

## El compás celeste "Pfund"

(Para determinar el rumbo en las regiones polares)

(Artículo del Comandante Alton B. Moody, publicado en la revista norteamericana "Navigation".)

Al descubrimiento de principios básicos rara vez acompaña la visión del uso que será posible hacer del conocimiento adquirido. De hecho, muchos de los principios importantes en la vida moderna fueron primeramente considerados como pura teoría y desprovistos de valor práctico, incluso por sus descubridores.

Cuando Benjamín Franklin descubrió el pararrayos no pudo prever la infinidad de aplicaciones que la electricidad pondría en las manos del hombre doscientos años después; ni cuando Marie Curie descubrió la radiactividad pudo imaginarse la bomba atómica.

La polarización de la luz nunca alcanzará en la civilización la influencia que han logrado la electricidad y la radiactividad; pero cuando Erasmus Bartholinus observó la polarización de la luz en Copenhague en 1669, nadie pudo suponer que cerca de tres siglos más tarde sería el remedio para guiar unos monstruosos pájaros mecánicos tripulados por hombres a través de las vastas regiones polares. Esto es precisamente lo que hace en la actualidad el compás celeste "Pfund", cuyo fundamento es la polarización de la luz solar. Pero ¿por qué es necesario? ¿Cómo nació? ¿Cómo funciona? ¿Cuáles son sus limitaciones? ¿Cómo se emplea? Consideremos estas cuestiones por separado.

### Necesidad del compás celeste.

Una de las necesidades de la navegación es determinar la dirección. La dirección de un punto B desde otro punto A se determina fácilmente conociendo la situación de ambos puntos. Esto suele hacerse midiendo directamente en la carta. Así, si una per-

sona desea ir de un punto A a un punto B, puede hallar fácilmente la dirección en que ha de marchar para llegar al punto B. Pero seguir esa dirección determinada ya es otra cuestión.

El problema de control de dirección del movimiento se resuelve normalmente mediante una brújula. En las aeronaves este instrumento proporciona la indicación de la dirección en virtud de la atracción que ejercen los polos magnéticos de la tierra sobre la aguja magnética del avión. A bordo de los barcos se controla la dirección, bien con una aguja magnética o utilizando las propiedades direccionales de un giróscopo o artefacto similar.

Pero la aguja magnética utiliza la intensidad horizontal del campo magnético terrestre, que al acercarse a los polos se va haciendo cada vez más débil. En una amplia zona de las regiones polares no se puede confiar en la aguja magnética. Incluso cuando la fuerza directriz es suficientemente fuerte, la exactitud de la aguja magnética se reduce, a causa de la incertidumbre de los valores de la declinación magnética y las variaciones que ésta experimenta en las diversas horas del día, aumentados con los efectos perturbadores de intensas tempestades magnéticas.

Al acercarse al polo geográfico, la fuerza directriz de la giroscópica marina va disminuyendo progresivamente, hasta que al llegar al polo desaparece completamente.

Los aviadores han recurrido al giróscopo direccional. Este instrumento continúa indicando la dirección en que ha sido colocado durante un período de tiempo relativamente corto, pero se aparta fácilmente de su dirección original, tomando el desconcertante hábito de hacerlo sin que sea posible pre-

decir la magnitud ni el sentido del desvío. A veces pueden éstos predecirse con seguridad, pero otras su movimiento es completamente indeterminado y no avisa normalmente sus intenciones. A pesar de su fragilidad, este invento ha demostrado ser útil empleado conjuntamente con otros medios de determinar la dirección. Estos procedimientos independientes se emplean para orientar inicialmente el giróscopo direccional y comprobar la exactitud de sus indicaciones varias veces por hora.

Generalmente el giróscopo direccional se orienta y se comprueba mediante una aguja magnética, si se dispone de ella, o mediante una aguja astronómica, artificio para determinar la dirección o azimut de un cuerpo celeste hacia el cual se apunta, proporcionando una solución mecánica al triángulo de posición; de modo que una aguja astronómica sólo es útil cuando se dispone de un cuerpo celeste visible.

