



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

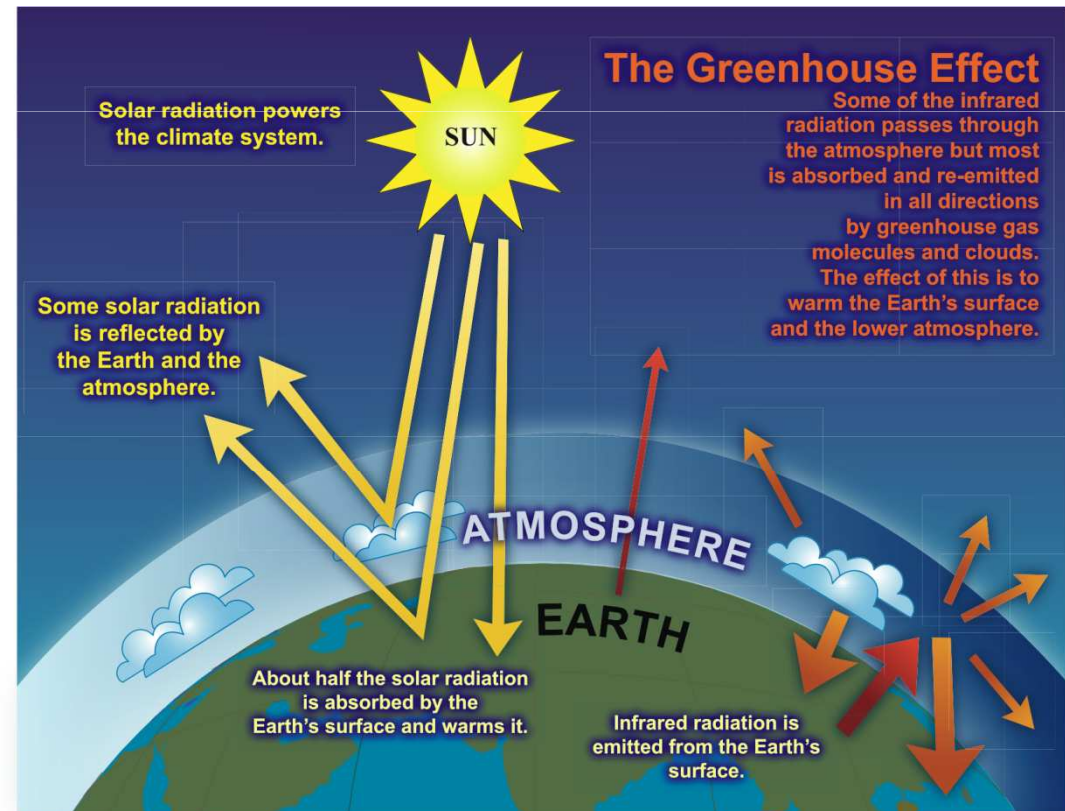
hbarbosa@if.usp.br

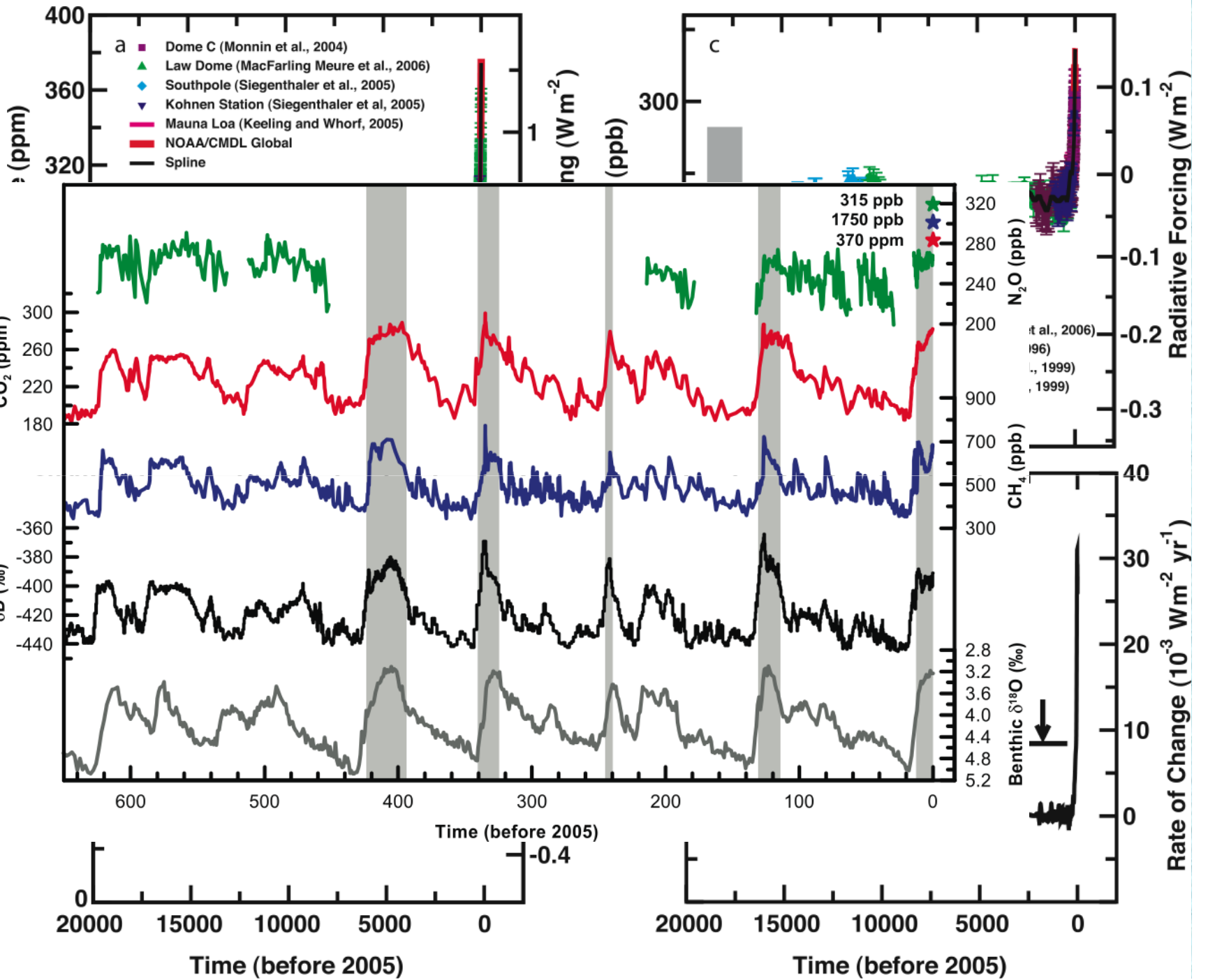
Ramal: 7070

