

## El sistema de navegación aérea "Rho-Theta"

Por JORGE DEL CORRAL

Capitán de Corbeta.

(Extractado de *Electrical Communication*.)

Oído y aceptado el informe del Comité Técnico de Comunicaciones, la Organización Internacional de la Aviación Civil ha adoptado, en junio de 1949, los equipos VOR (very-high-frequency omni-range) y DME de ultra-alta-frecuencia (distance-measuring equipment), como sistemas de ayuda a la navegación aérea, que pueden considerarse para su adopción como reglamentarios.

He aquí un extracto del apéndice 10, que contiene dicha recomendación:

"En las localidades donde las condiciones de densidad de tráfico y mala visibilidad requieran una radio-ayuda para la navegación a corta distancia, ésta deberá ser el sistema VOR, del tipo de comparación de fases en ondas continuas, conforme a las normas contenidas en los párrafos 3 y 4 del capítulo 3.º de este apéndice.

Como se sabe, la Organización Internacional de la Aviación Civil es el organismo especializado de la O. N. U. que tiene la responsabilidad de promover al incremento y seguridad de la Aviación Civil en todo el mundo. La ayuda que recomienda en este caso es de utilidad solamente para las rutas de aproximación en una zona cuyo radio no sobrepasa las 200 millas del aeropuerto o estación controladora.

La recomendación oficial que antecede no significa un nuevo sistema de navegación, sino simplemente la adopción de más modernos medios para la exacta determinación de la dirección y la distancia; esto es, de  $\rho$  y  $\theta$ . En realidad, el sistema de navegación

NOTA.—Se cree que el sistema UHF DME (Distance measuring equipment) se convertirá en una componente básica del VOR en el más breve plazo posible y será añadido a todos los equipos VOR ya instalados y en servicio. Para orientación de los Estados miembros se acompaña en el anexo B de este apéndice una relación de las especificaciones necesarias para un equipo DME.

o movimiento, basado en la determinación de una dirección y el recorrido de una distancia sobre ella, para llegar a un punto dado, es casi tan antiguo como el hombre. Rho-Theta es el clásico sistema de navegación usado por los geógrafos; la distancia de los polos sobre la esfera terrestre está señalada por los paralelos, y la dirección alrededor de los polos queda definida por los meridianos, tomando el que pasa por Greenwich como meridiano *cero* u origen de ángulos. En el sistema Rho-Theta, adoptado por la O. A. C. I., el centro del sistema lo constituyen las antenas del aparato. La información de la dirección nos la da un receptor especial de a bordo excitado por las señales del equipo transmisor terrestre omnidireccional; en tanto que la distancia queda señalada en la pantalla del "Radarfaro" (Interrogador-respondedor) de a bordo, el que operará en conjunción con el "Radarfaro" (Transpondedor) terrestre, que, como sabemos, es de respuesta automática.

### 1.—Determinación de la dirección (Theta).

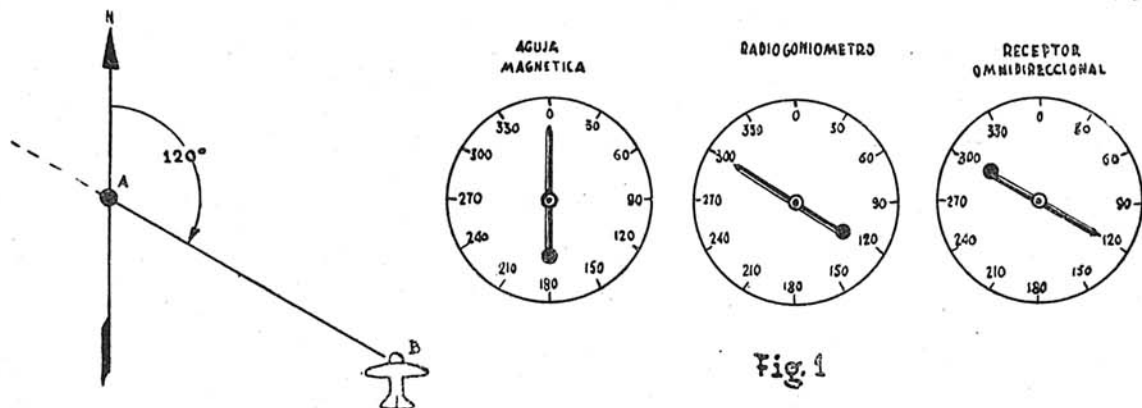
La necesidad de un transmisor omnidireccional en orden a la obtención de la dirección (ángulo de demora, marcación, azimut, etc.) no resulta, a menudo, comprendida y, en muchos casos, se le suele confundir con los no-direccionales, tales como los radiofaros, aerofaros y otros de esta clase. Con un radiogoniómetro automático o de ajuste manual es siempre posible determinar una dirección al observar las señales características de un radiofaro o transmisor no-direccional, pero la significación del ángulo obtenido es completamente diferente del que se obtiene con un transmisor omnidireccional. Mientras el radiofaro no tiene características direccionales en sí mismo, el transmisor omnidireccional posee una fija y determinada para cada dirección de emisión. Acertando a identificar la señal reci-

