

Universidade Estadual de Campinas

Instituto de Física Gleb Wataghin

F 609 – Tópicos de Ensino de Física I

Giroscópio motorizado para mostrar a rotação da Terra



Aluno: Priscila Garcia Gomes

priscila.unicamp x gmail.com

Orientador: Prof. Dr. Richard Landers – IFGW,

landers x ifi.unicamp.br

07/07/2011

Resumo

Nesse relatório descreve-se o processo de construção de um giroscópio que será utilizado para mostrar a rotação da Terra. Trata-se de um disco de bronze que através de um motor permanece em rotação constante e dessa forma permanece com seu eixo apontando para a mesma direção no espaço. O eixo do conjunto disco-motor é sustentado por um suporte, que permite rotação no sentido perpendicular ao eixo do disco. Uma vez que o disco apontará sempre para a mesma direção, a rotação do eixo do disco no sentido perpendicular permite concluir que a Terra está girando.

Inicialmente construímos o conjunto formado pelo disco de bronze e o motor. O motor de corrente contínua mantém o disco girando com a velocidade angular ajustável. Também foi providenciado um contrapeso para o conjunto, para que o eixo pudesse girar sem que houvesse nenhum torque. Acoplamos uma haste ao conjunto, para que pudéssemos visualizar a rotação com mais facilidade.

A partir disso, construímos um suporte para sustentar o eixo do conjunto e permitir a rotação do conjunto motor-disco nas direções perpendiculares à rotação do disco. O planejamento era permitir que o eixo do conjunto girasse 360°, entretanto, por causa da extensão do eixo do contrapeso e do tamanho da base, não foi possível realizar esse movimento. Limitamos-nos a permitir apenas pequenos ângulos de rotação, que já seria o suficiente para atingir o objetivo.

O suporte era inicialmente fixo, não podendo girar em torno de si mesmo. Num segundo momento então, construímos uma mesa giratória que serviu de base para o suporte e que permitia a rotação no terceiro sentido.

Para determinar o ângulo de rotação do eixo colocamos um anteparo com a marcação dos ângulos de um transferidor, e podíamos então controlar a angulação quando a haste se movia através de sua projeção no anteparo.

Apesar de todo construído, observamos que o experimento não funcionava. Deixávamos o disco em rotação, entretanto, após algumas horas não havia nenhuma rotação no sentido de rotação da Terra. Por isso, resolvemos diminuir o atrito no parafuso que sustentava o conjunto. Trocamos o parafuso por um rolamento tirado do mancal de disco rígido. Infelizmente mesmo com o pouco atrito o experimento não rotacionou como esperávamos e não sabemos qual está sendo o erro.

Resultados

Na primeira etapa foi feita a montagem do conjunto formado pelo disco e o motor, que serve para manter o disco em permanente rotação. Mandamos fabricar um disco de bronze e acoplamos o disco ao motor através de um eixo.

Disco: O disco é feito de bronze, tem 61,7 mm de diâmetro, 10,1 mm de espessura. Sua densidade é de 7,5 g/cm³.

Motor: O motor é um acionador de disco flexível de 5 e ½ polegadas da década de 80, movido a corrente contínua.

As figuras abaixo mostram a experiência em sua primeira etapa:



Figura 1: Conjunto disco-motor

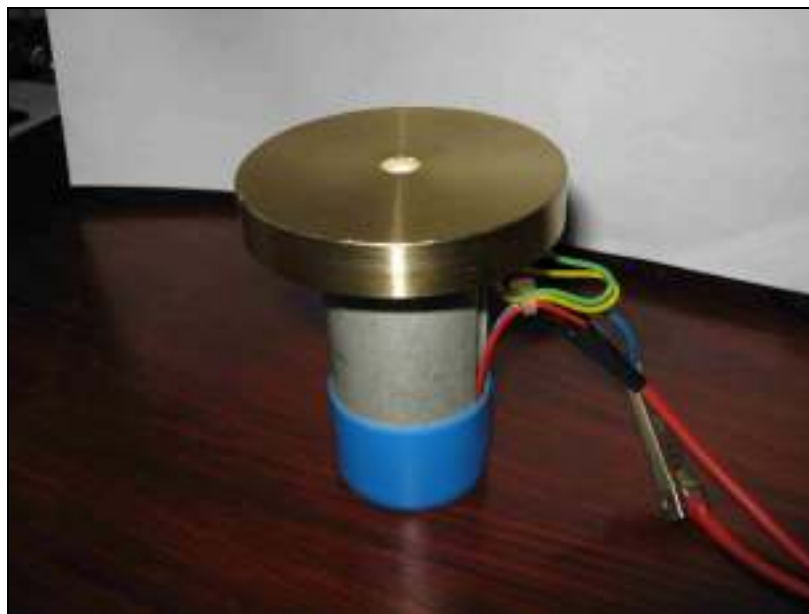


Figura 2: Conjunto disco-motor

Com o disco e o motor prontos, o próximo passo seria então montar o suporte para sustentar o conjunto.

Para esse segundo passo surgiram algumas questões quanto ao funcionamento do experimento. A primeira delas se tratava de colocar um contra peso para o disco, uma vez que ele precisaria rotacionar perpendicularmente ao seu eixo de rotação. Pensamos então em ligar um contrapeso através do corpo do motor.

A outra questão estava relacionada com a forma de marcar o ângulo de rotação do eixo do disco. Precisávamos pensar em uma forma de marcar o ângulo, para relacionar com o tempo decorrido.

Uma terceira questão ainda se tratava de deixar a base do suporte livre, para observarmos movimentos de rotação também nesse sentido.

O contrapeso foi realmente acoplado ao corpo do motor, através de uma base que envolve o motor e fixa um eixo que se estende atrás do mesmo. Essa mesma base serve como ligação entre o conjunto e o suporte, através de um parafuso. Com isso, a experiência evoluiu, chegando ao que pode ser visto nas figuras a seguir:

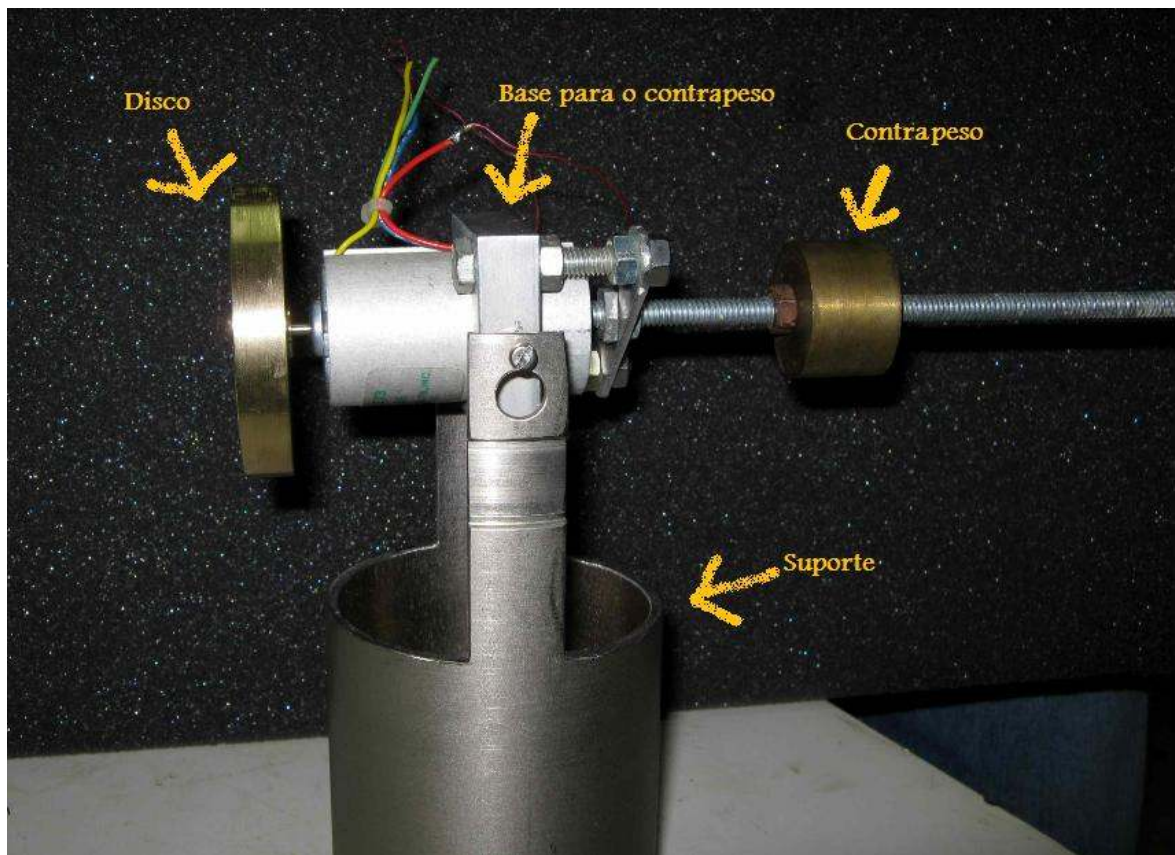


Figura 3: conjunto disco-motor com o seu contrapeso, sustentado pela base, visto de lado

