a una aeronave para ayudar a aterrizarla. Este tipo de sistemas tienen su uso principal en entornos militares, donde el avión no sigue una maniobra estándar por instrumentos [13].

El sistema de transmisión del PAR se compone de dos antenas (una para el acimut y otra para la elevación), que transmiten a los 9 GHz con una potencia de 150 kW, y que proporcionan la información necesaria para el aterrizaje de la nave. El rango de frecuencias en el que trabaja está entre los 9000 y los 9160 MHz. El escaneo se realiza con una frecuencia de 1500 Hz y el ancho del pulso va desde 0.18 hasta 0.6  $\mu$ s.

El sector que cubre el sistema PAR es de  $\pm 20^\circ$  en acimut a cada lado del eje central de la pista y  $8^\circ$  de elevación. Su alcance es de hasta 40 millas náuticas, unos 75 km aproximadamente [14][15].

En el receptor, situado a bordo de la aeronave, se muestra la información tal y como se muestra en la Figura 3:



**Figura 3: Representación de la información recibida del PAR**

Tal y como se puede apreciar, el indicador se divide en dos secciones: elevación (EL), situada en la parte superior, y acimut (AZ), en la parte inferior de la pantalla. Las marcas de la distancia (range marks) están espaciadas logarítmicamente para

proporcionar mayor nivel de detalle a distancia cortas más críticas. El escaneo en elevación requiere mayor precisión debido a la inestabilidad inherente del avión durante el descenso en comparación con un rumbo constante. También se muestra un cursor de seguridad para asegurarse que el avión no vuela demasiado bajo para un aterrizaje seguro [14].

## 5. DME (Distance Measuring Equipment)

El equipo medidor de distancia es un sistema electrónico que permite establecer la distancia entre éste y una estación emisora. Estos equipos suelen ser utilizados en muchos sistemas de ayuda de aproximación y de aterrizaje, como son: ILS, MLS y VOR.

Fue inventado por el físico inglés Edward George Bowen, que contribuyó mucho al desarrollo de sistemas de telecomunicaciones durante la Segunda Guerra Mundial. Sus investigaciones fueron a lo largo de la década de los años 50, al finalizar la guerra. Finalmente en el año 1960 fue adoptado por la OACI [16].

Cabe destacar que los elementos de los sistemas que se han visto hasta ahora eran elementos pasivos. Es decir, los equipos localizador (acimut) y senda de planeo (elevación) de ILS y MLS, simplemente recibían y decodificaban la señal generada por la instalación terrestre sin intervenir para nada más. En el caso del DME, situado a bordo de la aeronave, transmite señales de interrogación que tras ser recibidas y retransmitidas por el equipo de tierra proporcionan la información de distancia [4].

Su rango de funcionamiento está comprendido entre 962 y 1214 MHz y funciona de la siguiente manera [4][16]:

- El avión interroga a la estación terrestre con un par de pulsos, de una duración media de 3.5  $\mu$ s, separados 12  $\mu$ s.
- El transpondedor, situado en tierra, retransmite la señal con un retardo de 50  $\mu$ s.
- El equipo del avión calcula la distancia de la siguiente manera:

$$300 \left( \frac{m}{\mu s} \right) \cdot \frac{t - 50\mu s}{2}$$

donde  $t$  es el tiempo entre que se ha enviado y recibido la señal

Para diferenciar los pulsos de interrogación de los de respuesta, existe una diferencia de 63 MHz entre la frecuencia del interrogador y la del transpondedor. Con todo esto la banda de trabajo del DME está dividida en 126 canales de interrogación y 126 de respuesta apareados, es decir que de forma automática al seleccionar el canal de la estación de tierra, se selecciona la frecuencia en que hay que interrogarle y en la que se le va a recibir.

