



Cátedra de Instrumentos y Aviónica
Departamento de Aeronáutica
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y
Naturales
Universidad Nacional de Córdoba

HORIZONTE ARTIFICIAL

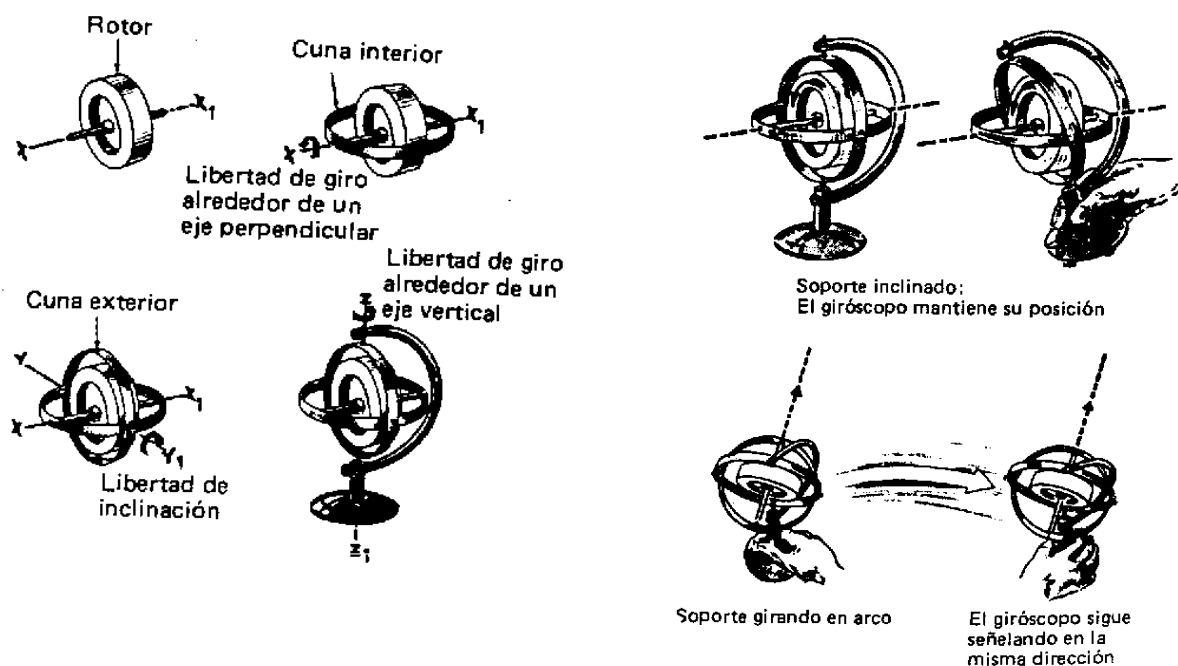
ING. JORGE O. GARCÍA

1. El giróscopo y sus propiedades

El giróscopo es un dispositivo mecánico que contiene una rueda de material pesado o rotor, montada en una junta universal de modo de tener 3 grados de libertad:

- Libertad de giro en un eje perpendicular a través de su centro (eje X-X)
- Libertad de inclinación alrededor de dos ejes perpendiculares al anterior (eje Y-Y y eje Z-Z)

El sistema de apoyo que permite estas libertades se denomina *Cardánico*.



Las propiedades fundamentales de todo giróscopo son la *rigidez giroscópica* y la *precesión*. La primera se refiere a que mantendrá la dirección de su eje de rotación, independientemente de los desplazamientos y rotaciones a los que se someta el sistema. La segunda es el cambio del plano de rotación bajo la influencia de una fuerza externa aplicada al sistema.

Para que esto sea posible es necesario que el rotor del giróscopo gire a gran velocidad, puesto que son una consecuencia del *Teorema del Momento Cinético*.

En la vida diaria encontramos numerosos ejemplos de la aplicación de este teorema: bicicleta, hélices, turbinas, balas, cohetes, etc.

2. Las aplicaciones de los giróscopos en la aeronáutica

En Aeronáutica los giróscopos son utilizados para brindar dos referencias principales:

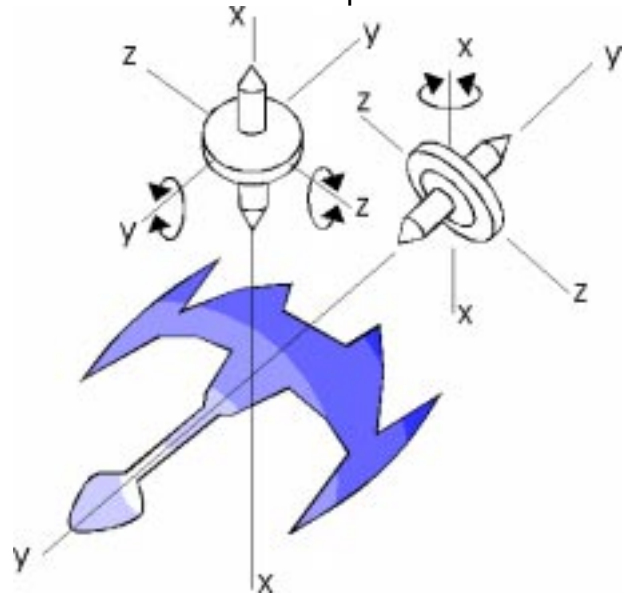
- **detección de cabeceo y alabeo**
- **proporcionar una referencia direccional**

La rigidez de los mismos establece una referencia estabilizada que no es afectada por el movimiento de la aeronave, y su precisión controla los efectos de la desviación aparente y real, manteniendo de esta forma, datos de referencia estabilizados.

Este tipo de giróscopos son conocidos como *giróscopos de desplazamiento*. Si bien se les proporciona tres ejes de rotación libres, el eje de giro no proporciona ninguna referencia de posición útil puesto que los desplazamientos tienen lugar a su alrededor únicamente.

