



# Física Experimental III

Notas de aula: [www.fap.if.usp.br/~hbarbosa](http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa)

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

## Experiência 3, Aula I

### Lei de Faraday

Prof. Henrique Barbosa

[hbarbosa@if.usp.br](mailto:hbarbosa@if.usp.br)

Ramal: 6647

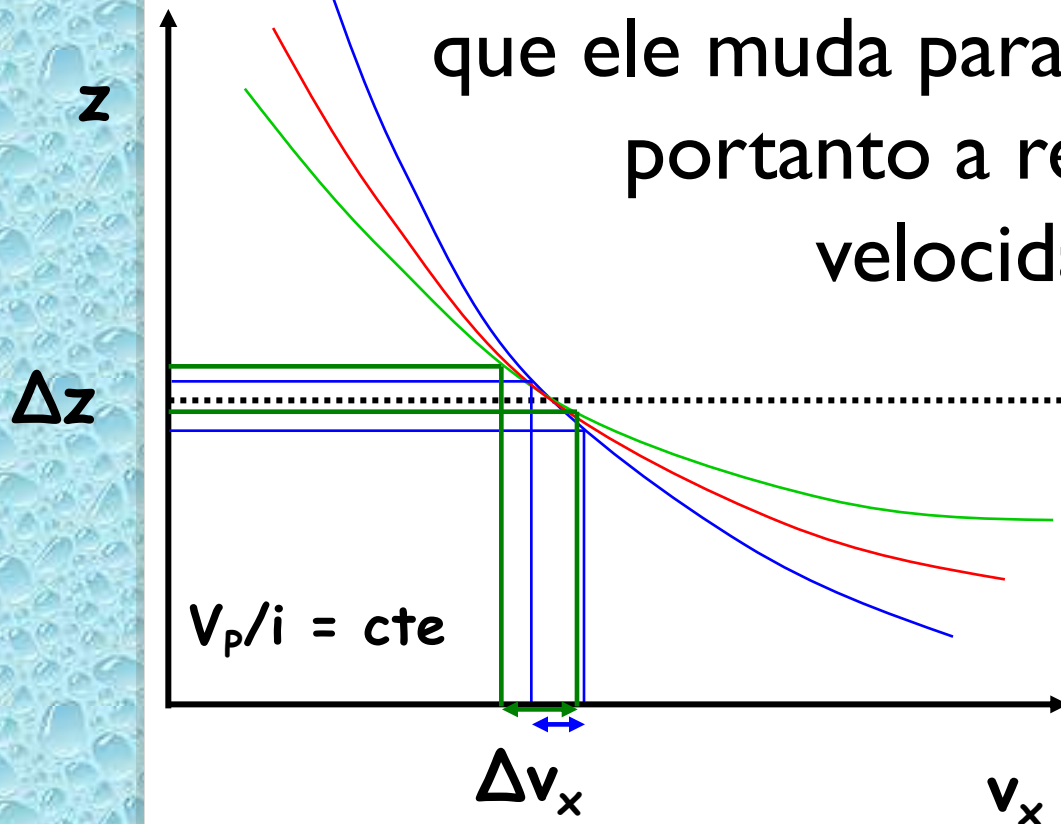
Ed. Basílio Jafet, sala 100

# TAREFAS SEMANA PASSADA

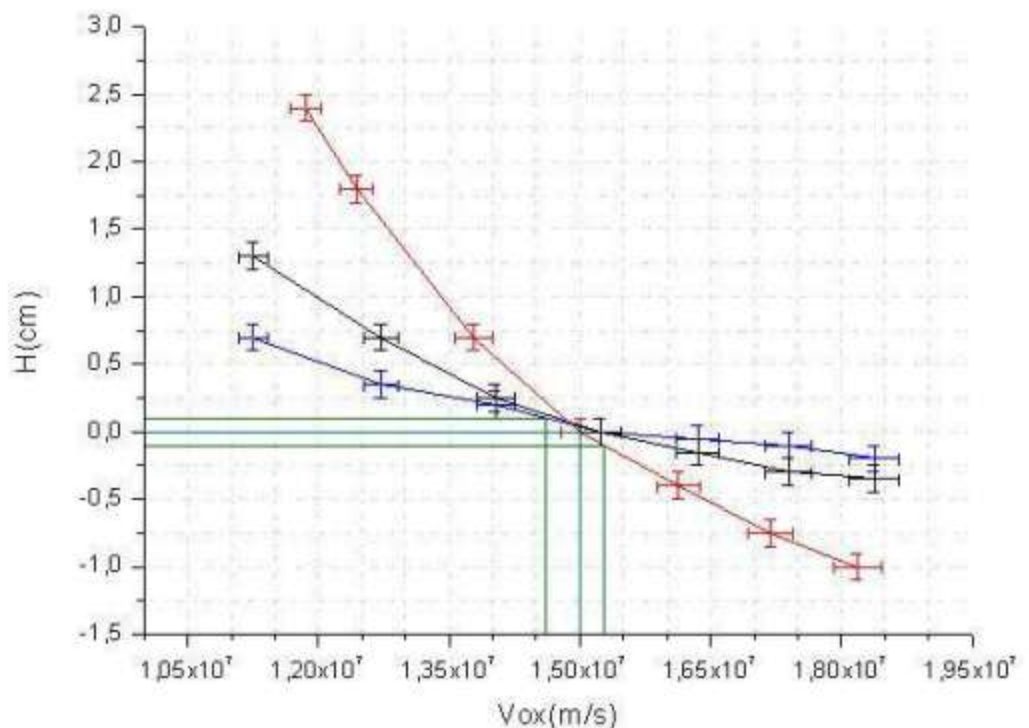
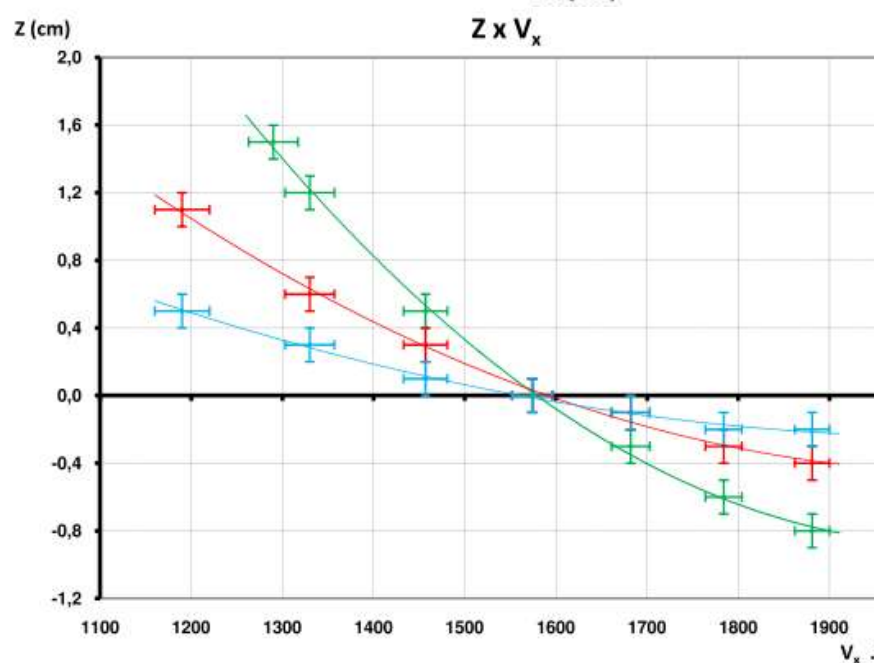
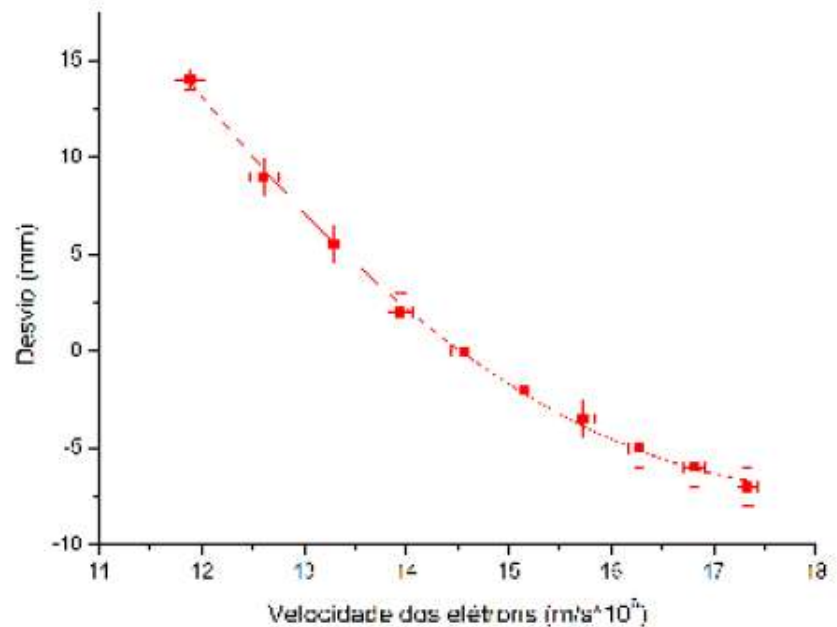
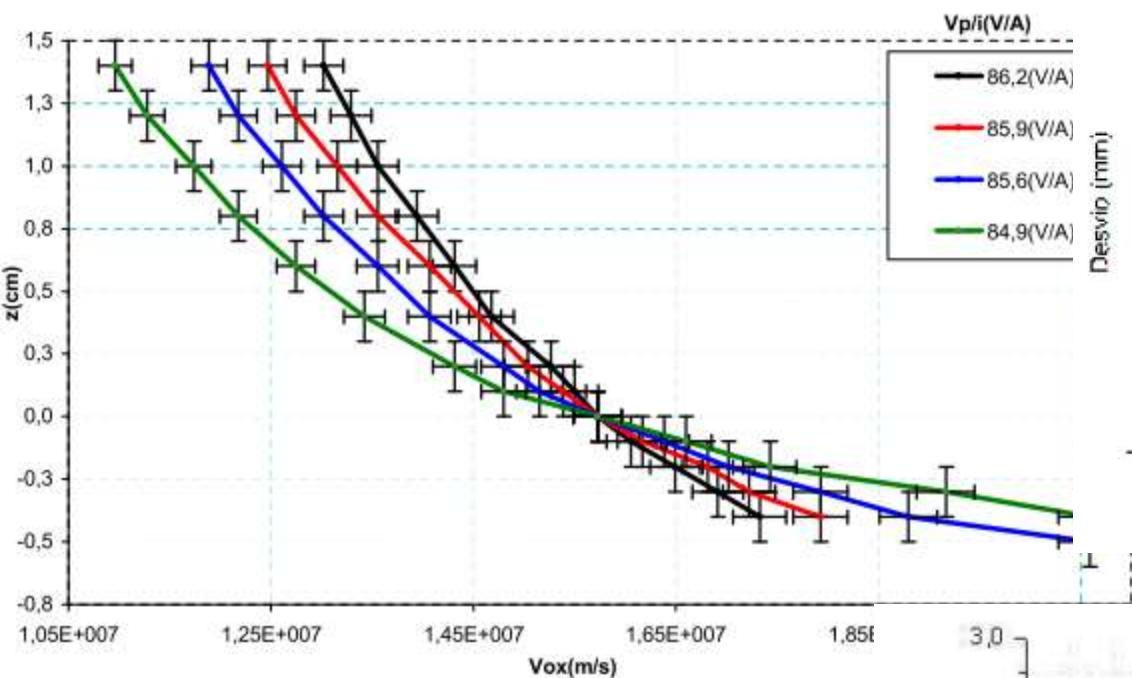


