

# F-329

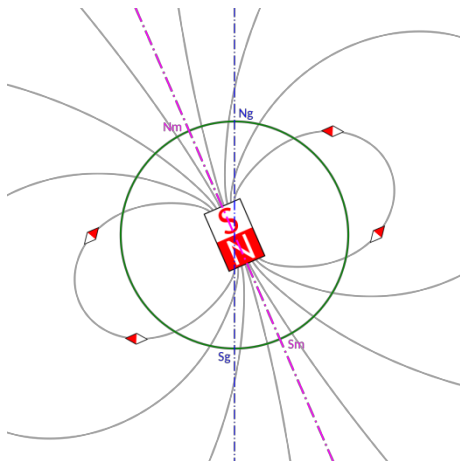
## Física Experimental III

### Experimento 6:

### **Campos Magnéticos**

Luiz Fernando Zagonel  
[zagonel@ifi.unicamp.br](mailto:zagonel@ifi.unicamp.br)

# Campos Magnéticos



No Planeta Terra



Nos Smartphones

Nas Geladerias



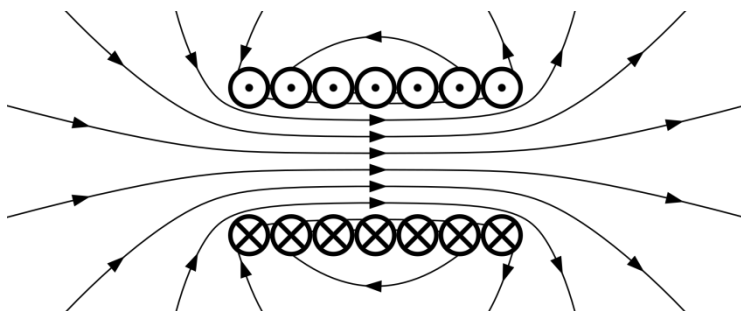
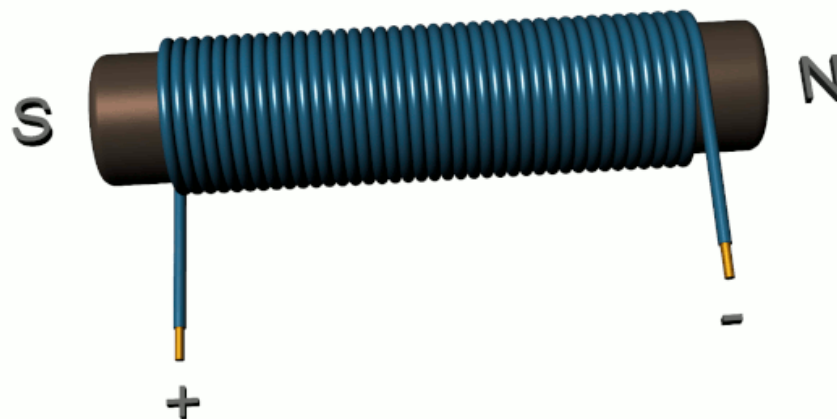
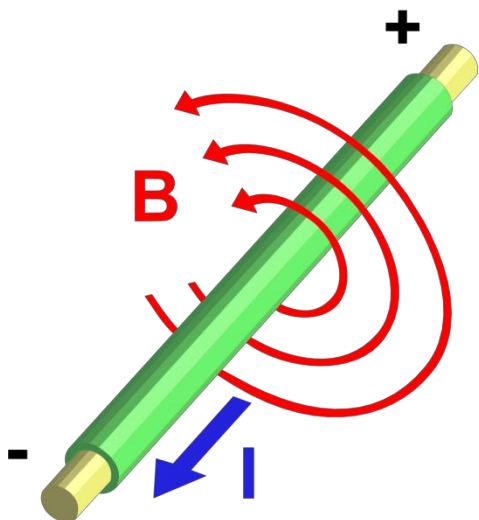
Na sociedade como um todo!

Campos magnéticos são utilizados em muitos produtos tecnológicos, como motores, geradores, Discos Rígidos de computadores, Sistemas de Imagens médicas, et, etc.

Há 10 prêmios Nobel em física relacionados a Magnetismo.

