



Física Experimental III

Notas de aula: www.fap.if.usp.br/~hbarbosa

LabFlex: www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex

Experiência 3, Aula I

Lei de Faraday

Prof. Henrique Barbosa

hbarbosa@if.usp.br

Ramal: 6647

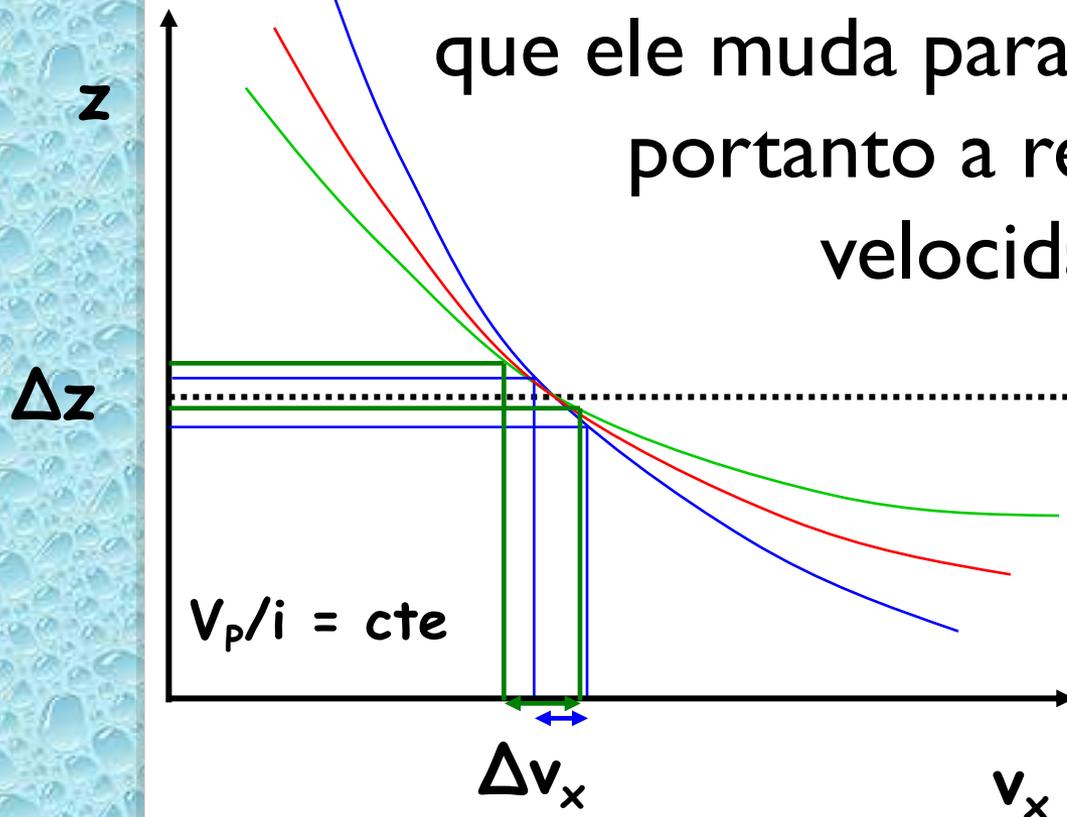
Ed. Basílio Jafet, sala 100

TAREFAS SEMANA PASSADA

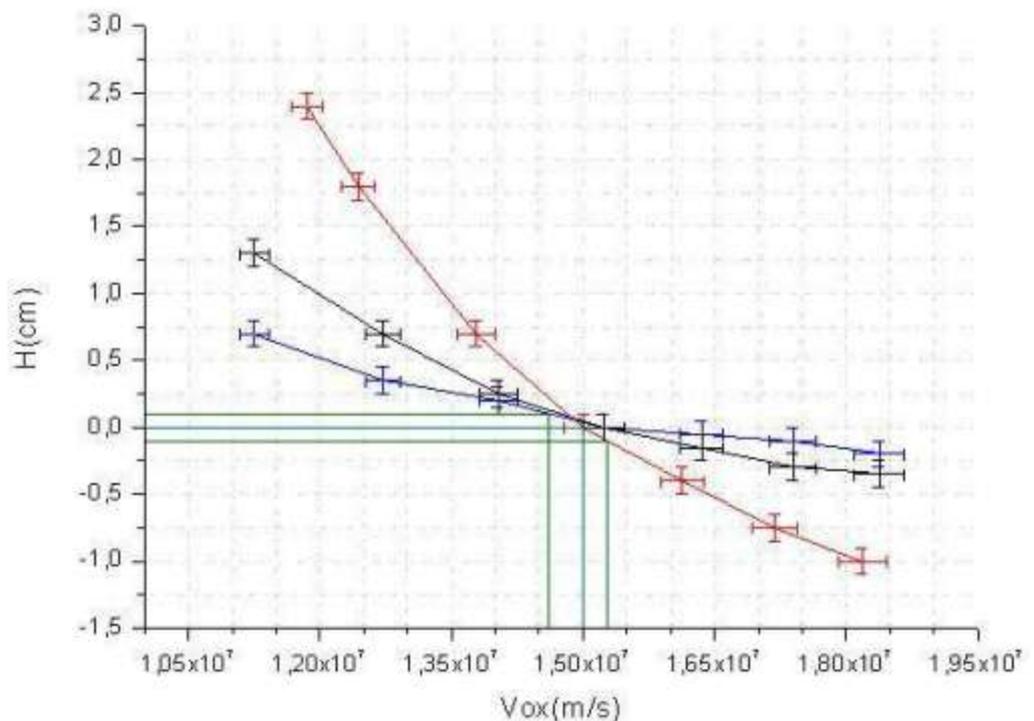
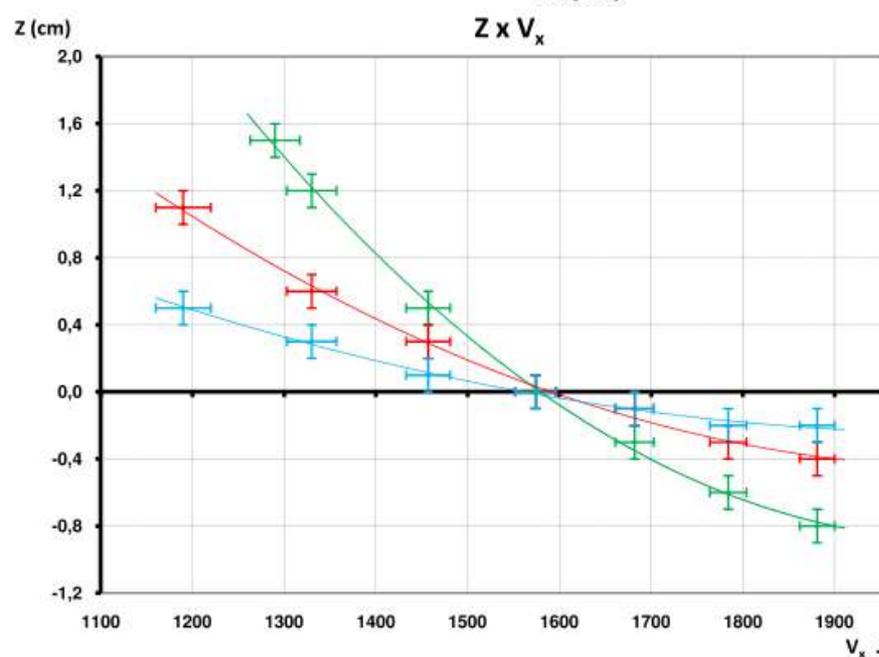
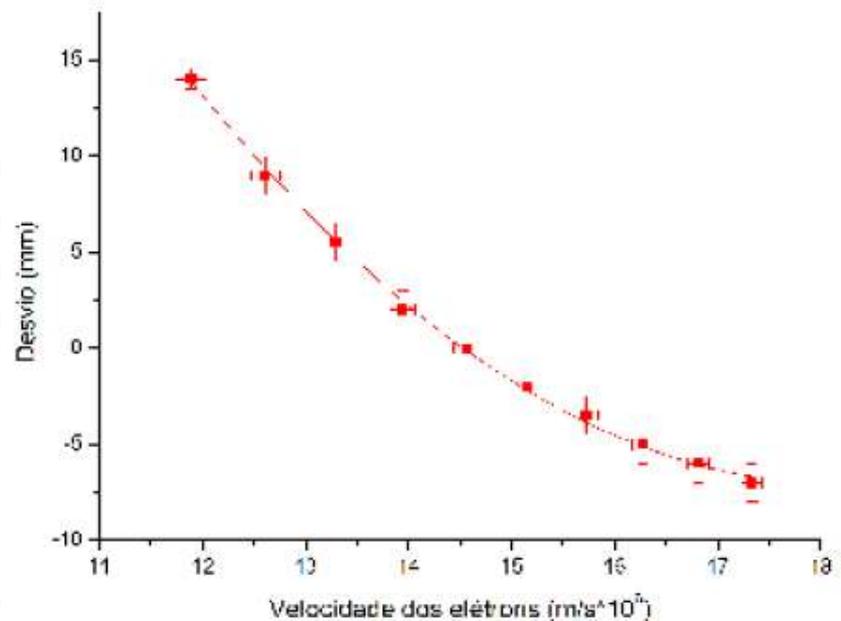
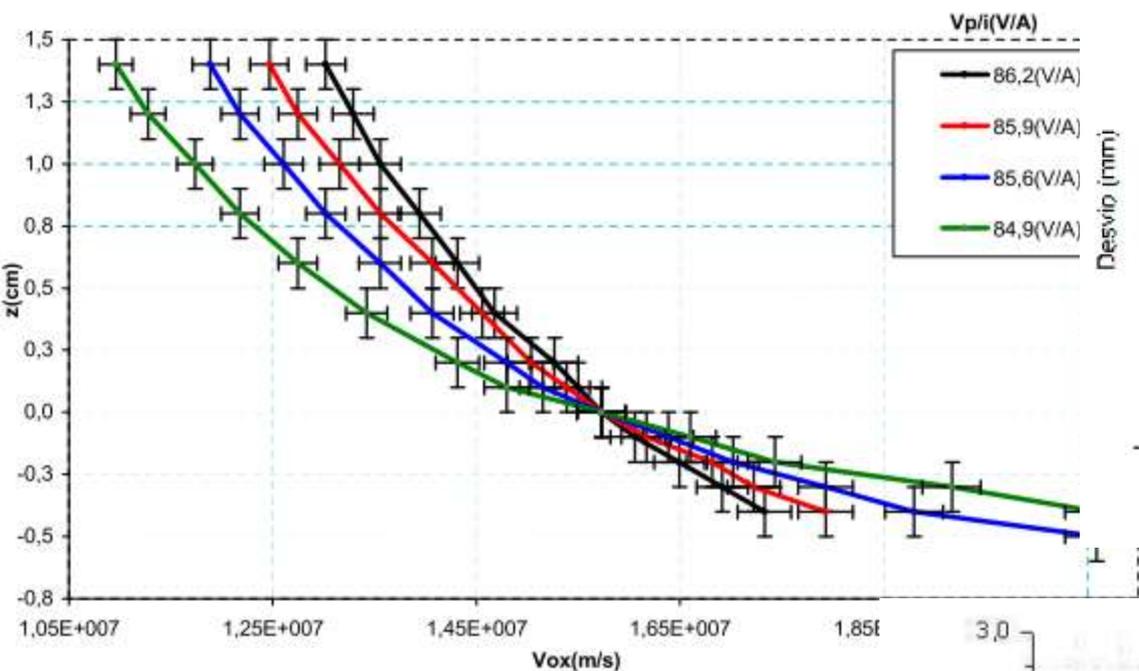