# Resolução do seletor

- ▶ Vamos ter um erro no eixo  $z$ ,  $\Delta z$  que é na verdade o tamanho do ponto na tela. Calculando o erro  $\Delta v_x$  a partir de  $\Delta z$ , vemos que ele muda para cada curva e, portanto a resolução em velocidade muda.



$$R = \frac{\Delta v_x}{v_x}$$



# Qual seria a melhor função de ajuste?

**Campo elétrico**  $h = A' \frac{V_p}{V_{ac}}$

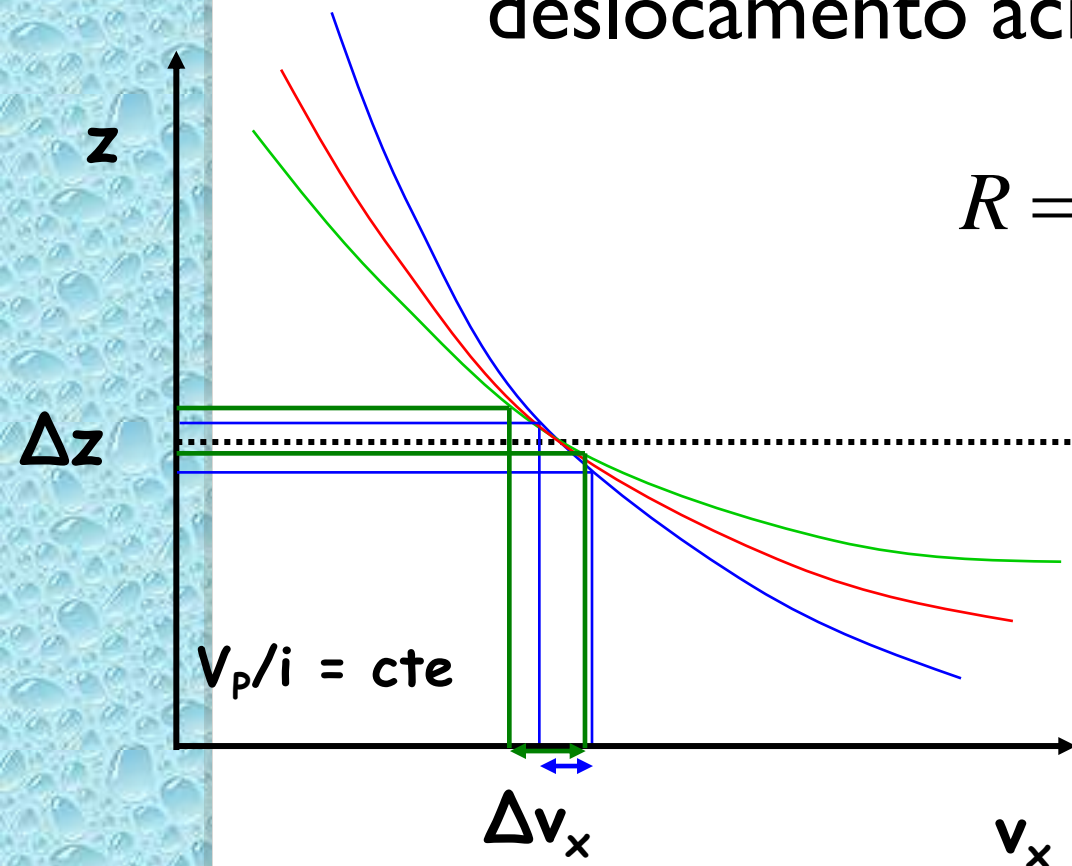
**Campo magnético**  $H = C \frac{i}{\sqrt{V_{ac}}}$

**Então a função teria a seguinte forma:**

$$h + H = A' \frac{V_p}{V_{ac}} + C \frac{i}{\sqrt{V_{ac}}} = \frac{\Gamma_1}{v_{0x}^2} + \frac{\Gamma_2}{v_{0x}}$$