Dado que son las aeronaves las que transmiten los pulsos de interrogación, puede darse el caso, y de hecho se da, que lo hagan varias a la vez. Estas interrogaciones

llegarán al transpondedor que generará y emitirá los pulsos de respuesta todos en la misma frecuencia. Entonces tenemos un montón de pulsos en el espacio y cada aeronave tiene que encontrar la forma de distinguir los que son respuestas a sus interrogaciones y le servirán para calcular su distancia.

La forma de distinguirlos consiste en generar los pulsos de interrogación con una frecuencia de repetición de pulsos cambiante, es decir, separando los pares de pulsos por un tiempo aleatorio pero que queda memorizado en el interrogador. Al recibir los pulsos de respuesta, se van comparando con la secuencia memorizada y cuando coinciden se sabe que son los correspondientes a las interrogaciones propias. Entonces solo queda calcular la distancia por el método descrito.

El procedimiento descrito resuelve el problema de saturación para el interrogador, pero no para el transpondedor situado en el aeropuerto, cuya capacidad de respuesta es limitada. Es por ello por lo que el equipo terrestre optimizar su modo de funcionamiento, dividiendo el trabajo en dos fases distintas [4]:

- Función de búsqueda: es la fase inicial en la que se sintoniza una estación de tierra. El número de interrogaciones es de unas 150 por segundo y la duración máxima de esta fase es menor de 20 segundos.
- Función de seguimiento: el objetivo de esta fase es realizar el seguimiento de la aeronave en su desplazamiento, y por lo tanto el número de interrogaciones desciende hasta unas 25 por segundo.



## 6. VOR (VHF Omnidirectional Range)

El radiofaro omnidireccional de VHF es una radioayuda a la navegación que permite a una aeronave conocer su posición angular o su acimut con respecto a la estación utilizando como referencia el norte magnético terrestre. Es un sistema muy utilizado en navegación continental, es decir, permite una guía del avión a través de estaciones VOR que forman una ruta determinada.

El VOR se podría clasificar como un sistema no preciso, pues solo proporciona información acimutal de las aeronaves.

El sistema VOR utiliza distintos tipos de señales [17]:

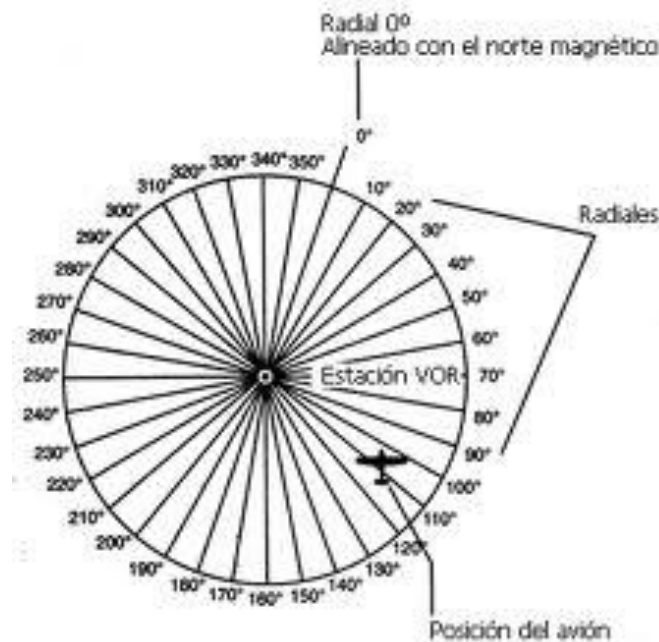
- Portadora principal: frecuencia entre 108 y 117.95 MHz.
- Señal de referencia: onda de 30 Hz. Se transmite modulando en FM una subportadora de 9960 Hz.
- Señal de fase variable: se obtiene en el avión por modulación espacial.
- Señal de identificación: en código Morse, para identificar la estación VOR.

La señal de referencia se emite de manera omnidireccional y con fase constante. Tal y como se ha dicho modula en FM una subportadora de 9960 Hz y que a su vez modula en AM a la portadora del VOR.