# Magnetismo em F 329

## Electro-magnetismo



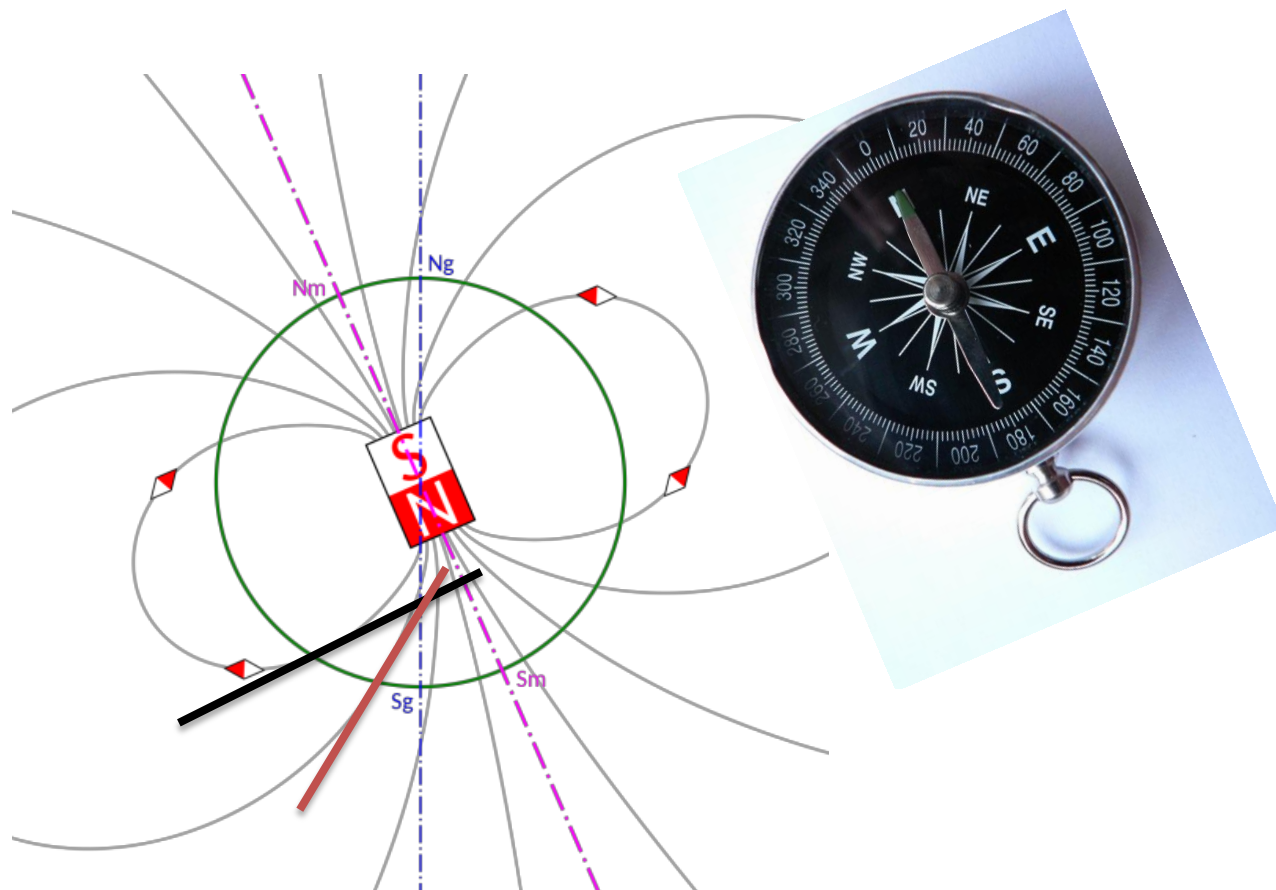
# Magnetismo em F 329

## Ímãs permanentes



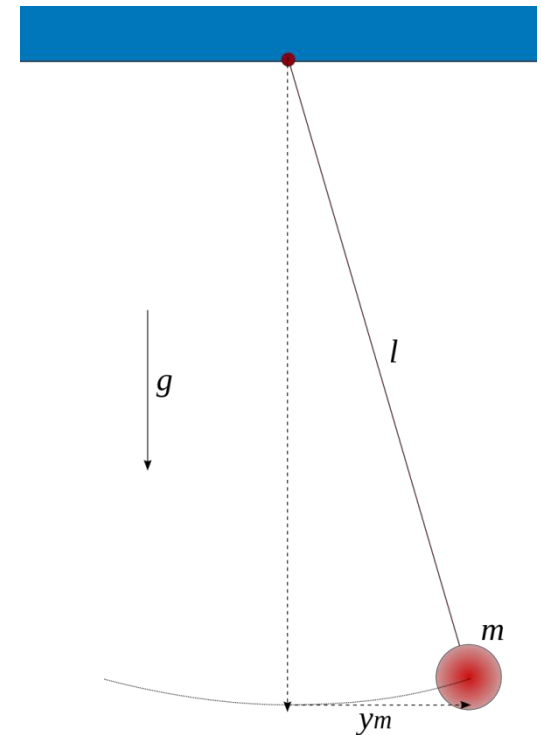
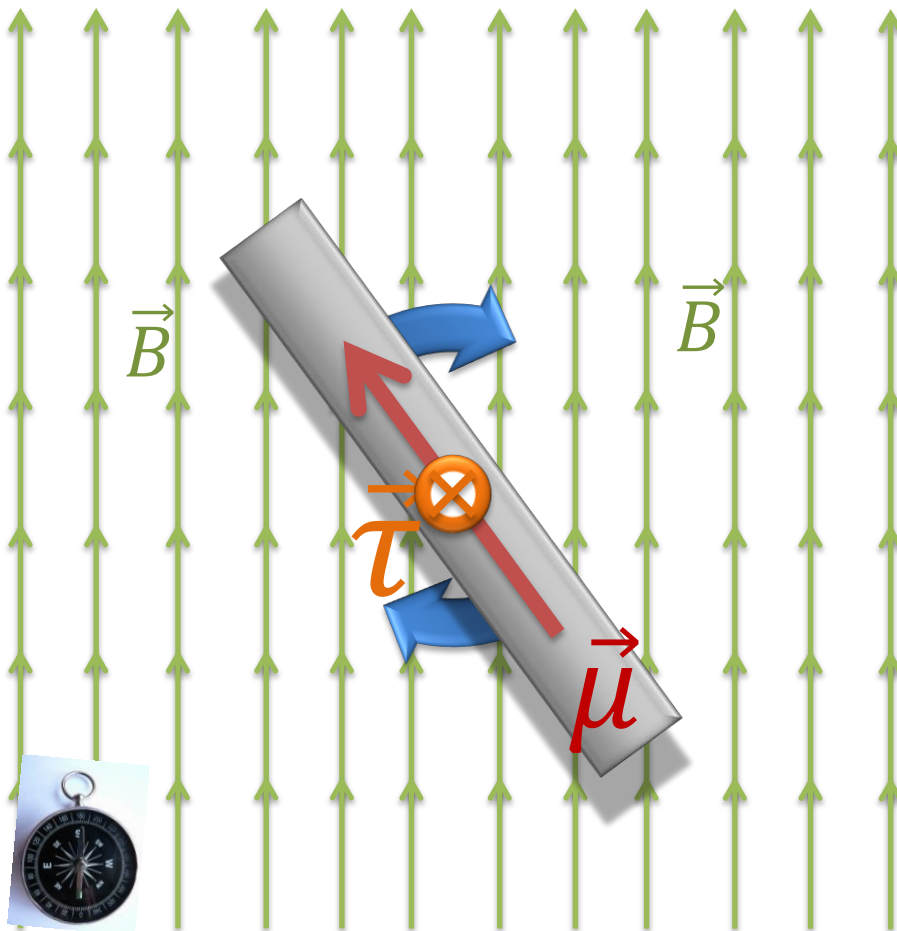
# Magnetismo em F 329