# Como calcular a resolução ?

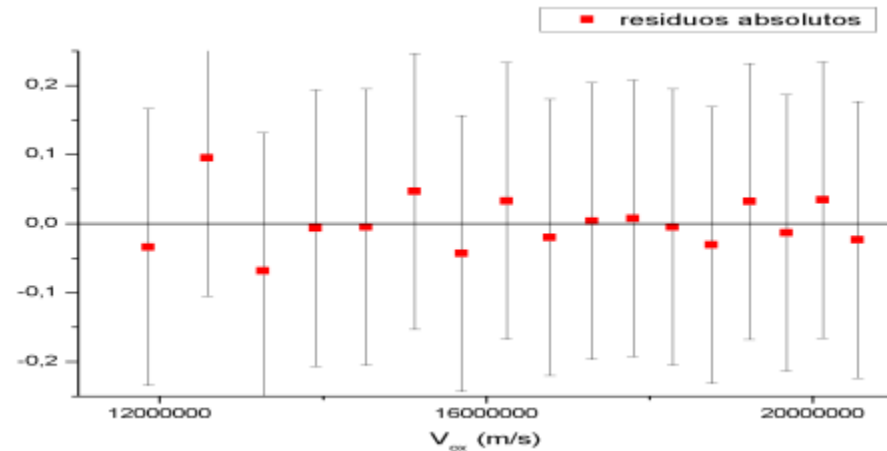
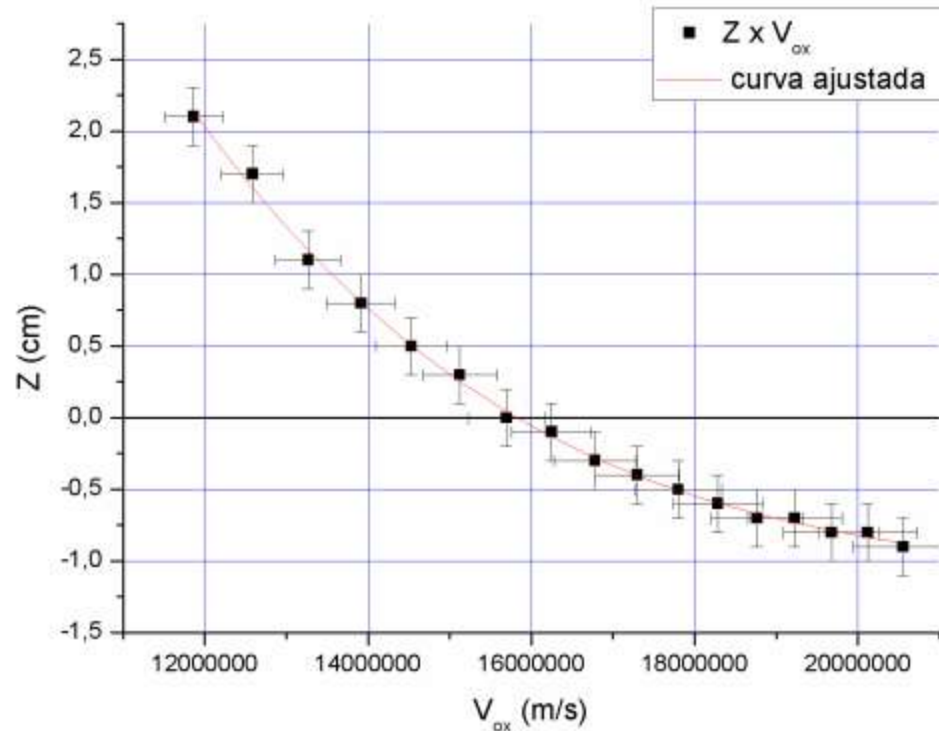
- A partir da função ajustada, calculava-se o valor da velocidade para um pequeno deslocamento acima e abaixo.



$$R = \frac{v_{0x}(+\Delta h) - v_{0x}(-\Delta h)}{v_{0x}(0)}$$

$$R = \frac{\left. \frac{\partial v_{0x}}{\partial h} \right|_{h=0} 2\Delta h}{v_{0x}(0)}$$

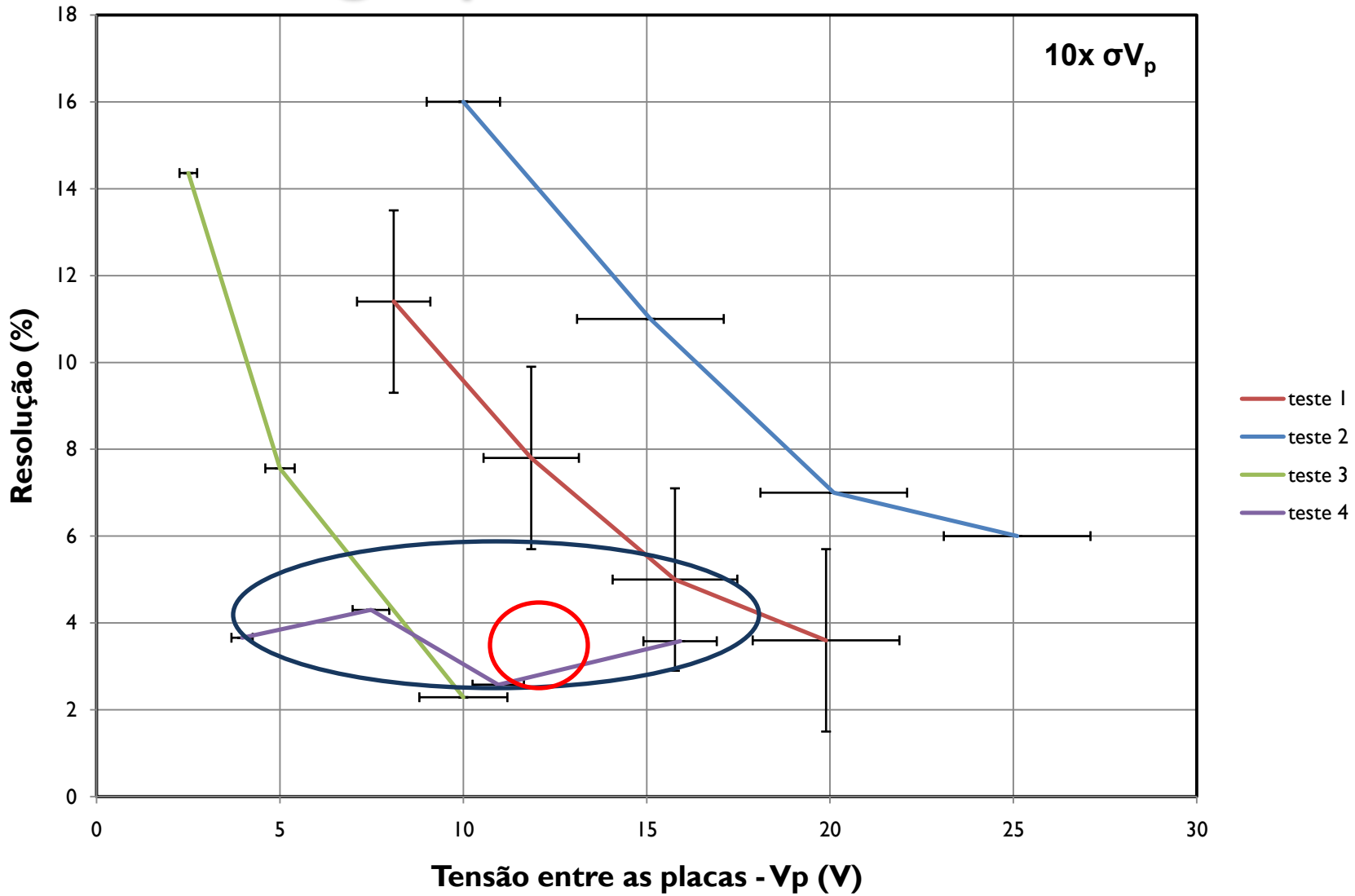
# Resolução



AJUSTE		
Equação $y = A + B \cdot x + C \cdot x^2 + D \cdot x^3$		
Adj. R-quadrado	0,99776	
Parâmetro	Valor	Erro
A	26	3
B	-3,5E-06	6E-07
C	1,6E-13	4E-14
D	-2,5E-21	7E-22

Resolução do Seletor de Velocidades			
$V_{ox} = 15697134 \text{ m/s}$			
$V_p/i \sim 87 \text{ V/A}$	$\Delta V_x \text{ (m/s)}$	$\sigma_{\Delta V_x} \text{ (m/s)}$	Resolução (%)
$V_p = (25,1 \pm 0,2) \text{ V}$ $I = (0,29 \pm 0,01) \text{ A}$	964700	57882	6
$V_p = (20,1 \pm 0,2) \text{ V}$ $I = (0,23 \pm 0,01) \text{ A}$	1140600	68436	7
$V_p = (15,1 \pm 0,2) \text{ V}$ $I = (0,17 \pm 0,01) \text{ A}$	1667100	100026	11
$V_p = (10,0 \pm 0,2) \text{ V}$ $I = (0,116 \pm 0,003) \text{ A}$	2536400	152184	16

# Vários grupos

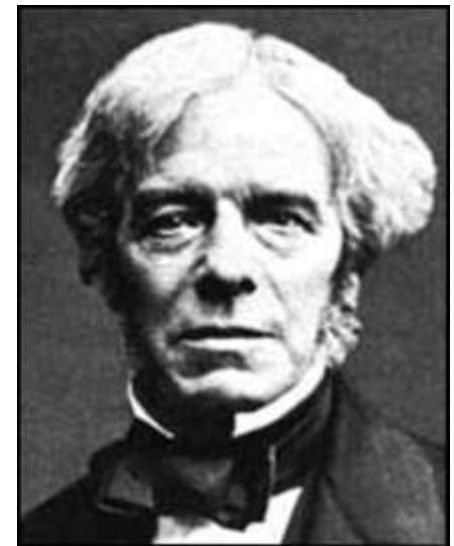




# Síntese Final

- Quais as conclusões do experimento?
  - Quais as medidas/analises que levaram a estas conclusões?
  - Conclusões (e resumo) do trabalho
- Como eu dou suporte a estas conclusões?
  - Quais as aproximações teóricas, medidas e análises que foram necessárias para este suporte?
  - Análise de dados
- Quais os fundamentos teóricos utilizados para chegar as conclusões estabelecidas?
  - Quais as motivações para a realização do trabalho?
  - Introdução