Los instrumentos que utilizan estos equipos son:

- **Horizonte artificial**
- **Indicador de giro y viraje**
- **Giróscopo remoto**
- **etc.**



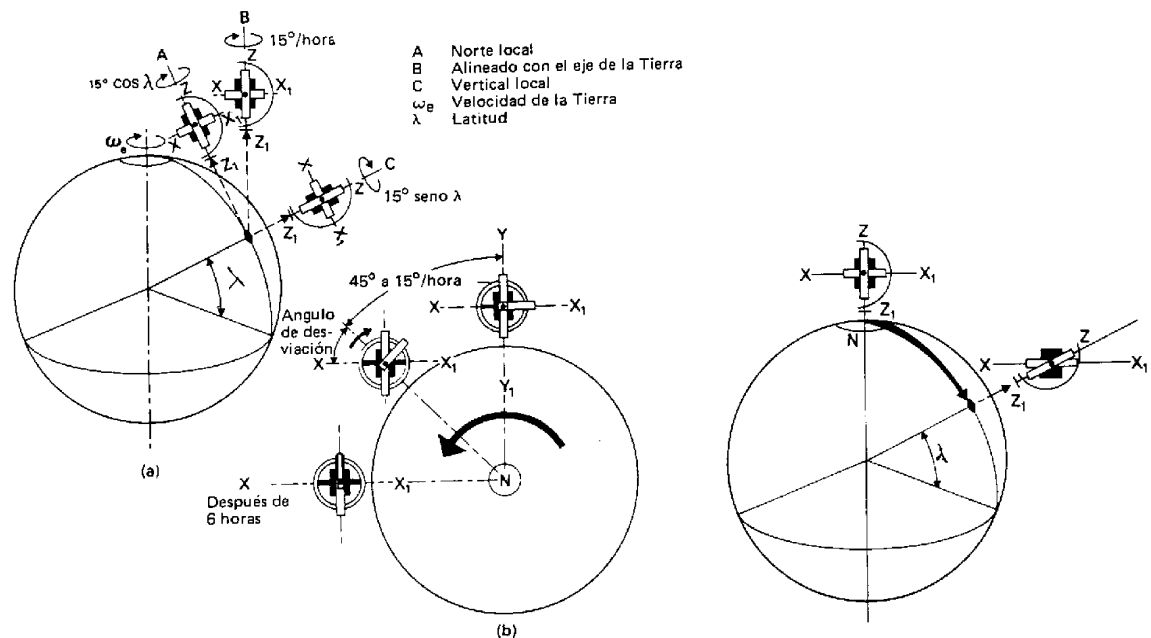
3. Limitaciones de un giróscopo libre

Las aeronaves deben tomar referencias respecto de la zona de la tierra donde se encuentran volando, pero un giróscopo libre no presentaría ninguna finalidad útil debido a su rigidez. Para solucionar esto deben corregirse dos efectos producidos por la Tierra:

- *la desviación aparente debido a la rotación del planeta*
- *el cambio de dirección por la curvatura de la Tierra al transportar el giróscopo de un lugar a otro de su superficie*

La desviación aparente es una consecuencia de la rotación de nuestro planeta. Este gira a una velocidad de 15° por hora, lo que implica una velocidad de rotación de $1,09 \times 10^4$ rad/seg (ω_T). Al situar un giróscopo en cualquier lugar de la superficie del

planeta, detectará una componente de la ω_T . Esto resultará para un observador terrestre, sin conciencia del movimiento de esta, en un cambio de dirección o *desviación aparente* del eje del giróscopo. Si el eje de rotación del giróscopo se sitúa coincidente con la componente local de ω_T , no aparecerá este fenómeno.



Existe otro tipo de desviación, denominado *desviación real*, que se debe a las imperfecciones constructivas del sistema (fricción en los cojinetes, desequilibrio de la cuna, etc.). La corrección de estos defectos es cara y complicada, pero en la actualidad con la aparición del *giróscopo láser* se han anulado casi por completo.

El cambio de dirección se debe a la curvatura de la tierra. A medida que la aeronave se desplace sobre la superficie terrestre, parecerá que el giróscopo rolara su plano de giro. Este fenómeno se presenta en conjunto con el de desviación y parecería que el giróscopo describiera un movimiento cónico.

Como se indicó anteriormente, si el eje del giróscopo fuera paralelo al de rotación terrestre, sólo se presentaría el fenómeno de cambio de dirección. Pero esto no resulta práctico, es por ello que se emplean sistemas de corrección.

1.1 Limitaciones de los giróscopos de desplazamiento

Según la orientación de su eje de giro, un giróscopo de este tipo puede estar sujeto a las siguientes limitaciones de funcionamiento:

- **Bloqueo Cardánico:** sucede cuando el eje de rotación llega a coincidir con alguno de los otros ejes de rotación que sirven de referencia de desplazamiento de posición en vuelo. Si en esta condición se hace girar el giróscopo, las fuerzas que actúan sobre el sistema Cardánico harían que este precesase continuamente.
- **Error Cardánico:** es un error que está también relacionado con la orientación del sistema Cardánico y se produce cada vez que el giróscopo se desplaza co-

mo un conjunto sin que sus cunas se encuentren en ángulo recto. Afecta principalmente a los giróscopos de eje horizontal.

4. Formas de accionamiento de instrumentos giroscópicos

Existen dos sistemas principales para accionar los giróscopos: neumática o eléctrica.

En el sistema neumático, la caja del instrumento está conectada a una bomba de vacío accionada por el motor o un venturi exterior a la aeronave. La bomba o el venturi crean una depresión regulada por una válvula de alivio entre 3,5 a 4,5 pulgadas de Hg. Si es necesaria una depresión más baja se lograría mediante una válvula reguladora adicional en la tubería de alimentación del indicador. La caja del instrumento presenta una entrada para el aire circundante, que ingresa debido al vacío producido por los orificios de salida conectados a la bomba o venturi.

En grandes altitudes, los instrumentos giroscópicos accionados neumáticamente sufren los efectos de una disminución de la depresión debido a la menor presión atmosférica; esta reducción en la velocidad del rotor afecta la rigidez giroscópica del instrumento. Para solucionar este problema se utilizan giróscopos accionados eléctricamente.