Resolução do seletor

- ▶ Vamos ter um erro no eixo z , Δz que é na verdade o tamanho do ponto na tela. Calculando o erro Δv_x a partir de Δz , 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 $h = A' \frac{V_p}{V_{ac}}$

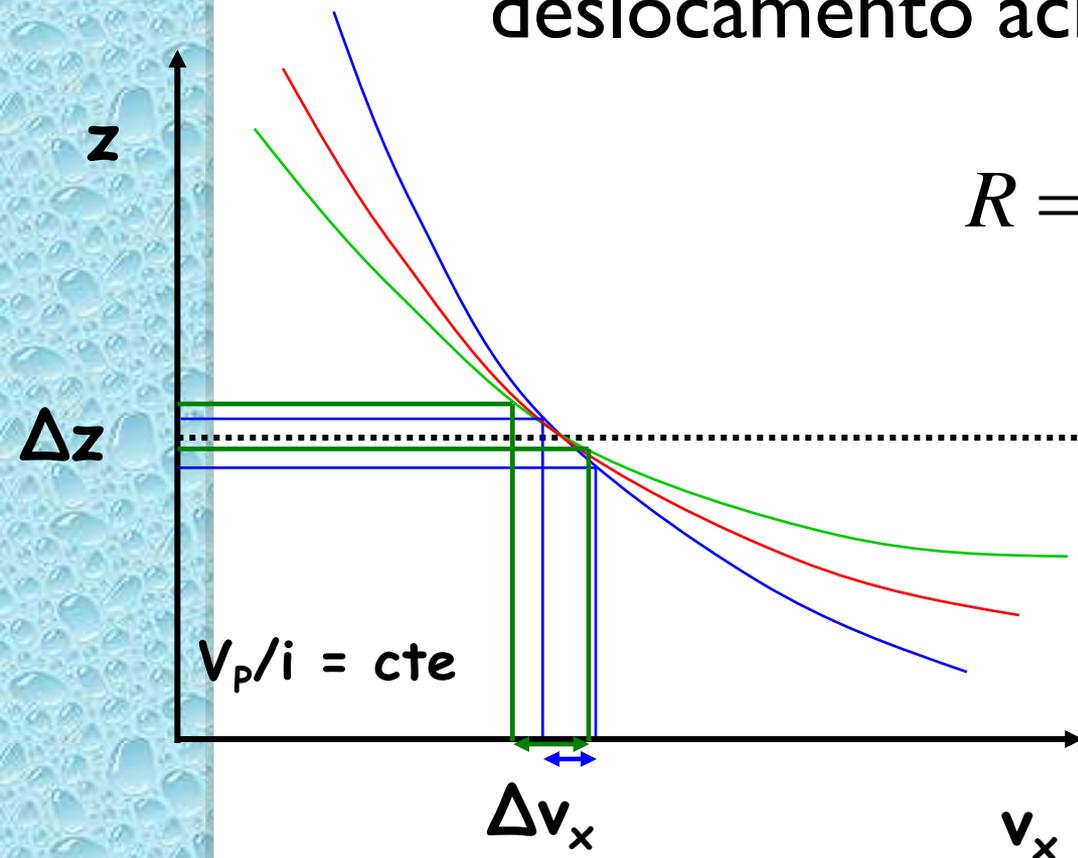
Campo magnético $H = C \frac{i}{\sqrt{V_{ac}}}$

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 ?