bida, es posible determinar la dirección verdadera del avión con respecto a la estación emisora, sin tener que hacer referencia a ningún otro indicador.

La principal diferencia entre los dos sistemas reside en que mientras el omnidirec-

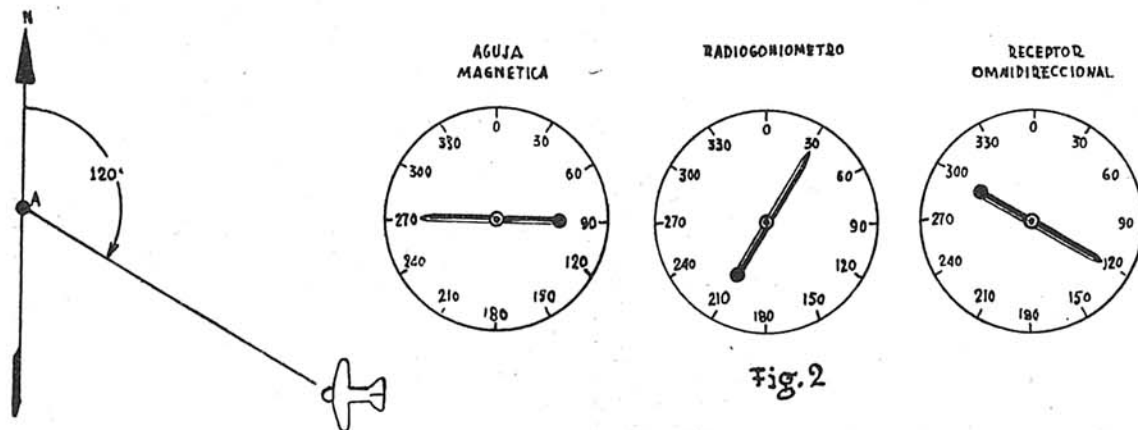
te si conocemos la dirección magnética o verdadera de nuestro observatorio con respecto al Norte magnético o verdadero.

Varios ejemplos nos aclararán perfectamente estos conceptos. La figura 1.<sup>a</sup> nos muestra a un avión en vuelo hacia el Nm, y



cional marca o señala una traza o dirección verdadera en el espacio, el no-direccional sólo proporciona la demora o marcación del radiofaro con respecto a la proa del avión o barco. Es, pues, preciso componer esa demora o marcación con el rumbo magnético o verdadero para obtener la demora geográfica en que nos han llegado las ondas o la dirección anterior o posterior del avión. El sistema VOR es, pues, semejante

suponemos que en el punto A coinciden un transmisor omnidireccional y un radiofaro, así como que el avión está dotado con el receptor especial para recibir al primero, con un radiogoniómetro y con una aguja magnética. Esta última señalará 0 grados, en tanto que los respectivos indicadores de los sistemas VOR y r/goniométrico señalarán 120 y 300 grados. Si de aquí queremos deducir la demora magnética de la estación,



a otros sistemas de navegación, tales como el LORAN y el CONSOL, que también nos proporcionan unas demoras geográficas verdaderas que pueden ser trazadas sobre la carta; en tanto que la radiogoniometría es análoga a la observación visual de una luz fija o de una marca terrestre notable, la que podremos trasladar a la carta solamen-

con respecto al avión, a partir del indicador del VOR, se comprende fácilmente que bastará prolongar la línea que los une y calcular el ángulo recíproco del NmAB. En este caso ambos indicadores coinciden en las demoras que se obtienen los 300 grados.