Para un observador situado en el polo geográfico, los cuerpos celestes describen círculos son variar de altura, a menos que la declinación del cuerpo celeste varíe. Así, las estrellas permanecen prácticamente a la misma altura. El sol sale una vez al año; la luna, una vez al mes. Cuando el limbo inferior del sol toca el horizonte, a finales de septiembre (en el hemisferio Norte), faltan todavía más de treinta y dos horas antes de que el sol desaparezca completamente para sus seis meses de viaje al Sur del horizonte. Mientras el sol se está poniendo efectúa una vuelta y un tercio alrededor del horizonte, cubriendo más de  $480^\circ$  en azimut. Cuando el último rayo de luz ha desaparecido de la vista, el sol continúa paseándose por debajo del horizonte. Ocho días después alcanza una distancia de  $3^\circ$  bajo el horizonte, y las estrellas más brillantes empiezan a dibujarse débilmente en el firmamento. Dentro de otros ocho días termina el crepúsculo, y se empieza a hacer sensible la sensación de oscuridad.

Pero durante esos primeros ocho días, en que no se distingue ningún cuerpo celeste, a menos que la luna o un planeta brillante acierte a estar sobre el horizonte. ¿Cómo se las arregla el navegante, privado de la aguja astronómica, sin poder fiarse de las indicaciones de la magnética y sin giroscópica para determinar la dirección? En el polo

Norte todas las direcciones son Sur, pero escoger el Sur erróneo puede ser desastroso.

Las condiciones descritas sólo existen en el mismo Polo, pero a medida que éste se va dejando atrás las condiciones varían lentamente. En cualquier lugar al norte de Alaska, el crepúsculo dura varias horas, y el movimiento de un avión, que normalmente excede, en estas latitudes, a la velocidad de giro de la tierra, puede prolongar este efecto casi indefinidamente.

Antes del desarrollo del compás celeste "Pfund", el crepúsculo era el punto ciego de la navegación polar, la situación más temida por los navegantes de las altas latitudes; el compás celeste funciona mejor precisamente durante este período.

#### Origen de la aguja celeste.

Aunque la polarización de la luz se descubrió nada menos que en 1669, como se ha indicado anteriormente, no fué hasta 1936, que a un físico de la Universidad Hopkins, de Baltimore, el fallecido Dr. A. H. Pfund, se le ocurrió la idea de desarrollar un aparato que revelaba asombrosamente la polarización de la luz difundida en el azul del cielo.

Posteriormente, en 1944, el Dr. Pfund, sintiendo nuevamente curiosidad por las posibilidades de su aparato, construyó un tosco modelo para observar el efecto de la polarización con más detalle. Por medio de este invento podía localizar el sol, por altura y azimut, con sorprendente precisión, *incluso cuando el sol estaba algo por debajo del horizonte.*

Se había descubierto, por fin, una posibilidad de resolver el problema del crepúsculo. Se podían determinar la altura y azimut del sol durante el largo crepúsculo polar. Quizá sólo el azimut podría determinarse prácticamente con exactitud, ya que los requisitos para la exactitud eran mayores para la altura que para el azimut.

#### Funcionamiento.

Los principios del funcionamiento del compás celeste son asombrosamente simples. Los rayos directos del sol contienen vibraciones en todas direcciones y no están polarizados. Cuando la luz solar penetra en la atmós-

fera terrestre, se difunde en parte, proporcionando al cielo su característico color azul. Esta luz difusa *se polariza en un plano*. Esto es, todas sus vibraciones se encuentran en un plano único, perpendicular a los rayos directos del sol. Esto es, que si el sol estuviese en el horizonte verdadero, al Este o al Oeste de un observador, el plano de polarización sería paralelo al vertical que pasa por el cenit y los puntos norte y sur del horizonte del observador. A medida que el sol sale o se hunde bajo el horizonte, el plano oscila, siendo siempre perpendicular a la línea que une el observador con el sol. El compás celeste determina este plano y el plano vertical que pasa por el observador y el sol. Este segundo plano, llamado *plano azimutal*, es de particular interés para el navegante, puesto que proporciona la dirección del sol.