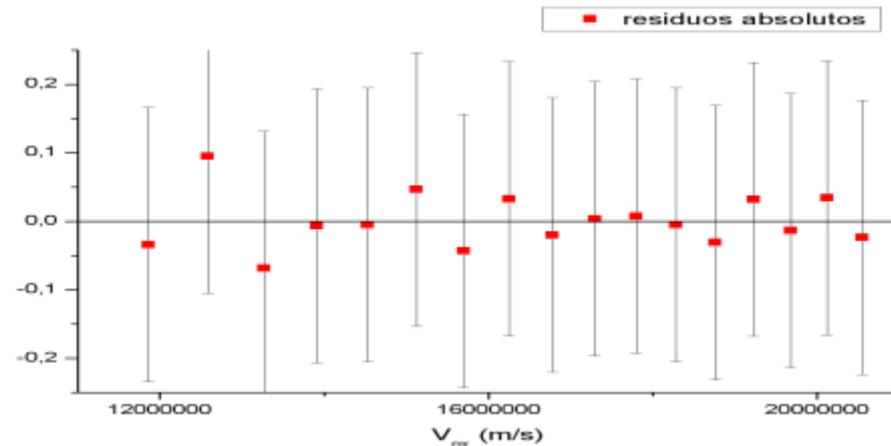
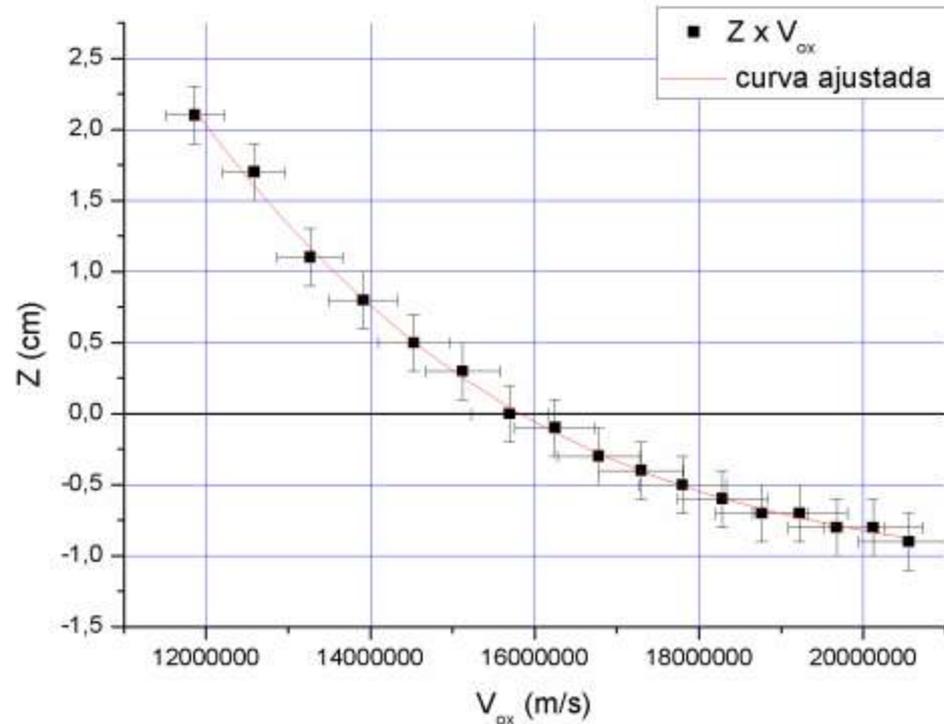
- A partir da função ajustada, calculava-se o valor da velocidade para um pequeno deslocamento acima e abaixo.



