

Capítulo 5

Instrumentos Giroscópicos

Cátedra de Instrumentos y Aviónica

Ing. Jorge García



Universidad
Nacional
de Córdoba



Departamento
de Aeronáutica

Año 2019

Propiedades del giróscopo

Indicadores de virajes, neumáticos, de C.C. y C.A.

Indicadores de actitud en dos ejes con giróscopo integrado, y remoto

Magnetismo terrestre, brújula, giróscopo direccional libre

Compás giroscópico auto-corregido, indicador con giróscopo integrado, y remoto

Central giroscópica para la indicación de actitud en tres ejes y toda actitud

Un poco de historia...



Etimología

Giróscopo proviene del griego, *gyros*: rotación y *skopein*: vista/

Desarrollo del giróscopo

Bernard León Foucault (1819-1868) inventó el giróscopo en 1852 y le permitió observar el giro del planeta Tierra. Montó una masa rotatoria en un soporte de Cardano para un experimento que demostrara la rotación de la Tierra. Aunque ya había demostrado la rotación de este cuerpo con el péndulo que lleva su nombre, no comprendía por qué la velocidad de rotación del mismo resultaba más lenta que la velocidad de rotación de la Tierra por un factor $\sin \lambda$, donde λ representa la latitud donde se encuentra el péndulo. Por lo anterior, Foucault se dió cuenta que necesitaba otro aparato para demostrar la rotación de la Tierra de forma más simple y utilizó los trabajos del astrónomo alemán Johann Bohnenberger.

Fuente: Wikipedia

Indicadores de virajes, neumáticos, de C.C. y C.A.

Indicadores de actitud en dos ejes con giróscopo integrado, y remoto

Magnetismo terrestre, brújula, giróscopo direccional libre

Compás giroscópico auto-corregido, indicador con giróscopo integrado, y remoto

Central giroscópica para la indicación de actitud en tres ejes y toda actitud

El giróscopo

Un giróscopo consiste en una masa rotante, con forma de rueda, cuyo eje se sujet a una armazón o cuna (gimbal) interior y ésta a otra cuna exterior. Este sistema se encuentra libre de rotar en el espacio. El giróscopo posee las siguientes propiedades:

- ① **Rigidez:** es la que permite que rote siempre en el mismo plano y se opone a cualquier momento que tienda a cambiarlo.
- ② **Precesión:** consiste en la variación angular del plano de rotación bajo el influjo de la aplicación de un momento. Su valor es proporcional a la intensidad del momento aplicado e inversamente proporcional al momento de inercia y momento cinético del rotor.



Instrumentos giroscópicos

Indicadores de virajes, neumáticos, de C.C. y C.A.

Indicadores de actitud en dos ejes con giróscopo integrado, y remoto

Magnetismo terrestre, brújula, giróscopo direccional libre

Compás giroscópico auto-corregido, indicador con giróscopo integrado, y remoto

Central giroscópica para la indicación de actitud en tres ejes y toda actitud

Aplicaciones giróscopo

- Giróscopos libres
 - Ejemplo: sistemas iniciales
- Giróscopos de desplazamiento
 - Dos (2) grados de libertad
 - Detecta desplazamientos angulares
 - Utiliza la propiedad de rigidez
 - Como referencia direccional se emplea uno de eje horizontal
 - Como referencia en cabeceo y alabeo se emplea uno de eje vertical
 - Ejemplos: horizonte artificial, compás giroscópico
- Giróscopos de velocidad
 - Un (1) grado de libertad
 - Detecta velocidades angulares
 - Utiliza la propiedad de precesión
 - Ejemplo: indicador de giro y viraje

Indicadores de virajes, neumáticos, de C.C. y C.A.

Indicadores de actitud en dos ejes con giróscopo integrado, y remoto

Magnetismo terrestre, brújula, giróscopo direccional libre

Compás giroscópico auto-corregido, indicador con giróscopo integrado, y remoto

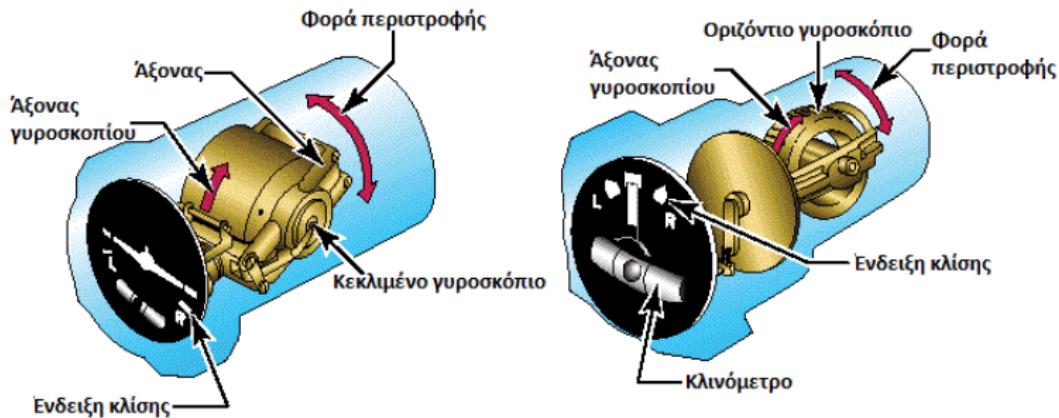
Central giroscópica para la indicación de actitud en tres ejes y toda actitud

Accionamiento del giróscopo

-  Giróscopo neumático
-   Giróscopo eléctrico
-  Giróscopo laser
-  Giróscopo de fibra óptica

