

## PÊNULO DE FOUCAULT (Foucault's Pendulum)

C.H.FURUKAWA e W.SANO

Instituto de Física - USP

Caixa Postal 20516

01498 São Paulo, SP

### RESUMO

Construímos um pêndulo de Foucault com funcionamento ininterrupto para demonstrar a rotação da Terra numa exposição. Como inovação, introduzimos um batente em substituição ao anel de Charron normalmente utilizado para correção do movimento de oscilação. O sistema de alimentação é eletromagnético do tipo Mackay. O deslocamento angular do plano de oscilação medido foi  $(6,1 \pm 0,2)^\circ/\text{h}$  em perfeito acordo com o esperado para a cidade de São Paulo.

### ABSTRACT

A continuous working Foucault's pendulum was built to demonstrate Earth's rotation in an exhibit. As an innovation, a backstop was utilized to replace the Charron's ring which is normally used to correct the oscillatory motion. The power system is a Mackay type electromagnetic system. The measurement of the angular displacement of the oscillating plane yielded  $(6,1 \pm 0,2)^\circ/\text{h}$  in perfect agreement with the expected value for the city of São Paulo.

## 1. INTRODUÇÃO

Trata-se de um dispositivo muito interessante para demonstrar a rotação da Terra. Naquele construído pelo próprio Foucault em Paris (1851) a massa era de 27 kg (uma bala de canhão) e o comprimento do fio de 60 m. A rotação do plano de oscilação era registrada nos montículos de areia dispostos circularmente no piso, de tal modo que uma pequena cauda pendente do pêso marcava a sua passagem. Modernamente é possível construir pêndulos de Foucault de dimensões bem menores (massa de 2 kg e fio de 2 m) mais adequados para serem instalados em espaços reduzidos.

C. L. Stong que redigia a seção de Cientistas Amadores da revista Scientific American contribuiu bastante na divulgação de técnicas de construção deste tipo de aparelhagem<sup>(1,2)</sup>. Outros autores introduziram aperfeiçoamentos<sup>(3,4,5)</sup>. Tais dispositivos funcionam ininterruptamente, graças a sistemas de alimentação eletro-magnética para compensarem as perdas por atrito.

Um obstáculo muito grande para quem pretenda construir um pêndulo deste tipo é a tendência do pêso em não se manter num plano, e sim, descrever uma trajetória elíptica ou em forma de 8. Quando isto ocorre o pêndulo pode até indicar rotação da Terra no sentido contrário ao esperado<sup>(1)</sup>, como, de fato, tivemos ocasião de verificar nas nossas primeiras montagens. Tal efeito se deve a pequenos defeitos de construção de peças, inhomogeneidade dos materiais utilizados e outras causas que introduzem componentes de forças estranhas. Dentre estas, parece-nos que a vibração do prédio é a mais importante. Realizamos montagens em diversos locais do campus e concluímos que a existência de compressores ou máquinas operatrizes que provoquem vibrações no prédio, movimento de estudantes pelos corredores e até mesmo a passagem de um ônibus a 100 m do local induzem este tipo de

comportamento. Este efeito é normalmente eliminado com a utilização do anel de Charron<sup>(1,2,3,4)</sup>. Este anel é montado próximo ao ponto de suspensão e concêntrico com o fio. Nos limites de excursão do pêndulo, o fio bate ligeiramente neste anel e com isso a tendência ao movimento elipsoidal é corrigida. O anel é feito de metal, de modo a servir, também, de chave elétrica para comandar o sistema eletro-magnético de alimentação. Entretanto, a centralização deste anel, feita por parafusos ajustáveis<sup>(4)</sup> é bastante trabalhosa<sup>(5)</sup>. Além disso, a fadiga do fio no ponto de contato pode provocar acidente devido a ruptura do fio neste ponto.

Neste trabalho descrevemos como contornamos estes problemas num pêndulo construído no IFUSP, apresentado na exposição da USP sobre o cometa Halley (1986), aperfeiçoado posteriormente e que se encontra em funcionamento no Laboratório de Demonstrações do IF. Antes de entrar em detalhes técnicos, julgamos interessante apresentar um resumo do princípio de funcionamento do pêndulo de Foucault, o que faremos a seguir.

