

APUNTES

DE

NAVEGACIÓN AERONÁUTICA

POR

DON EMILIO HERRERA Y LINARES

CAPITÁN DE INGENIEROS



MADRID

IMPRESA DEL «MEMORIAL DE INGENIEROS DEL EJÉRCITO»

—
1911



APUNTES DE NAVEGACIÓN AERONÁUTICA (1)



ANÁLOGAMENTE á lo admitido en la Navegación marítima, definiremos la *Navegación aeronáutica* como «la ciencia que nos enseña á determinar la situación de la nave aérea y la derrota que debe seguirse para trasladarla de un punto á otro del globo».

Aunque no esencialmente distinta de la primera, presenta con ella algunas diferencias que deben ser conocidas por los pilotos encargados de la dirección de un viaje aéreo, y especialmente por los de globo dirigible.

Los dos problemas principales que ha de resolver la navegación aeronáutica son:

- 1.º Determinar en un instante cualquiera la posición del globo en longitud, latitud y altura. (Problema llamado de la *ubicación*.)
- 2.º Conocer qué rumbo debe seguirse para llegar á un punto determinado, del modo más conveniente en cada caso.

A continuación estudiaremos el modo más práctico de resolver cada uno de estos problemas.

(1) Como el uso ha establecido que se comprenda con el nombre de Navegación aérea ó Aeronáutica al conjunto de ciencias que se ocupan de la resolución de la conquista del aire, como son: la Aerostática, Aviación, Construcciones aeronáuticas y Navegación propiamente dicha, hemos aceptado la denominación que encabeza estos apuntes, para designar esta última parte, á pesar de la redundancia que hay en él, en lugar del de Navegación aérea, que sería el más lógico, pero que daría lugar á confusiones.

A demás, en los manuales de Aeronáutica en que se trata de esta cuestión, se designa la ciencia que nos ocupa con el nombre *Aeronautical Navigation* y *Aëronautische Navigation*, análogos en inglés y alemán al que hemos adoptado.

PRIMERA PARTE

Determinación del punto ó UBICACIÓN aeronáutica.

La reconocida importancia de resolver este problema en las condiciones de exactitud y rapidez exigidas por las necesidades de un viaje aéreo, ha hecho que llame la atención de gran número de aeronautas, hasta el punto de crearse una Subcomisión de la Comisión Permanente Internacional de Aeronáutica, encargada únicamente de su estudio.

En la navegación en globo libre, la determinación del punto puede evitar que el globo se interne en el mar sin condiciones para efectuar una ascensión aéreo-marítima y con grave riesgo de la vida de los tripulantes. En la aerostación militar, el Oficial aeronauta encargado de efectuar un reconocimiento, tiene necesidad de conocer constantemente sobre qué terreno navega, tanto para que el reconocimiento sea útil como para evitar el peligro de un descenso en país enemigo. En la aerostación científica y en la deportiva, tiene este problema análoga importancia, pues el continuo conocimiento de la posición del globo es imprescindible cuando se efectúa una ascensión de exploración sobre país desconocido, y, en los concursos aerostáticos, el piloto que no se haya desorientado durante todo el trayecto, tiene una innegable ventaja sobre el que ignora la posición y rumbo que tiene su globo en cada momento.

En la navegación en globo dirigible, la determinación del punto debe hacerse con la mayor frecuencia que sea posible, para tener la seguridad de que el rumbo que se sigue es el conveniente ó poder efectuar las maniobras necesarias para seguirlo cuando un cambio en la dirección ó intensidad del viento lo hubiera modificado.

Resumiendo lo anterior, podemos establecer las conclusiones siguientes:

- 1.º En la navegación aérea es muchas veces necesario y siempre conveniente conocer la posición del globo con un error menor de 5' de arco de meridiano.

2.º Es indispensable en todo momento poder conocer con rapidez esta posición con un error inferior á medio grado.

Los procedimientos que estudiaremos á continuación satisfacen á una ú otra condición, y el piloto elegirá el que más le convenga, según el grado de aproximación y de rapidez que permitan las circunstancias de cada caso.

La altura sobre el mar se determina con suficiente aproximación por medio del barómetro con escala de alturas ó altímetro, y no hay necesidad de ocuparse de ello.

La determinación del punto por sus coordenadas terrestres puede ser geográfica, astronómica, magnética ó mecánica. Sucesivamente estudiaremos cada uno de estos procedimientos.

Determinación geográfica del punto.

Este procedimiento consiste en deducir la posición de la proyección del globo sobre el terreno por la observación de la parte de superficie terrestre visible desde la barquilla, y puede subdivirse en otras tres:

- 1.º Por inspección directa del terreno.
- 2.º Por *marcaciones*; y
- 3.º Por *estima*.

Primer procedimiento.—Desde la barquilla de un globo que navegue á A metros de altura sobre el terreno aparecerá éste, si no está oculto por nubes, á los ojos del observador, como un plano topográfico del mismo terreno dibujado en escala d/A visto á la distancia d ; es decir, que á 5.000 metros de altura el terreno aparece como un plano de escala $1/25.000$, visto á 20 centímetros de distancia; por lo tanto, el problema se reduce á comparar el aspecto general del terreno con las cartas de orientación que se lleven á bordo, colocándolas orientadas con relación al Norte marcado por la brújula, hasta encontrar el que corresponda con la forma de los accidentes del terreno que se tenga á la vista.

En nuestro país este problema no presenta dificultad en la mayoría de los casos, pues la observación de una vía férrea ó de una carretera de primer orden proporciona generalmente la solución inmediata. En algunos países del extranjero, y especialmente en Francia y Alemania, el problema se complica ante la monótona red de vías férreas y carreteras que se extiende ante la vista, sin presentar ningún accidente característico que permita deducir la solución.

Durante la noche se aumenta la dificultad por el menor número de detalles visibles, excepto en las proximidades del mar, en que por la du-

ración y número de los eclipses y destellos de la luz de los faros puede averiguarse la situación.

Para facilitar la resolución de este problema, conviene llevar cartas de orientación en que estén marcadas las manchas de vegetación más importantes con los tonos de color que presente el terreno y señalados los poblados que tengan alumbrado eléctrico. También debe llevarse una lista de los faros y señales marítimas por orden de número, duración de destellos y color de la luz, con la situación de cada uno.

Mr. La Vallette es autor de otro procedimiento, al que da el nombre de *topomancia* (del griego *τοπος* lugar y *μαντεια* adivinar), que consiste en lo siguiente: Representa las distintas formas características que pueden tener los ríos, vías férreas, carreteras, bosques y lagos por letras convenientes, y colocando sucesivamente las letras representativas de los accidentes de esta clase que rodeen un pueblo en un sentido determinado y á partir de la dirección Norte, se formará una palabra correspondiente á este pueblo. Reuniendo todas las palabras así formadas en un diccionario ó *repertorio topomántico* en que figure el pueblo que cada una de ellas representa, será muy fácil conocer el nombre de los que se vean desde el globo, pues para ello bastará con observar la forma y disposición de los ríos, vías férreas, carreteras, bosques y lagos que rodeen al pueblo, formar la palabra correspondiente y buscarla en el diccionario.

El autor asegura que con un alfabeto de 35 letras y formando palabras de 4 ó 5 se pueden representar todos los pueblos de Francia.

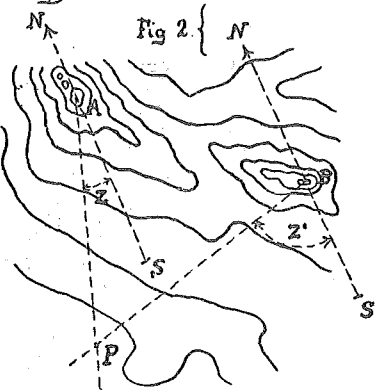
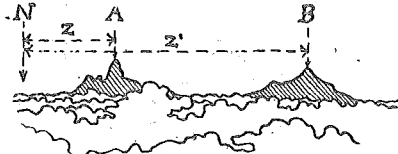
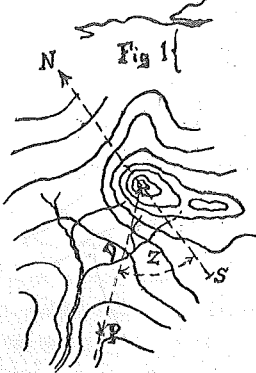
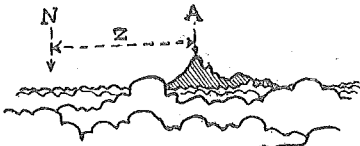
Este sistema, una vez vencida su mayor dificultad que es formar el diccionario, que habría que procurar tener al día por las nuevas vías de comunicación que se construyan, es el más sencillo y creemos que con algo de práctica para conocer el empleo de cada letra habría de dar excelente resultado.

Segundo procedimiento.—El anterior, aunque es el único que da la solución exacta, sólo es aplicable cuando permanece visible el terreno situado debajo del globo; pero es frecuente que éste esté oculto por las nubes y solamente sea visible algún pico ó punto elevado lejano que nos sea conocido. El mismo problema se presenta navegando sobre el mar á la vista de la costa, ó en las ascensiones nocturnas cuando se divise en el horizonte el resplandor de alguna ciudad conocida. En estos casos puede emplearse el método llamado en navegación marítima de *marcaciones*, que detallamos á continuación.

Dirigiendo una visual al punto conocido, y midiendo su ángulo azimutal por medio del compás de marcar ó brújula de pínulas, análogo al que usan los marinos, y trazando en la carta por el punto correspondiente una recta que forme el mismo ángulo azimutal con la Norte-Sur,

tendremos una primera marcación, en la cual ha de encontrarse el punto de observación.

Si no hubiese más que este punto conocido visible, y pudiésemos calcular la distancia por medio de un telémetro, tendríamos la solución

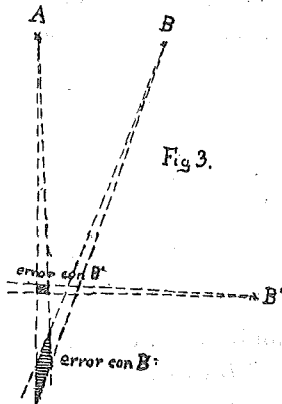


tomando sobre la línea de marcación, y á partir de aquel punto, una longitud igual á dicha distancia reducida á la escala del plano (fig. 1).

Si fuesen dos los puntos conocidos, se podría prescindir del uso del telémetro, pues bastaría con hallar en el plano la intersección de las dos líneas de marcación correspondientes á los dos puntos (fig. 2).

En este caso, el error probable será mínimo cuando éstas sean perpendiculares entre sí (figura 3), y, por lo tanto, en el caso de tener varios puntos donde elegir, convendrá operar con dos cuyas visuales formen un ángulo azimutal lo más próximo posible á 90°.

Para evitar el empleo del compás de marcar, que por la movilidad de la aguja imantada y por no conocerse el valor preciso de la declinación magnética del punto en que se esté, ofrece poca exactitud, se puede seguir otro procedimiento cuando sean tres ó más los puntos conocidos visibles, que consis-



te en medir con un sextante ó goniómetro el ángulo azimutal comprendido entre los puntos dos á dos, y trazar los correspondientes arcos capa-

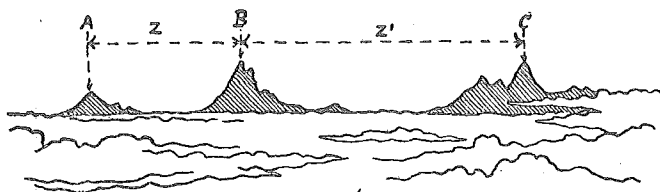
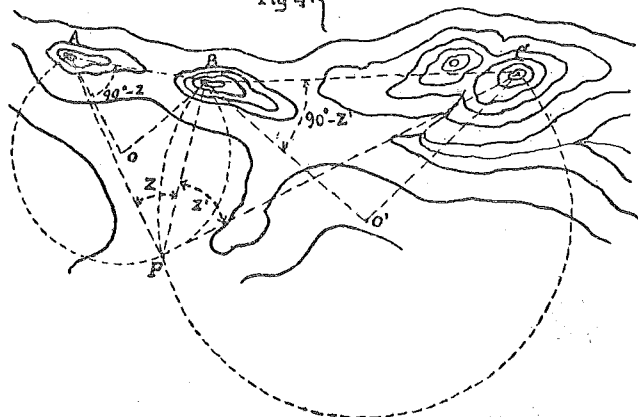


Fig 4.

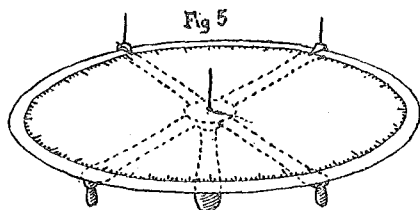


ces de estos ángulos en la carta sobre dichos puntos, y la intersección de estos arcos dará la posición del punto ocupado por el globo. La resolución

del problema en este caso se hará del modo siguiente: Sean A , B y C (fig. 4) los puntos conocidos del horizonte, Z el ángulo azimutal entre A y B , y Z' el de B y C . Trazando por A y B las rectas AO y BO que formen con la AB un ángulo igual al complemento de Z , tendremos por su intersección el punto O centro del arco APB capaz del ángulo Z , y repitiendo esta operación con los B y C y ángulo Z' obtendremos el otro arco BPC , que en su intersección con el APB nos dará la posición del punto de observación.

Si el ángulo Z fuese obtuso, su complemento sería negativo y habría que trazar los ángulos OAB y OBA al otro lado de la AB .

Si hubiera dos observadores, se pueden obtener los ángulos azimuta-



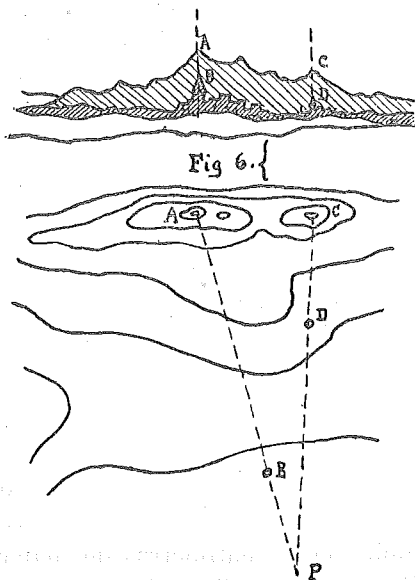
les de un modo sencillo y que da la suficiente aproximación. Consiste en emplear un círculo graduado con dos brazos que puedan girar alrededor de su centro, provistos de un índice que marque los grados y una pínula fija (fig. 5). Colocado horizontalmente el plano del círculo, y dirigiendo visuales cada uno de los dos observadores simultáneamente por la pínula del centro á un punto conocido del horizonte, y moviendo el brazo correspondiente hasta que su pínula coincida con la visual, el ángulo comprendido en el círculo entre los dos índices será el azimutal correspondiente á los dos puntos visados.

El problema se simplifica cuando las visuales á dos de estos puntos están en un mismo plano vertical. En este caso, el ángulo azimutal es cero, y el arco capaz de este ángulo se convierte en la recta que pasa por ellos en la carta.

Si las visuales á otros dos puntos conocidos coincidiesen también en proyección horizontal, la intersección de las rectas que los unen en la carta dará la solución del problema (fig. 6). Este procedimiento es llamado, en navegación marítima, de *enfilaciones*.

Tercer procedimiento. — El método de determinación del punto por *estima* consiste en resolver el problema conociendo la posición de un punto por donde se haya pasado anteriormente, el rumbo seguido y el camino recorrido, deducido este último de la velocidad y del tiempo. Conocidos estos datos, se determinará el punto trazando sobre el plano, y á partir del último punto conocido del viaje, en la dirección del rumbo que se lleve, una magnitud igual al producto de la velocidad por el tiempo, reducida á la escala correspondiente.

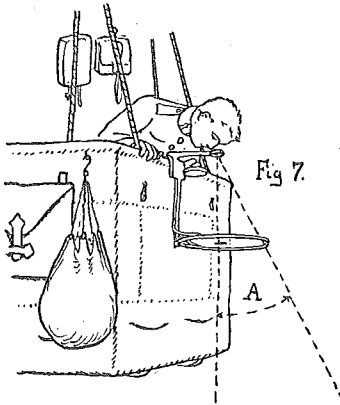
Este método, que en navegación marítima es el más usado por la constancia en dirección ó intensidad de las corrientes marítimas y su poca influencia en la marcha del buque, en cambio en la aeronáutica sólo es aplicable en muy raros casos por la dificultad de conocer en cada momento el rumbo y la velocidad del globo, producidos ó influenciados grandemente por la acción del viento, cuyos continuos cambios son difícilmente apreciables desde la barquilla. Sin embargo, en los casos en



que no pueda emplearse otro medio mejor, habrá que adoptar éste á pesar de su poca exactitud.

Conocido el último punto y el tiempo transcurrido desde que se pasó por él, hay que hallar el rumbo seguido y la velocidad absoluta.

Si fuesen conocidas la velocidad y dirección del viento durante el trayecto estaría resuelto el problema, pues en navegación libre estos mismos datos serían los de la marcha del globo, y si fuese dirigible bastaría efectuar la composición de velocidades entre la propia del globo y la del viento, y obtendríamos el rumbo y velocidad absoluta.



La velocidad propia del globo se puede medir por medio de un anemómetro muy sensible con contador de revoluciones colocado en un punto de la barquilla en donde el aire no esté muy perturbado por la hélice, ó bien con la corredera aérea (*air-log*) ideada por Mr. Renard, que consiste en un globito de 60 centímetros de diámetro, lleno de hidrógeno y atado á un hilo de seda de 100 metros.

Este hilo se deja correr libremente por la tracción del globito, durante la marcha, y se deduce la velocidad propia del globo por la fórmula

$$v = 100/t + k,$$

siendo t el número de segundos que tarde el globo en desarrollar toda la longitud del hilo, y k una constante de rozamiento que habrá que determinar por experiencias previas.

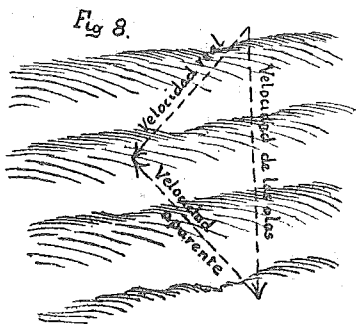
Si la tierra fuese visible por debajo del globo, observando la marcha aparente de la proyección de la punta de la cuerda freno, podemos conocer el rumbo y la velocidad midiendo el tiempo que se tarde en recorrer una distancia cuya longitud sepamos, por medio de un telémetro.

El Comandante del Servicio Aerostático, Sr. Rojas, es autor de un procedimiento sumamente sencillo é ingenioso que seguramente ha de dar grandes resultados en la práctica. Consiste en colocar horizontalmente, por la parte exterior de la barquilla, un círculo transparente con su centro marcado y graduada su circunferencia (fig. 7). En la vertical del centro, y al alcance del observador, hay un ocular por el cual se puede ver el círculo completo. Mirando por él á un punto del terreno que en su movimiento aparente pase por el centro del círculo, siguiéndole en su

marchá hasta que atraviere la circunferencia graduada, podremos hallar el rumbo del globo por la graduación á que llegue el punto observado, teniendo en cuenta la orientación del cero que conoceremos por medio de la brújula; y para obtener la velocidad, si T es el tiempo en segundos que ha tardado el punto del terreno en moverse desde el centro á la circunferencia, A el ángulo bajo el cual se ve el radio desde el ocular, y H la altura del globo sobre el terreno, tendremos:

$$\text{velocidad} = tg A \frac{H}{T}$$

El Capitán Kindelan es autor de un *cinemómetro*, empleado con éxito en el dirigible «España», con el que se obtiene la velocidad midiendo el tiempo que transcurre desde que un punto del terreno pasa por el nadir del observador, hasta que es enfilado por la visual dirigida según la hipotenusa de un triángulo rectángulo, formado de varillas movibles graduadas, que puede girar alrededor de uno de sus catetos mantenido verticalmente por un contrapeso. En este caso $tg. A$ es igual á la relación entre ambos catetos, y si el vertical es proporcional á la altura E , el horizontal representará, en la misma escala, el camino recorrido en el tiempo T .



Empleando estos aparatos, es necesario repetir las observaciones cada vez que se note un cambio de dirección ó velocidad y tener en cuenta que las oscilaciones ó giros de la arquilla de los globos libres, y el *tangage* en los dirigibles, puede conducir á obtener resultados muy erróneos si se opera cuando se produce uno de estos movimientos.

Para conocer la altura, dato indispensable para obtener la velocidad por la observación del terreno, no habrá más que restar, de la que marque el barómetro sobre el nivel del mar, la cota del terreno sobre que se navegue, si ésta es conocida. En el caso contrario puede emplearse el telémetro, y si por ser de noche ú otra causa éste no fuese aplicable, se puede obtener también dando un golpe seco de bocina y contando el número de segundos que tarde en oírse el eco reflejado por el terreno. Cada segundo representa aproximadamente 170 metros de altura.

Este procedimiento sólo es aplicable para alturas no muy grandes y sobre terreno poco accidentado.

Navegando sobre el mar, sin que sea visible desde la barquilla ningún punto fijo que pueda servir de referencia, es muy difícil formarse

idea de la dirección y velocidad del globo, porque instintivamente se tiende á referirlas á las ondulaciones de las olas considerándolas como surcos fijos en la superficie, obteniendo de este modo resultados muy distintos y hasta contrarios algunas veces á los verdaderos (fig. 8).

Para deshacer el error es preciso, ó navegar á la cuerda freno ó estabilizador, ó arrojar objetos que floten y permanezcan visibles desde la barquilla, y deducir por el movimiento aparente de éstos el rumbo y velocidad absoluta del globo. De noche da muy buen resultado arrojar fragmentos de potasio que, como es sabido, flota, produce una luz muy viva en contacto con el agua y termina su combustión con una pequeña



Fig. 9.

explosión que, por el número de segundos que tarde su sonido en llegar al observador, permite, además, conocer la altura multiplicando este número por 340 metros.

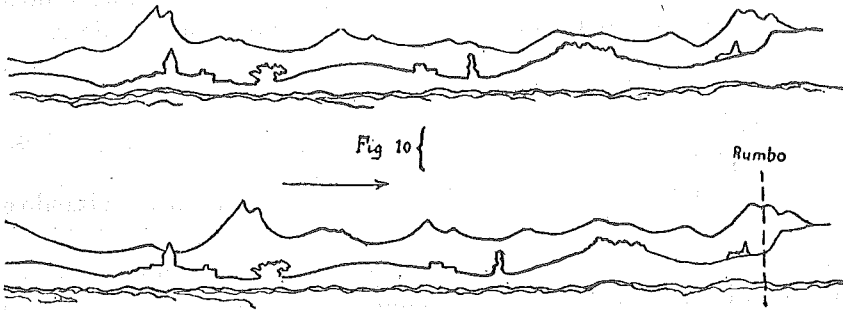
Para conocer la velocidad navegando sobre el mar á la cuerda freno ó estabilizador, basta echar al agua una corredera automática, como las que se usan en marina, atada á una cuerda de suficiente longitud, y ver el camino recorrido por el número de revoluciones que marque su contador.

Navegando sobre nubes, pero con horizonte terrestre visible, puede también conocerse el rumbo, aunque aproximadamente, observando la deformación aparente de aquél, y fijándose en qué punto del horizonte aumenta más de tamaño y este será el rumbo del globo (fig. 9). Para esta observación es de mucha utilidad el empleo de un telémetro, ó al menos de unos gemelos con placa telemétrica. Este método no es exacto más que cuando todos los puntos del horizonte están á la misma distancia del globo en la primera observación, porque si no, las partes más cercanas aumentarían más rápidamente de tamaño aparente, aunque estuvieran algo desviadas de la línea de rumbo, que los puntos más lejanos situados en esta línea.

Observando las nubes situadas bajo la barquilla podrá inducirse el mismo error que ya se dijo respecto á las olas, por referir la marcha del globo á la de las nubes, que á su vez se hallarán animadas de un movimiento que por regla general no conoceremos, pues frecuentemente es distinto del de la capa de aire en que están situadas.

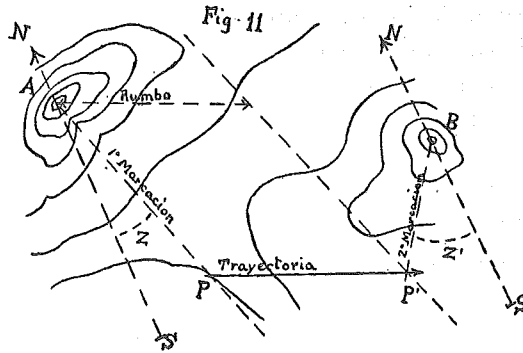
Si el horizonte visible se compusiera de dos términos bien definidos, se puede conocer el rumbo observando el desplazamiento aparente del más lejano con relación al más próximo, que se verá en la misma dirección en que se efectúe la marcha del globo. El rumbo estará indicado por la línea que une los dos puntos del horizonte en los cuales se anule el movimiento horizontal relativo de los dos términos (fig. 10).

Por último, si la tierra estuviese totalmente cubierta por las nubes sería imposible conocer el rumbo y velocidad del globo por medios geográficos, á no ser que se percibiera algún ruido que provenga del suelo,



como de salto de agua, ruido de alguna fábrica, de campanas, ladridos, etcétera, etcétera. En este caso podremos averiguar el rumbo, aunque con muy poca aproximación, apreciando en qué dirección se va alejando el sonido.

Si el punto por que se ha pasado no fuese conocido más que por una marcación, podremos determinar lo conociendo el rumbo y camino recorrido, y una nueva marcación final al mismo



punto que la primera ó á otro conocido visible. Para esto se trazaría por el primer punto visado su respectiva marcación, y una paralela, al rumbo seguido, de una longitud igual al camino recorrido; por el extremo de ésta una paralela á aquella marcación, y la intersección de ésta con la segunda marcación será el punto estimado (fig. 11).

Como se ve, este tercer procedimiento, por la poca exactitud que puede dar, solamente debe emplearse cuando no pueda hacerse uso de nin-

guno de los demás, y de todos modos sus resultados deben ser comprobados y completados por otro medio geográfico, y preferentemente por el primero que es el único que puede dar la solución exacta.

Determinación astronómica del punto.

Sucede frecuentemente que por navegar fuera de la vista de tierra conocida, ó por no haber apreciado constantemente el rumbo y velocidad desde el último punto conocido, no es posible aplicar los procedimientos geográficos á la determinación de la posición. Entonces, si el cielo aparece descubierto en totalidad ó en parte, y es posible la observación de algún astro, podremos determinar el punto por medios astronómicos.

Este procedimiento tiene sus mayores aplicaciones en los trayectos nocturnos, sobre el mar, sobre nubes ó sobre terrenos desconocidos, y sus empleos en la navegación aeronáutica y en la marítima, aunque análogos en el fondo, presentan las diferencias siguientes:

1.^a La resolución ha de ser más rápida en la aeronáutica, evitando en lo posible toda clase de cálculos.

2.^a No necesita de tanta exactitud como en la marítima, puesto que este procedimiento ha de ser completado con los geográficos para las operaciones que requieran mayor precisión, como la toma de tierra, los reconocimientos de un punto determinado, etc., etc.

3.^a Apareciendo generalmente muy confuso el horizonte visto desde un globo, y con un ángulo de depresión considerable, en la navegación aeronáutica no es posible medir la altura de los astros tomando la visual al horizonte visible como punto de referencia, como se hace en el mar.

Teniendo en cuenta estas diferencias veremos qué procedimientos pueden seguirse para determinar el punto por medios astronómicos, en las mejores condiciones posibles.

Los datos que podremos obtener de los astros observables son: sus coordenadas celestes, ó sean la ascensión recta y la declinación que conoceremos por las tablas del Almanaque Náutico que se deberá llevar á bordo, ó al menos una reducción de él; su altura sobre el horizonte que podremos medir con aparatos especiales; el azimut valiéndonos del compás de marcar ó azimutal en el caso de conocerse la declinación magnética del lugar, y el ángulo que forme el arco de círculo máximo que une dos astros con el vertical que pase por uno de ellos que también se podrá medir con aparatos fáciles de construir, aunque no tenemos noticia de que se haya empleado por los aeronáutas extranjeros.

Además, por el cronómetro de á bordo, podremos saber la hora sideral en el meridiano origen de longitudes, ó sea el de Greenwich, que es el oficial para España.

Podríamos obtener también la distancia angular entre la luna y otro astro, por medio del sextante para aplicar el procedimiento de distancias lunares, que se emplea en la navegación marítima cuando se quiere comprobar el estado del cronómetro ó prescindir de él; pero cremos que este procedimiento no es de aplicación en los viajes aéreos, en que por su corta duración, la hora que nos proporcione el cronómetro será de más exactitud que la que podamos deducir del método de distancias lunares.

Tampoco estudiaremos otros procedimientos analíticos, que por necesitar muchos cálculos y el empleo de instrumentos de precisión, son más propios para la geodesia ó la topografía que para la navegación. Tales son el de Döllén ó pasos por el vertical de la Polar, el de Chandler ó pasos por el círculo de co-latitud, el de pasos por el primer vertical, el de diferencias de distancias cenitales meridianas y otros varios.

Aparatos para medir alturas de astros sobre el horizonte.

Para emplear los aparatos usados en marina con este objeto, en la navegación aeronáutica, es necesario, por las razones ya expuestas, dotarlos de un horizonte artificial de mercurio, ó cristal azogado mantenido horizontalmente por un procedimiento cualquiera; pero la dificultad de usar estos aparatos en semejantes condiciones en el pequeño espacio libre de que puede disponerse en una barquilla (que además estará constantemente variando de orientación), y el tamaño exagerado que habría que dar á la superficie reflejante cuando la altura del astro sobre el horizonte fuera pequeña, ha hecho que estos aparatos sean de poco uso, á pesar de dar más exactitud que los demás cuando se opera en buenas condiciones.

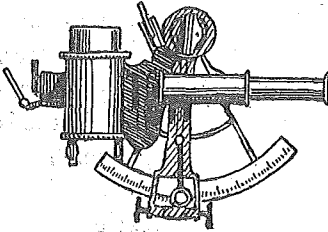
Tres clases de aparatos se han construído hasta la fecha para este uso: el sextante giroscópico del almirante francés Fleuriais, el cuadrante de nivel Butenschön y los astrolabios con amortiguador Favé.

El primero consiste en un sextante ordinario en que proporciona la horizontal un giróscopo de eje vertical, animado de un rápido movimiento de rotación que se mantiene por medio de una bomba de aire. El giróscopo lleva perpendicularmente á su eje una serie de trazos paralelos que se mantienen horizontales á pesar de los movimientos que se impriman al aparato durante la observación, y la visual dirigida á dichos trazos sustituye la que habría que dirigir al horizonte si se empleara el sextante del modo ordinario. Este aparato, aunque bastante exacto, tiene el inconveniente de ser demasiado delicado, costoso y pesado, por lo que su uso no se ha extendido mucho (fig. 12).

En el cuadrante de nivel Butenschön (*libellenquadrant*), de fabricación alemana, se obtiene la horizontalidad de la línea de fe que sustituye

ye al horizonte, haciendo que, al dirigir el anteojo del aparato al astro y centrado éste en el cruce de los hilos del retículo, venga á centrarse en

Fig. 12.



el campo del anteojo la imagen de la burbuja de un pequeño nivel fijo al aparato, reflejada por un espejo convenientemente situado en el interior del anteojo. Cuando tal ocurre, mediante la maniobra de un tornillo, la línea de fe, que une el eje de giro al cero de la graduación del limbo, es horizontal y basta leer con el nonius del anteojo dirigido al astro, la graduación que indica sobre el limbo del aparato, la altura aparente del astro. Durante la ob-

servación es necesario mantener el plano del aparato lo más verticalmente posible.

En las observaciones nocturnas se utiliza una pequeña lámpara eléctrica para iluminar el nivel y el retículo (figs. 13 y 14).

Este sencillo aparato, fundado en el mismo principio que el nivel de reflexión de Abney; es el que posee nuestro Servicio de Aerostación, y ha sido empleado por el autor de esta Memoria en varias ascensiones libres con buen resultado.

Fig. 13.

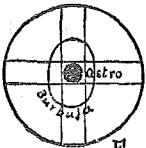
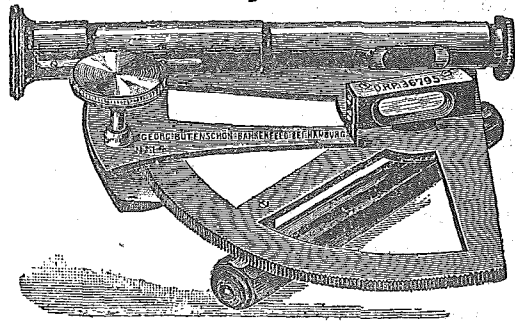


Fig. 14

El precio del aparato Butenschön es moderado y esto, unido á su pequeño peso y volumen, y á su solidez, le hace muy apropiado para su aplicación en la navegación aeronáutica. En cuanto á su manejo, resulta sencillo, sobre todo colgando el aparato del círculo de suspensión del globo, ó de cualquier punto fijo más alto que el observador, de modo que quede á altura conveniente, con lo cual se atenúan los pequeños movimientos de la mano del observador, obteniéndose sin gran práctica una aproximación de 3 ó 4 minutos en las alturas observadas.

Mr. Favé, ingeniero hidrógrafo de la marina francesa, completó su procedimiento para situar el globo, que se expondrá oportunamente, con

el estudio y construcción de varios modelos de un aparato por él ideado, llamado astrolabio de espejo. Dichos ingeniosos modelos, que perfeccionados es posible resuelvan el problema de un modo práctico y sencillo, no parece que hasta la fecha hayan dado completo resultado. Para obtener con ellos una visual ó línea de fe horizontal, que supla al horizonte, utiliza Mr. Favé en sus modelos un espejo que puede girar alrededor de un eje horizontal y cuyo plano, al disponer el aparato para una medición, debe quedar vertical, á cuyo efecto el espejo referido lleva un contrapeso provisto de una ingeniosa disposición destinado á amortiguar las oscilaciones del mismo y del espejo, disposición que consiste en gran número de finísimos radios de cristal de sólo algunas centésimas de milímetro de diámetro, que por su rozamiento con el aire amortigua las oscilaciones del péndulo ó contrapeso y lo mantiene, así como al espejo, en una posición vertical muy estable (figura 15).

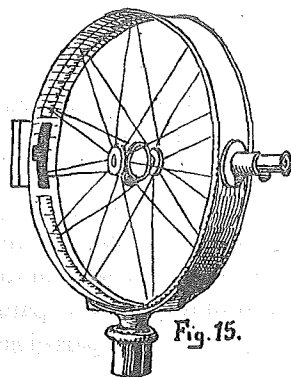


Fig. 15.

Aparatos para medir ángulos azimutales.

Puede usarse el compás de marcar ó azimutal, análogo al empleado por los marinos, pero á fin de reducir el peso y las oscilaciones de la aguja imantada, y de aumentar su sensibilidad, Mr. Favé ha construido un modelo de brújulas para medida de azimutes, extremadamente sensibles y dotadas de un sistema amortiguador análogo al que emplea en los astrolabios de su invención.

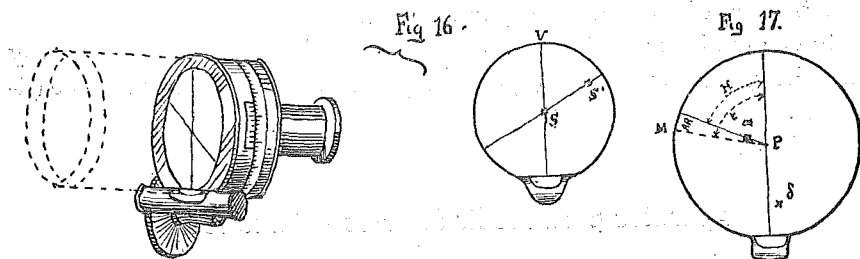
En esta clase de brújulas debe poder leerse la graduación del limbo al mismo tiempo que se hace la observación, para esto llevan un espejito delante del ocular que refleja la parte de graduación que marque el azimut correspondiente.

Estos aparatos, por la poca exactitud de los datos que pueden dar, debida á las oscilaciones de la aguja, y á desconocerse por regla general el valor de la declinación magnética del lugar, son muy poco empleados para las observaciones astronómicas.

Aparatos para medir ángulos de un círculo máximo con un vertical.