Ed. Basílio Jafet, sala 229

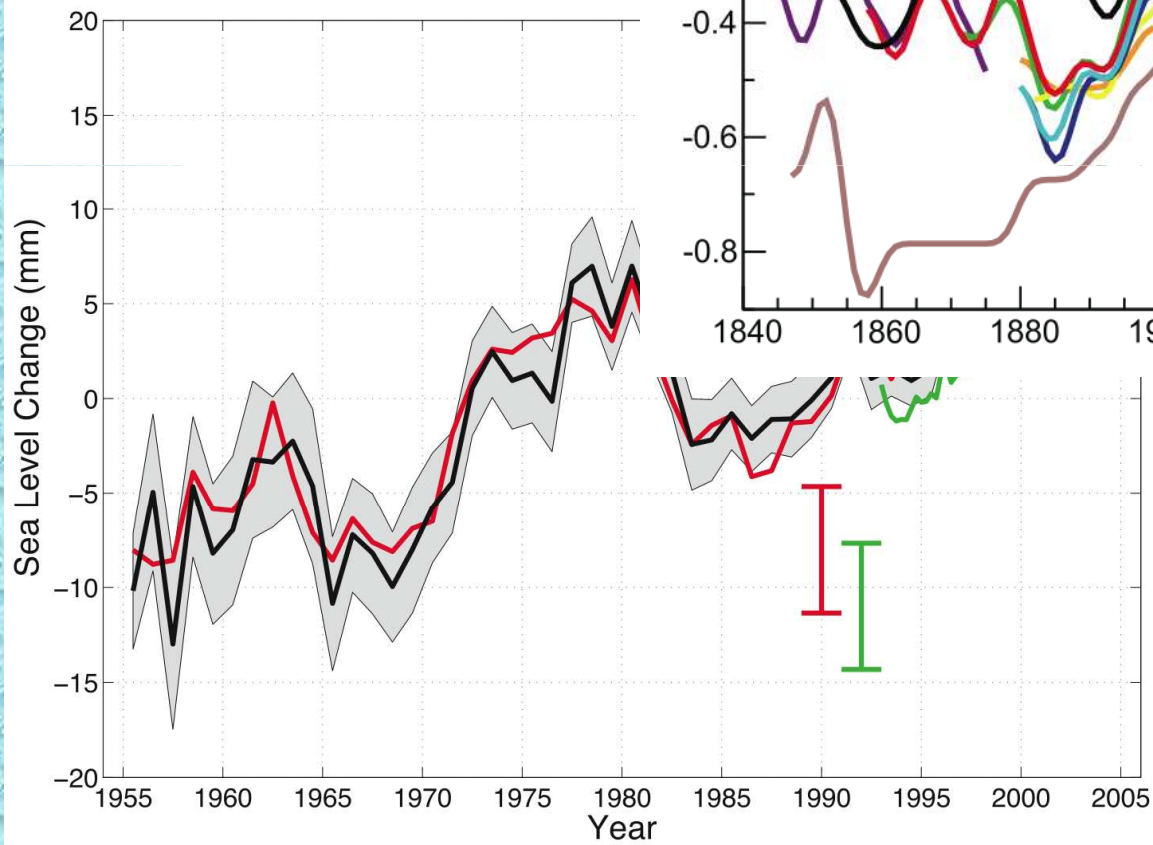
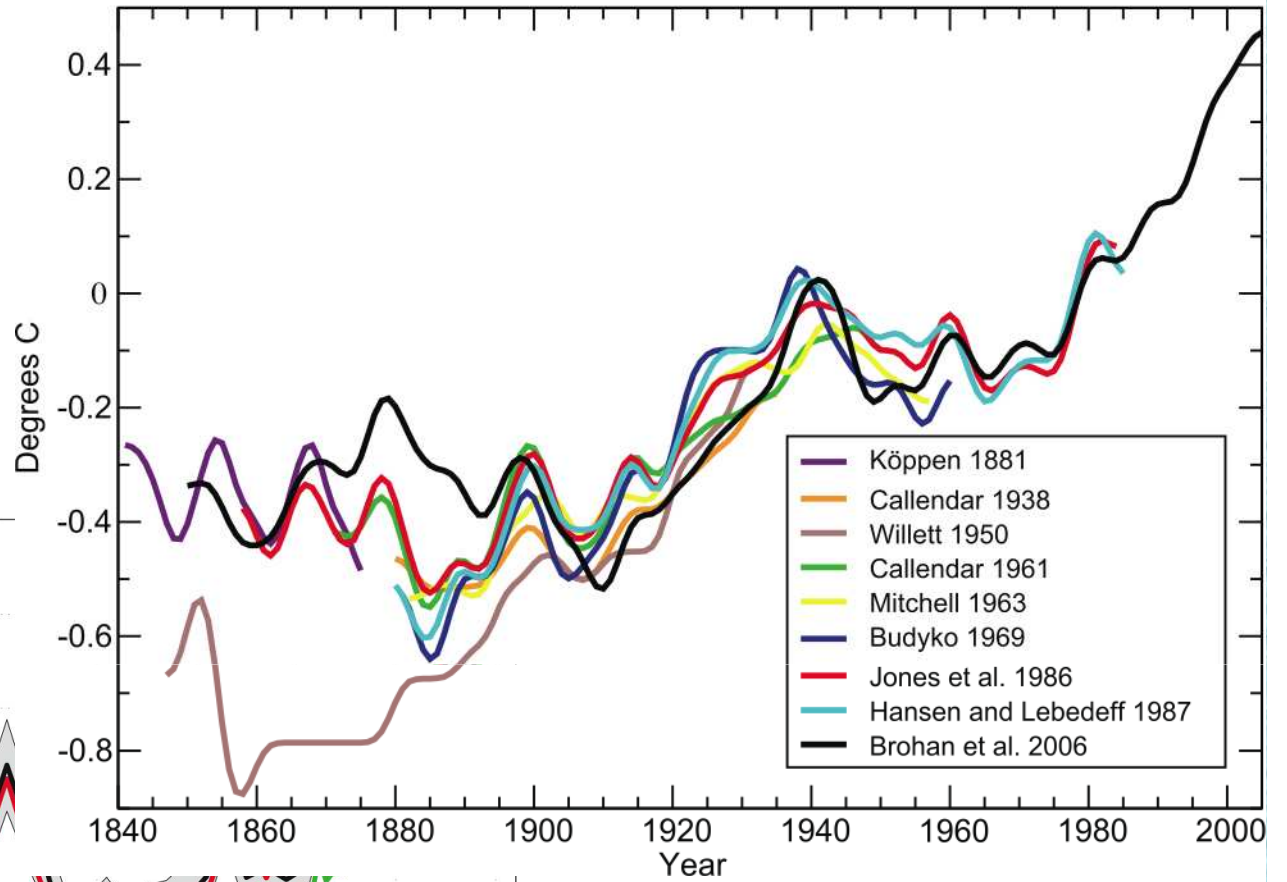
Incertezas em outras ciências que não a Física...