El sistema óptico del compás celeste es muy simple, y hace uso de un principio conocido desde hace largo tiempo. Consiste en una hoja circular de polaroid, de unos 11 centímetros de diámetro, sobre la que se monta una pieza de celofán de espesor adecuado. Esto se llama un *analizador*. El polaroid es similar al empleado en ciertas gafas de sol. El celofán se corta en forma de estrella de muchas puntas, y su diámetro es un tercio del del polaroid. Sobre el celofán se coloca una pieza de materia transparente para la debida protección. La luz polarizada en un plano puede desdoblarse en dos componentes, perpendiculares entre sí. Al llegar la luz al polaroid, una componente es absorbida y la otra pasa a través de él. Si se gira la hoja de polaroid, alrededor de un eje paralelo al rayo de luz, las magnitudes relativas de las dos componentes varían de modo que el polaroid aparece alternativamente brillante y oscuro, efectuándose este cambio cada 90°. Esto es, el ciclo completo de luz a oscuridad y a luz nuevamente tiene lugar con un giro de 180°, o sea desde el plano de polarización al plano normal, y nuevamente al de polarización. De este modo las posiciones de brillo y oscuridad indican la situación del plano de polarización y del plano azimutal.

El polaroid nos determinaría así la dirección del sol, pero los puntos de máximo y mínimo brillo no están definidos con suficiente precisión para los fines de la navegación.

Cuando la luz polarizada atraviesa el celofán, una componente pasa sin sufrir alteración y la otra sufre un cambio de fase de 180° sin que se modifique su amplitud. El resultado es el mismo que se obtendría girando el plano de polarización, trasladando así los puntos de máximo y mínimo brillo. Mientras gira el analizador, el polaroid aparece alternativamente más brillante y más oscuro que el celofán. Los dos aparecen con igual brillo cuando el eje óptico del celofán está en el plano de polarización, e igualmente oscuros cuando está en el plano normal a éste, con lo que existen cuatro pares de puntos separados 90°. Como una de las partes se va iluminando mientras la otra se va oscureciendo, estos pares de puntos pueden determinarse con considerable precisión.

El resto del instrumento consiste en un marco adecuado, un espejo inclinado 45° bajo el analizador para permitir una visión horizontal al observador, tornillos de nivelación, niveles y una escala convenientemente graduada. Lleva unido un aparato de relojería, para que una vez colocado el instrumento permanezca orientado al moverse el sol.

Para usar el instrumento sólo es necesario orientarlo convenientemente en el avión, introducir en el aparato de relojería la hora verdadera del lugar (después de la primera observación ya no hay que volver a efectuar esto), girar el analizador hasta conseguir la uniformidad de brillo, y leer la dirección del sol o la proa del avión. Una lectura puede efectuarse en unos segundos. Existe una posible ambigüedad de 90 ó 180°, pero el brillo relativo del cielo resuelve fácilmente esta duda.

#### Limitaciones.

Antes de efectuar una observación con el compás celeste, el instrumento debe ser cuidadosamente nivelado, de modo que la visual se dirigirá al cenit y no al sol. La luz del cielo se polariza sólo parcialmente. En el plano de polarización el porcentaje de luz polarizada es elevado, decreciendo gradualmente al aumentar la distancia angular a este plano. Al llegar aproximadamente al 50 por 100 el porcentaje disminuye rápidamente. Y como el funcionamiento de la aguja celeste depende de la luz polarizada, cuan-

to mayor sea el porcentaje de dicha luz que penetre en su sistema óptico tanto mayor será la sensibilidad del instrumento. Además, con grandes ángulos la geometría del sistema introduce errores adicionales.