Pueden construirse en forma de un anteojo de ancho campo visual, dotado de una placa giratoria con un diámetro dibujado y una graduación para medir con toda la exactitud posible el ángulo que forme esta línea con la vertical, que podría estar marcada por el hilo de una pequeña plomada interior al anteojo, ó mejor, por la reflexión en un espejo interior, de la burbuja de un nivel transversal.

Mirando por este aparato á las dos estrellas dadas (para lo cual haría falta que las dos apareciesen simultáneamente en el campo del anteojo)



haciendo que la estrella vértice del ángulo que se quiere medir, ocupase el centro, y, girando el diámetro de la placa giratoria hasta que pase por la segunda estrella, la graduación nos daría el valor del ángulo que se buscaba (fig. 16).

Si lo que se desea es medir el ángulo que forma con el meridiano del lugar el meridiano de la Polar, ó sea su ángulo horario (del cual se puede deducir fácilmente la hora sideral local, como veremos más adelante) pueden tenerse dibujadas en la placa del anteojo las proyecciones de las estrellas α y δ de la Osa menor, de modo que la proyección del Polo corresponda al centro del campo. De este modo no habría más que hacer coincidir aparentemente cada estrella con su proyección correspondiente y medir el ángulo que se marcase en la graduación (fig. 17), que podría tener su cero distante del paso superior de la Polar por el meridiano, un ángulo igual á la ascensión recta de esta estrella, y de este modo daría directamente la hora sideral local. Llamaremos á este aparato *goniómetro polar*.

Cronómetros que pueden usarse en la navegación aeronáutica.

Tratándose de viajes aéreos en los que no se haya de subir á gran altura, bastaría emplear un cronómetro ordinario, no siendo necesario que fuese de tanta precisión como los usados en marina, por ser los viajes aéreos de mucha menos duración que los marítimos, y por no necesitarse en los primeros un grado de exactitud tan grande como en los últimos.

Sin embargo, para viajes de gran duración y si se hubiese de navegar á grandes alturas, y efectuar observaciones de precisión, habría que adoptar disposiciones especiales para evitar las variaciones que la disminución de presión atmosférica y las bajas temperaturas podrían originar en la marcha del reloj, por presentar menor resistencia el aire á su movimiento y producirse contracciones en las diversas piezas, cuyas dos causas podrían dar lugar á adelantos que originarían errores de consideración. Para evitar esto, bastaría con tenerlo encerrado herméticamente en una caja con un lado de cristal, rodeada de una sustancia aisladora para el calor, y de la suficiente resistencia para sufrir la presión de dentro á fuera del aire contenido en su interior, que navegando entre 5000 y 6000 metros de altura llegaría á ser de media atmósfera.

Mr. P. Ditisheim ha hecho una serie de experiencias, de las cuales ha deducido que para un cronómetro *deck-watch* el efecto de la disminución de presión es de un adelanto de 1,6 segundos por cada 24 horas y 100 mm. de mercurio.

Por el empleo de los medios descritos anteriormente, podemos conocer de cada astro su altura verdadera sobre el horizonte y por lo tanto su distancia cenital, su azimut si fuera conocida la declinación magnética, y el ángulo del arco que pasa por dos estrellas con un vertical. Además, el Almanaque Náutico del observatorio de San Fernando (ó mejor, el *Nautical Almanac* del de Greenwich, por tener sus tiempos calculados con arreglo á este meridiano que es el oficial para España) (1) nos dará su ascensión recta y su declinación, y por el cronómetro de á bordo arreglado al tiempo astronómico, podremos conocer la hora sideral de Greenwich.

Veamos el modo de operar para obtener cada uno de estos datos.

Para hallar la altura verdadera de un astro se obtendrá primeramente, valiendose del sextante ó cuadrante y según el modo peculiar de

(1) Desde el año 1908, el Almanaque Náutico de San Fernando publica también sus datos con arreglo al meridiano de Greenwich.

cada aparato, su altura aparente, la cual estará influenciada por la refracción y la paralaje.

El error de refracción es siempre positivo y función de la temperatura, de la presión y de la altura aparente del astro. En las Tablas náuticas de Mendoza, muy usadas por los marinos, figura una que contiene las correcciones de refracción de las alturas aparentes de las estrellas que puede usarse en aeronáutica cuando se navegue á poca altura. Para alturas mayores será conveniente llevar á bordo una tabla de correcciones calculadas para distintas alturas sobre el mar, modificando la de Mendoza, sabiendo que esta corrección es proporcional á la presión atmosférica correspondiente.

De todos modos no se debe confiar en los datos obtenidos con astros de una altura aparente sobre el horizonte inferior á 10° , por estar demasiado influenciados por la refracción; en cambio, para alturas superiores á 45° se puede despreciar el error por ser inferior á $1'$ y aceptar la altura aparente como verdadera.

El error de paralaje es siempre negativo y tiene un valor angular cuyo seno = $\text{sen } z \cdot r/d$, siendo r el radio terrestre, d la distancia del astro y z su distancia cenital aparente, corregida de la refracción.

Para los usos de la aeronáutica, es despreciable para todos los astros, excepto para la Luna en que es mayor que el de refracción. En las citadas Tablas de Mendoza hay una para las correcciones de la altura aparente de la Luna, en que están tenidas en cuenta las dos causas de error en función de la paralaje horizontal actual de este astro que figura para cada día en el Almanaque Náutico ó Nautical Almanac.

Una vez hechas estas correcciones en la altura aparente obtenida por el aparato, conoceremos la altura verdadera, ó sea la que apreciaría un observador situado en el centro de la tierra si ésta careciera de atmósfera, que es la que habrá que emplear en los cálculos.

Por medio del compás de marcar hallaremos el azimut magnético del astro, al cual hay que sumar ó restar el ángulo de declinación magnética del sitio donde se esté, para obtener el azimut verdadero ó sea el que forma el vertical que pasa por el astro con el meridiano del lugar.

Si la declinación magnética no se conoce, este aparato no es aplicable y no será posible hallar el azimut verdadero.

El ángulo que forme con un vertical el arco de círculo máximo que pase por dos estrellas, estará influenciado también por los errores de refracción y paralaje. Las correcciones que habría que hacer en cada caso serían bastante complicadas y se necesitaría medir la altura aparente de cada estrella para calcularlas, y en este caso ya se podría seguir otro procedimiento más expedito. Para evitar estas correcciones lo mejor es

operar solamente con estrellas de poca diferencia en altura y que ésta sea la mayor posible, de este modo el error es despreciable, como sucede en nuestras latitudes operando con las α y δ de la Osa menor con el goniómetro polar.

Para obtener las coordenadas astronómicas del astro observado, empleando el Nautical Almanac, las buscaremos en las tablas *Mean places of Stars* si se trata de una estrella. Si fuese un planeta figurarán en las correspondientes á sus coordenadas, en las que se indican las que tiene al mediodía medio de Greenwich para cada día, efectuando después la interpolación necesaria para hallar las que correspondan á la hora de la observación. Lo mismo se hará con el Sol, cuya ascensión recta y declinación y su variación por hora figuran, para cada día, en las tablas de cada mes.

Las coordenadas de la Luna figuran en tablas especiales para cada mes, con el epígrafe *The Moon's right ascension and declination* en que están calculadas para cada hora con sus variaciones en diez minutos para facilitar la interpolación.

Para saber la hora sideral de Greenwich se pueden seguir dos procedimientos, llevar á bordo un cronómetro arreglado en tiempo sideral ó bien calcularla, conociendo la hora media, por medio de tablas á propósito ó interpolando entre la hora sideral del mediodía medio y la del día siguiente, que figuran en las tablas mensuales del Nautical Almanac.

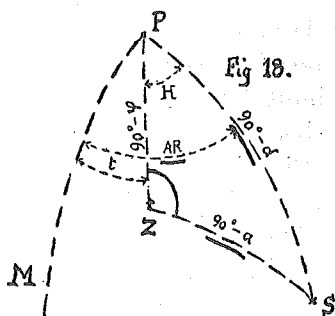
Para el estudio de los procedimientos de determinación astronómica del punto, dividiremos los casos que pueden presentarse en dos grupos, según que se hagan las observaciones con un sólo astro ó con dos ó más.

Observaciones con un solo astro.

En este caso se puede resolver el problema de dos modos distintos: por observaciones simultáneas ó por observaciones sucesivas.

I. El primero consiste en averiguar la posición, conociendo las coordenadas astronómicas del astro y su distancia cenital y azimut verdadero, y la hora sideral de Greenwich en el momento de la observación.

Análíticamente se puede resolver del modo siguiente: si representamos en Z el cenit del lugar (fig. 18), P el polo elevado y S el astro y $M P$ el meridiano principal celeste (que pasa por el pri-



mer punto de Aries ó vernal y que es origen de las ascensiones rectas) en el triángulo esférico PZS conoceremos los lados PS y SZ (complementos respectivos de la declinación y altura del astro) y el ángulo SZP que es el azimut.

El ángulo ZPS (horario del astro) lo podremos calcular por la fórmula:

$$\text{sen } ZPS = \text{sen } SP \text{ sen } SZP / \text{sen } ZS,$$

de donde podremos deducir la hora sideral local MPZ , restando del MPZ (ascensión recta del astro) el valor calculado de ZPS , y la longitud geográfica del lugar será igual á la diferencia entre esta hora local y la de Greenwich que marcará el cronómetro.

La latitud (complemento de ZP) se calculará por la fórmula:

$$\text{tg } \frac{1}{2} ZP = \text{tg } \frac{1}{2} (PZS + ZPS) / \text{tg } \frac{1}{2} (SZP - ZPS)$$

Si representamos por φ la latitud, L la longitud, a la altura del astro, Z su azimut, d la declinación y AR la ascensión recta, H el horario, t la hora local sideral y T la de Greenwich, tendremos sustituyendo en las fórmulas anteriores:

$$L = T - t = T - (AR - H) = T - (AR - \text{arc sen } = \cos d \text{ sen } Z / \cos a)$$

$$\varphi = 2 [\text{arc cotg } = \text{tg } \frac{1}{2} (Z + H) \text{tg } \frac{1}{2} (A - d) / \text{tg } \frac{1}{2} (Z - H)]$$

Para resolverlo gráficamente se puede seguir el procedimiento de trazar en la carta el lugar geométrico de los puntos de la Tierra para los cuales el astro tiene la altura medida, y el de los puntos desde los cuales tiene el azimut hallado, y su intersección nos dará el punto, pero como el segundo lugar geométrico es una curva esférica difícil de trazar en la mayoría de los casos, es preferible hallar el primero solamente y determinar por tanteos el punto de este lugar geométrico, en el que el azimut del astro sea el que se ha obtenido, que será el que ocupará el globo.

Si unimos el astro con el centro de la tierra con una recta, se llama *punto de iluminación* el de intersección de esta recta con la superficie terrestre para el cual la altura del astro es de 90° , ó sea, que aparecerá en su cenit. Se ve fácilmente por la inspección de la figura 19, que para todos los puntos de un círculo menor cuyo polo sea el punto de iluminación y cuyo radio sea A , la altura sobre el horizonte del astro será de $90^\circ - A$; de donde se deduce que, el lugar geométrico de los puntos de la

superficie terrestre desde los cuales un astro aparece con una altura determinada, en un momento dado, es un círculo menor cuyo polo es el punto de iluminación del astro en dicho momento y cuyo radio es el complemento de la altura.

Estos círculos menores se llaman *de altura* ó *de iluminación*.

Las coordenadas geográficas del punto de iluminación de un astro, como se deduce de la figura 20, son: latitud = declinación del astro, y longitud = $AR - T =$ ascensión recta menos la hora sidereal de Greenwich.

Para hallar el círculo de iluminación correspondiente á un astro y á una hora y altura dadas, sin tener que efectuar cálculos y del modo más sencillo y rápido posible,

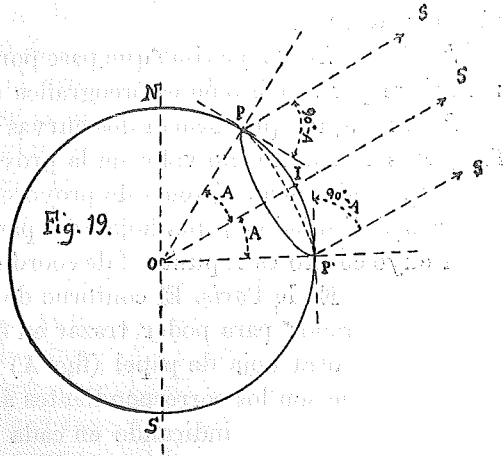


Fig. 19.

Mr. Favé ha ideado un procedimiento gráfico utilizado en muchas ascensiones del extranjero, á cuya descripción añadiremos la de otro método proyectado por el autor de esta Memoria, y empleado con buen resultado en varios viajes en globo libre.

El procedimiento Favé está basado en la proyección estereográfica,

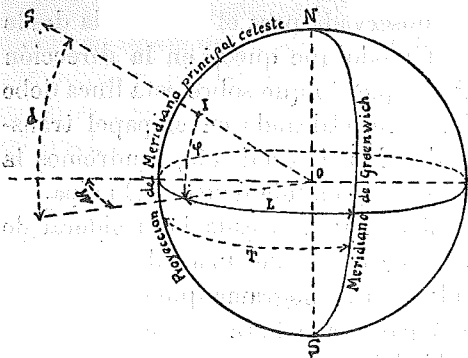


Fig 20.

que, como es sabido, se obtiene hallando la perspectiva de una parte de la superficie de la tierra que rodea á un cierto punto de la misma Z, tomando como punto de vista el antípoda del Z y por plano de proyección ó del cuadro, el diametral perpendicular á la línea que une el punto Z al punto de vista, ó cualquiera paralelo á dicho plano, como lo es el tangente á la esfera terrestre en el punto Z, que es el que emplea monsieur Favé.

Este sistema de proyección, muy generalizado, ofrece entre otras las siguientes propiedades:

1.^a Toda circunferencia trazada sobre la esfera se proyecta según otra circunferencia.

2.^a Todo círculo máximo que pase por el punto Z , llamado punto central, tiene por proyección estereográfica una recta.

3.^a El ángulo que forman dos curvas arbitrarias trazadas sobre la esfera, conserva su mismo valor en la proyección.

Empleando dicho sistema de proyección, obtuvo Mr. Favé un mapa de Europa dibujado en una hoja transparente (fig. A) y de contorno circular cuyo centro es el punto Z de coordenadas geográficas: lat. = 45° N., y long. = 7° E. de París. El contorno de este mapa estereográfico va dividido en grados para poder trazar en él ángulos azimutales desde el punto Z . En otra hoja de papel (fig. A) ha dibujado una serie de arcos de círculo que son los correspondientes á los de iluminación que pueden pasar por el punto Z , indicando en cada uno de ellos la altura del astro visto desde Z á que corresponde.

Con estas dos hojas es fácil obtener el círculo de altura ó de iluminación correspondiente á un astro en un momento dado, conocidos su azimut y su altura observados desde el punto Z ; para ello no hay más que colocar la hoja transparente sobre la figura, haciendo coincidir el punto Z de la primera con el de intersección del eje de azimutes y el círculo de altura correspondiente á la altura observada para el astro dada desde Z , y orientado el eje de azimutes del modo que quede en la dirección del azimut observado desde el punto Z , puesto que sobre esta línea debe hallarse el punto de iluminación del astro. Calcando en el papel transparente del mapa el círculo de iluminación determinado, tendremos la proyección de este círculo en la parte comprendida dentro del mapa.

Las alturas y azimutes de cada estrella y para cada hora sideral de París, y para el punto Z , se obtienen por medio de unas tablas calculadas por Mr. Favé. Para el Sol emplea un monograma que da la altura y azimut de este astro en el punto Z para cada hora de tiempo verdadero y para cada grado de declinación del astro.

Pero en general el globo no se hallará sobre ninguno de los círculos de altura que pasan por Z correspondientes á las observaciones que se efectúen, sino en otro cualquiera, y la altura observada no será igual á la que corresponde para el astro al punto Z en el momento de la observación. En este caso general el globo en encontrará en el momento de tomar la altura sobre un círculo de iluminación cuyo plano será paralelo al del que en dicho instante pasa por Z , que diferirá de éste un cierto número de grados n , igual precisamente á la diferencia entre la altura

observada desde el globo y la que en el mismo instante se mediría desde el punto central Z para el mismo astro visado.

Para trazar el círculo de iluminación que al globo corresponde habrá que tomar en la figura A sobre la línea que marque el azimut del astro observado, y á partir del punto Z , una distancia igual á la proyección de n grados de la esfera sobre el mapa estereográfico, distancia que se llevará desde Z hacia el astro si la altura de éste, observada desde el globo es mayor que la que para el mismo momento dan las tablas para el astro visado desde Z , y en sentido opuesto en el caso contrario.

Por el punto así obtenido en la figura, debe pasar el círculo de iluminación en que el globo se encuentra; pero como al variar de punto, varía el radio del círculo de iluminación correspondiente, así como la proyección estereográfica del mismo, para saber qué arco de los de la figura hay que emplear, utiliza Mr. Favé un nomograma en el cual, por alineación del valor de la altura observada desde el globo, y la calculada para el mismo astro visto desde Z á la misma hora (que es la que figura en la tabla correspondiente en unión de los azimutes) se obtiene el número del arco que hay que emplear, procediéndose á situar éste sobre el punto determinado como si se tratara del Z , y á calcar el arco correspondiente después de orientado su eje de azimutes en el sentido debido.

Una vez conocida la posición del círculo de altura, determinaremos por tanteos el punto en que su radio forma con el meridiano un ángulo igual al azimut del astro y éste será el punto que se busca.

El procedimiento que proponemos consiste, en esencia, en lo siguiente: Supóngase que desde la barquilla de un globo se toma en un momento cualquiera la altura a del astro s cuya declinación conocida es d y que el aeronáuta dispone de una figura ó ábaco análogo á la figura 21, hecha tomando como plano de proyección el del meridiano del astro, plano que por consiguiente contendrá el eje NS de rotación de la tierra y la recta OS que une el centro del astro con el de la tierra, recta que por ser paralela á la visual dirigida desde el globo al astro S , formará con el ecuador EE un ángulo IOE igual á su declinación. Dicha recta OI proporciona el punto i de iluminación del astro observado en el instante de medir su altura. Los diversos paralelos terrestres, por estar situados en

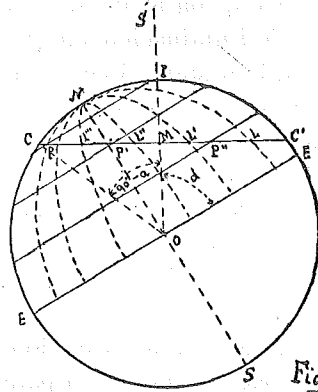


Fig. 21.

planos perpendiculares al eje NS , se proyectarán en la figura según las perpendiculares á ella $Aa A'a' A''a''$, etc.

Aunque para no complicar la figura sólo se indican cuatro paralelos, deben llevarse dibujados de grado en grado todos los de la zona terrestre en la que pueda suponerse se efectuará el viaje, llevándose también dibujados los meridianos de grado en grado, los cuales se proyectarán según elipses.

Determinada la altura a del astro observado, para fijar en el ábaco el círculo de iluminación en que se encontraba el globo en el momento de medirla, le bastará al aeronauta trazar (si no lo estaba, pues, en general, figurará ya en el ábaco) la recta OI que forme el ángulo $EOI = d \equiv$ declinación del astro observado, con el ecuador EE ; y á partir del punto I medir en uno ú otro sentido sobre el meridiano $NA...E$ un arco igual á $90^\circ - a$, con lo cual determinará el punto C ó el C' de dicho círculo, y como éste se encuentra en un plano perpendicular á la recta CI , la perpendicular CC' á dicha recta será en la figura el círculo de iluminación buscado.

Obtenidas en la forma dicha las rectas OI y CC' , veamos cómo utiliza el ábaco el aeronauta para alcanzar el objeto que persigue de situar su globo en el plano.

Por de pronto, puesto que su cronómetro marca el tiempo sideral de Greenwich, podrá conocer la hora sideral T de la observación, y por el Nautical Almanac el valor de la ascensión recta del astro AR ; siendo, pues, conocido el valor $AR - T$, ó sea la longitud del punto L , ó lo que es lo mismo, la del meridiano NAE , con lo cual podrá situar en el plano el meridiano correspondiente al punto de iluminación. Hecho esto, por la intersección en el ábaco, del círculo CC' con los diversos paralelos (puntos $P, P', P''...$), ó con los distintos meridianos (puntos $L, L', L''...$), cuyas longitudes respecto al meridiano NAE para los primeros, ó cuyas latitudes para los segundos podrá deducir de la figura, situará en el plano dichos puntos, y unidos por una curva continua (un círculo si el plano es estereográfico), le proporcionará en él la línea ó curva de altura correspondiente al momento de la observación. Sobre esta curva se determinará por tanteos el punto en que su normal forma con el meridiano un ángulo igual al azimut hallado, y éste será el punto donde se encuentra el globo.

Este procedimiento, empleado en la forma expuesta, exigiría el uso de un ábaco análogo á la figura, hecho en gran tamaño (de 90 á 100 centímetros de radio), si se quiere obtener la aproximación conveniente al apreciar las longitudes de los puntos P, P' , etc. ó las latitudes de las L, L' , etc. que sirven de base para la resolución del problema, por cuya

razón, y con el objeto de simplificar el trazado en el ábaco, del círculo de iluminación que corresponda al astro visado, hemos introducido en el procedimiento que queda descripto varias modificaciones y simplificaciones que á continuación se detallan.

Si se considera en el ábaco el triángulo rectángulo OOM , se ve que en él:

$$OM = OC \cos COI = OC \cos (90^\circ - a) = OC \operatorname{sen} a.$$

de modo que si en un papel transparente ó en una hoja de talco (fig. B) se tienen dibujadas dos rectas perpendiculares, y á partir de su punto de encuentro se toman sobre una de ellas los valores de los senos de los di-

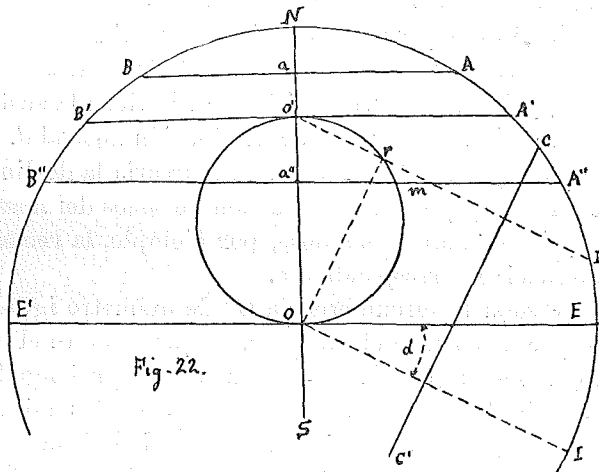


Fig. 22.

versos ángulos, cuyo radio sea el del ábaco, desde 0° á 90° , creciendo de grado en grado, para determinar la posición del círculo de iluminación que corresponde á una altura a del astro, bastará colocar el nomograma transparente sobre el ábaco, orientándolo de modo que la graduación de senos quede sobre la recta que en él indique la declinación del astro, haciendo coincidir la división que corresponde al seno de la altura a con el punto O , en cuyo caso la recta del nomograma perpendicular á la graduada, marcará el círculo de iluminación correspondiente, permitiendo determinar los puntos $P, P' \dots$ ó los $L, L' \dots$, de intersección con los paralelos ó los meridianos del ábaco, y como en éste se llevarán de antemano trazadas las rectas que corresponden á las declinaciones de los diversos astros observables, el empleo del nomograma transparente resulta cómodo y sencillo.

Con objeto de disminuir, sin perjuicio de la exactitud, las dimensiones del ábaco (fig. 22), y teniendo en cuenta que, partiendo de cualquier

punto de Europa ó de la América del Norte, no es fácil ni probable que el globo en su viaje se salga de la zona terrestre limitada por los paralelos AB , de latitud 60° , y $A'B'$, de latitud 30° , trataremos de resolver el problema con el trozo de ábaco proyectado en AA, aa , con lo cual, conservando la misma escala para su trazado, y, por consiguiente, igual aproximación en las mediciones gráficas, se reducen considerablemente las dimensiones del mismo. Veamos cómo se consigue este resultado.

Para ello es preciso: primero, sustituir el punto O por otro que quede dentro de la figura AA, aa, BB , eligiendo como nuevo punto el O' de intersección del paralelo $A'B'$, de latitud 45° , intermedio entre los que limitan la zona de navegación probable, y la recta NS . De este modo se podrá prescindir en el ábaco de los segmentos del círculo BNA y ASB , reduciendo el ábaco total por de pronto á la parte AA, BB , de dimensiones mucho menores, conservando la escala de la figura.

Comencemos, primero, por ver qué influencia tiene la sustitución dicha para la observación de un astro de declinación austral d .

Disponiendo del punto O , la recta OL marcaría la declinación d del astro, y sobre ella se apoyaría la graduación de senos del nomograma en la forma ya explicada, determinándose, por ejemplo, la recta CC como círculo de iluminación correspondiente.

Supóngase trazada la circunferencia O'' de diámetro igual al desplazamiento OO' que ha sufrido el punto O , y que se corre el nomograma sobre el ábaco, de modo que la recta CC' de aquél (prolongada si es preciso) siga cortando la circunferencia $NESE'$ en los mismos puntos C y C' , hasta que la graduación de senos (que se habrá movido paralelamente á sí misma) pase por el O' , determinando la recta $O'I'$ paralela á OI ; en este movimiento, el punto del nomograma que coincidía con el O (que era la división correspondiente al seno de a), caerá en un cierto punto r , el cual, por ser recto el ángulo OrO' , estará precisamente sobre la circunferencia $O'mO$, y en el trozo de arco $O'mO$ para todos los astros de declinación austral, visibles desde la zona AA, BB .

En vista de lo expuesto, lo que habrá que hacer en este caso de astros de declinación austral, para prescindir del punto O y emplear el O' , será: llevar dibujados en el ábaco AA, BB , el trozo de arco $o'm$; llevará asimismo dibujadas en él las rectas análogas á la $O'I'$, que indican las declinaciones australes de los astros que convenga observar; apoyar sobre la correspondiente al astro observado la graduación de senos del nomograma transparente; *pero en lugar de hacer que coincida con O' la división que á la altura del astro corresponda, establecer dicha coincidencia con el punto de intersección de $O'I'$ con el arco $o'm$* . La recta no graduada del nomograma proporcionará entonces, según se ha demostrado, el círculo de

iluminación correspondiente á $C C'$, y los puntos $P, P', P'' \dots$ ó los $L, L', L'' \dots$ necesarios para el resolver el problema.

Segundo, si se supone que se trata de un astro de declinación boreal (figura 23), al aplicar el procedimiento indicado en el caso anterior, resul-

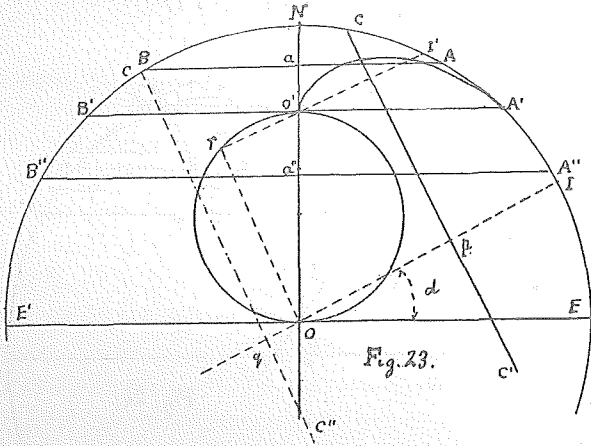


Fig. 23.

tará para el punto r posiciones comprendidas en el arco $O' r O$, y, por consiguiente, inadmisibles, puesto que caen fuera del trozo de ábaco $A A$, $a a$, que es el que en definitiva se desea utilizar. Si en el nomograma transparente se tiene trazada una recta $C' C''$, paralela á $C C$, distando de ella una longitud $p g = O O'$, y se corriese dicho nomograma (ya preparado y dispuesto sobre la recta $O' I'$ para determinar el círculo de iluminación $C C$), la cantidad $p g = O O'$ de tal modo, que la recta $O' I'$ siguiera pasando por O' ó I' , la $C' C''$ vendría á ocupar exactamente la posición de $C C$, y á determinar, por lo tanto, el círculo de iluminación del astro observado; pero al hacer dicho corrimiento, el punto r habrá ido á caer en r' , sobre la recta $O' I'$ y distando de r la cantidad $p g = O O'$, situándose sobre la curva (1) $O' M r' A'$, trazada haciendo girar la recta $O' I'$ alrededor de O' , y tomando sobre cada una de las posiciones de ella, y á partir de su punto de intersección con el arco $O' O r$ cantidades iguales á $O O'$.

Por consiguiente, si en el ábaco $A A, B B$ se tiene trazada en la forma dicha la curva $O' M A$, y en el nomograma la recta $C' C$ se comprende fácilmente por lo expuesto cómo se deberá operar para situar el círculo de iluminación correspondiente á un astro de declinación boreal.

Bastará para ello colocar el nomograma sobre el ábaco, de modo que su graduación de senos coincida con la recta $C' I'$ que marca la declina-

(1) Esta curva es la llamada *cardioide*.

ción, y que el seno que corresponda á la altura leída caiga sobre el punto de intersección de $O' T'$ con la curva $O' M A'$, con lo cual, la línea $C' C$ determinará el círculo de iluminación.

Con las modificaciones expuestas ha quedado el ábaco total reducido (figura 24) al trapecio mixtilíneo $A A, B B$, provisto de los meridianos

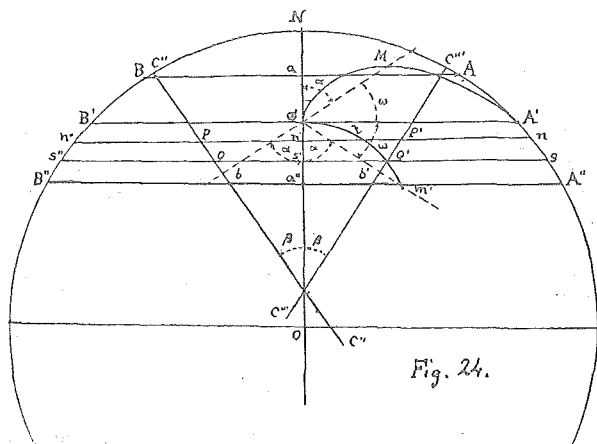


Fig. 24.

y paralelos correspondientes de grado en grado, de las rectas que marcan las declinaciones y de las curvas $O' M A'$ y $O' t m$, cuyos trazados, objeto y empleo queda ya conocido; pero se desea emplear únicamente la mitad derecha de dicho ábaco, ó sea la $A A, a a$, y como puede suceder (como ocurre en la figura, tratándose de astros de declinación boreal) que el círculo de declinación correspondiente al astro observado, determine puntos como el p y q , que quedan en la mitad izquierda de ábaco, por estar el globo en un meridiano que forme un ángulo mayor que 90° con el del astro, hay que ver qué debe hacerse en este caso, para poder operar en él con sólo la mitad derecha de la figura.

Supóngase doblado el ábaco por su eje de simetría de tal modo, que la parte derecha se superponga á la izquierda. De esta manera, cada paralelo coincidirá con su prolongación, y cada trozo de meridiano con otro de la otra mitad de la figura que tendrá su longitud suplementaria de la del primero con relación al meridiano del astro; por esta razón en el ábaco (fig. B), dibujado á escala $\frac{1}{5}$ del que se emplea en el globo, van dos escalas de longitudes para los meridianos, una sobre el paralelo $A a$, que da las longitudes de los de la mitad derecha respecto al $N A E$ del astro, y otra sobre el paralelo $A a$ correspondientes á las longitudes, con relación al meridiano citado, de los de la mitad izquierda, abatidos en la forma referida sobre los de la mitad derecha.

Al hacer el mencionado abatimiento, los puntos P y Q habrán venido á caer sobre sus simétricos P' y Q' , los cuales estarán sobre una cierta recta $C''' C'''$, simétrica de la $C'' C''$ con relación á la $a a''$ que sirvió de eje para el abatimiento.

Veamos cómo puede resolverse el problema en el caso indicado en la figura, con sólo el ábaco $A A''$, $a a''$ y el nomograma transparente ya conocido.

Si el punto de iluminación del astro visado es, por ejemplo, el i (de declinación boreal, pues para los de declinación austral basta siempre la mitad derecha del ábaco), y su círculo de iluminación determinado en la forma ya sabida, resulta ser el $CO C''$; es evidente que, trazando la recta $C''' C'''$, simétrica de la $C'' C''$ respecto á la $a a''$, dicha recta $C''' C'''$ proporcionará los puntos $P' Q'$, simétricos á los $P Q$ por su intersección con $n' n$, $s' s$, simétricos de $n'' n'$ y $s'' s'$, respectivamente, debiendo leerse las longitudes correspondientes á los puntos $P' Q'$ en la graduación de que va provisto el paralelo $A a$ del ábaco. Ahora bien, para no tener que trazar la recta $C''' C'''$ en cada caso particular, basta fijarse en lo siguiente: Si en el $A A'' a a''$ se tienen trazadas de antemano por el punto O' , no sólo las ábaco rectas análogas á las $O I$ que marcan las declinaciones boreales de los astros que pueden ser objeto de observación, sino sus simétricas como la $O' I'$ con relación al paralelo $O' A'$, podrán utilizarse dichas declinaciones simétricas para determinar con solo el nomograma, la recta $C''' C'''$ buscada. En efecto, si al emplear en la forma ya conocida el nomograma, se ve que el correspondiente círculo de iluminación $C'' C''$ no corta á los paralelos ó meridianos del trozo de ábaco conservado $A A''$, $a a''$, bastará fijarse en la división de la graduación de senos del nomograma que coincide con el punto O' y hacer girar á aquél de modo que dicha división siga coincidiendo con O' ; pero estableciendo á la vez la coincidencia de la graduación de senos con la recta $O' I'$, simétrica de la de declinación $O I$ del astro observado, respecto á $O' A'$, con la cual, la recta roja $C'' C''$ del nomograma tomará precisamente la posición $C''' C'''$ deseada y determinará los puntos P' y Q' , que, como se dijo, suplen á los P y Q .

Creemos que el método que proponemos presenta sobre el de Mr. Favé las ventajas siguientes:

Mayor facilidad de construcción de los gráficos.

Menor número y tamaño de los que hay que llevar para una misma aproximación.

Mayor rapidez de empleo, sobre todo empleando para trazar el círculo de iluminación un mapa estereográfico, bastando entonces determinar tres puntos y trazar el círculo que pase por ellos.

Poderse emplear con estrellas que aparezcan á cualquiera altura,

mientras que el de Mr. Favé no es aplicable más que á las estrellas cuyas alturas correspondan á los círculos que se tienen trazados.

Tener menos causas de error.

Poderse emplear para cualquier astro conociendo su ascensión recta y declinación, pues bastará trazar la recta correspondiente, mientras que con el método de Mr. Favé habría que calcular *à priori* la tabla de azimutes y alturas para el punto central.

Poderse emplear en las dos zonas terrestres comprendidas entre los paralelos 60° y 30° Norte ó Sur, en lugar de limitarse su empleo directo á la parte comprendida por el mapa circular transparente de Mr. Favé.

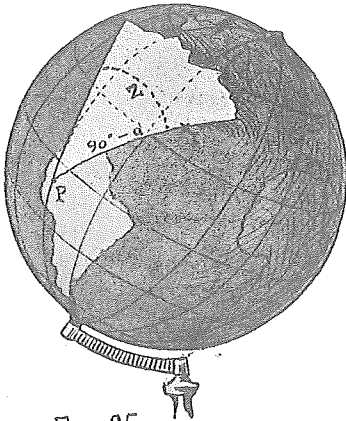


Fig. 25.

Para facilitar el trazado de las rectas correspondientes á la declinación de cada astro, en el borde del ábaco se han dibujado unas escalas con divisiones de grados que corresponden á los ángulos que formen con la $O' A'$ las rectas de declinación. Los signos que figuran en los extremos de estas escalas indican las declinaciones máximas Norte ó Sur que pueden alcanzar el Sol, la Luna y los Planetas observables.

Además, figura al margen una lista de las ascensiones rectas de las estrellas cuyas rectas de declinación están trazadas para evitar el tener que consultar el Nautical Almanac al hallar la longitud del meridiano de proyección.

