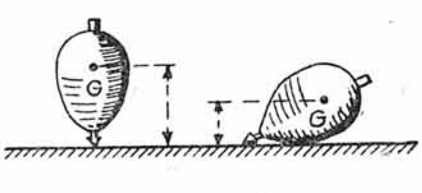
Algo sobre el giróscopo e instrumentos de vuelo derivados del mismo

Por el Comandante ARTURO MONTEL TOUZET

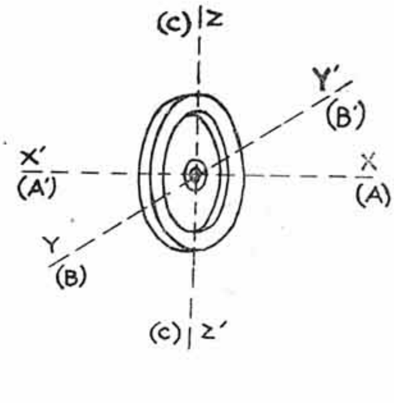
Toda persona que contempla por vez primera el tablero instrumental de un avión, muestra invariablemente asombro ante el número de "relojes" que componen dicho control. Al escuchar una somera explicación del papel desempeñado por cada uno, esperan con interés la descripción de aquellos instrumentos sobre los que su curiosidad les impulsa a interrogarnos y que por su misión les llama más la atención, como son: horizonte artificial, indicador de virajes, etc.; es decir, los giroscópicos. El hecho de mostrarles un giróscopo en esos momentos tiene la propiedad de causar un doble efecto, bien de admiración o, por el contrario, de decepción, ya que esperan invariablemente encontrar dentro de estos instrumentos un complicado conjunto de piezas, conexiones, etc., con el inseparable compañero de toda la "magia" moderna: la electricidad. Difícilmente alcanzan a comprender o creer que este sencillo elemento, "cerebro y músculo" a un tiempo, sea capaz por sí solo incluso de pilotar un avión. Este solo hecho, tan extraordinario, nos anima a publicar estas líneas sin temor a pecar de pesados al volver sobre esta materia, tan conocida y desarrollada con toda clase de detalles y tecnicismos en libros y revistas. Solamente pretendemos, en breve espacio, divulgar, aclarar y resumir algunos puntos, con ayuda de profusión de figuras, sobre el funcionamiento de estos pequeños "robots", a los que cientos, por no decir miles de pilotos, si no les debemos la vida, por lo menos es indudable que les somos deudores en gran parte de la tranquilidad, seguridad y rapidez en el vuelo.



Figª 1ª

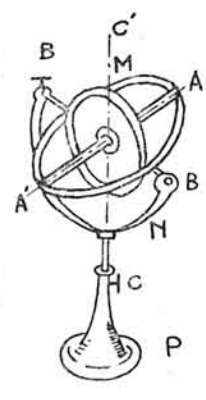
EL GIROSCOPO

Consideraciones previas.—La palabra giróstato se deriva del griego *gyros* = círculos, y *statos* = parado, y con ella se denomina todo sólido que esté animado de un rápido movimiento de rotación alrededor de su eje. Pero cuando se utiliza para demostrar una rotación cualquiera, como el que empleó Foucault para la de la Tierra, entonces se acostumbra a llamarle *giróscopo* (del griego *gyros* y *skopeo* = examinar), cuyo nombre se ha hecho extensivo hoy en día a todos los giróstatos con suspensión cardán.



Figª 3ª

Si un sólido gira alrededor de un eje, este último sufrirá una serie de tensiones motivadas por la fuerza centrífuga creada por los distintos puntos de su masa; cosa que no sucederá de estar distribuída perfectamente simétrica con respecto a dicho eje, y en este caso no existirá, por tanto, ninguna razón para que este último cambie de dirección de no ser forzado a ello por una causa externa; por eso esta clase de ejes reciben el nombre de *ejes permanentes de rotación.*



Figª 2ª

De todos es sobradamente conocido desde la infancia el fenómeno que se produce al dotar a una peonza de un rápido movimiento de rotación, que el centro de gravedad tiende a ponerse lo más alto posible. Conforme va decreciendo su velocidad de rotación, dicho centro tiende a descender, hasta colocarse la peonza en la forma de equilibrio más estable, al igual que lo hace cuando permanece en reposo (fig. 1). Existen, pues, según hemos visto, grandes diferencias entre la estabilidad estática y la dinámica.

Un giróscopo consiste ordinariamente en un disco metálico, también llamado *rótor* o *toro,* representado por *D* en la figura 2, cuyo árbol se apoya en sus extremos en dos puntos diametralmente opuestos de un anillo *M,* el cual, a su vez, puede girar sobre un eje de simetría *BB',* perpendicular al anterior en su punto medio, es decir, en el cen-

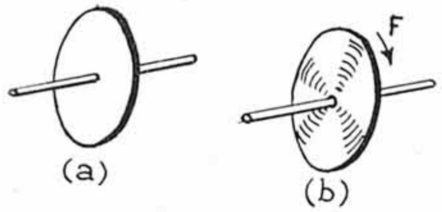


Fig.ª 4.ª

tro *O* del toro. Este nuevo eje se apoya en dos cojinetes, pertenecientes a otro anillo *N* (generalmente, un semianillo u horquilla). Mediante el tornillo *B* se puede inmovilizar el eje *BB'*, o sea, impedir el giro del anillo *M*. La horquilla tiene solidario un eje vertical *CC'*, que juega dentro del estático *P;* pero se puede frenar dicho movimiento con el tornillo *G*.