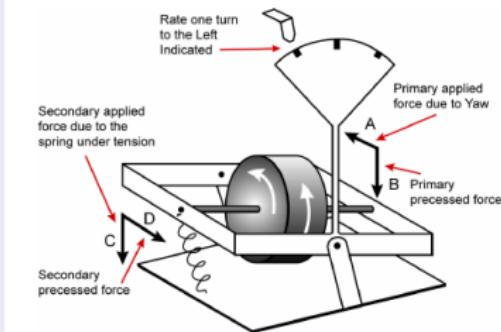
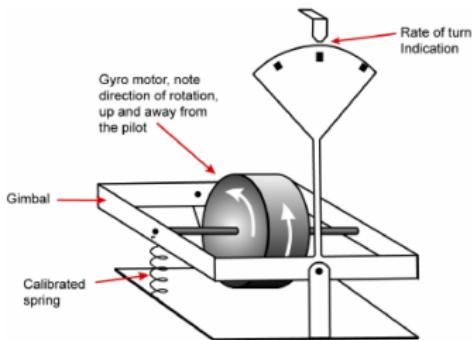
Indicadores de virajes, neumáticos, de CC y CA

Coordinador de giro. Indicador de viraje



Indicadores de virajes, neumáticos, de CC y CA

Indicador de viraje



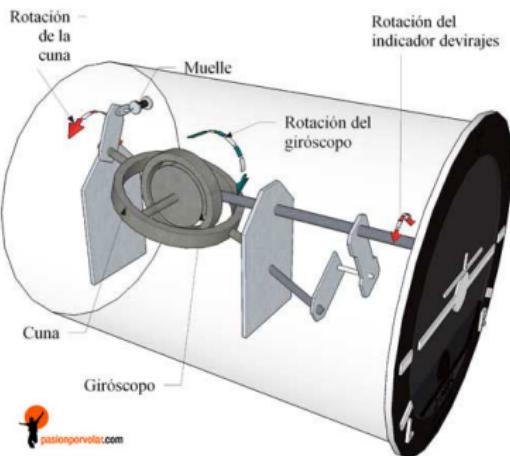
Indicadores de virajes, neumáticos, de CC y CA

Indicador de viraje



Indicadores de virajes, neumáticos, de CC y CA

Coordinador de giro



Viraje con resbale



Viraje coordinado

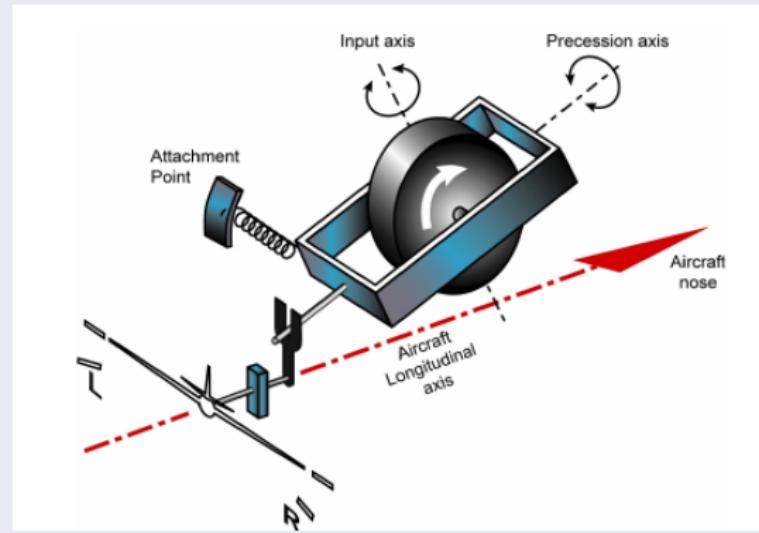


Viraje con derrape



Indicadores de virajes, neumáticos, de CC y CA

Coordinador de giro



Indicador de giro y viraje

Indicadores de virajes, neumáticos, de CC y CA



Coordinated Turn



Slipping Turn



Skidding Turn



Coordinated Turn
rudder into turn



Slipping Turn



Skidding Turn

Note the slight differences in rudder placement.

Propiedades del giróscopo

Indicadores de virajes, neumáticos, de C.C. y C.A.

Indicadores de actitud en dos ejes con giróscopo integrado, y remoto

Magnetismo terrestre, brújula, giróscopo direccional libre

Compás giroscópico auto-corregido, indicador con giróscopo integrado, y remoto

Central giroscópica para la indicación de actitud en tres ejes y toda actitud

Indicadores de actitud en dos ejes

Ver apunte de horizonte artificial

El Campo Magnético Terrestre (CMT)