Veamos ahora otro procedimiento gráfico que se puede seguir:

Si se llevara una esfera terrestre á bordo, se podría determinar el punto más rápidamente, aunque con menor aproximación, construyendo un ángulo de papel del mismo valor que el azimut del astro y tomando en uno de sus lados una magnitud igual al arco de la esfera, cuyo ángulo fuera complementario de la altura verdadera. Si colocamos el extremo de este lado sobre el punto de iluminación, y hacemos girar el papel alrededor de este punto hasta que el otro lado coincida con un meridiano, el vértice señalará la posición del punto en que se está (fig. 25).

Si el astro estuviese próximo á su paso por el meridiano, se puede tomar su altura a y añadirle una corrección $C = 2 \cos \varphi \cos d \operatorname{ver} H \sec a$, en la que φ y H son la latitud y horario que se suponga aproximadamente tengan el globo y el astro. Una vez obtenida la altura corregida a , se calculará la latitud $= 90^\circ - a' - d$. Por este procedimiento, llamado

de alturas extrameridianas, no es posible calcular la longitud. En las ya citadas Tablas Náuticas, de Mendoza, se encuentran medios para obtener de un modo sencillo el valor de C en cada caso.

II. Para evitar el empleo de los ángulos azimutales verdaderos, difíciles de averiguar, como ya se ha dicho, por la poca precisión de los aparatos para medirlos, y por no conocerse con exactitud la declinación magnética del lugar, cuando sólo haya un astro observable es preferible operar con él por observaciones sucesivas.

Los métodos de esta clase, más apropiados á la navegación aeronáutica, son: el de alturas sucesivas, alturas meridianas y alturas circunmeridianas.

El primero consiste en determinar el punto conociendo dos alturas a y a' , sucesivas de un astro, y la hora sideral de Greenwich de cada una de ellas, T y T' (fig. 30).

Si el globo hubiese permanecido fijo desde una á otra observación, ó con un camino recorrido despreciable, y suponiendo constantes las coordenadas del astro, podríamos resolver el problema analíticamente del modo siguiente: Siendo S y S' las dos posiciones del astro, Z el cenit y P el polo elevado, podremos resolver el triángulo esférico $SS'P$, del que conocemos PS y PS' , iguales á $90^\circ - d$, y el ángulo SPS' , igual á $T' - T$, y hallar el valor de $SS'P$ y del lado SS' . Con estos datos se obtendría el ángulo $SS'Z$ (resolviendo este triángulo, del cual se conocerían ya los tres lados), y restándole del $SS'P$, hallaremos $P'S'Z$, que nos permitirá calcular el lado $PZ = 90^\circ - \varphi$ y $S'PZ = H'$, del que obtendremos la longitud $L = T' - (AR - H)$. Este procedimiento, demasiado largo para usarlo á bordo, se complica todavía más cuando el globo recorre un cierto camino entre las dos observaciones. En este caso es más recomendable el empleo del método Sumner, que consiste en lo siguiente:

Si se conocen las latitudes de dos paralelos entre los cuales se navegue, se calcularán las longitudes de los puntos de intersección de estos paralelos con los círculos de iluminación correspondientes á las dos alturas medidas, y si la distancia entre los dos paralelos no es muy grande, las rectas que unan los puntos de intersección podrán suplir, con poco error, á los arcos de dichos círculos. Tomando á partir de un punto del primero, y en la dirección del rumbo que se haya tenido entre las dos observaciones, una magnitud igual al camino recorrido, y trazando una paralela á la recta que representa á dicho primer círculo, su intersección con la segunda será la posición (fig. 26).

Si el camino recorrido fuese cero, la intersección de las dos rectas de iluminación será la solución.

Para hallar las longitudes de los puntos de intersección de las rectas de iluminación con los paralelos, se calcula el horario para cada punto por la fórmula llamada de Mendoza, calculable por medio de los logaritmos que figuran en sus tablas náuticas. Esta fórmula es:

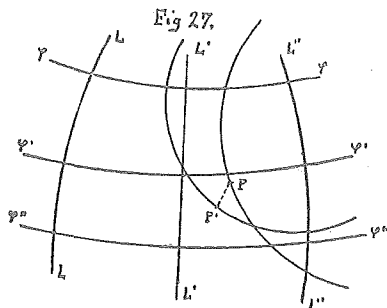
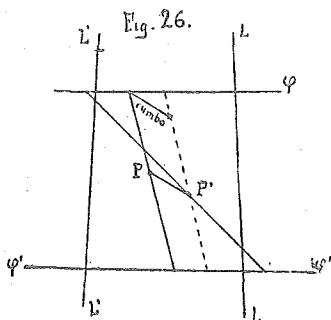
$$\text{ver } H = \cos \frac{1}{2} S \text{ sen } D \text{ sec } \varphi \text{ cosec } \Delta$$

En la que H es el horario del astro,

Δ la distancia polar referida al polo elevado $= 90^\circ - d$, φ la latitud del paralelo que se considere, $S = a + \Delta + \varphi$ y $D = \frac{1}{2} S - a$.

Estos horarios se pueden obtener por medio de ábacos especiales para cada astro en que se pueden determinar éstos, conociendo la latitud y la altura. Las longitudes correspondientes serán: $L = T - (AR - H)$.

Para que este método sea aceptable, es necesario que la altura del astro sea inferior á 22° ; que no esté próximo al meridiano; que la diferencia entre las latitudes de los paralelos que comprenden el punto sea la menor posible, y que entre una observación y otra pase el mayor tiempo



que se pueda, siempre que se conozca bien el camino recorrido y el rumbo seguido entre ellas.

Para resolver el problema gráficamente, se pueden hallar las posiciones de los dos círculos de iluminación por los procedimientos estereográficos ú ortográficos ya descriptos, y hallar los puntos de ellos cuya distancia entre sí, sea igual en magnitud y dirección al camino recorrido y rumbo entre las observaciones (fig. 27).

Cuando se conozca la región por donde se navega, se puede precisar el punto aplicando el método gráfico de las rectas de altura ó de iluminación, ideado por Mr. de la Baume Pluvinel. Este método es análogo al de Mr. Favé, descripto anteriormente, y sólo se diferencia de él en que el radio del mapa circular es de 200 kilómetros solamente y los círculos de iluminación están sustituidos por rectas.

Por medio de ábacos ó tablas análogas á las que se emplean en el método Favé, se halla el azimut y la altura del astro visto desde el punto central del mapa en el momento de la primera observación, lo que nos permitirá trazar la recta de altura que pasa por el punto central, que será perpendicular á la dirección del astro marcada por el azimut.

La recta de altura en donde estuviese el globo en la primera observación, será paralela á la que tendremos trazada y distará de ella una magnitud igual al número de grados de diferencia entre la altura calculada que den las tablas y la observada, con lo cual podemos trazarla en el mapa.

Una vez conocida esta primera recta de altura, se trazaría, á partir de un punto cualquiera de ella, una magnitud igual al camino recorrido, con un ángulo con el meridiano igual al rumbo que se haya seguido entre las dos observaciones, y por el extremo de ésta, una paralela con la recta de altura hallada. La intersección de esta paralela con la recta de altura correspondiente á la segunda observación, que trazaríamos del mismo modo que la primera, nos daría el punto buscado, en el cual estaría el globo en el momento en que aquélla se hubiese efectuado.

Este procedimiento, aunque presenta los inconvenientes del de monsieur Favé, y el de no ser aplicable á largos viajes, puede ser práctico para ascensiones de poca longitud por su sencillez y suficiente aproximación.

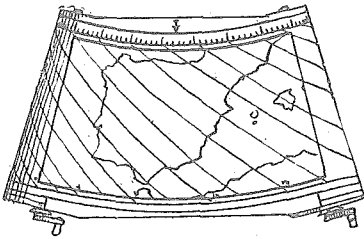
Otro procedimiento gráfico muy sencillo de emplear, aunque algo difícil de construir, consistiría en colocar sobre un mapa en proyección cónica polar del terreno que se recorre, una hoja transparente donde estuviesen trazadas las proyecciones cónicas de los círculos de altura correspondientes á una de serie de ellas, y un astro dado, cuya hoja pudiera girar en el sentido de los paralelos del mapa, con lo cual, las curvas de altura podrían tomar la posición correspondiente á cada hora sideral que señalaría un índice fijo en el mapa sobre una escala de horas dibujada en la hoja transparente. De este modo no habría más que correr la hoja transparente hasta que el índice marcase la hora sideral de la primera observación y tendríamos la primera curva de altura; corriendo la hoja hasta la hora de la segunda observación, tendríamos la otra curva, y la intersección de ambas sería la posición del globo si éste hubiese permanecido fijo. Si se hubiese movido, se tendría en cuenta el camino recorrido del mismo modo que en los procedimientos anteriores (fig. 28).

Finalmente, con una esfera terrestre bastaría trazar con un compás y del modo que ya sabemos, los dos círculos de altura correspondientes á las dos observaciones, y por su intersección, si el globo hubiese perma-

cido fijo, ó del modo ya explicado si se hubiese movido, se determinaría el punto (fig. 29).

El método de alturas meridianas consiste en tomar una serie de alturas sucesivas de un astro, que se crea próximo á su paso por el meridiano, hasta que se note que empieza á decrecer (ó á aumentar si se tra-

Fig. 28.



tase de un paso inferior de una estrella circumpolar); la altura máxima corresponderá al paso por el meridiano, y de ella podremos deducir la latitud por la fórmula

$$\varphi = 90^\circ - a + d.$$

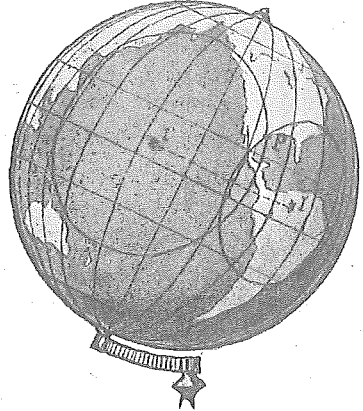
Por la hora sideral T á que ocurra esta altura máxima, se podrá averiguar la longitud, puesto que $L = T - A R$.

Este procedimiento da la latitud con mucha aproximación, por variar muy poco las alturas al paso del astro por el meridiano; en cambio puede dar error en la longitud, por no corresponder la hora de la altura máxima observada con la exacta del paso; por lo tanto, se usará preferentemente cuando se tenga más interés en determinar la latitud que la longitud, ó sea cuando se sepa que el rumbo es Norte-Sur y se conozca un punto de paso anterior, ó bien cuando el mar ó zona peligrosa tuviesen sus costas ó límites coincidiendo aproximadamente con paralelos terrestres en las proximidades del lugar donde se navega.

Si se operase con la Polar, el error en longitud podría ser demasiado grande; en cambio las lentas variaciones de la altura permiten un gran espacio de tiempo durante el cual la altura medida puede, sin error apreciable, considerarse como meridiana.

Si lo que se quisiera obtener con más exactitud fuese la longitud, conociendo aproximadamente la latitud, puede emplearse el método de alturas circunmeridianas ó de Littrow, que consiste en tomar dos alturas de un astro que comprenda el paso por el meridiano, procurando que sean

Fig. 29.



lo más próximas posible, para que no influya el movimiento del globo entre una y otra.

Llamando a y a' las alturas observadas, H y H' los horarios correspondientes, d la declinación y φ la latitud estimada del lugar, por medio de la fórmula:

$$\text{sen } \frac{1}{2} (H + H') = \text{sen } \frac{1}{2} (a' - a) \cos \frac{1}{2} (a' + a) \text{ cosec } \frac{1}{2} (H' - H) \sec \varphi \text{ sec. } d$$

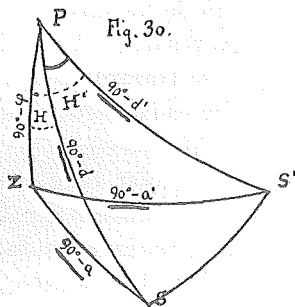
podemos obtener el horario medio correspondiente á la hora T , intermedia á las de las observaciones. De aquí podemos deducir la longitud L de la fórmula conocida

$$L = T - A R + \frac{1}{2} (H' + H).$$

El término $H' - H$ del segundo miembro es conocido, por ser el tiempo transcurrido entre las dos observaciones.

Este procedimiento es más aplicable en los casos contrarios á los del anterior, ó sea cuando el globo marcha según un paralelo que aproximadamente se conozca, ó cuando las costas ó límites peligrosos estén según meridianos.

Observaciones con dos ó más astros. — Por los inconvenientes que ya se han citado, prescindiremos de los métodos que pudieran seguirse midiendo los azimutes verdaderos que solamente deberán emplearse en el caso en que haya un solo astro observable y no sea posible emplear las observaciones sucesivas. Por lo tanto, sólo estudiaremos los procedimientos que se seguirán cuando se conozcan: 1.º, las alturas simultáneas de dos astros; 2.º, la altura de uno de ellos y el ángulo que forma el arco de círculo máximo que los una, con un vertical, y 3.º, los ángulos que forme este mismo arco de círculo máximo con los dos verticales correspondientes á los dos astros.



I. En el primero, ó sea dadas las alturas simultáneas de dos astros, se puede resolver el problema analíticamente por medio de las fórmulas de la trigonometría esférica.

Siendo S y S' los dos astros (fig. 30) y Z y P el cenit y polo elevado del lugar, resolveremos el triángulo $SS'P$, del cual se puede tener calculado *à priori* el valor del ángulo $PS'S$ y el lado SS' . Con estos datos, y resolviendo el triángulo $ZS'S$, calcularemos el ángulo ZSS' y el ZSP , que es su diferencia con el $PS'S$. Este ángulo ZSP , junto con los valo-

res de los lados ZS y PS , que son, respectivamente, los complementos de la altura y declinación de S , nos permitirán calcular el triángulo ZPS , su ángulo H , horario de S , que es SPZ , y el lado ZP , igual al complemento de la latitud. Con estos datos ya se puede resolver el problema como en los casos anteriores, puesto que

$$\varphi = 90^\circ - PZ \quad \text{y} \quad L = T - AR + H.$$

Este cálculo, aun simplificado por el empleo de los logaritmos, sería demasiado largo para ser efectuado á bordo, por lo cual será preferible adoptar uno de los procedimientos siguientes que, aunque de menor exactitud, son de uso más cómodo y rápido.

El procedimiento Summer es también aplicable á este caso, con sólo calcular por su fórmula ó por ábacos las longitudes de los puntos de intersección de las rectas de altura de los astros observados, con los paralelos entre los cuales se sopa que navega el globo.

El método Favé, el de gráficos ortográficos y el de las rectas de alturas ó de la Baume Pluvinel, resuelven el problema con gran facilidad, pues basta con determinar los dos círculos de iluminación correspondientes á los dos astros observados del modo que ya sabemos, y hallar su intersección.

Lo mismo se procederá empleando el mapa de proyección cónica polar ya descrito, si se tiene dibujadas en la hoja transparente las curvas de altura de los dos astros.

Para resolver el problema gráficamente por medio de una esfera terrestre, se trazarán con un compás de radio igual al complemento de la altura de cada astro, y haciendo centro en el punto de iluminación respectivo, los dos círculos de altura que en su intersección nos darán la posición del globo. Este medio empleado por primera vez por el Capitán de la Marina mercante española, D. Justo Oginaga, fué descrito en el MEMORIAL DE INGENIEROS del año 1883 por el hoy Coronel del Cuerpo, Jefe del Servicio Aerostático, D. Pedro Vives y Vich.

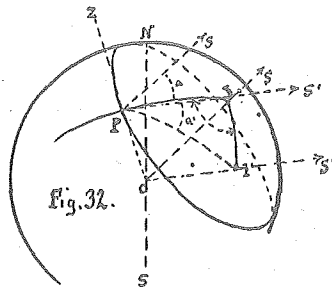
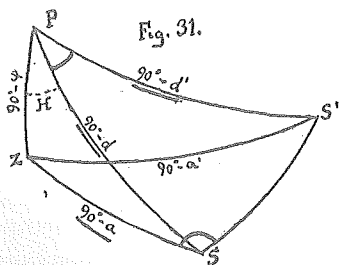
Los procedimientos gráficos empleando la esfera terrestre, aunque son muy sencillos en su empleo, tienen el inconveniente de exigir se lleve á bordo una esfera de gran tamaño, si se quiere tener un grado de aproximación aceptable, por lo cual no son usados en la navegación aeronáutica.

Hay que tener en cuenta, tanto para este caso como para los anteriores en que se resuelve el problema por la intersección de dos círculos de altura, que los dos puntos en que se cortan siempre estos círculos corresponden uno á la solución verdadera, y el otro á la que resultaría si las posiciones de los astros apareciesen invertidas en su orden de Este á Oeste,

conservando las mismas alturas. Basta un ligero examen para saber cuál de estos puntos de intersección es el que da la solución verdadera.

En todos estos métodos, excepto en el analítico que se complicaría demasiado, se puede resolver el problema también cuando las alturas no son simultáneas, haciendo lo que se ha explicado para caso de observaciones sucesivas de un solo astro, cuando el globo efectúa un cierto camino recorrido entre una y otra.

II. En el segundo caso, ó sea cuando los datos sean la altura de una



estrella S , y el ángulo que forma con su vertical el arco de círculo máximo que la une á otra s' ($S' S Z$), (fig. 31), puede también resolverse el problema analíticamente del modo siguiente:

A priori se llevará resuelto el triángulo $P S S'$ (del que son conocidos dos lados $P S = 90^\circ - d$ y $P S' = 90^\circ - d'$, y el ángulo comprendido $S P S' = A R' - A R$) y calculado el ángulo $P S S'$. Si se resta este ángulo del $Z S S'$, obtendremos el $P S Z$. Si tomamos ahora un ángulo auxiliar n , tal que $\cos n = \frac{\cot Z S}{\cos P S Z}$ tendremos:

$$\cotg H = \frac{\cotg P S Z \operatorname{sen} (P S - n)}{\operatorname{sen} n} = \frac{\cotg P S Z \cos (d + n)}{\operatorname{sen} n}$$

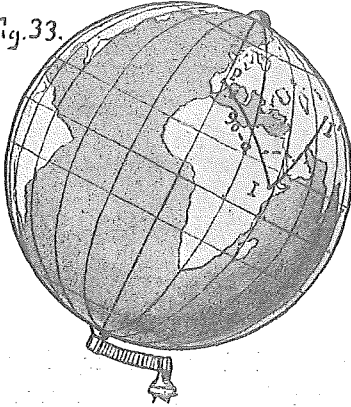
y

$$\cos \varphi = \operatorname{sen} P Z = \frac{\operatorname{sen} P S Z \cos a}{\operatorname{sen} H} \quad , \quad L = T A R + H.$$

Para resolverlo gráficamente habría que trazar el círculo de altura correspondiente al astro cuya altura se conoce, y hallar su intersección con el círculo máximo que, pasando por su centro, formase con el meridiano de este punto un ángulo igual al observado menos el $P S S'$, por ser este círculo máximo el lugar geométrico de los puntos de la superficie terrestre, desde los cuales el ángulo $Z S S'$ aparecería con la misma magnitud observada (fig. 32).

Con una esfera terrestre se señalarían los puntos de iluminación de los dos astros, se unirían por un arco de círculo máximo y se trazaría otro círculo máximo que, pasando por el punto de iluminación correspondiente al astro cuya altura se conoce, formara con el otro un ángulo igual al observado, y tomando sobre él, á partir del vértice, un arco igual al complemento de la altura, tendríamos el punto pedido (fig. 33).

Fig. 33.



Estos procedimientos tienen la ventaja de producir poco error por cortarse siempre perpendicularmente los dos lugares geométricos que determinan el punto.

Si lo que se conociese fuera el ángulo horario H de la Polar ó la hora sideral local por medio del goniómetro polar, podemos determinar directamente la longitud $L = T - A R + H$ ó $L = T - t$, y si al mismo tiempo medimos la altura a , conoceremos también la latitud φ por la fórmula:

$$\text{sen}(\varphi + n) = \text{sen } a \cos n / \text{sen } d,$$

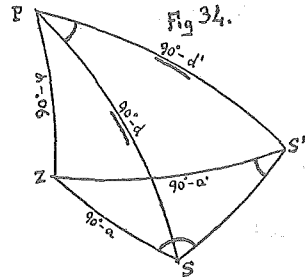
en la que n es un ángulo auxiliar $\text{tang } n = \cot d \cos H$. Los valores de esta fórmula pueden estar calculados en un ábaco en que se obtenga la latitud en función de los argumentos H y a de la Polar. Este es el procedimiento más rápido y sencillo para situarse astronómicamente de noche con cielo despejado hacia el Norte, sobre todo cuando se desee obtener más aproximación en latitud que en longitud.

Si, conocida por este medio la latitud, quisiese el aeronauta rectificar la longitud por medio de otro procedimiento más exacto, puede hacer uso de las tablas ó ábacos que dan, para una estrella determinada, el ángulo horario ó la hora sideral local en función de la latitud y de la altura verdadera.

Monsieur de la Baume Pluvinel y otros matemáticos han calculado varios de estos ábacos para uso de la navegación aeronáutica.

III. Si se conociesen los ángulos $Z S S'$ y $Z S' S$ (fig. 34) que forman los verticales de dos estrellas con el arco de círculo que las une, la resolución analítica sería la siguiente:

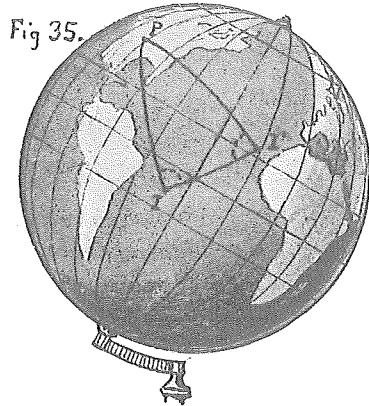
Teniendo ya resuelto el triángulo $P S S'$ y conocido el ángulo $P S S'$, el



$P S' S$ y el lado $S S'$, podríamos resolver el triángulo $Z S S'$, despejar el valor de $S Z$ y con él resolver el $P Z S$, deduciendo el valor de $P Z$ y del ángulo $Z P S = H$, y de aquí la latitud y la longitud del mismo modo que en los casos anteriores.

Sobre una esfera terrestre también se podría resolver gráficamente señalando los dos puntos de iluminación de los dos astros, y los círculos máximos que pasen por ellos formando con el arco que los une un ángulo igual al observado para cada estrella. Las intersecciones de estos dos círculos serán: una el punto buscado y la otra su antípoda (fig. 35).

Para evitar que los dos lugares geométricos se corten con ángulos muy agudos, se procurará que las dos estrellas tengan una diferencia de azimutes próxima á 90° , por lo que en algunos casos convendrá operar con 4 estrellas, determinando los ángulos que formen cada dos con los verticales que pasen por las que satisfagan mejor esta condición, evitándose así el tener que emplear anteojos de campo demasiado grande.



Observaciones generales para los procedimientos de determinación astronómica del punto. Hay que tener en cuenta las siguientes:

1.^a Las observaciones con las estrellas tienen la ventaja de que se pueden tener calculadas para siempre las tablas ó ábacos que den los azimutes, alturas, horarios, horas siderales y demás datos que se necesiten de ellas. En cambio las observaciones con los planetas, el Sol, y, sobre todo, la Luna, obligan á construir estos ábacos ó tablas, especiales para cada día y aun para cada hora.

2.^a Cuando se opera con el Sol, la diferencia $T - A R$, entre su ascensión recta y la hora sideral, es igual á la hora verdadera, y, por lo tanto, se podrán hacer las operaciones sin referirse á la hora sideral, convirtiendo el tiempo medio que marcará el cronómetro en tiempo verdadero, para lo cual se le sumará ó restará la ecuación del tiempo que figura para cada día en las tablas mensuales del Nautical Almanac.

3.^a Siempre que se haga alguna resolución trigonométrica conviene dibujar la figura correspondiente, para tener en cuenta el signo de cada ángulo. Sin esta precaución, y limitándose á aplicar la fórmula, es muy fácil obtener resultados completamente falsos.

4.^a Las longitudes se considerarán positivas al Oeste del meridiano de

Greenwich, los ángulos horarios al Oeste del meridiano del lugar, las ascensiones rectas y los tiempos siderales se contarán á partir del meridiano principal y hacia el Este. Si al calcular las longitudes resultasen mayores de 180° , se contaría su diferencia á 360° , con signo contrario.

5.º Para el cálculo trigonométrico de los elementos anteriores habrá que reducir el tiempo á arco, sabiendo que cada hora equivale á 15° , cada minuto á $15'$ y cada segundo á $15''$. Para la reducción inversa se tendrá en cuenta que $1.^\circ = 4^m$, $1' = 4^s$ y $1'' = 0,067^s$. Sin embargo, utilizando las Tablas Náuticas de Mendoza, no hay necesidad de efectuar esta reducción, porque en ellas los ángulos están expresados en arco y en tiempo.

Determinación magnética del punto.

Navegando entre nubes, con cielo y tierra cubiertos, es imposible determinar el punto por ninguno de los procedimientos anteriores. Para este caso ha propuesto Mr. Moureaux, Director del Observatorio Magnético de Parc Saint-Maur, el empleo de una brújula de inclinación, la cual nos daría el valor de este elemento magnético, y, por lo tanto, conoceremos que el globo se halla en un punto de la curva insóclina, ó paralelo magnético, correspondiente á la inclinación medida.

Por este medio se determinaría la latitud magnética del punto; pero necesitamos conocer otro lugar geométrico, que por su intersección con el conocido nos precise su posición.

Si se conociese la dirección del Norte verdadero, podríamos medir la declinación magnética por medio de una brújula, y determinar así la curva isógona ó meridiano magnético que por su intersección con el paralelo nos dará el punto; pero como esto es imposible con el cielo cubierto, se ha tratado de recurrir á medir la componente horizontal para conocer en qué curva isomagnética se encuentra el globo.

Este procedimiento, aunque se ha tratado de perfeccionar empleando agujas de gran longitud y sensibilidad, provistas de un sistema amortiguador de oscilaciones de hilos radiales de cristal, no ha dado resultado ni creemos llegue á ser práctico, por las razones siguientes:

1.ª Por la poca precisión en las medidas, sobre todo en las de la componente horizontal, que se puede conseguir con los aparatos que se lleven á bordo.

2.ª Por necesitarse mapas magnéticos al día, de la región en que se navegue, hechos con gran exactitud, siendo muy pocos los países que poseen mapas de esta clase.

3.ª Por cortarse bajo ángulos muy agudos, y en muchos puntos, las

líneas isóclinas y las isomagnéticas, que hasta coinciden en algunos trozos, lo que daría muchos errores al determinar el punto de intersección de ellas.

4.^a Por presentar variaciones continuas é irregulares estas líneas, lo que haría muy difícil la construcción exacta de los mapas magnéticos.

5.^a Por no ser conocidas las deformaciones que sufren estas líneas en las diferentes capas de la atmósfera, en función de su altura sobre el terreno.

También se ha propuesto deducir el desplazamiento del globo en la dirección de los paralelos magnéticos midiendo la corriente eléctrica originada por el campo magnético terrestre en un conductor fijo en el globo, pero hasta la fecha no se ha obtenido resultado práctico.

Determinación Mecánica del punto.

Este procedimiento está basado en la tendencia que tiene un giróscopo en marcha á consevar la dirección de su eje de rotación.

Aunque este aparato no está en la actualidad suficientemente perfeccionado para servir para determinar el punto, citamos este procedimiento por creer que no se tardará mucho en emplearle para este fin, por las grandísimas ventajas que presentaría su uso, especialmente en la navegación aeronáutica, en que su funcionamiento no estaría perturbado por movimientos tan bruscos, como en la marítima y terrestre.

Además, hay casos en que ninguno de los anteriores procedimientos es aplicable, y solamente el giróscopo podría dar la solución. Tal sucede en los viajes de exploración en globo por las regiones polares, intentados ya varias veces, aunque sin éxito hasta el presente. En estas regiones, por ser desconocidas, no serán aplicables los procedimientos geográficos más que en muy raras ocasiones; los astronómicos tampoco lo serán, porque efectuándose estos viajes durante el día polar, como época más favorable, no habrá más astros observables que el Sol y algunas veces la Luna; pero siempre muy próximos al horizonte y muy influenciadas sus alturas por la refracción, lo que hará inaceptables las observaciones en la mayoría de los casos; además, las brújulas no nos proporcionarán ningún dato preciso por estar en las proximidades del polo magnético, y por lo tanto, solamente el giróscopo puede darnos la posición geográfica del punto, de suma importancia en este caso: primero, por lo peligroso del viaje y necesidad de conocer qué rumbo habrá de seguirse para buscar un punto de refugio, y segundo, por tratarse de una exploración científica de regiones desconocidas que, sin la determinación de la posición de los puntos conocidos, carecería de valor.

Supongamos un giróscopo en movimiento de rotación, cuyo eje fuese paralelo al eje del mundo, es decir, que al ponerlo en marcha se hubiese

colocado su eje en el plano meridiano é inclinado con la horizontal, y hacia el polo elevado, un ángulo igual á la latitud del lugar.

Según las conocidas propiedades del giróscopo, si, una vez colocado en esta posición, y provisto de una suspensión que permita á su eje tomar una inclinación y dirección cualquiera, se le traslada á otro lugar de diferente latitud geográfica, su eje permanecerá siempre paralelo á sí mismo y, por lo tanto, al eje del mundo, y en cualquier momento seguirá situado en el plano meridiano y formando un ángulo con la horizontal igual á la latitud del lugar que ocupe (fig. 36).

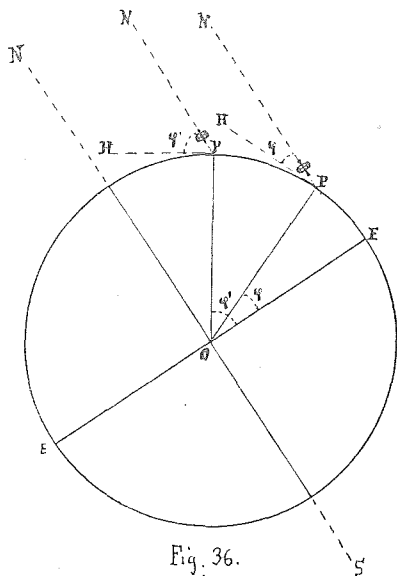


Fig. 36.

ción que la esfera celeste. En este caso, el ángulo que forme con el meridiano será igual á la hora sideral local, y por la diferencia entre esta hora y la de Greenwich, que podremos conocer por el cronómetro, sabremos la longitud geográfica (fig. 37).

Vemos, pues, cómo con dos giróscopos, animados de un movimiento de rotación suficientemente rápido, para que los rozamientos con la suspensión no influyan en la posición de sus ejes, podremos resolver de un modo continuo y sencillo el problema de determinar las coordenadas geográficas del lugar.

Del mismo modo, si lo colocamos con su eje paralelo á la línea de los equinoccios, ó sea apuntando al primer punto de Aries ó Vernal, permanecerá siempre en el plano del ecuador celeste, y girando aparentemente con el mismo movimiento de rota-

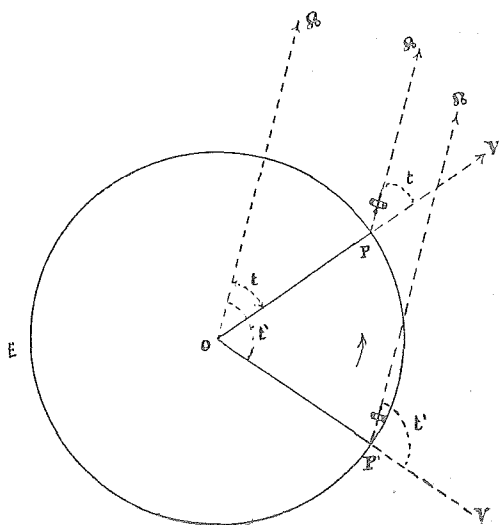


Fig. 37.

Todavía podía hacerse más sencilla la determinación del punto si se emplease una esfera terrestre del diámetro necesario para la exactitud que se desee, y en cuyo interior hubiese dos giróscopos eléctricos, uno de ellos con su eje coincidiendo con el de la esfera, y el del otro perpendicular al primero, y sosteniendo un mecanismo de relojería que hiciese girar á la esfera en la duración de un día sideral y en sentido contrario al aparente de la bóveda celeste. Si se colocasen los ejes de los giróscopos en las posiciones indicadas, y en el punto más alto de la esfera, bajo un índice vertical, el correspondiente al lugar de la observación; si no se trasladase el aparato, la esfera permanecería inmóvil, porque el movimiento de rotación del giróscopo de las longitudes se anularía con el del aparato de relojería, igual y de sentido contrario; pero

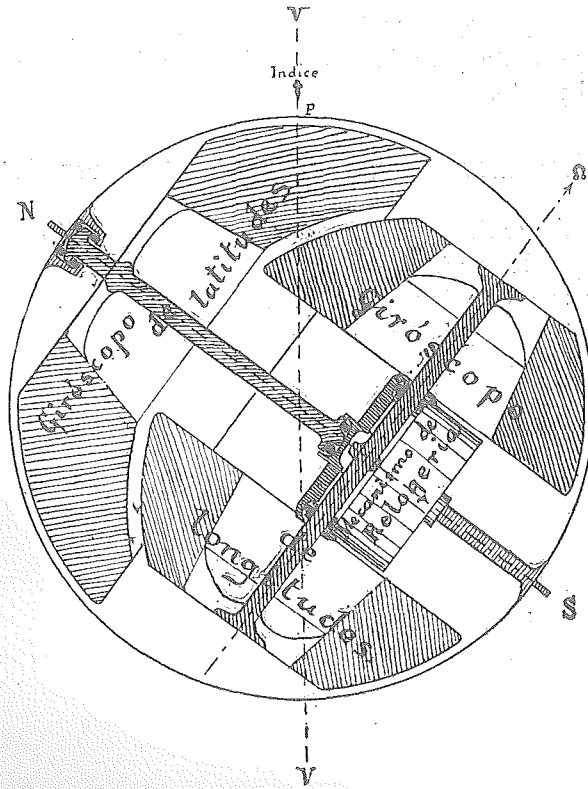


Fig. 38.

si se llevase de un lugar á otro, el giróscopo de latitud haría variar la inclinación de su eje hasta que tuviese un ángulo igual á la latitud del nuevo lugar, y en el punto más alto quedaría uno del paralelo á que se hubiese trasladado el aparato; al mismo tiempo el de longitudes le haría girar alrededor de su eje un ángulo igual á la diferencia entre su movimiento de rotación (que representa la hora sideral local) y el del aparato de relojería (que marca la hora sideral del punto de partida). Esta diferencia es precisamente la que hay entre las longitudes de los dos puntos, y, por lo tanto, quedaría bajo el índice el punto representativo del nuevo lugar en que se estuviera (fig. 38).

Este aparato se podría ir corrigiendo al pasar por puntos conocidos en el terreno, y hasta para mayor comodidad se podría dotar al índice vertical de un estilete gráfico que fuese marcando en la esfera la trayectoria del viaje.

Creemos que de las muchas aplicaciones del giróscopo, cuyo perfeccionamiento va siendo cada día mayor, no sería ésta de las menos interesantes por resolver de un modo automático y continuo un problema tan importante para la navegación aeronáutica, como es la determinación del punto.

Resumen de los procedimientos para determinar el punto.

A continuación insertamos un cuadro de los casos más probables que se pueden presentar, con los procedimientos preferibles para cada uno y los medios más convenientes para emplearlos.

CASOS MÁS PROBABLES

PROCEDIMIENTOS

MEDIOS DE EMPLEO

Tierra visible....	Terreno desconocido.....	{ La tierra no ha sido perdida de vista..... } { La tierra ha sido perdida de vista desde el último punto determinado..... }	Estima, inspección directa.....	{ Cartas de orientación. Compás de marcar. Aparato Rojas. Telémetro. Libro de faros.
			Topomancia, alturas sucesivas del Sol, simultáneas de dos astros, inspección directa.....	{ Repertorio topomántico. Cartas de orientación. Cuadrante de nivel. Cronómetro. Abaco ortográfico. Nautical Almanac. Libro de faros.
	Hay puntos conocidos visibles.....		Marcaciones.....	{ Compás de marcar. Goniómetro. Telémetro.
Tierra invisible..	Cielo despejado	{ De día..... } { De noche.. }	{ Luna invisible } { Alturas sucesivas del Sol, alturas meridianas del Sol..... }	{ Cuadrante de nivel. Cronómetro. Abaco ortográfico. Nautical Almanac.
			{ Luna visible.. } { Alturas simultáneas del Sol y la Luna }	
	Cielo cubierto.....		{ Polar invisible } { Alturas simultáneas de dos estrellas, alturas meridianas de un astro.... }	{ Goniómetro polar. Cuadrante de nivel. Cronómetro. Abaco de correcciones.
			{ Polar visible.. } { Horario, ú hora sideral, y altura de la Polar..... }	
			{ Sobre nubes.. } { Magnético..... }	
		{ Mecánico..... }	Giróscopo.	
		{ Sobre el mar.. } { Estima..... }	{ Compás de marcar. Corredera automática. Potasio.	