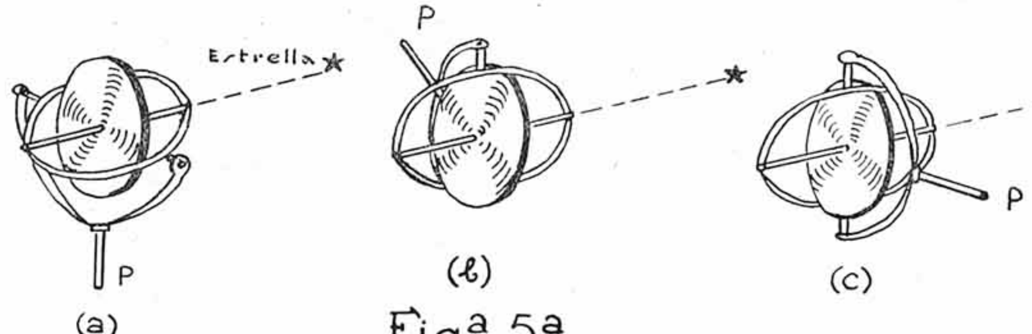


Fig.ª 5.ª

Cuando no están frenados los ejes *BB'* y *CC'*, el giróscopo puede moverse en todas las direcciones, y en este caso se dice que tiene *tres grados de libertad*. Si está frenado solamente uno de los dos, se le llama de *dos grados de libertad*, y si están los dos a un tiempo, entonces es de *un grado de libertad*.

Por todo lo dicho, sabemos que el disco *D* puede girar alrededor de tres ejes, a saber: *AA'*, *BB'* y el *CC'*, los que podremos representar por un sistema de ejes coordenados con su origen en el centro *O* del rótor (fig. 3).

Para mayor claridad en las explicaciones representaremos el rótor cuando permanece en reposo, como se indica en *a)* (fig. 4). Si está dotado de movimiento de rotación, como en *b)*. La flecha indica el sentido del movimiento.

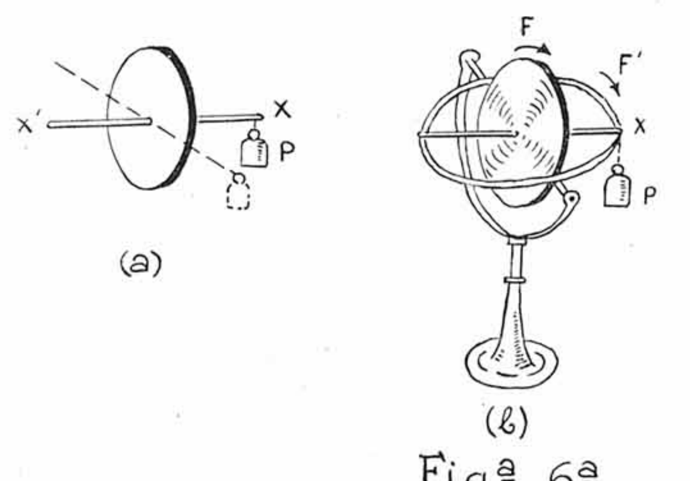


Fig.ª 6.ª

EXPERIMENTOS ENCAMINADOS A PONER DE MANIFIESTO LOS EFECTOS GIROSCOPICOS

a) Imprimiendo al toro un rápido movimiento de rotación podemos observar (si está perfectamente construído, es decir, simétrico con respecto a su centro, escasos rozamientos, etc.) que, después de algunas oscilaciones, se mantiene fijo el eje en una dirección determinada. Esto se representa en la figura 5, donde vemos al eje manteniendo la misma dirección en *a)*, *b)* y *c)*, cualquiera que sea la posición relativa que guarde el soporte del aparato. El eje nos señala una dirección fija en el espacio. Este fenómeno es conocido con e nombre de *rigidez en el espacio* o de *inercia giroscópica*.

b) Si de uno de los extremos del eje xx' colgamos un pesito *p*, cuando el disco está en reposo, como se representa en *a)* (fig. 6), aquél oscilará dentro de un plano vertical, descendiendo el brazo de dicho peso, según las leyes de la estática.

Si repetimos el experimento estando girando el rótor, observaremos — *b)* de la misma figura — un comportamiento muy distinto: el eje xx' no oscila ahora en un plano vertical, sino en el horizontal, según indica la flecha *f'*, siendo *f* el sentido de rotación del toro. Al cabo de un cierto tiempo el giróscopo estaría en la posición *c)*.

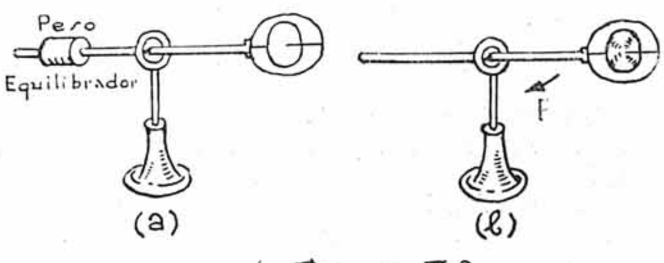
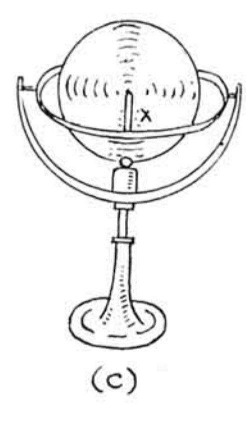
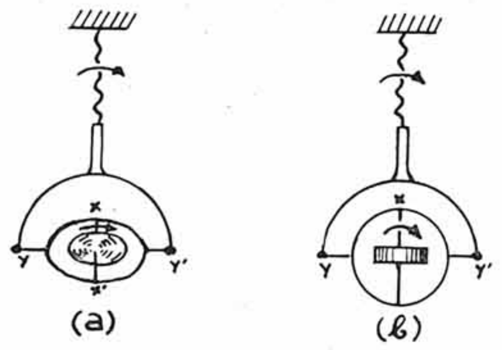


Fig.ª 7.ª

Este experimento es de efecto verdaderamente sorprendente, por exponernos dos fenómenos extraños: primero, el no observarse la influencia del peso *p* sobre el balancín que representa el eje xx', y el segundo es la rotación que se origina según el eje zz', sin causa aparente que la justifique.