## Efeito do campo terrestre em ímãs

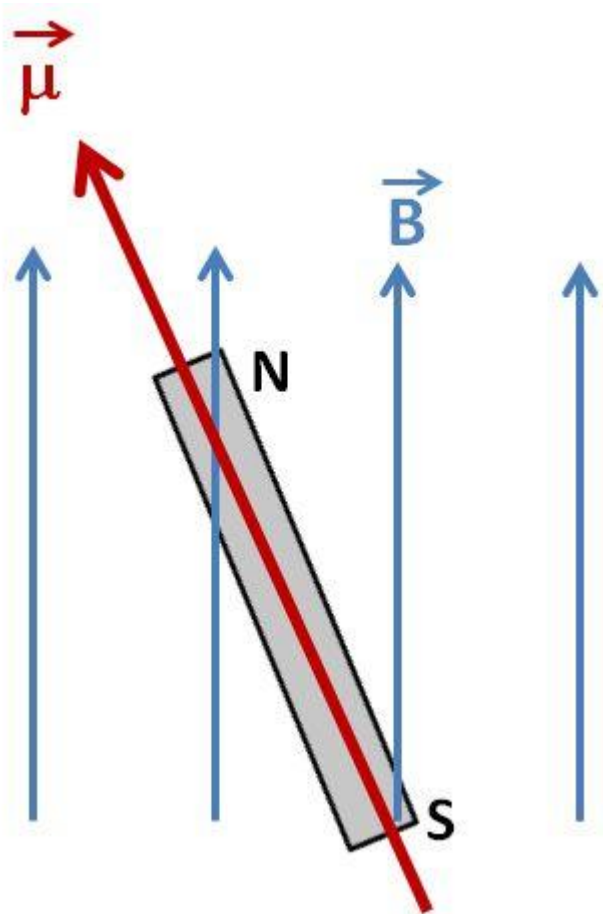


# Oscilação sob um campo magnético

## Força restauradora



# Pêndulo de torção de um ímã em um campo magnético



momento de dipolo  
magnético do ímã

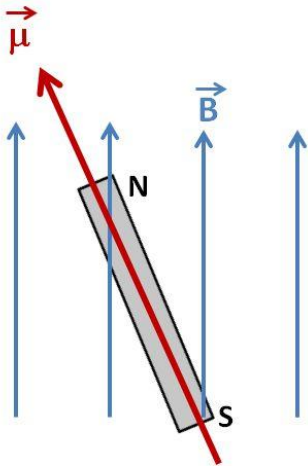
OSCILAÇÕES  
PEQUENAS!!

$$\tau = \vec{\mu} \times \vec{B} = \mu \cdot B \cdot \sin\theta \sim \mu \cdot B \cdot \theta$$

$$\tau = m_I \cdot \alpha = -m_I \cdot \ddot{\theta}$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{\mu \cdot B}{m_I} \cdot \theta$$