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

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

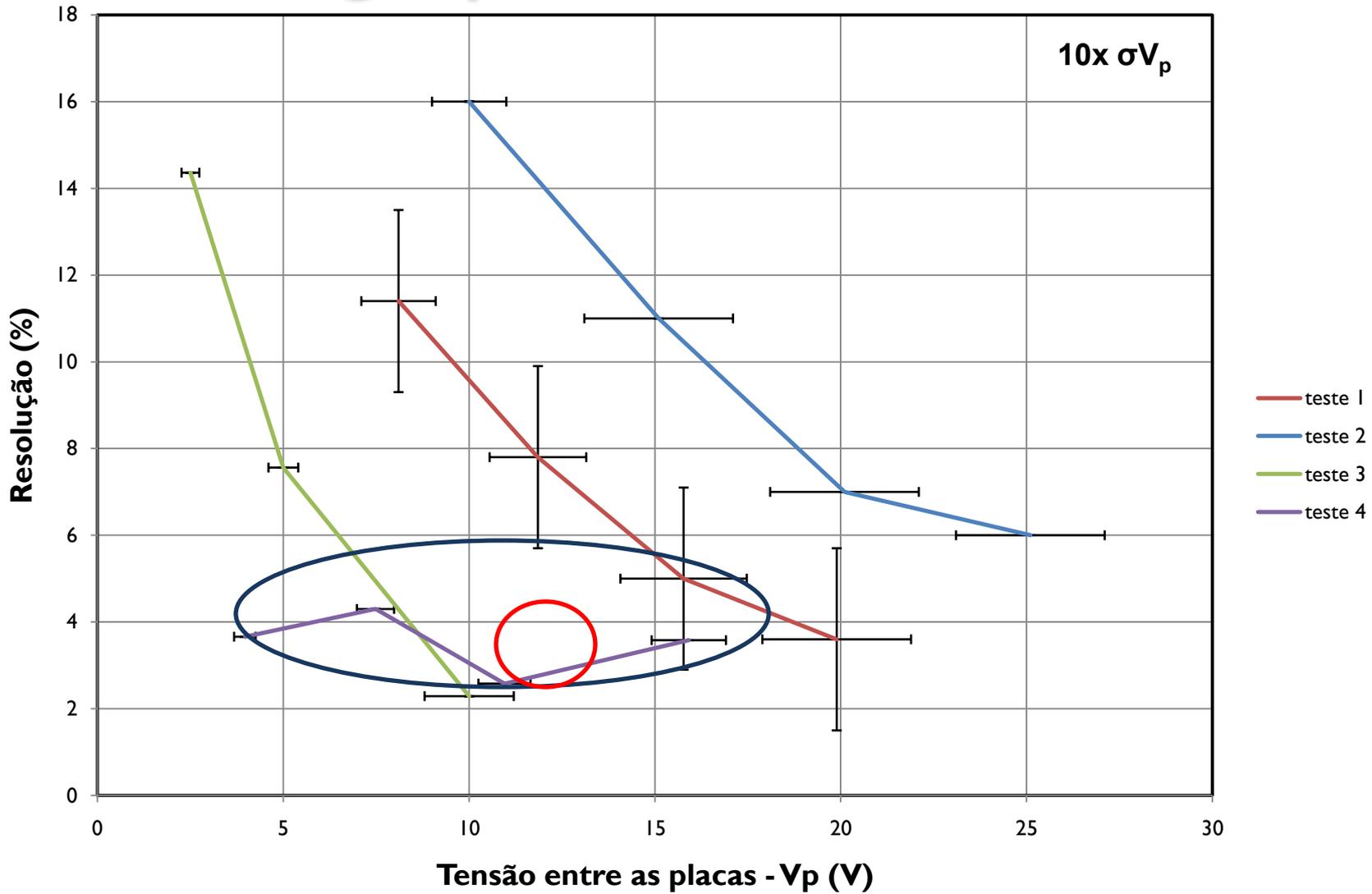
Resolução



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

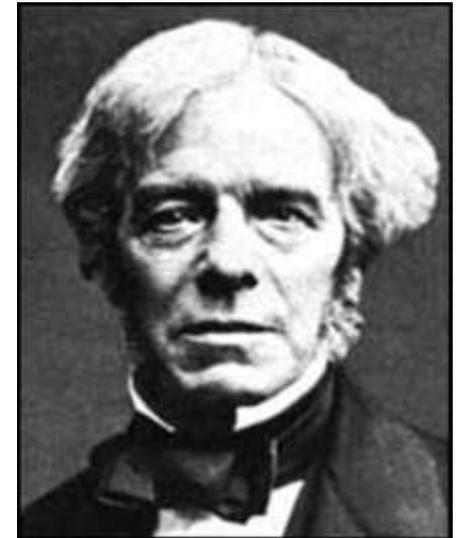
Vários grupos



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

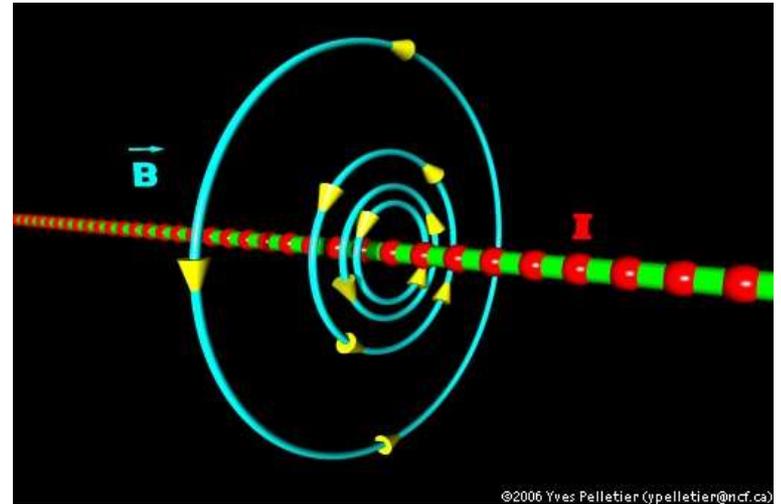
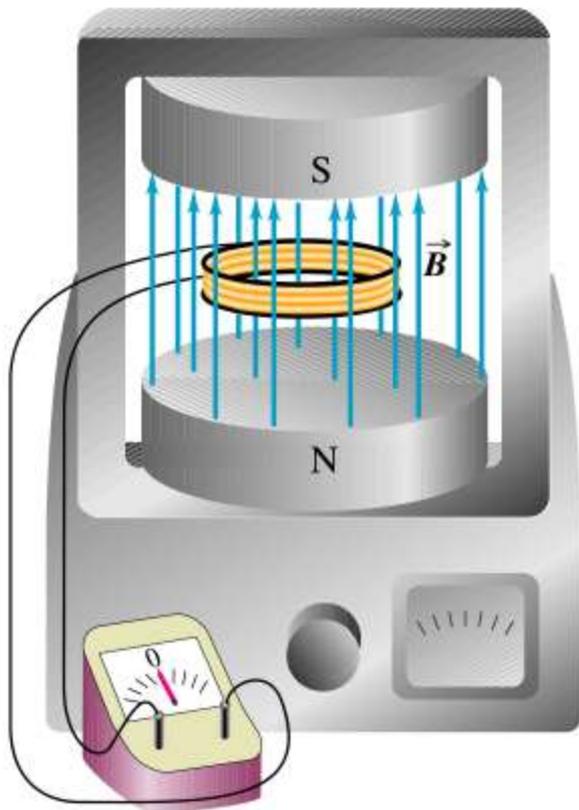
Esta Semana...A lei de Faraday



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.

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

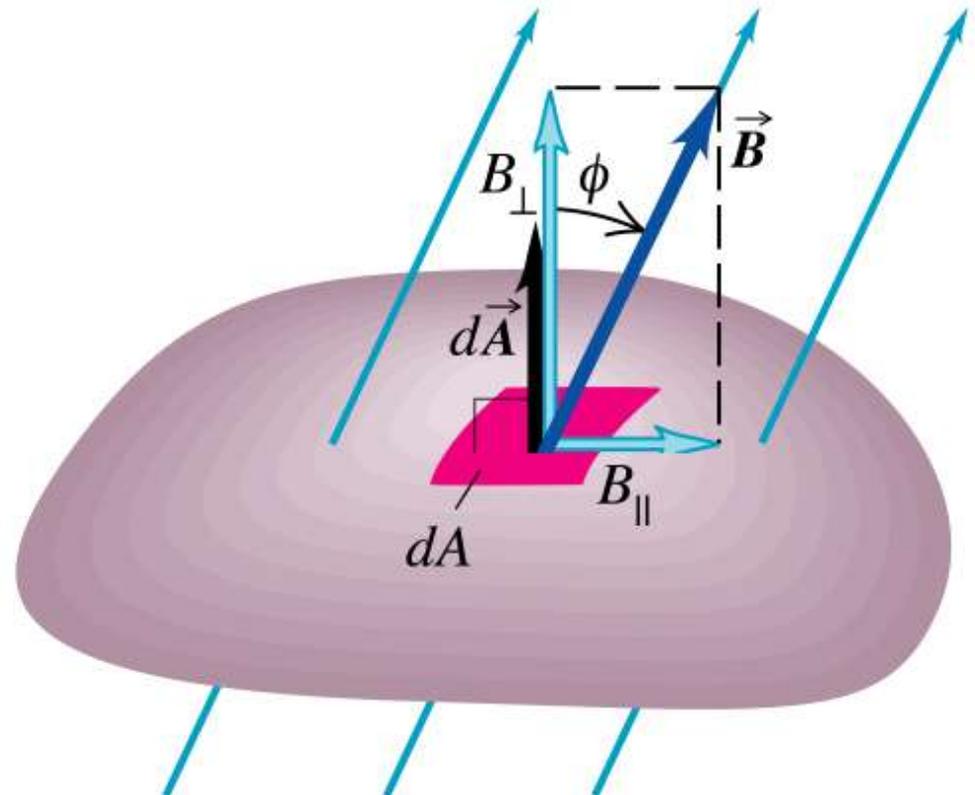
unidade de fluxo magnético é o **Weber**: $1 \text{ weber} = 1 \text{ Wb} = 1 \text{ T m}^2$

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.

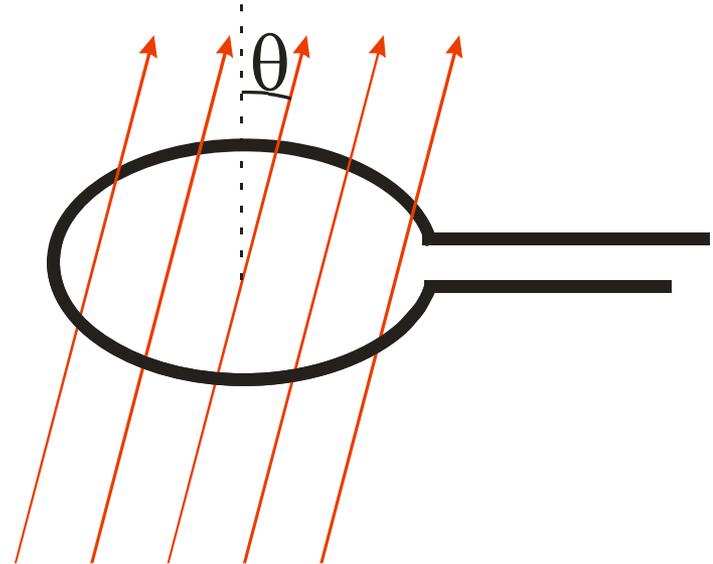
$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot \vec{n} da$$

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



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 = θ



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

Lei de Faraday em uma espira ideal

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

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

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

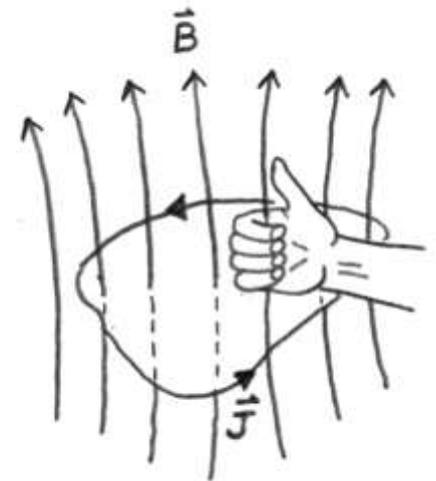
Indução devida a variação temporal do campo magnético (supondo apenas mudança de amplitude)