Otra forma para poner de manifiesto estos mismos fenómenos consiste en emplear un giróscopo como el representado en la figura 7 (que no detallamos por deducirse fácilmente su constitución por la

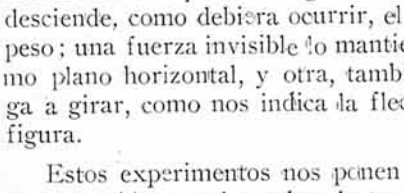


Figª 8ª

simple inspección de la figura). Al suprimir el peso equilibrador estático p estando girando el disco, veremos que no desciende, como debiera ocurrir, el giróscopo por su propio peso; una fuerza invisible lo mantiene suspendido en el mismo plano horizontal, y otra, también desconocida, le obliga a girar, como nos indica la flecha f en *b)* de la misma figura.

Estos experimentos nos ponen de manifiesto la propiedad conocida con el nombre de *precesión giroscópica* (libre).

c) Si le quitamos el pie al giróscopo y lo colgamos por el extremo C' de su eje vertical de un hilo previamente retorcido, estando en rotación el disco, observaremos que en el mismo instante en que el hilo intenta comenzar a destorcerse cesa esto, y en cambio, el anillo M inicia un giro sobre el eje yy', de tal modo que lleva al xx' a coincidir en dirección con la del hilo; esto lo representamos en la figura 8, siendo *a)* la posición inicial y *b)* la final. Una vez que el eje xx' alcanza la posición indicada anteriormente, el hilo comienza de nuevo a desenrollarse, y así continúa libremente hasta el final. Es de hacer notar que el eje xx' toma un sentido tal dentro de la dirección que ya hemos dicho, capaz de hacer que la rotación del mismo se efectúe en igual sentido que la del hilo.



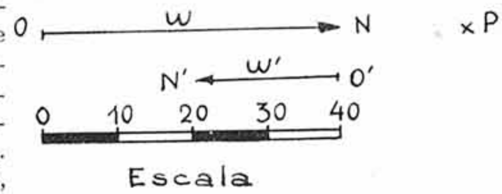
Figª 9ª

Esta experiencia nos muestra la propiedad enunciada en Mecánica como *tendencia de las rotaciones al paralelismo*, y que en el giróscopo equivalen a la de *resistencia a la precesión forzada*.

TEORIA DEL GIROSCOPO

REPRESENTACIÓN VECTORIAL DE LAS ROTACIONES.

Para determinar una rotación es necesario y suficiente conocer: la dirección del eje alrededor del cual se efectúa, sentido del movimiento y su velocidad angular. Estos tres elementos se pueden representar con un vector, de modo que su dirección sea la del eje; su sentido, tal que un observador, teniendo los pies en el origen y la cabeza hacia la punta de la flecha, viese la rotación en el sentido de las agujas de un reloj, y su magnitud igual a la de la velocidad angular en una escala previamente establecida. En la figura 9, el vector OM nos determina concretamente la rotación del toro D en el sentido indicado por la flecha f. Si el sentido del giro fuese opuesto al anterior, entonces lo representaríamos por el vector OM', según se indica en *b)*.



Figª 10ª

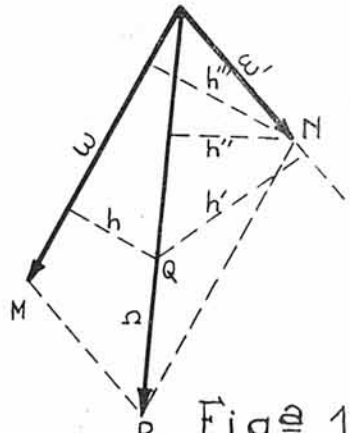
Si comparamos las rotaciones ω y ω', representadas por los vectores ON y ON', llegaríamos a las siguientes conclusiones (para un observador colocado en el punto P) (fig. 10); la rotación ω es a dextrosum y con una velocidad angular de 40 revoluciones por minuto. La ω' es de sentido contrario al anterior, y su velocidad angular, mitad de la expresada.

COMPOSICIÓN DE ROTACIONES.

Las rotaciones se componen al igual que las fuerzas, velocidades, etc.; es decir, la diagonal del paralelogramo cuyos lados son las dos rotaciones nos dará la resultante, o lo que es igual, resolviendo el triángulo.

Sean OM y ON dos vectores representativos de las rotaciones fijas ω y ω' (fig. 11), tales que sus ejes, por ejemplo, concurren en el punto O. Construyamos el paralelogramo y sea OR la diagonal. Para que ésta sea la resultante tendrá que reunir dos condiciones: 1.ª Ser un eje de rotación, es decir, que no se mueve (por ser una recta, bastará demostrar que permanecen inmóviles dos puntos). 2.ª Que en magnitud nos equivalga a las dos rotaciones dadas.

Para demostrar la primera cuestión hemos de tener en cuenta que O es un punto fijo, puesto que pertenece a los dos ejes. Nos bastará demostrar que otro punto cualquiera, tal como el Q, también lo es. En efecto, este punto, debido a la rotación ω, recorrerá en el tiempo t un camino a derechas:



Figª 11ª

$$\omega \,.\, t\, h,$$

y por la ω', otro $\omega' \,.\, t \,.\, h'$, de sentido contrario al anterior (siendo h y h' las perpendiculares bajadas desde Q a OM y ON).

Según el el teorema de Varignon, cuando el centro de los momentos está sobre la resultante, los momentos de las fuerzas componentes son iguales, y por tanto $\omega \,.\, h = \omega' \,.\, h'$, o lo que es igual, $\omega \,.\, h \,.\, t = \omega' \,.\, h' \,.\, t$; lo que quiere decir que si el punto Q ha de recorrer dos caminos iguales y en sentido contrario y en el mismo tiempo, es que permanece fijo.