Supongamos ahora que el avión (fig. 2)

navega en dirección al Oeste magnético, siendo su posición, relativamente a la estación A, la misma. En este caso la aguja magnética indicará el nuevo rumbo, 270 grados; el indicador r/goniométrico acusará la nueva marcación respecto de su proa, 30 grados, pero el del VOR indicará la misma demora de antes, 120 grados (o sea los 300 grados de demora geográfica magnética). Para obtener esta demora, partiendo de la indicación del r/goniómetro, tendríamos que componer su indicación con la del compás magnético, y así obtendríamos también la demora de los 300 grados, pero esta operación exige que las indicaciones de la aguja sean exactas, cosa que no siempre ocurre.

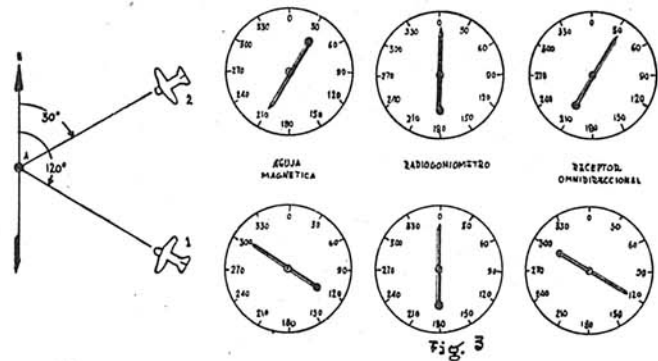
Otro ejemplo que aclarará las ventajas del sistema VOR es el siguiente: La figura 3 nos muestra a dos aviones situados en diferentes posiciones, intentando ambos aproximarse al aeropuerto o punto A. si ambos cuentan con r/goniómetro les bastará con mantener el rumbo que coincida con la señal *cero* en el indicador de éste. Nótese que mientras los aviones están ocupando posiciones totalmente diferentes, sus indicadores r/goniométricos están dando la misma lectura, ya que ambos van al mismo punto. Se ve, pues, que la dirección del avión desde la estación no está reflejada por el r/goniómetro del avión. Para determinar esta dirección es necesario tener en cuenta la indicación de la aguja magnética y la variación de la zona donde el avión está volando. A causa de las inexactitudes inherentes a los r/goniómetros y a las agujas magnéticas, la dirección y posiciones obtenidas de un avión por medio de un radiogoniómetro no son nunca de gran exactitud. Aunque no debe ser, también existen las posibilidades de error en la suma o resta de la desviación magnética.

Por el contrario, aunque las indicaciones omnidireccionales para los dos aviones de la figura 3 son diferentes, son idénticas para el que ocupa la posición 1 y los de las figuras 1 y 2, no obstante ser en todas diferentes las direcciones de sus proas. Es decir, que el sistema VOR nos proporciona siempre una demora geográfica sobre la que se encuentra nuestro avión, y que, por tanto, si dos aviones vuelan dando sus indicadores omnidireccionales la misma lectura, es

que ambos llevan idéntica derrota, independientemente de las direcciones de sus proas, que podrán ser distintas si lo son las direcciones y fuerzas de los vientos respectivos.

**2.—Algunas características del sistema VOR.**

Cuando observamos los destellos no-direccionales de un faro, nos será fácil navegar hacia él, pero nos resultará imposible conocer nuestra dirección geográfica o demora verdadera desde o a partir de él. Pero si a nuestro faro giratorio lo dotamos de un dispositivo tal que, girando a velocidad constante, emita un destello de luz fija roja cada vez que el haz principal de destellos blancos pase, en su rotación, por el Norte, entonces nos bastará con disponer de un cronógrafo y medir los segundos transcurridos



desde el destello rojo hasta que el destello principal blanco pase por nuestra visual, para obtener la demora geográfica de nuestra nave a partir de la conocida situación del faro. Es decir, que por medio de una medición de tiempo obtenemos una medida de ángulo. En este mismo principio vienen a estar basados los transmisores o radioguías omnidireccionales del tipo VOR, si bien lo que nos da el receptor es una medida de ángulo de fase, que es también función del tiempo.

En sus líneas generales, el radioguía omnidireccional emite dos diagramas de radiación. Uno de ellos es circular y contiene la frecuencia portadora modulada por una señal de baja frecuencia. El otro viene a ser como una senoide giratoria a la velocidad de 1.800 r. p. m., conteniendo tan sólo la frecuencia portadora. Se comprende que la fase de la señal resultante variará con el azimut, y es para la exacta medición de la diferencia de fase entre las dos señales para lo que

están proyectados los receptores especiales que montan los aviones.