Indução devida a mudança da geometria ou posição da bobina

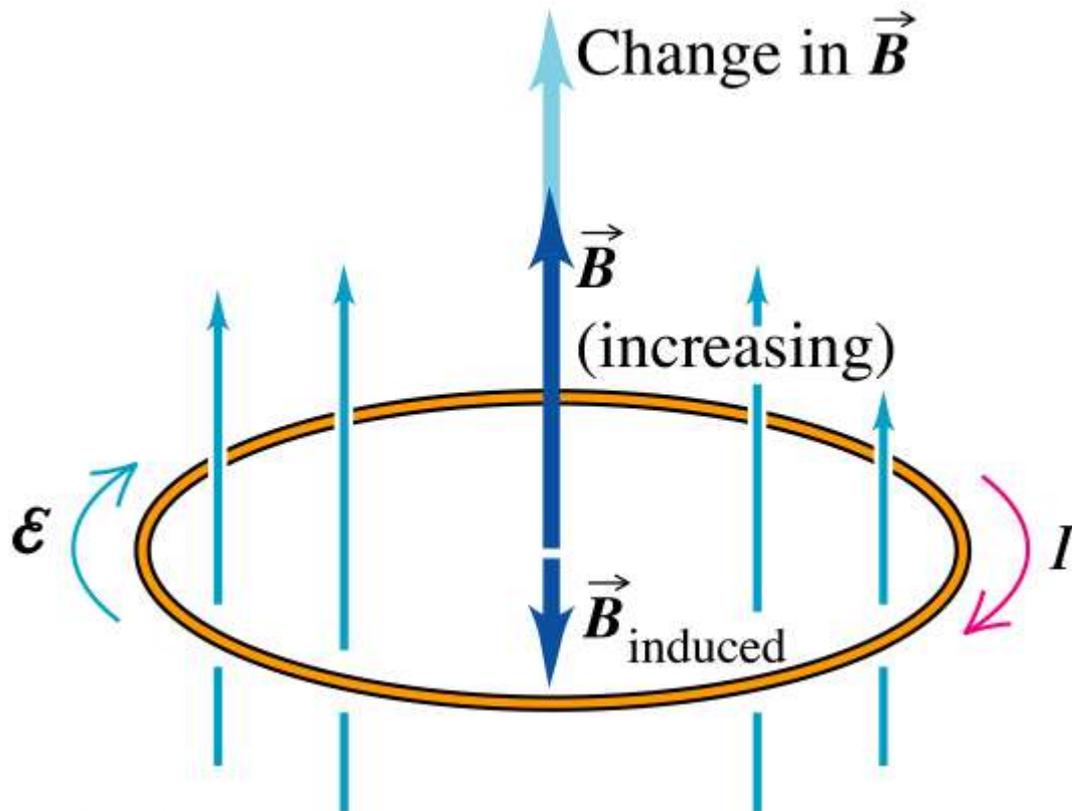
Interpretação

- 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.

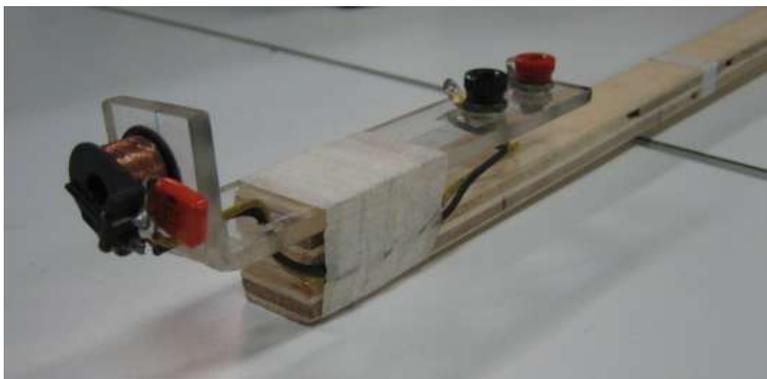
Objetivos do experimento

- 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.

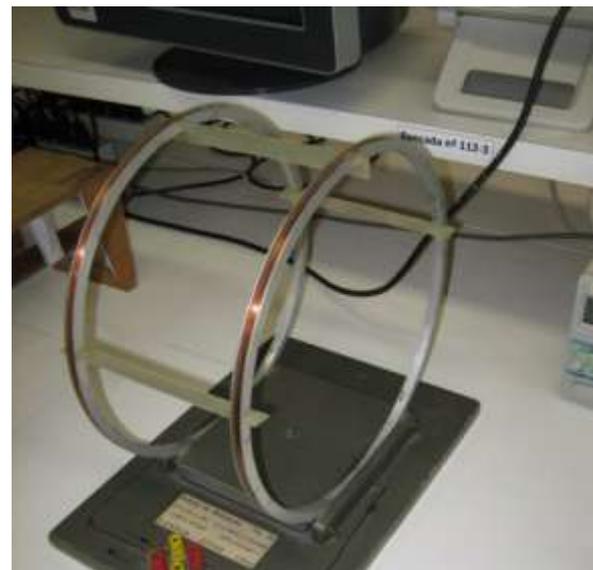
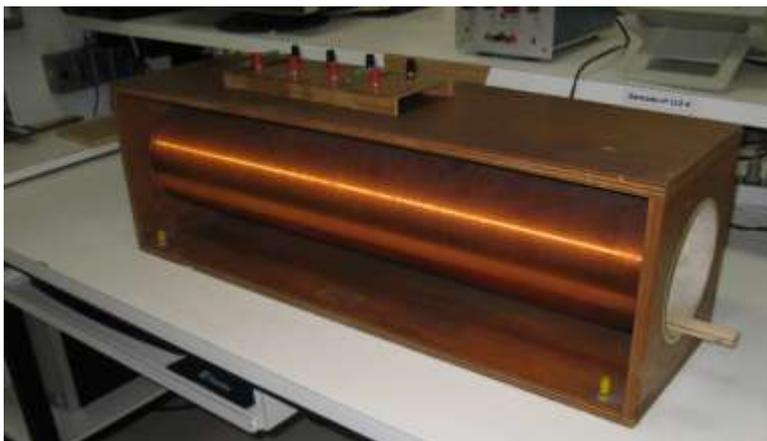
Equipamentos básicos do laboratório

- 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



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

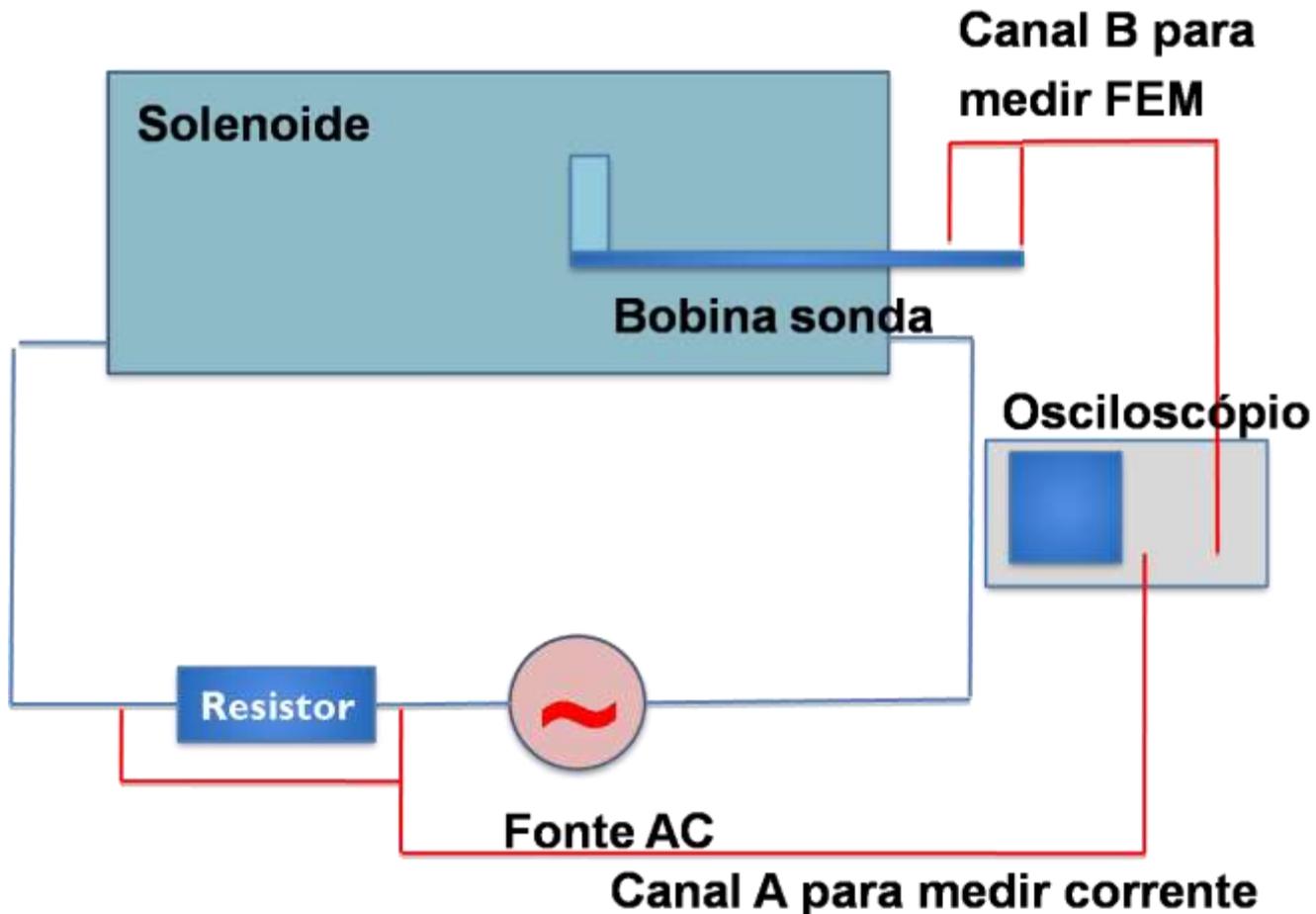
$$B \approx cte \Rightarrow \Phi_B = A_{eff} B$$