SEGUNDA PARTE

Determinación de la derrota.

El 2.º problema que la navegación aeronáutica ha de resolver, ó sea determinar la derrota más conveniente para transportar una nave aérea de un punto á otro del globo, está íntimamente ligado con el de conocer los movimientos probables de la masa aérea en que se ha de efectuar el viaje y los accidentes favorables ó desfavorables que se desarrollarán en ella durante el trayecto.

Aunque las ciencias meteorológicas no han alcanzado hasta el presente el grado de perfeccionamiento suficiente para permitir resolver este problema con completa exactitud, los trabajos de exploración de las distintas capas atmosféricas, que se vienen realizando desde hace algunos años en todos los países civilizados por medio de observatorios y lanzamientos de globos sondas y pilotos, han dado resultados valiosísimos para el desarrollo de la Aerología, siendo posible en la actualidad averiguar antes de emprender el viaje el régimen meteorológico que reinará en la región que se trata de recorrer durante el tiempo que se emplee en el trayecto, si no en condiciones de seguridad, por lo menos con una gran probabilidad de acierto.

Antes de entrar en la resolución del problema de determinar la derrota, estudiaremos ligeramente las principales bases de la Aerología en las que se fundan las reglas generales de predicción del tiempo, en la parte que más afecta á la Navegación aeronáutica. Dividiremos este estudio en tres partes:

- 1.ª Del viento.
- 2.ª Nebulosidad, lluvia, nieve y electricidad atmosférica,
- 3.ª Bases para la predicción del tiempo.

DEL VIENTO.

Se ha convenido en llamar viento al aire en movimiento, movimiento

siempre producido por un desequilibrio atmosférico. Este desequilibrio puede ser originado, directa ó indirectamente, por tres causas principales, que son: el calor solar, la atracción lunar y el calor telúrico, y según la causa á que obedezcan, se han clasificado por el meteorólogo norteamericano Mr. Morris Davis del modo siguiente:

CLASIFICACIÓN DE LOS VIENTOS

ORIGEN DE ENERGÍA	LUGAR DE ACCIÓN	PERÍODO	NOMBRE DE LOS VIENTOS
Calor solar..	Ecuador y polos.....	Permanente...	Planetarios.
	Ecuador térmico y polos.	Anual.....	Terrestres.
	Continentes y océanos..	Anual.....	Continetales.
	Tierra y mar.....	Diurno.....	Brisas de mar y tierra.
	Valles y montañas.....	Diurno.....	Brisas de valle y montaña.
	Local ó indirecto.....	Irregular.....	Ciclónicos.
	Luz y sombra.....	Irregular.....	De eclipse.
	Indirecto.....	Accidental....	De avalancha.
Atracción lunar.....	Mareas.....	{ Dos veces por día lunar... }	Brisas de marea.
Calor telúrico.....	Erupciones volcánicas...	Irregular.....	Volcánicos.

Sucesivamente estudiaremos cada una de estas clases de vientos, y después las modificaciones que sufren en su velocidad ó dirección por el rozamiento con la superficie terrestre ó por el choque con los accidentes orográficos.

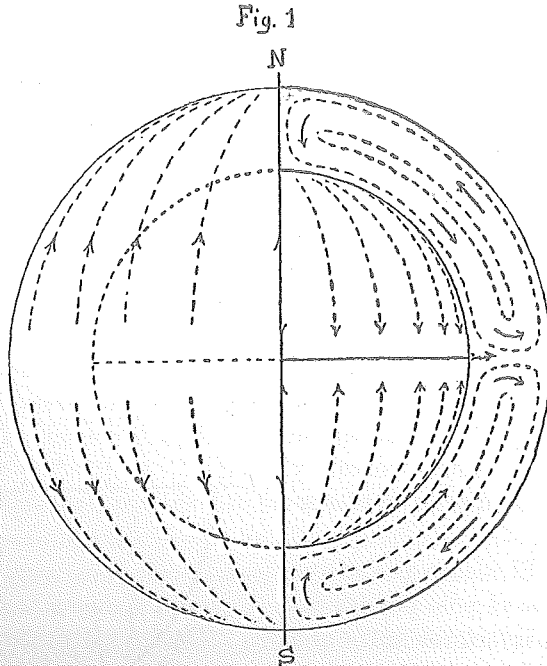
Vientos planetarios.—Si la Tierra fuese una esfera homogénea, fija, cuyo Ecuador estuviese calentado por el Sol y los polos permaneciesen á una temperatura más baja, las capas atmosféricas inferiores, calentadas por radiación del suelo en las proximidades del Ecuador, tomarían un movimiento conveccional ascendente, siendo sustituidas por las capas inferiores de las latitudes próximas más elevadas. Al llegar á las altas

regiones del aire (1) irían en dirección á los polos á llenar el vacío que dejaron las capas que las habían sustituido al originarse su movimiento conveccional ascendente, y repitiéndose indefinidamente estas translaciones se realizaría una circulación general de la atmósfera, ascendente en la región ecuatorial, descendente en los polos y en dirección de los meridianos en las latitudes intermedias, de Ecuador á polo en las capas superiores, y de polo á Ecuador en las inferiores.

En las circunstancias supuestas existiría una zona de bajas presiones, á lo largo del ecuador, y un máximo en cada polo; las líneas isobaras coincidirían con los paralelos, y los gradientes barométricos tendrían las direcciones de los meridianos (figuras 1 y 2).

El movimiento de rotación de la Tierra complica esta circulación general de la atmósfera, pues el viento, al ir del ecuador á los polos en las capas superiores, no sigue la dirección del gradiente ó sea de los meridianos, sino que, por efecto del movimiento de rotación de que está animado, se desvía á la derecha en el hemisferio Norte y á la izquierda en el austral, siendo esta desviación tanto mayor cuanto más alta sea la latitud y menor el rozamiento (ley de Buys-Ballot).

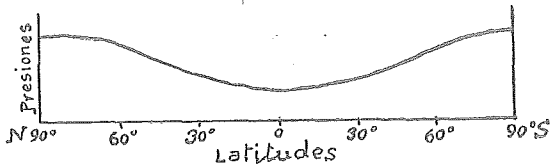
Al llegar á una cierta latitud próxima al polo, la desviación sería tal que la dirección del viento llegue á ser perpendicular al gradiente ó sea W-E., sumándose su velocidad á la de rotación de la Tierra. En estas



(1) Las altas regiones de la atmósfera donde cesa el movimiento ascendente debido á la convección, no constituyen el límite extremo del aire, sino que están determinadas por una altura tal que, al llegar á ellas el aire caliente elevado de las regiones inferiores, pierde su fuerza ascensional por el enfriamiento de la expansión adiabática que sufre en su subida, y, por lo tanto, se equilibra verticalmente

condiciones, la acción de la fuerza centrífuga que se desarrollaría en la masa de aire anularía la condensación debida al enfriamiento por las bajas temperaturas de las regiones polares, y el máximo de presiones que

Fig. 2.

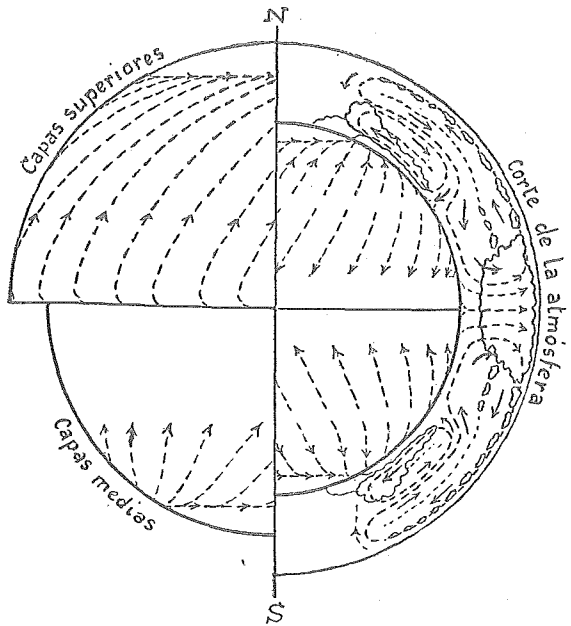


debía existir en cada polo sería sustituido por un mínimo que atraería el viento de las capas inferiores hasta una cierta latitud donde se equilibrarían las atracciones de las bajas presiones

del polo y del Ecuador. En esta latitud se formaría una zona de altas presiones en las que el viento sería descendente, repartiéndose al llegar á las capas inferiores en dos direcciones: una al polo, y otra al Ecuador, inclinándose ambas á la derecha del gradiente (conforme á la ley de Buys-Ballot), en el hemisferio boreal, y á la izquierda en el austral.

El viento que afluye hacia el polo por las capas inferiores sufre una desviación análoga al de las altas regiones, llegando á tomar también una dirección WE. que le produce un aumento

Fig. 3

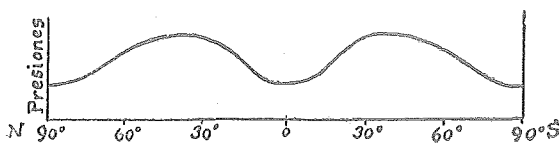


con las capas de aire que le rodean. La masa de aire situada por encima de esta altura no sufre desequilibrios térmicos por no poder calentarse por conveccion y, probablemente, no tendrá otros movimientos que los que por rozamiento les comuniquen los contra-alisios y los debidos á las mareas atmosféricas que deben producirse en ella, aunque este fenómeno no ha podido ser comprobado. La parte de la atmósfera, hasta la altura donde alcanza la acción de la convección, ha sido llamada por Mr. Teisserenc de Bort *troposfera*, y *estratosfera* la restante.

en la fuerza centrífuga y la dilatación consiguiente, cuyas dos causas originan en él un movimiento ascensional y una desviación hacia la zona de altas presiones, adonde llega juntamente con el de las altas regiones, cerrándose así el movimiento circulatorio (fig. 3).

Por lo tanto, en la superficie de la Tierra (siempre supuesta homogénea y esférica), resultarían: tres zonas

de bajas presiones, situadas en el Ecuador y ambos polos, y dos altas presiones en latitudes intermedias simétricas con el Ecuador. Las isobaras coincidirían también con los paralelos y los gradientes con los meridianos, aunque cambiando de signo en el paralelo de las máximas presiones (fig. 4).



En las capas bajas de la atmósfera habría cinco zonas de calmas; de ellas, tres con corriente ascendente (ecuatorial y polares), y dos con corriente descendente en las zonas de altas presiones (tropicales). Entre el Ecuador y la zona de calmas tropicales de cada hemisferio habría vientos del NE. en el boreal, y del SE. en el austral (alisios del NE. ó del SE.), y entre esta zona y el polo respectivo, vientos del SW. y del NW. (alisios del SW. ó del NW.), también según el hemisferio que se considere (fig. 5.).

En las capas intermedias las zonas de calmas estarían en los polos y alrededor del Ecuador, desde la zona Norte de altas presiones, hasta la del hemisferio Sur; esta gran zona de calmas, ó más bien divisoria de vientos contrarios, estaría atravesada por una corriente ascendente en el Ecuador y dos descendentes en los paralelos extremos. Entre esta zona y las de calmas polares habría otras dos de vientos NW. y SW., respectivamente, en los hemisferios Norte y Sur (vientos de retorno), figura 6.

Por último, en las altas regiones de la atmósfera, solamente habría dos zonas de calmas polares con corriente descendente. En el Ecuador el viento ascendente, al llegar á las altas regiones tendría un lento movimiento del E. debido á que, conservando la velocidad tangencial de rotación de la Tierra, habría aumentado de radio y disminuído, por lo tanto, de velocidad angular, lo que le haría aparecer girando en sentido contrario (1). Esta dirección E. se cambiaría en SE. y NE., después en S. y N., y

(1) Este viento del E de las altas regiones ecuatoriales, que citamos por tenerlo en cuenta varios autores, en nuestra opinión ha de ser tan sumamente lento que

por último en SW. y NW. (contra-álisis), inclinándose tanto más al W. cuanto mayor fuera la latitud, hasta ser completamente W. al llegar á

la zona de las calmas polares (fig. 7).

Los vientos que forman esta circulación general son los que reciben el nombre de planetarios, y su existencia está comprobada en la atmósfera terrestre aunque con las perturbaciones debidas á las causas que estudiaremos á continuación.

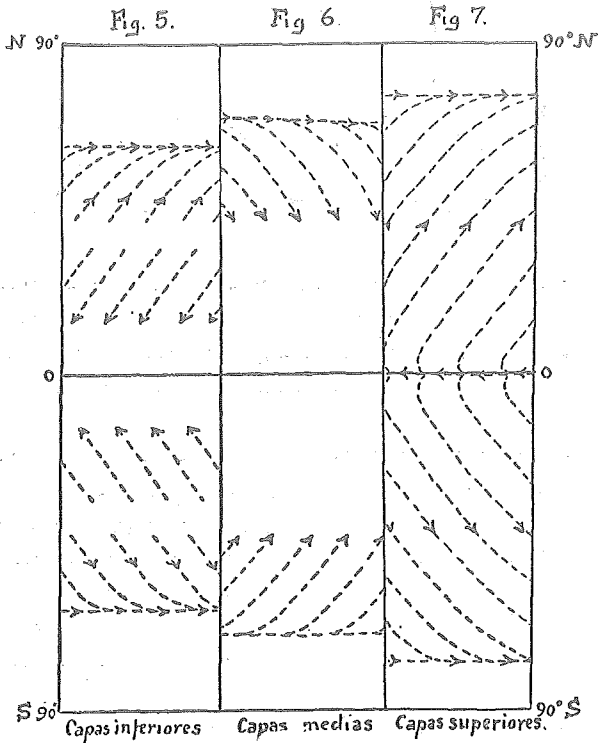
Vientos terrestres.—En la anterior hipótesis hemos supuesto que la parte de la Tierra más calentada por el Sol era el ecuador, ó sea que

el ecuador geográfico coincidiera con el ecuador térmico. Esto sucedería (siempre en la hipótesis de homogeneidad de la Tierra) si el eje de rotación fuese perpendicular al plano de la órbita; pero sabemos que esto no es así, y que, debido á la inclinación del eje de la Tierra con la eclíptica, el máximo de calor solar recorrería dos veces en el espacio de un año una cierta zona simétrica con el ecuador, cuya anchura depende, no sólo de la inclinación del eje terrestre respecto á la eclíptica, sino del

se puede considerar su acción como despreciable, con relación á la velocidad que alcanzarán los contra-álisis. En efecto; siendo r el radio ecuatorial de la Tierra, h la altura á que haya llegado el movimiento ascendente del aire y v la velocidad del viento del E á esta altura, tendremos:

$$v = \frac{2 \pi (r + h)}{24} - \frac{2 \pi r}{24} = \frac{\pi}{12} h = 0,2618 h$$

ó sea 2618 ms., por hora, para 10.000 ms. de elevación.



poder absorbente y emisivo de la superficie terrestre. Esto produciría el efecto de desplazar el ecuador térmico hacia el Norte hasta una cierta latitud N., durante los meses de Abril, Mayo y Junio, hacerle retroceder al Sur hacia la misma latitud en el hemisferio austral durante los seis meses siguientes y volver á moverse hacia el Norte para llegar en Marzo siguiente á coincidir con el ecuador geográfico.

Simultáneamente con este movimiento del ecuador térmico, la temperatura de cada polo se elevaría ó disminuiría según que aquél se acercase ó se alejase. Veamos que influencia tienen estos fenómenos en la circulación general de la atmósfera.

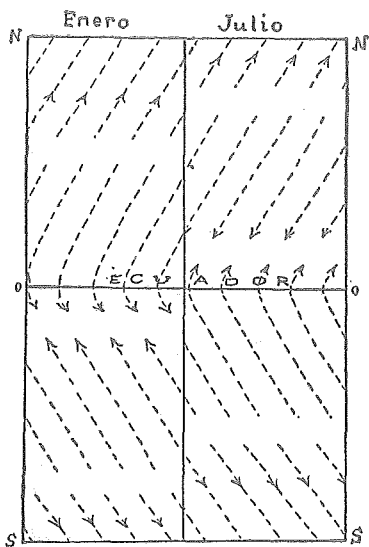
Al desplazarse el Ecuador térmico arrastra con él la zona de calmas ecuatoriales, que alternativamente se encontraría en uno ú otro hemisferio; al mismo tiempo, en el hemisferio cuyo polo tenga más baja temperatura, el desequilibrio será mayor, los contra-alisios y vientos de retorno más rápidos y la zona de calmas tropicales se alejará del polo, é inversamente en el otro hemisferio, por lo tanto las zonas de calmas ecuatoriales y tropicales se moverán al Norte ó al Sur simultáneamente, y con ellas las zonas de vientos alisios que comprenden. Esto da por resultado que los puntos próximos á las zonas de calmas tropicales y ecuatoriales tendrán alternativamente cada medio año vientos alisios de sentidos contrarios, según el lado en que se encuentren, con relación á la zona de calmas que separa á estos vientos (fig. 8).

Estos vientos planetarios, perturbados por la emigración alternativa del sistema, debida á la inclinación del eje de la Tierra, son los que han recibido el nombre de terrestres.

Vientos continentales.—Lo que acaba de decirse se refiere á la circulación general de la atmósfera en el caso de que la superficie terrestre fuese homogénea, pero la irregular repartición de tierra y mar introduce nuevas perturbaciones en las corrientes aéreas que vamos á estudiar en lo que sigue.

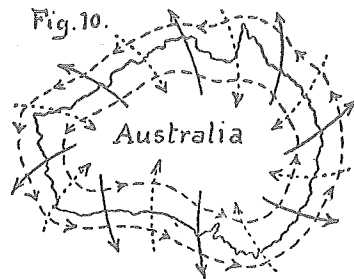
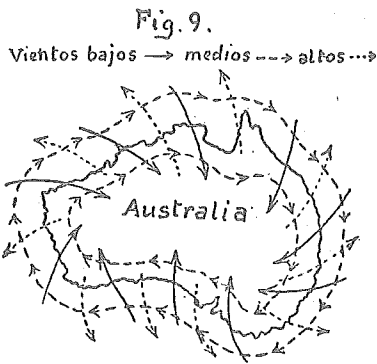
Los continentes hasta una latitud de 45° N. ó S. tienen una temperatura media anual mayor que el mar, lo que hace que el Ecuador térmico

Fig. 8.



co terrestre esté situado casi continuamente en el hemisferio boreal, por ser en este mayor la relación de superficie de tierra á la de mar que en el austral. Esto origina que la zona de calmas ecuatoriales esté siempre situada algo más al Norte de como resultaría en el caso de superficie homogénea.

En verano, los continentes, por su mayor temperatura respecto á los mares, están cubiertos por áreas de bajas presiones que, si no existieran otras causas de desequilibrio atmosférico, originarían vientos de régimen ciclónico de mar á tierra, desviándose á la derecha en el hemisferio boreal y á la izquierda en el austral, y formando con el gradiente barométrico un ángulo de deflexión proporcional directamente á la latitud é in-



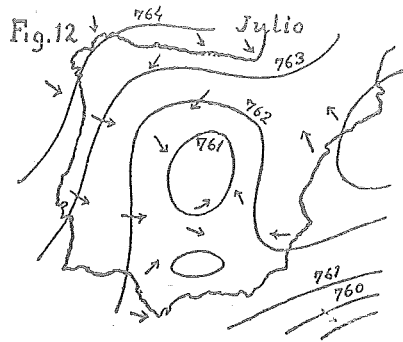
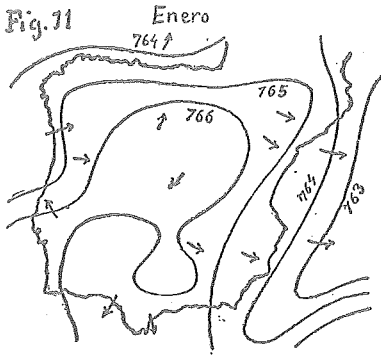
versamente al rozamiento con la superficie, según las leyes de Buys-Ballot. En las capas medias, la dirección sería aproximadamente paralela á las isobras ó sea á la costa, y en las altas regiones iría el viento de tierra á mar, desviándose en el sentido dicho anteriormente. Además, el viento calentado por radiación al pasar sobre el continente, tomaría un movimiento ascensional producido por la convección, hasta llegar á las capas superiores donde el enfriamiento de la expansión anule la fuerza ascensional (figura 9).

Durante el invierno, la temperatura de los continentes es menor que la de los mares, las bajas presiones residen ahora en estos y el viento producido tendrá el carácter de anticiclónico, será descendente sobre los continentes y se dirigirá de ellos al mar, formando con el gradiente un ángulo de deflexión según la ley ya citada (fig. 10).

Estos vientos continentales serán tanto más veloces y su acción alcanzará á mayor altura, cuanto mayor sea la diferencia entre las temperaturas del mar y la tierra, y esta diferencia es máxima en la zona tórrida. Por lo tanto, en las proximidades de las costas en esta región se formarían vientos continentales que variarían de sentido cada seis meses,

análogamente á los terrestres de las proximidades á las zonas de calmas ecuatoriales y tropicales.

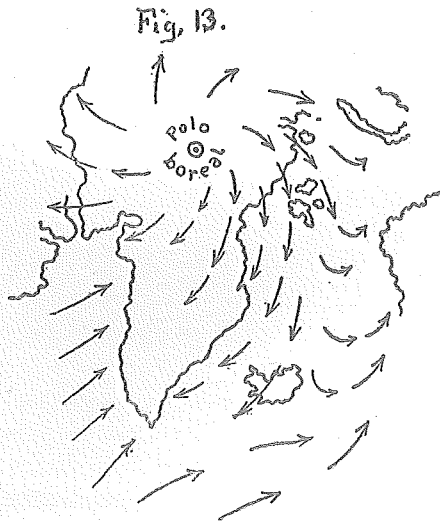
La acción combinada de los vientos continentales y terrestres da diversos resultados según sus direcciones é intensidades; produciendo los



llamados vientos generales, que son los resultantes de los dos anteriores.

En la zona tórrida y en algunas regiones determinadas se suman los efectos de los vientos terrestres y de los continentales, dando lugar á los vientos periódicos de gran regularidad é intensidad que se llaman monzones, cuyas direcciones cambian cada seis meses.

En las zonas templadas predominan generalmente los alisios, aunque modificadas sus direcciones periódicamente por los continentales, siendo estas modificaciones menos sensibles en las capas elevadas. En las figuras 11 y 12 están indicadas las deformaciones que introducen los vientos continentales en las isobaras medias de nuestra Península. En cambio, en las proximidades del polo boreal, en que durante todo el año la temperatura es notablemente inferior que la de los continentes que le rodean, se producen vientos de carácter anticiclónico del NE., que anulan la acción de los alisios del SW. en parte de la zona glacial ártica, aunque su acción no se extiende á las capas superiores de la atmósfera (fig. 13)



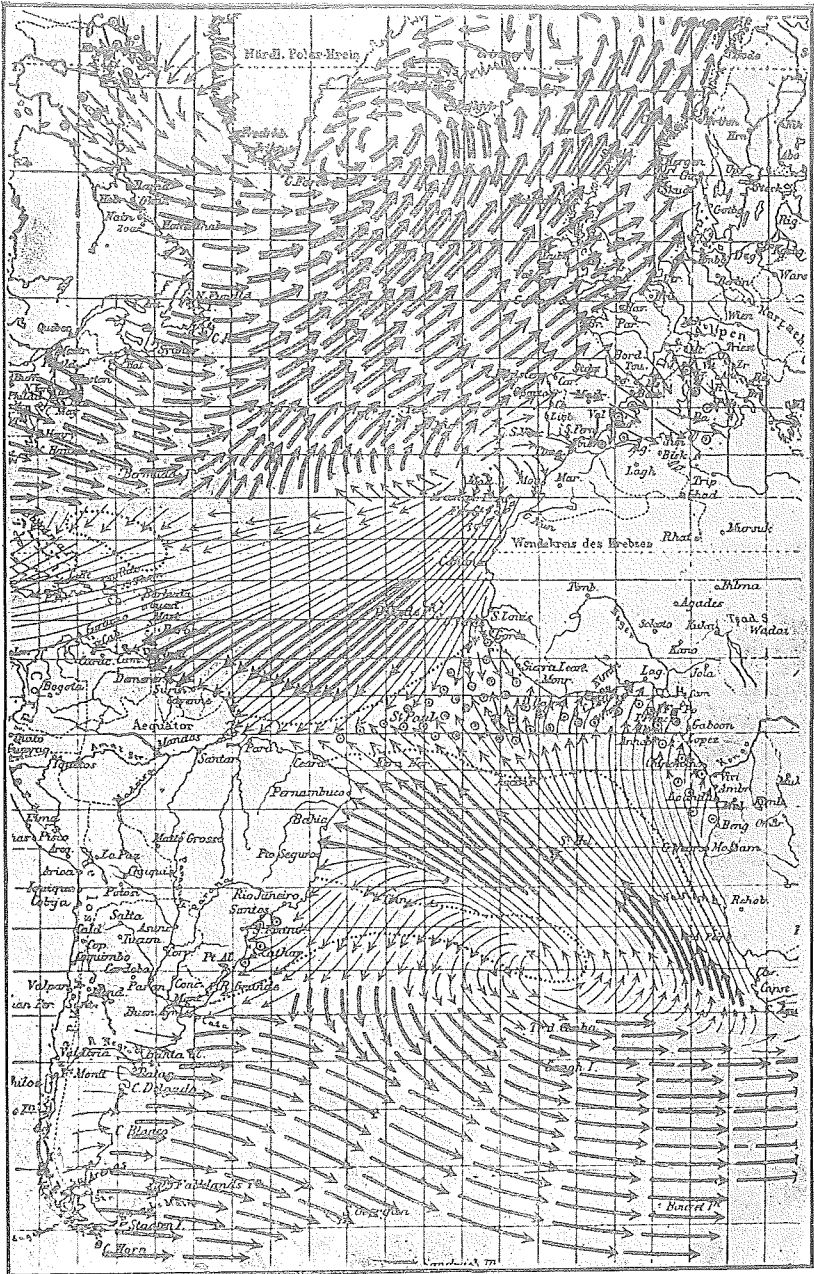


Fig. 14.

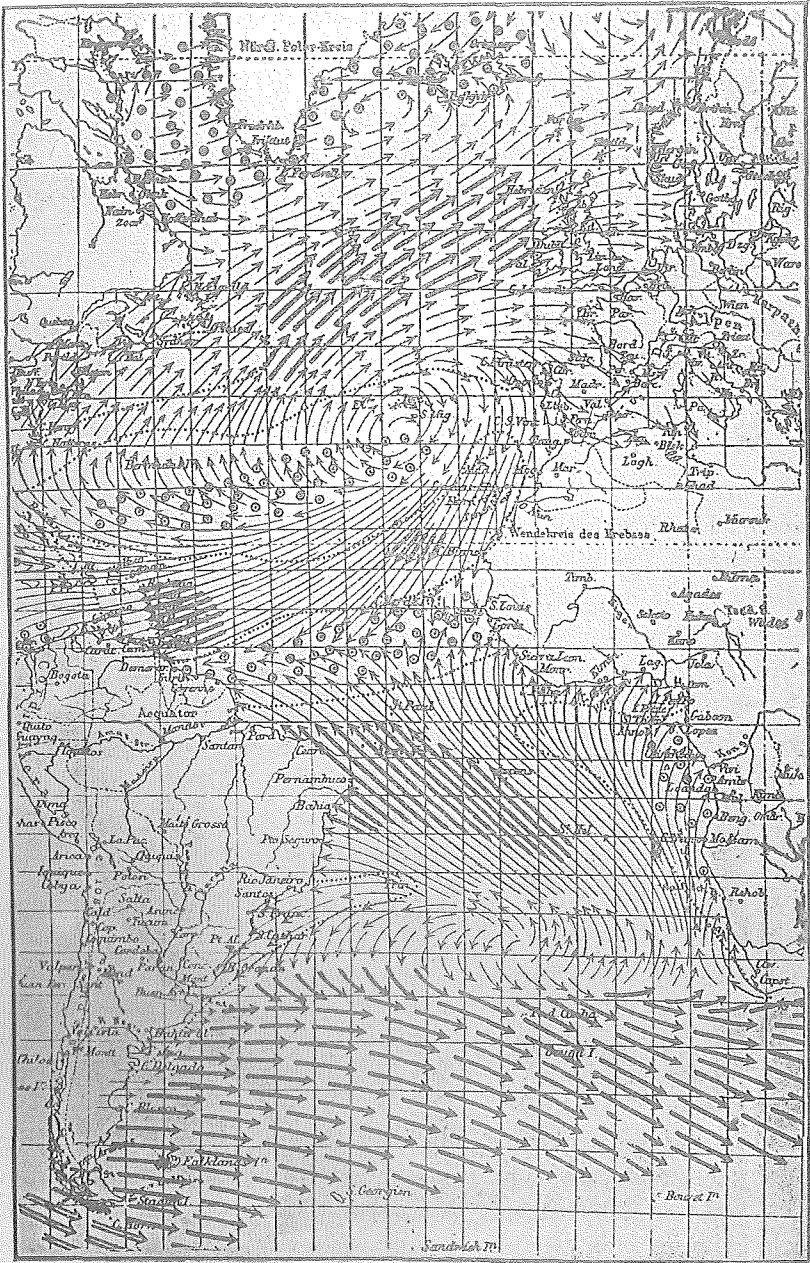
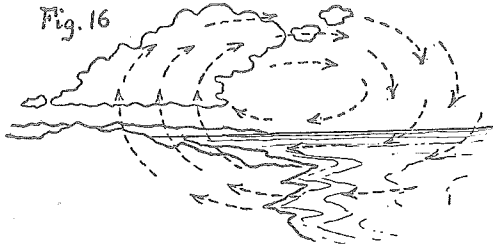


Fig. 15,

En el polo austral no se ha observado este fenómeno, lo cual se explica, porque no habiendo continentes en sus inmediaciones, el gradiente térmico es menor que en el boreal.

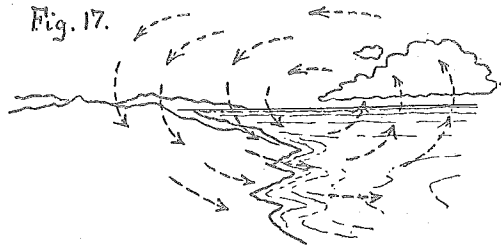
Por efecto de las bajas presiones continentales del verano, las zonas de altas presiones tropicales quedan interrumpidas al llegar á los continentes y reducidas á áreas anticiclónicas situadas en el Océano, que, al disminuir de extensión aumentan en presión barométrica, ocurriendo lo mismo en el invierno respecto á las bajas presiones del Océano.



En las figuras 14 y 15 (tomadas de las cartas del Observatorio Naval Alemán «Deutsche Seevarte» de Hamburgo) están indicados los vientos generales del Atlántico en Enero y Julio, siendo la longitud de las flechas proporcional á la constancia del viento correspondiente y el espesor á la intensidad; las calmas están representadas por círculos y los límites de las zonas tropicales y ecuatoriales por curvas de puntos.

Brisas de mar y tierra.

— El mismo efecto de desequilibrio térmico entre la tierra y el mar que hemos estudiado para el verano é invierno, se reproduce, aunque con menos intensidad, en las proximidades de las costas durante el día y la noche.



Cuando el sol está sobre el horizonte, la temperatura de la tierra aumenta más rápidamente que la del agua, produciéndose una dilatación de las capas aéreas inmediatas á la tierra, que en los primeros momentos se verifica en todos sentidos, notándose, por lo tanto, en la costa un débil viento hacia el mar.

Cuando el calentamiento es suficiente para producir el desequilibrio vertical y elevación, por consiguiente, del aire calentado, el aire frío del mar viene á ocupar el espacio que aquél tenía antes, naciendo de este modo la brisa de mar y estableciéndose una circulación del aire inmediato á la costa, de mar á tierra por abajo, movimiento ascendente sobre la tierra, de tierra á mar al llegar á una cierta altura y movimiento descendente sobre el mar (fig. 16).

Durante la noche, el enfriamiento de la tierra, mayor que el del agua, hace reproducir estos fenómenos en sentido inverso, dándose origen á las brisas de tierra (fig. 17).

El máximo de intensidad de estas brisas tiene lugar á las horas de la máxima diferencia de temperatura entre el mar y la tierra, ó sea por la madrugada la brisa de tierra, y en las primeras horas de la tarde la de mar.

Estos desequilibrios térmicos diarios hacen modificar la forma de las

Fig. 18.

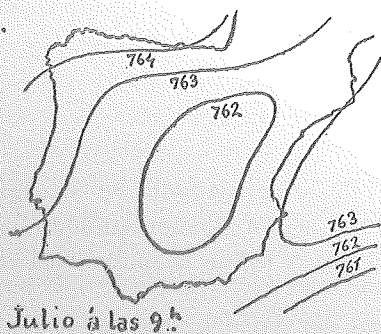
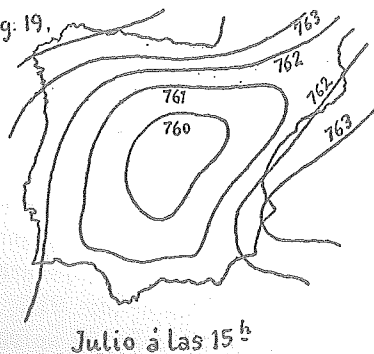


Fig. 19.



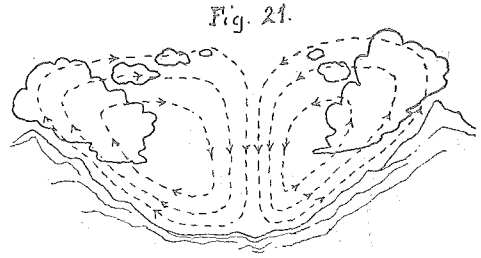
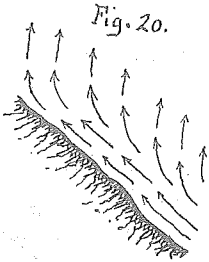
isobaras, especialmente en las costas, y, por lo tanto, tienen su mayor influencia en las islas y penínsulas. En las figuras 18 y 19 se ven las deformaciones de las isobaras de Julio de nuestra Península por el influjo de esta causa. Se nota que á las nueve el gradiente barométrico es más débil que el medio (fig. 12), porque el enfriamiento nocturno de la tierra ha anulado en parte al calentamiento estival. En cambio, á las quince, los calentamientos diurno y estival se suman y hacen que la depresión de la Península sea mayor que la media y que el gradiente barométrico sea más fuerte.

Debido á la corta duración del fenómeno, que no da tiempo para un mayor desarrollo, la acción de la brisa sólo se extiende á unos 40 ó 50 kilómetros tierra adentro, y algo menos en el mar, y su altura no excede de unos 200 metros, notándose á alturas superiores, hasta el doble, la brisa contraria. Sin embargo, en algunos casos se ha notado el influjo de la brisa hasta 800 metros de altura.

La dirección de estos vientos comienza siguiendo la del gradiente; pero á medida que la brisa se va extendiendo, se hace notar la deflexión producida por la rotación terrestre y la brisa se va rolando á la derecha en el hemisferio Norte, y á la izquierda en el Sur.

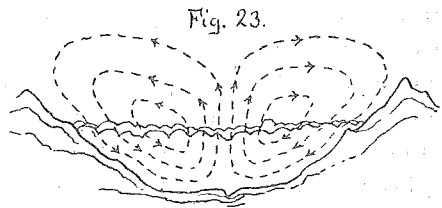
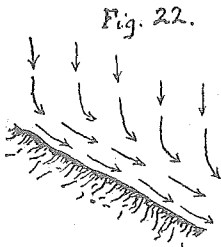
Brisas de valle y montaña.—Durante el día, las capas de aire com-

prendidas dentro de un valle, al calentarse por radiación del calor del suelo, se dilatan rompiéndose el equilibrio vertical y originándose un movimiento ascendente de las capas más próximas al suelo, que son substituidas por otras que descienden á llenar el vacío que aquéllas dejaron (fig. 20). De este modo se produce un movimiento circulatorio ascen-



dente á lo largo de las laderas del valle, y descendente en el centro de él, que influirá á mayor ó menor altura, según el calentamiento del suelo, con relación á la temperatura del aire y según la inclinación del terreno de las laderas (fig. 21).