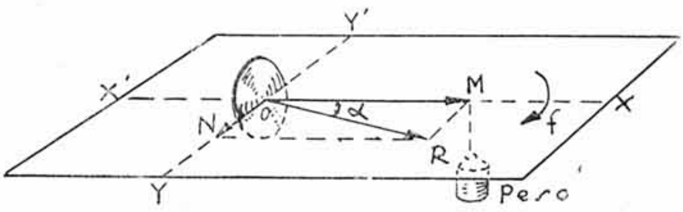
Veamos la segunda parte: El punto N, por efecto de la rotación ω', permanecerá inmóvil; pero bajo la acción de la ω recorrerá en el tiempo t un espacio, a derechas,

$$\omega \cdot t\, h'''.$$

Por la rotación resultante Ω, otro también en el mismo sentido:

$$\Omega \cdot t\, h''.$$

Si conseguimos igualar ambas expresiones, quedará demostrada la cuestión, pues por el mismo razonamiento lo demostraríamos para el punto M.



Figª 12ª

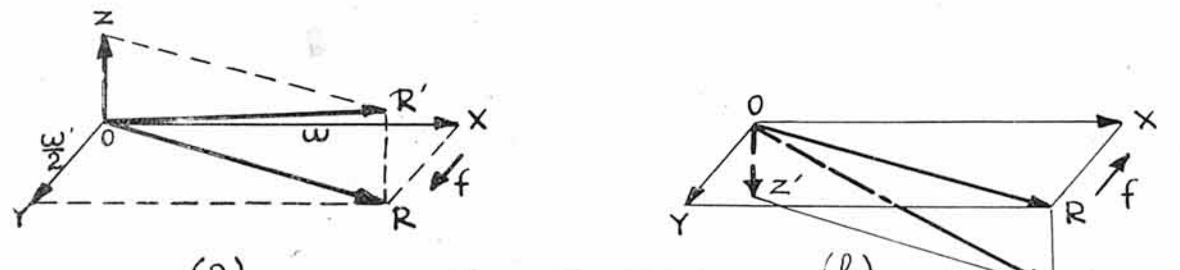
Estas expresiones son iguales, por representar $\omega \cdot h'''$ el área del paralelogramo y $\Omega \cdot h''$ el doble del área del triángulo ONR, que, como sabemos, son idénticas.

Podemos decir, en consecuencia de todo lo anteriormente expuesto, que la *diagonal del paralelogramo construído sobre dos rotaciones concurrentes nos representa la resultante en dirección, sentido y magnitud.*

do las rotaciones ω y $\frac{\omega'}{2}$ obtendremos la resultante OR, lo cual nos indica que el árbol del rótor tiende a desplazarse en la dirección señalada por la flecha f'; este es el *sentido del movimiento de precesión.* Todo esto sucede, como ya hemos dejado sentado, en un espacio de tiempo infinitamente pequeño, y esto origina que la existencia del eje OR sólo tiene lugar durante un instante, ya que tan pronto como el árbol OM comience a desplazarse lo hará en la misma cantidad angular el eje OY, naciendo, en consecuencia, otro eje resultante OR', que formaría, con el anterior OR, un ángulo igual al del desplazamiento del árbol; este nuevo eje tendría también una existencia instantánea, y así se reproduciría sucesivamente el fenómeno, dando lugar a un movimiento continuo de precesión, mientras el vector ω no llegue casi a tener un valor nulo. Los ejes resultantes OR, OR', OR''..., reciben, por las razones anteriormente expuestas, el nombre de *ejes instantáneos de rotación.*

La acción del peso p no nos produce solamente, como hasta ahora hemos considerado, un movimiento de precesión; nace al mismo tiempo otro, denominado de *nutación,* que únicamente se hace visible para velocidades pequeñas del rótor, pero que no describimos por no interesar a nuestro estudio, de instrumentos giroscópicos, ya que en éstos las velocidades de los rotores son del orden de 10.000 vueltas al minuto.

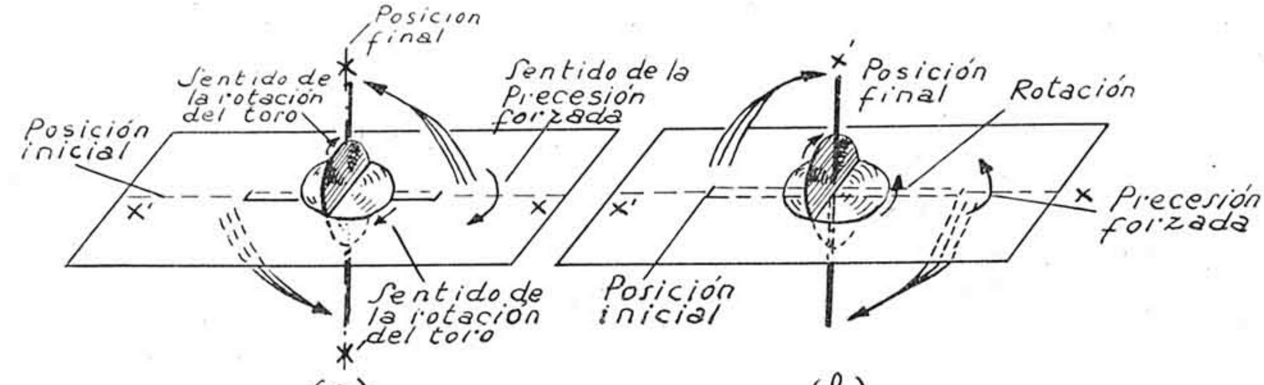
Razonemos ahora la resistencia a la precesión forzada. Sean, como hemos considerado en los casos anteriores (figura 13, *a)*) ω y $\frac{\omega'}{2}$ los vectores correspondientes a las rotaciones del disco y la originada por el peso p. Si sometemos la rotación resultante a otra forzada, según el sentido indicado por la flecha f, ésta estaría representada por un nuevo