## II. VARIAÇÃO DO PLANO DE OSCILAÇÃO COM A LATITUDE

Um pêndulo montado num dos pólos da Terra, ou seja, com o ponto de suspensão passando pelo seu eixo de rotação, mostraria que o plano de oscilação rodaria exatos  $360^\circ$  em um dia, ou, mais precisamente em 23h e 56m (dia sideral). Por outro lado, um pêndulo colocado na linha do Equador, por exemplo, na cidade brasileira de Macapá, o período de rotação do plano de oscilação seria infinito, isto é, o pêndulo oscilaria sempre no mesmo plano e seria inútil para observar o efeito da rotação da Terra. Para qualquer outro local de latitude diferente de zero este período assumiria valores intermediários.

Este período pode ser facilmente determinado a partir da componente do vetor velocidade angular da Terra, como indicado na figura 1. Assim, o período a uma latitude  $\theta$  é obtido de

$$T = \frac{2\pi}{\omega \text{sen}\theta} = \frac{23\text{h } 56\text{m}}{\text{sen}\theta}$$

Conseqüentemente, a velocidade angular do plano de oscilação será dada por

$$\omega_p = \frac{360^\circ}{T} = 15,04 \text{sen}\theta^\circ/\text{h}$$

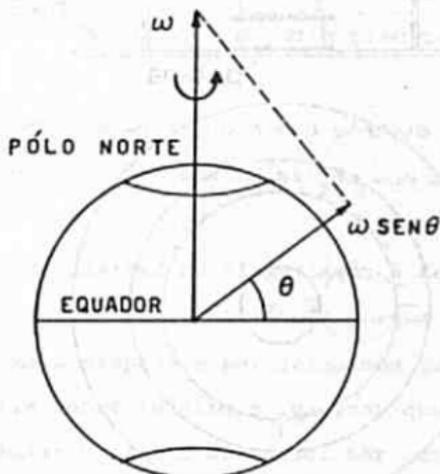


Figura 1: Diagrama vetorial da velocidade angular de rotação da Terra e a sua componente a uma latitude qualquer  $\theta$ .

### III. DESCRIÇÃO DO PÊNDULO

O aspecto geral do nosso pêndulo está esquematizado na figura 2. A modificação mais importante que introduzimos com

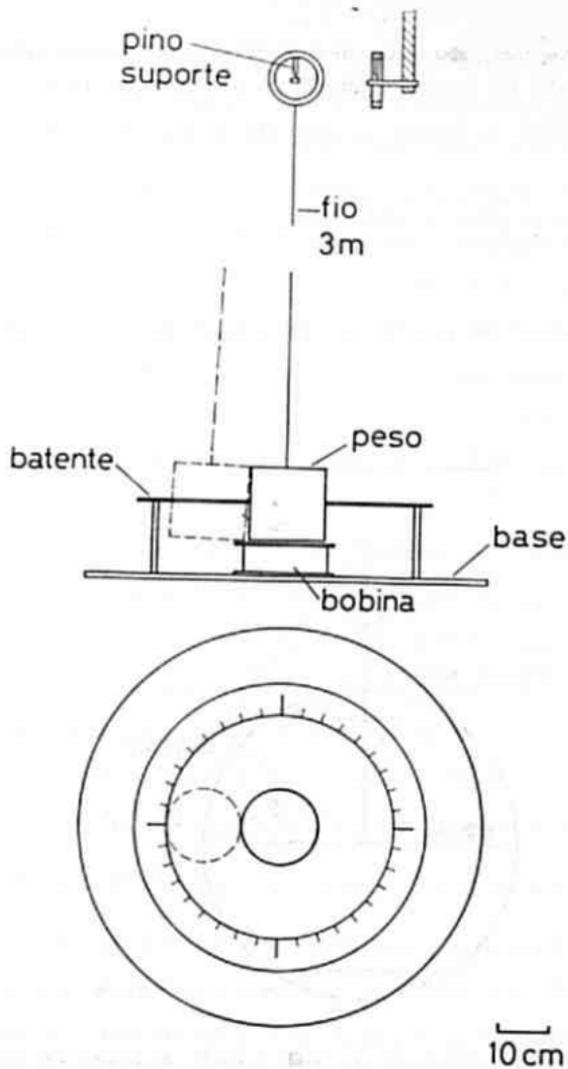


Figura 2: Pêndulo de Foucault. Na parte superior à direita temos uma vista lateral, em corte, do suporte. Na parte inferior temos uma vista em projeção do conjunto onde alguns detalhes foram omitidos. A parte pontilhada representa a posição de máximo deslocamento do pêndulo.