Durante la noche, el enfriamiento del suelo, que es superior al del aire, produce el mismo fenómeno, pero en sentido inverso (fig. 22), ori-



ginándose un movimiento circulatorio descendente á lo largo de las laderas, y ascendente en el fondo del valle (fig. 23).

Tanto estas brisas como las de mar y tierra combinadas con los vientos generales modifican sus intensidades y direcciones periódicamente cada día, produciendo en algunos casos vientos violentos y hasta tormentas periódicas cuando sus efectos se suman y sus intensidades son suficientes para producir estos fenómenos.

Vientos ciclónicos.—Con este nombre comprenderemos los vientos aperiódicos animados de movimiento de rotación alrededor de un eje aproximadamente vertical que, á su vez, se desplaza recorriendo una cierta trayectoria. Los dividiremos para su estudio en: ciclones inter-

tropicales, ciclones extratropicales, anticiclones, tormentas, tornados y torbellinos.

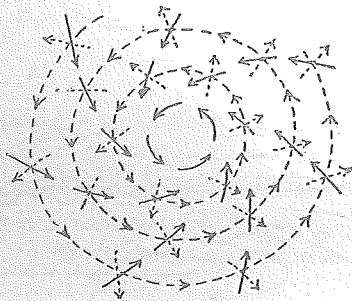
Ciclones intertropicales.—La región de las calmas ecuatoriales, cuya temperatura es notablemente más alta que la de las regiones que la rodean, no solamente por la acción más directa de los rayos solares, sino por la ausencia de vientos en ella, puede tener partes en que, por causas locales, se eleve la temperatura del aire más que en el resto de la misma zona, y la corriente ascendente conveccional de ella sea más enérgica que la de las partes que la rodean. Si esta región caliente se encuentra sobre el ecuador geográfico, ó á corta distancia de él, el viento afluirá directamente á ella (por ser nulo en este caso el ángulo de deflexión), la enfriará por radiación y hará desaparecer el desequilibrio térmico, y, por lo tanto, barométrico, que se había originado.

Si por el contrario esta región caliente se encuentra fuera del ecuador geográfico, al formarse la depresión barométrica debida al movimiento ascendente del aire que afluya atraído por esta depresión formará éste con el gradiente un ángulo de deflexión proporcional directamente á la latitud ó inversamente al rozamiento, como hemos visto antes, y que además estará aumentado por la fuerza centrífuga que desarrollará el movimiento de rotación resultante alrededor del centro de la depresión.

El aire, por lo tanto, se acercará á este centro por las capas inferiores con movimiento de espiral, que sucesivamente se irá transformando en helizoidal ascendente hasta llegar á una cierta altura en que se alejará del centro, también en espiral, descendiendo después en forma análoga á la subida. El aire de las capas intermedias toma un movimiento giratorio alrededor del centro de la depresión, y el sentido de toda esta rotación será el de las agujas de un reloj en el hemisferio austral, y el contrario en el boreal (fig. 24).

En las capas inferiores el movimiento en espiral es muy regular, aunque el ángulo de deflexión es algo menor en la parte delantera de la depresión, en cambio en las capas superiores no es tan característico, porque el sentido de su rotación, debido únicamente á la inercia, es contrario á ley de Buys-Ballot. Al aproximarse el aire al centro, la fuerza centrífuga aumentará con la disminución del radio de giro, de tal modo que llegará á una cierta distancia, á ser tal que le obligue á moverse

Fig. 24.

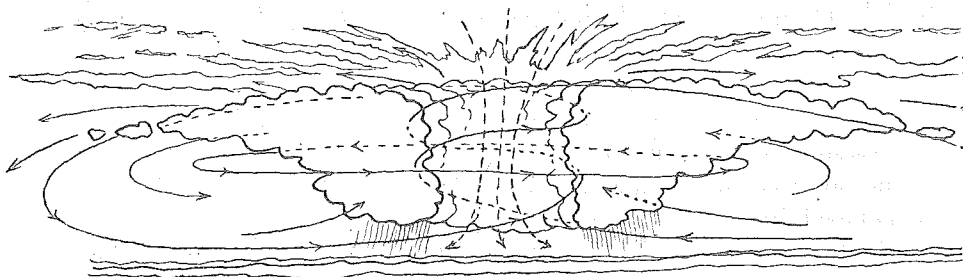


perpendicularmente al radio, quedando toda la parte interior en calma y á una presión menor que la inicial. Como no puede llenarse esta depresión por el aire de alrededor, porque á ello se opone la fuerza centrífuga, se formará en ella una corriente descendente, que compensará el vacío que dejaran las moléculas de aire que, arrastradas por la rotación de las de su alrededor, huyen en virtud de la citada fuerza.

Alrededor del ciclón y en las capas bajas, el viento descendente formará un anillo de altas presiones ó anticiclónico, y en las capas medias el viento tendrá un movimiento de rotación paralelamente á las isobaras (fig. 25).

Si el viento que afluye á la depresión llega cargado de vapor de agua, al sufrir la expansión del movimiento ascendente y condensarse este vapor, todo el calor de vaporización almacenado dejará de estar la-

Fig. 25.



tente y aumentando la temperatura de la masa de aire, contribuirá también á su desequilibrio y á la persistencia del movimiento giratorio, que constituye lo que se llama un ciclón intertropical, ó simplemente tropical.

Si la región atmosférica en donde se forma el ciclón estuviese en calma absoluta, y si el viento afluente de las distintas direcciones llegase con igual grado de humedad y temperatura, el ciclón no variaría de sitio y permanecería siempre sobre la región origen del desequilibrio; pero si la atmósfera se encontrase en movimiento, la parte de la depresión atacada por el viento se llenaría más rápidamente que la opuesta y la depresión, y con ella el ciclón se iría trasladando en el mismo sentido que el viento reinante. Además, si el viento de una cierta dirección llegase más húmedo que el de las demás, la depresión se aumentaría por el lado por donde llegara aquél, que sería donde el calor

latente de vaporización desarrollado sería el máximo y tendería á moverse en este sentido.

Si la temperatura del suelo no fuese uniforme, sabemos por la fórmula de Laplace que las diferencias de presiones entre dos capas atmosféricas de distinta altura es tanto mayor cuanto menor sea la temperatura media del aire que haya entre ellas, y por lo tanto, las isobaras de las distintas capas horizontales se deformarían con la altura en la forma que indican las figuras 26, 27 y 28, haciendo que el eje del ciclón se incline hacia las bajas temperaturas y que el viento alto tenga una dirección paralela aproximadamente á las líneas isotermas. Esto daría por resultado que la depresión tomaría una tendencia á desplazarse en este mismo sentido dejando á su derecha las temperaturas más altas en nuestro hemisferio.

Estos desplazamientos de las depresiones no llevan consigo el desplazamiento material de la masa de aire, porque entonces la dirección é intensidad del viento en cada parte sería resultante de la suya propia y

Fig. 26. Depresión é isotermas al nivel del suelo

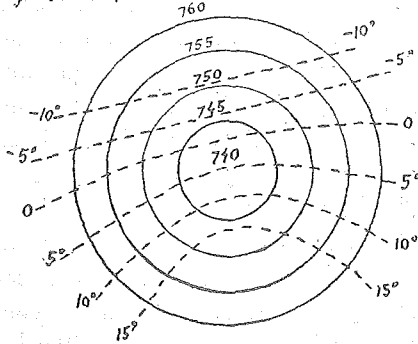


Fig. 27. A 3000 m.s.

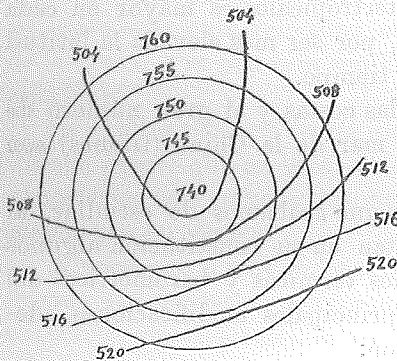
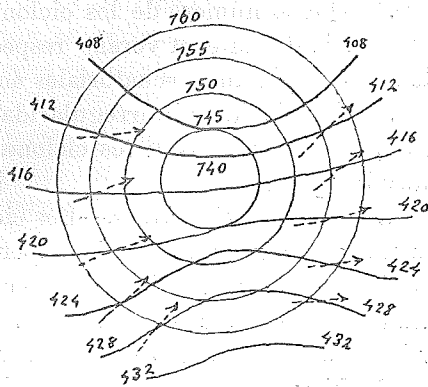


Fig. 28. A 4500 m.s.



de la del movimiento de la depresión, lo que no se verifica, pues aunque algunas veces en el mar se ha notado diferencia de intensidades entre los vientos de los diferentes sectores de un ciclón, esto parece ser debido á la influencia de los vientos generales del sitio donde se desarrolla.

Las depresiones también tienen tendencia á girar en el sentido de las

agujas de un reloj en nuestro hemisferio, alrededor de las regiones de altas presiones, cuando el gradiente barométrico que las une con ella es más intenso que los demás radiales de la presión; por ésto, cuando en Europa encuentran un máximo pasan por el Norte de él y después inclinan su trayectoria al Sud-Este, aunque generalmente no concluyen la rotación iniciada y continúan después su marcha primitiva.

Si varias de estas causas de desplazamiento coexisten, la depresión sigue la resultante de todas ellas y su movimiento será tanto más determinado cuanto menos se opongan los efectos de estas causas.

En comprobación de todo lo anterior, se ha observado:

1.º Que los ciclones intertropicales se producen principalmente en el mar por estar más húmedo el aire.

2.º Que no existen en el Sur del Atlántico, porque la zona de calmas ecuatoriales en este mar no llega nunca al hemisferio Sur (efecto del desplazamiento hacia el Norte del Ecuador térmico en esta parte).

3.º Que la dirección de las trayectorias de estos ciclones es primeramente al W. hasta el Golfo de México, en donde, huyendo de la tierra, encurvan al N. su trayectoria y entran en la zona templada con dirección al NE. hasta las costas de Europa, donde desaparecen. Estos cambios de dirección son debidos á los vientos reinantes, á las direcciones de los que llegan cargados con mayor humedad y á la dirección del gradiente térmico en cada zona.

4.º Por las mismas causas, las direcciones de los ciclones del Pacífico del Sur son hacia el W. al principio, y después al S. y al SE.

5.º Que el número de los ciclones intertropicales es mayor en cada hemisferio durante su verano respectivo, por ser más elevada la latitud de la zona de calmas ecuatoriales en este tiempo.

6.º Que debido á la irregularidad de las costas y al gran número de Islas, las trayectorias de los ciclones del mar de la China (tifones) son muy irregulares.

Ciclones extratropicales.—Los ciclones que acabamos de estudiar, al entrar en la zona templada experimentan en su constitución algunos cambios debidos á las distintas condiciones térmicas y barométricas del nuevo medio donde se encuentran. Las principales modificaciones, además del cambio de dirección ya citado, son:

1.º Mayor irregularidad en la forma de las isobaras, que en lugar de afectar, figura circular como entre los trópicos, adoptan otras formas elípticas ó irregulares, generalmente presentando hacia el trópico el gradiente más rápido por estar hacia este sentido la zona de altas presiones.

2.º Ausencia del anillo anticiclónico que está sustituido por áreas de altas presiones de forma irregular.

3.º Ausencia ó gran debilitación de la corriente descendente central.

4.º El área central de las mínimas presiones es de mayor extensión, lo que se explica por ser mayor el ángulo de deflexión, y por lo tanto, el viento llegará á ser normal al gradiente á mayor distancia del centro.

5.º Las trayectorias son menos determinadas y constantes, porque los vientos generales son menos fijos y varían más con la altura, y por la mayor desigualdad en la repartición de las temperaturas en la superficie. Estas trayectorias al llegar á las costas siguen generalmente las líneas de mayor humedad compatibles con las direcciones que les impriman las demás influencias, y si el terreno es seco ó accidentado, se prolongan de un modo indeterminado retrocediendo á veces, y desaparecen pronto por disminuir el ángulo de deflexión con el rozamiento y la depresión con la falta de humedad.

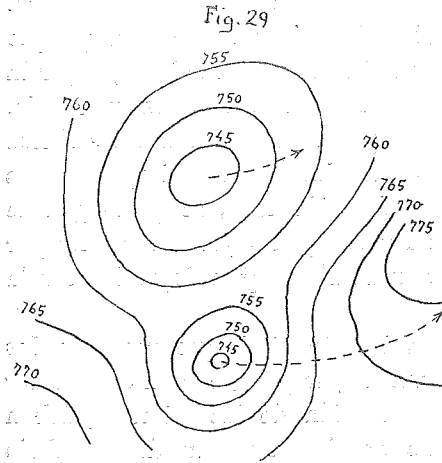
Además de estos ciclones de origen intertropical que recorren las zonas templadas principalmente en verano, se producen en ellas otros que aunque no se diferencian en su constitución de los primeros, deben tener un origen distinto que no puede explicarse por un desequilibrio térmico.

Estos ciclones nacen en la zona templada preferentemente en el invierno, y aunque no se ha encontrado una teoría que explique satisfactoriamente su formación, se cree como más probable que tengan su origen en las altas regiones de la atmósfera al encontrarse una capa fría superior con otra más caliente inferior, y establecerse el desequilibrio vertical y el consiguiente movimiento giratorio que continuará, una vez establecido, gracias á la energía almacenada por el vapor de agua que contienen las capas de aire donde se forma. Cuando este movimiento adquiere suficiente velocidad, su acción se extiende hasta la superficie de la tierra, y se presenta con los mismos caracteres que los que hemos estudiado.

Se explica por esta teoría que su formación sea más frecuente en invierno, puesto que en esta estación, como vimos antes, el desequilibrio atmosférico que origina los vientos terrestres de las diversas capas es mayor que en verano.

A veces dos ó más ciclones extratropicales se unen en su marcha y forman una depresión común de mayor profundidad; otras veces, por el contrario, una depresión se segmenta produciendo otra de menor extensión, pero de igual profundidad, que se mueve girando alrededor de la primitiva, en sentido contrario, al de las agujas de un reloj, en nuestro hemisferio (fig. 29). En estas depresiones satélites, el viento es por regla general más intenso que en la central, á causa de su menor extensión, y, por lo tanto, mayor intensidad del gradiente barométrico. La segmenta-

ción tiene lugar generalmente cuando una depresión encuentra en su marcha una región de altas presiones; entonces la depresión tiende á pasar entre el polo y las altas presiones, y la satélite que se forma pasa por el lado del Ecuador. Cuando la segmentación se verifica hacia el lado del polo, que es lo menos frecuente, la marcha de la satélite se detiene ó retrocede, y se destruye pronto.



En la figura 30 están indicadas las principales trayectorias de los ciclones intertropicales y extra-tropicales, pudiéndose distinguir las de los primeros por la dirección al W. que toman en su origen; en la figura 31 se representan las trayectorias de los principales ciclones que atraviesan á Europa,

sus anchuras son proporcionales á la frecuencia con que los ciclones las recorren. La velocidad media de traslación de las depresiones en Europa es de 7 á 8 metros por segundo, y próximamente el doble en la América del Norte.

Anticiclones.—Como se ha dicho antes, en las zonas templadas no existe el anillo anticiclónico que rodea á las depresiones intertropicales, sino que está sustituido por áreas de altas presiones que acompañan al movimiento de las depresiones. Si varias de éstas se mueven á la vez, el área de altas presiones comprendida entre ellas toma una forma más determinada y se convierte en un centro de altas presiones ó anticiclón (fig. 32), caracterizado por una corriente de aire descendente, giratorio en contrario sentido que el de los ciclones, y que refluye del centro á la periferia en las capas bajas, formando con el gradiente el ángulo de deflexión en la forma que ya conocemos. Estos anticiclones son frecuentes en los Estados Unidos, y generalmente están colocados entre dos depresiones, á las que acompañan en su movimiento.

Otros anticiclones se forman generalmente en invierno y en Europa, cuando dos corrientes aéreas de alguna constancia y de distinta dirección convergen á una misma región comprimiendo las capas inferiores y produciendo un reflujó rotativo de aire alrededor del centro de presión (fig. 33), y, por último, en invierno pueden originarse anticiclones de centro frío, que presentan caracteres contrarios á los ciclones de centro caliente, con viento giratorio afluente en espiral por las altas capas,

después descendente en hélice y luego refluente en espiral por la parte inferior (fig. 34). Algunas veces la acción de la fuerza centrífuga produce un mínimo relativo en el centro del anticiclón (fig. 35).

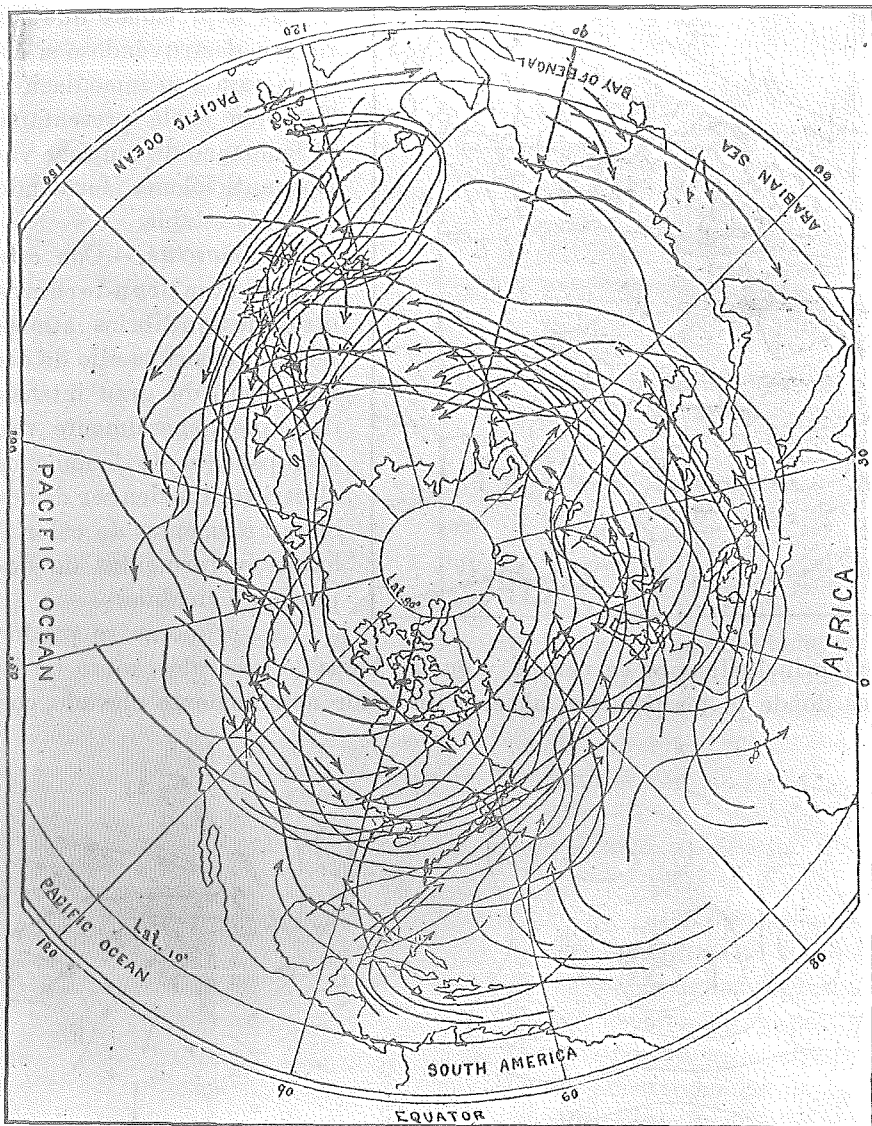
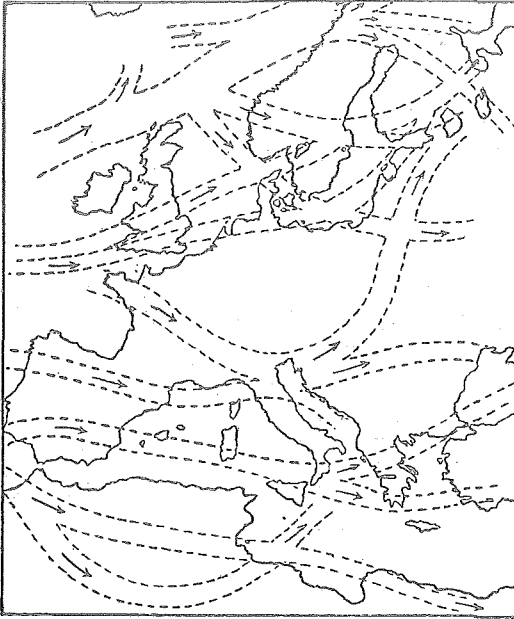


Fig. 30.

Estos anticiclones tienen escasa duración, porque teniendo en ellos el aire un movimiento descendente es raro contenga la humedad neces-

ria para producir por su evaporación el incremento de desequilibrio térmico análogo, aunque contrario al que mantiene la existencia de los ciclones. Sus traslaciones son lentas y obedecen al influjo de las depresiones que les rodean, destruyéndose si alguna pasa á su inmediación. También suele presentarse el fenómeno de reunirse varios anticiclones formando uno más estable.

Fig. 31.



Tormentas.—Con este nombre comprenderemos otros desequilibrios atmosféricos de corto radio de acción, pero de gran intensidad, que generalmente van acompañados de fenómenos eléctricos. Pueden ser de dos clases: tormentas de calor ó locales y tormentas de depresión ó ciclónicas.

Las primeras se producen principalmente en verano y en las horas de más calor, sobre terrenos donde la temperatura alcance un valor notablemente elevado, con

relación á la de las regiones que les rodean. Su formación es análoga á la de los ciclones térmicos, aunque su duración es mucho más corta, pues desaparecen generalmente con el decrecimiento de temperatura noc-

Fig. 32.

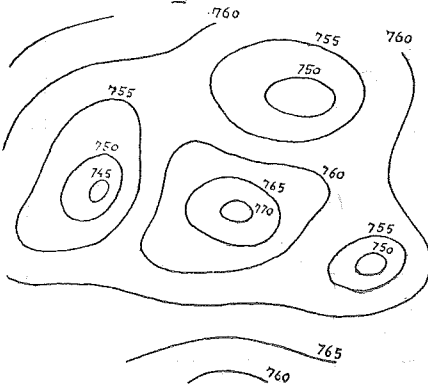
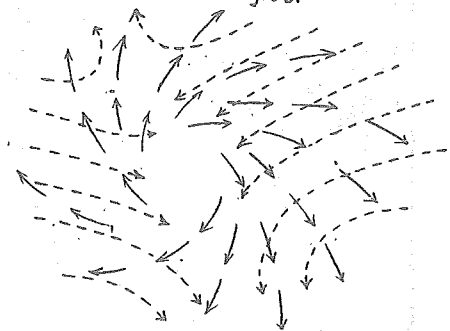


Fig. 33.



relación á la de las regiones que les rodean. Su formación es análoga á la de los ciclones térmicos, aunque su duración es mucho más corta, pues desaparecen generalmente con el decrecimiento de temperatura noc-

turna. Sin embargo, algunas llegan á durar varios días y recorren grandes extensiones arrastradas por los vientos reinantes locales. También pueden ser producidas por las corrientes ascendentes de las brisas de montaña y valle, como se dijo al tratar de estos vientos.

Estos fenómenos se producen, por lo tanto, en las islas tropicales y en las regiones montañosas de los continentes durante los meses de mayor calor; sin embargo, también se producen en los meses de invierno sobre el Océano durante la noche, y especialmente sobre el Gulf Stream, debiendo estas tormentas su origen al movimiento convectivo producido por la gran diferencia de temperatura que existe en esas condiciones entre el agua de la corriente del golfo, relativamente caliente, y las capas elevadas del aire.

Las tormentas de depresión son movimientos ciclónicos de mucha intensidad, aunque de poca extensión, que acompañan á las depresiones como las satélites, especialmente por el S. y SE. de ellas, que es la región en donde, por llegar el aire más caliente, el movimiento ascendente convectivo es más enérgico.

La velocidad de traslación de estas tormentas es á veces mayor que la de las depresiones que acompañan, y, por lo tanto, tienden á girar alrededor de ellas como las depresiones satélites, de quienes son

en un caso particular. Sus condiciones de propagación y sostenimiento son análogas á las de los ciclones, y sus trayectorias son más irregulares é indeterminadas que las de éstos.

La dirección de los vientos en las tormentas es análoga á la de los

Fig. 34.

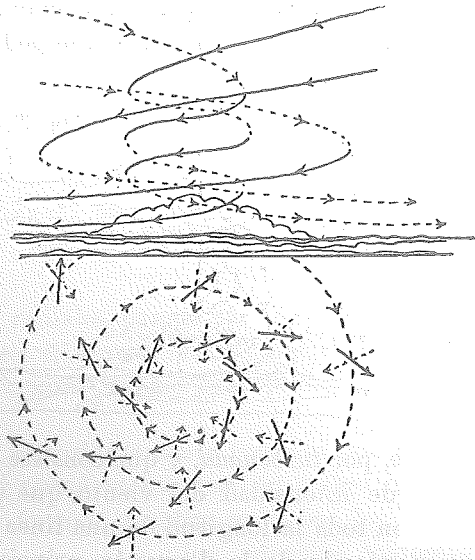
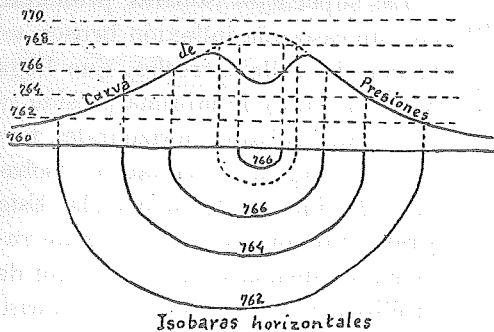


Fig. 35.

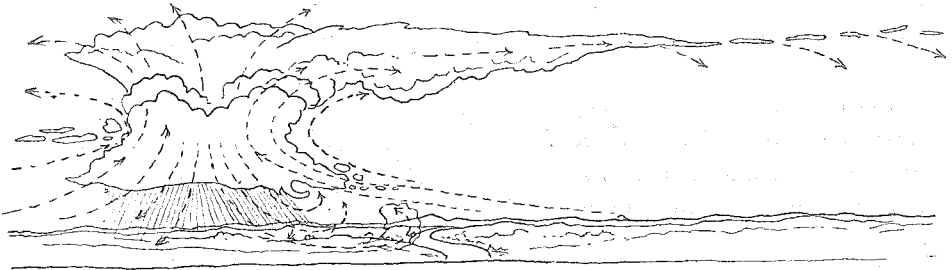


La dirección de los vientos en las tormentas es análoga á la de los

cyclones, excepto en la parte central en que se produce un viento que refluye del vórtice á la periferia. Este es producido por la reacción de la columna ascendente central, á cuya causa se suma á veces el arrastre que efectúa en el aire la lluvia que se produce generalmente en esta parte (fig. 36).

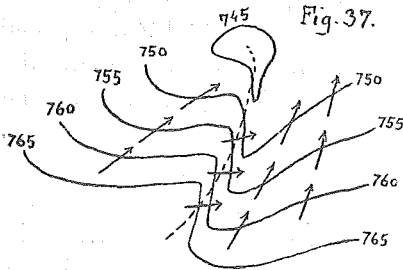
Las tormentas de depresión afectan algunas veces una forma especial que los franceses llaman *grain*, que podríamos traducir, aunque no exac-

Fig. 36



tamente, por *turbonada*, y que consiste en un cambio de dirección y aumento de intensidad del viento, que se efectúa simultánea y bruscamente en toda la longitud de una línea ó zona estrecha (*ruban de grain*) que, partiendo de la depresión principal se extiende en forma más ó menos sinuosa hacia el lado del Ecuador. Este golpe de viento dura al-

gunos minutos, y después cesa continuando el régimen anterior á la turbonada (fig. 37).

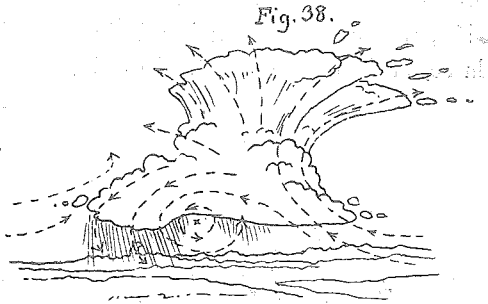


Las superficies isobaras presentan en este caso una inflexión brusca en forma de valle estrecho, que llega hasta el punto de mínima presión, y las curvas isobaras horizontales forman un zig-zag correlativo (isobaras en V) cuyos vértices están situados en la línea de la turbonada. Esta línea se mueve con la depresión, sin grandes deformaciones, durante varias horas, y algunas veces presenta cierta tendencia á girar alrededor de aquella en el mismo sentido que los satélites. También se ha dado el caso de presentar una misma depresión varias líneas radiales de turbonada.

La dirección del viento en los lados de la depresión radial sigue la regla general, pero dentro de ella es normal á las isobaras, lo que se explica por la corta duración de este viento que no le permite un desarrollo suficiente para tomar el ángulo de deflexión. Su violencia es debida á la

gran intensidad del gradiente barométrico, por estar muy próximas las isóbaras dentro de la inflexión.

Otra anomalía de este viento es que mientras el que le rodea es ascendente, por ser de régimen ciclónico, el de la turbonada es descendente en las capas inferiores y tiene un movimiento de rotación alrededor de un eje horizontal que corresponde á la línea de la turbonada (fig. 38). En la unión del viento ascendente con el descendente de la turbonada, se forman remolinos que preceden generalmente á estos fenómenos.



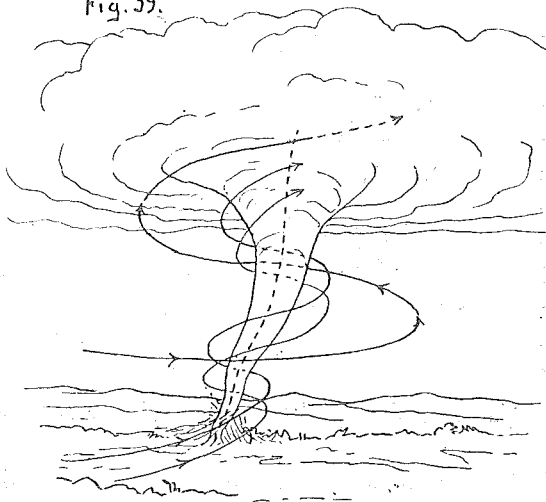
El origen de estas tormentas radiales parece ser térmico, análogo á las de calor, pues por regla general se forman en las mismas condiciones y á las mismas horas que éstas, aunque después se desplazan acompañando á la depresión principal.

Tornados.—Estos fenómenos, llamados también trombas, son torbellinos de gran violencia, de eje aproximadamente vertical ó algo inclinado hacia delante por arriba, que se forman algunas veces en las bases de

los cúmulos tempestuosos, cuando existen en ellos grandes diferencias de temperatura, humedad y dirección de las corrientes de aire que llegan á la nube.

Este fenómeno, una vez formado, aumenta de intensidad por la gran expansión que el aire sufre al acercarse al vórtice y disminuir el radio de rotación, por lo que se aumenta su fuerza centrífuga, destruyéndose después cuando encuentra algún

Fig. 39.



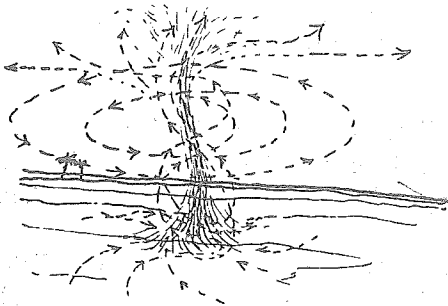
obstáculo en su marcha ó agitación en la atmósfera. Su duración rara vez llega á una hora.

El movimiento del viento en un tornado es análogo al de un ciclón,

con la diferencia de que en el primero la fuerza centrífuga del aire es mucho mayor por ser de mucho menor radio el área de mínima presión, alrededor de la cual gira el viento (fig. 39).

Torbellinos.—Son fenómenos puramente locales, de origen térmico, análogo al de los ciclones intertropicales, pero que alcanzan poca extensión, por lo cual el sentido de la rotación puede no ser el que determina la regla de Buys-Ballot, sino el que resulte, según los obstáculos que encuentre el aire al afluir á la superficie caliente.

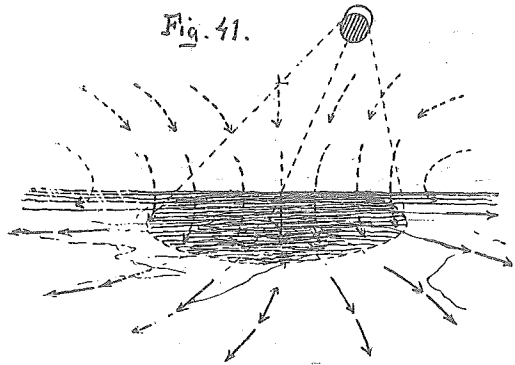
Fig. 40.



Los torbellinos se forman principalmente en las llanuras muy calentadas por el sol y en los desiertos, y su duración es muy corta por la falta de humedad del aire (fig. 40).

Vientos de eclipse.—Cuando la sombra de la luna recorre la superficie terrestre, la baja de temperatura que produce dentro de ella origina un anticiclón de centro frío, pero de acción muy débil por la gran velocidad de la sombra lunar sobre la tierra, que impide que el decrecimiento de temperatura sea lo suficiente para producir vientos que se superpongan á los reinantes durante el eclipse. Por lo tanto, solamente en régimen de calma absoluta se notará en los lugares próximos á la totalidad del eclipse un débil viento procedente del punto del horizonte á donde se dirija la concavidad de la parte visible del disco solar, ó algo á su derecha, mientras en las capas elevadas se efectuará un viento contrario (fig. 41).

Fig. 41.



Vientos de avalancha.—Estos fenómenos acompañan á los desprendimientos de tierras, avalanchas, y, en general, siempre que un cuerpo de un gran volumen sufre un desplazamiento brusco en la superficie de la tierra.

Al iniciarse el movimiento se comprime el aire situado delante del

cuerpo móvil, acompañándole parte de él y separándose el resto, mientras el que le rodea tiene que afluir á llenar el vacío que el cuerpo en movimiento deja detrás de sí. De aquí que en estos casos se formen vientos cuya dirección es la de la avalancha delante y detrás de ella y opuesta por los costados (fig. 42).

La extensión de las capas atmosféricas hasta donde se note el efecto de estos vientos, así como la intensidad de éstos, depende del volumen de la avalancha y de la longitud y velocidad de su desplazamiento, llegando en algunos casos á originarse vientos comparables con los más violentos huracanes.

Brisas de marea.—Estos vientos, generalmente poco perceptibles, excepto cuando suman sus efectos á las brisas de mar y tierra, son producidos por el desplazamiento que el agua del mar imprime á las capas atmosféricas con su movimiento biotidiano de ascenso y descenso. Su dirección es de mar á tierra durante el flujo, y de tierra á mar durante el reflujo (fig. 43).

Su acción es muy débil, y solamente se puede notar en las costas donde las mareas alcance gran altura.

Vientos volcánicos.—Son vientos ciclónicos de origen térmico que se producen alrededor de los volcanes en actividad al calentarse las capas inferiores de la atmósfera por el contacto con las materias á elevadas temperaturas que cubren las proximidades del cráter.

Estas capas inferiores calientes sufren por convección un

movimiento ascendente, siendo sustituidas por otras que afluyen por abajo de los alrededores del volcán, originándose así un movimiento ciclónico, cuyo vórtice es el cráter. A una cierta altura sobre el terreno, el viento ascendente, junto con los gases, producto de la erupción, refluye hacia el exterior y toma un movimiento descendente para cerrar la

Fig. 42.