**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:

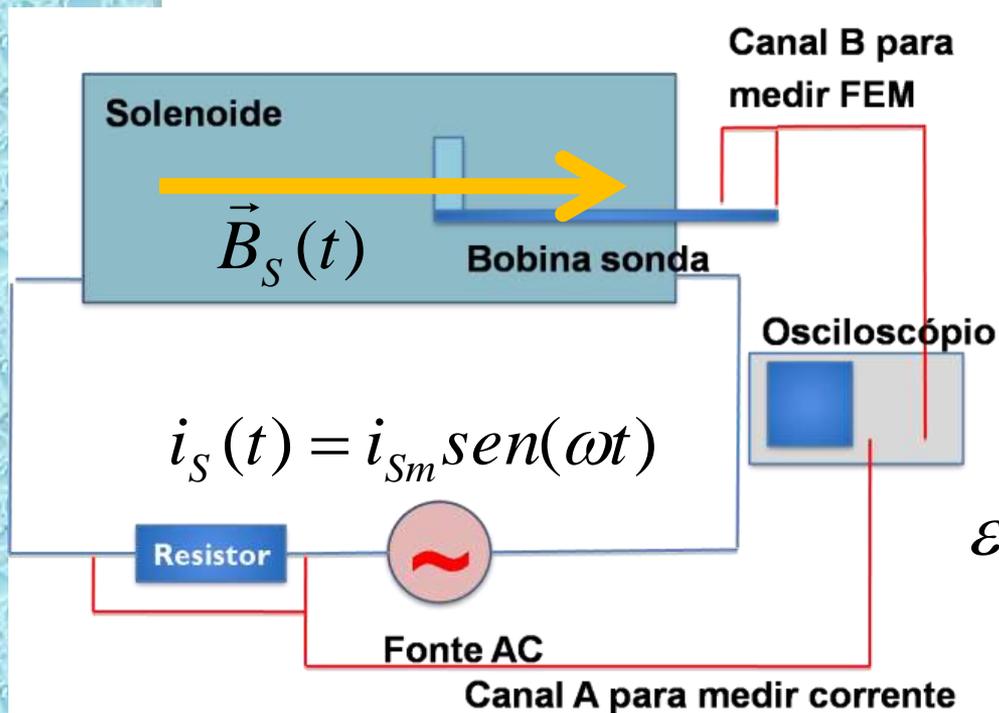
$$B_S(t) = \mu_0 n_S i_S(t)$$

- μ_0 é a permeabilidade magnética, n_S é o número de espiras por unidade de comprimento, i_S é a corrente.

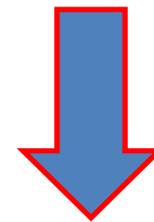
Assim: $\mathcal{E}_{ind} = -A_b^{eff} \mu_0 n_S \frac{di}{dt}$

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)

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

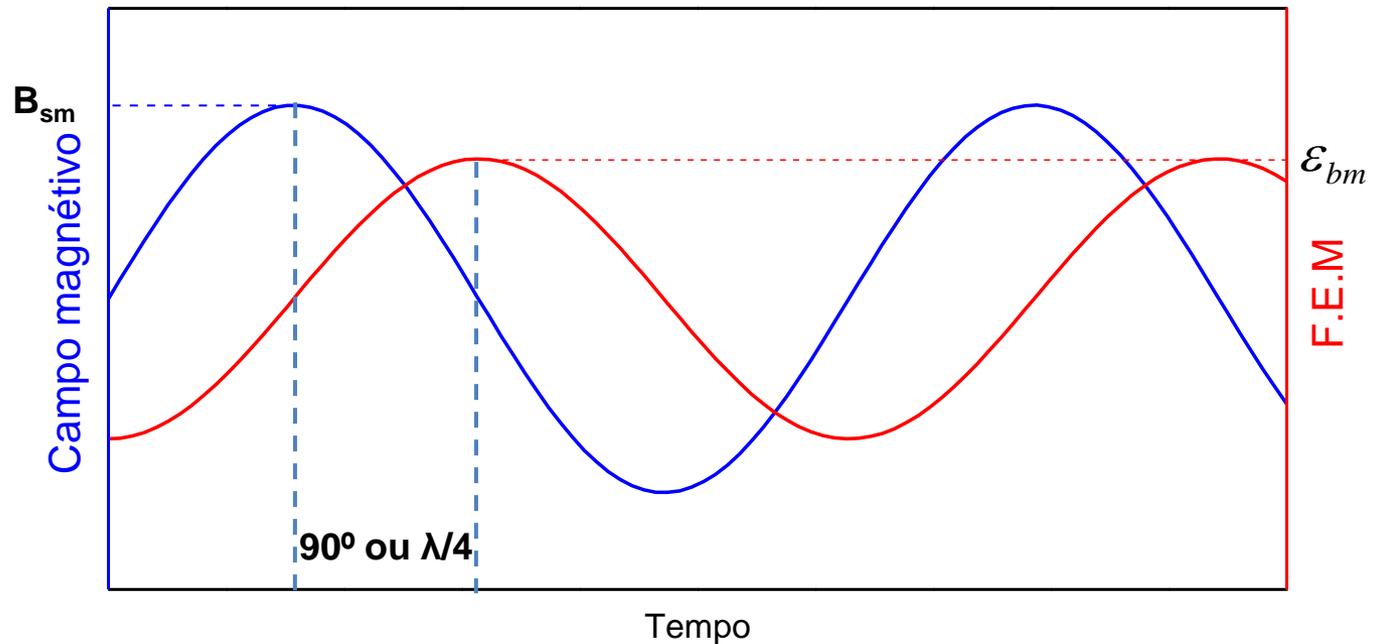
- E a corrente aplicada no solenóide: 90°

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

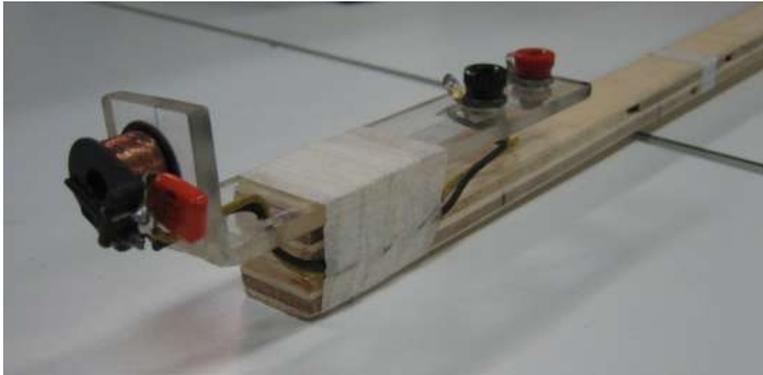
A observação simultânea (“triggerando” \mathcal{E}_b com R_a) permite não somente obter o valor de pico, ou amplitude de \mathcal{E}_b e V_{R_a} , como observar a diferença de fase entre elas.