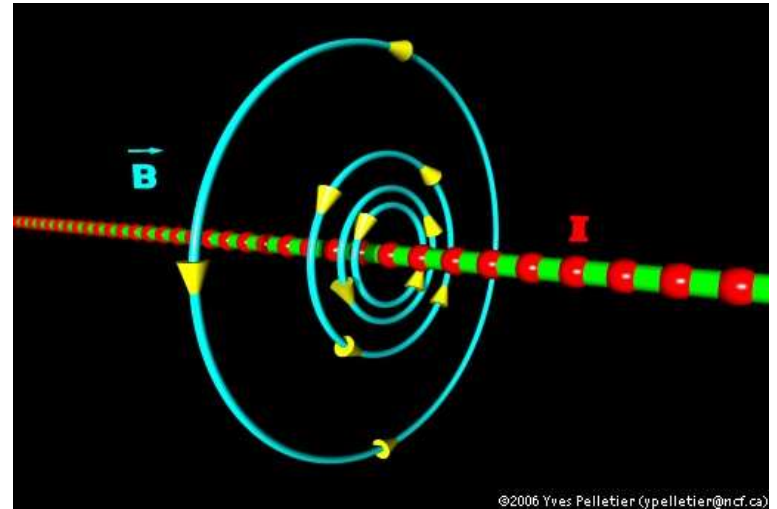
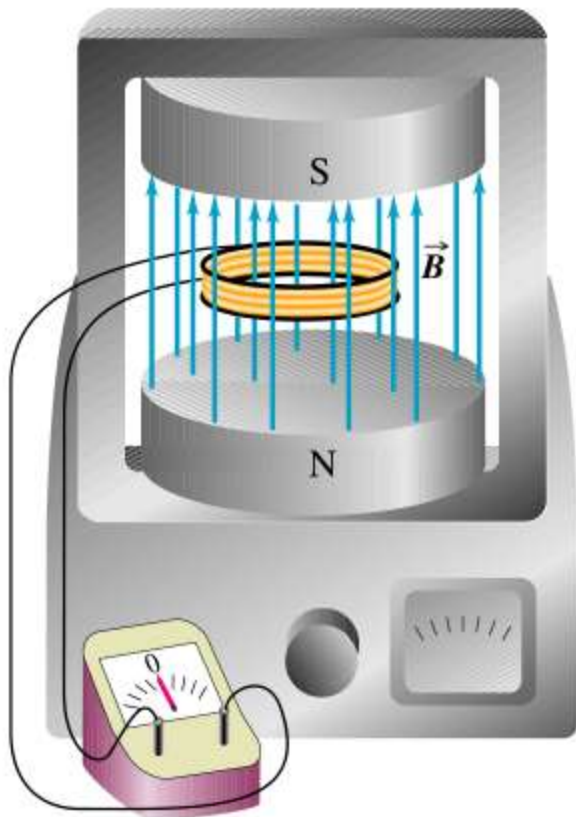
# Esta Semana...A lei de Faraday



**1791-1867**

# Lei de Faraday

$i(\text{const. no tempo}) \rightarrow B$



~~$B(\text{const. no tempo}) \xrightarrow{?} i$~~

# Lei de Faraday: exemplo



# Lei de Faraday

- Então o que precisa variar para que uma força eletromotriz seja induzida num circuito?

$$\mathcal{E} = - \left( \frac{d\Phi_B}{dt} \right)$$



# FEM induzida

A **lei de Faraday** da indução eletromagnética diz que uma força eletromotriz  $\mathcal{E}$  é induzida num circuito fechado, imerso num campo magnético  $\mathbf{B}$ , sempre que:

houver variação na intensidade das linhas de campo  $\mathbf{B}$  que atravessam o circuito.

houver variação entre a direção das linhas de campo  $\mathbf{B}$  que atravessam o circuito e o versor normal à área compreendida pelo circuito

houver variação na área compreendida pelo circuito, ou espira

caso o circuito seja composto de muitas espiras enroladas (bobina), houver variação no número total de espiras, que é também variação na área compreendida pelo circuito

# Fluxo magnético

É a “quantidade” de linhas de campo que passam por dentro da espira, i.e. é o produto de  $\vec{B}$  através da espira pela área da espira.

É definido como o produto escalar do campo pelo vetor área da espira.

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot \vec{n} da$$

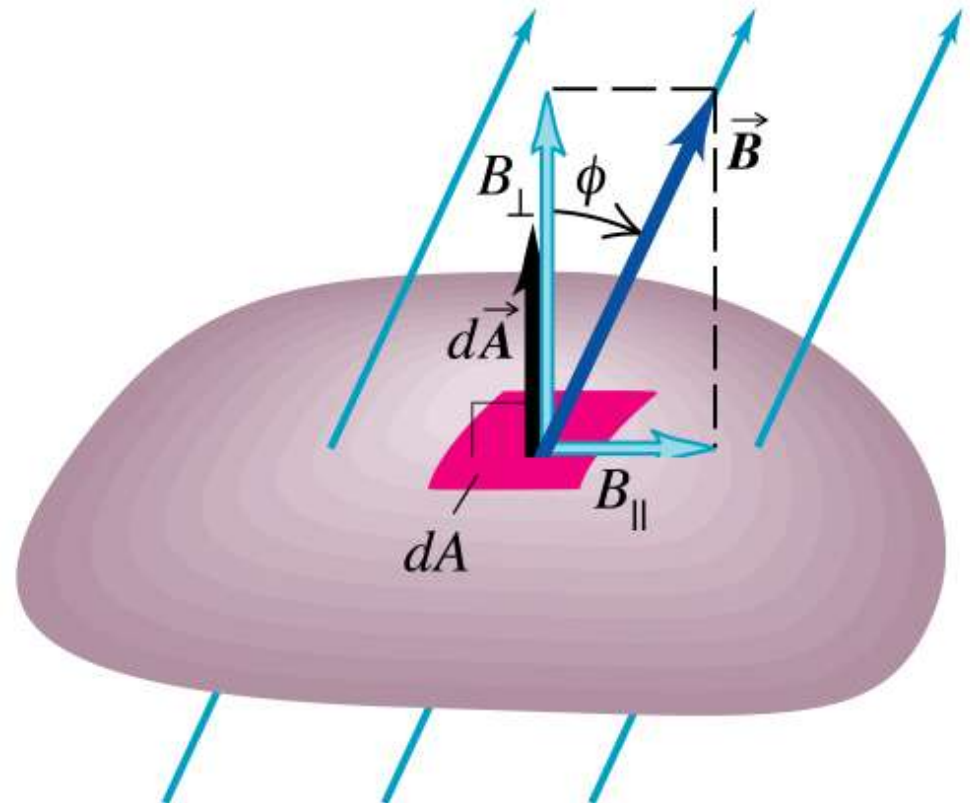
unidade de fluxo magnético é o **Weber**:  $1 \text{ weber} = 1 \text{ Wb} = 1 \text{ T m}^2$

# Cálculo do Fluxo

- O vetor área da espira tem módulo igual à área compreendida pela espira e direção e sentido da normal à área da espira.

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot \vec{n} da$$

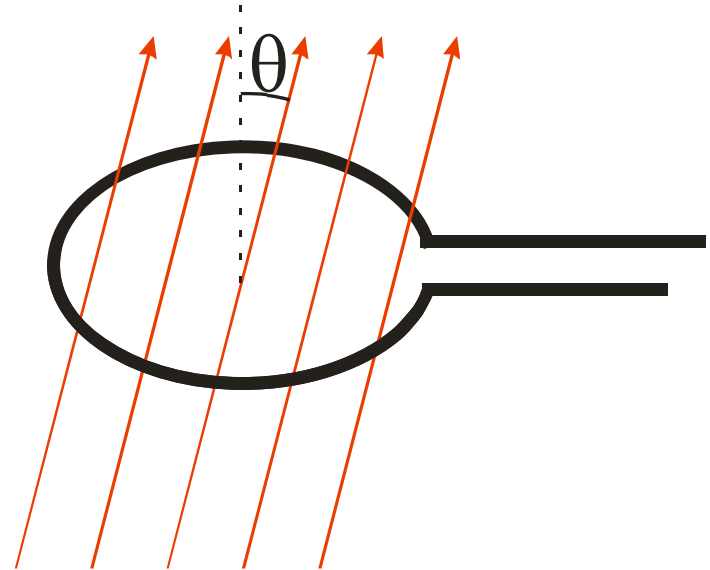
$$\vec{n} da = d\vec{A}$$





# 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  $A$ .

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

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

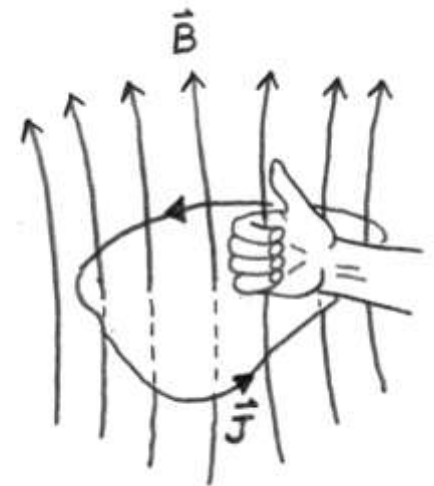
Indução devida a variação temporal do campo magnético (supondo apenas mudança de amplitude)