# Movimento Harmônico Simples



$$\ddot{\theta} = -\frac{\mu \cdot B}{m_I} \cdot \theta$$

MHS

$$\ddot{\theta} = -\omega^2 \cdot \theta$$

$$\omega^2 = \frac{\mu \cdot B}{m_I}$$

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

$$f^2 = \frac{\mu \cdot B}{4\pi^2 \cdot m_I}$$

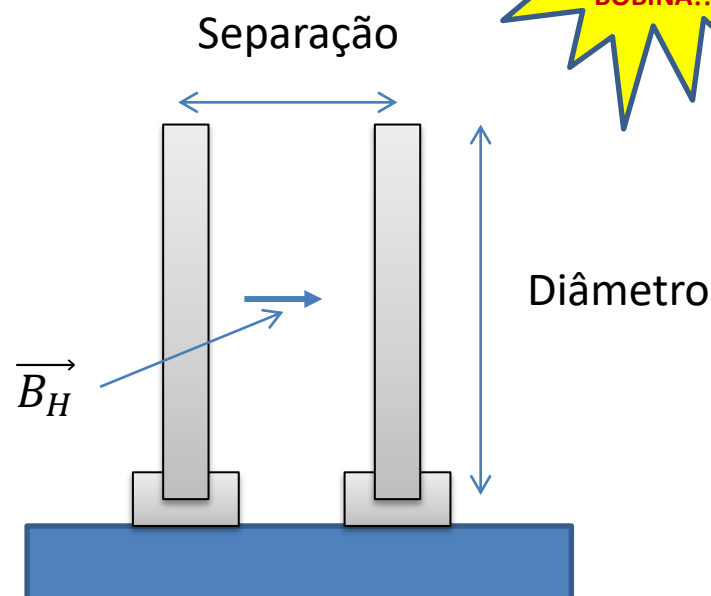
Medir o período (ou frequência) de oscilação devido ao campo magnético terrestre permite obter  $\mu^* B_{\text{Terra}}$  mas não os dois parâmetros separadamente.



# Bobinas de Helmholtz

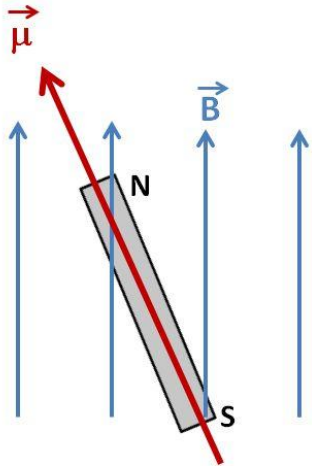


$$B_{Helmholtz} = B_H = \frac{8\mu_0 \cdot I \cdot N}{5^{3/2} \cdot R}$$

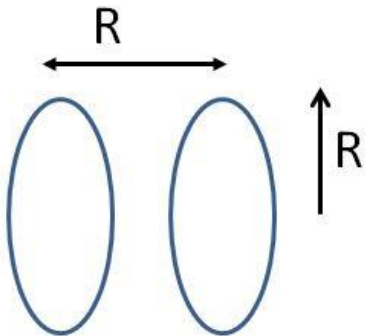


$$\text{Separação} = \text{Raio} = \text{Diâmetro} / 2$$

# Campo composto $B_T + B_H$



Bobina de Helmholtz



$$f^2 = \frac{\mu \cdot B}{4\pi^2 \cdot m_I}$$

$B = B_{Helmholtz} \pm B_{Terra}$

$$B_{Helmholtz} = B_H = \frac{8\mu_o \cdot I \cdot N}{5^{3/2} \cdot R}$$

$$f^2 = \frac{\mu}{4\pi^2 \cdot m_I} \cdot \left[ \left( \frac{8\mu_o \cdot N}{5^{3/2} \cdot R} \right) \cdot I \pm B_{Terra} \right]$$

# Modelo e TH

A hipótese que iremos testar está ligada ao modelo que é sintetizado pela equação a seguir:

$$f^2 = \frac{\mu}{4\pi^2 \cdot m_I} \cdot \left[ \left( \frac{8\mu_o \cdot N}{5^{3/2} \cdot R} \right) \cdot I \pm B_{Terra} \right]$$

Suposições no modelo (que não iremos testar diretamente):

- O campo da Terra está alinhado com o campo da bobina;
- O campo da bobina é constante em todo o volume ocupado pelo imã;
- O campo dentro da bobina é dado pela equação citada (ou seja, a bobina tem a geometria correta de uma bobina de Helmholtz);
- As oscilações são pequenas tal que a aproximação feita no modelo é boa (ou seja, não implica em desvios significativos da frequência com relação às incertezas das grandezas consideradas);
- Outras?

# Modelo e TH

A hipótese que iremos testar está ligada ao modelo que é sintetizado pela equação a seguir:

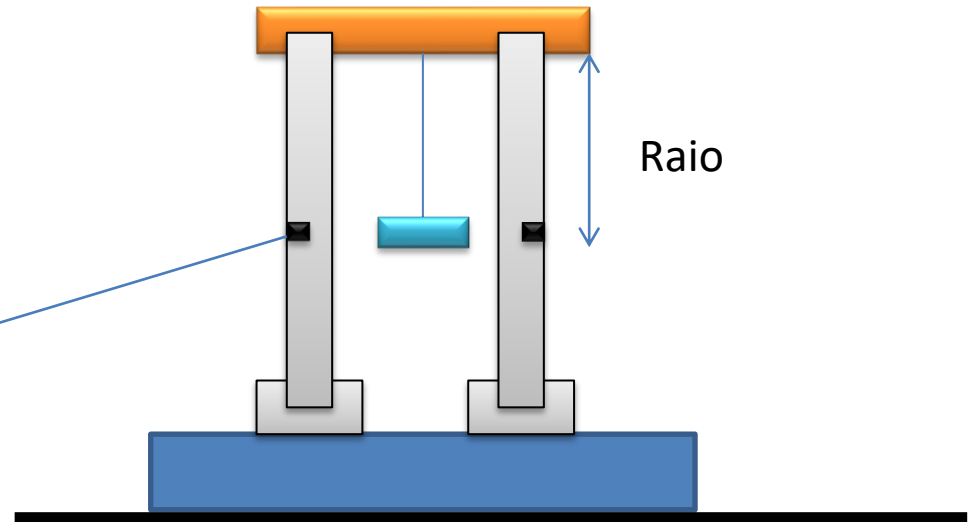
$$f^2 = \frac{\mu}{4\pi^2 \cdot m_I} \cdot \left[ \left( \frac{8\mu_o \cdot N}{5^{3/2} \cdot R} \right) \cdot I \pm B_{Terra} \right]$$

Como iremos testar o modelo? Explicitamente qual é a previsão que queremos do modelo?