En la antena omnidireccional que se muestra en la figura 4, un dipolo alimentado por la portadora sin modular gira a 1.800 revoluciones por minuto, produciendo en el receptor una onda modulada en amplitud de  $f = 30$  ciclos. La antena está montada sobre una torre de cinco metros de altura, con

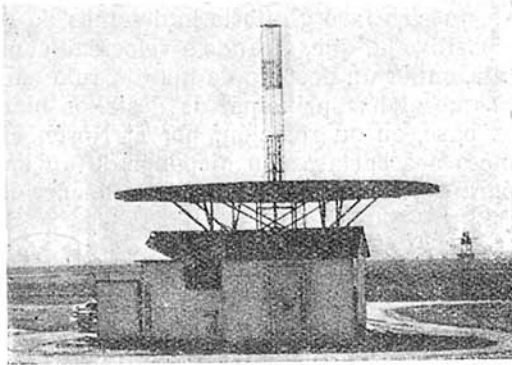


Fig. 4.

una contrantena de ocho metros de diámetro. El transmisor, colocado en la base de la antena, es de 300 vatios y funciona en la banda de 112 a 118 megaciclos. Emite una señal, modulada en amplitud por otra de 10.000 ciclos, que a su vez está modulada en frecuencia en  $\pm 500$  ciclos, a un ritmo de 30 ciclos por segundo. La señal de 10.000 ciclos modulada en frecuencia está generada por un dispositivo de rueda dentada montado directamente sobre el mismo eje de rotación de la antena. La portadora modulada y las bandas laterales de 10.000 ciclos alimentan a una antena horizontal fija. La salida del transmisor pasa también a través de un circuito recortador o limitador, que la demodula totalmente, siendo ésta portadora no-modulada la que va a alimentar a la antena giratoria. Con el dispositivo descrito se mantiene una rígida relación de fase entre las señales que emiten las dos antenas descritas.

La figura 5 muestra cuatro indicadores relacionados con el sistema que estamos exponiendo. El número 3, o indicador radiomagnético, da al mismo tiempo rumbo magnético, marcación radiogoniométrica y demora del receptor omnidireccional. Por

medio del selector azimutal número 2 es posible seleccionar el azimut de una estación para seguirlo en vuelo con el avión, de forma que la aguja vertical del indicador número 1 se mantenga sobre la raya central.

### 3.—Determinación de la distancia.

A primera vista pudiera parecer que no es muy necesaria la determinación de una segunda coordenada de posición. Si por el sistema VOR sabemos que el avión se encuentra en la ruta correcta hacia su destino, parece que deberá ser suficiente, y así resulta, efectivamente, en muchos casos. Pero no debemos olvidar que este sistema es de utilidad recomendable para la navegación a distancias cortas, y en estas áreas el peligro de colisión con otros aviones puede ser grande si la zona es de elevada densidad de tráfico. Por ello resulta de sumo interés poder localizar exactamente la posición ocupada por el avión, dentro de cada senda de aproximación o alejamiento, en todo momento.

En tanto que los navegantes han dispuesto durante muchísimos años de los medios necesarios para determinar direcciones, demoras o marcaciones (alidadas azimutales, taxímetros de marcar, sextantes horizontales, etcétera), hasta hace muy poco tiempo no han contado con ninguno para medir directamente su distancia a la costa o a un punto notable de ella. Indirectamente, sí, por

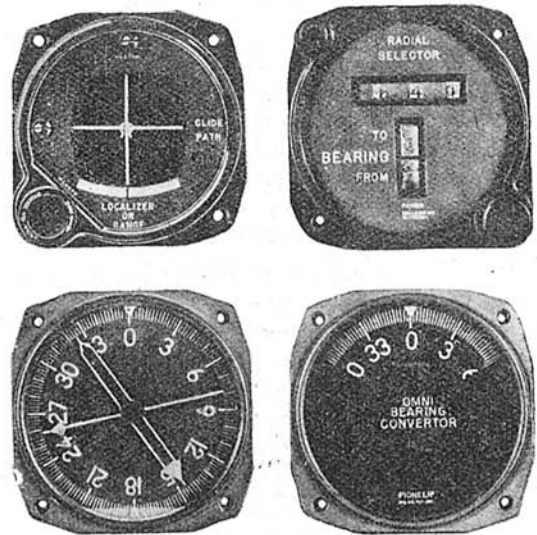


Fig. 5.