Indução devida a mudança da geometria ou posição da bobina

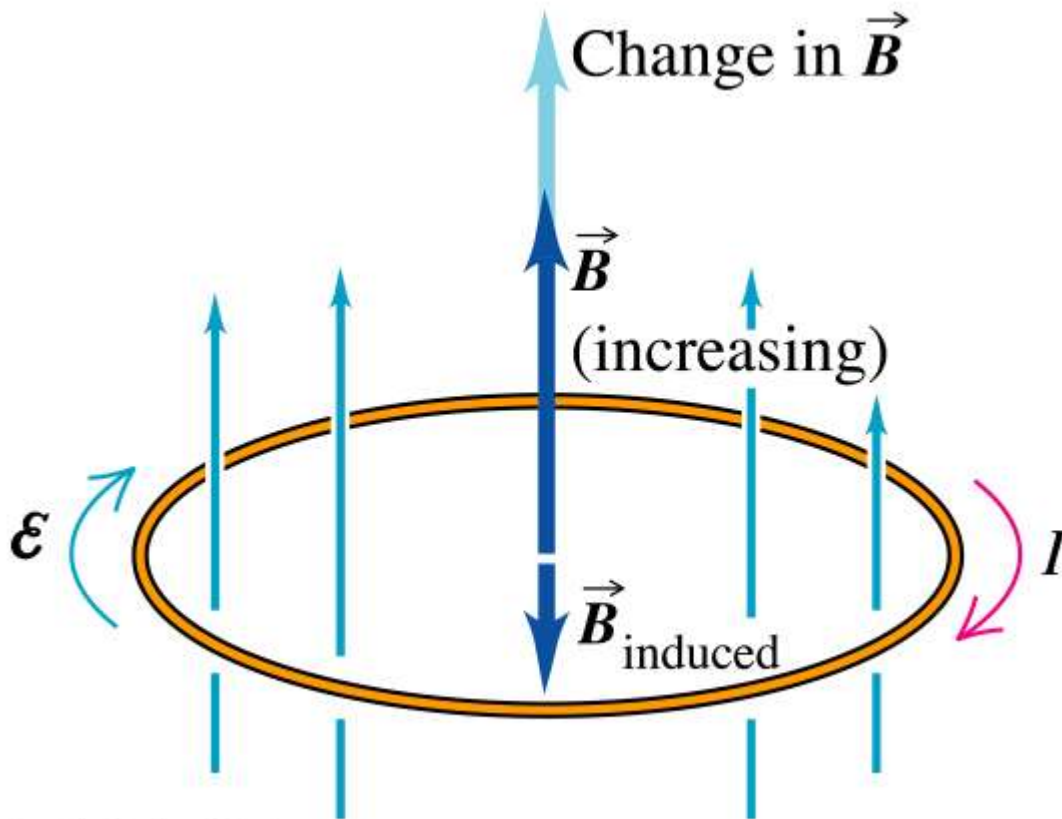
# Interpretação

- O sinal negativo na **Lei de Faraday** está relacionado à polaridade da força eletromotriz induzida em relação à variação do fluxo. Isso é estabelecido pela **lei de Lenz**:
- **A força eletromotriz induzida (f.e.i.) produz uma corrente que age sempre de maneira a se opor à variação que a originou.**
- **A lei de Lenz resulta da lei de conservação de energia.**

$$\mathcal{E} = - \left( \frac{d\Phi_B}{dt} \right)$$



# Interpretação



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

- agente externo move um ímã permanente para o interior de uma bobina, o fluxo de  $\mathbf{B}$  através da bobina, estará aumentando.

- o campo induzido vai se opor a essa variação, gerando um polo magnético idêntico ao que está se aproximando.

(a)

**• O trabalho exercido pelo agente externo proporciona a energia necessária para gerar e manter a corrente induzida na bobina.**

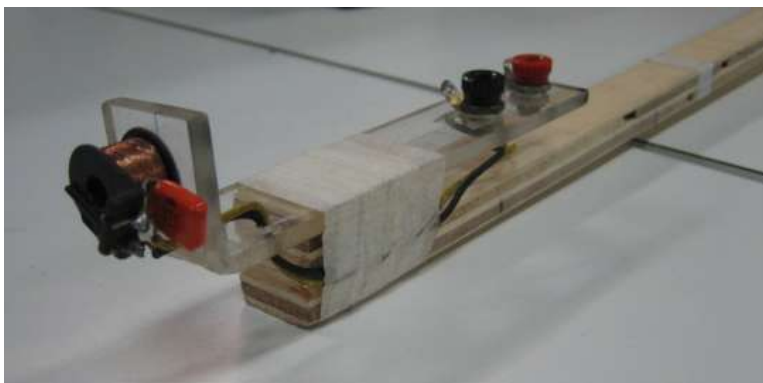
# Objetivos do experimento

- 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

**Vamos assumir que a lei de Faraday é válida.**

# Equipamentos básicos do laboratório

- Bobinas sonda



- Bobina de Helmholtz

- Solenóide de referência



# A Bobina Sonda

- Chamamos de bobina sonda uma pequena bobina que será usada como sensor de campo magnético.
  - Ela precisa ser pequena, para que o campo magnético que se quer medir possa ser considerado uniforme dentro dela
  - Vamos medir na verdade a fem induzida, mas conhecendo a teoria, calculamos o campo magnético



$$\varepsilon = -\left(\frac{d\Phi_B}{dt}\right)$$

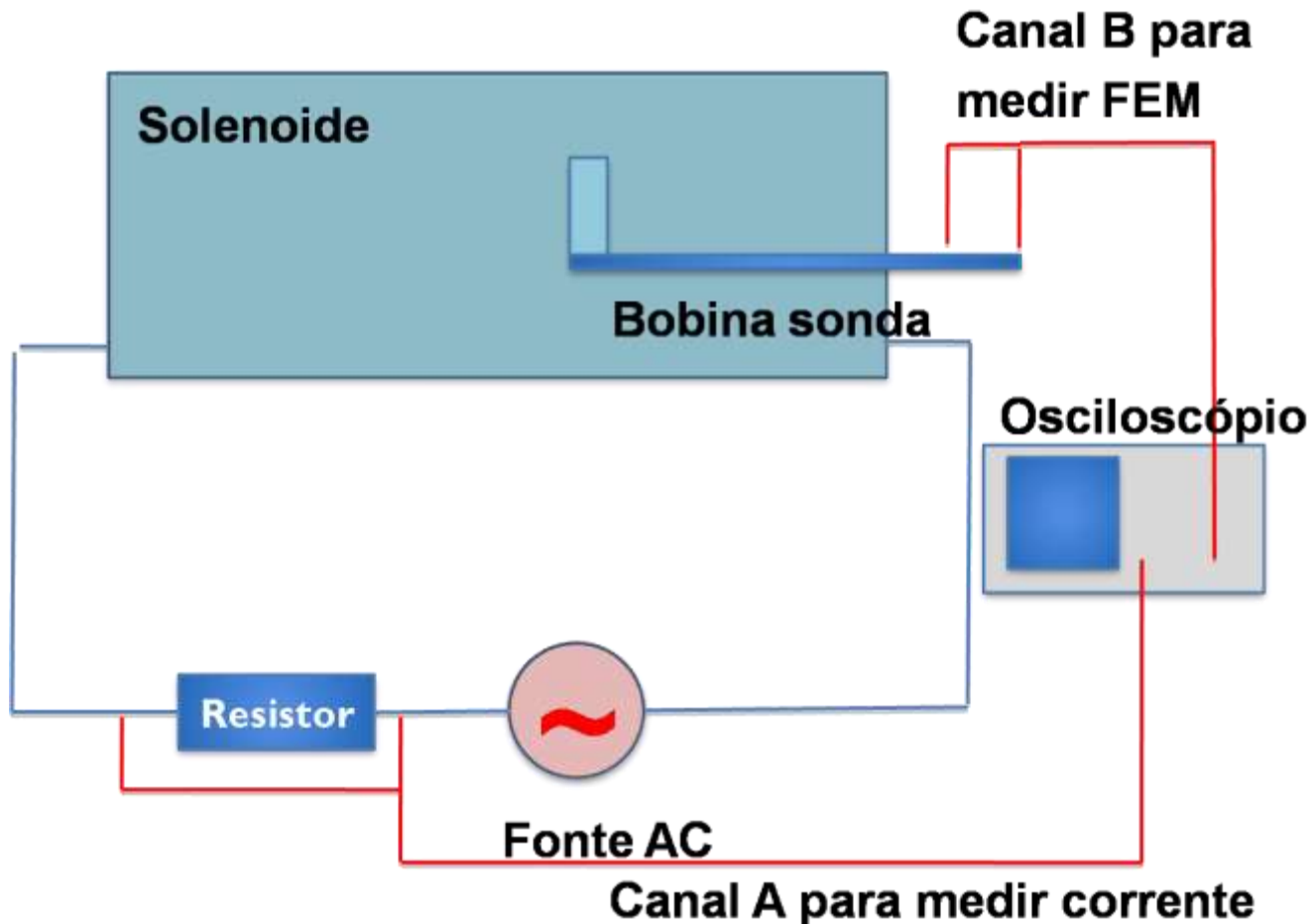
$$B \approx cte \Rightarrow \Phi_B = A_{eff} B$$