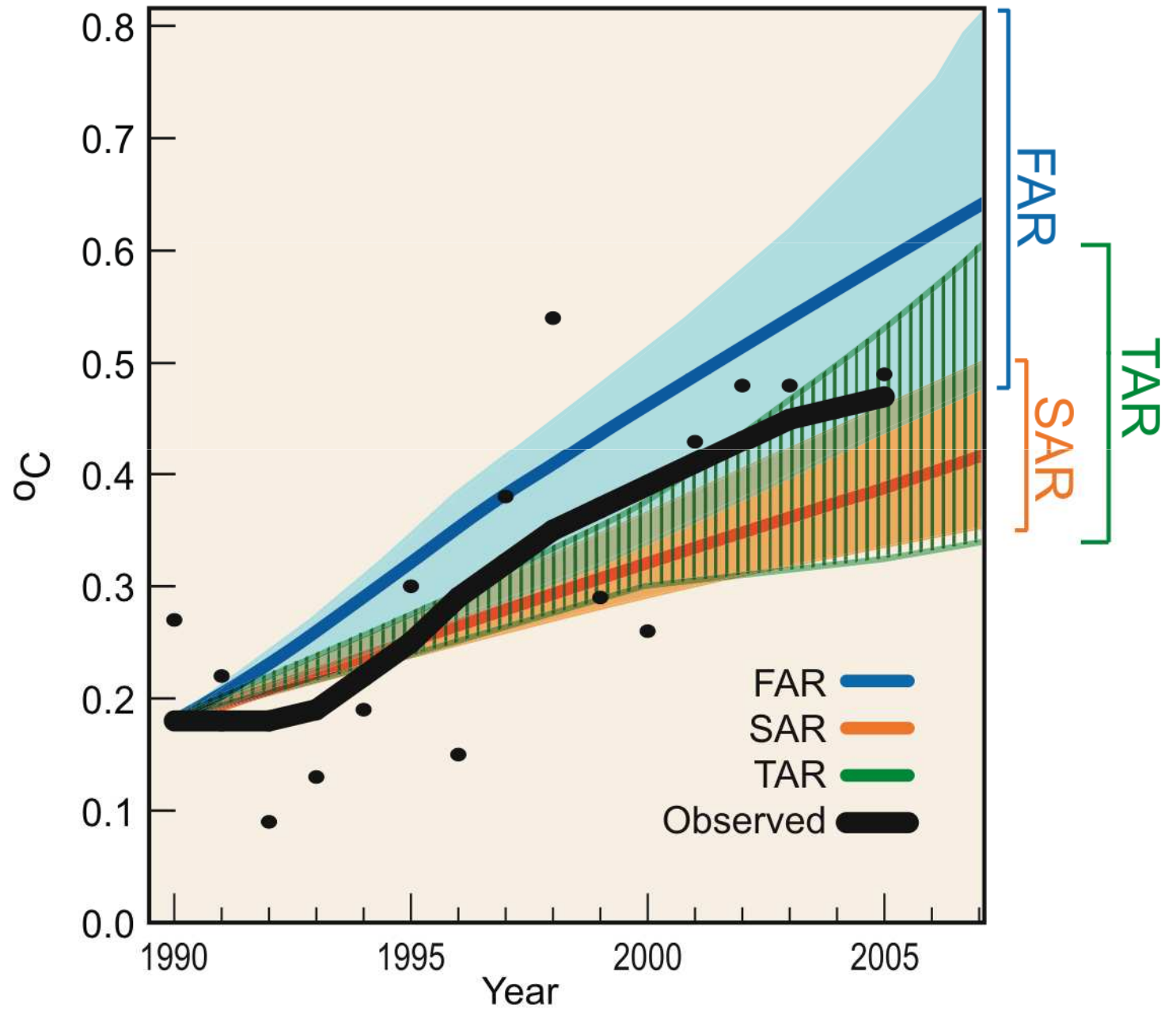
Mudanças Climáticas Globais





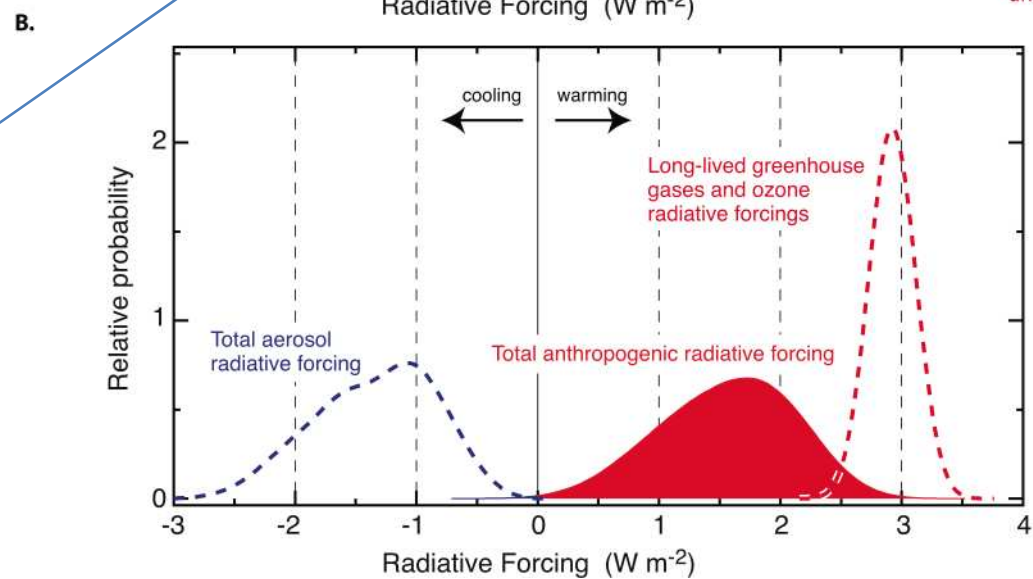