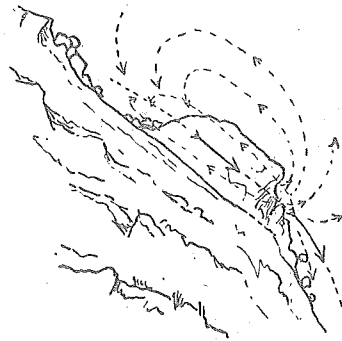
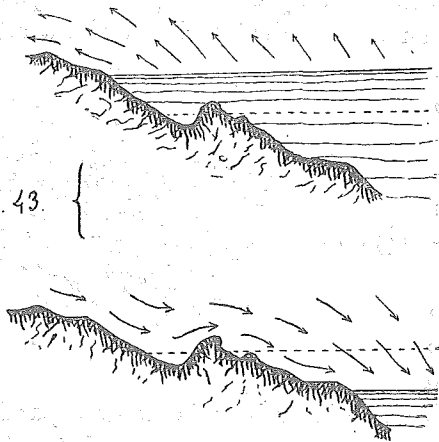


Fig. 43.



circulación análoga á la de los ciclones que ya se han estudiado (fig. 44).

Modificaciones que sufren la intensidad y dirección de los vientos por la influencia del terreno.—Estas modificaciones pueden ser producidas de dos maneras distintas: por el rozamiento del aire sobre la tierra y por la obstrucción que presentan al viento los accidentes orográficos.

El rozamiento del aire sobre la tierra da por resultado una disminución en la intensidad del viento y en el ángulo de deflexión de su dirección con

la del gradiente barométrico, por lo cual el viento se moverá en nuestro hemisferio, tanto más á la izquierda cuanto mayor sea el rozamiento, y al contrario en el hemisferio austral.

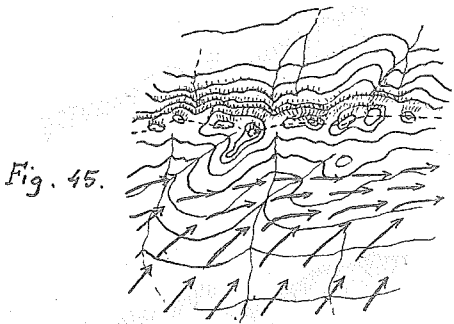
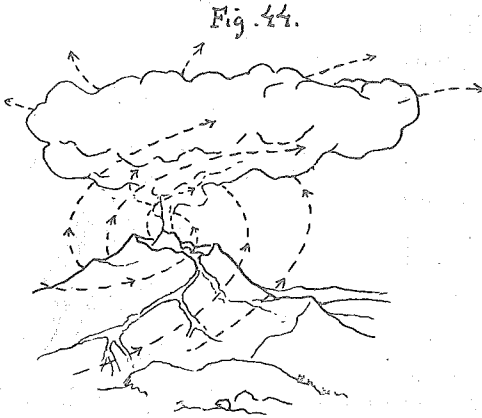
Esta influencia del rozamiento es más sensible en las capas bajas de la atmósfera, y, sobre todo, cuando no existe movimiento conveccional vertical, puesto que así la misma masa de aire sufre continuamente el rozamiento con el suelo sin ser renovada por otras.

Esto sucede cuando la temperatura del suelo es baja, lo que explica que durante la noche sea muy común que las capas inferiores de la atmósfera queden en calma mientras á una cierta altura haya vientos de gran intensidad.

Los accidentes orográficos que obstruyen el movimiento del viento, desvían su dirección y modifican la intensidad según la forma y extensión del obstáculo y su posición relativa con el viento.

Un resalto del terreno, como una cadena de montañas, que se presente formando un pequeño

ángulo con el viento, desvía su dirección hasta hacerle moverse paralelamente al obstáculo (fig. 45). Si el ángulo del viento con el obstáculo se aproxima á 90° , parte de aquél pasará por encima y el resto se desviará á derecha é izquierda para rodearlo si no fuese de gran extensión (figura 46). Si el obstáculo fuese muy escarpado y de dirección transversal, se pueden producir zonas de calmas ó vientos reflejos de sentido contrario y menor velocidad á un lado ú otro del obstáculo. Estas zonas

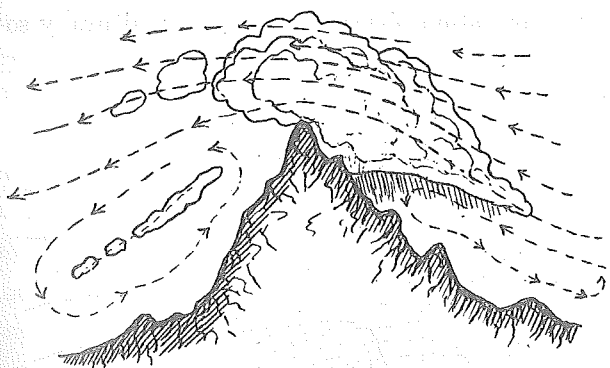


deben ser bien determinadas en las regiones montañosas para cada dirección de vientos por constituir puntos de refugio, cuyo conocimiento es muy útil en la aeronáutica (figura 47).

Las cortaduras transversales en el terreno no influyen en la dirección del viento, y el aire comprendido dentro de ellas, ó queda en calma ó toma un movimiento lento á lo largo de ellas originado por la succión del viento superior. En estos casos pueden utilizarse también como puertos de refugio, aunque tienen el inconveniente de que si el viento cambia de dirección puede hacerse la estancia en estos puntos más peligrosa que en el exterior, como se ve en lo que sigue (fig. 48).

En las cortaduras ó depresiones del terreno que se presentan paralelamente al viento, éste toma la dirección

Fig. 47.

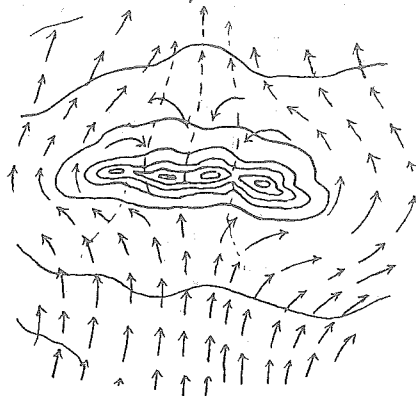


Golfo de Lyon con gran violencia siguiendo la dirección de la cuenca del Ródano.

Estos efectos del terreno se extienden algunas veces á distancias y alturas considerables sobre el obstáculo, que dependen, como es natural, de las circunstancias especiales de cada caso.

Nebulosidad, lluvia, nieve y electricidad atmosférica.—Cuando una masa de aire cargado de vapor de agua y de partículas de polvo en suspensión sufre un enfriamiento hasta llegar su temperatura á ser la de saturación para la cantidad de vapor que contenga, alrededor de cada

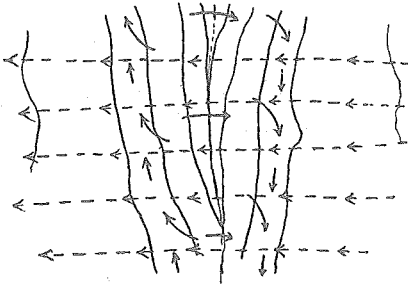
Fig. 46.



lamente al viento, éste toma la dirección del eje de la depresión orográfica, y si sus bordes son convergentes, la disminución de sección produce un aumento de velocidad, que puede ser sensible á grandes distancias (fig. 49). Un ejemplo de este caso es el mistral, viento que llega al

partícula de polvo se condensa el vapor de agua excedente, formándose unas esferitas líquidas de 6 á 14 μ de diámetro que caerán continuamente y se evaporarán de nuevo al llegar á una capa de aire no saturado, á menos que se formen en una corriente ascendente, en cuyo caso

Fig. 48.



podrán mantenerse en suspensión ó ascender con la diferencia de velocidades y ser transportadas con la masa de aire, siempre que éste conserve las condiciones térmicas é higrométricas necesarias para la formación y conservación de estas esferitas líquidas, cuyo conjunto constituye la nube. Se ha demostrado que si no existe polvo en suspensión, puede la masa de aire enfriarse bastantes gra-

dos por debajo del punto de condensación sin que ésta se produzca y quedando sobre-saturada de vapor de agua.

El enfriamiento puede ser producido por tres causas principales:

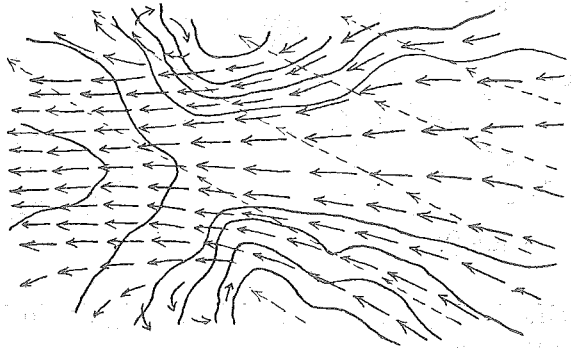
1.^a Por radiación del suelo. Esta causa da lugar á la formación de las nieblas y brumas que se observan cuando el suelo llega á estar á una temperatura inferior á las capas atmosféricas de una cierta altura, y sobre todo si hay una corriente lenta descendente, ó si el viento va de un terreno caliente á otro más frío.

2.^a Por mezcla de un aire frío con otro saturado. Este es el origen de formación de una capa de nubes (stratus) que separa las dos masas de aire (figura 50). Si estas tienen

diferentes direcciones y velocidades, se originan ondulaciones en la superficie de contacto que dan lugar á una serie de nubes aisladas (alto-cúmulos y cirro-cúmulos) (fig. 51).

3.^a Por expansión de una capa de aire saturada. Esta expansión puede ser producida por ascensión ó por fuerza centrífuga, y la ascensión puede ser por convección ó por accidentes del terreno. La altura H á que se forma la nube es $H = 125(t-t')$, siendo t la temperatura del

Fig. 49.



aire y t' la del punto de saturación. Esto explica que en invierno se formen las nubes á menor altura que en verano.

Estas causas dan lugar á los strato-cúmulos, cúmulos, cúmulo-nimbus, nimbus y trombas de los tornados.

Cuando la temperatura desciende hasta el punto de congelación, la

Fig. 50.

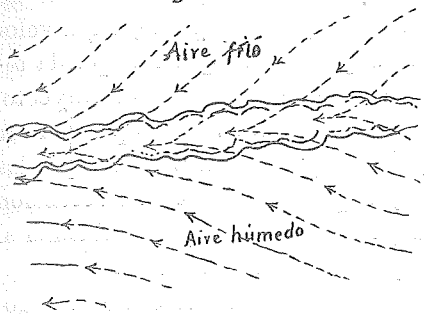
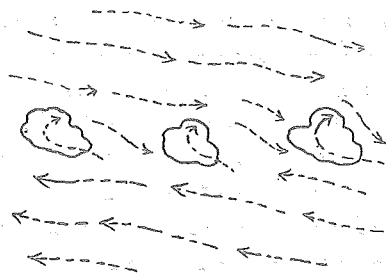


Fig. 51.



nube se constituye de una reunión de cristalitas de hielo (cirrus y cirro-stratus).

Las alturas medias de las diferentes clases de nubes y sus velocidades en metros por segundo, están dadas en la tabla siguiente:

NUBES	ALTURAS EN METROS	VELOCIDADES
Cirrus.....	7000 á 11000.....	30 á 40
Cirro-stratus.....	7000 á 9000.....	30
Cirro-cúmulus.....	7500.....	15 á 35
Alto-stratus.....	4000 á 6000.....	20
Alto-cúmulus.....	3000 á 6000.....	15
Strato-cúmulus.....	1500 á 2500.....	10
Cúmulus.....	1500.....	10
Cúmulu-nimbus.....	1500 á 4000.....	15
Nimbus.....	500 á 1500.....	>
Stratus.....	500.....	7

La altura extrema á que se ha observado la superficie superior de los cirrus, ha sido de 20 kilómetros y su velocidad de 100 metros. Jesse observó nubes luminosas de noche á 80 kilómetros de altura que se cree estaban formadas por cenizas procedentes de la erupción del Krakatoa. El espesor de las nubes puede llegar en algunas (cúmulus-nimbus) hasta ser de 6 kilómetros.

Como se deduce del modo de formación de las nubes, la velocidad de éstas no siempre es igual á la del aire que las contiene, pudiendo darse el caso de haber nubes fijas dentro de un viento rápido (como sucede con las que se forman por ascensión orográfica) y hasta de moverse otras en sentido contrario al viento (como las trombas que descienden de las nubes dentro de un aire de movimiento ascendente).

Si la condensación es muy enérgica y abundante, las esferitas de agua, uniéndose unas á otras, llegan á formar gotas mayores, cuya velocidad de régimen de caída en el aire es superior á la que éste pueda tener, por lo cual, si éstas gotas no llegan á evaporarse en el trayecto, caerán á la superficie terrestre produciendo la lluvia. Estas pueden ser de convección, ciclónicas ó de relieve, según que el enfriamiento que las produce esté originado por convección, expansión ciclónica ó ascensión orográfica. En el primer grupo se incluyen también las que se forman al enfriarse el aire por su paso de una región caliente á otra fría.

Si la condensación se efectúa á una temperatura inferior á 0° las gotas de lluvia se congelan, produciéndose la nieve ó granizo según la rapidez de congelación.

Por último, estas condensaciones enérgicas hacen que la cantidad de electricidad que poseía la masa de aire se aglomere en la superficie de las gotitas de agua que, á medida que se van reuniendo para formar gotas más gruesas, la suma de superficies va siendo menor, y, por lo tanto, va aumentando la carga eléctrica por unidad de superficie, que podrá llegar á ser tal, que produzca la descarga disruptiva entre la nube y la Tierra ó entre dos nubes electrizadas con signo contrario.

La electricidad de la Tierra es negativa, y la de las nubes positiva, generalmente, debido á la influencia de la Tierra, en primer lugar; además, á que cuando una masa de agua dulce se divide en gotas, éstas se electrizan positivamente y, por último, á la propiedad que tienen los rayos ultravioletas de la luz del Sol de descargar los cuerpos electrizados negativamente. Sin embargo, si una nube ha estado en contacto con el suelo, puede estar cargada de electricidad negativa.

Estos fenómenos acuosos y eléctricos, como es natural, van acompañados de las nubes que acusan mayor rapidez y cantidad de condensación, ó sean los nimbus y cúmulus-nimbus.

Conocido el origen de las nubes y fenómenos acuosos y eléctricos, se pueden deducir fácilmente los que darán lugar, cada uno de los vientos ya estudiados, como vemos á continuación:

Vientos planetarios.—Estos vientos producen un mínimo de nebulosidad en las zonas de calmas tropicales y máximos de nebulosidad (cúmulus, cúmulus-nimbus y nimbus con fenómenos acuosos y eléctricos).

cos) en las calmas ecuatoriales y en las capas bajas y medias situadas entre las zonas tropicales y las polares. En las capas de separación entre los contra-alisios y alisios, ó entre aquéllos y los vientos de retorno, se producirán alto-cúmulus y cirro-cúmulus ó stratus, y en la región de los contra-alisios se formarán cirrus con sus variantes. Finalmente, en las proximidades de las calmas polares los vientos descendentes darán lugar á nieblas y stratus bajos por la baja temperatura del suelo.

Vientos terrestres.—Estos solamente originan el desplazamiento anual de la zona de nebulosidad ecuatorial.

Vientos continentales.—Aumentan la nebulosidad en los continentes, sobre todo en las proximidades de las costas, durante los meses de verano, y en el mar durante el invierno. Las nubes originadas son cúmulus con sus variantes. Los vientos descendentes del NE. de la región polar boreal, disminuyen la nebulosidad de esta región, quedando el máximo comprendido entre los paralelos 40° y 50°.

Brisas de mar y tierra.—Producen cúmulus durante las horas de más calor sobre las costas ó islas, y á las horas de mínima temperatura dan lugar á la formación de nieblas, stratus bajos ó cúmulus sobre el mar.

Brisas de valle y montaña.—Estos vientos originan cúmulus ó cúmulus-nimbus, acompañados á veces de fenómenos acuosos y eléctricos en las crestas de las montañas, durante las horas de más calor, y nieblas ó mar de nubes bajo, cubriendo el valle, durante las horas más frías de la noche ó de la madrugada.

Vientos ciclónicos.—Los intertropicales dan lugar á la formación de un anillo de cúmulus y nimbus, acompañado de fenómenos acuosos y eléctricos, con centro despejado (ojo del ciclón), debido al viento descendente central. El anillo anticiclónico también permanece despejado.

Sobre la masa de cúmulus se destacan en la dirección de los vientos superiores una capa de cirro-stratus, que se prolonga, principalmente en el sentido de la marcha, con cirrus filamentosos.

Los ciclones extra-tropicales carecen del espacio despejado central, ó no es tan marcado, y tienen el máximo de nebulosidad y lluvia al SE. del centro en nuestro hemisferio, ó, en general, donde la dirección del viento, con relación á las isothermas, haga que el enfriamiento sea el máximo, ó sea cuando la dirección sea normal á dichas líneas. Este máximo estará más marcado cuando el viento en esta parte provenga, además, del mar ó de la región de mayor humedad.

Una vez establecido el régimen ciclónico, las isothermas sufren una torsión alrededor del centro en el sentido del viento, originada por la modificación de la temperatura que producen los vientos procedentes de regiones desigualmente calentadas.

En la parte opuesta del ciclón está el *mínimum* de nebulosidad, en donde sólo se notan cúmulus aislados, que se van disolviendo continuamente.

Los anticiclones van acompañados de cielo despejado. Sin embargo, los que se producen sobre terrenos muy fríos pueden dar lugar á nieblas cuando existe inversión de temperatura en el gradiente térmico vertical, lo que sucede principalmente de madrugada.

Las tormentas producen grandes condensaciones de cúmulus y nimbus por convección y fuerza centrífuga, acompañadas de lluvia y granizo y fenómenos eléctricos, estando esta masa de nubes coronada, como en los ciclones, por una capa de cirro-stratus y cirrus en el sentido del viento en las capas superiores.

Los tornados originan la formación de una nube cilíndrica ó cónica invertida, de poco diámetro, rodeando el eje de rotación, que constituye la tromba. También suelen ir acompañados de fenómenos eléctricos.

Los torbellinos no producen generalmente nebulosidad por formarse en sitios muy secos, y solamente se hacen visibles por el remolino de polvo que levantan, que á veces le da apariencia de tornados.

Vientos volcánicos.—Pueden producir tormentas de convección con cúmulus, nimbus, lluvia y fenómenos eléctricos.

Vientos de eclipse, de avalancha y brisas de marea.—No producen nebulosidad apreciable.

Los accidentes orográficos, cuando producen vientos ascendentes, pueden dar lugar á la formación de cúmulus que se apoyan en las montañas por el lado batido por el viento, constituyendo el fenómeno, que en los Alpes se llama el *Föhn*. Cuando estos accidentes dan lugar á capas de vientos reflejos distintos en condiciones de humedad y temperatura de los vientos superiores, puede formarse en la superficie de separación una capa de stratus, ó strato-cúmulus, que se disuelven en cúmulus aislados cuando la mezcla de las dos capas de vientos se hace más extensa.

Bases para la predicción del tiempo ó Meteorognosia.—La predicción del tiempo en lo referente á las necesidades de la navegación aeronáutica, ó sea determinar *a priori* el viento que reinará en cada punto y para cada altura en una época determinada, solamente puede basarse con probabilidades de éxito en el perfecto conocimiento del régimen meteorológico presente y de sus probables modificaciones.

Los observatorios meteorológicos, con quienes debe hallarse en comunicación la estación aeronáutica, pueden proporcionar diariamente para una hora dada, la carta meteorológica del momento y las modificaciones que viene sufriendo el régimen atmosférico, con cuyos datos podemos conocer la primera parte del problema, que puede ser completada con las observaciones locales que se efectúen por medio del barómetro, termó-

metro, higrómetro, cuyos datos comprobarán la persistencia del régimen determinado en la carta ó anunciarán las variaciones que vaya sufriendo; con observaciones del anemómetro y lanzamientos de globos pilotos, que indicarán la velocidad y dirección del viento á distintas alturas; estudio del aspecto, velocidad y dirección de las nubes, del que podremos deducir la naturaleza y movimientos de las capas de aire donde estén formadas; aspecto de los horizontes que por su mayor ó menor diafaneidad nos darán á conocer el estado de las capas bajas de la atmósfera, etc. Con todos estos elementos se podrá llegar á conocer con suficiente exactitud el estado meteorológico del momento de la partida, del cual se pueden deducir los vientos reinantes en cada punto y á cada altura para el mismo momento, para lo cual se puede emplear la fórmula

$$v = 0.00012237 \cdot G \cdot \cos a \cdot l/kd$$

que da la velocidad media del viento v en función del gradiente G , expresado en milímetros de mercurio por grado geográfico, del ángulo de deflexión a , del peso específico del aire d , y de un coeficiente de fricción k , que para el mar en calma es 0,00002, y para tierra desigual es 0,00012; la deflexión teórica en un segundo es $= 0,0001458 \cdot v \cdot \sin \varphi$; siendo φ la latitud. Estas fórmulas se refieren á los vientos bajos, y no tienen en cuenta las modificaciones introducidas por los obstáculos del terreno en la intensidad y dirección; para los vientos de altura media, los que más frecuentemente habrá que tener en cuenta para la navegación aeronáutica, el ángulo de deflexión, con relación al gradiente, al nivel del suelo, es de 90° , aproximadamente, ó sea que su dirección es paralela á las isobaras, dejando el mínimo á la izquierda en nuestro hemisferio y á la derecha en el austral.

Conocido con toda la exactitud posible el régimen meteorológico de una extensión de terreno tan extensa como sea posible, principalmente en el sentido por donde suelen llegar las depresiones, y que comprenda la región donde se vaya á efectuar el viaje, la previsión del tiempo puede deducirse del estudio que hemos hecho de los vientos en general, y particularmente de los movimientos de los centros de depresión y trayectorias más probables, teniendo en cuenta las modificaciones que hayan acusado las últimas observaciones efectuadas. Para efectuar la previsión con mayores probabilidades de acierto, son de gran utilidad las reglas prácticas que se deduzcan de la meteorología local acerca de las variaciones que en condiciones parecidas ha experimentado un régimen análogo al que exista en el momento de la observación, puesto que en el estado actual de la meteorología muchos de estos cambios de tiempo no tienen explicación que pueda basarse racionalmente en los principios

conocidos, y hay que completar la previsión lógica con las enseñanzas de otros cambios análogos ya observados. El estudio de la influencia de los ciclos meteorológicos, que en la actualidad aparece como una base para la previsión del tiempo, no es de interés para la navegación aeronáutica, porque con ellos se trata principalmente de resolver el problema de la predicción, á larga fecha, y para la ciencia que nos ocupa basta con la predicción inmediata, por la corta duración que pueden tener en la actualidad los viajes aeronáuticos. Además, todavía no ha sido posible determinar con precisión la existencia é influencia de estos ciclos.

Estudiadas ya las principales bases para la predicción del tiempo, vamos á resolver el problema de la determinación de la derrota, objeto de la segunda parte de estos apuntes.

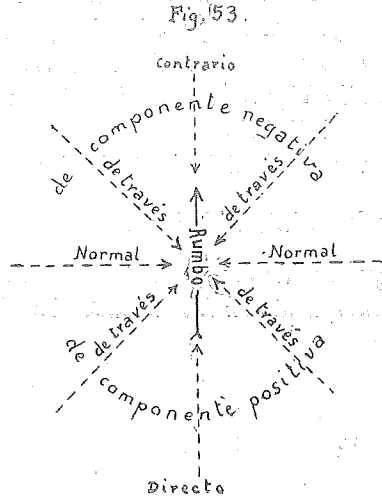
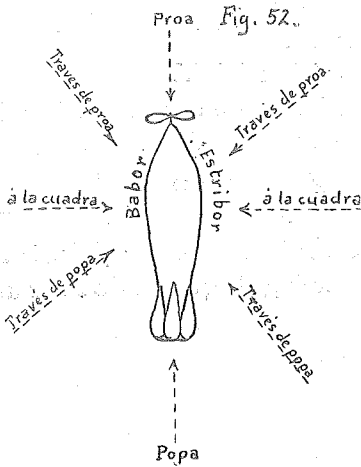
DERROTAS AERONÁUTICAS.

Diferencias con la navegación marítima.—En dos puntos esenciales difiere la navegación aeronáutica de la marítima, en lo relativo á la determinación de la derrota:

1.º Un buque puede recibir el viento formando un ángulo cualquiera con la dirección de su proa, de aquí que en la navegación marítima se clasifiquen los vientos, según el costado del buque por donde éste los recibe en: *de fil de roda, de bolina, á un descuartelar, á la cuadra, á un un largo, por la aleta y en popa cerrado*, según que la dirección de donde vienen forme con la de la proa un ángulo de 0, 6, 7, 8, 10, 14 y 16 cuartas, respectivamente (cada 45° tiene 4 cuartas). En la navegación aeronáutica el dirigible se mueve dentro de la masa de aire que le sostiene independientemente del movimiento de ésta con relación al suelo, y, por lo tanto, siempre recibe el viento relativo por su proa; solamente en los cambios bruscos de dirección ó velocidad del viento ó del dirigible puede éste, á causa de su inercia, no seguir exactamente el movimiento que le imprime su propulsor dentro de la masa de aire, y entonces recibirá el viento relativo, formando un pequeño ángulo á babor ó estribor de la proa, que el par originado por la resistencia del aire en la cola se encargará de anular. Por lo tanto, en la navegación aeronáutica no es aplicable esta clasificación de vientos, puesto que el dirigible siempre lo recibe por la proa. Sin embargo, como en la estabilidad de ruta influye el ángulo que forma con la dirección de la proa, la del viento, se pueden clasificar éstos, según el valor de este ángulo, en vientos *de proa, de través de proa, á la cuadra, de través de popa y de popa*, adaptando en lo posible la clasificación de la navegación marítima, para valores de dicho ángulo de 180°, obtuso, recto, agudo y cero (fig. 52).

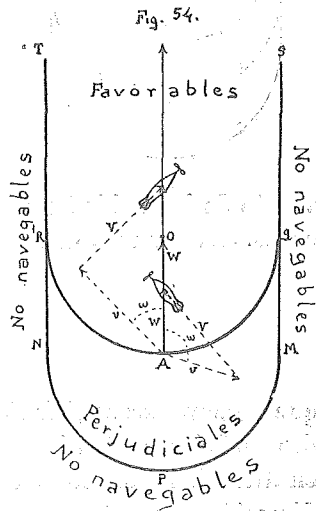
Por el ángulo que forme la dirección del viento con la de la derrota

que se desee seguir, pueden clasificarse (fig. 53) en *directos*, cuando coincidan estas direcciones; *contrarios*, cuando son opuestas y, *de través*, cuando forman un cierto ángulo. Si este ángulo es menor de 90° , se llaman



de componente positiva; si es recto, *normales*, y si es mayor de 90° , *de componente negativa*.

Por el efecto que produzcan en la marcha de un dirigible de velocidad propia V en una dirección determinada, los clasificaremos en *favorables*, cuando la velocidad absoluta W resulte mayor que V (figura 54), *perjudiciales*, si es menor que V y mayor que cero, y *no navegables*, cuando dicha velocidad W resulte negativa ó imaginaria, ó sea cuando la dirección que se desee seguir no esté comprendida en el sector abordable.

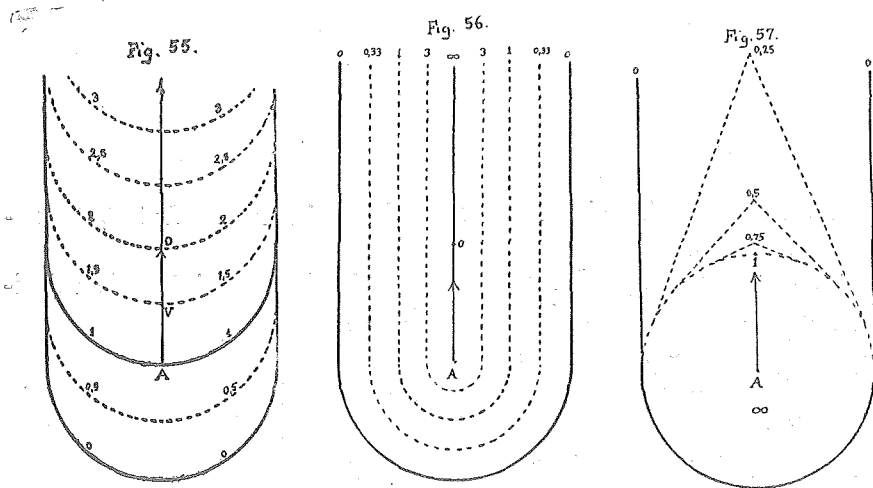


Si es A el punto de partida y $V=AO=AP$ la velocidad propia del dirigible y AO la dirección que se desea seguir, representando el viento en dirección é intensidad por un vector, á partir del punto A , los vientos favorables quedarán comprendidos dentro de la línea $SQA RT$, formada por la semicircunferencia QAR de radio V y las dos paralelas á OA , RT y QS ; los vientos perjudiciales estarán comprendidos dentro de la línea cerrada $QARNPMQ$, formada por las dos semicircunferencias de radio V , QAR

y MPN de centros O y A , respectivamente, y sus tangentes comunes NR y MQ ; y los vientos no navegables serán todos los que no queden comprendidos en los límites anteriores.

En la figura 55 están trazadas las curvas que determinan los vientos *equifavorables* para la dirección AO , ó que producen el mismo aumento en la velocidad absoluta W . Estas curvas son semicircunferencias de radio V y centro en AO , á una distancia de A igual á W .

Si dividimos la diferencia entre la intensidad de un viento determinado v y la del viento límite navegable de su misma dirección, por su misma intensidad v , tendremos un número, $\frac{V - v \operatorname{sen} \omega}{v \operatorname{sen} \omega}$ ó $\frac{V}{v}$, según que sea de componente positiva ó negativa, que llamaremos *coeficiente de navegación en intensidad*. Si se divide el menor ángulo que pueda rolar un



viento de intensidad v y dirección ω para llegar al límite de navegable conservando su intensidad v , por un ángulo recto, tendremos otro valor

$$\left(2 \frac{\operatorname{ang} \operatorname{sen} \frac{V}{v} - \omega}{\pi} \right)$$

que llamaremos *coeficiente de navegación en dirección* del viento. Estos dos coeficientes dan idea de las variaciones que puede sufrir un viento en dirección ó en intensidad, sin dejar de ser navegable para una cierta dirección, y son tanto mayores cuanto menores sean v y ω .

En la figura 56 están los lugares geométricos que determinan los vientos *equinavegables*, ó de igual coeficiente de navegación en intensidad, y en la 57 los equinavegables en dirección. Los primeros son semi-

circunferencias de centro en A y de radio $\frac{V}{C+1}$ prolongadas por sus dos tangentes paralelas á AO , y los segundos son rectas tangentes á la circunferencia de radio V y de centro A prolongadas hasta llegar á la dirección AO , con la cual forman un ángulo $= \frac{C\pi}{2}$. Dentro de la circunferencia $C = \infty$.

De estas figuras se deducen las consecuencias siguientes:

- 1.^a Los vientos directos son siempre favorables.
- 2.^a Los vientos de través, cuya dirección forme un ángulo menor de 45° con el rumbo, son: ó favorables ó no navegables, según que

$$v < \frac{V}{\text{sen } \omega}$$

- 3.^a Los vientos de través que forman ángulo mayor de 45° con el rumbo y menor de 90° pueden ser favorables, perjudiciales ó no navegables, según que

$$v < 2V \cos \omega, \quad v > \frac{2V \cos \omega}{\text{sen } \omega}, \quad \text{ó que } v > \frac{V}{\text{sen } \omega}.$$

- 4.^a Los vientos normales, de componente negativa y contrarios, son perjudiciales ó no navegables, según que su intensidad sea menor ó mayor que la velocidad propia del dirigible V .

- 5.^a Un viento de dirección determinada será favorable en grado máximo cuando $v = \cot \omega$, ó sea cuando el viento esté á la cuadra con relación al dirigible.

2.º La otra diferencia entre la navegación marítima y la aeronáutica estriba en que en la primera el rumbo está determinado por la dirección de la proa, pues la desviación debida á la deriva ó abatimiento del buque, originado por el viento ó las corrientes marítimas, es de poca consideración y calculable en la mayoría de los casos, mediante una sencilla operación llamada corrección del rumbo. Por este motivo se emplea comúnmente la navegación loxodrómica ó de rumbo constante que, aunque de mayor duración que la ortodrómica ó por círculo máximo, tiene sobre ésta la ventaja de que una vez determinado el rumbo que debe seguirse desde la partida, el timonel se encargará de mantenerlo con sólo cuidar, por la observación del compás, de que la dirección de la proa sea siempre la del rumbo determinado. Por el contrario, en la navegación aeronáutica el rumbo no depende solamente de la dirección de la proa,

sino también de la velocidad propia del dirigible en cada momento y de la dirección é intensidad del viento, imposible de determinar á bordo sin conocer el rumbo que se trata de calcular, por lo tanto, no se puede mantener el rumbo constante con la facilidad que en un buque, y la navegación loxodrómica resulta inaplicable.

En cambio, por la gran influencia que tienen en la navegación aeronáutica la intensidad y dirección del viento, así como sus variaciones, relativamente á la duración del viaje, trabajo motor desarrollado, probabilidades de llegada y otras circunstancias; la navegación por regla general más conveniente no será la ortodrómica, sino que habrá que seguir una cierta derrota para cada caso, de cuya determinación vamos á ocuparnos.

CLASIFICACIÓN DE LAS DERROTAS

Conocida la orografía del terreno que haya de recorrerse, las características del dirigible (1) (como son la velocidad propia, número de horas de marcha, altura máxima, etc.), y la situación meteorológica del momento de partida y sus probables modificaciones, la naturaleza del viaje, así como las circunstancias en que se efectúe, determinarán el trazado, que deberá tener la derrota para dar la solución más conveniente en cada caso.

Por el objeto que se persiga pueden dividirse los viajes aéreos en viajes de un punto á otro, que será el caso general de la Navegación aeronáutica, en viajes de un punto á una línea, caso de un dirigible que navegando sobre territorio enemigo trate de alcanzar la frontera de una nación amiga para descender; ó que, encontrándose sobre el mar, trate de llegar á la costa, y, por último, en aquellos en que se trate de huir de la zona peligrosa de una de depresión.

Por las circunstancias en que se realice el viaje habrá casos en que se deseará efectuarlo en el menor tiempo posible (derrota de mínima duración), con el menor trabajo motor (derrota de mínimo trabajo), navegando con la mayor altura posible sobre el terreno (derrota de altura máxima), y en el caso de que se conozca la dirección en que pueden saltar los vientos de velocidad superior á la del dirigible, podrá tratarse de efectuar el viaje en condiciones de tener las mayores probabilidades de llegar al punto deseado (derrota de arribada más probable). Por último, en algunos casos especiales en que por no ser visible el suelo é ignorarse

(1) Aunque todo lo que se expone puede aplicarse igualmente, tanto á los viajes efectuados en globo dirigible como á los que se lleven á cabo en aparatos de aviación, nos referimos principalmente á los primeros por ser los que en la actualidad permiten la ejecución de viajes aéreos de mayor duración y recorrido.

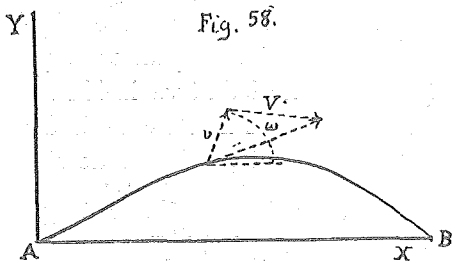
la dirección del viento resulte difícil comprobar la derrota en cada momento, convendrá navegar dirigiendo la proa al punto de arribada ó á alguno intermedio en la dirección que se desee seguir (derrota con proa á punto fijo).

No tenemos conocimiento de que en los viajes aéreos que se han efectuado en el extranjero se haya tenido en cuenta la influencia de estas circunstancias para determinar el trazado de la derrota que haya de seguirse, ni aun de que se haya estudiado la resolución de este problema, reduciéndose siempre á seguir la línea recta dentro de lo que permitan los accidentes orográficos del terreno y la altura que el dirigible pueda alcanzar, habiéndose considerado la derrota rectilínea como la más conveniente en todos los casos. Sin embargo, veremos en el estudio de cada uno de éstos que en la mayoría de las veces no es esta la solución del problema.

Antes de entrar en este estudio conviene fijar las ideas acerca del significado que daremos á algunas palabras que emplearemos para designar algunos conceptos de uso frecuente en la Navegación Aeronáutica.