Uma boa opção é o campo magnético da Terra. É uma grandeza que conhecemos a partir de outras fontes e que é determinada de forma independente deste modelo. Assim, estamos testando o modelo se usamos ele para medir o campo da Terra. A hipótese seria de que o modelo é capaz de determinar o campo da Terra dentro da incerteza prevista pelo próprio modelo (ou seja, aquela devida às medidas das grandezas da equação do modelo).

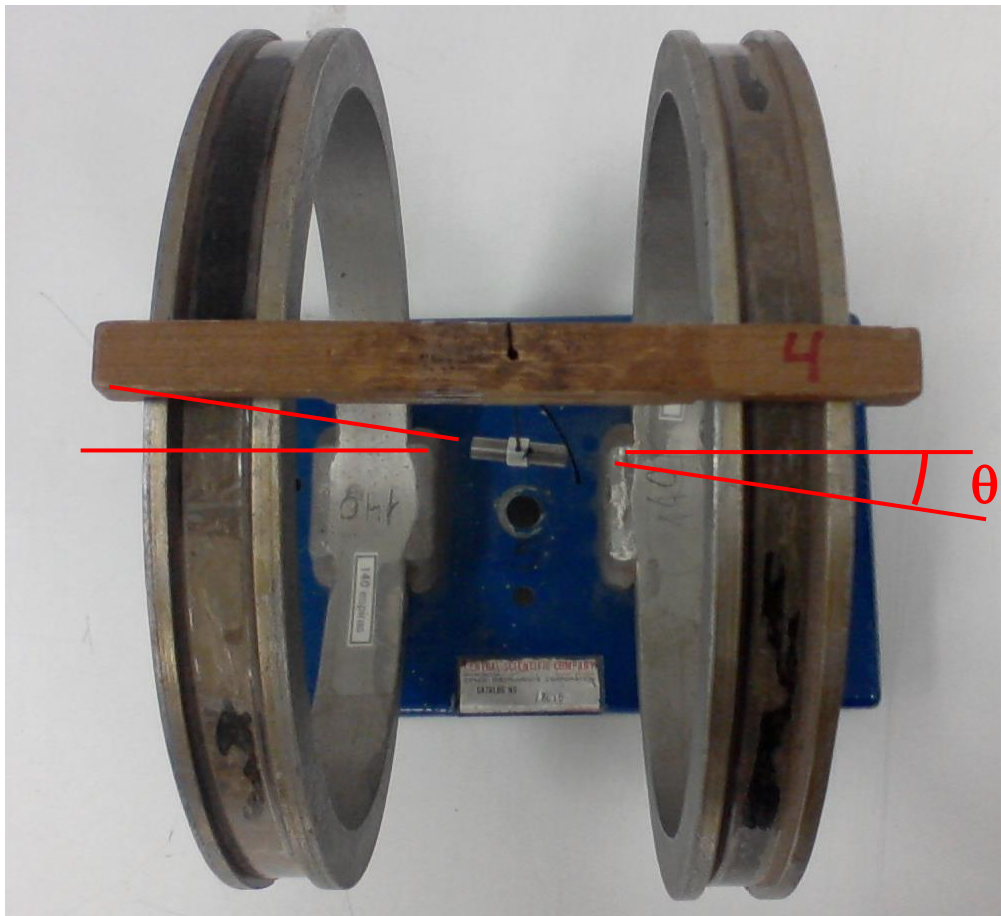
# Alinhamento do imã

O imã deve estar centralizado em altura!



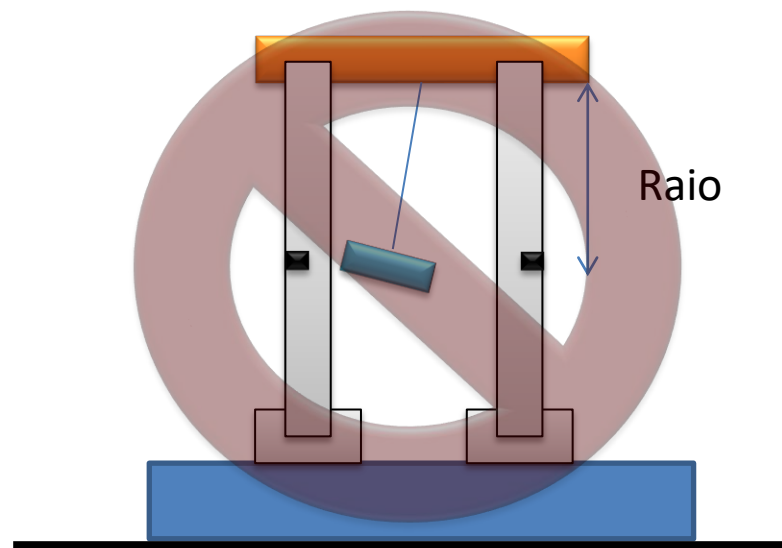
# Oscilação do imã

A condição inicial é o imã parado e alinhado com a bobina!