Las fuentes de alimentación son corriente trifásica de 115 V y 400 Hz obtenidos de un inversor o alternador, y corriente continua de 28 V. Los instrumentos alimentados con corriente alterna utilizan el principio del motor de inducción en jaula de ardilla, y gracias a la alta frecuencia se logran grandes velocidades en el rotor (~ 24000 r.p.m.), con la consiguiente mejora en las prestaciones del equipo. Los accionados por corriente continua utilizan motores convencionales de tipo imán permanente.

2. Horizonte artificial

2.1 Generalidades

El objeto de este instrumento es indicar la posición de alabeo y cabeceo de una aeronave respecto de su vertical local.

Para esto utiliza un giróscopo cuyo eje de giro se encuentra en posición vertical mediante un dispositivo sensitivo a la gravedad.

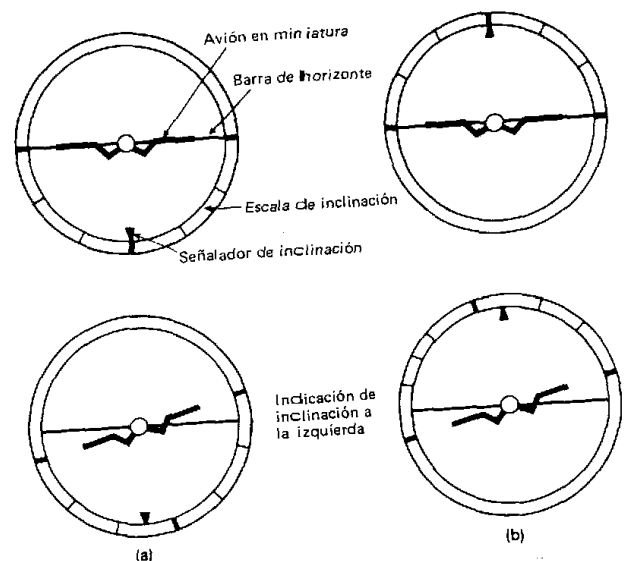
Las indicaciones de cabeceo y alabeo son presentadas por las posiciones relativas de dos elementos: uno que representa al avión y otro al horizonte natural. Mediante una aguja y una escala fija se proporciona información adicional sobre alabeo.

El principio de funcionamiento es muy simple. Consiste en un sistema Cardánico dispuesto de tal forma que la cuna interior forme la caja del rotor y se encuentre pivotada de forma paralela al eje lateral del avión (eje Y-Y). La cuna exterior pivota respecto del eje Z-Z de la aeronave. Los pivotes de la cuna exterior se sitúan en los extremos anterior y posterior de la caja del instrumento. El elemento que representa al

avión puede encontrarse fijo a la caja o exteriormente arriba y abajo para compensación de cabeceo.

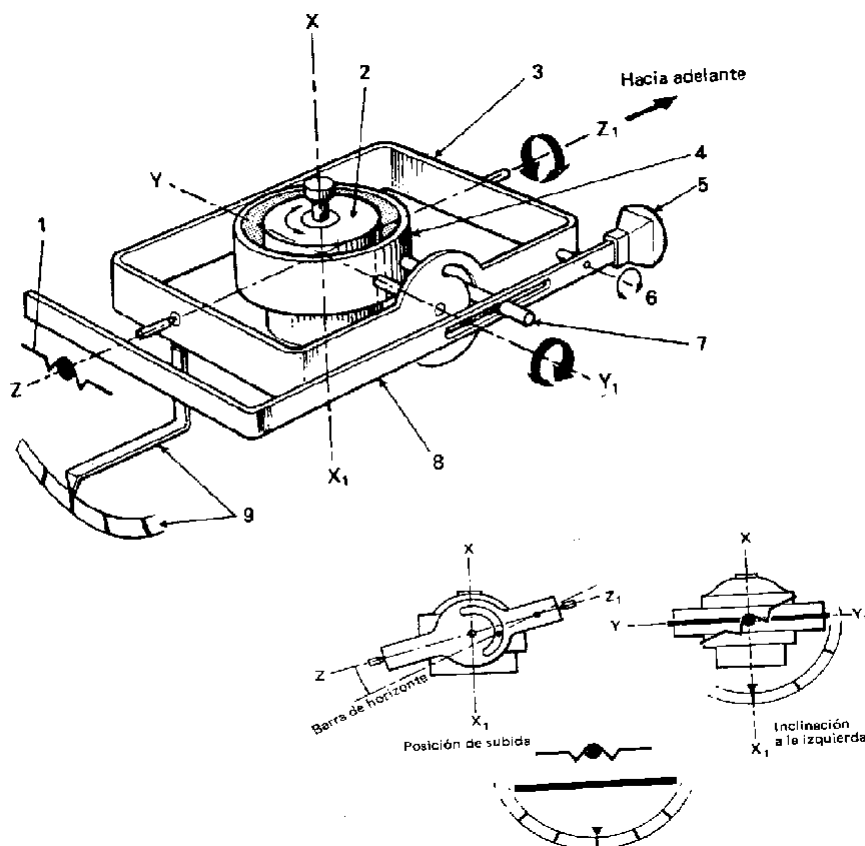
Cuando el equipo se encuentre operativo, el sistema se encuentra equilibrado en vuelo horizontal para que los tres ejes se encuentren perpendiculares entre sí.

La barra de horizonte se encuentra articulada sobre la cuna exterior del giróscopo y engrana con un pasador de accionamiento fijado a la cuna interior, esto permite aumentar la indicación puesto que actúa como una palanca. Solidaria a la misma, usualmente se encuentra una aguja tal cual se mencionó anteriormente.



Cuando el avión alabea, el instrumento gira según el eje Z-Z, y la barra de horizonte es arrastrada por el pivote, indicando el cambio de posición lateral.

La libertad de movimiento del sistema en alabeo y cabeceo es de 360° y $\pm 85^\circ$ respectivamente, este último se limita por un **tope elástico**. El motivo de esta restricción es evitar el **bloqueo Cardánico** mencionado en un punto anterior.