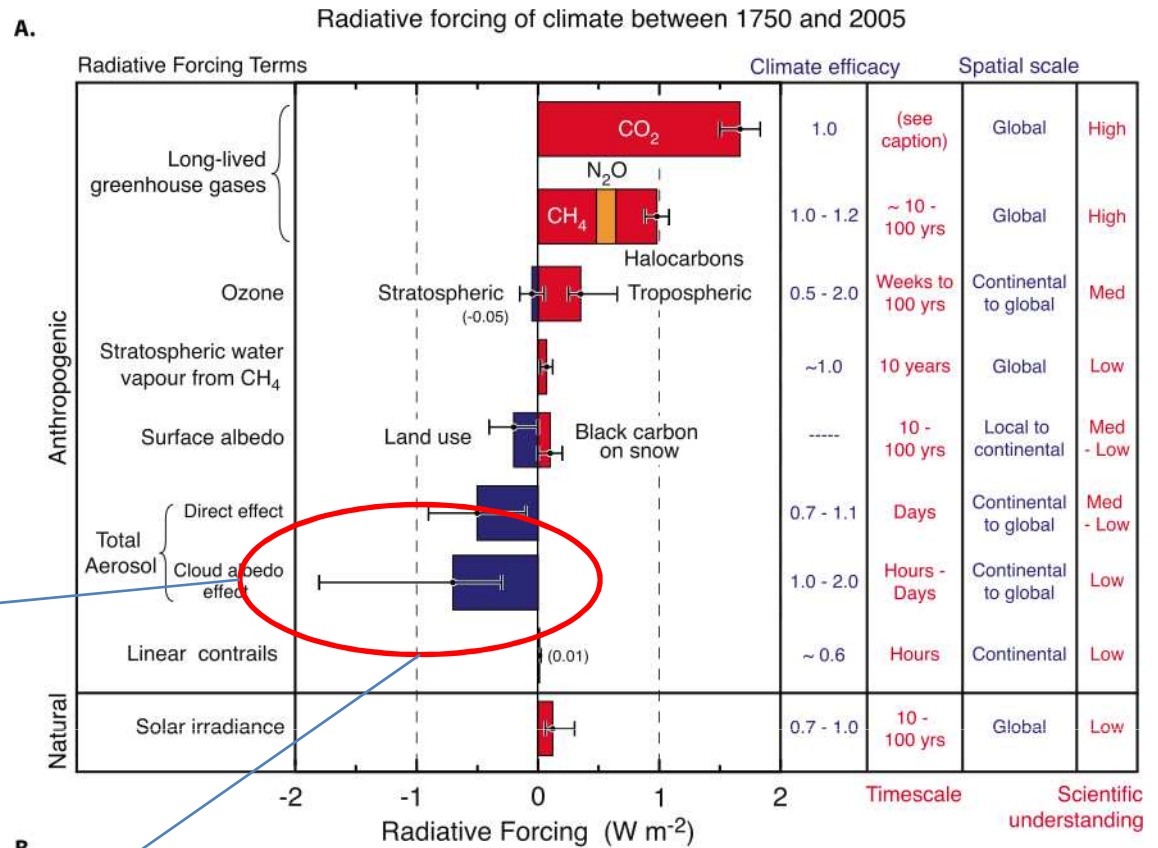
Global Temperature Time Series