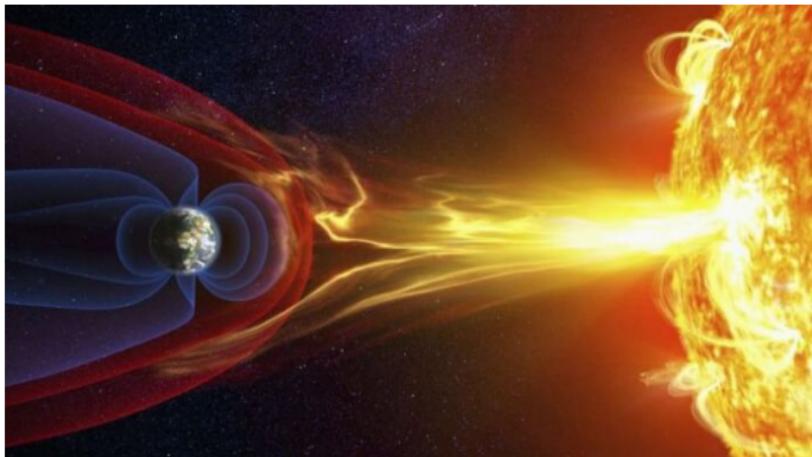
Campo magnético terrestre



Satélites que estudian el campo magnético de la Tierra



Magnetismo terrestre



Fuente: <https://www.capasdelatierra.org/campo-magnetico-magnetosfera/>

Función principal del CMT

Proteger al planeta Tierra del viento solar

Características del CMT

- El proceso que lo origina se conoce como **geodinamo** (hipótesis del dínamo)
- El primero en estudiarlo fue Karl Friedrich Gauss en el siglo XIX
- Su intensidad es mínima cerca del ecuador y máxima cerca de los polos
- Es una estructura dinámica que responde a la actividad del Sol
- Los polos geográficos no coinciden con los magnéticos, se mueven en el tiempo
- Han existido “*inversiones*” del campo en la historia del planeta, aproximadamente en 20000000 de años se han invertido cada 200000 - 300000 años, la última ocurrió aproximadamente hace 780000 años
- La interacción con el viento solar produce *tormentas magnéticas*, algunas partículas cargadas quedan atrapadas en la magnetósfera y se precipitan a las regiones polares, chocando con moléculas de oxígeno y nitrógeno, emitiendo luz roja y verde conocidas como *auroras boreales* en latitud norte y *auroras australes* en latitud sur.

Mayores detalles sobre el CMT pueden encontrarse en [Cómo funciona el campo magnético de la Tierra, en seis espectaculares GIF](#)

Propiedades del giróscopo

Indicadores de virajes, neumáticos, de C.C. y C.A.

Indicadores de actitud en dos ejes con giróscopo integrado, y remoto

Magnetismo terrestre, brújula, giróscopo direccional libre

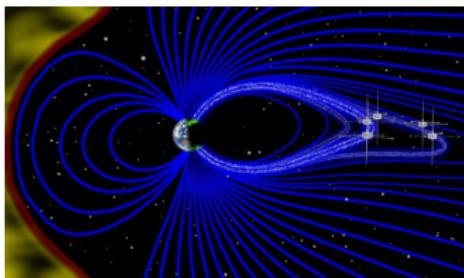
Compás giroscópico auto-corregido, indicador con giróscopo integrado, y remoto

Central giroscópica para la indicación de actitud en tres ejes y toda actitud

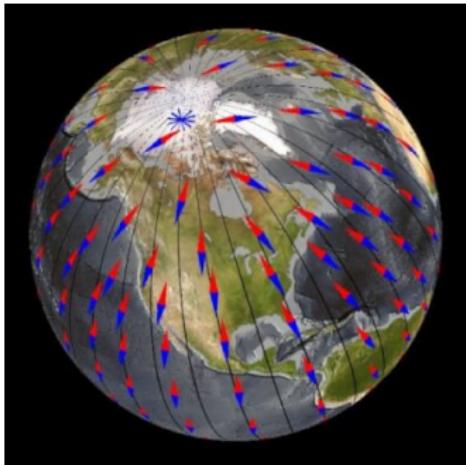
Magnetismo terrestre



Aurora



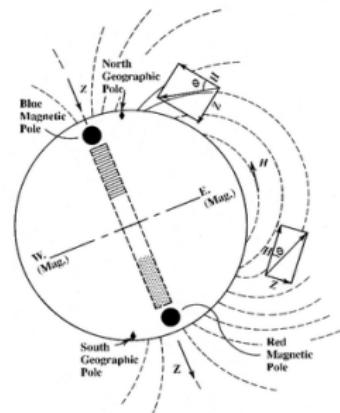
Interacción del CMT con el viento solar



Fuente: <https://www.capasdelatierra.org/campo-magnetico-magnetosfera/>

Propiedades del CMT

- Intensidad:** resulta máxima en los polos y mínima en la zona del ecuador con un rango entre 25000 a 65000 nanoTesla (0,25 a 0,65 Gauss). En la actualidad se está debilitando con una tasa de 10-15 % en los últimos 150 años. Su intensidad ha subido y bajado en el pasado, siendo las mismas dentro de los valores obtenidos por registros de los campos magnéticos grabados en rocas.
- Inclinación:** se inclina hacia el suelo en la zona de los polos magnéticos, hasta quedar perpendicular a la superficie, y rota progresivamente hasta quedar horizontal al suelo en el ecuador magnético. En un mapa las líneas de igual inclinación magnética se denominan *isoclinas*, del griego *isoklines* = *puntos de la tierra con igual inclinación magnética*
- Declinación:** En un mapa las líneas de igual declinación magnética se denominan *isogonas*, del griego *isogonios* = *cuerpo geométrico de ángulos iguales*
- Dipolaridad:** el campo magnético presenta un polo norte y otro sur, que no coinciden con los polos geográficos, y su ubicación es variable en el tiempo.



Inclinación del CMT

Variaciones del CMT

- **Variaciones temporales de corto plazo:** variaciones periódicas en la fuente que genera al CMT o de fenómenos exteriores.
- **Variaciones temporales de largo plazo:** al superar un (1) año terrestre de duración, se las conoce como **Variaciones Seculares**. Son causadas por dos tipos de procesos que tienen lugar en el núcleo terrestre. El primero está relacionado con las variaciones del campo principal de un dipolo y opera con escalas de tiempo de cientos o miles de años. El segundo se relaciona con las variaciones del campo no dipolar, en escalas de tiempo del orden de decenas de años.
- **Inversión de campo:** según se explicó anteriormente

Se puede obtener mucha información sobre estos temas y también planos actualizados en [National Ocean and Atmospheric Administration](#)

Propiedades del giróscopo

Indicadores de virajes, neumáticos, de C.C. y C.A.