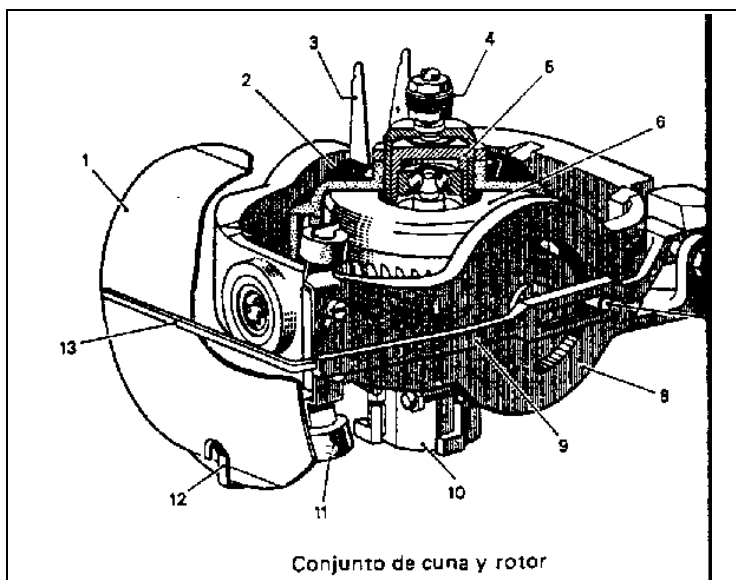


2.1.1 Horizonte artificial accionado neumáticamente

En este equipo el rotor se encuentra pivotado sobre cojinetes de bolas dentro de una caja que forma la cuna interior, la cual, está pivotada en una cuna exterior rectangular. El rodamiento inferior del rotor se coloca en un rebaje en la parte inferior de la carcasa del rotor, mientras que el rodamiento superior entra en un alojamiento cargado por resorte dentro del casquete superior para compensar los efectos de la expansión diferencial entre el eje del rotor y la caja, debida a las variaciones de temperatura.

En el extremo delantero de la cuna exterior, va colocada una placa de fondo que representa el cielo y que lleva solidaria una aguja de inclinación lateral a fin de indicar contra una escala el ángulo de inclinación o alabeo.

En la tapa posterior de la caja del instrumento existe una conexión para el acoplamiento de la alimentación de vacío. También existen orificios para el ingreso de aire filtrado que se sitúan sobre el soporte y el pivote del cojinete posterior de la cuna exterior, el cual se encuentra taladrado para comunicar con un canal en la cuna citada. Este canal termina en boquillas giratorias diametralmente opuestas dentro de la caja del rotor, cuyo lado inferior posee varios agujeros.

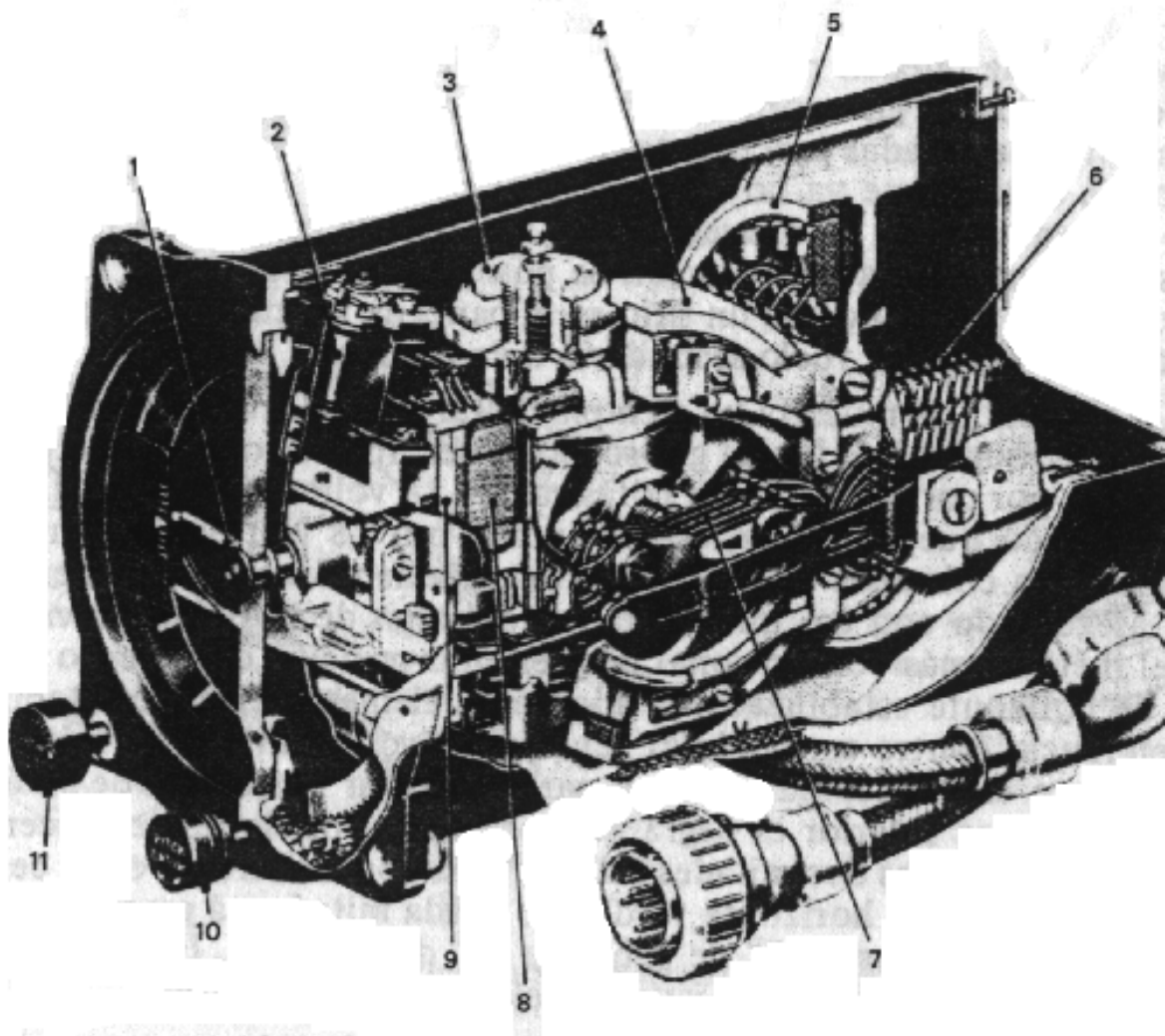


Horizonte artificial accionado neumáticamente. 1. Plataforma celeste. 2. Cuna interior. 3. Tope elástico. 4. Tuerca de equilibrado. 5. Compensador temperatura. 6. Rotor. 7. Pasador de accionamiento. 8. Cuna exterior. 9. Brazo accionador. 10. Unidad de paletas oscilantes. 11. Topes de parada. 12. Señalador de inclinación. 13. Barra horizontal.