Figª 13ª

Explicación gráfica del fenómeno de la precesión y determinación del sentido de rotación.—Representemos por el vector OM (fig. 12) la rotación del disco D. Al aplicar el peso p en el extremo A del árbol, sabemos que éste inicia un descenso, lo que equivale a decir que toma un movimiento de rotación según el eje yy', el cual podremos representar por un vector ON, de magnitud igual a $\frac{\omega'}{2}$, siendo ω' la velocidad angular adquirida al cabo de un tiempo t, considerado infinitamente pequeño (se toma el valor $\frac{\omega'}{2}$ debido a que siendo el peso P una fuerza constante, dará lugar a una rotación uniformemente acelerada), componiendo

vector OZ, el que nos producirá, al componerlo con la resultante OR, otra tal como OR', que nos indica la existencia de un nuevo movimiento, que tenderá a desplazar el árbol OX hacia arriba. Si en lugar de forzar la velocidad de precesión, lo que hacemos es frenarla, lo que obtendríamos impulsando el vector OX, según se indica en *b)* por la flecha f, entonces el vector equivalente a esta rotación sería el OZ', que, compuesto con el OR, nos dará por resultante el OR', que viene a mostrarnos el inverso desplazamiento del árbol OX con respecto al caso anterior. Obsérvese, como se pone de manifiesto en *a)* y *b)* de la figura 14, las posiciones finales del eje xx', según los dos casos anteriormente estudiados: el disco se coloca de modo que



(a) (b)

Figª 14ª

su sentido de rotación se sume siempre a la de la precesión forzada. Los ejes se ponen en prolongación, consecuencia de la *tendencia de los ejes de rotación al paralelismo.*

CÁLCULO ANALÍTICO DE LA PRECESIÓN (fig. 12).

Representados por ... { ω la velocidad del rótor. ω' la adquirida según el movimiento producido por p, al cabo de un tiempo t, considerado infinitamente pequeño.

La velocidad media sería $\frac{\omega'}{2}$.

Representemos estas velocidades vectorialmente y hallemos el valor del ángulo α. Este podemos determinarlo según la relación $\frac{RM}{OM}$, puesto que siendo el ángulo α muy pequeño (debido a que la velocidad ω será muchísimo mayor que la $\frac{\omega'}{2}$), podemos igualar, sin gran error, el arco y la tangente.

Pero

$$RM = \frac{\omega'}{2} \quad \text{y} \quad OM = \omega;$$

luego

$$\alpha = \frac{\omega'}{2\,\omega}\ (a).$$

Por otro lado, tenemos: que el momento de la fuerza p (1) será:

$$M_p = p \cdot OM = p \cdot OR \cdot \cos\alpha;$$

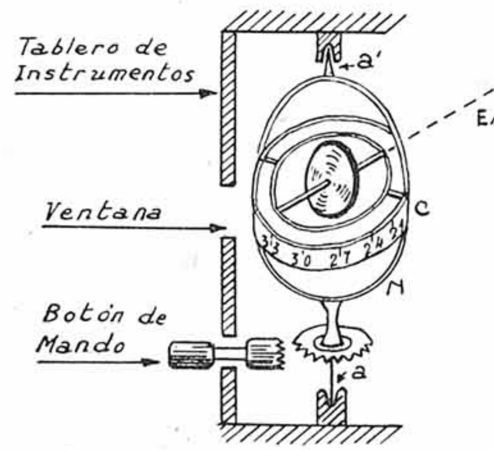
este valor oscilará entre los siguientes:

Máximo.............	Para $\alpha = 0°$
Mínimo.............	Para $\alpha = 90°$

(1) Se denomina momento de una fuerza el producto de la intensidad de la misma por su brazo.

Cuanto mayor sea M_p mayor será ω (puesto que las aceleraciones o las velocidades para tiempos iguales son directamente proporcionales a las fuerzas a igualdad de masas). Por otro lado, sabiendo que ω' es inversamente proporcional al momento de inercia con respecto al eje YY' (1), tendríamos:

$$\omega' = \frac{M_p}{I_{YY'}};$$



Figª 15ª

(1) Se entiende por momento de inercia de un punto que gira alrededor de su eje, describiendo una circunferencia de radio r, al producto de su masa por el cuadrado del radio:

$$I_o = m\,r^2.$$

Cuando se trata de una masa, como por ejemplo un volante, su momento de inercia viene expresado por la suma de los momentos de inercia de todos sus puntos; es decir,

$$I_o = m\,r^2 + m'\,r'^2 + m''\,r''^2 + \ldots$$

La que se suele resumir en $I = \Sigma\,MR^2$, siendo $M = m + m' + m'' + \ldots$, y R una magnitud tal que satisfaga la ecuación

$$MR^2 = mr^2 + m'\,r'^2 + \ldots$$

pero como

$$I_o = 2\, I_{YY'}, \quad (1)$$

resulta

$$\omega' = \frac{2\, M_p}{I_o};$$

y sustituyendo este valor en la *(a)*, nos encontramos finalmente con que

$$\alpha = \frac{M_p}{I_o\ \omega}.$$

El análisis de esta fórmula nos dice que el ángulo α descrito por el árbol del rótor en el tiempo t es proporcional al momento de p; es decir, la velocidad de precesión aumenta al hacerse mayor el peso que coloquemos o al brazo de palanca. Ocurre todo lo contrario al aumentar la masa del rótor.

Si anulamos M_p, α se nos reduce a cero, lo que equivale a decir que no hay precesión. Esto nos confirma el concepto de la *inercia giroscópica* o de los *ejes permanentes de rotación*. Igualmente observamos que el aumento de la velocidad del rótor nos disminuye la de precesión.

INSTRUMENTOS GIROSCOPICOS

Direccional giroscópico.—Consiste en un giróscopo de tres grados de libertad (fig. 15) que lleva en su anillo (no emplea un semianillo, para poder utilizar los puntos de apoyo a y a') exterior, y en un plano perpendicular, una corona circular C, dividida en 360° y con los puntos cardinales

(1) En la determinación de los momentos de inercia podemos distinguir dos casos: que el eje sea perpendicular a la superficie o que esté contenido en la misma. En el primer caso se le denomina *momento de inercia polar*, y en el segundo no recibe denominación especial y únicamente se suele afectar a la letra I de un subíndice indicado del eje que tratemos.