Projetos:
EUCARI (europa)
\$12Milhoes euros
Brasil
R\$4Milhoes



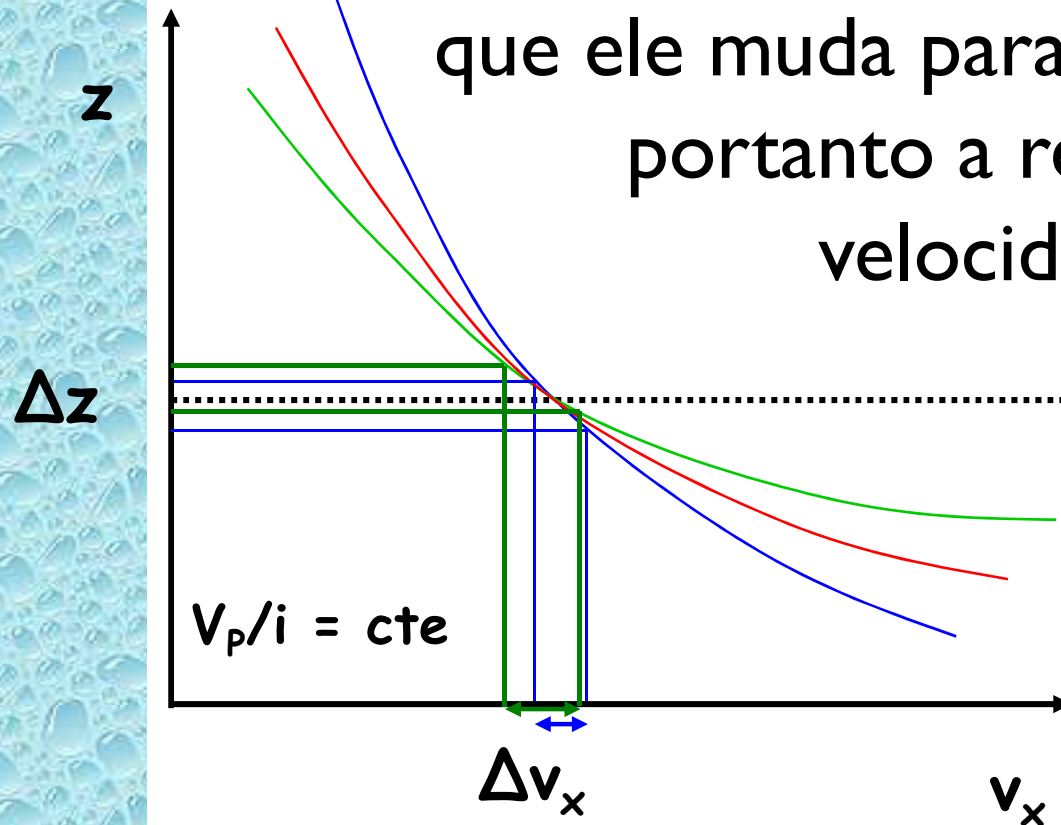


TAREFAS SEMANA PASSADA