Con el sistema de presión en funcionamiento, se crea una depresión para que la atmósfera circundante ingrese en la entrada filtrada y pase a través de los canales a las boquillas. El aire emitido por estas golpea las cubetas del rotor, lo cual hace que este gire a aproximadamente 15000 r.p.m. Luego de pasar por el rotor, el aire es extraído por una unidad de paletas oscilantes fijadas en la parte inferior del rotor.

2.1.2 Horizonte artificial accionado eléctricamente

La diferencia fundamental de este equipo es el método de accionamiento del rotor, que como se mencionó, puede ser por corriente continua o trifásica. Cuando se adopta un motor eléctrico para el accionamiento existe el problema de concentrar la mayor cantidad de la masa en el centro del rotor, lo cual disminuiría su rigidez. Es por esto que en el caso trifásico se utilizan los motores tipo **jaula de ardilla**. En este tipo el estator, que en un motor común se encuentra en su interior, gira en el exterior, aumentando de este modo su rigidez.



Horizonte accionado eléctricamente. 1. Figura de avión. 2. Conjunto indicador de falla energía. 3. Conjunto de giróscopo. 4. Motor de par de alabeo. 5. Motor de par de cabeceo. 6. Conjunto de anillo deslizante. 7. Conjunto de contacto de la cuna del giróscopo. 8. Estator. 9. Rotor. 10. Botón de ajuste de compensación de cabeceo. 11. Pulsador de erección rápida.

La alimentación eléctrica es suministrada por medio de anillos deslizantes, escobillas y conjuntos de contactos suaves. Para la corrección de los errores por traslación se emplean pequeños motores eléctricos ubicados en los pivotes de las cunas.

El motor usualmente gira a 20000 - 23000 r.p.m. Si llegase a fallar la alimentación al motor, aparecería una banderilla en la parte frontal del instrumento con la inscripción **off**, la cual se oculta por accionamiento de un solenoide en operación normal.

2.2 Sistemas de erección

Bajo este nombre se conocen a las soluciones empleadas para corregir los errores del giróscopo debido a traslación. Su función es mantener el eje de rotación del giróscopo alineado con la vertical local. Se clasifican en dos categorías: mecánicos y eléctricos.

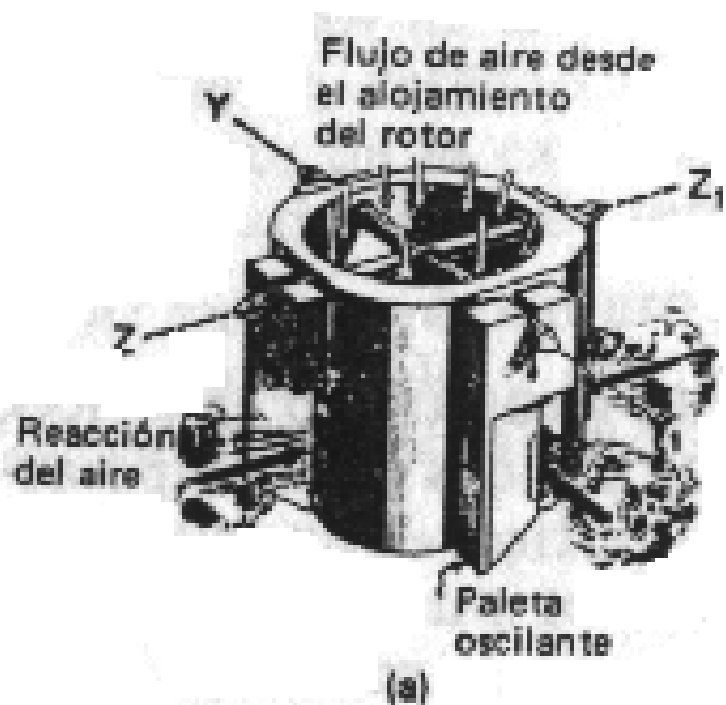
El régimen de erección es la velocidad con que se corrige la inclinación del rotor. En sistemas mecánicos es de alrededor de 8°/min mientras que en los eléctricos es de 3° a 5°/min.

