



# Física Experimental III

Notas de aula: [www.if.usp.br/suaide](http://www.if.usp.br/suaide)

LabFlex: [www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex](http://www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex)

## Aula 12

Prof. Alexandre Suaide

Ramal: 7072

Ed. Oscar Sala (Pelletron), sala 246

# Lei de Faraday

- A Lei de Faraday estabelece como uma variação de fluxo magnético pode induzir um potencial elétrico.

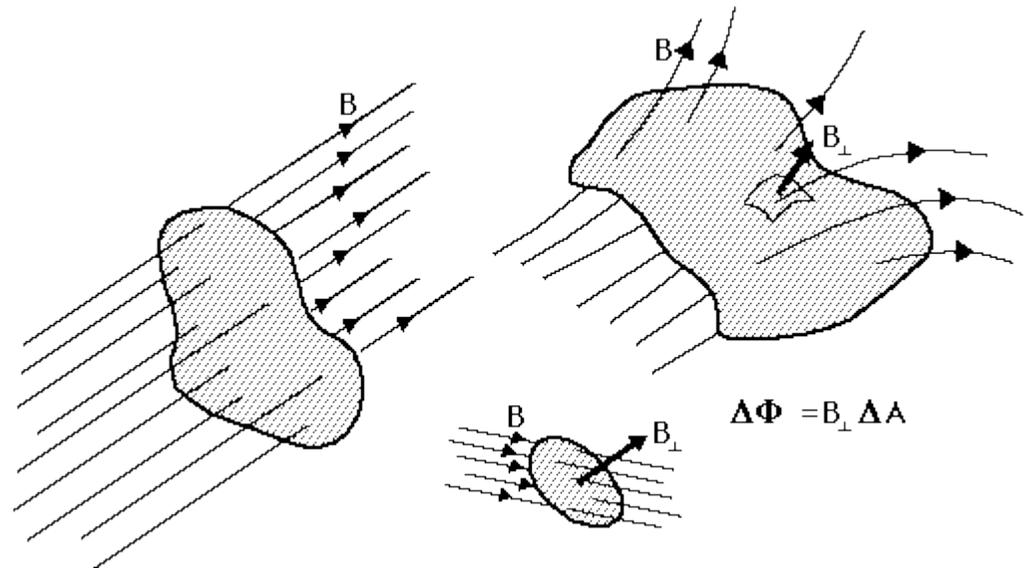
$$\mathcal{E} = - \frac{d\phi_B}{dt}$$



# Fluxo magnético

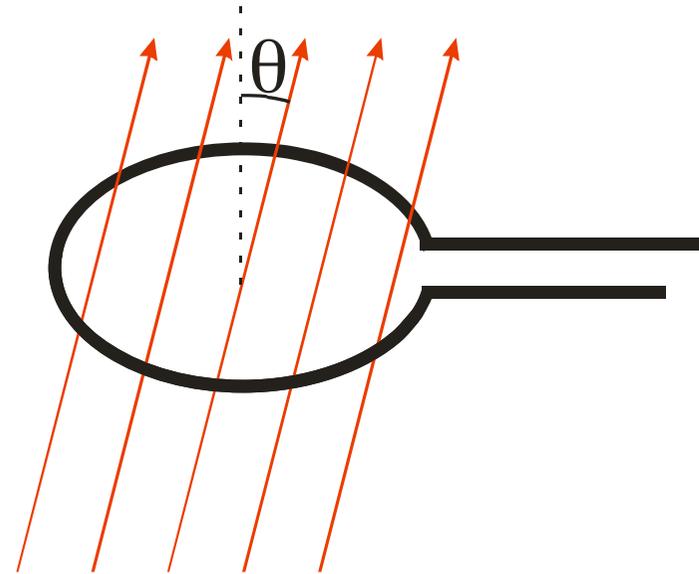
- Depende da intensidade do campo e da área transversal
- Variação do fluxo magnético
  - Campo varia e /ou
  - Área varia

$$\phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{a}$$



# Fluxo magnético sobre uma espira ideal

- Espira circular de área  $A$
- Campo uniforme e constante na espira
  - Espira suficientemente pequena para supor que o campo não varia
- Ângulo entre a espira e as linhas de campo =  $\theta$



$$\begin{aligned}\phi_B &= \int \vec{B} \cdot d\vec{a} \\ &= BA \cos(\theta)\end{aligned}$$

# Lei de Faraday em uma espira ideal

- Vamos calcular a variação do fluxo sobre uma bobina de área  $A$ .