Indicadores de actitud en dos ejes con giróscopo integrado, y remoto

Magnetismo terrestre, brújula, giróscopo direccional libre

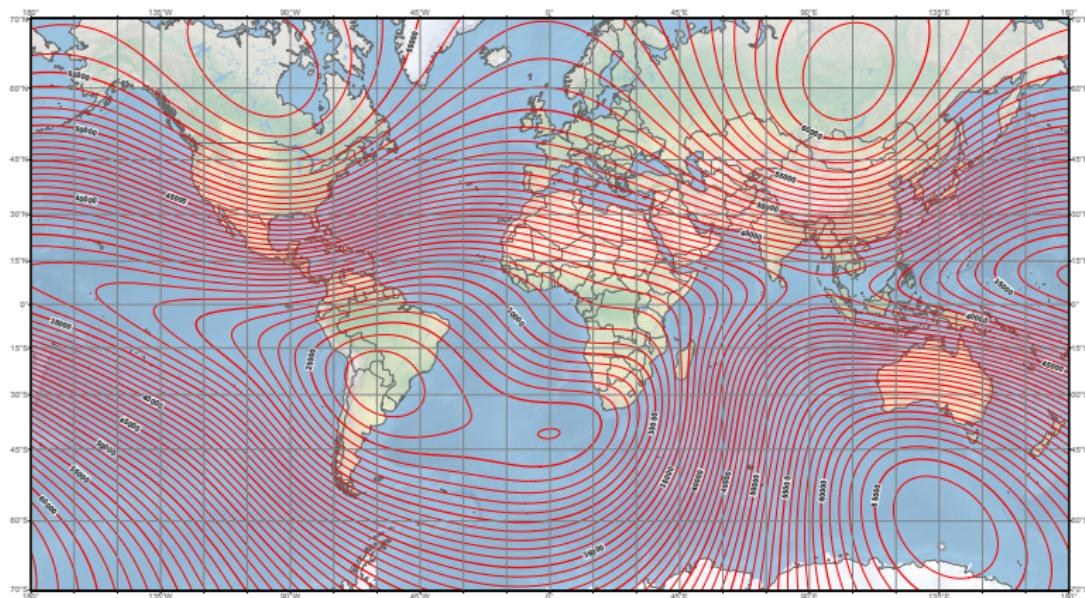
Compás giroscópico auto-corregido, indicador con giróscopo integrado, y remoto

Central giroscópica para la indicación de actitud en tres ejes y toda actitud

Magnetismo terrestre

Mapa Intensidad de CMT

US/UK World Magnetic Model - 2019.0
Main Field Total Intensity (F)



Map developed by NOAA/NCEI and CIRES
<https://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM>
Published February 2019

Ing. Jorge Garcia

Capítulo 5 Instrumentos Giroscópicos

Propiedades del giróscopo

Indicadores de virajes, neumáticos, de C.C. y C.A.

Indicadores de actitud en dos ejes con giróscopo integrado, y remoto

Magnetismo terrestre, brújula, giróscopo direccional libre

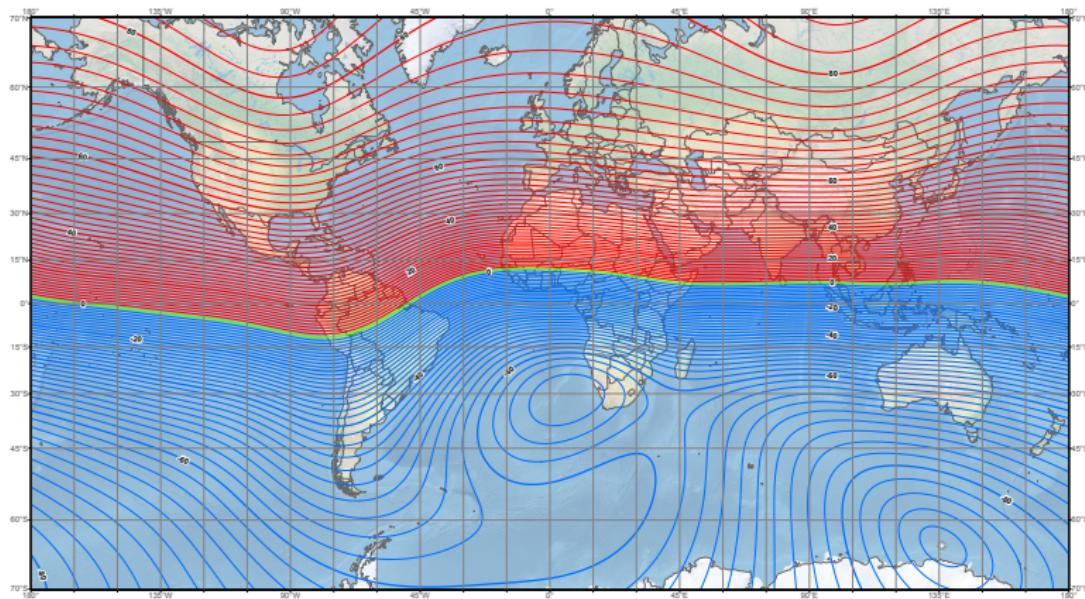
Compás giroscópico auto-corregido, indicador con giróscopo integrado, y remoto

Central giroscópica para la indicación de actitud en tres ejes y toda actitud

Magnetismo terrestre

Líneas Isoclinas

US/UK World Magnetic Model - 2019.0
Main Field Inclination (I)



Main Field Inclination (I)
Contour Interval: 2 degrees, red contours positive (down); blue negative (up); green zero line.
Mercator projection.

◎: Position of dip poles

Map developed by NOAA/NCEI and CIRES
<https://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM>
Published February 2019

Propiedades del giróscopo

Indicadores de virajes, neumáticos, de C.C. y C.A.