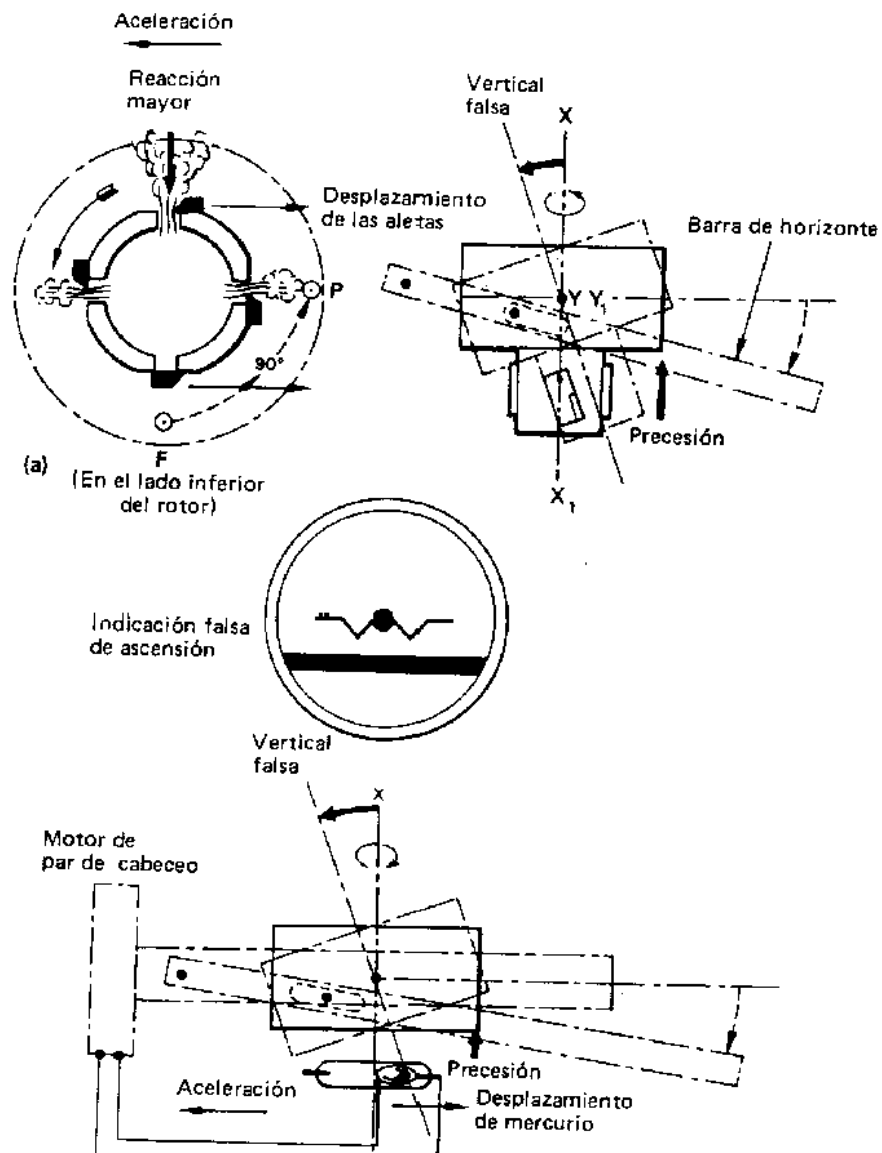
2.2.1 Sistemas mecánicos

2.2.1.1 Unidad de paletas oscilantes

Se emplea en instrumentos accionados por aire, se coloca en la parte inferior del rotor y consta de cuatro paletas pendulantes sujetas por parejas en dos ejes de intersección sostenidos en el cuerpo del giróscopo. En los costados del cuerpo existen cuatro aberturas pequeñas de forma alargada, ubicadas una debajo de cada paleta.

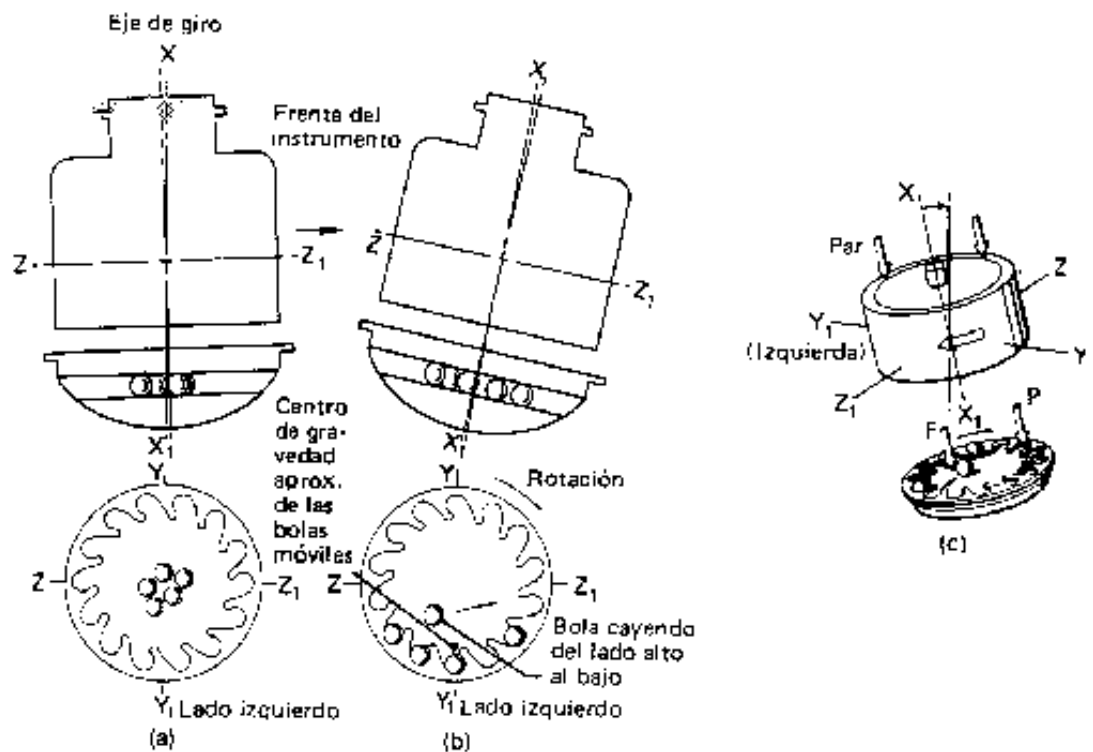
El aire es expulsado por estas aberturas. Como las paletas cuelgan siempre de forma vertical, debido a la atracción terrestre, el caudal en cada orificio dependerá de cuánto tape una paleta al mismo. Al encontrarse el eje de rotación del giróscopo inclinado respecto de la vertical local, algunas paletas abrirán más unos orificios que otros, produciendo una reacción en un cierto sentido que precesará el giróscopo de tal manera de alinearlo con la vertical.





2.2.1.2 Unidad de bolas

Se tiene en la parte inferior del rotor un mecanismo consistente en cinco u ocho bolas, según el diseño particular, las cuales pueden rodar libremente a un disco de erección redondeado. En el borde interior de este último se fija una placa con varios alojamientos, la separación de los mismos se elige de forma que se pueda regular la liberación de las bolas cuando el giróscopo se inclina. De esta manera se produce una concentración de masas en la parte inferior del rotor que provocan la precesión que corrige la posición del giróscopo.