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt}(BA \cos(\theta))$$

$$\varepsilon = -A \cos(\theta) \frac{dB}{dt} + BA \sin(\theta) \frac{d\theta}{dt}$$

Indução devida a variação temporal do campo magnético (supondo apenas mudança de amplitude)

Indução devida a mudança da geometria ou posição da bobina

## Bobina sonda

- A bobina sonda é uma bobina composta de  $N$  espiras de área  $A$ , correspondendo a uma bobina efetiva de área  $NA$ 
  - Aumenta a sensibilidade para variações de fluxo magnético

$$\phi_B = B(NA)\cos(\theta)$$

- Muito utilizada para medir e mapear campos magnéticos variáveis

## Uso da bobina sonda em um campo magnético oscilante harmônico

- Bobina perpendicular às linhas de campo, ou seja,  $\cos(\theta) = 1$

$$\phi_B = BNA$$

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt} = -NA\frac{dB}{dt}$$

- Campo magnético harmônico

$$B = B_0 \sin(\omega t)$$

$$\varepsilon = -NA\frac{dB}{dt}$$

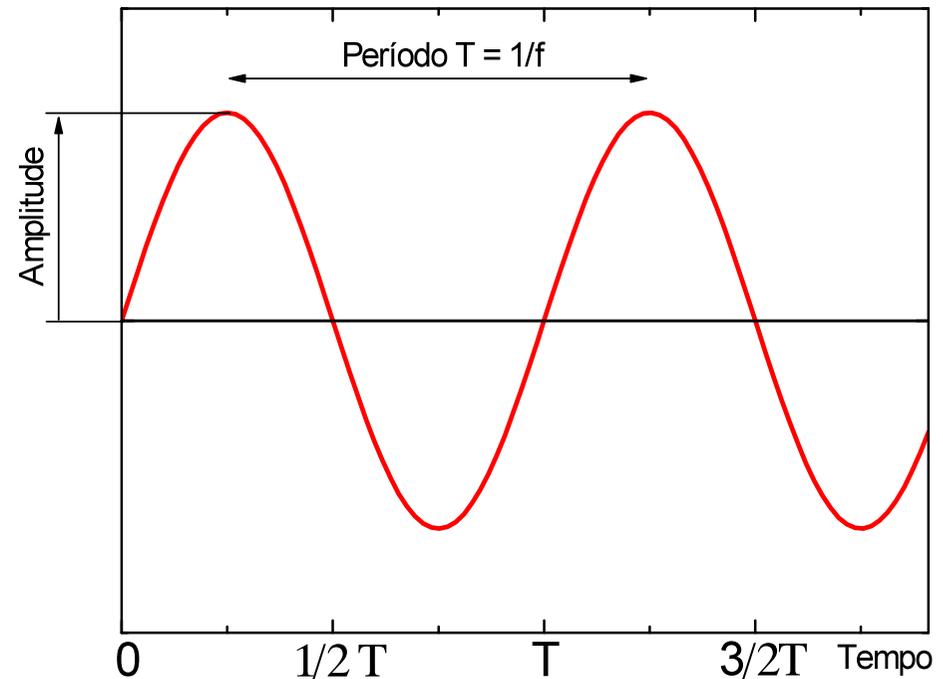
$$= -NA\omega B_0 \cos(\omega t)$$

# Uso de bobinas sonda

- F.E.M. induzida significa ser possível de medir em um osciloscópio

$$\varepsilon = -NA\omega B_0 \cos(\omega t)$$

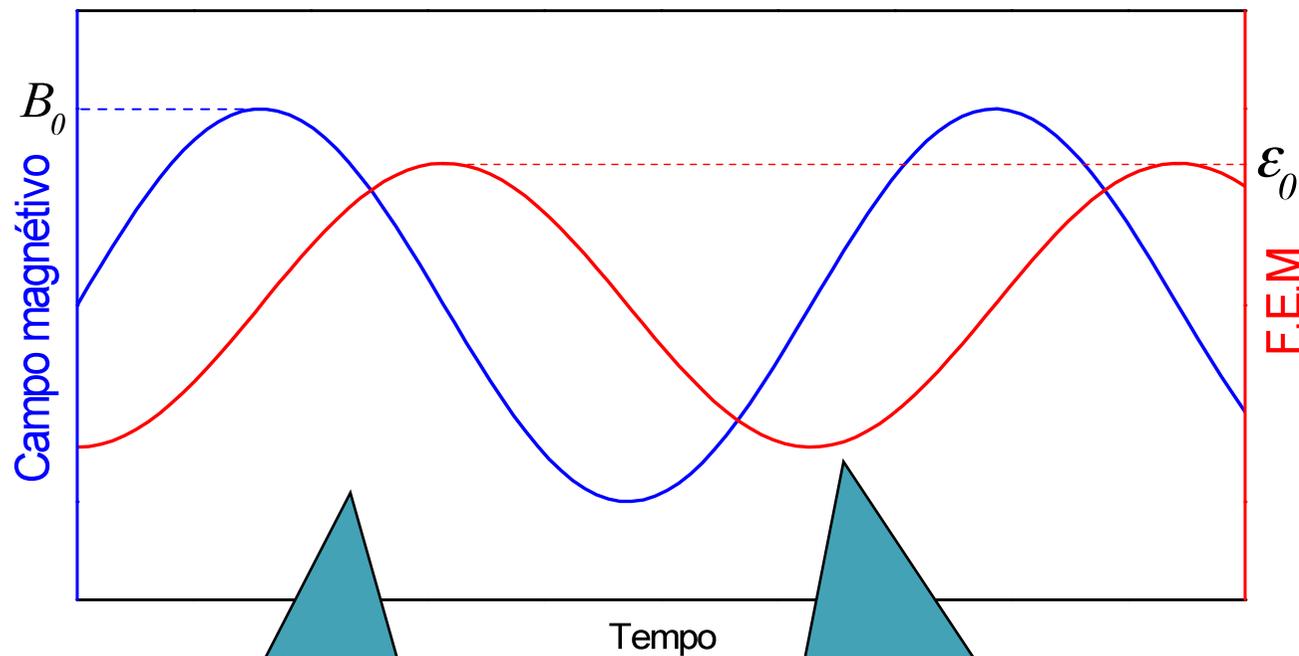
- Medindo F.E.M posso medir o campo magnético, bem como a sua dependência no tempo
  - *Amplitude* =  $NA\omega B_0$ .