O imã deve oscilar em rotação em torno do seu centro **sem balançar como um pêndulo.**

Ângulo máximo de  $\sim 14^\circ$





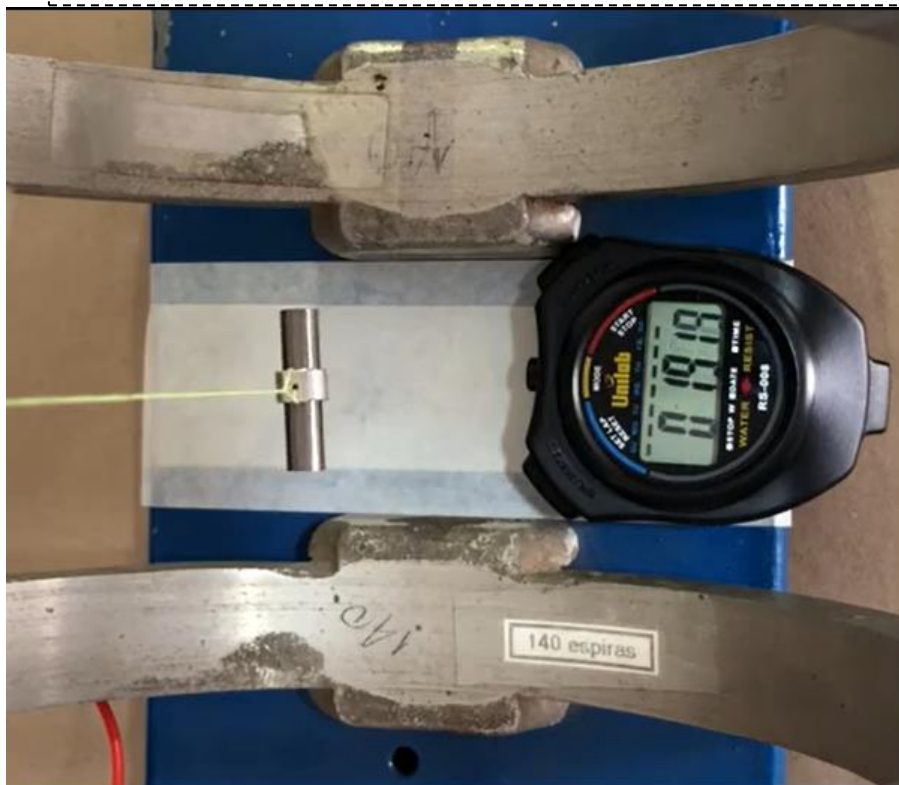
# Circuito

Fonte de tensão, amperímetro (mA) e resistor de potência.

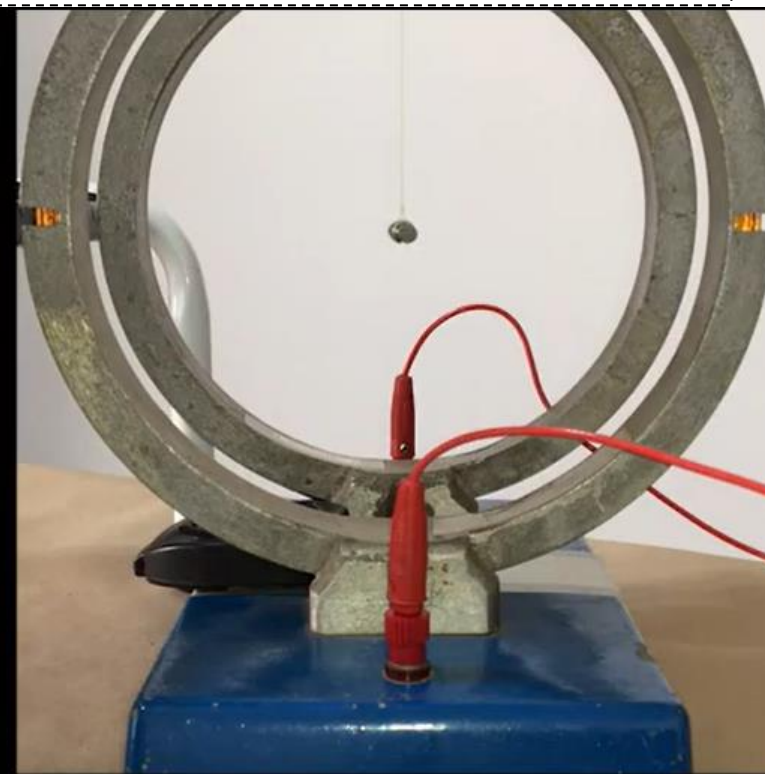


# Período em função da corrente

- Medir período de  $M$  oscilações ( $T_M$ ) para corrente positiva e negativa
- **Variar corrente de 0-250mA**
- Para cada valor de corrente: A partir de  $T_M$  calcular  $T_1$  e depois  $f^2$