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. $\varepsilon_b(t) = -A_{eff} \omega B_{sm} \cos(\omega t) = \varepsilon_{bm} \text{sen}(\omega t - \pi / 2)$



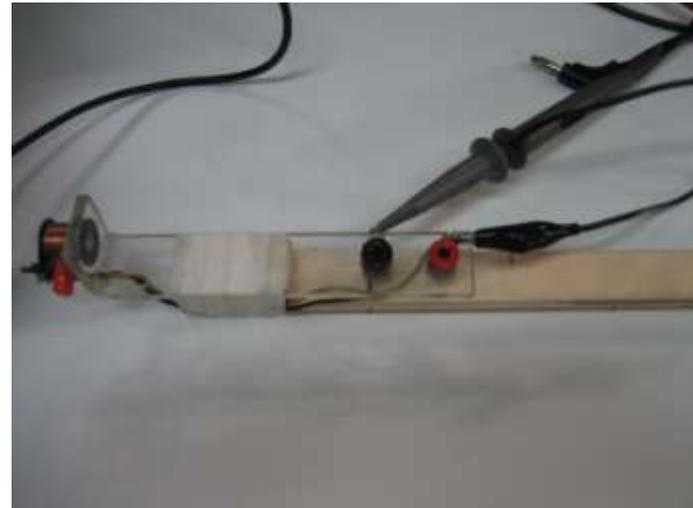
Tarefas da semana (1)



Anotar o número da bobina para a próxima semana

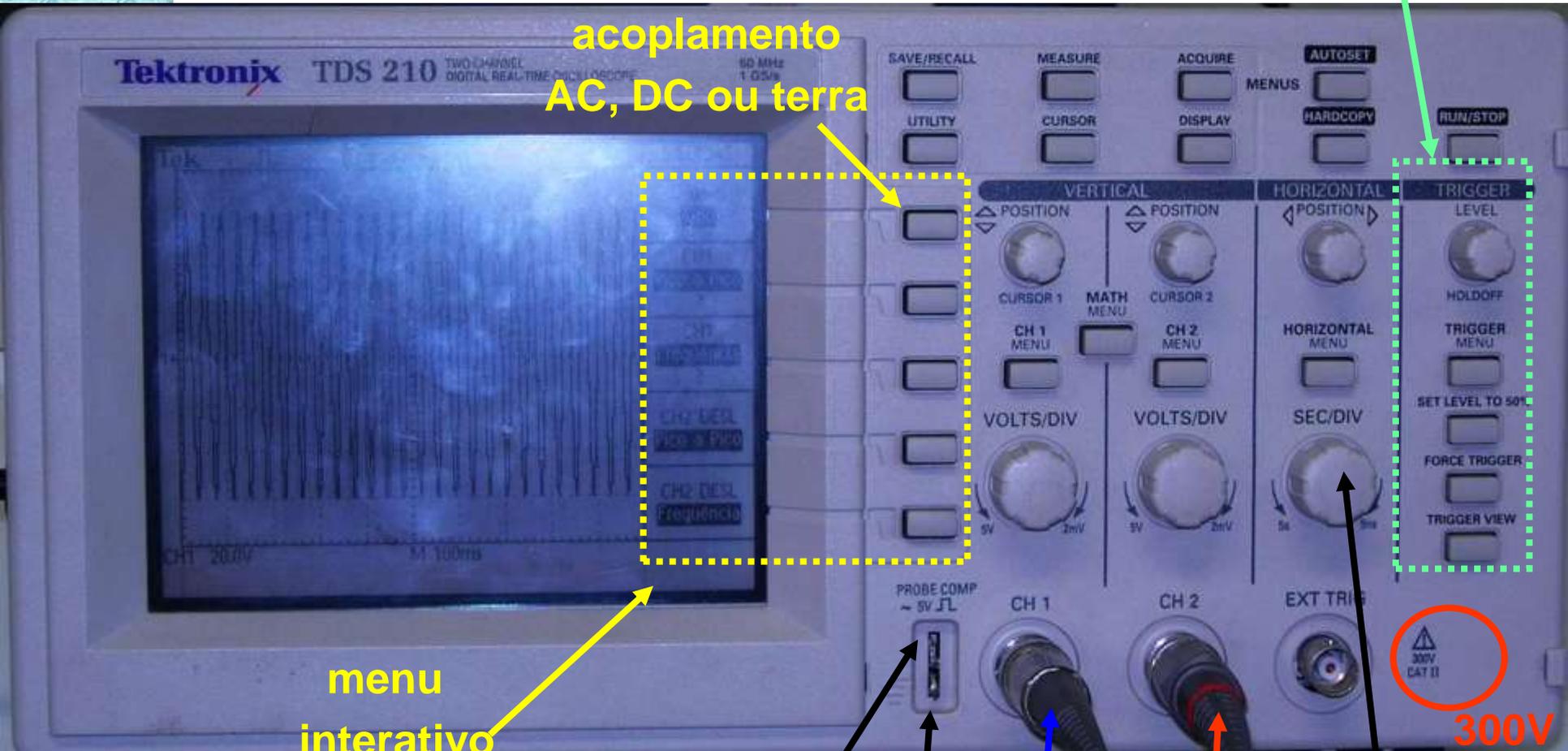
- Usando a bobina de área desconhecida
 - Fazer gráfico da F.E.M. induzida em função da corrente no solenóide.
 - Ajustar os dados e determinar a **área efetiva** da bobina
 - Medir a diferença de fase entre o campo magnético (corrente) e a FEM induzida na bobina. Está de acordo com o esperado?
- Perguntas “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)

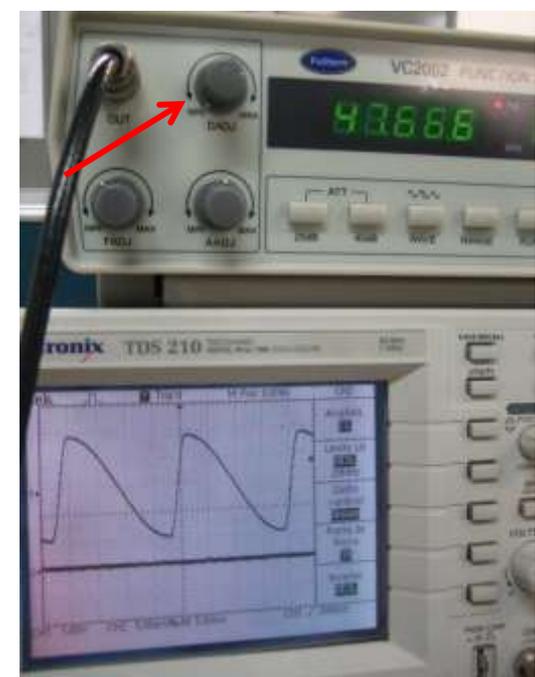
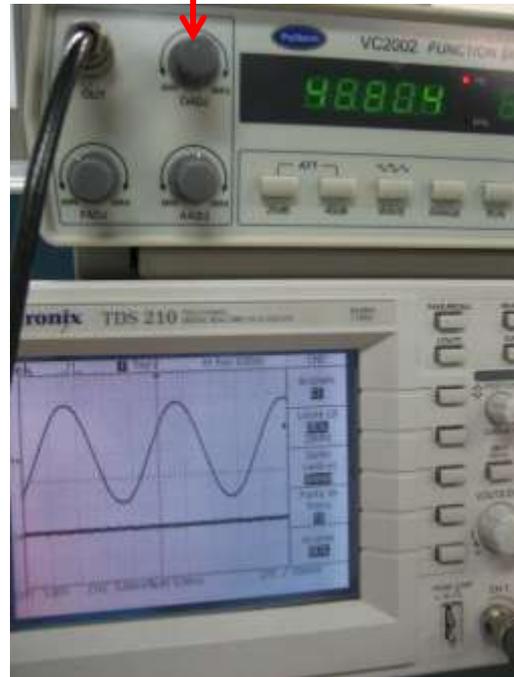
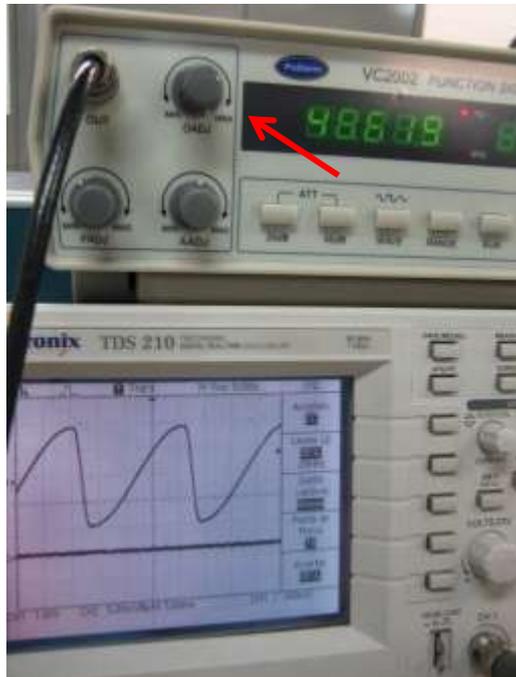
300V
CAT II