**Cte de  
calibração**

$$\varepsilon = -A_{eff} \left(\frac{dB}{dt}\right)$$

# Calibração da Bobina Sonda

Para calibrar a bobina sonda, precisamos de um campo magnético variável conhecido. Vamos usar o solenóide grande.





# Calibração da Bobina Sonda

Para calibrar a bobina sonda, precisamos de um campo magnético variável conhecido. Vamos usar o solenóide grande.

- Se o solenóide for alimentado com uma tensão alternada conhecida, podemos calcular a variação do fluxo através da bobina sonda e, portanto, a **f.e.i.** induzida
- O campo de um solenóide infinito é dado por:

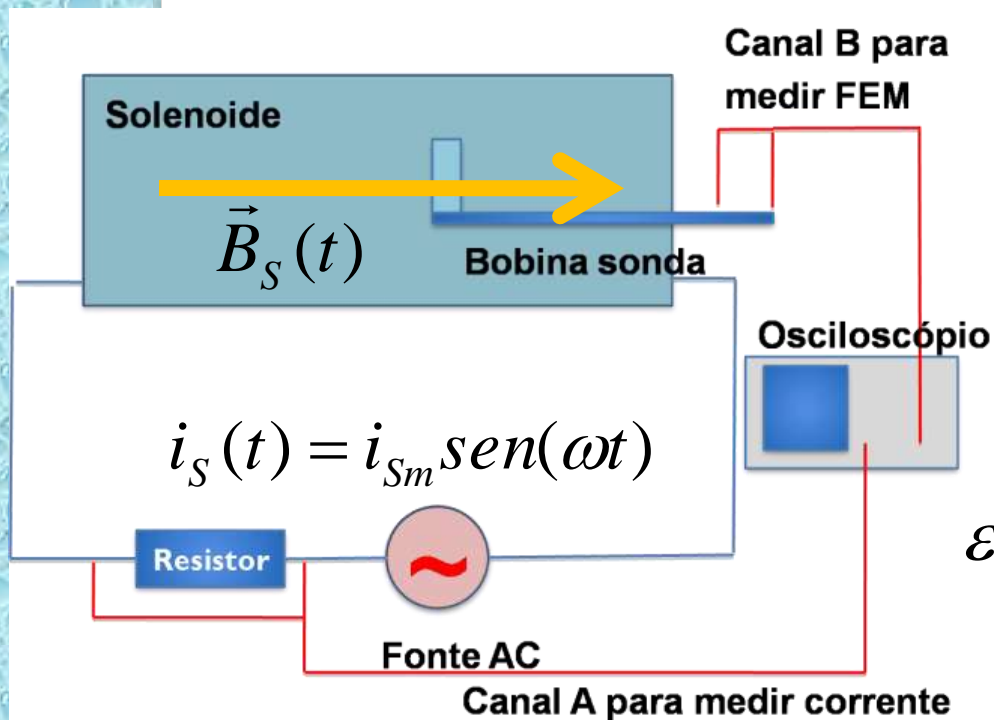
$$B_S(t) = \mu_0 n_S i_S(t)$$

- $\mu_0$  é a permeabilidade magnética,  $n_S$  é o número de espiras por unidade de comprimento,  $i_S$  é a corrente.

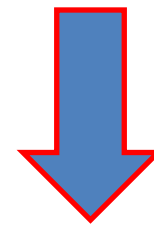
Assim:  $\mathcal{E}_{ind} = -A_b^{eff} \mu_0 n_S \frac{di}{dt}$

# Calibração da Bobina Sonda

Como conhecemos a corrente que está sendo aplicada...  
... Podemos calcular a derivada do fluxo magnético para encontrar a fem induzida!



$$B_S(t) = \mu_0 n_S i_{Sm} \text{sen}(\omega t) \\ = B_{Sm} \text{sen}(\omega t)$$



$$\mathcal{E}_{ind}(t) = -A_b^{eff} \mu_0 n_S i_{Sm} \omega \text{cos}(\omega t) \\ = -\mathcal{E}_{ind}^{pico} \text{cos}(\omega t)$$

# A FEM e o Campo Magnético

- Podemos medir a fem induzida (voltímetro)

$$\mathcal{E}_{ind}(t) = -A_b^{eff} B_{Sm} \omega \cos(\omega t)$$

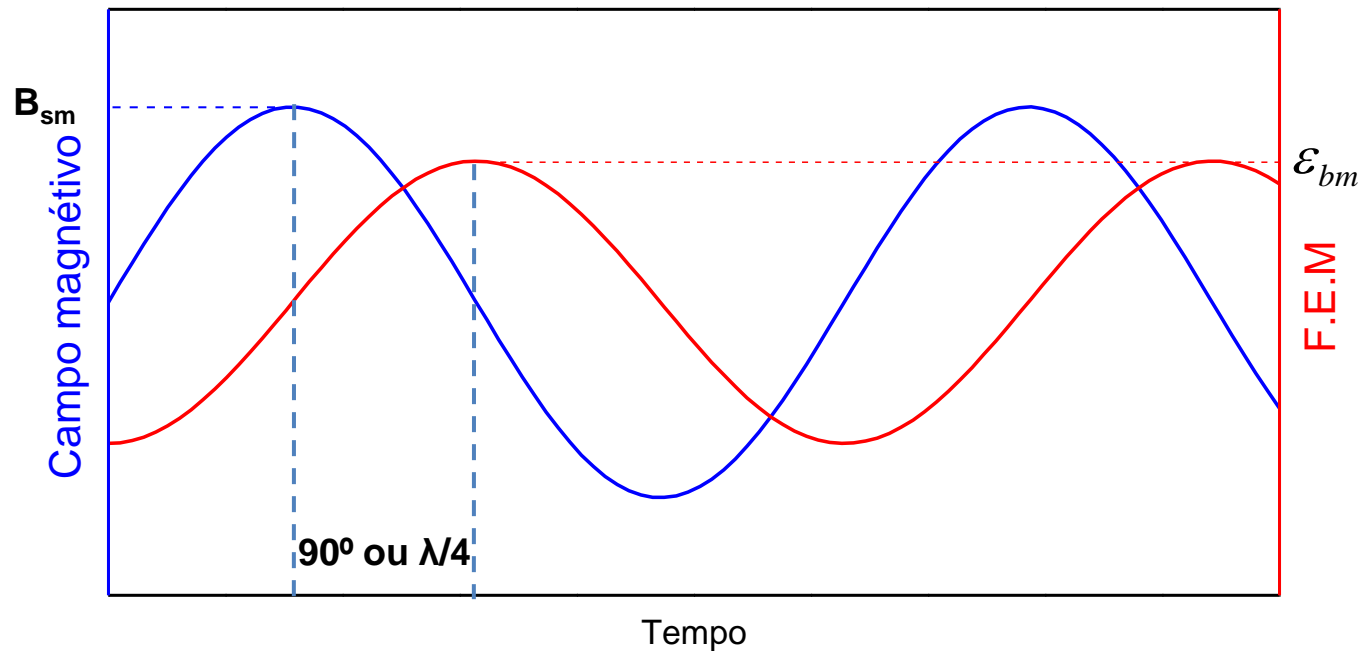
- E a corrente aplicada no solenóide:   $90^\circ$

$$B_S(t) = \mu_0 n_S i_{Sm} \text{sen}(\omega t)$$

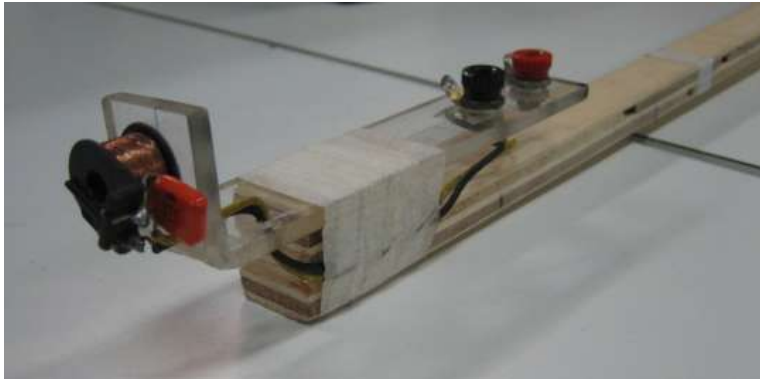
A observação simultânea (“triggerando”  $\mathcal{E}_b$  com  $R_a$ ) permite não somente obter o valor de pico, ou amplitude de  $\mathcal{E}_b$  e  $V_{R_a}$ , como observar a diferença de fase entre elas.