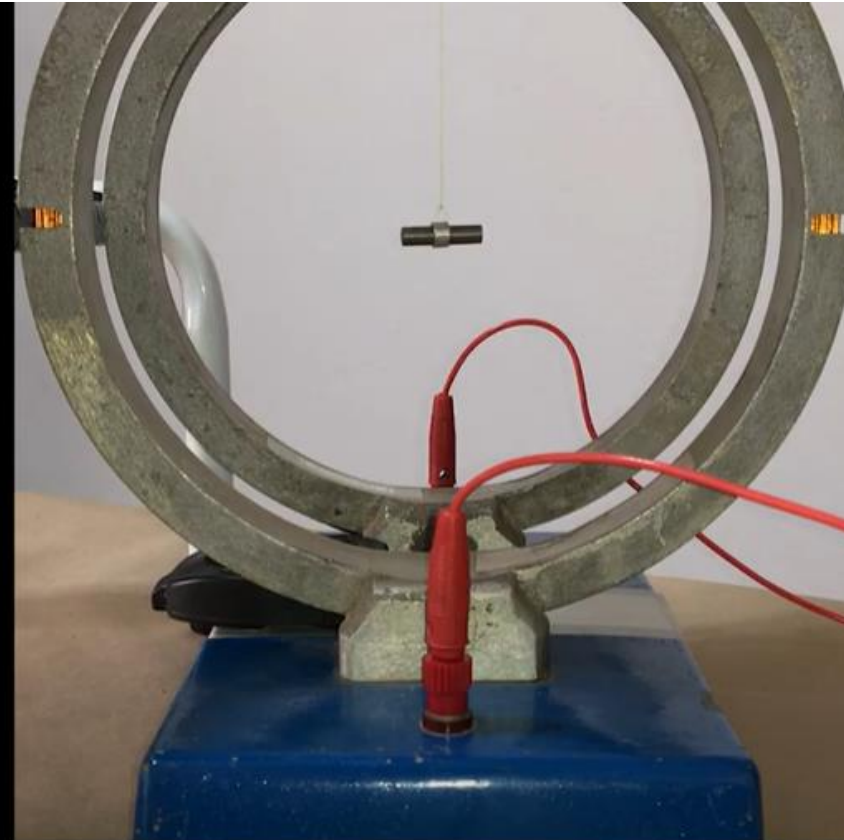
Campos Magnéticos  
**OSCILAÇÕES**



Auto Range  
Corrente 19.54 m A DC



# Campo resultante pequeno



Campos Magnéticos  
**OSCILAÇÕES**

Variação dinâmica  
da corrente



# Medida do raio da bobina

Como medir o raio das bobinas? Qual é a incerteza?????

Note que as bobinas são tem dimensão nula e que não se trata de mecânica de precisão.



Com qual incerteza faz sentido querer conhecer o raio das bobinas?



# Analises esperadas

Linearização da equação do modelo:

$$f^2 = \frac{\mu}{4\pi^2 \cdot m_I} \cdot \left[ \left( \frac{8\mu_o \cdot N}{5^{3/2} \cdot R} \right) \cdot I \pm B_{Terra} \right]$$

Diagram illustrating the linearization of the equation above. A red arrow points from  $f^2$  to  $Y$ . A blue arrow points from  $\frac{\mu}{4\pi^2 \cdot m_I}$  to  $A$ . A green arrow points from  $\left( \frac{8\mu_o \cdot N}{5^{3/2} \cdot R} \right) \cdot I$  to  $B$ . A blue arrow points from  $B_{Terra}$  to  $B$ . The resulting linearized equation is:

$$Y = A \times X + B$$

$$f^2 = \frac{\mu}{4\pi^2 \cdot m_I} \cdot \left[ \left( \frac{8\mu_o \cdot N}{5^{3/2} \cdot R} \right) \cdot I \pm B_{Terra} \right]$$

Diagram illustrating the linearization of the equation above. A red arrow points from  $f^2$  to  $Y$ . A blue arrow points from  $\frac{\mu}{4\pi^2 \cdot m_I}$  to  $A'$ . A blue arrow points from  $\left( \frac{8\mu_o \cdot N}{5^{3/2} \cdot R} \right) \cdot I$  to  $B' \times X$ . A green arrow points from  $B_{Terra}$  to  $B_T$ . The resulting linearized equation is:

$$Y = A' [(B' \times X + B_T)]$$

$$A = A'B' \rightarrow A' = A/B'$$

$$B = A'B_T \rightarrow B_T = B/(A') = B' (B/A)$$

Note que:

$$Y=0 \rightarrow X = -B/A.$$

$$Y=0 \rightarrow B_T = -B' \times X \rightarrow B_T = B' (B/A)$$

# Analises esperadas

Tabela de valores

$i \pm \delta i$	$T \pm \delta T$	$f \pm \delta f$	$f^2 \pm \delta f^2$

Gráfico com todos os valores;

Coeficientes lineares e angulares da regressão linear em ambos os conjuntos de dados;

Valores da componente horizontal do campo magnético da Terra (são 3) e do momento de dipolo do ímã (são 2).

Comportamento quando o período fica muito alto (Frequência quase nula).  
O que está havendo aqui?

# Frequência em função da corrente

$$f^2 = \frac{\mu}{4\pi^2 \cdot m_I} \cdot \left[ \left( \frac{8\mu_o \cdot N}{5^{3/2} \cdot R} \right) \cdot I \pm B_{Terra} \right]$$

$f^2$  é proporcional ao campo resultante!