Indicadores de actitud en dos ejes con giróscopo integrado, y remoto

Magnetismo terrestre, brújula, giróscopo direccional libre

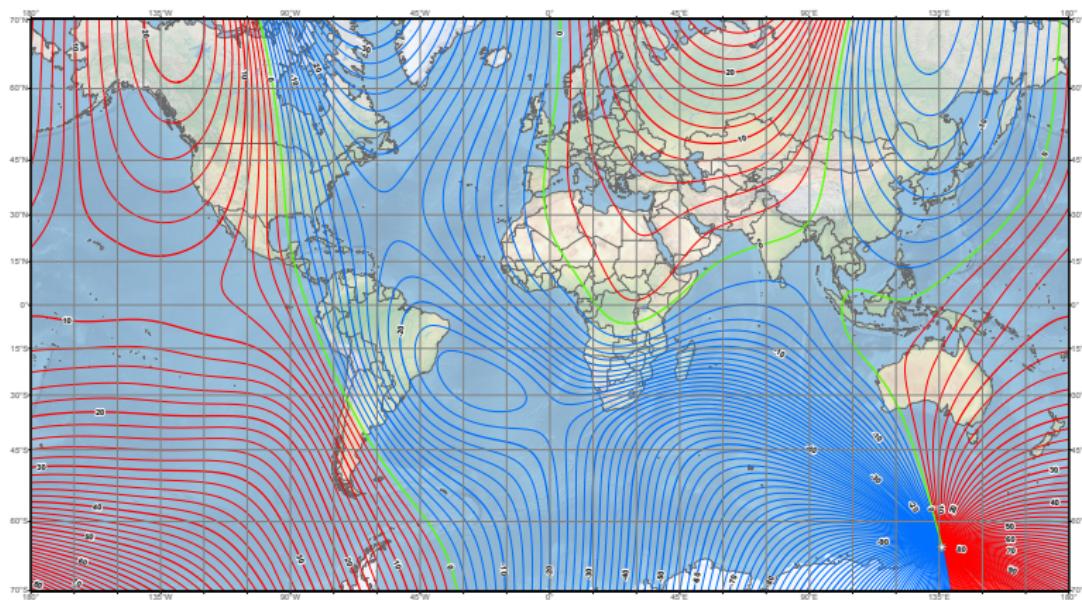
Compás giroscópico auto-corregido, indicador con giróscopo integrado, y remoto

Central giroscópica para la indicación de actitud en tres ejes y toda actitud

Magnetismo terrestre

Líneas Isógonas

US/UK World Magnetic Model - 2019.0
Main Field Declination (D)



Main Field Declination (D)
Contour interval: 2 degrees, red contours positive (east); blue negative (west); green (agonic) zero line.
Mercator projection.

Position of dip poles

Map developed by NOAA/NCEI and CIRES
<https://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM>
Published February 2019

Aplicaciones del CMT

- Los animales vivos pueden detectarlo y lo utilizan para orientarse durante sus migraciones (**magnetorrecepción**)
- **En la navegación, marítima o aérea, para orientarse desde el siglo XII**
- **Estudio de estructuras geológicas subterráneas**

Propiedades del giróscopo

Indicadores de virajes, neumáticos, de C.C. y C.A.

Indicadores de actitud en dos ejes con giróscopo integrado, y remoto

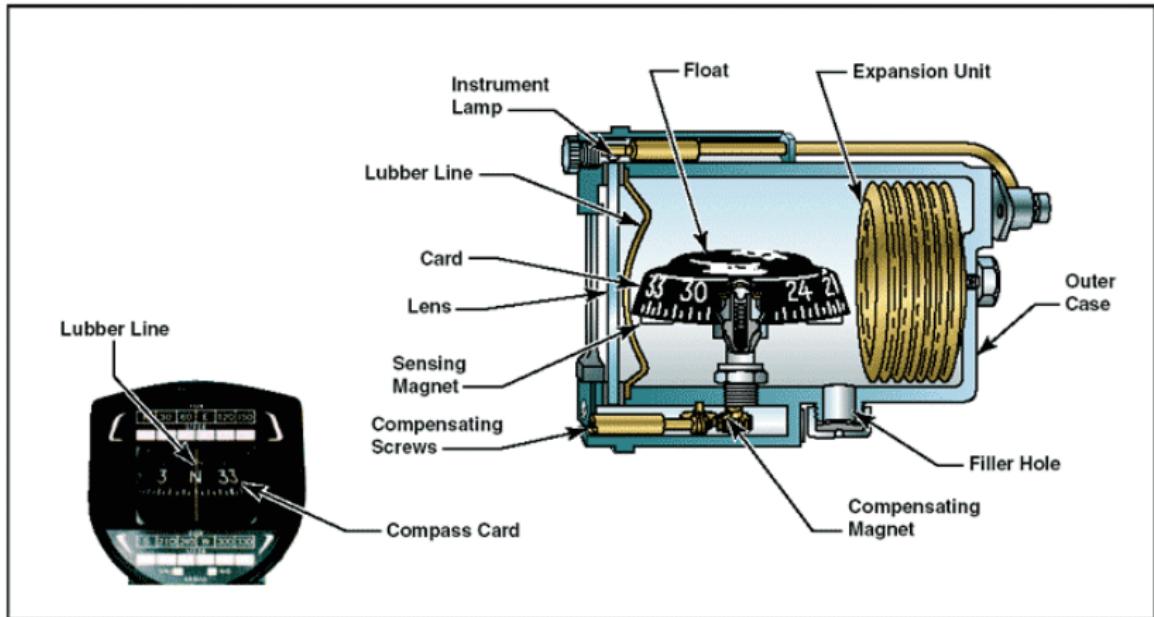
Magnetismo terrestre, brújula, giróscopo direccional libre

Compás giroscópico auto-corregido, indicador con giróscopo integrado, y remoto

Central giroscópica para la indicación de actitud en tres ejes y toda actitud

Magnetismo terrestre

Forma constructiva brújula magnética



Propiedades del giróscopo

Indicadores de virajes, neumáticos, de C.C. y C.A.