Por sencillo cálculo se demuestra que tratándose de una superficie circular el momento polar es igual al doble del momento con relación a otro eje que sea un diámetro; es decir,

$$I_o = 2\, I_{yy'} = 2\, I_{zz'}.$$

Mediante una corriente de aire o por un procedimiento eléctrico, se dota al toro de un rápido movimiento de rotación (del orden de 10.000 rev./min.); en estas condiciones, como ya sabemos, su eje mantendrá una posición fija en el espacio una vez que el piloto coloque el rumbo deseado (accionando el botón de mando). Este podrá comprobar por la ventanilla correspondiente a este instrumento y situada en el tablero de los mismos si se mantiene o no en su rumbo.

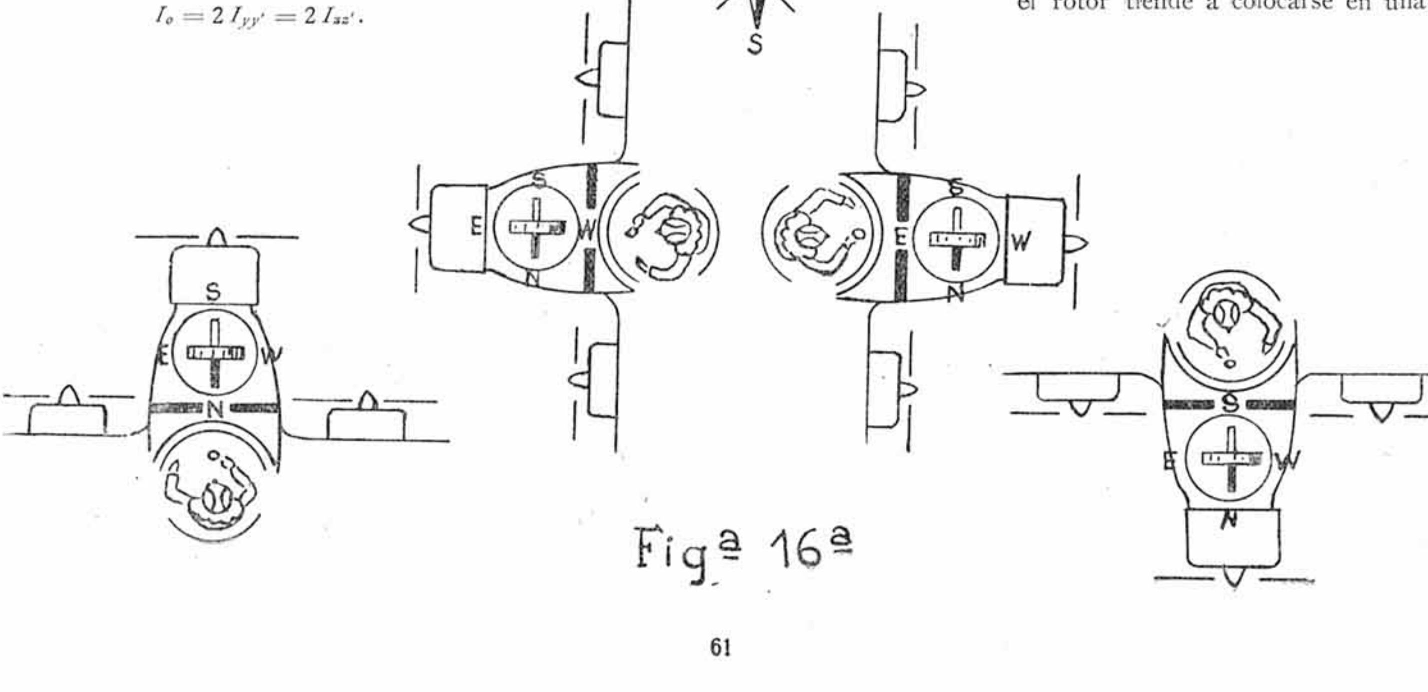
Se comprende que este instrumento no llena más misión que la de guiarnos en el rumbo que nos proporcione con anterioridad una brújula magnética, o bien el indicarnos el número de grados que nos desplacemos en un viraje. Este aparato, en resumen, no es más que un auxiliar de la brújula magnética.

Por marcar una posición fija en el espacio y no con respecto a la Tierra, su dirección será errónea al no tener en cuenta la rotación de aquélla; por esto es preciso que cuando se navega con el direccional, efectuar correcciones en el rumbo en plazos de tiempo que no deben exceder a veinte minutos.

En la figura 16 se representa a un avión en cuatro posiciones distintas y los rumbos que leería el piloto si la primera hubiese fijado el eje del rótor en la dirección Norte-Sur.

Indicador de virajes.—Está formado (fig. 17) por un giróscopo de dos grados de libertad, unido materialmente al avión, y debido a esto, siempre que el último efectúe un viraje someterá al primero a un movimiento de precesión forzada. Un sistema de palancas transmite los balanceos del eje del rótor a un índice (bastoncito), que indica al piloto el lado por donde efectúa el viraje y la velocidad angular del mismo (no se confunda con la velocidad lineal). Un muelle antagonista obliga al giróscopo a permanecer en su posición normal una vez que desaparece la causa modificadora de la misma.

Obsérvese en b) (fig. 17), cómo el rótor tiende a colocarse en una



Figª 16ª

posición tal que su rotación se sume a la del viraje del avión, o sea a la de precesión forzada; esto se indica por las flechas f y la de ruta.