# Campo magnético e F.E.M.

$$B = B_0 \sin(\omega t)$$

$$\varepsilon = -NA\omega B_0 \cos(\omega t)$$



A F.E.M. é defasada de  $\pi/2$  em relação ao campo magnético

A amplitude da F.E.M. depende das características geométricas mas depende também da frequência de oscilação do campo



# Objetivos do experimento

- Estudar aspectos fundamentais e aplicações da Lei de Faraday
  - Visualizar no laboratório a F.E.M. induzida em uma bobina e verificar que a amplitude é compatível com o previsto pelo cálculo do fluxo
  - Aplicações
    - Calibração de uma bobina sonda para mapeamento de campos variáveis.
    - Estudo de um solenóide e de uma bobina de Helmholtz

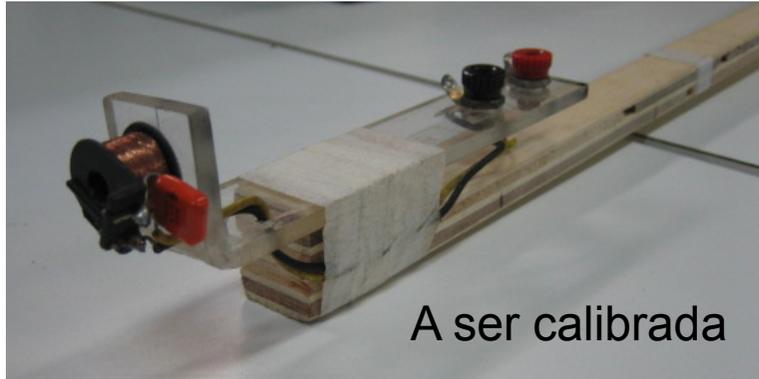


# Objetivos para esta semana

- Verificar, utilizando uma bobina conhecida, a Lei de Faraday
- Calibrar uma bobina sonda para mapeamento de campos magnéticos
  - Utilizar uma bobina sonda (área e número de espiras desconhecida)
  - Determinar a área efetiva ( $NA$ ) desta bobina para uso nas aulas seguintes
- Mapear o campo magnético de um solenóide
  - Comparar com previsão teórica.