intersección de dos azimutes o dos marcas visuales o radiogoniométricas, efectuadas simultáneamente, de donde se deduce nuestra posición y podemos medir sobre la carta la distancia que deseamos. Si los errores inherentes a este sistema, por cualquier posible error en la medida del azimut o del rumbo, son relativamente poco importantes para un barco, dada su escasa velocidad, se comprenderá cuán interesante resulta hacer mínimos dichos errores cuando de situar a los modernos aviones se trate, y de que los errores en la medición de la distancia sean independientes de la distancia del avión a su punto de destino o referencia.

La segunda parte del sistema Rho-Theta proporciona los medios para medir directamente la distancia del avión a cada una de las estaciones radioguías omnidireccionales que nos interese. Estos medios requieren el concurso simultáneo de los dos equipos: uno terrestre y el otro aéreo. Al medir la distancia al mismo punto del que hallamos nuestro azimut, no cabe duda de que logramos una gran exactitud en nuestra situación.

#### 4.—Equipo de medición de distancias (DME).

Este equipo está basado en la técnica de impulsos. Un transmisor instalado en el avión emite un impulso en una determinada frecuencia, el que, recibido por un transpondedor instalado en la estación terrestre, hace que el transmisor de este último emita automáticamente otro impulso de res-



Fig. 6.

puesta, si bien con otra diferente frecuencia, característica de cada "radarfaró". Al igual que sucede en el radar, el tiempo invertido por el impulso en recorrer el doble camino avión-estación-avión nos dará directamente sobre la pantalla del tubo de rayos catódicos la distancia. El indicador de esta

medición a bordo es del tipo que se muestra en la fig. 6, que da decenas de millas, unidades y décimas de milla. El de la figura marcará, por tanto, 42,3 millas. Alcanza hasta 100 millas y su precisión es del orden de 0,2 millas. La Unión Internacional de Telecomunicaciones, en su conferencia de At-

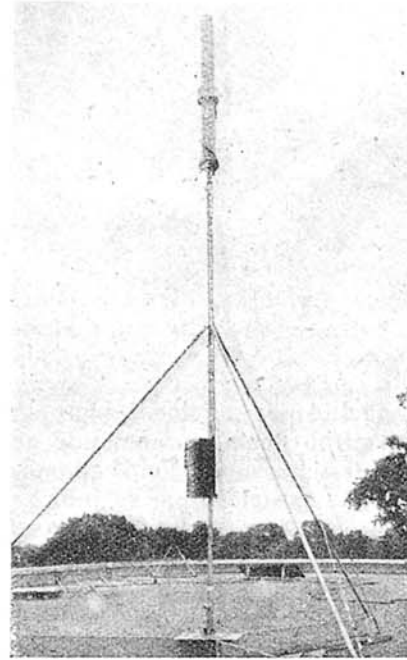


Fig. 7.

lantic City, señaló para este equipo la banda de frecuencias de 960 a 1.215 megaciclos. Se han desarrollado equipos controlados por cristal de cuarzo, permitiendo la selección de 100 diferentes canales de funcionamiento, de 2,5 megaciclos de anchura de banda, con sólo apretar un botón.

La figura 7 nos muestra la antena del radarfaró terrestre, la que normalmente deberá ir montada sobre la antena del equipo VOR terrestre (fig. 4). El equipo DME de a bordo se muestra en la figura 8, y sólo pesa 45 libras.

#### 5.—Aplicación práctica del sistema Rho-Theta.

Disponiendo de los medios para conocer directamente su distancia y demora al punto o estación A (fig. 9), es evidente que el piloto sabe en todo momento exactamente dónde se encuentra. La selección de la frecuencia del VOR selecciona automáticamente

te la frecuencia del radarfaro DME, situado en el mismo punto, pudiendo inmediatamente seguir la demora a la radioestación elegida.