El índice se desplazará un ángulo x, proporcional a un factor K, dado por el sistema de amplificación del movimiento, y al momento M_p de la fuerza aplicada; luego

$$x = K \cdot M_p;$$

pero siendo

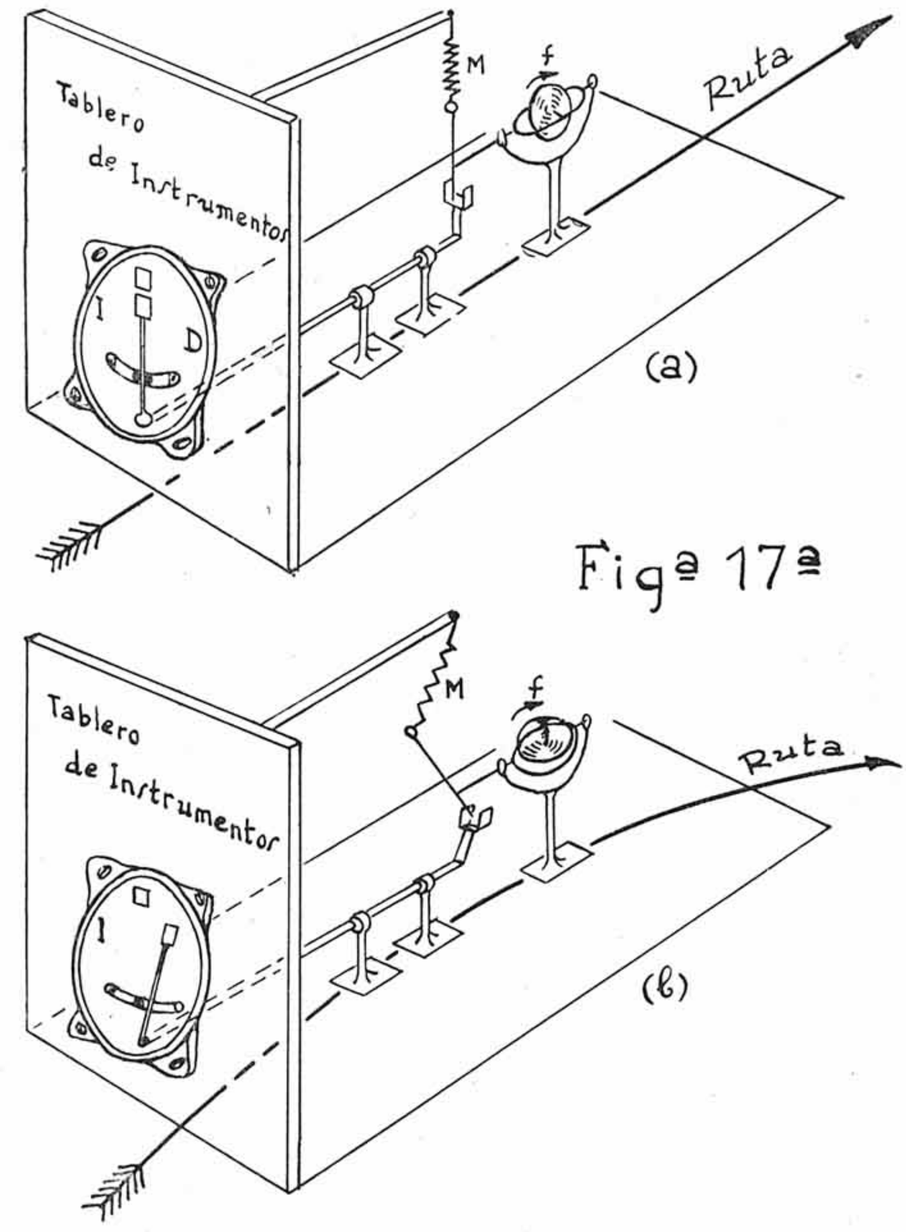
$$M_p = I_o \cdot \omega \cdot \alpha,$$

tendremos que

$$x = K \cdot I_o \cdot \omega \cdot \alpha.$$

Esta fórmula nos dice que el desplazamiento del índice varía con arreglo a tres factores: ω, α e I_o, aunque este último es, generalmente, constante. El primer factor nos representa la velocidad del rótor y el segundo la velocidad angular del viraje del avión. Según variemos cualquiera de los tres factores, así se originarán diversos tipos, indicadores de sensibilidad variable a voluntad.

En la figura 18 se representan distintas posiciones que tomará el rótor de acuerdo con la maniobra que ejecute el avión: en a) y b) el avión vuela normalmente; en c) el avión está inclinado, pero sin efectuar viraje; en d) lo efectúa hacia la izquierda, y en e) lo hace en sentido contrario al anterior. (Compruébese en todos los casos la suma de rotaciones.)



Figª 17ª

Horizonte artificial.—Consiste en esencia en un giróscopo de tres grados de libertad (fig. 19). El eje del rótor es vertical, y al objeto de que mantenga esta posición con respecto a la Tierra se le adapta un dispositivo especial, que no detallamos por carecer de interés a nuestro estudio de los efectos giroscópicos. Consideraremos, pues, que este eje coincide siempre con la vertical verdadera.