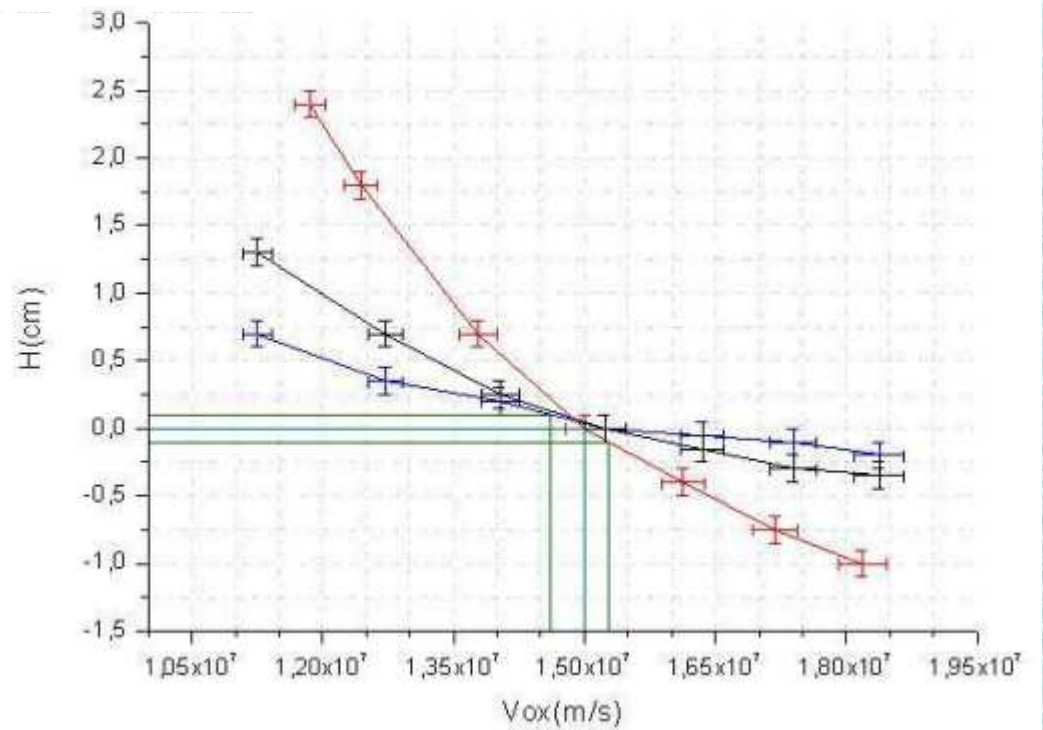
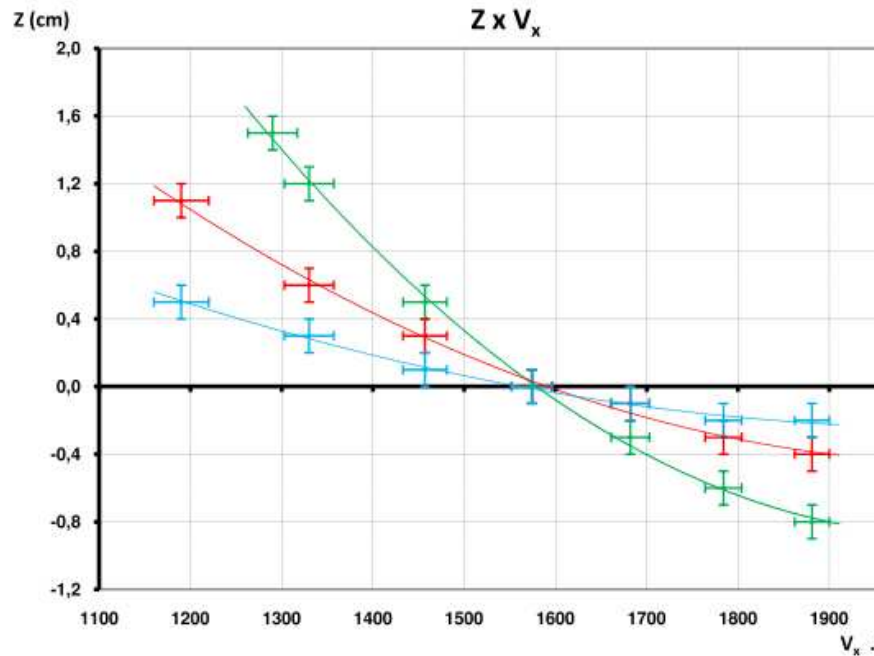
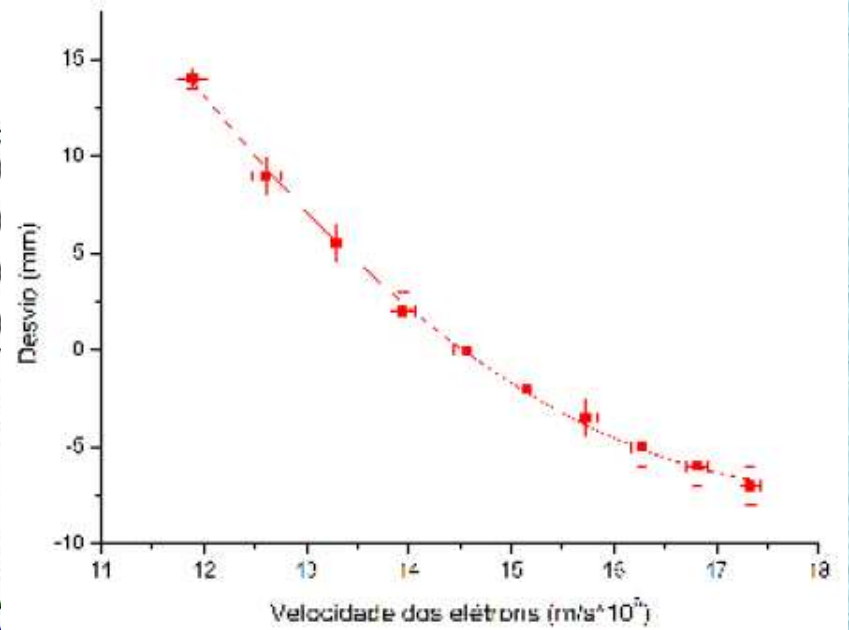
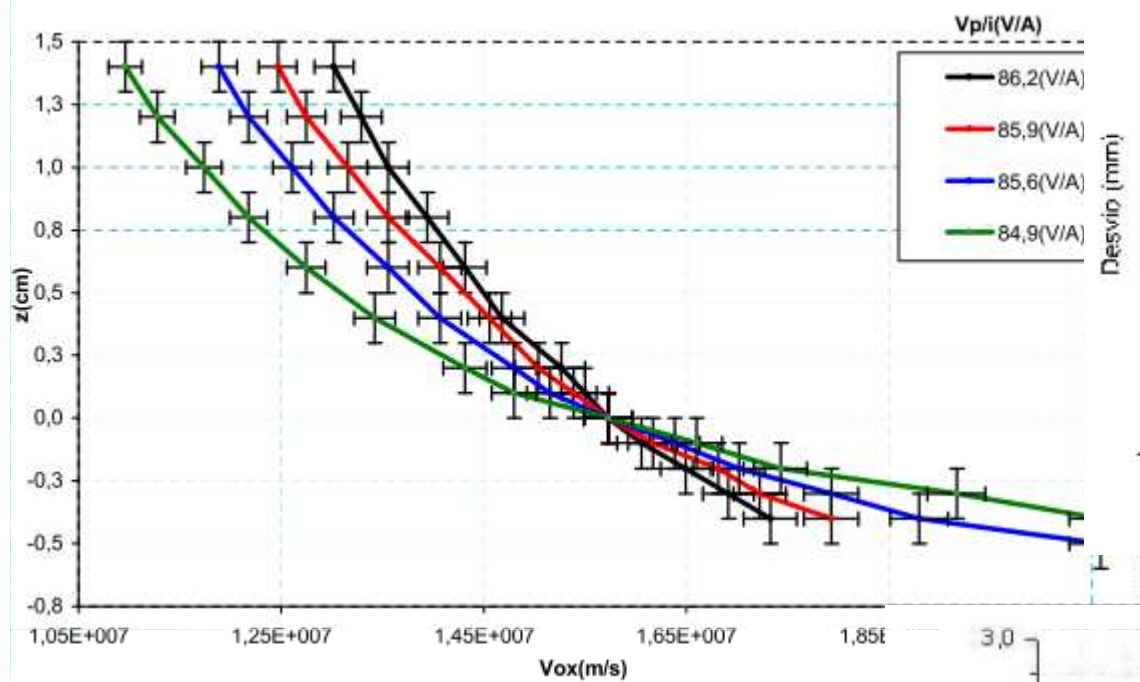