La unidad se encuentra conectada al rotor mediante un mecanismo reductor que le imprime una velocidad de, aproximadamente, 25 r.p.m.

2.2.2 Sistemas eléctricos

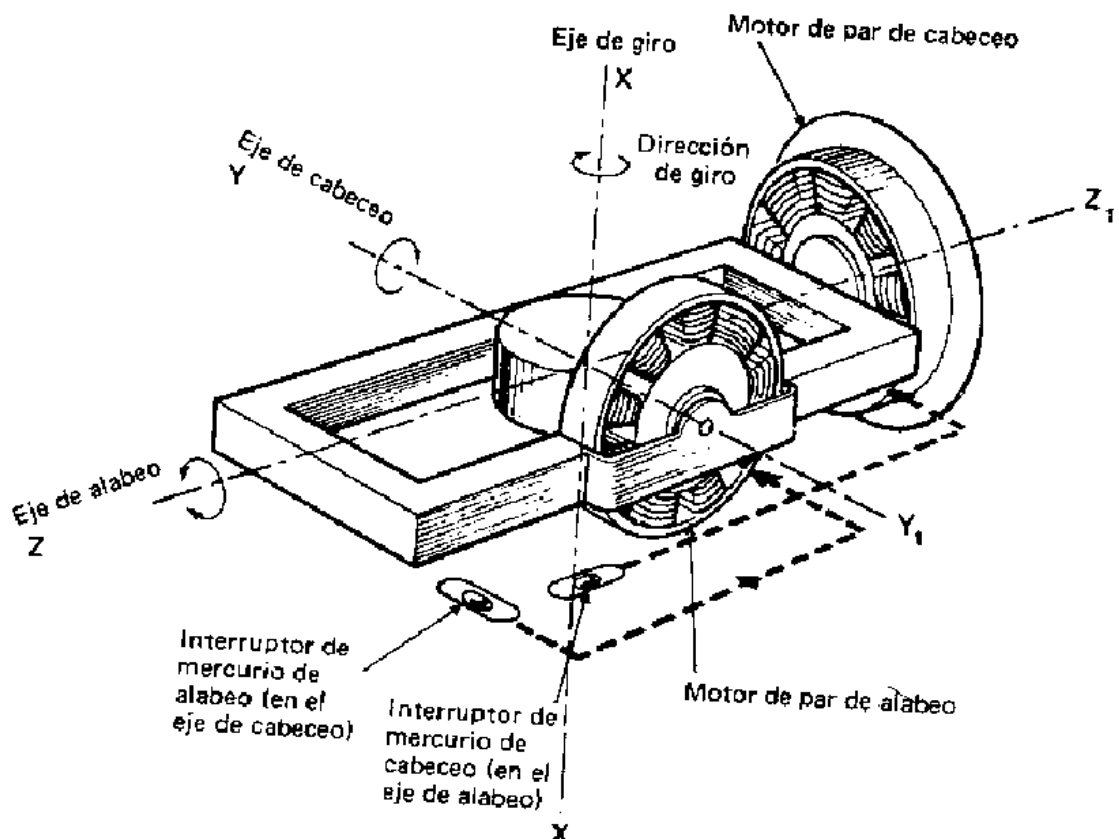
2.2.2.1 Motor de torsión e interruptores de nivelación

Se emplea en horizontes eléctricos y consta de dos motores eléctricos de torsión accionados independientemente por interruptores de nivelación de mercurio. Estos se encuentran alineados según el eje lateral y el longitudinal del instrumento.

El sensor lateral detecta el alabeo del rotor y envía una señal al motor eléctrico, ubicado según el eje de cabeceo, que obliga a precesar al giróscopo.

El sensor longitudinal detecta el desplazamiento en cabeceo y envía la señal al motor de torsión ubicado sobre el eje de alabeo.

Cada sensor tiene la forma de un tubo de cristal alargado con tres contactos, dos en cada extremo y un en el centro; en el interior del mismo se encuentra una cierta cantidad de mercurio. Los tubos se encuentran llenos de un gas inerte para evitar la formación de arcos eléctricos en los electrodos al hacer contacto el mercurio.



Los sensores se ubican en alojamientos ajustables, colocadas en ángulo recto en un bloque de interruptores situado debajo del alojamiento del giroscopio.

Los motores de torsión son del tipo jaula de ardilla, y poseen un control fino de su posición de giro (motor paso a paso).

Al funcionar normalmente el giroscopio, el mercurio de los sensores sólo hace contacto con el electrodo central del tubo, pero al inclinarse hacia algún lado se produce el contacto con otro de los electrodos. Esto permite el paso de la corriente eléctrica hacia los motores de torsión que efectúan la corrección.

2.2.3 Sistemas de erección rápida

En algunos horizontes eléctricos, si el eje del rotor se encuentra desplazado más de 10° de la vertical, se interrumpen los circuitos del sistema de torsión lo que implica que el giroscopio no se enderezará.

Esto se hace porque el giroscopio puede haber **basculado** o estar fuera de la vertical con un ángulo demasiado grande antes de poner en marcha el instrumento, entonces, debido al bajo régimen de corrección del sistema adoptado normalmente, se tardaría demasiado en colocar al giroscopio correctamente.

Para superar este inconveniente y llevar al giroscopio a su posición normal rápidamente, se incorpora un sistema de erección rápida.

2.2.3.1 Interruptor de erección rápida

Consiste en varios contactos conectados a la línea de alimentación de energía de los motores de torsión y sensores.

En operación normal del giróscopo, el interruptor está cerrado por un resorte y sólo permite el paso de corriente de bajo voltaje, mientras que los otros contactos permanecen abiertos.

Si el rotor se encuentra muy separado de la vertical, se oprime el interruptor de forma de cortar la alimentación al sistema de corrección y permitir la alimentación de alto voltaje a los motores de torsión. Esto aumenta el régimen de erección de 5°/min a 120 - 180°/min, según diseño.