# O Equipamento básico do experimento

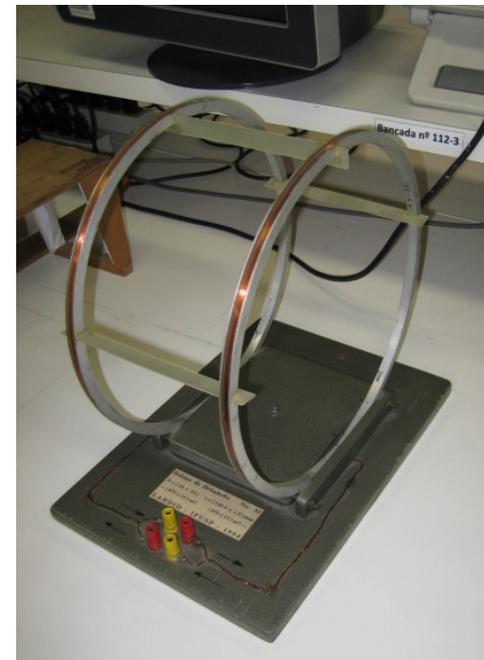
- Bobinas sonda



- Solenóide de referência

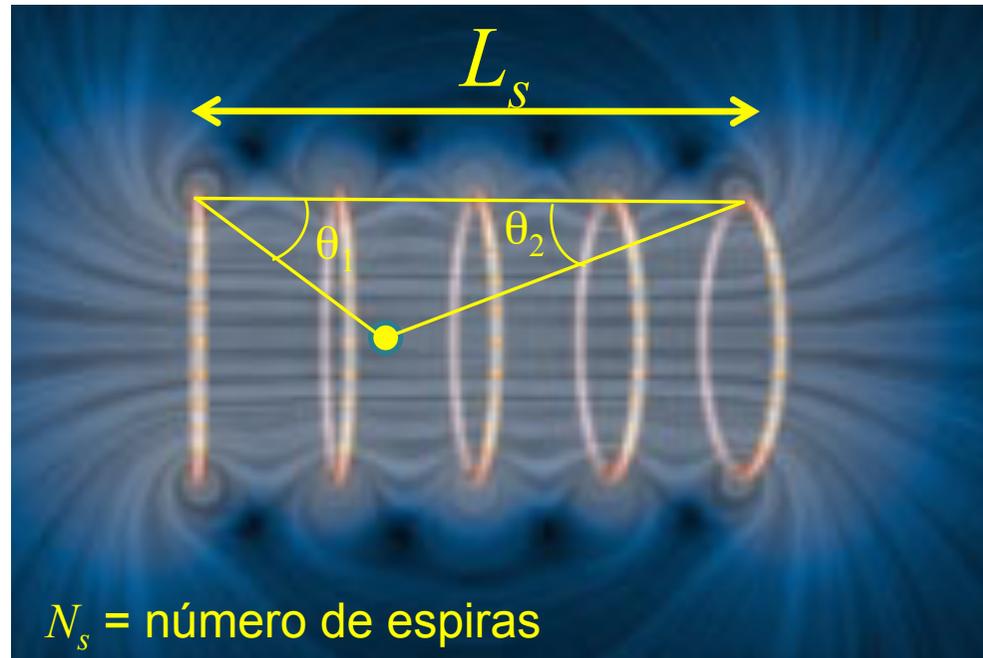


- Bobina de Helmholtz



## E o campo magnético para induzir a F.E.M.?

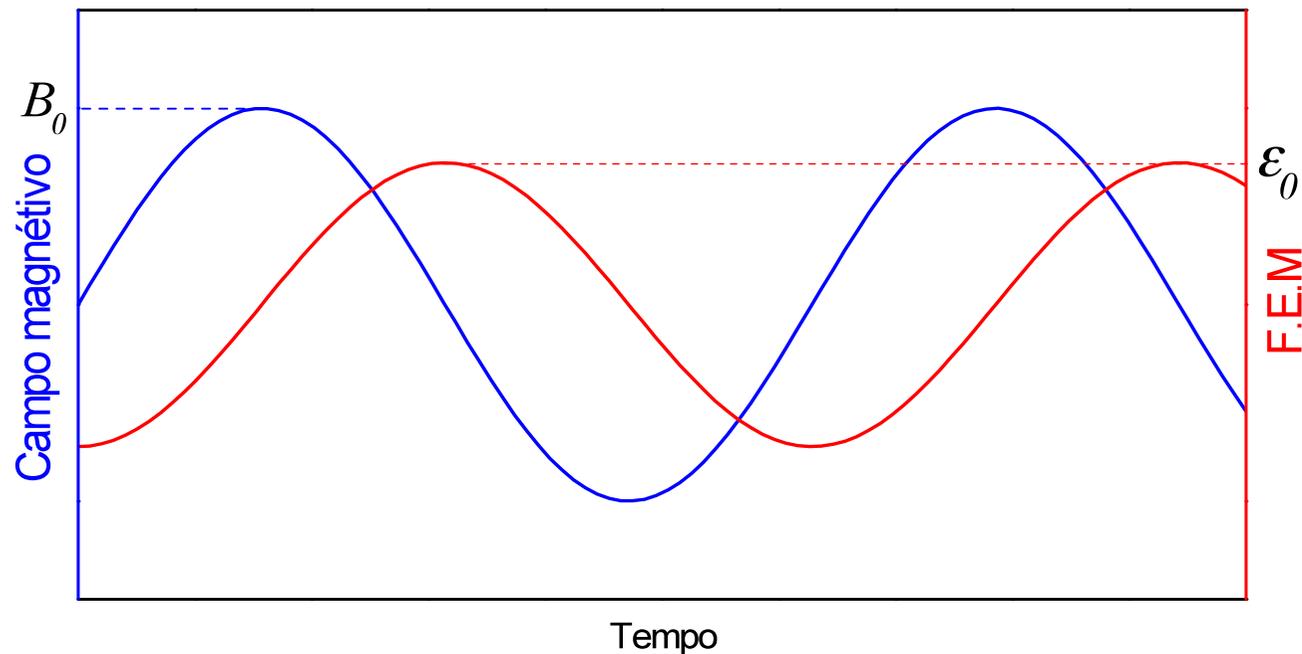
- Solenóide finito  $B(t) = \frac{\mu_0 N_s}{2L_s} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \cdot i(t)$