Resolução do seletor

- ▶ 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 $h = A' \frac{V_p}{V_{ac}}$

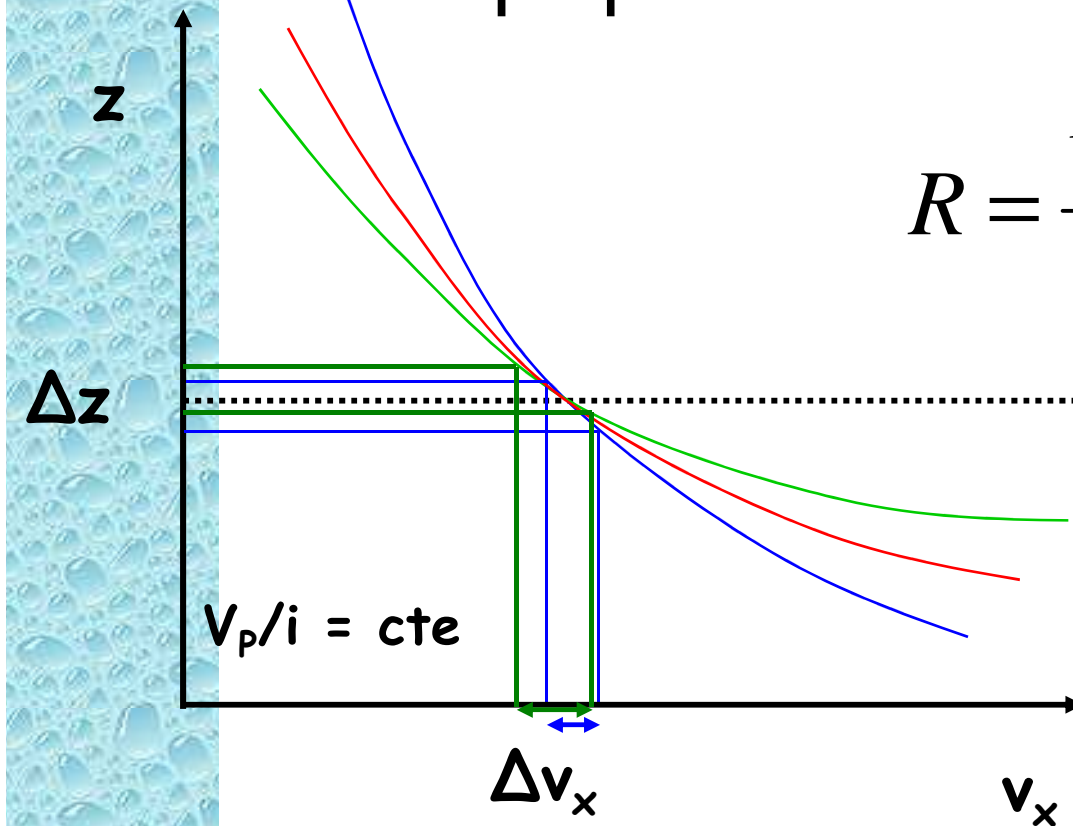
Campo magnético $H = C \frac{i}{\sqrt{V_{ac}}}$