La señal variable se emite por el transmisor del VOR por medio de un diagrama giratorio que produce una modulación de AM en la portadora. Su fase cambia según la dirección en la que se está emitiendo.

Ambas señales, de 30 Hz, están en fase cuando el receptor se coloca en el norte magnético de la estación y, debido al giro de la VARIABLE, van desfasándose proporcionalmente al ángulo que se desplace este [4].

De esta manera, cuando el equipo VOR de la aeronave recibe, amplifica, demodula y separa las señales, compara las fases de la señal de referencia con la de la variable y conoce en qué radial del VOR sintonizado se encuentra la aeronave con respecto al norte (Figura 4) [17].



**Figura 4: Diagrama de radiación de una estación VOR**

El sector en el que el VOR proporciona cobertura, obviamente, es de  $360^{\circ}$  y posee un alcance de 320 km a hasta 11500 m sobre la estación.

Debido a que el VOR solo proporciona información acimutal, en la práctica se utiliza un DME para conocer la distancia de la nave del transmisor, por lo que comparten antena, pero no es sistema transmisor entero.

## 7. TACAN (TACTical Aerial Navigation)

Es un sistema de radionavegación aérea utilizado en los aviones militares. Su principio de funcionamiento es el mismo que el del sistema VOR, pero presenta una mayor precisión en el guiado de las aeronaves.

Al igual que un sistema VOR, el TACAN tan solo proporciona información lateral: el acimut. Por lo tanto, es necesaria la incorporación de un elemento para la medición de la distancia. En el caso de TACAN se utiliza un DME X (de uso militar), mientras que en VOR se utilizaba DME Y (de carácter civil). No obstante, el DME X conserva las especificaciones técnicas del civil, lo que garantiza la compatibilidad de ambos sistemas. El alcance de este tipo de DME es mayor, ya que sobrepasa los 400 km de distancia [18].

La otra diferencia con VOR es el rango de frecuencias utilizado, en el caso de TACAN va desde los 962 hasta los 1213 MHz. Este rango va a utilizarse dependiendo del modo de funcionamiento en el que se encuentre el TACAN:

- Modo X: se utilizan 126 canales separados 1 MHz y distribuidos desde 962 a 1024 MHz y desde 1151 a 1213 MHz.
- Modo Y: 126 canales separados 1 MHz y distribuidos entre 1025 y 1150 MHz.

Cabe destacar que en cualquier modo de operación, el equipo receptor, situado a bordo de la nave, siempre trabaja a una frecuencia desplazada 63 MHz respecto de la frecuencia del transmisor.

El sistema TACAN utiliza dos pulsos para la interrogación, al igual que lo hacia VOR. Estos pulsos son de una duración de 3.5  $\mu$ s, como en VOR, pero su separación depende del modo en el que esté funcionando. En el caso de ser Modo X la separación es de 12  $\mu$ s y en el caso de ser Modo Y la separación es de 30  $\mu$ s.

El modo de funcionamiento es igual que el del VOR: el transmisor, situado en la nave, interroga al transpondedor con la señal descrita anteriormente, éste le contesta introduciendo 50  $\mu$ s de retardo y el equipo del avión amplifica, demodula y separa la señal y la representa en pantalla.

Al igual que en el sistema VOR, el TACAN utiliza una señal de identificación en código Morse. No obstante, TACAN proporciona dos señales de velocidades distintas: una es de 15 Hz (en lugar de los 30 Hz del VOR) y un sistema auxiliar que permite un aumento en la resolución, en la teoría, nueve veces mayor a 135 Hz (no se utiliza para

ángulos de elevación grandes). Sin embargo, esta resolución tan solo ha mejorado el doble en la práctica [19].