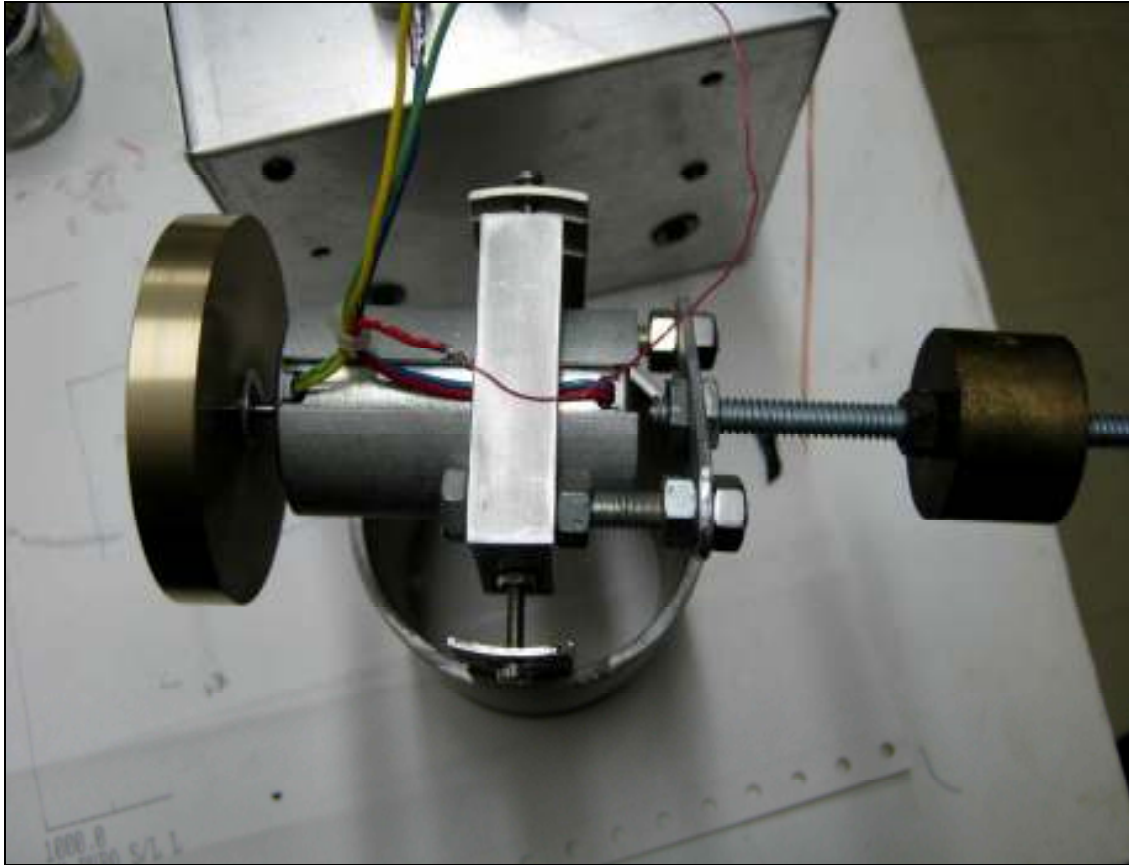


Figura 4: conjunto disco-motor com o seu contrapeso, sustentado pela base, visto de cima

Como se percebe pelas figuras, o eixo que segura o contrapeso é longo, e por isso não é possível que o eixo do conjunto disco-motor rotacione 360° . Para fazer essa adequação seriam gerados vários problemas. Por isso decidimos manter a forma como estava e nos limitarmos a variações pequenas de angulação.

Com o problema do contrapeso resolvido, precisávamos encontrar uma forma de medir o ângulo de rotação do eixo. Pensamos em colocar um fio, preso à base do contrapeso. A questão da influência do peso desse fio foi levantada e decidimos então por utilizar um canudo de bebida, pois é leve e permanece estendido. Acoplamos um canudo de plástico de bebida, de forma que ele indicaria a rotação do eixo do conjunto com mais facilidade.

Para marcar o ângulo rotacionado com mais precisão, preparamos um anteparo que contém um transferidor. Pode-se projetar então a haste fixa no transferidor e marcar os ângulos percorridos com o tempo.



Figura 5: Anteparo utilizado para medir o ângulo de rotação do eixo do conjunto disco-motor.

Construímos também uma base giratória para apoiarmos o suporte, que permitia a rotação do terceiro sentido. A base foi construída com disco rígido de computador, como mostra a figura abaixo:



Figura 6: Base giratória – base para o suporte

Com a base giratória o experimento se tornou o seguinte:

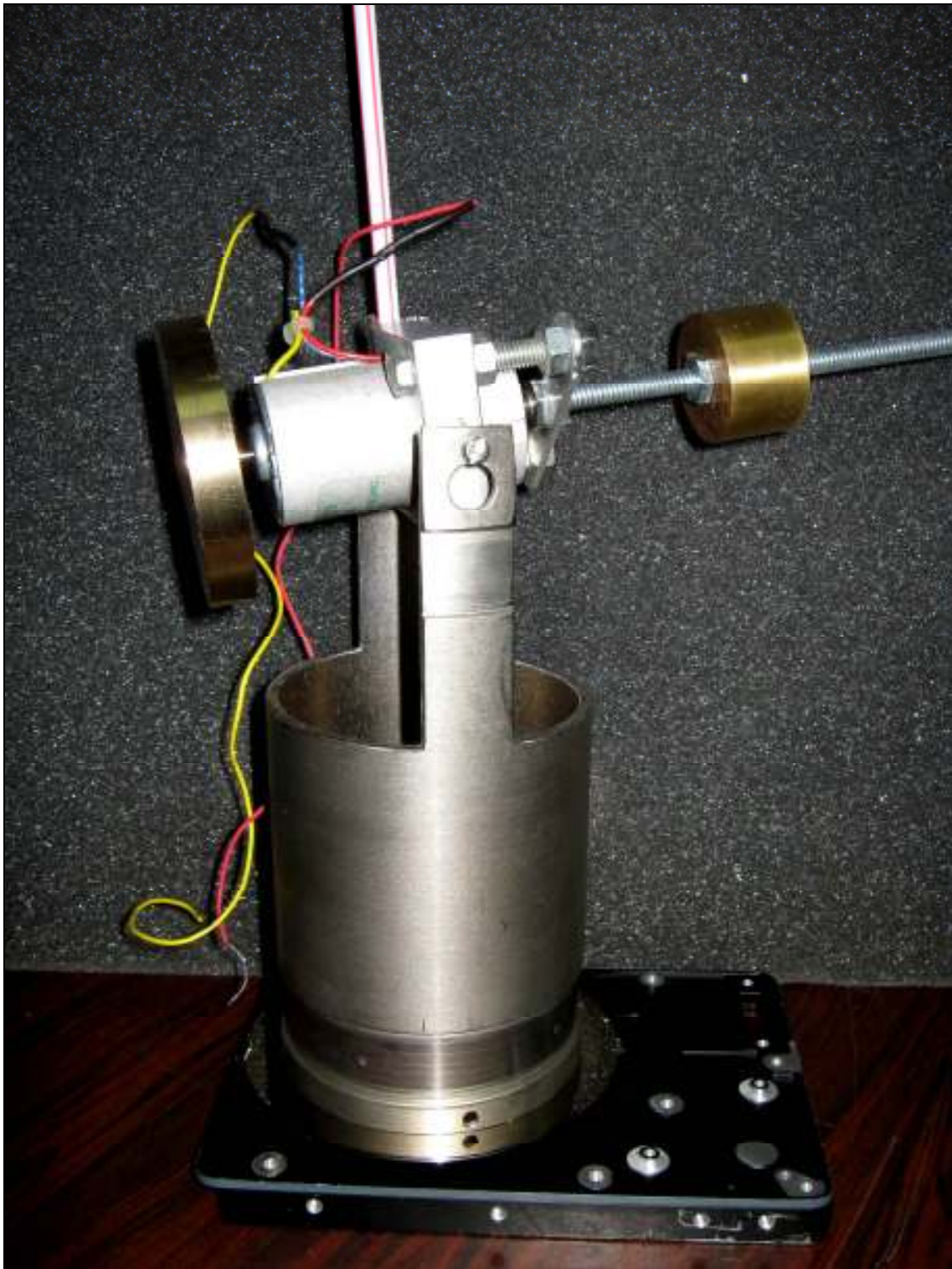


Figura 7: Suporte apoiado na base giratória

A velocidade angular do disco não pode ser medida, por motivo de falta de um estroboscópio adequado.

Para a realização do experimento é necessária uma análise inicial da direção em que o eixo do disco-motor será colocado. O suporte deve ser colocado de forma que o eixo

possa rotacionar na direção perpendicular ao eixo da Terra, ou seja, o eixo deve estar apontando no sentido leste-oeste.

Após alguns testes, percebemos que o experimento não estava funcionando. Deixávamos o disco com velocidade angular constante, entretetando, passadas algumas horas, o giroscópio permanecia na mesma posição. Pensamos que o problema poderia estar relacionado com o atrito causado pelo parafuso que servia de suporte para o conjunto, destacado na figura abaixo:

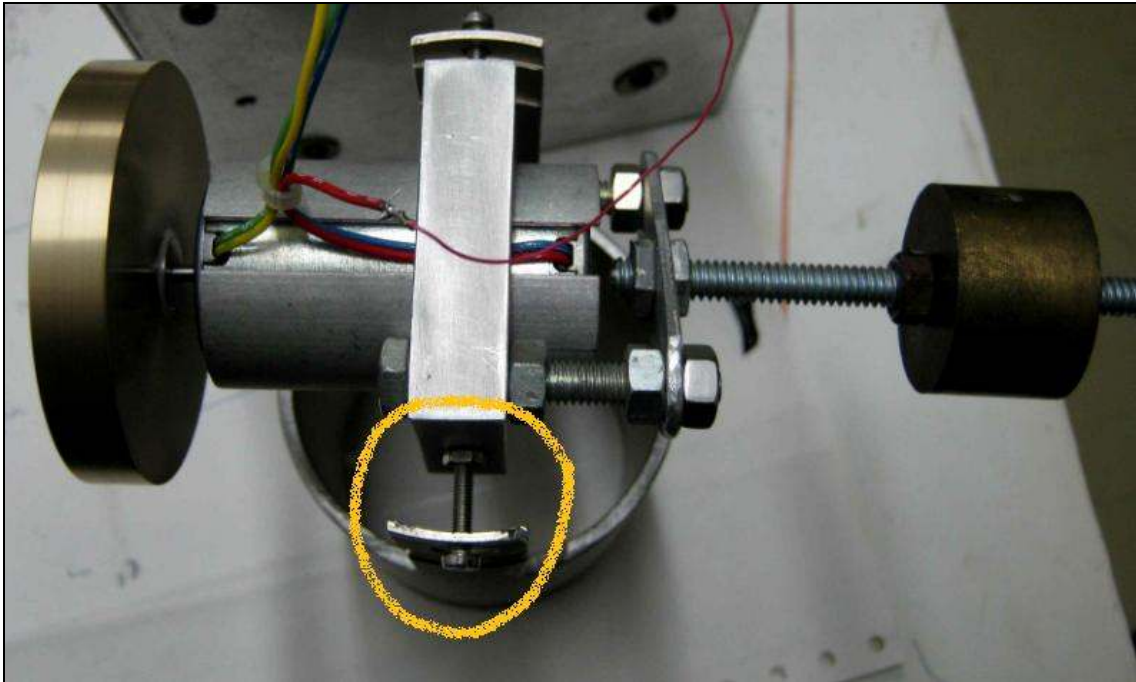


Figura 8: destaque do parafuso que liga o conjunto ao suporte

Decidimos então aperfeiçoar a montagem diminuindo o atrito nesse parafuso. Desmontamos o mancal de um disco rígido, que tem um atrito muito baixo, e utilizamos o seu rolamento para encaixar o parafuso. O mancal utilizado é mostrado na figura abaixo:



Figura 9: Mancal de disco rígido utilizado para construir o apoio do parafuso

Aumentamos a circunferência do suporte e encaixamos o rolamento. O parafuso foi centrado no rolamento através de uma bucha de nylon e obtivemos o resultado mostrado a seguir:



Figura 10: Resultado obtido com a nova montagem do apoio do parafuso

O experimento completo pode se visualizado a seguir:

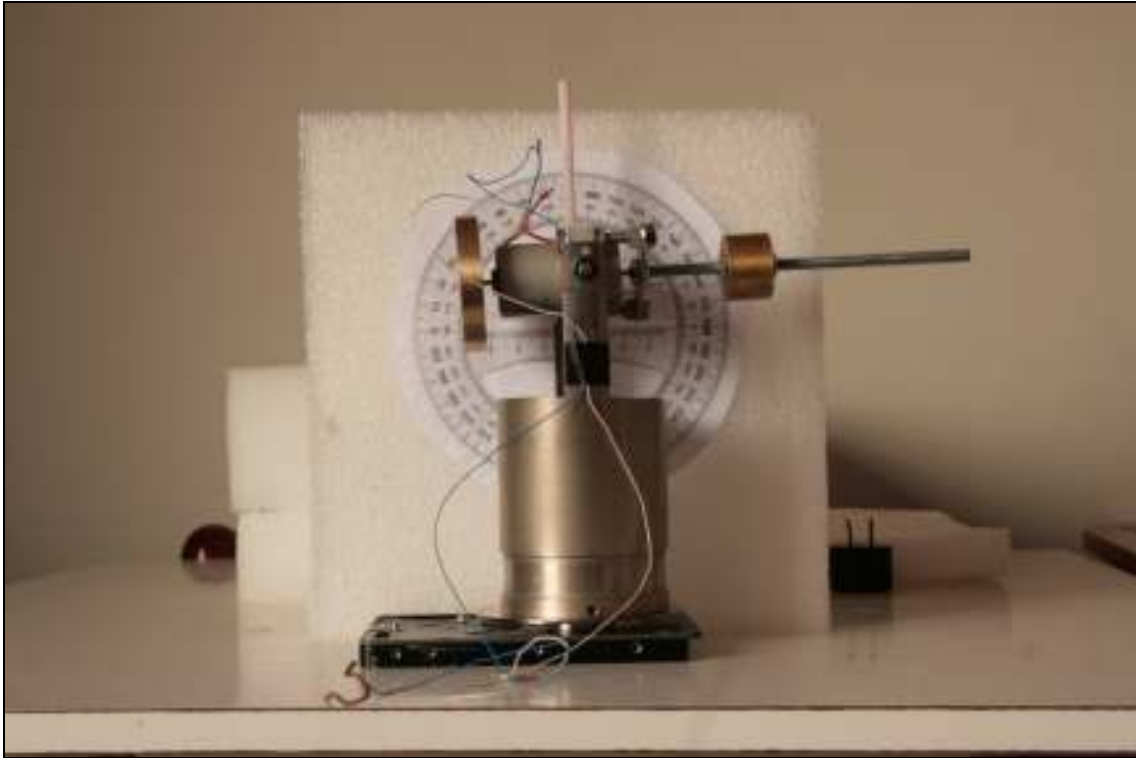


Figura 11: Experimento em seu estado final

Infelizmente, mesmo com o atrito muito baixo no parafuso, o experimento continuou não correspondendo nossas expectativas. Apesar de fazermos varias analises, não conseguimos identificar a questão que não permite que o experimento se realize de forma satisfatória.