- Corrente harmônica  $i(t) = i_0 \sin(\omega t)$

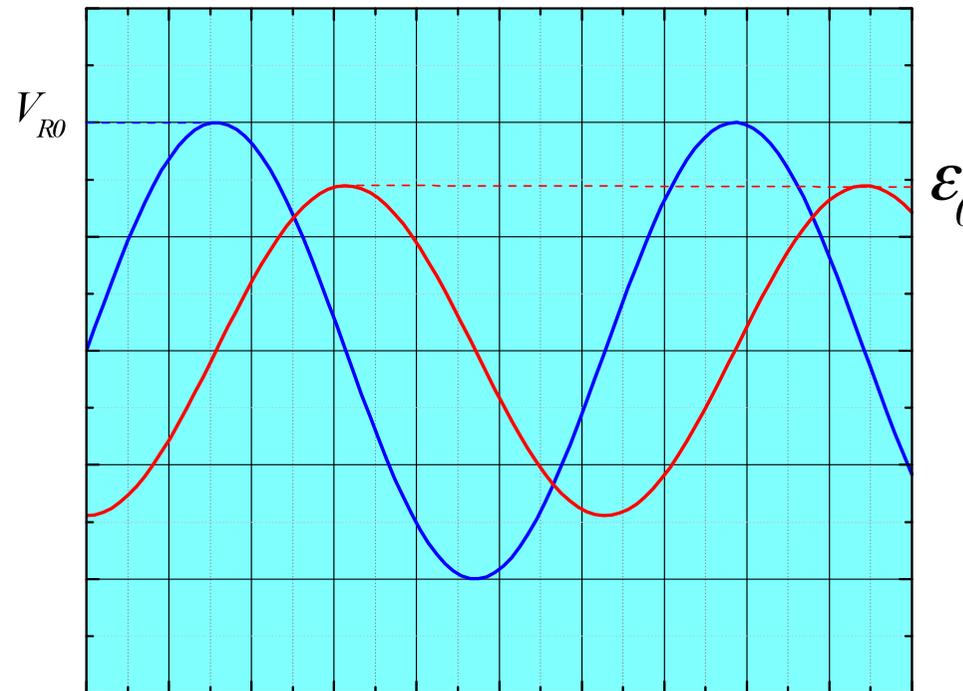
# Campo magnético e F.E.M.

- Campo  $B(t) = \underbrace{\frac{\mu_0 N_S i_0}{2L_S} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)}_{B_0} \cdot \sin(\omega t) = B_0 \sin(\omega t)$
- F.E.M.  $\varepsilon(t) = -NA \frac{dB}{dt} = -\underbrace{B_0 \omega NA}_{\varepsilon_0} \cos(\omega t) = \varepsilon_0 \cos(\omega t)$