Como ya hemos visto, la medición de distancia en el sistema TACAN es totalmente compatible con el DME, por tanto, para reducir el número de estaciones necesario, las estaciones TACAN son frecuentemente situadas en instalaciones VOR. Esta agrupación de estaciones se conoce como VORTAC. Se trata de conjuntos formados por una estación VOR para información del rumbo de uso civil y una TACAN para medición del rumbo de uso militar y medición de la distancia de uso mixto (militar y civil) (Figura 5) [18].

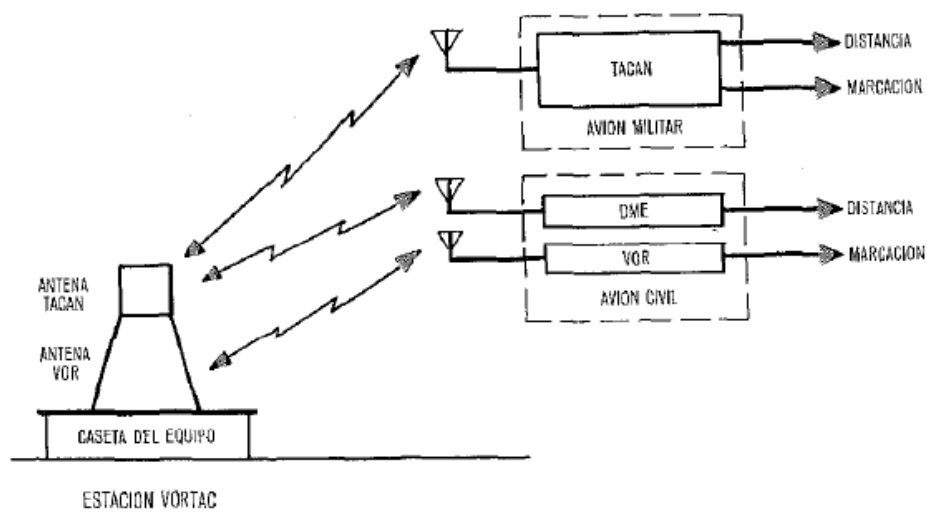


Figura 5: Principio del sistema VORTAC

## 8. LORAN (LONg RANGE Navigation)

Sistema hiperbólico de radionavegación basado en estaciones terrestres que transmiten señales pulsadas en bajas frecuencias (90-110 kHz).

LORAN fue desarrollado durante la Segunda Guerra Mundial (1939-1945) como ayuda a la navegación de la aviación aliada y a los convoyes del Atlántico Norte. Tras la guerra, el servicio de guardacostas de los Estados Unidos de América extendió su uso como ayuda a la navegación.

Durante los años 50 se perfeccionó el sistema LORAN, en cuanto a la precisión (dando lugar a la versión C), principalmente para el uso militar. En el ámbito no militar, con las mayores exactitudes obtenidas tras las investigaciones, incluyó estudios de busca, ayuda, reconocimiento y orientación. El sistema LORAN-C es utilizado en muchos países, entre ellos los Estados Unidos de América, Japón y varios países europeos [21].

El principio de funcionamiento de cualquier sistema hiperbólico es el siguiente (Figura 6):

- Se mide la diferencia de distancias desde el móvil a 2 puntos fijos
- Esto sitúa al móvil en una hipérbola (lugar geométrico de los puntos cuya diferencia de distancias a 2 focos fijos es constante)
- Estos 2 puntos fijos son 2 estaciones transmisoras, por lo que la diferencia de distancias se calcula midiendo la diferencia de tiempo de propagación de las ondas desde esos 2 puntos hasta el móvil
- Midiendo la diferencia de distancias a otros 2 puntos fijos de la misma forma, se tiene una segunda hipérbola
- La intersección de ambas hipérbolas es la posición del móvil