# A FEM e o Campo Magnético

- Campo  $B_S(t) = \mu_0 n_S i_{sm} \text{sen}(\omega t) = B_{sm} \text{sen}(\omega t)$
- F.E.M.  $\varepsilon_b(t) = -A_{eff} \omega B_{sm} \cos(\omega t) = \varepsilon_{bm} \text{sen}(\omega t - \pi / 2)$



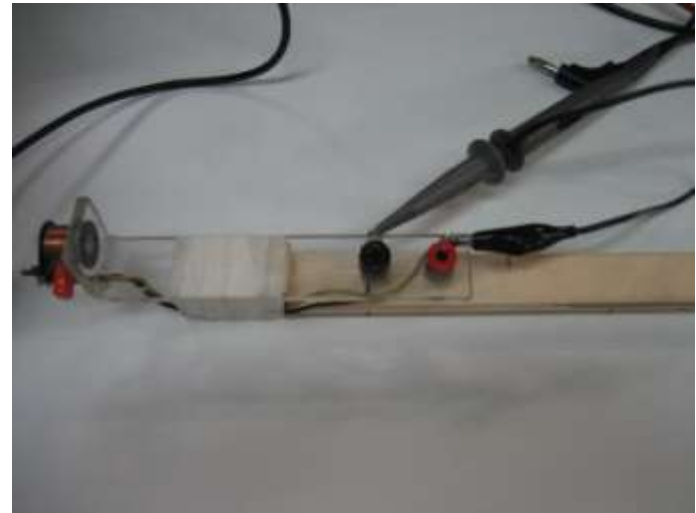
# Tarefas da semana (1)



**Anotar o número da bobina para a próxima semana**

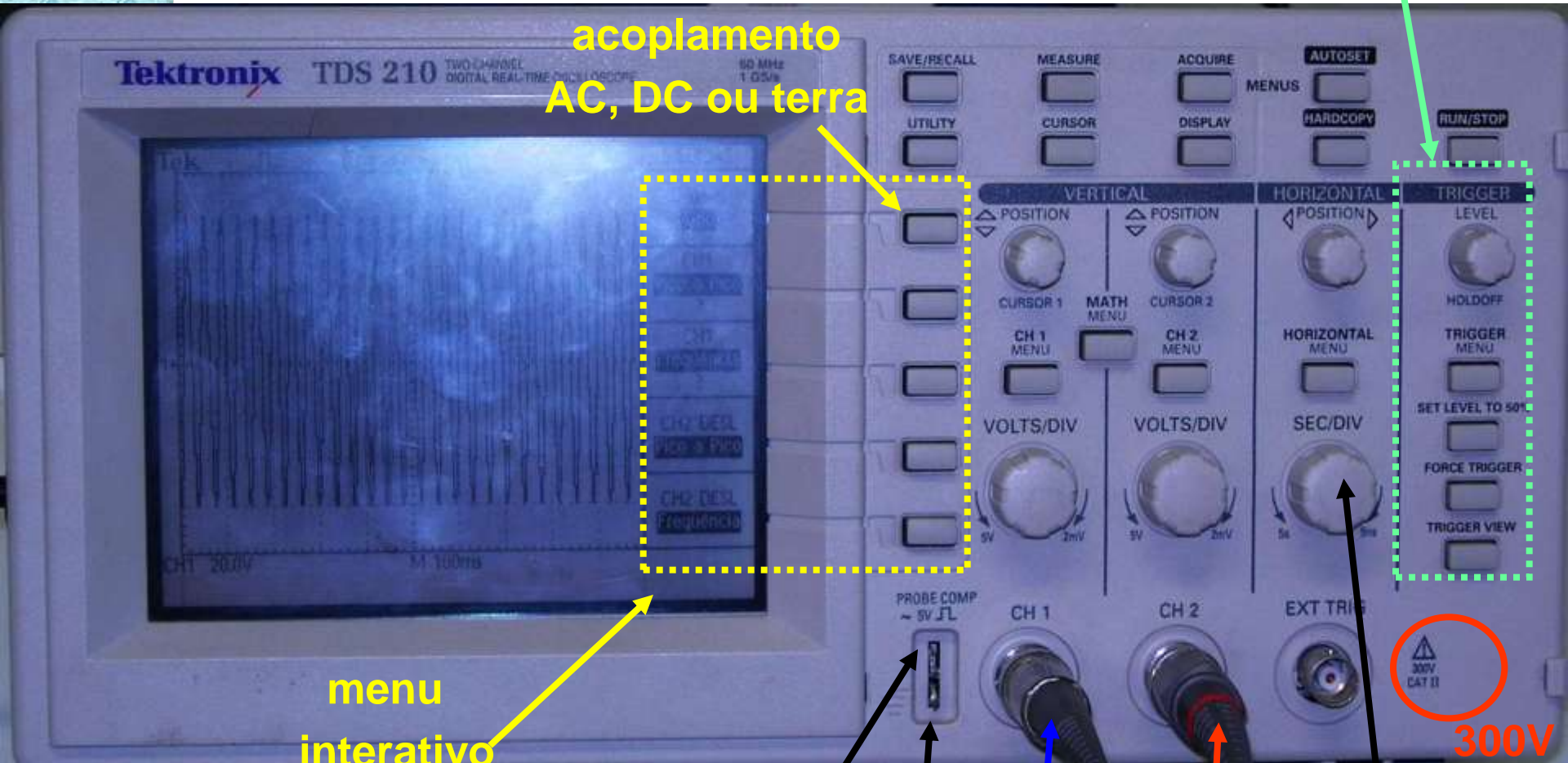
- Usando a bobina de área desconhecida
  - Fazer gráfico da F.E.M. induzida em função da corrente no solenóide.
  - Ajustar os dados e determinar a **área efetiva** da bobina
  - Medir a diferença de fase entre o campo magnético (corrente) e a FEM induzida na bobina. Está de acordo com o esperado?
- Perguntas “teóricas”
  - Deve existir alguma preocupação do alinhamento do solenóide com o campo magnético local? Porque?
  - E com a posição da sonda dentro do solenóide??
  - Será que o solenóide do laboratório pode ser considerado infinito? Qual correção deve ser feita se não puder?