parando-se com os descritos nos trabalhos citados está na substituição do anel de Charron por um batente. Este batente é um anel maior que executa perfeitamente o papel do anel de Charron com vantagens, primeiro por ser de fácil ajuste por causa das suas dimensões e pela sua localização próxima do piso e, segundo, pelo fato de não provocar fadiga no fio de sustentação. Este decorre em consequência do contato ser realizado pelo pêso de forma cilíndrica, a sua meia altura. Como o batente é de alumínio este sistema pode chavear circuitos eletrônicos de alimentação como no caso do anel de Charron. Além disso, este batente é graduado para efetuar a leitura do deslocamento angular do plano de oscilação. Tal leitura é feita precisamente no instante do toque.

No dimensionamento do nosso pêndulo levamos em conta que ele fosse adequado para uma exposição num salão de cerca de  $200 \text{ m}^2$ .

O nosso sistema de alimentação é baseado no método de Mackay (6,1). Optamos por este método porque visualmente o equipamento fica mais simples e por julgarmos que desta forma o observador estaria menos sujeito a imaginar que houvesse algum arranjo para simular o efeito desejado. Por outro lado, a utilização de sistemas eletrônicos citados (2,3,4,5) que teriam aplicações no nosso pêndulo sem maiores modificações trariam simplificações na construção da parte mecânica pela redução da maior parte das dimensões, com consequente economia de material, por exemplo, poderia reduzir o nosso cilindro de 20 kg por um fator 10. O esquema do nosso circuito de alimentação está na figura 3. O ajuste necessário antes de dar partida ao pêndulo é centrar a bobina e o batente de modo a ficarem perfeitamente concêntricos

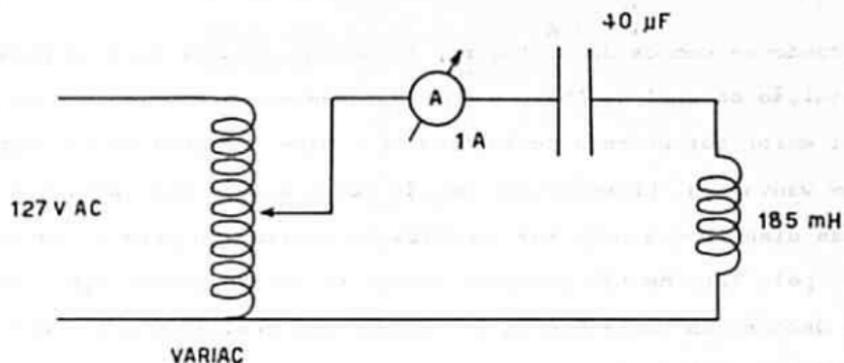


Figura 3: Circuito de alimentação. O amperímetro foi colocado para mostrar o pulso de corrente que surge quando o pêso se aproxima do centro da bobina gerando um campo magnético atrativo.

com o pêndulo. A corrente da bobina é ajustada no Variac de maneira a obter uma batida suave do pêso no batente. Este sistema funciona devido ao surgimento de um campo de atração magnética para o pêso quando se aproxima da bobina sem que o movimento de afastamento do mesmo seja tolhido<sup>(6)</sup>.

Apresentamos, a seguir, alguns detalhes das diversas partes que constituem o pêndulo de Foucault:

**PINO SUPORTE** - pino de aço rápido de 9,5 mm de diâmetro, temperado na ponta e rosqueado num anel de alumínio com diâmetro interno de 80 mm, diâmetro externo de 105 mm e espessura de 20 mm; o apoio é uma ferramenta para torno (bits) de seção quadrada de 12,7x101,6(mm) engastada numa barra de ferro sextavada de 25,4 mm por 230 mm montada verticalmente, presa ao teto de concreto por meio de parafusos embutidos.

FIO - aço inoxidável de 1 mm de diâmetro por 3 m de comprimento.

PÊSO - aço doce, 150 mm de diâmetro por 150 mm de comprimento e 20 kg.

BATENTE - anel de alumínio de 5 mm de espessura com diâmetro interno de 450 mm e externo de 580 mm, aresta interna chanfrada.

BOBINA - 1500 espiras de fio esmaltado AWG 15; carretel feito com tubo de PVC de 35 mm de diâmetro por 53 mm de comprimento e discos de 200 mm de diâmetro de placas Eucatex de 5 mm;  $L = 185$  mH (ar) e  $Q = 4$ .