Llamaremos *trayectoria* de un viaje aéreo la línea que describe en el espacio el centro de gravedad del dirigible; *derrota* la proyección de esta línea sobre un plano horizontal fijo ó sobre la superficie terrestre; *rumbó* la dirección de la derrota en un punto cualquiera de ella; *velocidad absoluta* la que tenga la proyección horizontal del globo en cada momento; *derrota propia* la línea que describa la proyección horizontal del dirigible sobre un plano que se mueva con la velocidad y dirección del viento, ó sea la que describe el globo con relación á la masa de aire en donde se mueve; *rumbó propio* la dirección de la derrota propia en un punto de ella, ó sea la dirección de la proa; *velocidad propia* la del dirigible; *deriva* ó *abatimiento* el desplazamiento que sufre el dirigible por la acción del viento, apartándole de su derrota propia, y *ángulo de deriva* el que forma el rumbo con la dirección de la proa ó rumbo propio.

Si fuese posible conocer exactamente la intensidad y dirección del viento en cada punto del terreno y en cada momento antes de emprender el viaje, se podría determinar analíticamente la derrota más conveniente que habría que seguir en cada caso, pues siendo (fig. 58).



$$v = F(x, y, t) \quad \text{y} \quad \omega = f(x, y, t)$$

las funciones de las coordenadas y del tiempo que representarán la velocidad del viento y su dirección, empleando el cálculo de variaciones podríamos hallar la función $y = \psi(x)$ que daría un mínimo para el valor del tiempo:

$$T = \int dx \frac{1}{F(x, y, t) \cos \left[f(x, y, t) + \arccos \frac{1}{\sqrt{1+y^2}} \right]} + \sqrt{V^2 - F(x, y, t)^2} \operatorname{sen}^2 \left[f(x, y, t) + \arccos \frac{1}{\sqrt{1+y^2}} \right]}$$

y dicha función representaría la derrota de mínima duración, ó suponiendo variable la velocidad propia V entre cero y el límite máximo que pueda alcanzar, podríamos obtener las funciones $y = \varphi(x)$ y $V = \varphi(x)$ que hagan mínimo el valor del trabajo motor $M = C \int \varphi(x)^3 dx$, y estas funciones nos darían la derrota de mínimo trabajo.

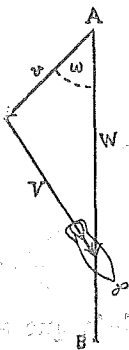
Estos problemas, en la mayoría de los casos serían complicadísimos, si no imposibles de resolver, y, además, como la meteorognosia no está en la actualidad tan desarrollada que permita una predicción tan exacta del tiempo, consideramos inútil intentar la resolución analítica general, y sólo estudiaremos las soluciones gráficas más sencillas de los casos que tengan mayor aplicación en la práctica.

A continuación analizaremos todos los casos que se han mencionado y, como final, estudiaremos la determinación del campo de acción de un dirigible, según el viento reinante, la posición y el número de estaciones de que disponga.

I. Viajes de un punto á otro.

Derrota de mínima duración.

Fig. 59.



Por las condiciones del régimen atmosférico pueden presentarse los cuatro casos siguientes:

1.º Que haya calma ó viento de dirección é intensidad constantes en cualquier lugar del terreno comprendido entre los puntos de partida y arribada, y que se espere que no habrá variación en toda la duración del viaje.

En este caso, la derrota de mínima duración es la línea recta, ó el arco de círculo máximo terrestre, según la extensión del viaje.

Siendo A el punto de partida, B el de arribada, d la distancia entre ellos, V la velocidad propia, v la del viento, W la absoluta y ω el ángulo que forme la dirección del viento con el rumbo AB (fig. 59), resultará:

$$W = v \cos \omega + \sqrt{V^2 - v^2 \operatorname{sen}^2 \omega}$$

Si V es menor que $v \operatorname{sen} \omega$ esta fórmula da un valor imaginario, lo que indica que la dirección AB está fuera del sector abordable del dirigible; que no podrá moverse siguiendo dicha recta, si $v \operatorname{cós} \omega$ es negativo (por ser ω mayor que 90°) y mayor que $\sqrt{V^2 - v^2 \operatorname{sen}^2 \omega}$ la velocidad absoluta W resulta negativa, por estar AB dentro del sector opuesto por el vértice al abordable. En este caso el globo se movería sobre la prolongación del rumbo AB , pero en sentido contrario (fig. 60).

El tiempo que se empleará en el viaje será

$$T = \frac{d}{v \operatorname{cós} \omega + \sqrt{V^2 - v^2 \operatorname{sen}^2 \omega}}$$

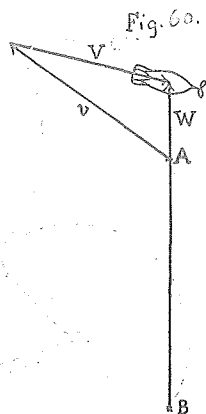
que resultará imaginario ó relativo en los mismos casos que la velocidad absoluta. Si este tiempo resultara mayor que el máximo de marcha del dirigible, habrá que efectuar el viaje haciendo el número de escalas necesarias en los puntos intermedios que se crean más convenientes. Si la recta AB cortara algún punto del terreno de cota superior á la altura máxima que el dirigible pueda alcanzar, habrá que rodear el obstáculo lo más proximamente posible á la línea recta, conservando rectilíneos cada uno de los trayectos parciales.

Durante el viaje, la dirección de la proa ó rumbo propio formará con el rumbo un ángulo de deriva, cuyo seno es igual á $\operatorname{sen} \omega \cdot \frac{v}{V}$. Este valor se hace mayor que la unidad cuando V es menor que $\operatorname{sen} \omega \cdot v$, lo que vuelve á demostrar la imposibilidad de seguir el rumbo AB en este caso.

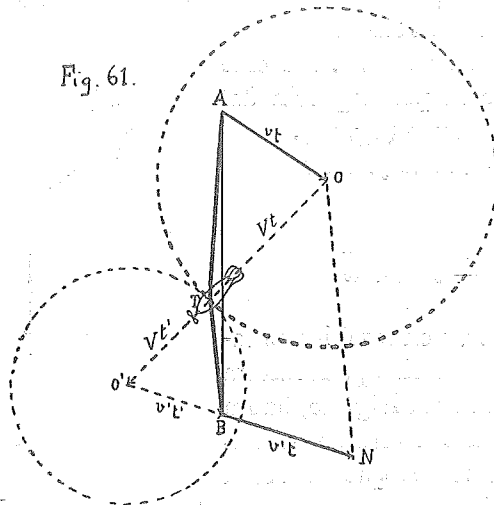
2.º Caso de viento de igual dirección é intensidad en cualquier lugar del terreno, y que se espere que cambiará simultáneamente y por igual en otro viento determinado.

Los cambios de viento, cuya previsión es más frecuente, se reducen á un aumento ó disminución de intensidad á una hora dada ó á un cambio de dirección en un sentido determinado, originados todos estos cambios por los vientos periódicos ó por los ciclónicos que acompañan á una depresión, cuya intensidad y movimientos probables pueden ser anunciados por los observatorios meteorológicos.

El problema general de determinar la derrota de mínima duración entre A y B (fig. 61) sabiendo que hay un viento v , que al cabo de un tiempo t cambiará en otro v' , puede resolverse gráficamente del modo siguiente:



El lugar geométrico de los puntos que puede ocupar el dirigible al cabo de un tiempo t de marcha con viento v , ó sea en el momento de efectuarse el cambio de viento, es una circunferencia de radio Vt y de centro



O sobre la dirección del viento v y á una distancia de A igual á $v t$. Igualmente, el lugar geométrico de los puntos que puede ocupar el dirigible para llegar á B con viento v' en un tiempo t' será otra circunferencia de radio $V't'$ y de centro en O' á barlovento de B y distante $v' t'$ de este punto. Si hacemos variar á t' , creciendo desde cero, tendremos una serie de circunferencias homotéticas con B , cada vez de radio mayor y la que resulte tangente

á la circunferencia O nos dará la solución del problema, pues la derrota de mínima duración deberá pasar por el punto de tangencia.

Si tomamos á sotavento de B una magnitud $BN = v' t'$ y unimos N con O , en los triángulos $O'BT$ y $O'NO$ tendremos

$$O'B : BN :: v't' : v't :: t : t' :: Vt : V't :: O'T : T'O$$

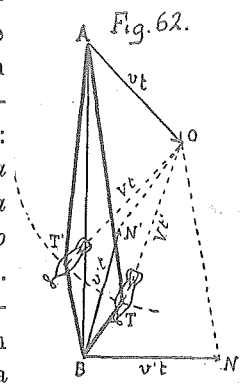
luego TB y ON son paralelas. De aquí se deduce la construcción siguiente: Trácese en el sentido de v y v' magnitudes $v t$ y $v' t'$ por A y B respectivamente, únense sus extremidades por una recta ON y trácese por B una paralela á esta recta. Haciendo centro en la extremidad O de la primera y con radio Vt , trácese un arco que corte á esta paralela y uniendo el punto de intersección T con A y B la línea quebrada resultante ATB será la derrota de mínima duración.

La dirección de la proa será paralela á OT y constante durante todo el viaje, por lo tanto la derrota propia es rectilínea y de esta dirección; el tiempo total T invertido en el viaje $= t + t'$ podrá calcularse dividiendo OO' por V ó dividiendo $O'B$ por v' y sumándole t ; el rumbo de partida difiere de AB tanto más cuanto menor sea la velocidad propia V , y, por el contrario, el rumbo de arribada es independiente de esta velocidad.

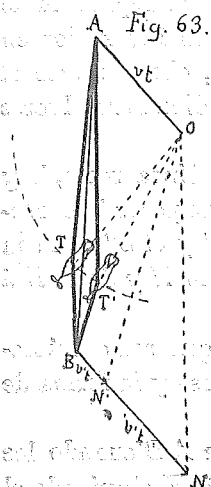
Si la paralela á ON por B no cortase á la circunferencia de centro O ,

sería imposible llegar á *B*, y si el punto *B* estuviese dentro de esta circunferencia podría llegarse á *B* antes del cambio de viento, y por lo tanto estaríamos en el primer caso.

Si solamente se espera un cambio de dirección del viento sin variación de intensidad, haciendo la construcción correspondiente (fig. 62) se deduce que la paralela á *ON* por *B* cortará á la circunferencia *O* con relación á la recta *AB*, del lado que esté *O* ó en el opuesto, según que la nueva dirección forme con *AB* un ángulo mayor ó menor que la primera. De esto se deduce la siguiente regla práctica: *Cuando el viento tienda á ponerse perpendicular á la dirección del punto de arribada, deberá desviarse la derrota hacia barlovento, y si tiende á ponerse paralelo ó á cambiar de sentido, deberá desviarse hacia sotavento.*



Si, por el contrario, es la intensidad la que se espera que cambie, conservándose la dirección, se ve en la figura 63 que la paralela á *ON* por *B* cortará á la circunferencia *O* con relación á la *AB* del lado de *O* si el viento *v'* es menor que *v*, y en caso contrario si es mayor, deduciéndose también la siguiente regla: *Si el viento tiende á calmar, deberá desviarse la derrota hacia sotavento, y si tiende á aumentar, hacia barlovento.*



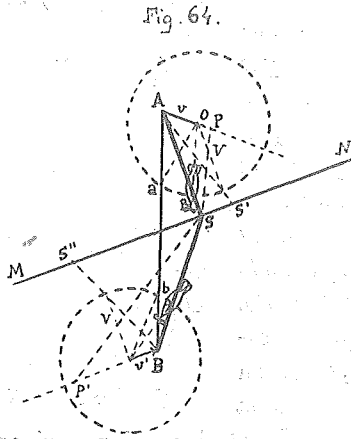
Estas reglas pueden resumirse en la siguiente: *Convendrá desviar la derrota á barlovento cuando el viento tienda á aumentar de componente transversal á la dirección del punto de arribada, y á sotavento cuando tienda á disminuir.*

3.º Caso de viento de dirección é intensidad distintas en varias partes del terreno comprendido entre los puntos de partida y arribada, pero constantes en toda la duración del trayecto.

Este caso es muy frecuente, sobre todo en terreno montañoso ó surcado por ríos de importancia, cuya influencia en el régimen de vientos ya hemos estudiado. Supondremos para simplificar la solución que sólo existen dos clases de vientos distintos sobre el terreno separados por una línea divisoria.

Sean (fig. 64) *A* y *B* los puntos de partida y arribada, y *MN* la línea á partir de la cual el viento *v* cambia en el *v'*. Si á partir de *A* y en la dirección del viento *v* se toma una magnitud *AO* = *v* y haciendo centro en *O* se traza una circunferencia de radio *V*; trazando por *A* una direc-

ción de derrota cualquiera AS la parte AR interceptada entre A y la circunferencia será igual á la velocidad absoluta W en esta dirección, y el tiempo que se empleará en llegar á la línea MN se obtendrá dividiendo el camino recorrido AS por la velocidad AB . Si tomamos como unidad de tiempo el radio OR y trazamos por S una paralela al radio correspondiente, la magnitud SP será igual al tiempo empleado en llegar á la línea MN siguiendo la dirección AS . Si MN es una línea recta, la dirección AS' cuyo radio es perpendicular á MN es la que da menor tiempo, ó sea cuando se marche con rumbo propio perpendicular á la divisoria.



Análogamente, trazando por B la BO' en dirección contraria al viento v' y de magnitud igual á su intensidad, y con centro en O' y radio V la circunferencia de velocidades absolutas para cada dirección de arribada, podremos calcular el tiempo que, siguiendo una cualquiera de ellas, se emplearía en llegar á B , el cual estaría representado por una magnitud como SP' ; sumando ahora los tiempos invertidos en llegar de A á un punto de MN y de este punto á B , obtendremos el tiempo total empleado en el viaje para cada derrota, pudiendo resolverse así el problema por tanteos.

Para reducir el número de ellos cuando MN es una línea recta, hay que tener en cuenta que el punto de MN por donde deba pasar la derrota de mínima duración estará comprendido entre el S' y el S'' que son los correspondientes á los mínimos tiempos de llegada á MN y de MN á B respectivamente.

Análogo procedimiento puede seguirse cualquiera que sea el número de líneas divisorias de vientos que haya de encontrarse y la forma de ellas.

Los dos puntos S' y S'' estarán á un mismo lado de AB cuando los radios Oa y Ob correspondientes á las direcciones de V siguiendo el rumbo AB , formen con MN ángulos agudos hacia este mismo lado de AB . De la inspección de la figura se deduce que en este caso el lado á que se encuentran S' y S'' es el mismo hacia donde deba desviarse la derrota según las reglas del caso anterior. Con arreglo á esto puede darse la regla siguiente: Cuando la dirección de la proa deba pasar por la normal á la divisoria de vientos siguiendo la derrota rectilínea, deberá desviarse ésta según las reglas del caso anterior.

Si no se verificase esta circunstancia y los vientos de un lado y otro de la divisoria fuesen muy desigualmente favorables para la derrota rectilínea, deberá desviarse ésta en el sentido que permita navegar por más tiempo con el viento más favorable, y si esta desigualdad no fuese muy marcada, y esta regla no coincidiese con la anterior, convendrá determinar la derrota por tanteos, de donde se deduce la regla siguiente:

Si el dirigible no ha de cortar normalmente la divisoria siguiendo la derrota rectilínea, deberá desviarse ésta aumentando el ángulo que forme la quilla con la divisoria, si el viento que se espera es más favorable, y disminuyéndolo en caso contrario, siempre que los dos vientos fuesen muy desigualmente favorables, ó si esta regla no se opone á la anterior; en otro caso se seguirá la línea recta ó se calculará la desviación por tanteos.

Cuando el viento varía con la altura, habrá que elegir para la navegación aquélla que tenga el viento más favorable, dentro de los límites que permitan las condiciones del dirigible.

4.º Caso de viento variable con el tiempo y con el lugar.

La resolución más realizable del problema en este caso consiste en seguir el método de tanteos, calculando gráficamente los tiempos para varias derrotas, y determinar entre cuáles está comprendida la de mínima duración. Como reglas prácticas se pueden seguir las de los casos anteriores, si sus resultados no se oponen, y en este caso seguir la línea recta, si los cambios que se esperan no fuesen muy considerables ó su predicción poco segura.

Derrota de mínimo trabajo.

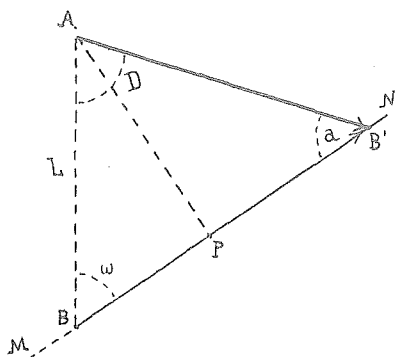
El trabajo desarrollado por un dirigible en marcha es igual al producto de la resistencia que le opone el aire (fuerza) por la longitud de la derrota propia (camino recorrido). La resistencia sabemos que es proporcional á V^2 , y el camino recorrido igual á $V T$, por lo tanto, el trabajo será proporcional á $V^3 T$; veamos ahora en cada caso qué derrota y qué velocidad (1) deberá emplearse para que este producto sea mínimo:

1.º *Viento constante.*—Supongamos la marcha del dirigible referida á la masa de aire en movimiento (fig. 65). El punto de arribada B se moverá con velocidad igual á la del viento, pero en sentido contrario, y el dirigible tendrá que describir su derrota propia para alcanzar con el menor trabajo motor al punto de arribada.

(1) En los aeroplanos, V no puede variar más que dentro de muy estrechos límites por depender de ella la sustentación, por lo tanto, para determinar la derrota de mínimo trabajo no es aplicable este procedimiento, pudiendo considerarse como solución la derrota de mínima duración recorrida con la velocidad de máximo rendimiento del motor.

Desde luego se deduce que la derrota propia debe ser rectilínea; que el encuentro de los móviles debe verificarse en un punto situado delante

Fig. 65.



del pie de la perpendicular P , puesto que así se podrá reducir la velocidad V con un mismo camino recorrido; que la llegada al punto de encuentro de ambos móviles debe verificarse simultáneamente, porque si el dirigible tuviese que esperar el punto de llegada sobre la recta MN , podría con la misma velocidad haberlo alcanzado en un punto anterior disminuyendo el camino recorrido, y, por último, siendo análogas las condiciones del problema para cada punto de la derrota, se deduce que

la velocidad V debe ser constante durante toda ella.

En el triángulo $AB'B'$, en que BB' y AB' son proporcionales a v y V , por ser caminos recorridos en el mismo tiempo T , se verifica

$$V = \frac{v \operatorname{sen} \omega}{\operatorname{sen} D} \quad \text{y} \quad AB' = \frac{L \operatorname{sen} \omega}{\operatorname{sen} a},$$

y el trabajo desarrollado

$$K \cdot S \cdot V^3 T = K \cdot S \cdot L v^2 \operatorname{sen}^3 \omega \frac{1}{\operatorname{sen} a \operatorname{sen}^2 D},$$

siendo K el coeficiente de resistencia del aire y S la superficie de la sección máxima del dirigible.

Este valor será mínimo cuando $\operatorname{sen} a \operatorname{sen}^2 D$ sea máximo, y como $\operatorname{sen} D = \operatorname{sen}(a + \omega)$, tendremos

$$\frac{d \operatorname{sen} a \operatorname{sen}^2(a + \omega)}{d a} = \cos a \operatorname{sen}^2(a + \omega) + \operatorname{sen} a 2 \operatorname{sen}(a + \omega) \cos(a + \omega),$$

de donde se deduce que

$$\operatorname{tg} D = 2 \operatorname{tg} a.$$

De todo lo anterior se deduce que: *la derrota de mínimo trabajo de un punto á otro con viento constante es la línea recta que los une recorrida con una velocidad tal que la tangente del ángulo de deriva sea doble de la del ángulo que forme la dirección de donde venga el viento con la de la proa.*

Esta condición se puede expresar igualmente, diciendo que: *la pro-*

yección de la velocidad del viento sobre la dirección de la proa debe ser igual á los dos tercios de la velocidad propia.

Despejando el valor de $tg a$ y $tg D$ en función de ω se tienen las expresiones:

$$tg a = \frac{3}{4} \cot \omega + \sqrt{\frac{9}{16} \cot^2 \omega + \frac{1}{2}}$$

y

$$tg D = \frac{3}{2} \cot \omega + \sqrt{\frac{9}{4} \cot^2 \omega + 2}$$

y despejando V entre estas ecuaciones y la anterior, se tiene:

$$V = v \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{2} \cot \omega + \sqrt{\frac{1}{4} \cot^2 \omega + \frac{2}{9}}\right)^2 + \frac{4}{9}}}$$

Este valor de V , que llamaremos *velocidad económica*, se puede hallar gráficamente prolongando la magnitud v á partir de A , y en sentido contrario una cantidad igual á su mitad, y hallando la intersección I de la circunferencia que tenga como diámetro la recta $\frac{3}{2} v$, con la línea AB .

Uniendo I con la extremidad de v , tendremos V en intensidad y dirección, y la velocidad absoluta W estará representada por AI . Fácilmente se ve, por la inspección de la figura 66, que con esta construcción queda cumplida la condición

$$v \cos a = \frac{2}{3} V$$

ó sea

$$V = \frac{3}{2} v \cos a.$$

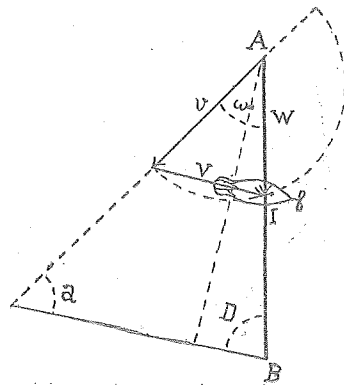
La velocidad absoluta W es igual á

$$v \left(\frac{1}{4} \cos \omega + \sqrt{\frac{1}{16} \cos^2 \omega + \frac{1}{2}} \right)$$

el tiempo empleado en el viaje

$$T = \frac{L}{v \left(\frac{1}{4} \cos \omega + \sqrt{\frac{1}{16} \cos^2 \omega + \frac{1}{2}} \right)}$$

Fig. 66.



y el trabajo mínimo desarrollado será:

$$KSLv^2 \frac{\operatorname{tg}^2 \omega}{\cos \omega \left(\frac{17}{18} + \frac{2}{9} \operatorname{tg}^2 \omega + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2}{9} \operatorname{tg}^2 \omega} \right) \left(\frac{1}{4} + \sqrt{\frac{1}{16} + \frac{1}{2 \cos \omega}} \right)}$$

Para calcular gráficamente el valor del trabajo mínimo desarrollado (fig. 67), una vez construido el triángulo de velocidades por el procedimiento anterior, habrá que hallar el producto de BP (longitud de la derrota propia) por el cuadrado de QI (velocidad económica), y multiplicar el producto así obtenido por KS . Si para facilitar la operación tomamos á KS como unidad de fuerza y RQ por unidad de longitud, SQ (proyección de V sobre el diámetro), será el cuadrado de V , y tomando $QT = PB$, uniendo T con R y trazando por S la paralela SU á RT , la magnitud QU será el trabajo desarrollado.

Puede darse el caso de que la velocidad económica resulte mayor que la máxima propia que pueda alcanzar el dirigible, entonces la derrota de

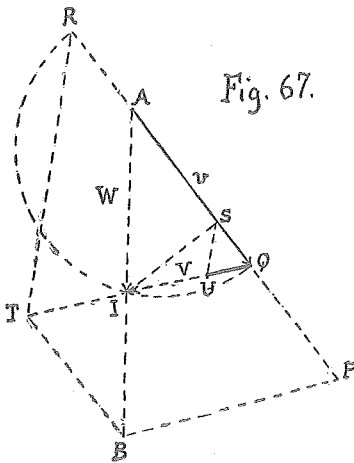
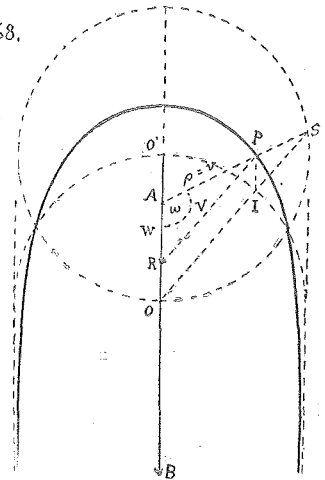


Fig. 67.

Fig. 68.



mínima duración será también la de mínimo trabajo. Si V_m es la velocidad propia máxima, esto sucederá cuando

$$v > V_m \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cot \omega + \sqrt{\frac{1}{4} \cot^2 \omega + \frac{2}{9}} \right)^2 + \frac{4}{9}}$$

por lo tanto, si siendo AB la derrota que hay que seguir (fig. 68), se

Como como eje de coordenadas polares esta recta y como polo el punto de partida A , y se traza la curva representada por la ecuación

$$\rho = V_m \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cot \omega + \sqrt{\frac{1}{4} \cot^2 \omega + \frac{2}{9}}\right)^2 + \frac{4}{9}}$$

Esta curva señalará el lugar geométrico de las extremidades de los vientos cuyas velocidades económicas son iguales á V_m .

Este lugar geométrico es una curva de 8º grado que puede construirse por puntos trazando con centro en O , sobre AB y á $\frac{2}{3} V_m$ de A , una circunferencia con radio V_m , y con un centro O' sobre la prolongación de AB y á $\frac{1}{3} V$ de A otra circunferencia del mismo radio; uniendo ahora un punto cualquiera S de esta última con A y O y trazandola IP paralela al eje desde el punto I de intersección de OS con la circunferencia O , el punto P determinado sobre AS pertenece á la curva, puesto que trazando la PR paralela á IO , el triángulo APR será el de las velocidades, y la PR velocidad económica, es igual á $OI = V_m$ velocidad propia máxima.

Esta curva corta á la prolongación del eje á una distancia igual á $\frac{2}{3}$ de V_m , y tiene dos asíntotas paralelas al eje y separadas de éste una distancia igual á V_m .

Sustituyendo en la ecuación de la curva el valor V_m por otros inferiores, tendremos una serie de curvas semejantes que determinan los vientos de igual velocidad económica.

Cuando $\operatorname{tg} \omega = \sqrt{2}$ la velocidad económica es igual á la velocidad absoluta, y si $\operatorname{tg} \omega = \sqrt{5}$ aquélla es igual á la velocidad del viento. Las circunferencias tales como la O' , cuyos centros están sobre la prolongación de AB y á una distancia de A igual á la mitad del radio, determinan los vientos para los cuales el tiempo T , empleado en el trayecto AB con derrota de mínimo trabajo, es constante. Este tiempo es igual á AB , ó sea L , dividido por $\frac{2}{3}$ del radio.

De todo lo anterior se deducen las siguientes consecuencias:

- 1.ª Cuando el viento es directo la velocidad económica es igual á cero.
- 2.ª Los vientos de componente positiva que formen con el rumbo un ángulo cuya tangente sea menor que $\sqrt{2}$, tienen sus velocidades económicas mayores que las absolutas correspondientes, y, por lo tanto, son fa-

favorables para las velocidades económicas, siendo los demás vientos perjudiciales para estas mismas velocidades.

3.^a La velocidad económica para un viento contrario es igual á $\frac{3}{2}$ de la del viento y la absoluta igual á $\frac{1}{2}$ de la misma.

4.^a Siguiendo la derrota de mínimo trabajo, el dirigible navega siempre con viento de través de proa, ó de proa cuando el viento es contrario.

5.^a La velocidad económica no puede ser mayor de $\frac{3}{2}$ de la del viento.

6.^a El ángulo que forma el viento con el rumbo propio no puede ser mayor que el de deriva.

7.^a El camino recorrido por el viento durante el viaje, así como la longitud de la derrota propia, son independientes de la velocidad del viento.

En la figura 69 están trazadas las curvas que determinan los vientos

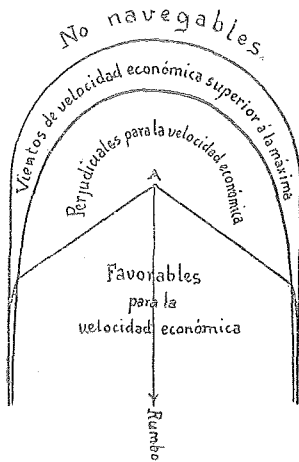
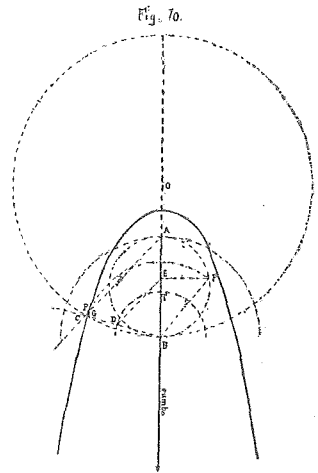


Fig. 69



favorables y perjudiciales para la velocidad económica y para la velocidad máxima propia.

La curva, cuya ecuación polar es

$$\rho^2 = \frac{C \cos \omega \left(\frac{17}{18} + \frac{2}{9} \operatorname{tg}^2 \omega + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2}{9} \operatorname{tg}^2 \omega} \right) \left(\frac{1}{4} + \sqrt{\frac{1}{16} + \frac{1}{2 \cos \omega}} \right)}{K S L \operatorname{tg}^2 \omega},$$

determinará los vientos, para los cuales el trabajo mínimo para navegar de A á B (fig. 70) es constante é igual á C. Esta curva puede construirse por puntos, trazando con centro en O sobre la prolongación de AB igual

á L , y á una distancia de A igual á $\frac{1}{2} L$, una circunferencia con radio $OB = \frac{3}{2} L$, y con centro en B otra circunferencia con radio BT igual al trabajo mínimo que se considere C , y á continuación únase el punto C de la circunferencia O á sotavento de A con B ; por el punto D de intersección de CB con la circunferencia B , trácese una paralela á AC hasta cortar en E á la AB , y por este punto una perpendicular á esta recta hasta cortar en F á la circunferencia de diámetro AB . Llevando ahora la longitud BF sobre la recta BC , se determinará el punto G , y trazando por él una paralela á AB hasta cortar á la dirección del viento AC , se tendrá el punto P perteneciente á la curva de vientos de mínimo trabajo constante $= C$, tomando AB como unidad de longitud y al producto KS como unidad de fuerza. Por la construcción seguida, se ve fácilmente que siendo

$$ABE = 1 \quad \text{y} \quad BT = C, \quad CB = VT, \quad BE = \frac{C}{VT} = \frac{TV^3}{VT} = V^2$$

$$BF = \sqrt{BE} = V \quad \text{y} \quad AP = BG \frac{v}{V} = BF \frac{v}{V} = v = \rho.$$

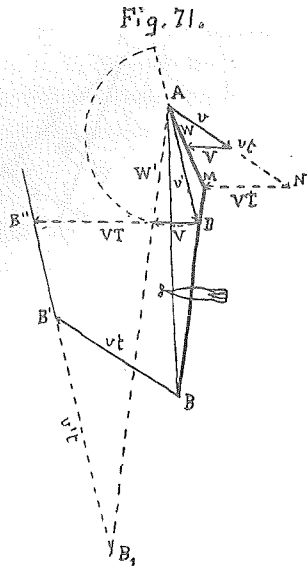
Las curvas de vientos de trabajo mínimo constante, tienen la forma de la indicada en la figura, cortan á la prolongación del rumbo, ó sea al eje, á distancias de A iguales á

$$-\sqrt{\frac{4}{27} \frac{C}{L}} \quad \text{y} \quad +\infty$$

y no tienen asíntotas.

2.º *Viento variable con el tiempo.*—Suponiendo, como en el caso anterior, el movimiento del dirigible referido á la masa de aire, el punto de arribada describirá, no una recta como en el caso de viento constante, sino una línea cuya dirección en cada momento será la del viento, pero recorrida con velocidad igual y contraria á la de éste. Para simplificar el problema, supondremos que el viento v sólo sufre un cambio en otro v' al cabo de un tiempo t de la partida.

En este caso, el punto de arribada B describirá una línea quebrada $B'B''$ (fig. 71), siendo $B'B = vt$. Tomando en prolongación de

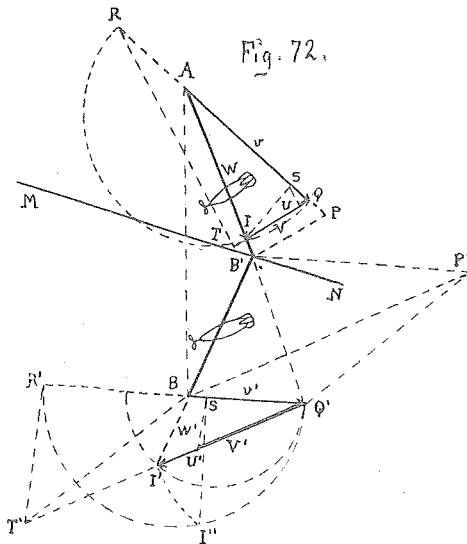


$B' B''$ y á partir de B' una magnitud $B' B_1 = v' t$, el problema queda reducido al del caso anterior, pues sería lo mismo que si el viento fuese v' constante y el punto de arribada estuviese en B_1 , pudiendo determinarse así la velocidad propia V de trabajo mínimo en magnitud y dirección, la cual, compuesta con v dará el rumbo y velocidad absoluta de partida $A C$, que limitaremos en un punto M correspondiente al tiempo t , para lo cual tomaremos $A N = v t$ y trazaremos por N una paralela á V . La segunda parte de la derrota será la recta $M B$ recorrida conforme al caso anterior.

La derrota propia es rectilínea, y está representada en magnitud y dirección por la recta $D B''$; la velocidad económica es constante é igual á V ; la derrota absoluta es también rectilínea cuando la componente transversal del viento no varía, y es una línea quebrada hacia barlovento ó hacia sotavento cuando aumenta ó disminuye dicha componente transversal, análogamente á la derrota de mínima duración, siendo, por lo tanto, aplicables las mismas reglas prácticas de esta derrota.

Si el viento v' fuese de menor trabajo mínimo que el v , la solución consistiría en esperar para emprender el viaje á que el nuevo régimen estuviera establecido, si la partida no hubiera de verificarse en un momento dado.

3.º *Viento variable con el lugar.*—Supongamos como en la derrota de mínima duración que haya una línea divisoria de los vientos v y v' , y sea ésta la $M N$ (fig. 72).



Para resolver el problema, el procedimiento más expedito consiste en calcular gráficamente la suma de trabajos mínimos correspondientes á varios puntos de paso de la divisoria y por tanteos determinar cuál sea el perteneciente á la derrota que se busca. Como es de suponer, en el cálculo gráfico de cada uno de los trabajos mínimos hay que emplear las mismas unidades, por lo tanto, si en el primero se toma como unidad de longitudes y de ve-

locidades $\frac{3}{2} v$ (siguiendo el procedimiento de la figura 67), en el segundo habrá que tomar esta misma unidad, no pudiendo emplearse la semi-

circunferencia de diámetro $\frac{3}{2} v'$ para elevar al cuadrado el valor de V' sino una de diámetro $\frac{3}{2} v$ igual á la empleada en el cálculo análogo de la otra operación.

Por regla general, la derrota propia no es rectilínea, ni la velocidad constante antes y después del paso de la divisoria, pudiendo aplicarse las reglas prácticas de la derrota de mínima duración en el caso análogo.

4.º *Viento variable con el tiempo y el lugar.*—En este caso se emplearán los procedimientos explicados para cada caso aislado, y procediendo después por tanteos.

En todos los casos de derrota de mínimo trabajo debe de tenerse en cuenta que los motores y propulsores empleados en la aeronáutica, el rendimiento es máximo para un cierto régimen de marcha para el que están calculados, y, por lo tanto, si se hace disminuir la velocidad propia por debajo de este régimen (generalmente próximo á la velocidad máxima), el consumo de combustible ó de energía de que se disponga es algo mayor que el proporcional á $T V^3$, y, por lo tanto, la derrota de mínimo trabajo motor (ó sea de mínimo consumo de combustible) se conseguirá marchando con una velocidad algo mayor que la calculada, para que el ángulo que forme la dirección del viento con la de la proa sea algo mayor que a , pero sin llegar á 90° , pues para esto tendría el consumo de combustible que ser proporcional á $T V$, lo que no llega á ocurrir en ningún motor aeronáutico. Este ángulo se aproximará tanto más á a , cuanto más constante sea el rendimiento del sistema motor-propulsor para las diferentes velocidades.

Derrota de altura máxima.

El problema consiste en determinar la derrota que ha de llevar un dirigible que deba marchar de un punto á otro, y que, ya por mantenerlo lo más alejado posible del fuego enemigo en tiempo de guerra, ó por evitar la proximidad de obstáculos que puedan ofrecer peligro en una marcha nocturna ó en condiciones de visualidad difícil, convenga efectuar el viaje á la mayor altura posible sobre el suelo durante todo el trayecto.