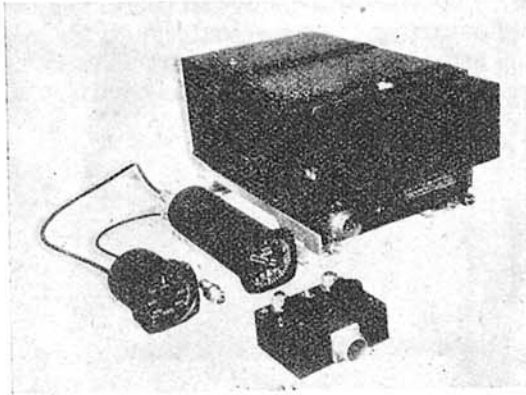
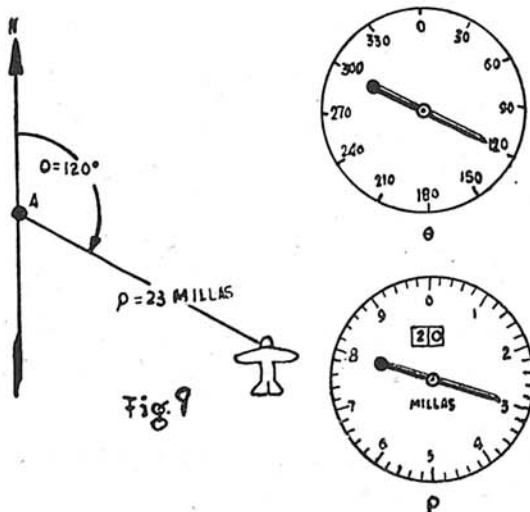


Fig. 8.

Otras facilidades adicionales proporcionan el sistema Rho-Theta, aumentando grandemente su eficacia. Supongamos que un avión situado en la posición que se indica en la figura 10 desea llegar al aeropuerto que se indica en la parte alta. Calculada nuestra posición, por el método Rho-Theta, con respecto a la estación A, podemos situarla sobre la carta que comprende la situación del aeropuerto; uniendo a éste con la posición



del avión por medio de una línea, observaremos que el azimut de esta línea con respecto al Norte es 30 grados y que la mínima distancia de la estación a dicha línea

es de 10 millas. Por simple Trigonometría podemos deducir que las coordenadas polares de todos los puntos situados sobre la citada línea de aproximación al aeropuerto están dadas por la ecuación.

$$D/\rho = \text{sen}(\theta - \varphi).$$

Como D son 10 millas y el azimut de la línea  $\varphi$  son 30°, es siempre posible calcular la tabla que se ve en la parte baja de la figura, que liga continuamente a  $\rho$  con  $\theta$ . Manteniendo un rumbo tal que los continuos valores que se van obteniendo de  $\rho$  y  $\theta$  sean los dados en la tabla, se alcanzará, exactamente la posición del aeropuerto, pudiéndose operar igualmente para cualquier otro deseado punto de destino, que esté dentro del alcance de la estación.

6.—Calculador de rumbos arbitrarios.

La operación anterior no es practicable para el piloto ni por tiempo ni por medios. Pero resulta sencillo diseñar un calculador que realice aquellas operaciones, valiéndonos del conocido artificio del Puente de Weastone. Los dos brazos del puente estarían constituidos por dos divisiones de tensión, cuyos contactos móviles estarían controlados por dos motorcitos Selsyn, alimentados, respectivamente por las salidas del receptor omnidireccional y del equipo DME. Si uno de los divisores de tensión da una salida desproporcional a  $D/\rho$ , y el otro a  $\text{sen}(\theta - \varphi)$ , el puente estaría equilibrado y el indicador núm. 1 de la fig. 5, centrado, indicaría que se volaba sobre la deseada derrota.

Cualesquiera valores de las derrotas correspondientes a D y  $\varphi$  pueden ser fácilmente introducidos en el calculador. Si dos aviones han seleccionado idénticos valores para el azimut  $\varphi$ , pero diferentes para D, quiere decir que ambos siguen derrotas paralelas, lo que habrá simplificado enormemente el problema del control del tráfico en las cercanías de los grandes aeropuertos internacionales.

7.—Conclusión.

De todo lo expuesto se deduce que el sistema Rho-Theta reúne muchísimas ventajas. En primer lugar, es el sistema natural de navegación, pudiendo el piloto, de una sim-

ple ojeada, apreciar su situación con respecto a una estación o localidad determinada, sin necesidad de efectuar ningún cálculo. En segundo lugar, puede calcular fácilmente su velocidad horizontal y, por tanto, estimar su hora de recalada, con una exactitud nunca alcanzada en anteriores ocasiones. Por último, el sistema Rho-Theta posee una gran flexibilidad, pudiendo elegirse multitud de derrotas de coordenadas definidas, las que pueden ser voladas, bien por piloto real o por automático.