Dificuldades

A primeira dificuldade foi encontrada no balanceamento do conjunto motor-disco. Infelizmente, a distribuição de massa do disco não é perfeita e isso causa uma vibração indesejada.

Percebemos que a velocidade angular alta intensificava a vibração, de forma que o suporte se movia. Por isso, precisamos utilizar apenas velocidades baixas.

Além disso, havia uma folga no eixo que ligava o disco ao motor e não sabíamos quais seriam as conseqüências dessa folga. Quando acoplamos o contrapeso, percebemos que não era possível equilibrar o contrapeso com o disco, pois este se movimentava, mudando sua distância do suporte e mudando seu centro de massa.

Isso foi resolvido colocando um fio atrás do motor, que exerce pressão internamente ao eixo do disco, fazendo-o permanecer na mesma posição.

Quando fizemos essa adequação, percebemos que outro problema surgiu. A pressão feita pelo fio ao eixo dentro do motor gerou mais atrito. Isso fez com que o eixo tivesse

mais resistência para rotacionar, mas felizmente, esse problema não afetou a velocidade do disco.

A grande dificuldade foi no sentido de encontrar o erro que não permitiu que o experimento funcionasse da forma esperada. Não conseguimos detectar tal erro para que pudéssemos aperfeiçoá-lo.

Pesquisa

Vídeo sobre a rotação da terra, pendulo de Foucault:

Vídeo Newton e o Movimento Circular, DVD: 15 Experimentos Didáticos de Física da disciplina F809 – Instrumentação para o ensino: Experimentos didáticos de física, Unicamp

O DVD pode ser solicitado gratuitamente pelo site: <http://www.ifi.unicamp.br/vie/F809.htm>

Teoria sobre a rotação da terra e o giroscópio parado em relação ao espaço e que portanto aparenta uma rotação:

http://www.tpub.com/content/neets/14187/css/14187_140.htm (Anexo 1)

Teoria sobre giroscópio e precessão:

<http://www.ufrgs.br/museudetopografia/Artigos/Giroscopio.pdf> (Anexo 2)

Projeto sobre a tentativa de construção de um giroscópio:

Projeto “Giroscópio” da disciplina F609 - Tópicos em Ensino de Física I, Unicamp

Pendulo de Foucault

http://en.wikipedia.org/wiki/Foucault_pendulum (Anexo 3)

Cálculo de momento angular, teoria de conservação de momento angular e giroscópio:

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J, Fundamentos de Física 1: Mecânica. 7ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2006. pg 307 a 319.

Giroscópio

http://en.wikipedia.org/wiki/Gyroscope#cite_note-10

Palavras pesquisadas para encontrar o experimento:

- Giroscópio de Foucault
- Experimento giroscópio de Foucault
- experimento giroscópio
- Giroscópio rotação da terra
- Giroscópio experimento rotação da terra
- Demonstrar que a terra gira
- Demonstrar que a terra gira giroscópio
- suspensão cardânica giroscópio
- gyroscope experience
- gyroscope experience earth
- cardanic suspension
- cardanic suspension experience
- wiki Foucault gyroscope
- determining the rotation of the earth with a gyroscope
- science fair gyroscope

Embasamento teórico

O experimento praticamente se baseia na Conservação do Momento Angular. Temos que o momento angular se conserva se não houver um torque externo. Mesmo que internamente haja mudanças em um sistema, o momento angular será o mesmo.

Através das seguintes fórmulas percebe-se que sem torque externo o momento angular se conservará:

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt} \quad \vec{\tau} = \vec{0} \Rightarrow \vec{L} = \vec{k}$$

Isso significa que se um corpo está em rotação, ele tenderá a permanecer apontando para a mesma direção até que haja a atuação de um torque.

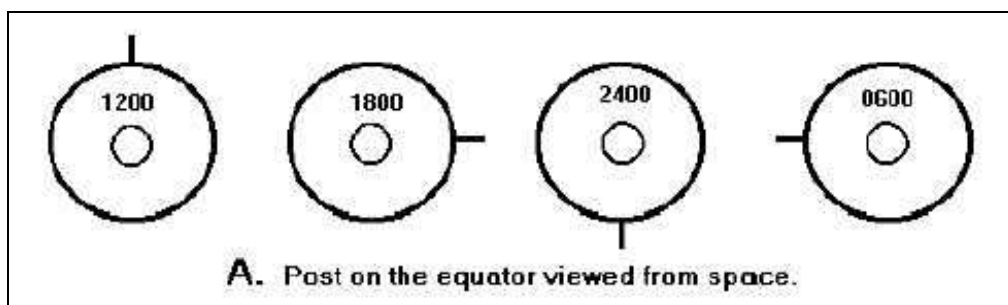
O momento angular depende do momento de inércia do corpo e da velocidade angular:

$$\vec{L} = I \cdot \vec{\omega}$$

Então, se colocarmos um disco com velocidade angular constante, temos que o momento angular deverá ser também constante, até que haja um torque externo atuando sobre o disco.

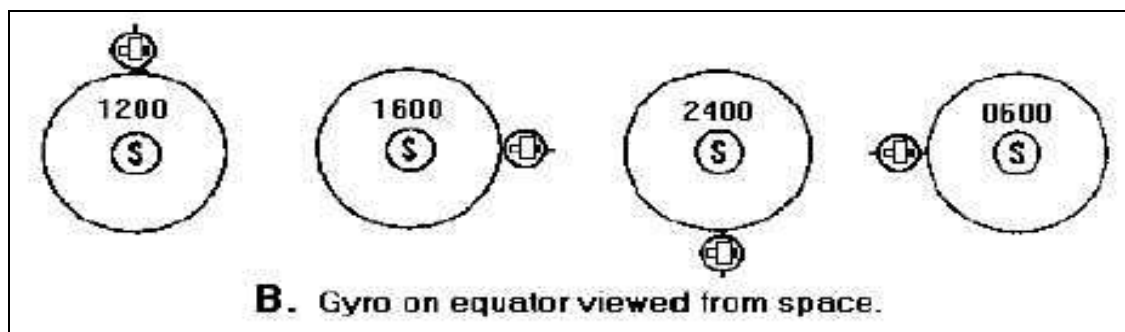
Sendo assim, podemos demonstrar de forma simples que se colocamos um disco em rotação constante, durante um dia, para quem está na terra, aparentará que o disco rotacionou em torno de si mesmo.

Mais detalhadamente, podemos pensar em um poste que está ligado à Terra, perpendicularmente à sua superfície, no equador e que acompanha a rotação durante o dia, como mostra a figura A:

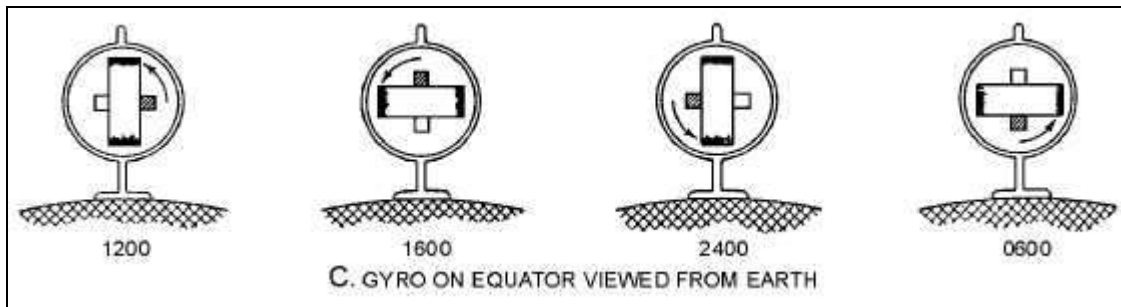


Percebemos que o poste dá uma volta completa, pelo motivo da rotação da terra.