Cuando el sol está en el horizonte, el plano de polarización es vertical, y pasa, por tanto, por el cenit. La sensibilidad del compás celeste es máxima en estas condiciones. Si el sol está a pocos grados del horizonte, la pérdida de sensibilidad no es apreciable. De este modo los resultados más exactos se obtienen cuando el sol está demasiado bajo para la observación con la aguja astronómica (astro-compás) o durante el crepúsculo, esto es, cuando más se necesita.

Teóricamente el compás celeste puede usarse a cualquier hora de la noche, pero cuando el sol alcanza una altura negativa de unos 7 u 8°, la cantidad de luz polarizada disminuye tan rápidamente que la falta de brillo dificulta mucho la lectura. Pero en estas condiciones ya puede disponerse de alguna estrella para utilizar el astro-compás.

Una espesa capa de nubes puede interceptar toda la luz polarizada, no dejando ninguna para la observación. Tampoco funciona el compás celeste si una blanca niebla aparece en el campo visual, a menos que el sol esté bajo el horizonte y la capa de niebla no esté iluminada directamente. Las nubes entre el observador y el sol no entorpecen el funcionamiento del compás celeste, siempre que el cenit esté despejado. Sin embargo la luz, reflejada de nubes situadas por el otro lado del observador, sí que tiene un efecto perturbador, ya que la luz reflejada por dichas nubes está polarizada con respecto a las nubes. El máximo efecto tiene lugar cuando las nubes se extienden en un cuadrante del cielo, cuyo centro esté a 135° del sol. En estas condiciones la lectura puede tener varios grados de error.

La luna produce un efecto similar, pero como el brillo de la luna es aproximadamente 1/450.000 el del sol, el efecto es prácticamente de poquísima importancia. El máximo efecto perturbador de la luna, cuando se encuentra a unos 10 ó 20° sobre el horizonte y a unos 140° del sol (unos tres días antes o después de la luna llena), y el error introducido es de menos de 1°. Otros diversos factores ejercen pequeños efectos perturbadores. El polaroid no es sensible para

la luz roja o violeta, y cuando predominan estos colores en la luz difusa del cielo el resultado es una pérdida de sensibilidad.

Si el celofán no es del espesor adecuado para producir un exacto cambio de fase de 180° de una de las componentes, la luz que sale de él está elípticamente polarizada, ocasionando una ligera reducción del contraste entre las posiciones de brillo y oscuridad, que ocasionan pérdida de sensibilidad. Si el instrumento no está convenientemente nivelado se introduce un error que es directamente proporcional a la altura del sol.

#### Empleo del compás celeste.

Hasta la fecha sólo se han fabricado cuatro instrumentos, y sólo han sido empleados en gran escala por la Escuadrilla de Reconocimientos Meteorológicos núm. 375, de las Fuerzas Aéreas de Estados Unidos, que llevaban uno de estos instrumentos en muchos de sus vuelos Ptarmigan de Fairbanks al Polo Norte. Cuando en 1949 el personal de esta escuadrilla recibió uno de los compases celestes para prueba, encontraron necesario adaptar el armazón al de los astródomos de sus B-29 y determinar un método de alinear el instrumento con el eje longitudinal del avión. Estos problemas se solucionaron fácilmente.

El compás celeste "Pfund" ha eliminado el temor del crepúsculo para el navegante polar. Se ha comprobado que es de fácil manejo y suficiente exactitud. El autor de este artículo efectuó varios vuelos polares durante el verano de 1949. En uno de estos vuelos el avión se encontraba sobre el polo cuando el sol estaba exactamente debajo del horizonte, efectuándose el regreso en las peores condiciones. Todo el vuelo se efectuó sin pérdida de continuidad.

Con las recientes mejoras en otros instrumentos el compás "Pfund" no es de absoluta necesidad, pero es un invento útil, que proporciona a las operaciones suficiente flexibilidad para justificar su desarrollo, que están efectuando las Fuerzas Aéreas en Wright Field.

Si un principio descubierto en 1669 se emplea en 1951 para llenar una importante laguna de los instrumentos náuticos, ¿qué principios descubiertos hoy empleará el navegante de mañana?