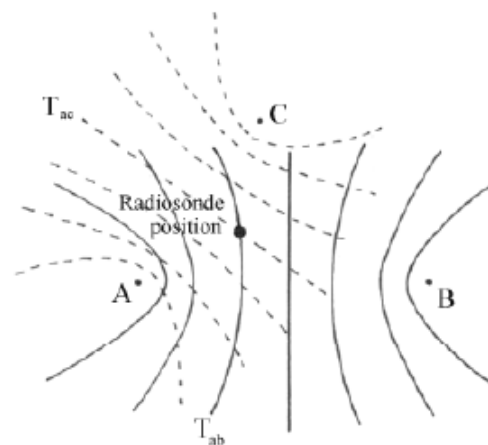


Figura 6: Sistema de navegación hiperbólico

Los sistemas LORAN-C están formados por una estación principal y varias secundarias. La estación principal es la encargada de sincronizar y disparar la transmisión de las estaciones secundarias y actúa como control de toda la cadena

LORAN. En cuanto a las estaciones secundarias, estas se van a encargar de transmitir grupos de señales LORAN y sincronizar las transmisiones en un tiempo fijado [20].

Se utiliza una técnica de grupos de pulsos para la comunicación entre las estaciones base y los receptores de la nave. Estas señales multipulsos pueden ser de dos tipos:

- Maestra: formada por 9 pulsos y transmitida por la estación principal.
- Esclavas: conformada por 8 pulsos y transmitida por una estación secundaria o de referencia.

Por lo tanto, el receptor deberá encargarse de buscar las señales, identificar si son maestras o secundarias y determinar la envolvente y la fase de la portadora. Finalmente, midiendo las diferencias de tiempos se puede calcular la posición de la nave.

Es importante destacar que la precisión que ofrece el sistema LORAN-C está entre los 180 y los 460 metros.

El futuro de LORAN en un principio iba encaminado a un sistema renovado llamado eLORAN, el cual permitiría una enorme mejora en cuanto a la precisión, pues se esperaba que fuera de aproximadamente unos 10 metros. Sin embargo, EEUU, el inventor del sistema, ha decidido no seguir financiando el proyecto, debido a su elevado coste.

## 9. Conclusiones

A lo largo del presente trabajo fin de grado se han enumerado algunos de los sistemas de comunicaciones que suelen estar presentes en los aeropuertos. Todos los sistemas nombrados han sido sistemas de radionavegación aérea, que se utilizan con el fin de proporcionar a los pilotos una ayuda a la hora de aproximarse al aeropuerto y aterrizar la nave. Se ha tratado de describir de una manera sencilla el modo de funcionamiento de cada uno de dichos sistemas, así como sus características más importantes.

Así pues, a continuación se va a tratar de extraer una serie de conclusiones, con la ayuda de todo lo descrito en los puntos previos, con el fin de entender las ventajas de estos sistemas de ayuda a la aproximación y aterrizaje. Por otra parte, también nos ayudará a comprender cuales son las desventajas de los sistemas de radionavegación utilizados en la actualidad y, de esta manera, conocer su futuro.

Los sistemas que se han explicado a lo largo del presente proyecto se podrían clasificar en dos grupos (aparte de por su uso civil o militar):

- Precisión: instrumentos que proporcionan la totalidad de información sobre la posición de la aeronave. Es decir, ofrecen información tanto lateral como vertical. A este grupo pertenecen: ILS, MLS, PAR.
- No-precisión: equipos que tan solo ofrecen información lateral de la aeronave, por lo cual su ayuda al aterrizaje es un tanto escasa. A este grupo pertenecen los sistemas VOR y TACAN.

A parte de los nombrados, también se han visto:

- El sistema LORAN: un sistema hiperbólico que proporciona la posición de la nave a partir del tiempo de propagación de las señales y del desfase de éstas.
- DME: un equipo de medida de distancia entre la nave y el transpondedor situado en tierra.

Todos los sistemas que se han visto, excepto LORAN, hacen uso del DME. Esto es muy importante, ya que este elemento es el que hace que se establezca una comunicación bilateral entre la nave y el equipo de tierra. Es el único sistema que establece un dialogo (envía una señal y espera una respuesta), mientras que los otros simplemente transmiten información de manera constante.