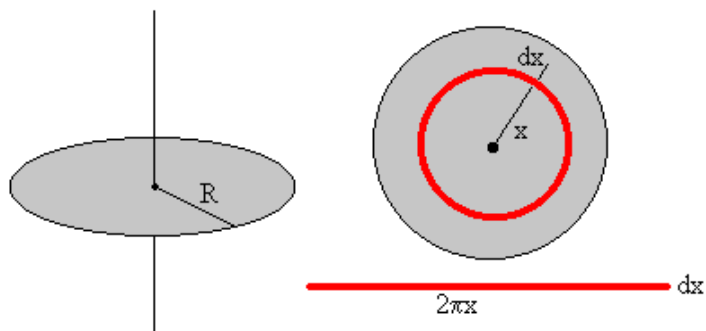
Se colocarmos um disco em rotação no lugar do poste, e deixarmos o disco livre no espaço, ele se manterá girando sempre apontando a mesma direção no espaço, como mostra a figura B:



Se pensarmos que o suporte do giroscópio se comportará como o poste da figura, percebemos facilmente que ao final de um dia, aparentemente o giroscópio terá dado uma volta completa em relação ao suporte, pois o suporte mudou de posição no espaço, mas o giroscópio não. O eixo do disco-motor então, durante um dia, aparentemente dará uma volta completa em torno de si mesmo, como mostra a figura C:



Nesse caso temos um disco em rotação. Para o cálculo de seu momento de inércia temos:



Tomamos um elemento de massa que dista x do eixo de rotação. O elemento é um anel de raio x e de largura dx . Se recortamos o anel e o estendemos, é convertido em um retângulo de comprimento $2\pi x$ e largura dx , cuja massa é

$$dm = \frac{M}{\pi R^2} 2\pi x dx = \frac{2M}{R^2} x dx$$

O momento de inércia do disco é

$$I_C = \int_0^R \frac{2M}{R^2} x^3 dx = \frac{1}{2} MR^2$$

Para o nosso disco temos os seguintes dados:

Raio $R = 30,85 \text{ mm}$

Espessura $d = 10,1 \text{ mm}$

Densidade do bronze $\rho = 7,5 \text{ g/cm}^3$

Calculando a Massa M:

$$M = \rho \cdot V$$

$$M = \rho \cdot \pi R^2 \cdot d = 226\text{g}$$

E portanto:

$$I = 1075,45 \text{ g cm}^2$$

Com isso, podemos calcular o momento angular:

$$\vec{L} = I \cdot \vec{\omega}$$

Nesse estágio da experiência ainda não medimos a velocidade angular. Tentaremos medir utilizando o estroboscópio e então poderemos calcular o momento angular.

O meu orientador realizou os seguintes comentários:

“O projeto talvez foi um pouco audacioso, no sentido de necessitar de algumas peças que a rigor deveriam se balanceadas, o que só seria possível com instrumentação específica e de alta precisão.”

“O aparelho fabricado com os materiais disponíveis provavelmente é o melhor que se poderia fazer com os meios disponíveis, somente os testes finais, que deverão ser feitos na quarta feira, dirão se os objetivos foram alcançados plenamente. De qualquer maneira o exercício certamente terá sido interessante do ponto de vista didático, pois a aluna aprendeu uma série de conceitos e se deu conta de que uma montagem mecânica, por mais simples que possa parecer, quando se requer precisão, sua execução não é tão fácil.”

Anexo 1

Effect of Rotation of the Earth

As you have learned, a free gyro maintains its spin axis fixed in space, and not fixed relative to the Earth's surface. To understand this, imagine yourself in a space ship somewhere out in space and looking at the South Pole of the Earth. You see a sphere rotating clockwise, with the South Pole in the center. Maneuver your ship until it is on a direct line with the South Pole and then cut in the automatic controls to keep it in this position. You will now see the Earth make a complete rotation every 24 hours. You could keep track of that rotation by driving a big post into the Equator as shown in view A of figure 3-11. If this post were upright at 1200, the Earth's rotation would carry it around so it would be pointing to your right at 1800. Likewise, the Earth's rotation would carry the post around so that at 2400 it would be upside down. Then, at 0600 the next day, the post would be pointing to your left. Finally, at 1200 the next day the post would be back in its original position, having been carried, with the Earth, through its complete rotation. Notice that the post has many positions as you observe it—because it is attached to the Earth's surface and does not have rigidity in space.

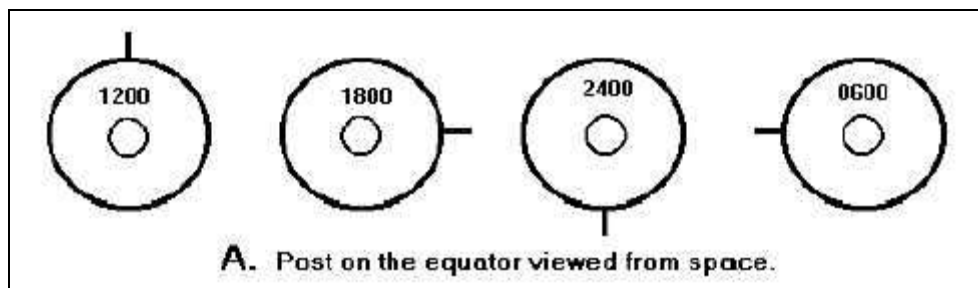
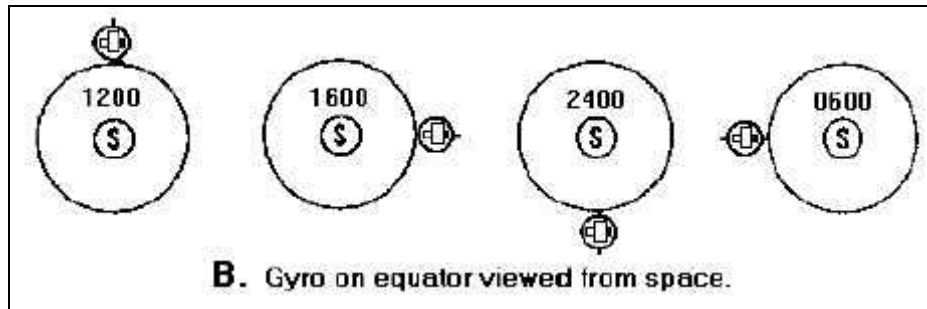


Figure 3-11A.—Fixed direction in space. Post on the equator viewed from space.

If you put a gyroscope in place of the stake, you will see a different action. Imagine a gyroscope mounted at the Equator with its spin axis aligned with the E/W axis of the Earth. The gyro is spinning and has rigidity in space. Now look at view B. At 1200 the spinning axis is horizontal with respect to the Earth's surface. At 1800 the spinning axis is vertical with respect to the Earth's surface; but the gyro is still spinning in the same plane as before, and the black end is pointing away from the Earth's surface. At 2400, the spinning axis is again horizontal. At 0600 the spinning axis is again vertical, and the

black endpoints toward the Earth. Finally, at 1200 the next day, the gyro is in the same position as when it started. The plane of spin of the gyro wheel did not change direction in space while the gyro rotated with the Earth. This is because the gyro is rigid in space.



3-13 Figure 3-11B.—Fixed direction in space. Gyro on equator viewed from space.

You have just imagined observing the gyro from space. Now, let's come back to Earth and stand right next to the gyro. Look at the gyro in view C. From your viewpoint on Earth, the spinning axis appears to make one complete rotation in one day. As you know, the gyro is rigid, and both you and the Earth are rotating. The effect of the Earth's rotation on a gyro is sometimes called APPARENT DRIFT, APPARENT PRECESSION, or APPARENT ROTATION.