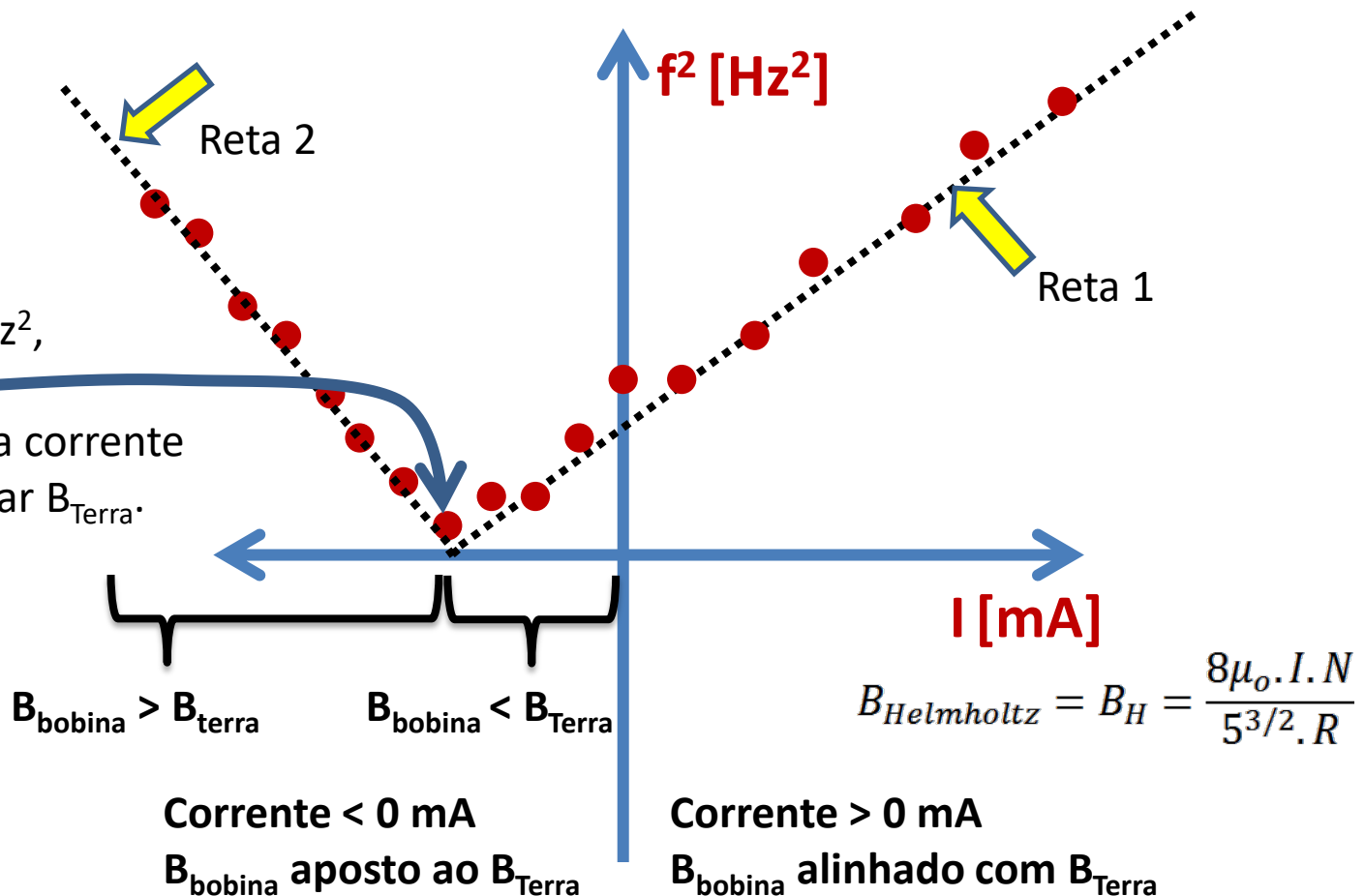


Quando  $f^2 = 0 \text{ Hz}^2$ ,

$B_{bobina} = B_{terra}$

E com o valor da corrente podemos calcular  $B_{Terra}$ .

$B_T = B' (B/A)$



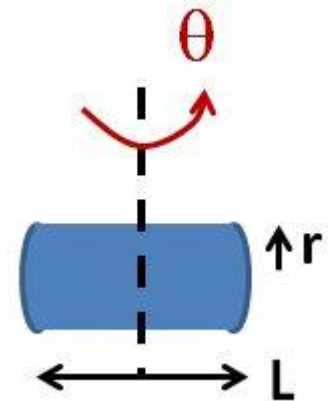
$$f^2 = \frac{\mu}{4\pi^2 \cdot m_I} \cdot \left[ \left( \frac{8\mu_o \cdot N}{5^{3/2} \cdot R} \right) \cdot I \pm B_{Terra} \right]$$

$\text{Hz}^2$      $\text{Hz}^2/\text{Tesla}$      $\text{Tesla}/\text{A}$      $\text{A}$      $\text{Tesla}$

$\mu$  = momento magnético do imã [ $\text{A} \cdot \text{m}^2$ ]

$\mu_o$  = permeabilidade magnética do vácuo =  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m}/\text{A}$

$m_I$  = momento de inércia do imã [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]



$$m_I = \frac{1}{4} m r^2 + \frac{1}{12} m L^2$$

$$\text{Tesla} = \frac{\text{kg}}{\text{A} \cdot \text{s}^2}$$