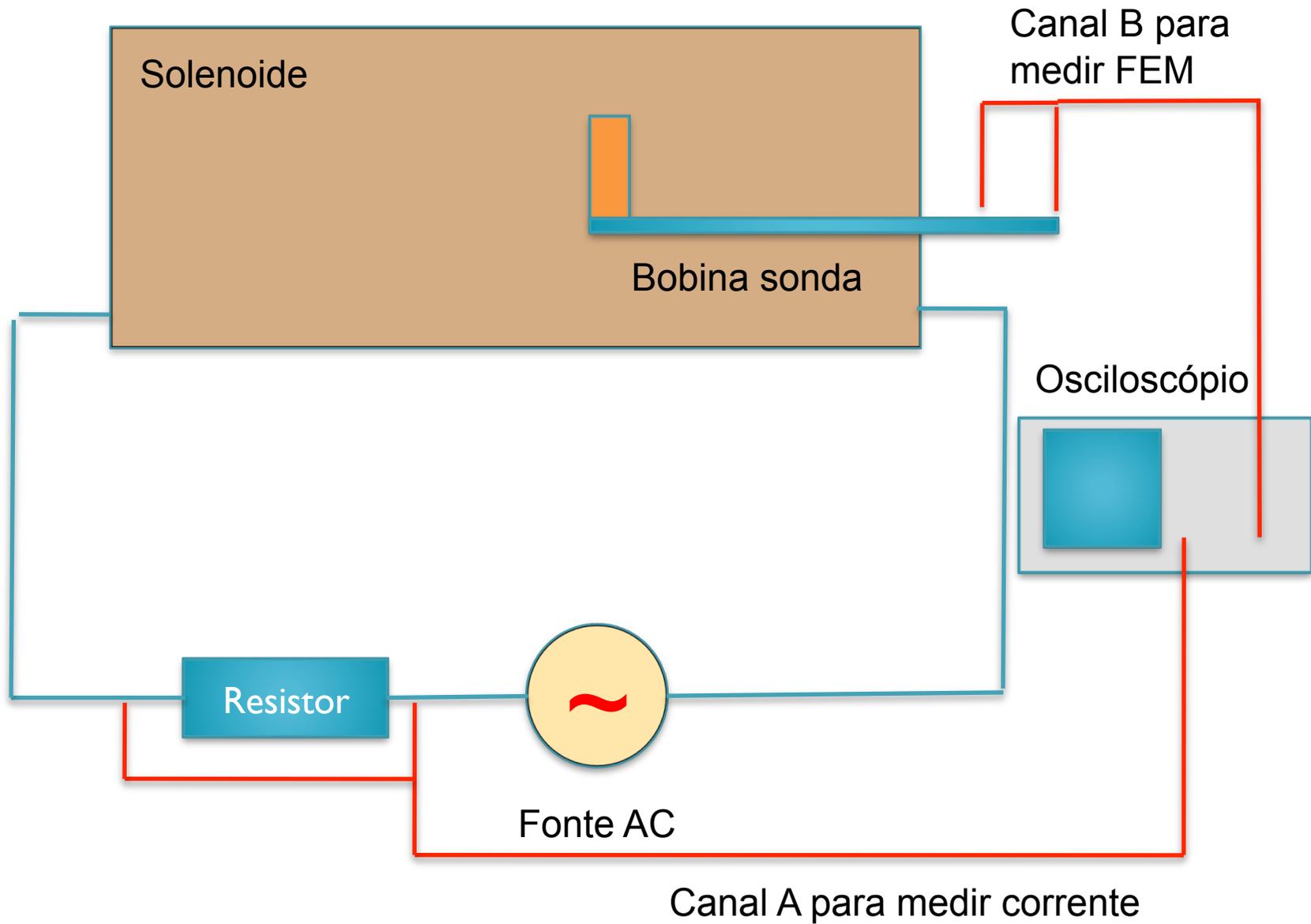
# Na prática – medidas realizadas

- Medimos a corrente no osciloscópio
  - Na verdade, a tensão em um resistor conhecido
    - Desta medida, podemos calcular o campo magnético
- F.E.M.

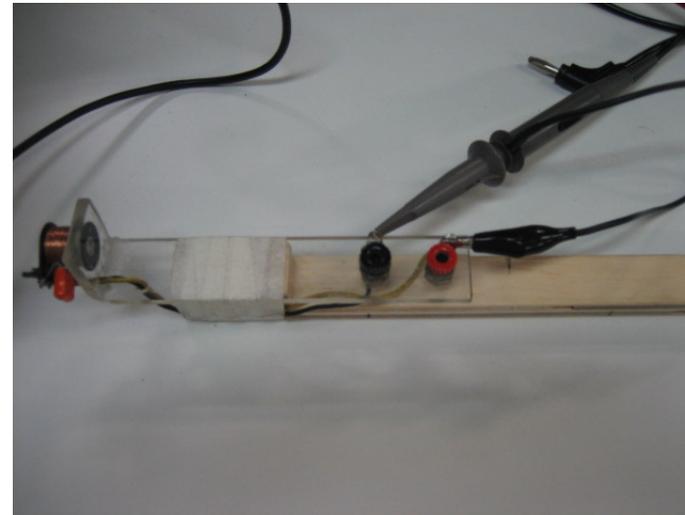
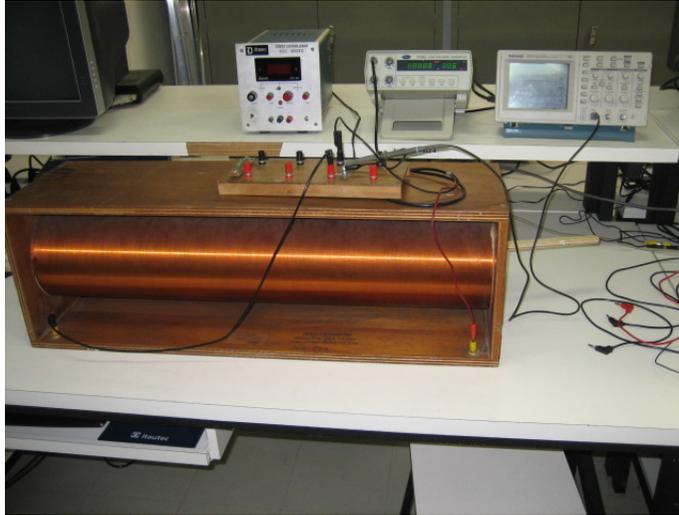