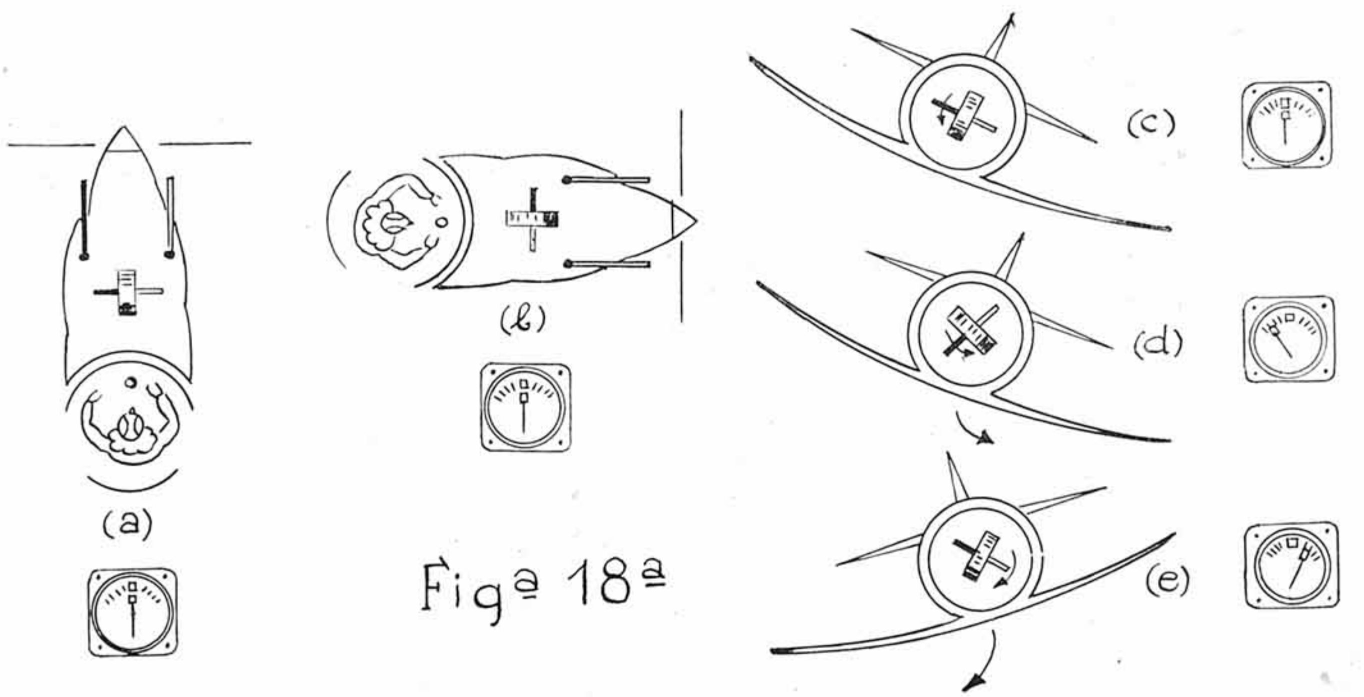
El conjunto de elementos que componen este instrumento se destaca perfectamente en la figura. Todo giro según el eje YY' se traducirá en un alzamiento o descenso de la línea artificial de horizonte h, ya que el codo a', a modo de biela, elevará o bajará la corredera p, y con ello a toda la palanca, que tiene por punto de apoyo o. La pieza m no tiene más objeto que servir de contrapeso al brazo $o\,p\,h$. Según esto, siempre que el avión pique o encabrite, la línea de horizonte h subirá o descenderá, dándole así al piloto, por intermedio del avión indicador A del tablero de instrumentos, una representación de lo que realmente sucede.

Cualquier giro del rótor según el eje ZZ' se transmitirá a la línea de horizonte h y al disco D, los que se inclinarán hacia el lado contrario del que lo hace el avión, con lo cual en el indicador tendremos realmente reflejado el movimiento.

En la figura 19 se representa: En a), un avión en línea de vuelo; en b), otro inclinado a la derecha, y en c), picando.

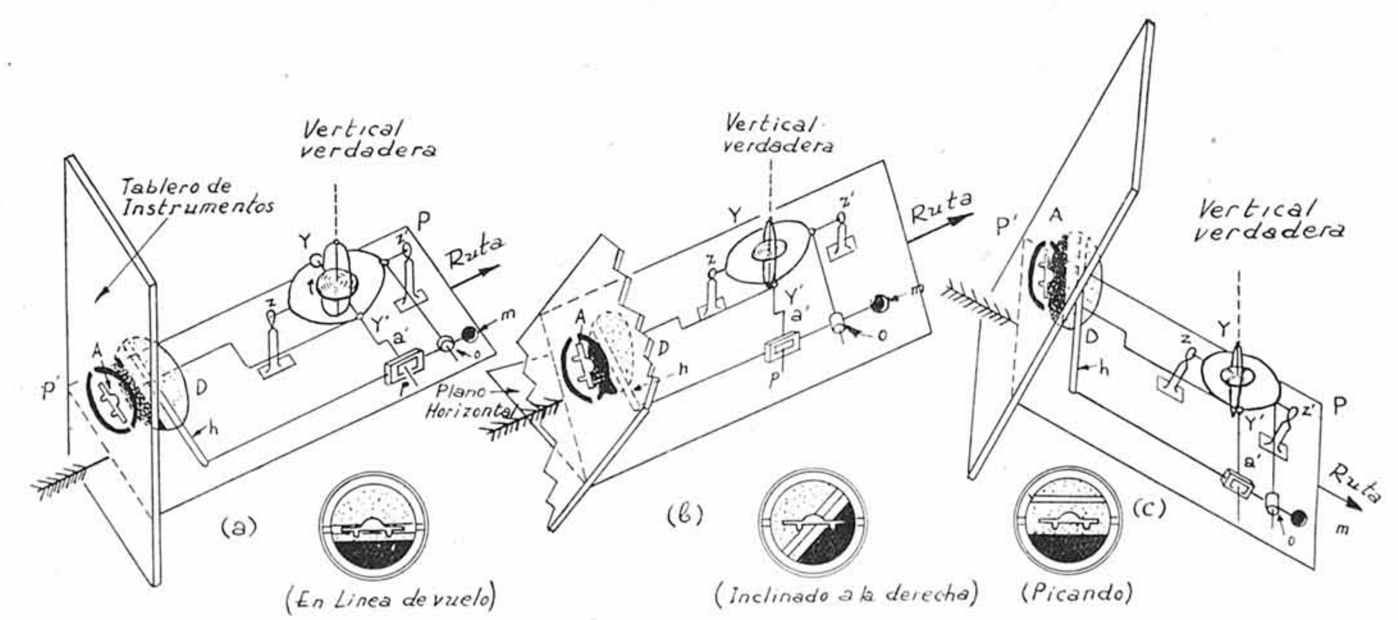
Resumen:

Direccional giroscópico.... Horizonte artificial..........	Tres grados de libertad.—Inercia giroscópica.
Indicador de virajes.........	Dos grados de libertad.—Tendencia al paralelismo de las rotaciones.



Figª 18ª

No son solamente estos instrumentos aquellos en los que tiene aplicación el giróscopo, pues aún podríamos citar gran variedad, como son: *piloto automático, estabilizador en dirección de los torpedos, interruptor automático de circuitos de fuego en las torres de los barcos de guerra,* al objeto de eleminar los efectos perjudiciales de balanceo y cabezada; *granadas de piezas de salvas de Infantería,* etc., etc. Por esto vemos que sus aplicaciones no sólo no decrecen, sino que aumentan de día en día, incluso en las armas más recientes.



Figª 19ª