La Administración de la Aeronáutica Ci-

vil ha instalado más de 400 estaciones de VHF-VOR a través de todo el territorio de los Estados Unidos, estando igualmente en vías de instalación los complementarios equipos de medición de distancias DME.

**8.—Progresos que se esperan para un futuro próximo.**

En la actualidad se realizan estudios y esfuerzos combinados por el Ejército, la Armada, Fuerzas Aéreas y la Administración de la Aviación Civil de los Estados Unidos para el desarrollo de un nuevo programa de ayudas radioelectrónicas a la navegación aérea, las que abrirán un nuevo ciclo y que, en líneas generales, serán las siguientes:

Antes de que el piloto del avión emprenda el vuelo, ya le tendrán controlada su hora de aterrizaje en el aeropuerto de destino. Durante el vuelo, un instrumento electrónico le estará indicando los minutos y segundos que puede llevar de adelanto o retraso sobre el horario previsto, con lo que podrá regular su velocidad, según le convenga. El piloto, en el interior de su cabina, tendrá a la vista una representación panorámica de todo lo que le rodea. Esta representación le será, probablemente, enviada por televisión desde tierra, mostrándole su propio avión en relación con los que puedan estar en sus proximidades, obstrucciones geográficas o accidentales que puedan presentarse, e incluso la posición de las turbonadas o tormentas locales.

Al mismo tiempo, estaciones radar terrestres le estarán siguiendo continuamente en su ruta. Los aviones dispondrán de unos equipos que estarán transmitiendo continuamente a las estaciones de control terrestre las lecturas de varios de los instrumentos de a bordo. Estos datos, automáticamente introducidos en unos cerebros electrónicos, junto con la información procedente del radar y otros equipos de control, permitirán comprobar en tierra la regularidad de su marcha y el correcto funcionamiento de sus aparatos. Si el piloto desea cambiar su plan de vuelo, podrá preguntarlo a las estaciones de control pulsando unos conmutadores especiales. La aprobación o negativa a su deseo le será transmitida en menos de un segundo, después que unas máquinas automáticas de tierra hayan calculado la posibilidad o inconveniencia técnica de su propósito.

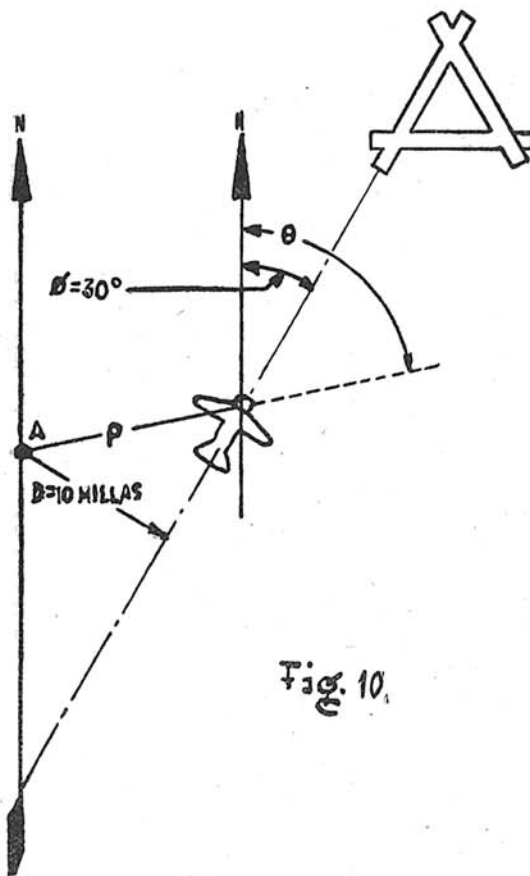


Fig. 10.

$$D/\rho = \text{sen} (\theta - \phi)$$

$\theta$ en grados	$\rho$ en millas	sen grados	$\rho$ en millas
180	20,0	110	10,1
170	18,5	100	10,7
160	13,1	90	11,5
150	11,5	80	13,1
140	10,7	70	18,5
130	10,1	60	20,0
120	10,0	50	29,3