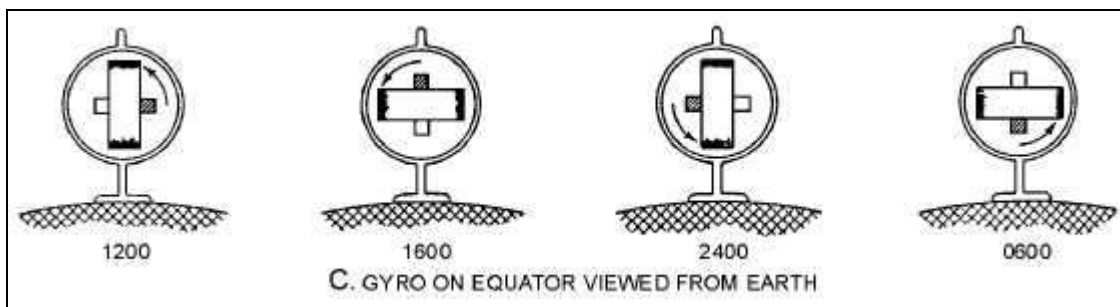


Figure 3-11C.—Fixed direction in space. Gyro on equator viewed from earth.

Effect of Mechanical Drift A directional error in a gyro is produced by random inaccuracies caused by mechanical drift and the effect of the Earth's rotation (apparent drift). We shall see later how it is corrected for in the equipment. First, let's consider the causes of mechanical drift. There are three general sources of mechanical drift:

1. Unbalance. A gyro often becomes dynamically unbalanced when operated at a speed or temperature other than that for which it was designed. The static balance of the gyro is upset when its center of gravity is not at the intersection of the three major

axes. Some unbalance of both types will exist in any gyro since manufacturing processes cannot produce a perfectly balanced gyro.

2. Bearing friction. Friction in the gimbal bearings results in loss of energy and incorrect gimbal positions. Friction in the rotor bearings causes mechanical drift only if the friction is not symmetrical. An even amount of friction all around in a rotor bearing results only in a change of the speed of rotation.

3. Inertia of gimbals. Energy is lost whenever a gimbal rotates because of the inertia of the gimbal. The greater the mass of the gimbal, the greater the drift from this source.

The complete elimination of mechanical drift in gyros appears to be an impossibility. However, by proper design it has been kept to a minimum. Any error that still exists can be corrected for.

Q-13. A universally mounted gyro has how many degrees of freedom?

Q-14. If a free gyro is placed at the equator at 1200 in a vertical position; in what position should it be at 1800?

Q-15. What are the three causes of mechanical drift in a gyro?

Anexo 2

MUSEU DE TOPOGRAFIA PROF. LAUREANO IBRAHIM CHAFFE DEPARTAMENTO DE GEODÉSIA – UFRGS

O GIROSCÓPIO

Original em espanhol:

<http://es.wikipedia.org/wiki/Gir%C3%B3scopo>

Tradução, ampliação e ilustrações:

Iran Carlos Stalliviere Corrêa – Museu de Topografia Prof. Laureano Ibrahim Chaffe, Departamento de Geodésia, IG/UFRGS.

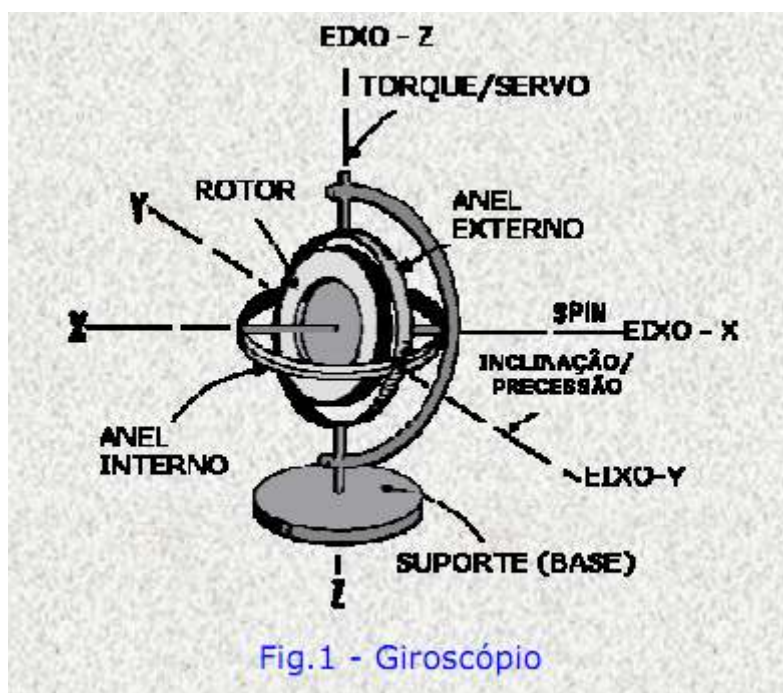


Fig.1 - Giroscópio

O giroscópio é um dispositivo mecânico formado essencialmente por um corpo com simetria de rotação que gira ao redor de seu eixo de simetria (Fig.1). Quando o giroscópio é submetido a um momento de força que tende a mudar a orientação do eixo de rotação, seu comportamento é aparentemente paradójico já que o eixo de rotação, em lugar de mudar de direção, como o faria um corpo que não girasse, muda sua orientação para uma direção perpendicular a direção "intuitiva".

O giroscópio foi inventado em 1852 por Jean Bernard Léon Foucault (Fig.2), quem também o denominou, montando uma massa rotatória em um suporte de Cardan para um experimento de demonstração da rotação da terra. A rotação já havia sido demonstrada com o pêndulo de Foucault (Fig.3). Entretanto não compreendia o

porquê que a velocidade de rotação do pêndulo era mais lenta que a velocidade de rotação da terra, de um fator “ $\text{sen}(\lambda)$ ”, onde λ representa a latitude em que se localiza o pêndulo. Se necessitava outro aparato para demonstrar a rotação da terra de forma mais simples. Foucault apresentou assim um aparato capaz de conservar uma rotação suficientemente rápida (150 a 200 voltas por minuto) durante um tempo suficiente (uma dezena de minutos) para que se pudesse fazer medidas. Esta proeza mecânica (para a época) ilustra o talento de Foucault e seu colaborador Froment, em mecânica.



Fig.2 - Jean Bernard Léon Foucault
(1819-1868)

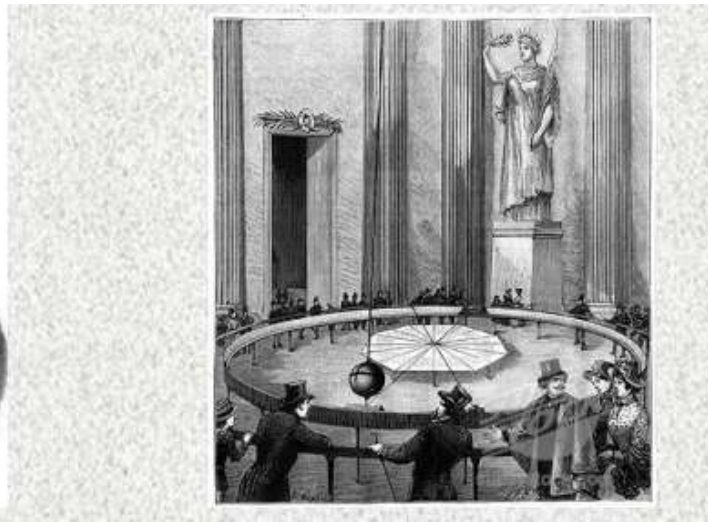


Fig.3 - Demonstração da rotação da terra
no Pantheon de Paris em 1851.

Foucault também se deu conta de que seu aparato podia servir para indicar o Norte. Em se impedindo certos movimentos do suporte do giroscópio, este se alinha com o meridiano. Isto permitiu a invenção do girocompasso ou bússola giroscópica (Fig.4).



Fig.4 - Girocompasso ou Bússola Giroscópica

Os giroscópios têm sido utilizados em girocompassos e pilotos automáticos. Os giroscópios também têm sido utilizados para diminuir o balancear de navios, para estabilizar plataformas de tiro e para estabilizar plataformas inerciais, sobre as quais estão fixados captadores de aceleração para a navegação inercial em aviões e mísseis, construídos antes do aparecimento do GPS. O efeito giroscópico é à base do funcionamento dos piões (Fig.5) e do Power Ball (Fig.6), o qual é um dispositivo giroscópico desenhado para exercitar, especialmente, as mãos em fisioterapia, ou para fortalecer, em geral, os diversos músculos da extremidade superior.