BASE - disco de pinho compensado de 15 mm e 800 mm de diâmetro.

#### IV. CONCLUSÕES

O deslocamento angular foi determinado em 9 séries de medidas, cada série teve duração que variou de 5 a 60 horas com tomada de dados a intervalos que variaram de 5 a 20 horas, tendo totalizado 13 dias de observação. A orientação do plano de oscilação de partida foi variada, pois, é sabido que o campo magnético da Terra influi nos resultados<sup>(2)</sup>. A média obtida foi de  $(6,1 \pm 0,2)^\circ/h$  sendo que o valor esperado para São Paulo (latitude  $23,6^\circ$ ) é de  $6,0^\circ/h$ . Resultado de uma das séries está representado na figura 4.

Finalmente, concluímos que a precisão das medidas é ótima, está de acordo com os resultados obtidos em outros países, como descritos nas referências citadas e com vantagem de termos simplificado a operação de ajuste graças a modificações que introduzimos.

AGRADECIMENTOS - Ao Prof. E.W. Hamburger pelo apoio, aos técnicos C.D. Fôrcemo e W.L. Silva pela construção e as instituições que financiaram: UNESCO, FINEP e CNPq.

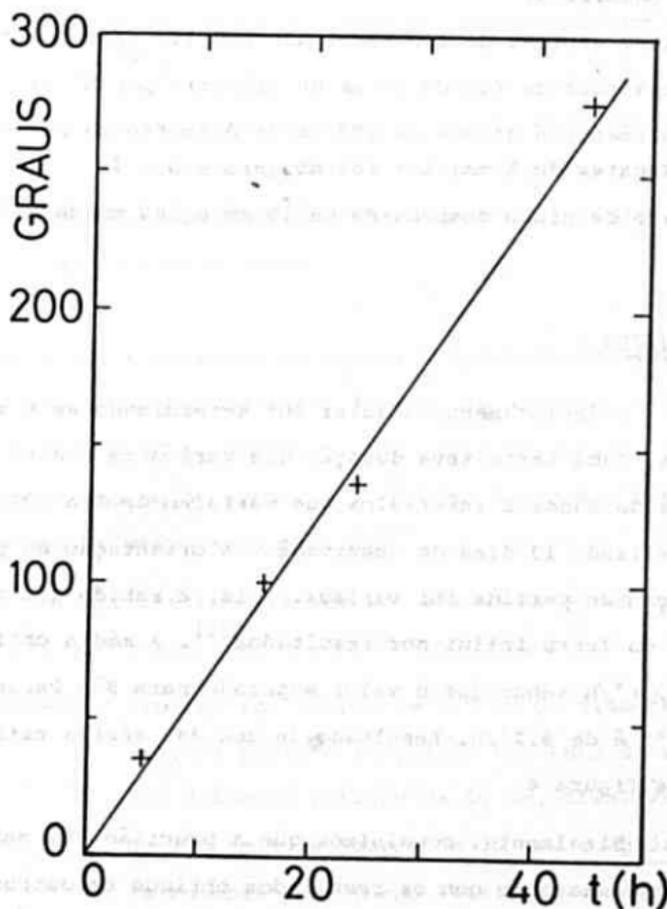


Figura 4: Uma série de medidas do deslocamento angular do plano de oscilação do pêndulo em função do tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) C.L. Stong "How to make a pendulum that will demonstrate the rotation of the earth" (seção The Amateur Scientist), Sci. Am. 198(6), 115 (1958)
- 2) C.L. Stong "How to photograph air currents in color and build an accurate Foucault pendulum" (seção The Amateur Scientist), Sci. Am. 210(2), 136 (1964)
- 3) W.A. Hilton "The Foucault pendulum: A corridor demonstration", Am. J. Phys. 46, 436 (1978)
- 4) H. Kruglak, L. Oppliger, R. Pittet e S. Steele "A short Foucault pendulum for a hallway exhibit", Am. J. Phys. 46, 438 (1978)
- 5) E.C. Reynhardt, T.A. Van der Walt e L. Soskolsky "A modified Foucault pendulum for a corridor exhibit", Am. J. Phys. 54, 759 (1986)
- 6) R.S. Mackay "Sustained Foucault pendulums", Am. J. Phys. 21, 180 (1953)

*Original recebido do antigo editor em 24/08/89*

*Versão revisada pelos autores recebida em 29/08/90*

*Aceito para publicação em 28/09/90*