Tela do osciloscópio

# Arranjo experimental



# Arranjo experimental

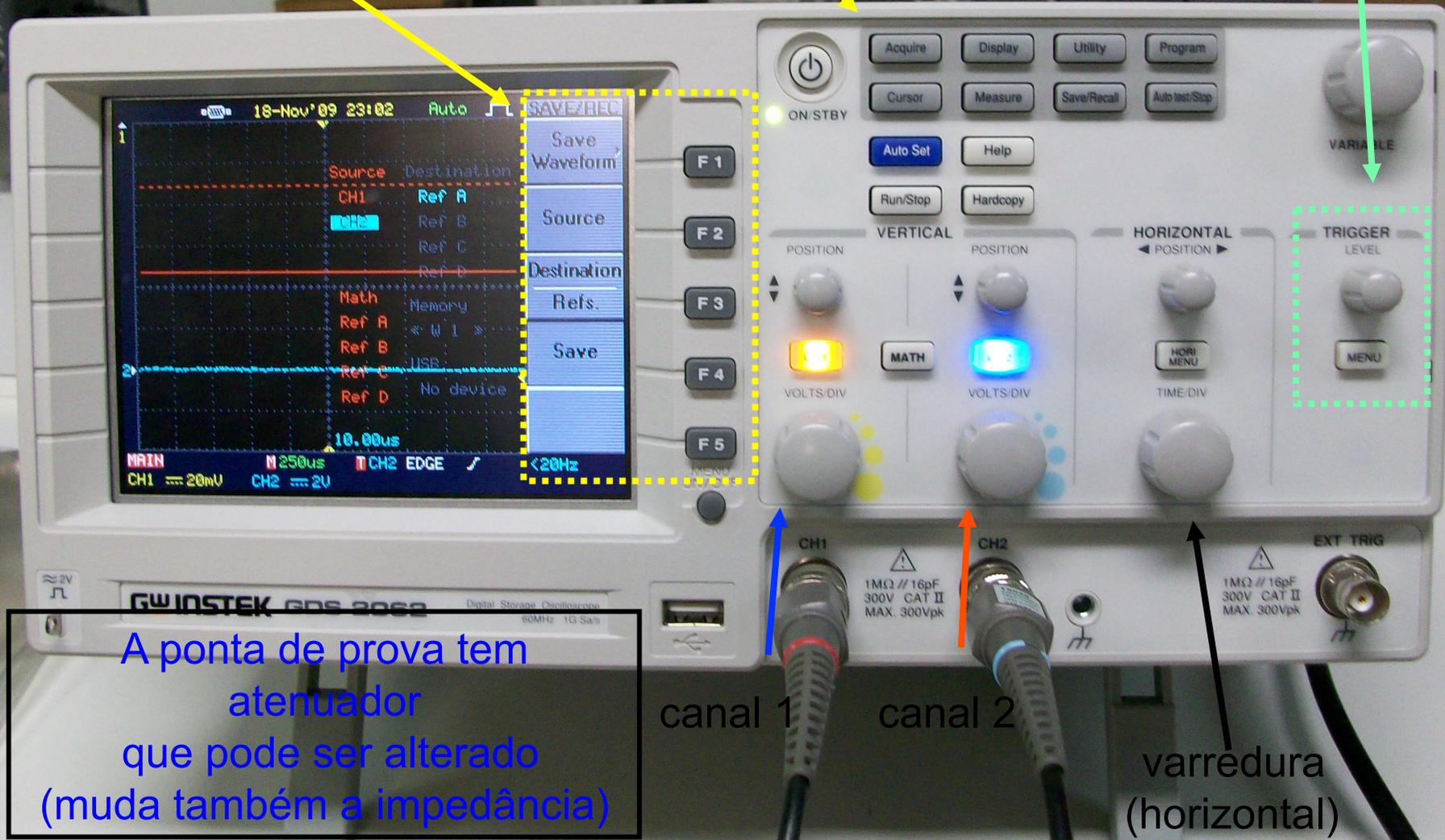


# Osciloscópio

gatilho (trigger)