Indicadores de actitud en dos ejes con giróscopo integrado, y remoto

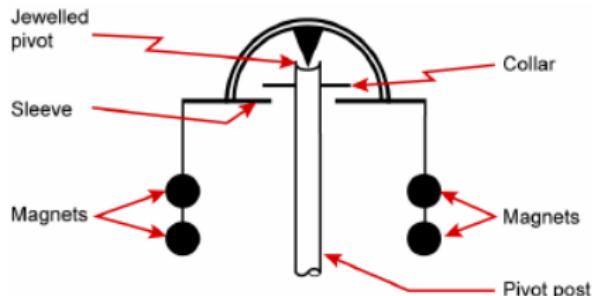
Magnetismo terrestre, brújula, giróscopo direccional libre

Compás giroscópico auto-corregido, indicador con giróscopo integrado, y remoto

Central giroscópica para la indicación de actitud en tres ejes y toda actitud

Magnetismo terrestre

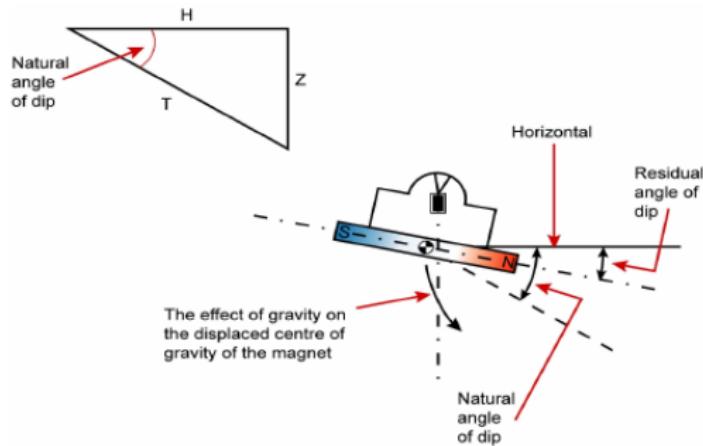
Forma constructiva brújula magnética



Propiedades

- Horizontabilidad
- Sensibilidad
- Aperiodicidad

Brújula magnética. Horizontabilidad



Requerimiento

Resulta esencial que la brújula se mantenga lo más cercano posible al plano horizontal

Solución

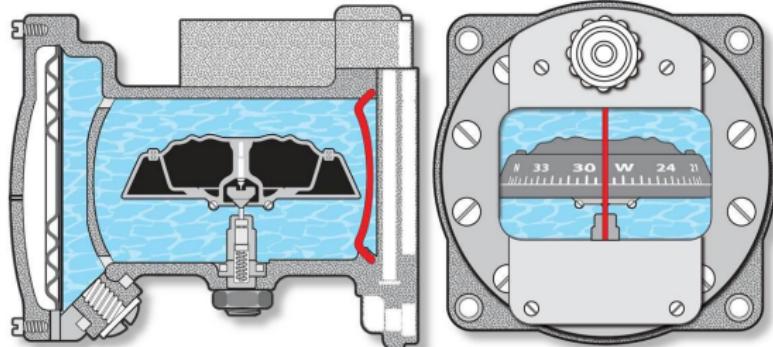
Mediante la forma constructiva y de suspensión en forma de péndulo, con su centro de gravedad por debajo del punto de suspensión.

El ángulo residual de inclinación puede ser $< 3^\circ$

Brújula magnética. Sensibilidad

La sensibilidad es una medida de la habilidad del instrumento para indicar con precisión hacia el norte.

Dado que no puede aumentarse la intensidad del CMT, se utilizan varios imanes de gran intensidad y se reduce todo lo posible la fricción en el punto de pivote. Este usualmente es una piedra preciosa lubricado por el líquido que contiene el instrumento que, al ser cierta densidad, permite una cierta flotación de la carta, reduciendo la fricción.



Brújula magnética. Aperiodicidad

La aperiodicidad se define como la habilidad del sistema para amortiguar rápidamente las oscilaciones, apuntando hacia el polo norte magnético, después de un desplazamiento por maniobras o turbulencias.

Si una brújula magnética no es enteramente aperiódica, el efecto es que su indicación oscila alrededor del norte magnético, llegando a descansar sólo lentamente.

La aperiodicidad se logra utilizando imanes pequeños, manteniendo la masa del conjunto oscilante cerca de su punto pivotante y reduciendo el momento de inercia total. Esto puede lograrse utilizando materiales ligeros en la parte móvil y mediante la viscosidad del fluido amortiguante. Éste fluido debe ser transparente y llenar completamente el interior del instrumento para evitar oscilaciones. Para ésto se provee unas cápsulas de expansión debido a efectos de temperatura.

Brújula magnética. Distancias de seguridad

Uno de los mayores problemas con el compás magnético es que resulta de lectura directa, por lo que debe ubicarse en la cabina del piloto y, por lo tanto, se encuentra rodeado por equipos que pueden causarle desviación a su indicación.

Por lo anterior, debe estudiarse cuidadosamente la ubicación del instrumento.

Como recomendaciones sobre la ubicación del mismo:

- Cada equipo eléctrico o electrónico cercano no debe causar una desviación de no mas de 1° en el compás. La suma total de los errores de todos los equipos de este tipo debe ser menor a 2° .
- De la misma manera, los cables de conexión de cada equipo, desviaciones $< 1^\circ$, para todos los cables, $< 2^\circ$.
- La operación de los equipos en cabina, desviación $< 1^\circ$
- Cuando el compás magnético es el instrumento principal para el rumbo, la desviación máxima de cualquier rumbo $< 3^\circ$.

Propiedades del giróscopo

Indicadores de virajes, neumáticos, de C.C. y C.A.

Indicadores de actitud en dos ejes con giróscopo integrado, y remoto

Magnetismo terrestre, brújula, giróscopo direccional libre

Compás giroscópico auto-corregido, indicador con giróscopo integrado, y remoto

Central giroscópica para la indicación de actitud en tres ejes y toda actitud

Magnetismo terrestre

Compás magnético de carta vertical

También conocido como tipo E.