Osciloscópio



Ajuste do gerador de áudio

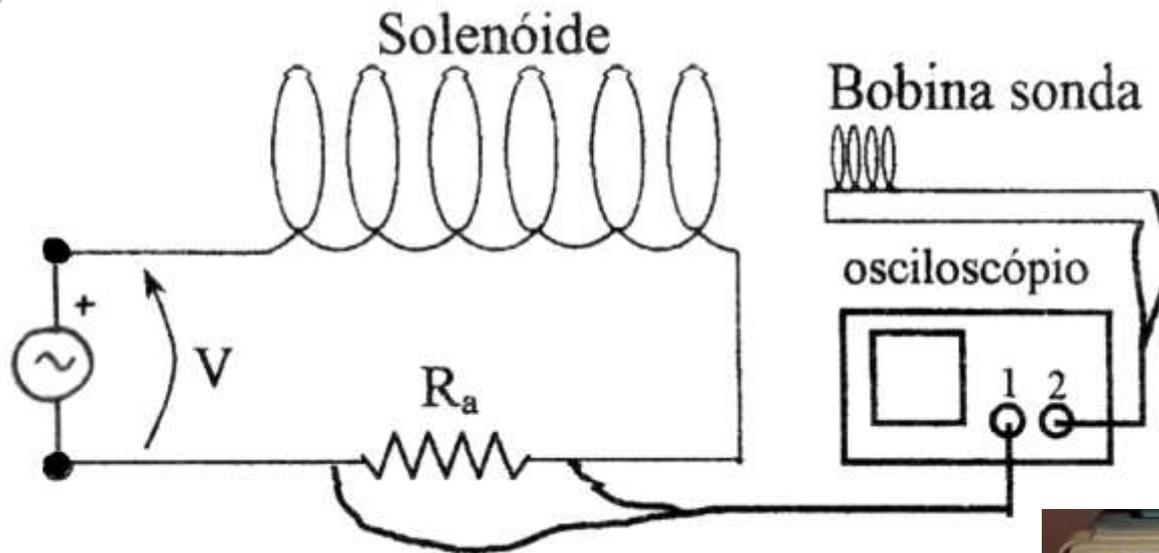
- Ajuste de frequência e amplitude
- Cuidado com duty cycle



Observações

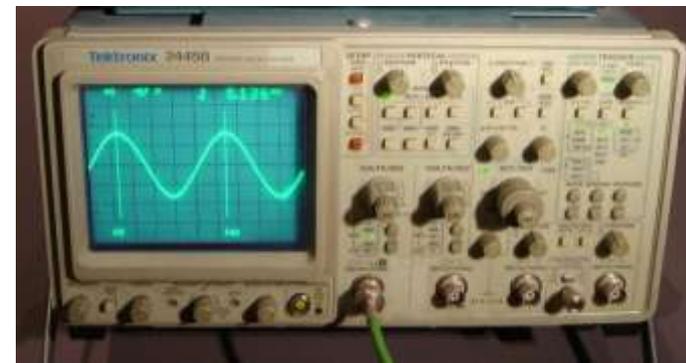
Usar um resistor de proteção R_a da ordem de **1 ohm** e uma frequência da ordem de **1 a 2 kHz**.

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

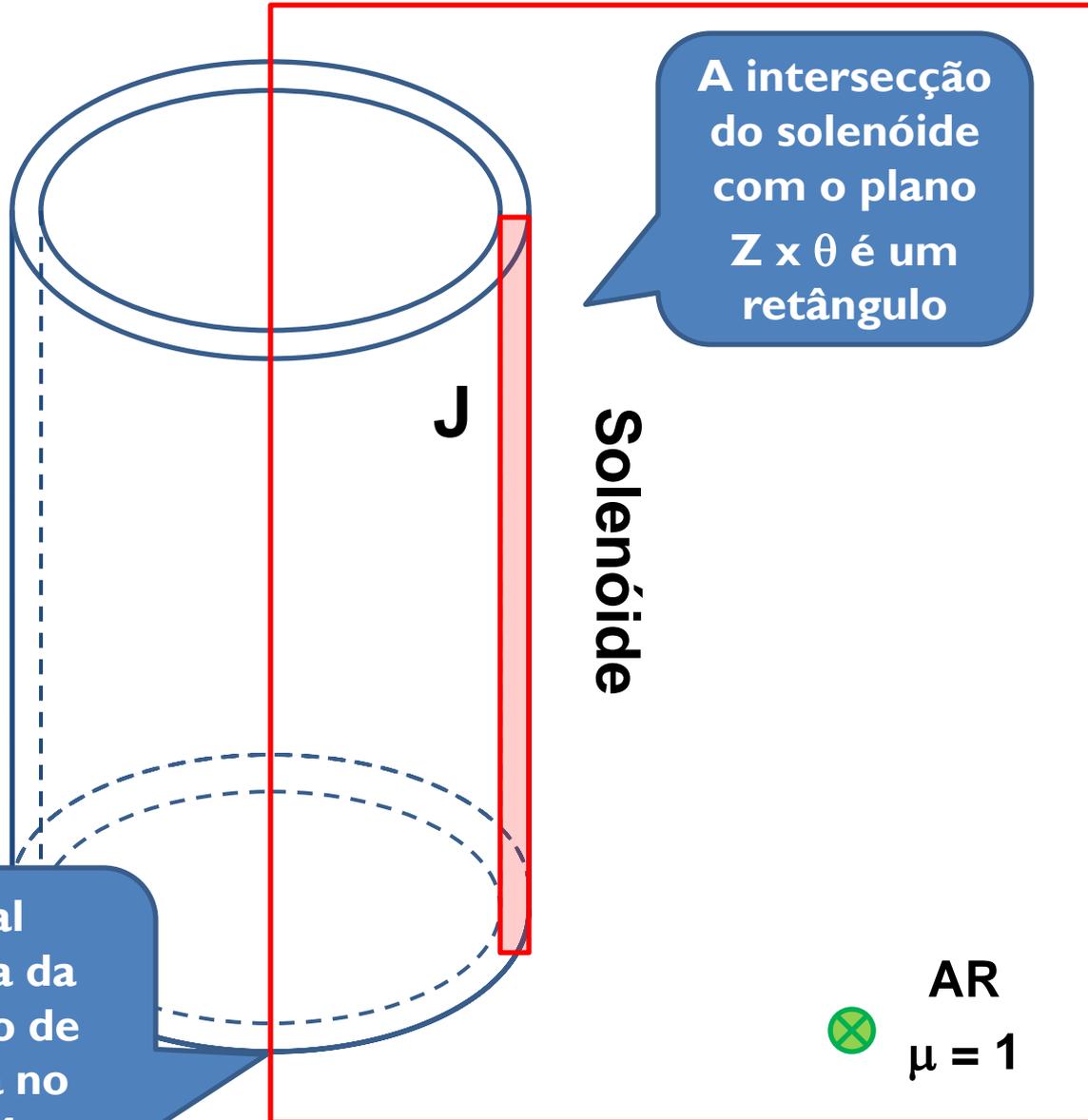


$$\varepsilon_b = -A_{bef} \left(\frac{dB_s}{dt} \right)$$

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



Simulação



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