La determinación de esta derrota es un problema puramente topográfico, que se resolverá fácilmente con el plano, de modo análogo al empleado para el trazado de carreteras entre dos puntos, solamente habrá que tener en cuenta las observaciones siguientes:

1.º La altura máxima del terreno que se recorra debe ser inferior á la máxima que pueda alcanzar el dirigible.

2.º Esta altura máxima debe hallarse lo más al final del trayecto que sea posible, que es cuando el dirigible estará más apto para alcanzarla con menor sacrificio de lastre.

3.º Si no fuese posible efectuar lo anterior, se debe procurar que el paso por la altura máxima corresponda con las primeras horas del día, á fin de aprovechar el efecto del golpe de sol, si el viaje se efectuase en globo dirigible.

4.º Dentro de estas condiciones debe elegirse el trazado que dé menor altura media del terreno sobre el mar sin alargar la duración del viaje más de lo conveniente, según las circunstancias del caso.

Derrota de arribada más probable.

Supongamos que se trata de efectuar un viaje de A á B (fig. 73) con

un viento v , y que, aunque se ignoran los cambios de vientos probables que pueden ocurrir, se conoce la dirección en que suelen saltar los vientos v' , de intensidad superior á la velocidad propia V , los cuales pueden impedir la realización del viaje.

Si B está dentro del sector abordable para el viento v' , la solución de este problema es la derrota de mínima duración; pero si no lo estuviera, se habrá de procurar que lo esté lo antes posible, ó, lo que es lo mismo, llegar con el dirigible á la recta BC , límite del sector, dentro del cual es navegable el viento v' para un dirigible de velocidad propia V y con rumbo á B , y que llamaremos *sector de arribada*. Esta recta BC se obtendrá trazando el triángulo rectángulo BON con hipotenusa $BO = v'$ y cateto $ON = V$.

Para llegar lo antes posible á esta recta habrá que partir con rumbo propio perpendicular á ella, y, por lo tanto, siguiendo la derrota AM hasta llegar á cortarla, y desde este momento se deberá ir describiendo una curva hacia B , á cuyo punto se debe arribar con rumbo igual á la dirección de v' , á fin de que sucesivamente vaya estando B dentro de los sectores abordables de vientos de la dirección de v' , y cada vez de mayor intensidad.

Si el punto M sobre la BC resultase á sotavento de B con relación á v' , se deberá emplear la derrota de mínima duración.

Derrota de proa á punto fijo.

Sea A el punto de partida y B el de arribada (fig. 74), y supongamos que la dirección de la proa ó rumbo propio del dirigible se hace

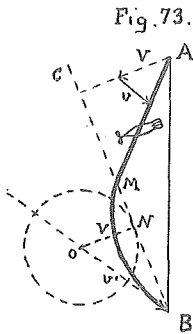
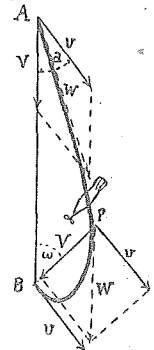


Fig. 74.



pasar constantemente por este último punto. Si v es la velocidad del viento, a el ángulo que forma con la línea AB de longitud l , V la velocidad propia y W la absoluta, las coordenadas polares de la derrota referida al polo B y eje BA se podrán deducir de las ecuaciones diferenciales

$$d\rho = -V dt - v \cos(a + \omega) dt \quad d\omega = \frac{v dt \operatorname{sen}(a + \omega)}{\rho}$$

de las que se deduce eliminando dt

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{V}{v} \frac{d\omega}{\operatorname{sen}(a + \omega)} - \frac{d\omega}{\operatorname{tg}(a + \omega)}$$

que, integrada, da la ecuación polar de la derrota

$$\rho = C \frac{\operatorname{ctg} \frac{1}{2}(a + \omega)^{\frac{v}{V}}}{\operatorname{sen}(a + \omega)}$$

Para el punto de partida tenemos

$$l = C \frac{\operatorname{ctg} \frac{1}{2} a^{\frac{v}{V}}}{\operatorname{sen} a}$$

de donde

$$C = \frac{l \operatorname{sen} a}{\operatorname{ctg} \frac{1}{2} a^{\frac{v}{V}}}$$

que sustituido en la ecuación anterior nos dá

$$\rho = l \frac{\operatorname{sen} a}{\operatorname{sen}(a + \omega)} \left(\frac{\operatorname{tg} \frac{1}{2} a}{\operatorname{tg} \frac{1}{2}(a + \omega)} \right)^{\frac{v}{V}}$$

Analizando la ecuación polar de esta curva, que es la conocida con el nombre de *curva del nadador*, se deducen las consecuencias siguientes:

1.^a Cuando V sea menor que v no será posible arribar al punto B aunque esté comprendido en el sector abordable.

2.^a Siendo V mayor que v , la arribada se verificará para un ángulo $\omega = 180^\circ - a$, ó sea con viento de proa. Esta propiedad hace que el empleo de la derrota con proa á punto fijo sea conveniente para preparar la arribada que, como sabemos, es necesario efectuar con la menor velocidad absoluta posible ó sea con viento de proa.

3.^a La duración de un viaje de ida y vuelta entre dos puntos ó de un circuito poligonal cerrado es independiente de la dirección del viento.

4.^a En un viaje de un punto á otro la duración es la misma cuando la proa se dirige continuamente al punto de arribada, que cuando se dirige sucesivamente á puntos intermedios situados en la línea recta que una los extremos.

Salvo en la preparación de la arribada, y cuando sea difícil observar el rumbo sobre el terreno, pudiendo observarse, en cambio el punto de arribada ó alguno de la dirección que se desee seguir, en los demás casos no es conveniente el empleo de esta derrota que aumenta la duración del viaje sin presentar ninguna ventaja importante.

Al preparar la arribada, debe retardarse el empleo de esta derrota todo lo posible á fin de no aumentar la duración del viaje ó el consumo de combustible inútilmente. Para ver en qué momento habrá que comenzar á seguir esta derrota, observaremos que mientras el dirigible la describe con relación al suelo, su derrota propia es la curva llamada *del perro* ó *del perseguimiento*, puesto que se dirige con velocidad constante V hacia el punto de arribada, que con relación al aire, se mueve siguiendo una recta contraria á la dirección del viento y con su misma velocidad v .

La ecuación de esta curva es

$$\varphi = \frac{1}{2} \left[\frac{c y^{\frac{v}{V}+1}}{\frac{v}{V}+1} + \frac{1}{\left(\frac{v}{V}-1\right) c y^{\frac{v}{V}-1}} \right] + C$$

cuando $v \geq V$, ó $\varphi = \frac{1}{2} \left[\frac{c y^2}{2} - \frac{1}{c} \log y \right] + C$ si $v = V$, siendo c y C

constantes que dependen de la posición inicial de los dos móviles. Haciendo variar la distancia inicial AB (fig. 75) las curvas correspondientes

son semejantes y por lo tanto los radios de curvatura mínimos serán proporcionales á estas distancias. Así pues, para ver á qué distancia habría que empezar á describirla bastaría determinar cuál es la que corresponde á la curva cuyo mínimo radio de curvatura sea igual al de la circunferencia más pequeña C que pueda describir el dirigible según su construcción. Suponiendo que ésta fuera la $A' B'$, á una distancia menor que $A' B$ no sería posible seguir la derrota con proa al punto B por no permitirlo la flexibilidad de derrota propia del dirigible.

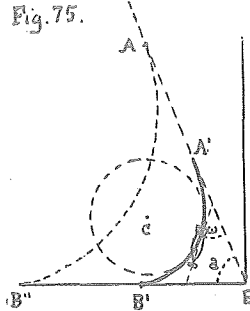


Fig. 75.

Vamos á calcular esta distancia mínima $A' B$.

Por la propiedad fundamental de la curva del perro se verifica que

$$\frac{v dt \operatorname{sen}(a + \omega)}{\rho} = \frac{V dt}{r},$$

siendo r el radio de curvatura en un punto cualquiera, puesto que el ángulo que forme dos tangentes consecutivas ha de ser igual al que formen los radios correspondientes. De aquí deducimos que

$$r = \frac{V \rho}{v \operatorname{sen}(a + \omega)} = \frac{V}{v} l \frac{\operatorname{sen} a}{\operatorname{sen}^2(a + \omega)} \left(\frac{\operatorname{tg} \frac{1}{2} a}{\operatorname{tg} \frac{1}{2}(a + \omega)} \right)^{\frac{V}{v}}$$

Diferenciando esta ecuación con relación á $(a + \omega)$, tendremos:

$$\frac{dr}{d(a + \omega)} = \frac{V}{v} l \operatorname{sen} a \operatorname{tg} \frac{1}{2} a \frac{V}{v} \frac{\operatorname{sen}^2(a + \omega) \frac{V}{v} \left(\operatorname{tg} \frac{1}{2}(a + \omega) \right)^{\frac{V}{v} - 1} \frac{1}{2 \cos^2 \frac{1}{2}(a + \omega)} + \left(\operatorname{tg} \frac{1}{2}(a + \omega) \right)^{\frac{V}{v}} \frac{1}{2} \operatorname{sen}(a + \omega) \cos(a + \omega)}{\operatorname{sen}^4(a + \omega) \left(\operatorname{tg} \frac{1}{2}(a + \omega) \right)^{\frac{2V}{v}}}$$

Este valor se anula cuando

$$\cos(a + \omega) = - \frac{V}{2v},$$

de lo que se deduce que el radio mínimo es

$$r = \frac{V}{v} l \frac{\operatorname{sen} a}{1 - \frac{V^2}{4v^2}} \left(\frac{\operatorname{tg} \frac{a}{2} \sqrt{1 - \frac{V^2}{4v^2}}}{1 + \frac{V}{2v}} \right)^{\frac{V}{v}}$$

y por lo tanto,

$$l = r \frac{v \left(1 - \frac{V^2}{4v^2} \right)}{V \operatorname{sen} a} \left(\frac{1 + \frac{V}{2v}}{\operatorname{tg} \frac{a}{2} \sqrt{1 - \frac{V^2}{4v^2}}} \right)^{\frac{v}{V}}$$

Los distintos valores de $\frac{l}{r}$ en función de $\frac{V}{v}$ y de a pueden obtenerse fácilmente por medio de una tabla de doble entrada ó de un abaco que evite efectuar los cálculos á bordo para preparar la arribada.

Si V es menor que v , ya sabemos que esta derrota no conduce al punto de arribada, por lo tanto, en la preparación de esta operación habrá que dirigir la proa á un punto situado á barlovento de B y algo desviado al costado opuesto á aquel donde esté el dirigible con relación á la dirección del viento, para que al hallarse á barlovento de B pueda dirigir su proa al viento y llegar á B en condiciones de efectuarse la arribada.

II. Viajes de un punto á una línea.

Derrota de mínima duración.

La solución consiste en marchar con la dirección de la proa perpendicular á la línea de arribada si ésta es una recta. Si d es la distancia del punto A á la recta (fig. 76), v la velocidad del viento y ω el ángulo que

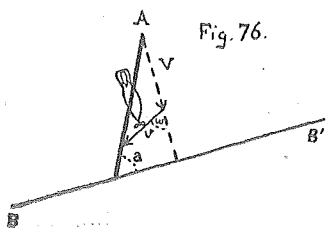


Fig. 76.

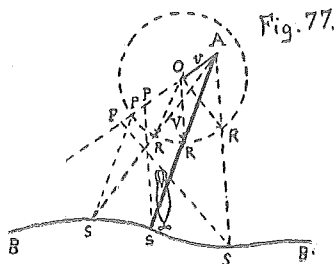


Fig. 77.

forma con la perpendicular á la recta de arribada, el tiempo empleado en el trayecto será

$$T = \frac{d}{V + v \cos \omega}.$$

Si $\omega > 90^\circ$ y $v \cos \omega > V$, la recta de arribada estará fuera del sector abordable en toda su extensión y, por lo tanto, el problema es imposible. El ángulo que forma el rumbo seguido con la recta de arribada

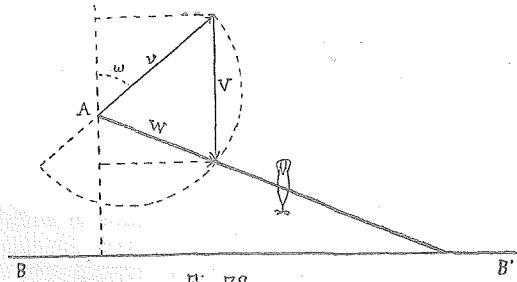
$$a = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{V + v \cos \omega}{v \operatorname{sen} \omega} \quad (\text{fig. 77}).$$

En el caso de que la línea de arribada sea una curva habrá que resolver por tanteos el problema, trazando varios rumbos $AS, AS', ..$ y la circunferencia de velocidades absolutas O y hallando el tiempo que se emplearía en el trayecto siguiendo cada uno de ellos, ó sea el cociente de la longitud de cada derrota por la velocidad absoluta correspondiente; estos valores estarían representados por las magnitudes $AP, AP', ..$ tomando AO como unidad. El radio OR , correspondiente al menor cociente, determinaría la dirección del rumbo propio de la derrota de mínima duración AS .

Derrota de mínimo trabajo.

Suponiendo referido el movimiento del dirigible á la masa de aire como en los casos análogos

anteriores, la recta de arribada se moverá con relación al dirigible paralelamente á sí misma, acercándose ó alejándose de él con una velocidad igual á la proyección de la del viento sobre la normal á la recta, por lo tanto, podremos considerar que el viento siempre es directo ó contrario y de una velocidad $v \cdot \cos \omega$.



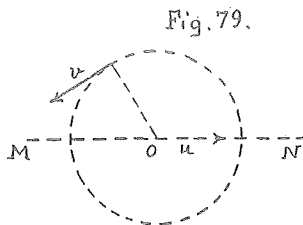
Si la recta de arribada se encuentra á sotavento del punto de partida, la solución consistirá en parar el motor y efectuar el viaje á la deriva con trabajo cero y en un tiempo $\frac{L}{v \cos \omega}$, siendo L la mínima distancia del punto de partida á la recta de arribada; pero si estuviese á barlovento, ó sea cuando el viento sea de componente negativa con relación á la normal, habrá que marchar con una velocidad económica

$= \frac{3}{2} v \cos \omega$ (como se vió en el caso de viento contrario en los viajes de un punto á otro) y con la dirección de la proa á rumbo propio perpendicular á la recta de arribada BB' (fig. 78). La longitud de la derrota propia será $3L$, y el trabajo mínimo desarrollado $K \cdot S \frac{27}{4} L v^2 \cos^2 \omega$.

III. Derrota para huir de una depresión.

Como ya sabemos, en las capas de la atmósfera, donde por regla general se efectúan los viajes aéreos, se puede suponer que en un régimen ciclónico normal el viento se mueve con un ángulo de deflexión igual á 90° y con velocidad sensiblemente constante, mientras el centro de la depresión se mueve siguiendo una recta en dirección W-E.

Si MN (fig. 79) es la línea en la cual se mueve el vórtice de la depresión con velocidad u , y alrededor de éste gira el viento con velocidad v , independiente de la del ciclón, y con dirección normal y á la derecha del gradiente, vamos á calcular qué curva describe cada molécula del viento producido por este régimen, con relación al centro del ciclón O .



La intensidad y dirección del viento relativo para el centro O se hallarán componiendo las que tiene en realidad con la velocidad igual y de sentido contrario á la u del ciclón (fig. 80).

Si tomamos como polo de coordenadas polares el punto O , y como eje la normal á MN por O , tendremos

$$d\rho = u \operatorname{sen} \omega dt \quad d\omega = (v + u \cos \omega) dt,$$

de donde, eliminando dt , tendremos la ecuación diferencial de la curva

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{\operatorname{sen} \omega}{\frac{v}{u} + \cos \omega} d\omega$$

que, integrada, da

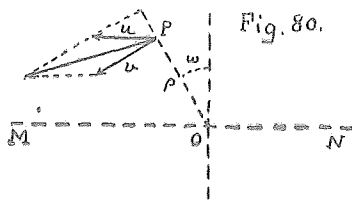
$$\rho = \frac{C}{\frac{v}{u} + \cos \omega}$$

ecuación polar de una curva de segundo grado, que tiene uno de sus focos en el polo del sistema, y uno de sus ejes coincidiendo con el eje de las coordenadas.

Si llamamos l á la distancia del punto de intersección del eje con la curva al centro O del ciclón, resulta

$\rho = l \frac{v + u}{v + u \cos \omega}$, de lo que se deduce que l es el valor mínimo que puede tener.

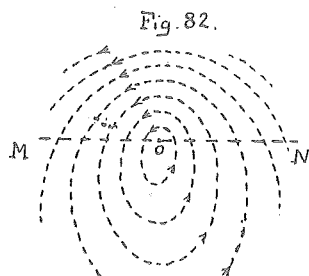
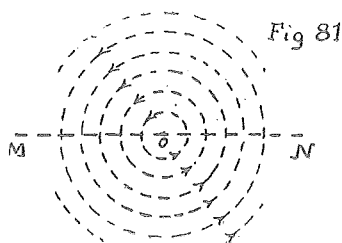
Si u fuese igual á cero, la ecuación sería $\rho = l$, que representa una circunferencia de radio l . Cada molécula giraría alrededor del centro de depresión á distancia invariable (fig. 81).



Si u es menor que v , cada molécula describirá una elipse, uno de cuyos focos es O y el eje mayor coincidirá con el de coordenadas (fig. 82).

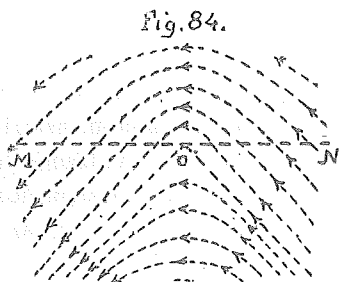
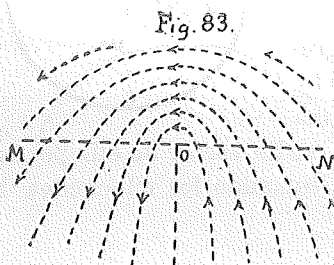
Si u es igual á v , las curvas resultantes son parábolas, cuya ecuación polar es $\rho = l \frac{2}{1 + \cos \omega}$ (fig. 83). Los puntos situados en la prolongación del eje de coordenadas no tendrán movimiento alguno.

Si u es mayor que v , resultarían las ramas de hipérbolas homofoca-



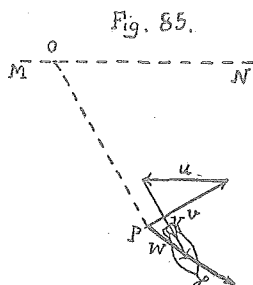
les, representadas en la figura 84, cuyas asíntotas forman con el eje un ángulo $\omega = \arccos \left(-\frac{u}{v} \right)$. Los puntos para los cuales $\cos \omega$ tenga este valor, se moverían en línea recta, hacia el centro de la depresión los situados delante de ella y en sentido contrario los situados detrás.

De la discusión de esta ecuación se deduce que todas las moléculas de aire situadas detrás de la normal á la trayectoria de la depresión en



su centro se mueven acercándose hacia dicho centro y los situados detrás de esta línea se mueven alejándose de él, por lo tanto, así como en la navegación marítima se considera *semicírculo peligroso* el situado al sur de la trayectoria del ciclón, porque en él los vientos tienden á acercar al buque hacia el vórtice, y *manejable* el opuesto por la razón contraria, en la navegación aeronáutica hay que considerar *peligroso* el semicírculo delantero y *manejable* el posterior. Esta diferencia se explica porque al

nivel del mar el ángulo de deflexión es mucho menor que el que tiene el viento en las capas atmosféricas de altura media.

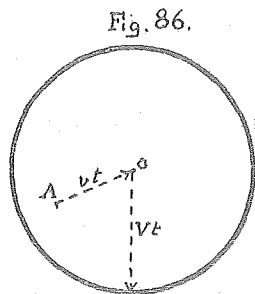


Un dirigible que se encuentra sometido á la acción de una depresión peligrosa, deberá maniobrar de modo que se aleje con la mayor velocidad posible del centro de la depresión, para ello deberá moverse con rumbo propio en dirección opuesta al gradiente (fig. 85), ó sea *con viento á la cuadra por estribor* (siempre refiriéndonos al hemisferio boreal), regla que en la navegación aeronáutica sustituye á la de *ceñir el viento por la amura de estribor* que se emplea en los casos análogos de la navegación marítima.

Campo de acción de un dirigible.

El campo de acción de un dirigible que pueda marchar sin interrupción t horas y acampar en el punto de llegada, sea éste cual fuere, es un círculo cuyo centro se halla á sotavento del punto de partida y á una distancia de él igual á $v t$, y cuyo radio es $V t$ (fig. 86). El área del campo de acción en este caso es constante para cada dirigible, y solamente variará la posición de su centro con la dirección y la intensidad del viento.

Si el dirigible tuviese necesidad de regresar al punto de partida al final de su recorrido, el campo de acción estaría limitado por una curva tal, que, dividiendo la longitud de un radio vector de ella por las velocidades absolutas de ida y de vuelta, y sumando los cocientes, la suma sea constante é igual á t (fig. 87)



$$\frac{\rho}{\sqrt{V^2 - v^2 \sin^2 \omega} + v \cos \omega} + \frac{\rho}{\sqrt{V^2 - v^2 \sin^2 \omega} - v \cos \omega} = t$$

$$\rho = \frac{1}{2} V t \frac{1 - \frac{v^2}{V^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{V^2} \sin^2 \omega}}$$

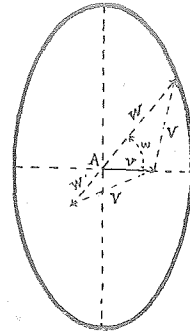
Esta es la ecuación polar de una elipse, cuyo centro está en A , y cuyos semi-ejes son: el menor,

$$= \frac{1}{2} Vt \left(1 - \frac{v^2}{V^2} \right),$$

paralelo al viento; y el mayor,

$$= \frac{1}{2} Vt \sqrt{1 - \frac{v^2}{V^2}},$$

Fig. 87.

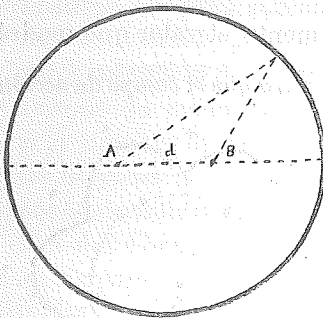


perpendicular al viento. El radio de acción medio para un viento v de dirección indeterminada es la media geométrica de los semi-ejes, ó sea

$$r = \frac{1}{2} Vt \left(1 - \frac{v^2}{V^2} \right)^{\frac{3}{4}}.$$

Si $v = 0$, el campo de acción será la circunferencia de radio $\frac{1}{2} Vt$; como se ve, este radio es mayor que cualquiera de los correspondientes á las elipses en el caso de ser v distinto de cero.

Fig. 88.



Si partiendo del punto A tuviese el dirigible que volver á una estación de arribada B al final de su recorrido, siendo el viento cero, el campo de acción estaría limitado por una elipse (fig. 88), cuyos focos serían los puntos A y B , el semi-eje mayor = $\frac{1}{2} Vt$, y el menor

$$= \frac{1}{2} Vt \sqrt{1 - \frac{d^2}{V^2 t^2}},$$

siendo d la distancia entre las dos estaciones. En este caso, como el dirigible podrá volver también al punto de partida, en realidad el campo de acción se compondrá de la semi-elipse $PM P'$, y el segmento de círculo $PN P'$ (fig. 89).

Diferenciando, con relación á d , el valor del área del conjunto de este

campo de acción, se demuestra que es máximo para un mismo valor del radio r de la circunferencia, cuando

$$d = \frac{1}{4} (\sqrt{64 + \pi^2} - \pi) r = 1,36 r.$$

Esto nos permite resolver el problema de determinar á qué distancia es más conveniente colocar las estaciones, dada la velocidad propia, el tiempo de marcha y la intensidad media del viento que haya de encontrarse en los días navegables.

Siendo v la intensidad media del viento en los días navegables, el radio medio de acción regresando al punto de partido es

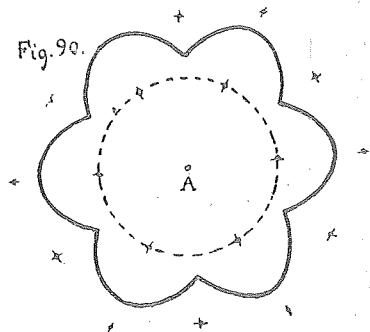
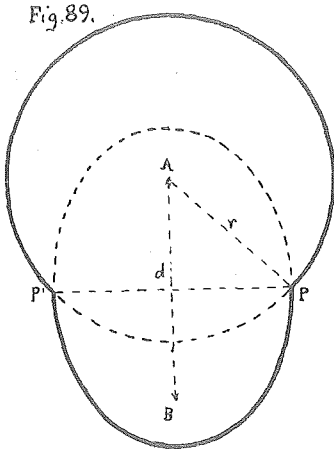
$$r = \frac{1}{2} V t \left(1 - \frac{v^2}{V^2} \right)^{\frac{3}{4}}$$

y la distancia á que deben colocarse las estaciones para que el campo de acción sea máximo, será:

$$d = \frac{1}{8} (\sqrt{64 + \pi^2} - \pi) V t \left(1 - \frac{v^2}{V^2} \right)^{\frac{3}{4}}.$$

Suponiendo $v = \frac{1}{2} V$, que es aproximadamente el valor que tendrá en la práctica, resulta $d = 0,54 V t$, ó sea que: *para que el campo de acción medio de un dirigible sea máximo deben colocarse sus estaciones á una distancia igual aproximadamente á la mitad del recorrido máximo que pueda efectuar con velocidad propia.*

Para cubrir una cierta extensión de terreno con un número ilimitado de estaciones, la disposición más conveniente, é igualdad de las demás circunstancias, es la exagonal, pues así cada estación estaría rodeada de otras seis, situadas todas ellas entre sí á la distancia del campo de acción má-



ximo. Para un dirigible situado en la estación *A* (fig. 90), el campo de acción total tendría la forma indicada en la figura.

Resumen general de la Navegación aeronáutica.

Recibidas las noticias del régimen atmosférico y tiempo probable que comunique el Observatorio Meteorológico con que esté en relación la estación de partida, el Comandante del dirigible en vista de ellas y de las observaciones locales que efectúe, procurará formarse una idea lo más exacta posible del régimen meteorológico, y deducirá de él las variaciones que tendrán lugar, probablemente, en la dirección é intensidad del viento en cada punto del trayecto, así como la influencia sobre ellas de la orografía del terreno y altura de cada capa atmosférica navegable. En vista del resultado que se obtenga en este estudio determinará la altura más conveniente para la navegación, y hará el trazado de la derrota siguiendo las reglas ya explicadas.

En la práctica, salvo casos excepcionales, las derrotas que se seguirán no se ajustarán estrictamente á uno solo de los tipos estudiados en estos apuntes, sino que habrá que tenerse en cuenta varios de ellos, aunque las circunstancias del caso determinarán cuál será el predominante; así, pues, siguiendo la derrota de mínima duración, convendrá tener en cuenta la de mínimo trabajo y determinar en qué puntos del trayecto se puede acortar la marcha propia para disminuir el consumo de combustible, sin gran aumento de la duración; en la derrota de mínimo trabajo convendrá, generalmente, no reducir la velocidad hasta llegar al valor calculado de la económica sino seguir una marcha algo mayor que, aunque de menor rendimiento, no aumentará tanto la duración como si se siguiera estrictamente la derrota que hemos estudiado. También estas derrotas deben ser influenciadas por la de arribada más probable, ó por la de huir de una depresión, etc., según los casos, y solamente la práctica del Comandante del dirigible en la Navegación aeronáutica puede servir para obtener la solución más conveniente, sin que sea posible dar reglas fijas en este punto.

También convendrá tener determinados de antemano los puntos del terreno que se puedan considerar como de refugio contra los vientos peligrosos que más probablemente puedan presentarse, á fin de evitar dilaciones que pudieran dar lugar á accidentes al buscar el refugio si llegase el caso.

Una vez verificadas todas estas operaciones y estando en la seguridad

de que el aprovisionamiento es completo y que todos los mecanismos están dispuestos á funcionar en perfectas condiciones, se pondrá en marcha el dirigible tratando de seguir constantemente la derrota marcada siempre que las predicciones del tiempo que la sirven de fundamento se vayan confirmando. En caso contrario habrá que ir modificando la derrota en el sentido más favorable á fin de que constantemente se siga el rumbo correspondiente á la derrota más conveniente según las predicciones del momento.

Para convencerse de que sigue la derrota que se desea es necesario efectuar continuamente ó por lo menos con cortos intervalos, la determinación del punto por el procedimiento que se crea más aplicable según el caso. Conociendo el punto, el rumbo y la velocidad absoluta por los procedimientos explicados en la primera parte, se pueden determinar la velocidad y dirección del viento haciendo la composición de velocidades, la cual se puede efectuar fácilmente empleando un gráfico en que se tengan trazadas dos series de circunferencias concéntricas de distinto color para evitar confusiones, cuyos radios indiquen las velocidades del viento y absoluta y cuyos centros estén á una distancia igual á la velocidad propia expresada en la misma escala que las anteriores. Colocando la línea de los centros paralela al eje del dirigible, y tomando á partir de uno de ellos la magnitud que represente la velocidad absoluta en su dirección correspondiente, el extremo de esta magnitud indicará con relación al otro centro la intensidad y dirección del viento.

Durante la marcha se deben ir anotando, con la frecuencia que lo permitan las continuas maniobras que habrá que ir efectuando, la hora y minutos de la observación, el punto donde se esté, la altura sobre el nivel del mar que marque el barómetro, el rumbo, el rumbo propio, la velocidad absoluta, la velocidad propia deducida del anemómetro ó del número de revoluciones del motor, la inclinación del eje del dirigible, las presiones interiores, las inclinaciones de los estabilizadores y del timón, las temperaturas seca y húmeda, arrojés de lastre, golpes de válvula y marcha de los ventiladores, y las observaciones dignas de mención que se hagan en el exterior, como son velocidad y dirección del viento en tierra, nebulosidad, etc.

En la mayoría de los casos no podrán los aeronautas atender á la anotación de todas estas observaciones, pero si fueran pasajeros á bordo deberá ser utilizado uno de ellos para esta operación. De todos modos es conveniente llevar en la hoja de ruta un encasillado para todo esto á fin de simplificar las anotaciones que se efectúen.

Al llegar á la proximidad del punto de arribada se empleará la derrota con proa á punto fijo, ó se hará el giro necesario con el menor ra-

dio para presentar la proa al viento cuando se llegue á dicho punto, si la dirección del viento en tierra fuese conocida, efectuándose entonces el descenso con las maniobras propias de cada aparato.

Después del viaje, el Comandante deberá recopilar todos los datos de la ascensión en un resumen en que se expliquen todas las circunstancias de ella, las razones que haya tenido para la elección de la derrota, los procedimientos que haya seguido para determinar el punto, y, en fin, todos los incidentes dignos de mención que redunden en lección provechosa para sí y para los demás que traten de imponerse en la práctica de esta importante rama de la Aeronáutica.

FIN

ÍNDICE

	<u>Páginas</u>
APUNTES DE NAVEGACIÓN AERONÁUTICA.....	5

PRIMERA PARTE

Determinación del punto ó ubicación aeronáutica.....	6
Determinación geográfica del punto.....	7
Primer procedimiento.....	7
Segundo procedimiento.....	8
Tercer procedimiento.....	11
Determinación astronómica del punto.....	16
Aparatos para medir alturas de astros sobre el horizonte.....	17
Aparatos para medir ángulos azimutales.....	19
Aparatos para medir ángulos de un círculo máximo con un vertical....	20
Cronómetros que pueden usarse en la navegación aeronáutica.....	21
Observaciones con un solo astro.....	23
Observaciones con dos ó más astros.....	39
Observaciones generales para los procedimientos de determinación astro- nómica del punto.....	43
Determinación magnética del punto.....	44
Determinación mecánica del punto.....	45
Resumen de los procedimientos para determinar el punto.....	48

SEGUNDA PARTE

Determinación de la derrota.....	51
<i>Del Viento</i>	51
Clasificación de los vientos.....	52

	Páginas
Vientos planetarios.....	52
Vientos terrestres.....	56
Vientos continentales.....	57
Brisas de mar y tierra.....	62
Brisas de valle y montaña.....	63
Vientos ciclónicos.....	64
Ciclones intertropicales.....	65
Ciclones extratropicales.....	68
Anticiclones.....	70
Tormentas.....	72
Tornados.....	75
Torbellinos.....	76
Vientos de eclipse.....	76
Vientos de avalancha.....	76
Brisas de marea.....	77
Vientos volcánicos.....	77
Modificaciones que sufren la intensidad y dirección de los vientos por la influencia del terreno.....	78
<i>Nebulosidad, lluvia, nieve y electricidad atmosférica.....</i>	79
Vientos planetarios.....	82
Vientos terrestres.....	83
Vientos continentales.....	83
Brisas de mar y tierra.....	83
Brisas de valle y montaña.....	83
Vientos ciclónicos.....	83
Vientos volcánicos.....	84
Vientos de eclipse, de avalancha y brisas de marea.....	84
<i>Bases para la predicción del tiempo ó Meteorognosia.....</i>	84
DERROTAS AERONÁUTICAS.....	86
Diferencias con la navegación marítima.....	86
Clasificación de las derrotas.....	90
Viajes de un punto á otro.....	92
Derrota de mínima duración.....	92
Viento constante.....	92
Viento variable con el tiempo.....	93
Viento variable con el lugar.....	95
Viento variable con el tiempo y el lugar.....	97
Derrota de mínimo trabajo.....	97
Viento constante.....	97

	Páginas
Viento variable con el tiempo.....	103
Viento variable con el lugar.....	104
Viento variable con el tiempo y el lugar.....	105
Derrota de altura máxima.....	105
Viajes de un punto á una línea.....	110
Derrota de mínima duración.....	110
Derrota de mínimo trabajo.....	111
Derrota para huir de una depresión.....	111
Campo de acción de un dirigible.....	114
Resúmen general de la Navegación aeronáutica.....	117





Figuras A. (dos diagramas.)

FIGURA A.

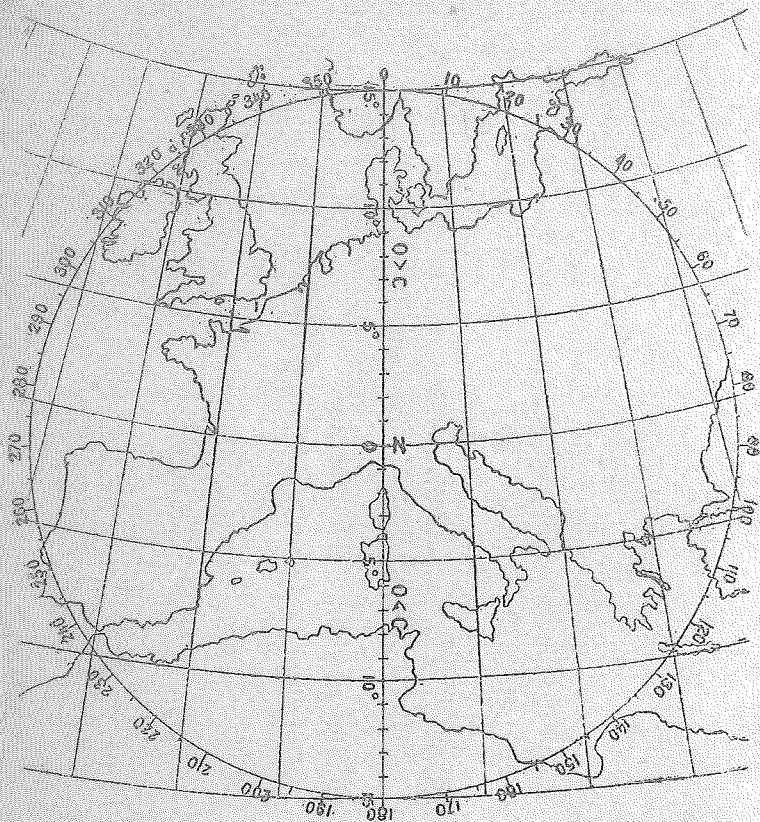


DIAGRAMA N.º 1.

FIGURA A.

30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62

Direction de l'astre →
Index des azimuts A

DIAGRAMA N.º 2.

NOMOGRAMA N.º 1.

5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
60
65
70
75

C

C'

FIGURA B.