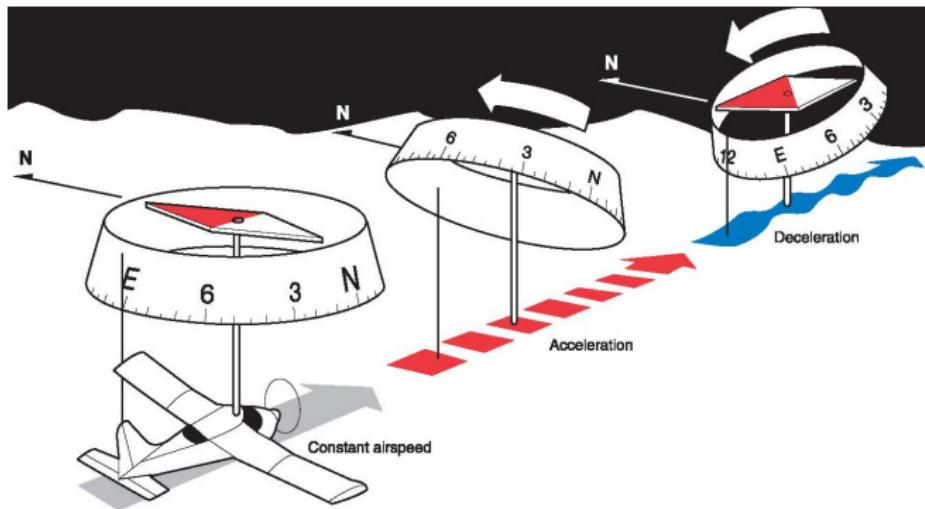
Fuente: <http://n98297.blogspot.com/2017/12/pai-700-compass-installation.html>

Errores brújula magnética

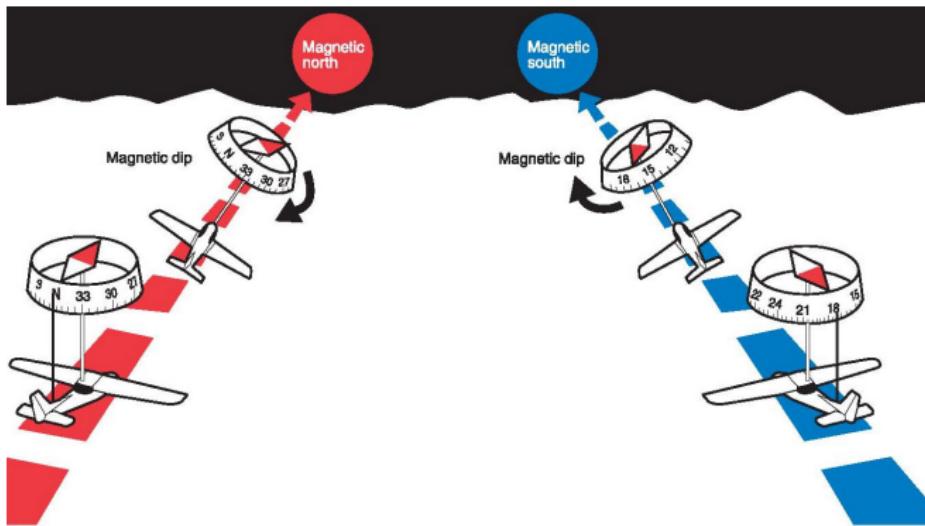
- Aceleración
- Giro
- Movimiento del líquido

Errores brújula magnética. Aceleración

Debido a la inercia.



Errores brújula magnética. Giro



Directional Gyro Indicator

El Directional Gyro Indicator (DGI) o Direction Indicator (DI) es un instrumento que consiste en un giróscopo compuesto por una masa que gira rápidamente, libre para moverse sobre uno o dos ejes, perpendicular a los ejes de rotación y el uno de otro. Es una brújula que mira siempre al polo geográfico.

El girocompás fue patentado en 1885 por el holandés Martinus Gerardus Van Den Bos, si bien su diseño nunca funcionó adecuadamente. En 1889, el capitán Arthur Krebs diseñó un giróscopo pendular eléctrico para el submarino experimental francés *Gymnote*, que le permitiría forzar un bloqueo naval en 1890.

A principios del siglo XX, un problema militar importante fue el control y la navegación de los barcos, que cada vez presentaban diseños más avanzados. Entre los primeros avances a este respecto destacó el diseño de sensores que posibilitaran el control en lazo cerrado.

En 1903 el alemán Herman Anschütz-Kaempfe construyó un girocompás que funcionaba y obtuvo una patente sobre su diseño, en 1908 junto al estadounidense Elmer Ambrose Sperry patentaron el instrumento en los Estados Unidos y Gran Bretaña.

Propiedades del giróscopo

Indicadores de virajes, neumáticos, de C.C. y C.A.

Indicadores de actitud en dos ejes con giróscopo integrado, y remoto

Magnetismo terrestre, brújula, giróscopo direccional libre

Compás giroscópico auto-corregido, indicador con giróscopo integrado, y remoto

Central giroscópica para la indicación de actitud en tres ejes y toda actitud

Compás giroscópico auto-corregido

Los DGI tienen las siguientes ventajas sobre la brújula magnética:

- Pueden señalar el norte geográfico, esto es el eje de giro del planeta Tierra
- No se ven afectados por acumulaciones de metal, como el casco de barcos y aeronaves

Los DGI tienen las siguientes desventajas sobre la brújula magnética:

- Requieren de una fuente constante de energía.
- Son mucho más costosos

DGI. Desviaciones

- **Desvío o precesión real:** la fricción de los rodamientos sobre los que giran el motor y las cunas puede originar, con el tiempo, desequilibrios de las cunas, lo que ocasiona desvíos del sistema cardánico, los cuales resultan prácticamente inapreciables.
- **Desvío o precesión aparente:** mientras el eje de rotación del giróscopo se halla apuntando al Norte, el movimiento de rotación de la tierra provoca una desviación aparente del eje del rotor, aproximadamente $15^\circ/\text{hora} \times \text{sen(latitud)}$.