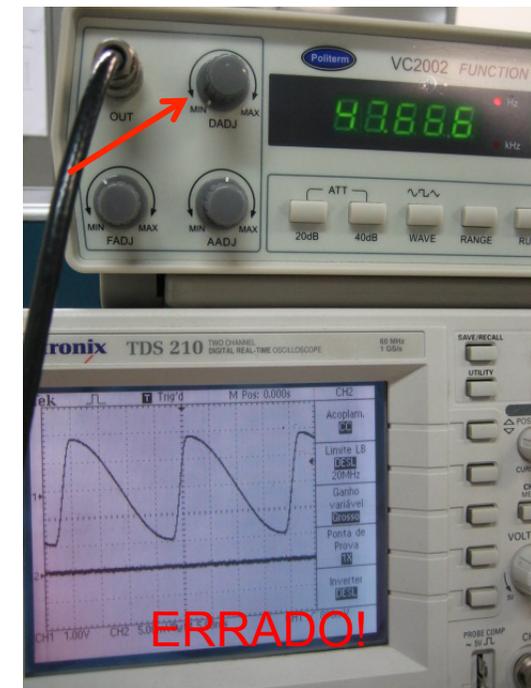
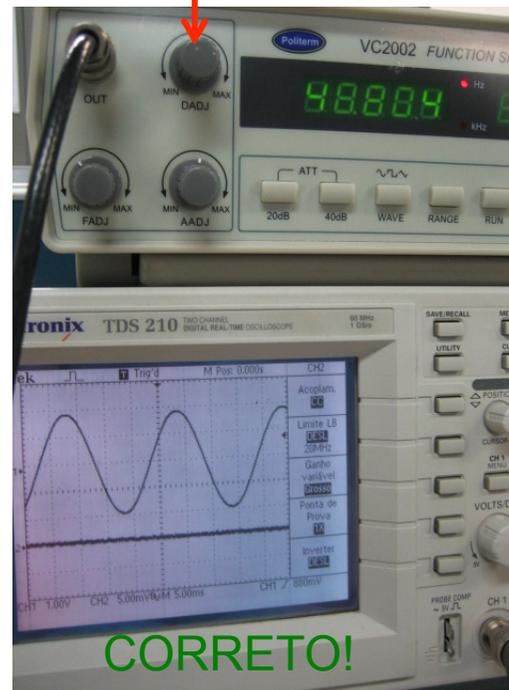
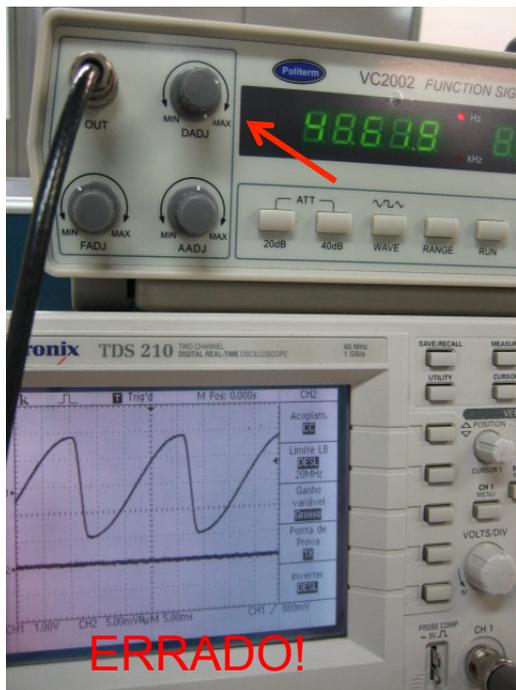
menu interativo

acoplamento AC, DC ou terra

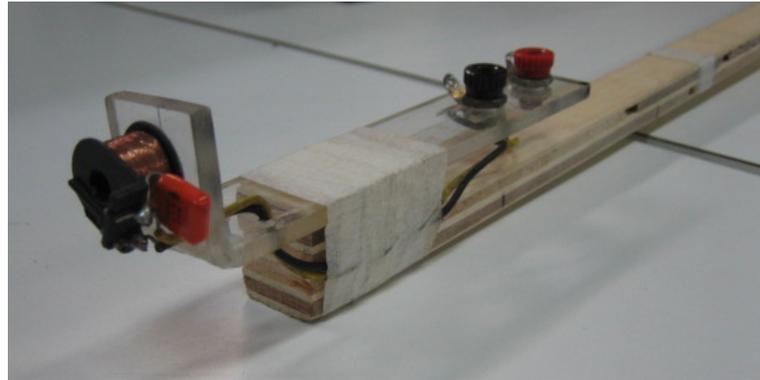


# Ajuste do gerador de áudio

- Ajuste de frequência e amplitude
- Cuidado com duty cycle



# Tarefas da semana (primeira parte)



- Usando a bobina desconhecida
  - Fazer gráfico da F.E.M. induzida em função da corrente no solenóide.
  - Ajustar os dados e determinar a área efetiva da bobina
  - Medir a diferença de fase entre a F.E.M. na bobina e a corrente no solenóide. Comparar ao valor esperado.
- Pergunta “teórica”
  - Deve existir alguma preocupação do alinhamento do solenóide com o campo magnético local? Porque?

# Tarefas da semana (segunda parte)



- Mapear o campo ao longo do eixo-z do solenóide
  - Usando a bobina sonda calibrada anteriormente, medir o campo magnético do solenóide em função de  $z$ .
    - Interesse maior nas bordas, entendendo para o exterior do solenóide até  $B \sim 0$ .
  - Comparar valores experimentais com previsão teórica
    - FEMM ou expressão teórica. Superpor resultados.
  - Discuta o valor do campo na borda do solenóide em relação ao valor no seu centro.