Fig.5 – Pião



Fig.6 - Power Ball

Dessa maneira, o giroscópio serve como referência de direção, mas não de posição. Ou seja, é possível movimentar um giroscópio normalmente no espaço sem qualquer trabalho além do necessário para transportar sua massa. A resistência surge contrária as forças que atuem de maneira à rotacionar seu eixo de rotação a qualquer configuração não paralela à sua posição original. Assim, um veículo munido de um giroscópio e sensores apropriados podem medir com precisão qualquer mudança em sua orientação, exceto rotações que ocorram no plano de giro dos discos do giroscópio. Por essa razão, normalmente são utilizados dois giroscópios perpendiculares de modo a integralizar a possibilidade de detecção de variações na orientação.

O efeito giroscópico

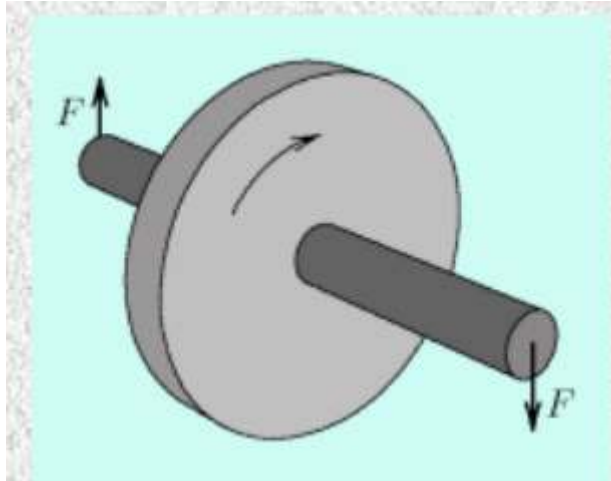


Fig.7 - Quando se empurra o lado direito para baixo, este, em lugar de baixar, se move em direção ao observador.

Suponhamos um giroscópio formado por um disco montado sobre um eixo horizontal, ao redor do qual o disco gira livremente a grande velocidade, como se observa na figura 8. Um observador mantém o eixo da esquerda com a mão esquerda e o eixo da direita com a mão direita. Se o observador trata de girar o eixo em direção à direita (baixando a mão direita e subindo a mão esquerda) sentirá um comportamento muito curioso, já que o giroscópio empurra sua mão direita e tira de sua mão esquerda. O observador acaba de sentir o efeito giroscópico (Fig.8). É uma sensação muito surpreendente porque dá a impressão de que o giroscópio não se comporta como um objeto "normal".



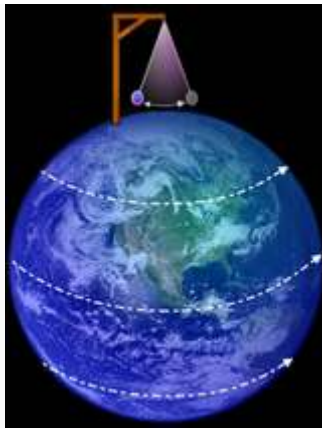
Fig.8 - O efeito giroscópico

Anexo 3

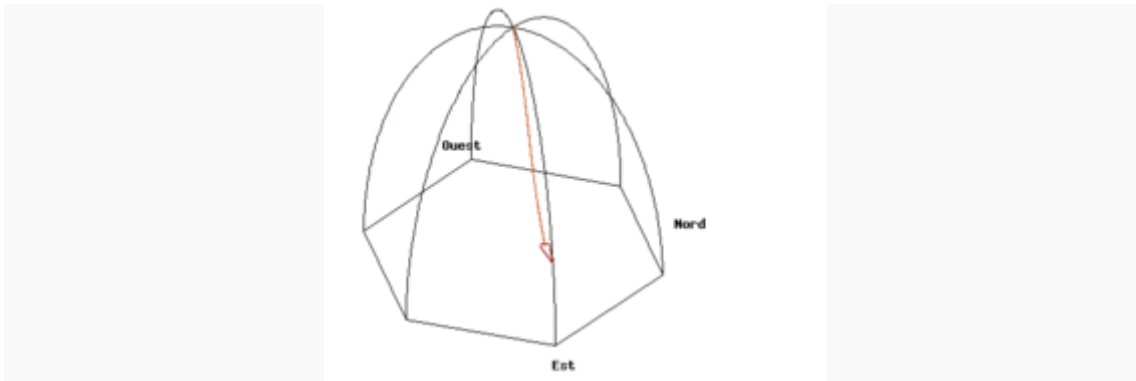
Foucault pendulum

The experimental apparatus consists of a tall [pendulum](#) free to swing in any vertical plane. The actual plane of swing appears to rotate relative to the Earth; in fact the plane is fixed in space while the Earth rotates under the pendulum once a sidereal day. The first public exhibition of a Foucault pendulum took place in February 1851 in the Meridian of the [Paris Observatory](#). A few weeks later Foucault made his most famous pendulum when he suspended a 28 kg brass-coated lead [bob](#) with a 67 meter long wire from the dome of the [Panthéon, Paris](#). The plane of the pendulum's swing rotated clockwise 11° per hour, making a full circle in 32.7 hours. The original bob used in 1851 at the Panthéon was moved in 1855 to the [Conservatoire des Arts et Métiers](#) in Paris. A second temporary installation was made for the 50th anniversary in 1902.^[1]

During museum reconstruction in the 1990s the original pendulum was temporarily displayed at the Panthéon (1995), but was later returned to the [Musée des Arts et Métiers](#).^[2] On April 6, 2010,^[3] the cable suspending the bob in the [Musée des Arts et Métiers](#) snapped causing irreparable damage to the pendulum and to the marble flooring of the museum.^[4] An exact copy of the original pendulum has been swinging permanently since 1995 under the dome of the [Panthéon, Paris](#).



A Foucault pendulum at the north pole. The pendulum swings in the same plane as the Earth rotates beneath it.



Animation of a Foucault pendulum at the Pantheon in Paris (48°52' North), with the Earth's rotation rate greatly exaggerated. The green trace shows the path of the pendulum bob over the ground (a rotating reference frame), while the blue trace shows the path in a frame of reference rotating with the plane of the pendulum.

At either the [North Pole](#) or [South Pole](#), the plane of oscillation of a pendulum remains fixed relative to the [distant masses of the universe](#) while Earth rotates underneath it, taking one [sidereal day](#) to complete a rotation. So, relative to Earth, the plane of oscillation of a pendulum at the North Pole undergoes a full clockwise rotation during one day; a pendulum at the South Pole rotates counterclockwise.

When a Foucault pendulum is suspended at the [equator](#), the plane of oscillation remains fixed relative to Earth. At other latitudes, the plane of oscillation precesses relative to Earth, but slower than at the pole; the angular speed, ω (measured in clockwise [degrees per sidereal day](#)), is proportional to the [sine](#) of the [latitude](#), φ :

$$\omega = 360^\circ \sin \varphi.$$

where latitudes north and south of the equator are defined as positive and negative, respectively. For example, a Foucault pendulum at 30° south latitude, viewed from above by an earthbound observer, rotates counterclockwise 360° in two days.

In order to demonstrate the rotation of the Earth without the complication of the dependence on latitude, Foucault used a [gyroscope](#) in an 1852 experiment. The gyroscope's spinning rotor tracks the stars directly. Its axis of rotation is observed to return to its original orientation with respect to the earth after one day whatever the latitude, not subject to the unbalanced [Coriolis](#) forces acting on the pendulum as a result of its geometric asymmetry.

A Foucault pendulum requires care to set up because imprecise construction can cause additional veering which masks the terrestrial effect. The initial launch of the pendulum is critical; the traditional way to do this is to use a flame to burn through a thread which temporarily holds the bob in its starting position, thus avoiding unwanted sideways motion. [Air resistance](#) damps the oscillation, so some Foucault pendulums in museums

incorporate an electromagnetic or other drive to keep the bob swinging; others are restarted regularly, sometimes with a launching ceremony as an added attraction.