Propiedades del giróscopo

Indicadores de virajes, neumáticos, de C.C. y C.A.

Indicadores de actitud en dos ejes con giróscopo integrado, y remoto

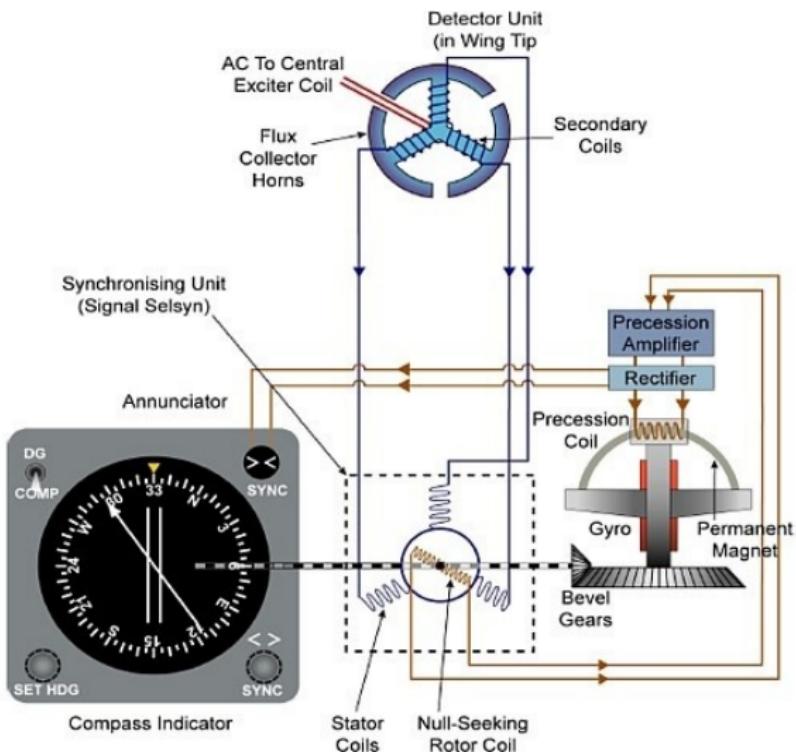
Magnetismo terrestre, brújula, giróscopo direccional libre

Compás giroscópico auto-corregido, indicador con giróscopo integrado, y remoto

Central giroscópica para la indicación de actitud en tres ejes y toda actitud

Compás giroscópico auto-corregido

Girocompás esclavo



Propiedades del giróscopo

Indicadores de virajes, neumáticos, de C.C. y C.A.

Indicadores de actitud en dos ejes con giróscopo integrado, y remoto

Magnetismo terrestre, brújula, giróscopo direccional libre

Compás giroscópico auto-corregido, indicador con giróscopo integrado, y remoto

Central giroscópica para la indicación de actitud en tres ejes y toda actitud

Central giroscópica

AHRS

Attitude and Heading Reference Systems

Los **Sistemas de Referencia de Actitud y Rumbo**, son sensores tridimensionales que proporcionan información acerca del rumbo, la actitud, y la guiñada de una aeronave. Este tipo de sistemas están específicamente diseñados para reemplazar a los antiguos instrumentos de control giroscópicos, y proporcionar una mejor precisión y fiabilidad. Están conformados por giróscopos o MEMs, acelerómetros, y magnetómetros, que proporcionan datos en los tres ejes del espacio. Algunos AHRS utilizan receptores GPS para mejorar la estabilidad a largo plazo de los giróscopos. Como técnica de fusión sensorial, es habitual emplear Filtros de Kalman, de tal manera que se obtenga una única solución a partir de las diversas fuentes de datos originales. Los AHRS se diferencian de los sistemas de navegación inercial en que se basan en el uso de magnetómetros y/o receptores GPS para corregir los datos en bruto (sin procesar) del giróscopo.

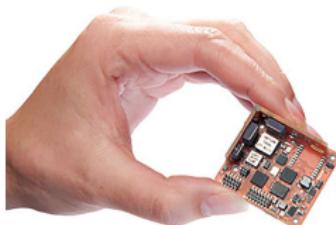
Propiedades del giróscopo
Indicadores de virajes, neumáticos, de C.C. y C.A.
Indicadores de actitud en dos ejes con giróscopo integrado, y remoto
Magnetismo terrestre, brújula, giróscopo direccional libre
Compás giroscópico auto-corregido, indicador con giróscopo integrado, y remoto
Central giroscópica para la indicación de actitud en tres ejes y toda actitud

Central giroscópica

AHRS

Integración

Los AHRS se integran normalmente en Sistemas electrónicos de información de vuelo (EFIS) y se suelen combinar con Digital Air Data Computer (DADC), formando un Air Data, Attitude and Heading Reference Systems (ADAHRS), que proporciona información adicional tal como la velocidad del avión relativa al aire, altitud, y temperatura del aire en el exterior del avión.



Fuente: <https://www.xsens.com/products/mti-100-series/>



Fuente: <https://watson-gyro.com/?s=ahrs>

Propiedades del giróscopo

Indicadores de virajes, neumáticos, de C.C. y C.A.

Indicadores de actitud en dos ejes con giróscopo integrado, y remoto

Magnetismo terrestre, brújula, giróscopo direccional libre

Compás giroscópico auto-corregido, indicador con giróscopo integrado, y remoto

Central giroscópica para la indicación de actitud en tres ejes y toda actitud

Central giroscópica

Bibliografía