2.2.3.2 Sistema electromagnético

Un electroimán circular se sujeta en el interior de la caja del instrumento, encima de un inducido en forma de sombrilla que está montado en el alojamiento del rotor del giróscopo. El inducido tiene aproximadamente el mismo diámetro que el imán.

Mediante una unidad de energía auxiliar se controlan el electroimán y el tiempo de erección.

Cuando se desea corregir al giróscopo, el inducido solidario al rotor se encontrará inclinado lejos del centro del electroimán, por lo que se ejercerá una fuerza mayor en un lado del inducido que en el otro lado lo que provocará una torsión. Esta corregirá la posición del rotor, alineándolo con el electroimán.

Para evitar daños, el equipo cuenta con un relé de retardo de tiempo, el que corta la alimentación de energía al electroimán luego de 20 segundos.

2.2.3.3 Errores debidos a la aceleración

Como todos los dispositivos de erección son de tipo pendular, es común que resulten afectados por las aceleraciones y virajes de la aeronave, lo cual provoca correcciones innecesarias. Por lo que se deben implementar sistemas que eviten estos efectos indeseables.

Consideremos el sistema de paletas analizado anteriormente. Una aceleración en la dirección de vuelo, cualquiera sea su sentido, abrirá más una aleta lateral y cerrará proporcionalmente la opuesta diametralmente. Esto cambia los esfuerzos provocados por el aire en su salida, originando una precesión que hará que el horizonte indique un ascenso/descenso falso.

En el caso de los sensores de mercurio, la aceleración moverá el mercurio (el cual tiene un alto peso específico) hacia la parte posterior o anterior del tubo; cerrando el circuito y provocando una precesión que indicará un ascenso/descenso falso.

De lo anterior, se deduce que durante los períodos de aceleración/desaceleración el horizonte giroscópico presentará una indicación falsa de ascenso/descenso. Afortunadamente, estos períodos resultan cortos y no influyen mayormente en el vuelo.

2.2.3.4 Errores debidos al viraje

Cuando una aeronave ingresa en un viraje con inclinación correcta, el eje del giróscopo permanece inicialmente en posición correcta, pero el sistema de paletas oscilantes o el sensor de alabeo son afectados por la aceleración centrífuga. Esto provoca una precesión hacia la resultante de las aceleraciones de gravedad y centrífuga, lo que provoca una indicación falsa de alabeo.

Si supone un avión efectuando un viraje de 360° , la fuerza centrífuga experimentada por el eje del giróscopo en la posición vertical falsa resulta constante durante toda la trayectoria, y perpendicular a la misma. Esto implica que cuando el avión cambia su rumbo a un régimen constante durante el viraje a 360° , la parte superior del eje del giróscopo trazará una trayectoria circular que está a 90° en avance del rumbo del avión.

Para corregir este problema se emplean tres métodos: inclinación del eje de giro del giróscopo, corte de erección y compensación de cabeceo-inclinación lateral.

2.2.3.4.1 Inclinación del eje de giro del giróscopo

Este método se basa en la idea de que, si la parte superior del eje describiera un círculo alrededor de sí mismo durante un viraje, entonces resultará un error constante. Para su aplicación se utiliza un dispositivo mecánico, que cambia con el tipo de horizonte, pero en todos los casos lo que se hace es impartir al eje del giróscopo desde la vertical verdadera una inclinación constante hacia adelante o hacia atrás. Este ángulo de inclinación es variable, pero suele ser de $1,6^\circ$ o $2,5^\circ$. En los equipos accionados neumáticamente, las paletas oscilantes se equilibran de manera que el giróscopo reciba un movimiento de precesión. En los equipos eléctricos el sensor de mercurio se coloca fijo en una posición determinada, a fin de provocar el mismo efecto.

2.2.3.4.2 Corte de erección

Se emplea en equipos eléctricos y se activa cuando el avión se inclina mas de 10° en cualquier dirección. Básicamente consiste en un conmutador que corta la señal enviada por el sensor cuando se supera este ángulo de alabeo. Sin embargo, el sistema de erección rápida sigue estando activo, cuando sea necesario.

2.2.3.4.3 Compensación de cabeceo-inclinación lateral

Consiste en un sistema combinado en el que el sensor de inclinación lateral se encuentra desconectado durante un viraje y su sistema de erección es controlado por el sensor de cabeceo. Su objetivo es corregir los errores variables de cabeceo y alabeo, sólo opera cuando el régimen de viraje produce una aceleración centrífuga superior a $0,18g$, lo que equivale a una inclinación de 10° del sensor de inclinación de alabeo.

2.2.3.5 Errores de pendulación

La pendulación se introduce deliberadamente en los horizontes giroscópicos para que el giróscopo descanse siempre aproximadamente en su posición vertical. Esto

ayuda a reducir el tiempo de erección cuando se arranca el equipo e impide que el sistema gire alrededor de los ejes de alabeo y cabeceo durante la parada del rotor.

Pero puede ser influido por las aceleraciones en vuelo recto y nivelado, y fuerzas centrífugas en virajes. Por lo tanto, resulta una fuente de error adicional.

Si se considera un viraje a la derecha de 360° , la fuerza centrífuga hará precesar el giróscopo de forma que indique un cabeceo. En todo el viraje la parte superior del rotor traza una trayectoria circular que, a diferencia de la resultante de los efectos de viraje en los sistemas de erección, está sincronizada con el cambio de rumbo del avión. Cualquier cuerda del círculo desde el punto en que comenzó el viraje indica la inclinación del eje del giróscopo en relación con la vertical verdadera, y se presentarán errores variables en las indicaciones de alabeo y cabeceo.

2.2.3.5.1 Compensación de errores de alabeo y cabeceo

La compensación se realiza adoptando el método de eje inclinado, siendo la inclinación en este caso alrededor del eje de alabeo y dependiendo la dirección de la rotación del rotor. La cantidad de inclinación está regulada por el tipo de instrumento, considerándose $0,5^\circ$ y $1,75^\circ$ valores típicos.

El efecto de la compensación es el mismo que el producido cuando el eje del giróscopo se inclina en cabeceo. Es decir, la parte superior del eje traza una trayectoria circular alrededor de sí mismo para producir un solo error constante.