Foucault pendulums around the world

Further information: [List of Foucault pendulums](#)

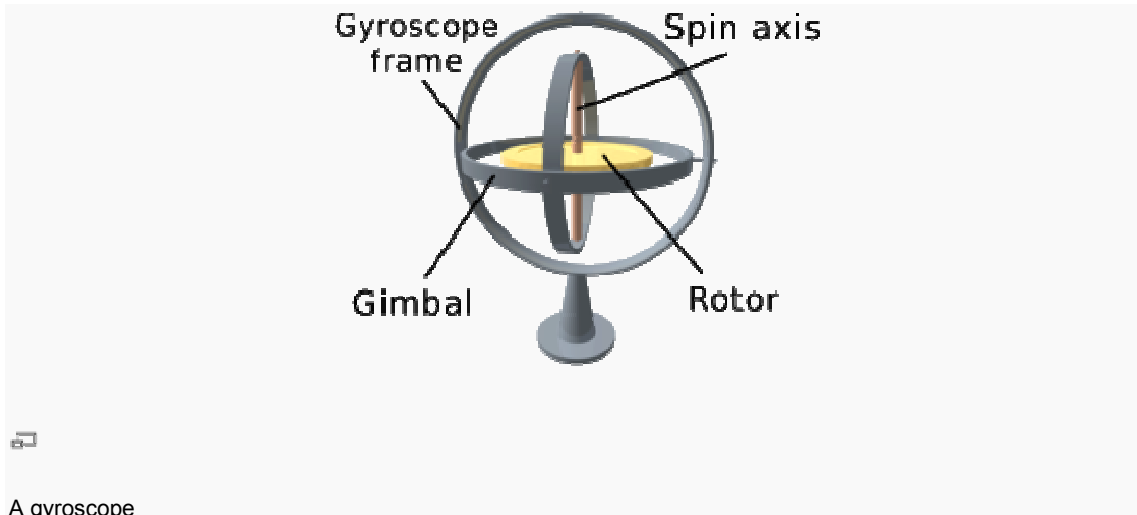
There are numerous Foucault pendulums around the world, mainly at universities, science museums and planetaria. A particularly famous and prominent one is located at the [United Nations](#) in [Manhattan](#). The experiment has been carried out at the South Pole.

Anexo 4

Gyroscope

From Wikipedia, the free encyclopedia

For other uses and non-rotary gyroscopes, see [Gyroscope \(disambiguation\)](#).

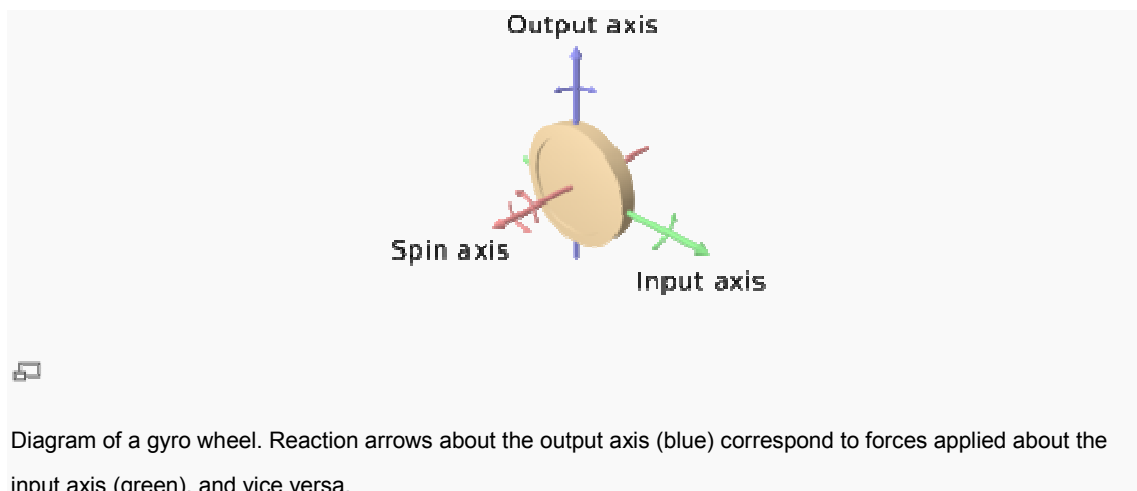


A **gyroscope** is a device for measuring or maintaining [orientation](#), based on the principles of [conservation of angular momentum](#).^[1] In essence, a mechanical gyroscope is a spinning wheel or disk whose axle is free to take any orientation. This orientation changes much less in response to a given external [torque](#) than it would without the large angular momentum associated with the gyroscope's high rate of spin. Since external torque is minimized by mounting the device in [gimbals](#), its orientation remains nearly fixed, regardless of any motion of the platform on which it is mounted.

Gyroscopes based on other operating principles also exist, such as the electronic, microchip-packaged [MEMS gyroscope](#) devices found in consumer electronic devices, solid-state [ring lasers](#), [fibre optic gyroscopes](#), and the extremely sensitive [quantum gyroscope](#).

Applications of gyroscopes include [inertial navigation systems](#) where magnetic compasses would not work (as in the [Hubble telescope](#)) or would not be precise enough (as in [ICBMs](#)), or for the stabilization of flying vehicles like radio-controlled helicopters or [unmanned aerial vehicles](#). Due to their high precision, gyroscopes are also used to maintain direction in tunnel mining.^[2]

Description and diagram



Within mechanical systems or devices, a conventional *gyroscope* is a mechanism comprising a [rotor](#) journalled to spin about one [axis](#), the [journals](#) of the rotor being mounted in an inner [gimbal](#) or ring; the inner gimbal is journalled for oscillation in an outer gimbal, which is journalled in another gimbal for a total of three gimbals.

The **outer gimbal** or ring, which is the gyroscope frame, is mounted so as to pivot about an axis in its own plane determined by the support. This outer gimbal possesses one degree of rotational freedom and its axis possesses none. The next **inner gimbal** is mounted in the gyroscope frame (outer gimbal) so as to pivot about an axis in its own plane that is always perpendicular to the pivotal axis of the gyroscope frame (outer gimbal). This inner gimbal has two degrees of rotational freedom. Likewise, next **innermost gimbal** is attached to the inner gimbal, which has three degrees of rotational freedom and its axis possesses two.

The axle of the spinning wheel defines the spin axis. The rotor is journalled to spin about an axis, which is always perpendicular to the axis of the innermost gimbal. So the rotor possesses four degrees of rotational freedom and its axis possesses three. The wheel responds to a force applied about the input axis by a reaction force about the output axis.

The behaviour of a gyroscope can be most easily appreciated by consideration of the front wheel of a bicycle. If the wheel is leaned away from the vertical so that the top of the wheel moves to the left, the forward rim of the wheel also turns to the left. In other words, rotation on one axis of the turning wheel produces rotation of the third axis.

A **gyroscope flywheel** will roll or resist about the output axis depending upon whether the output gimbals are of a free- or fixed- configuration. Examples of some free-output-gimbal devices would be the attitude reference gyroscopes used to sense or measure the [pitch](#), [roll](#) and [yaw](#) attitude angles in a spacecraft or aircraft.



The centre of gravity of the rotor can be in a fixed position. The rotor simultaneously spins about one axis and is capable of oscillating about the two other axes, and, thus, except for its inherent resistance due to rotor spin, it is free to turn in any direction about the fixed point. Some gyroscopes have mechanical equivalents substituted for one or more of the elements. For example, the spinning rotor may be suspended in a fluid, instead of being pivotally mounted in gimbals. A [control moment gyroscope](#) (CMG) is an example of a fixed-output-gimbal device that is used on spacecraft to hold or maintain a desired attitude angle or pointing direction using the gyroscopic resistance force.

In some special cases, the outer gimbal (or its equivalent) may be omitted so that the rotor has only two degrees of freedom. In other cases, the centre of gravity of the rotor may be offset from the axis of oscillation, and, thus, the centre of gravity of the rotor and the centre of suspension of the rotor may not coincide.

[\[edit\]](#)