# Arranjo experimental



# Osciloscópio

gatilho (trigger)



acoplamento  
AC, DC ou terra

menu  
interativo

A ponta de prova tem  
atenuador  
que pode ser alterado  
(muda também a  
impedância)

referência  
5V

terra

canal 1

canal 2

varredura  
(horizontal)

300V

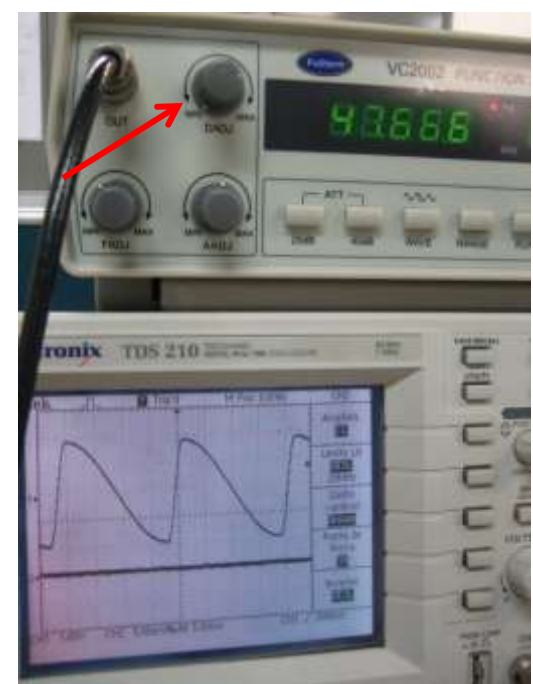
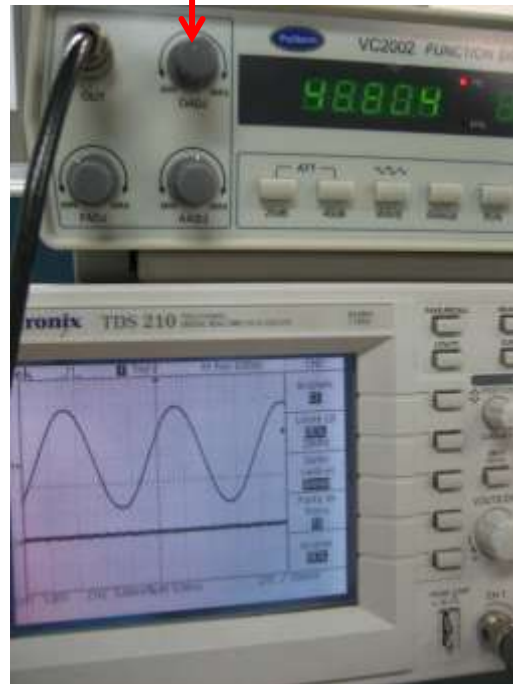
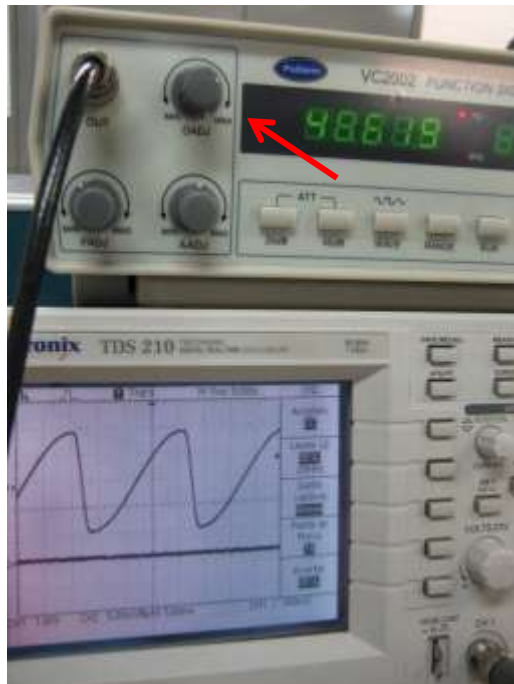
# Osciloscópio





# Ajuste do gerador de áudio

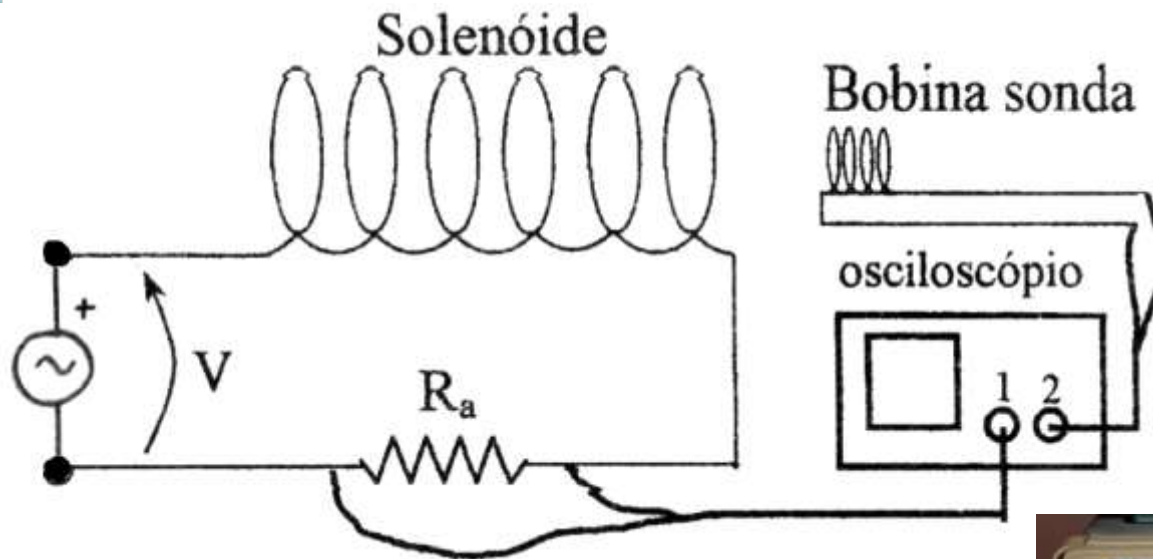
- Ajuste de frequência e amplitude
- Cuidado com duty cycle



# Observações

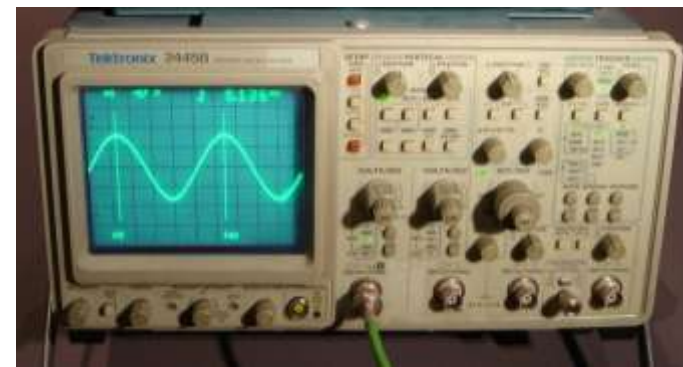
Usar um resistor de proteção  $R_a$  da ordem de **1 ohm** e uma frequência da ordem de **1 a 2 kHz**.

A amplitude da corrente no solenóide não deve ultrapassar **1,5A**.

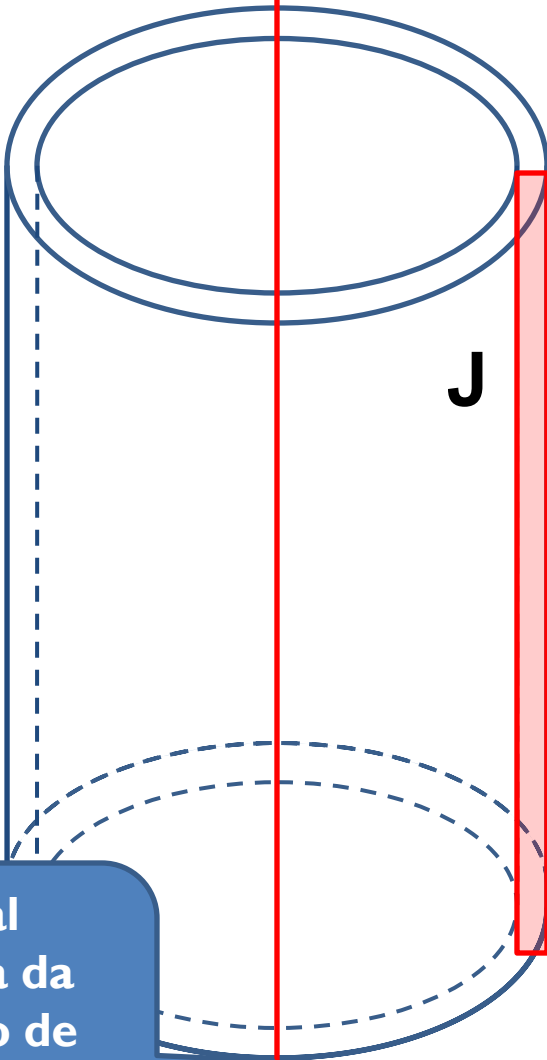


$$\varepsilon_b = -A_{bef} \left( \frac{dB_s}{dt} \right)$$

$$i_{Sm} = \frac{V_{Ram}}{R_a}$$



# Simulação



Lateral esquerda da tela (eixo de simetria no FEMM)

A intersecção do solenóide com o plano  $Z \times \theta$  é um retângulo

Solenóide

AR  
 $\mu = 1$

$J$  é a densidade de corrente é

$$J = \frac{Ni}{A}$$

Em vermelho é a geometria a ser desenhada no FEMM.

# Para Esta Semana (2)

- Simular o solenóide usando o FEMM
  - Fazer um gráfico da intensidade do campo magnético ao longo do eixo de simetria
- Usando a bobina calibrada
  - Medir o campo magnético no solenóide e comparar os resultados (mesmo gráfico) com os obtidos através da simulação