Estos sistemas llevan muchos años en activo y por lo tanto se puede decir que son tecnologías probadas. Por ahora ofrecen la precisión suficiente o necesaria (algunos más que otros) para ayudar a aterrizar una aeronave. El gran inconveniente de esta tecnología es que resulta necesaria la implantación de equipos en los aeropuertos, lo que resulta un tanto incómodo, por supuesto, costoso y no ofrece tanta exactitud.

Debido a esto, se espera que en un futuro sean reemplazados por sistemas basados en satélites, sobre todo el GPS, ya que es el único que lleva bastantes años funcionando y ofrece la mejor precisión. Por supuesto, también se requerirán estaciones terrestres, pero la combinación de un sistema satelital con éstas proporcionará un grado de precisión mucho mayor que en los sistemas utilizados actualmente.

Un ejemplo podría ser la combinación de GPS con WAAS (Wide Area Augmentation System) o EGNOS (European Geostacionary Overlay Service). Ambos son sistemas de aumentación basados en satélites y pretenden aumentar la exactitud, fiabilidad y disponibilidad a la hora de realizar los cálculos de posicionamiento.



## 10. Bibliografía

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/John\\_Stone\\_Stone](http://en.wikipedia.org/wiki/John_Stone_Stone)
- [2] [http://en.wikipedia.org/wiki/Direction\\_finder](http://en.wikipedia.org/wiki/Direction_finder)
- [3] <http://www.ingeniatic.net/index.php/tecnologias/item/592-sistema-de-aterrizaje-instrumental-ils>
- [4] <http://www.navegarea.com/index.html>
- [5] [http://en.wikipedia.org/wiki/Instrument\\_Landing\\_System](http://en.wikipedia.org/wiki/Instrument_Landing_System)
- [6] <http://www.casa.gov.au/wcmswr/assets/main/pilots/download/ils.pdf>
- [7] <http://www.allstar.fiu.edu/aero/ils.htm>
- [8] [www.cs.virginia.edu/~wsg6p/docs/slides/ILS.ppt](http://www.cs.virginia.edu/~wsg6p/docs/slides/ILS.ppt)
- [9] [http://en.wikipedia.org/wiki/Microwave\\_landing\\_system](http://en.wikipedia.org/wiki/Microwave_landing_system)
- [10] <http://www.allstar.fiu.edu/aero/MLS.htm>
- [11] [http://eprints.iisc.ernet.in/1066/1/MICROWAVE\\_LANDING\\_SYSTEM.pdf](http://eprints.iisc.ernet.in/1066/1/MICROWAVE_LANDING_SYSTEM.pdf)
- [12] <http://agamenon.tsc.uah.es/Asignaturas/it/rd/Temas1-5.pdf>
- [13] [http://en.wikipedia.org/wiki/Precision\\_approach\\_radar](http://en.wikipedia.org/wiki/Precision_approach_radar)
- [14] <http://accessscience.com/content/Precision-approach-radar-%28PAR%29/543000>
- [15] <http://www.radarpages.co.uk/mob/navaids/par/par1.htm>
- [16] [http://en.wikipedia.org/wiki/Distance\\_measuring\\_equipment](http://en.wikipedia.org/wiki/Distance_measuring_equipment)
- [17] [http://en.wikipedia.org/wiki/VHF\\_omnidirectional\\_range](http://en.wikipedia.org/wiki/VHF_omnidirectional_range)
- [18] [http://es.wikipedia.org/wiki/Usuario:Italcala/sistema\\_tacan](http://es.wikipedia.org/wiki/Usuario:Italcala/sistema_tacan)
- [19] [http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/navy/nrtc/14090\\_ch2.pdf](http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/navy/nrtc/14090_ch2.pdf)
- [20] <http://en.wikipedia.org/wiki/LORAN>
- [21] <http://mecg.es/archivos/AST2%20-%20Bloque2.pdf>