Então a função teria a seguinte forma:

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

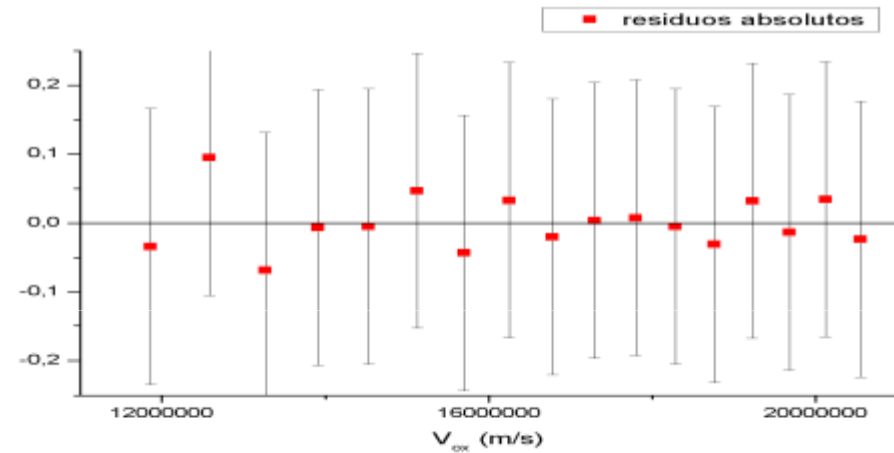
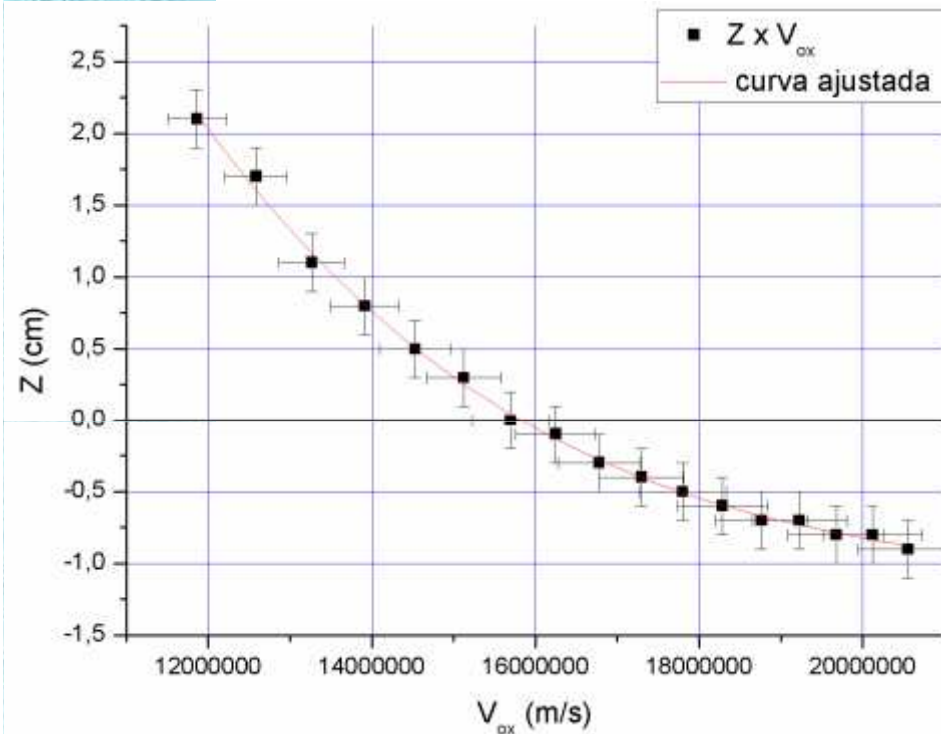
Como calcular a resolução ?

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



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

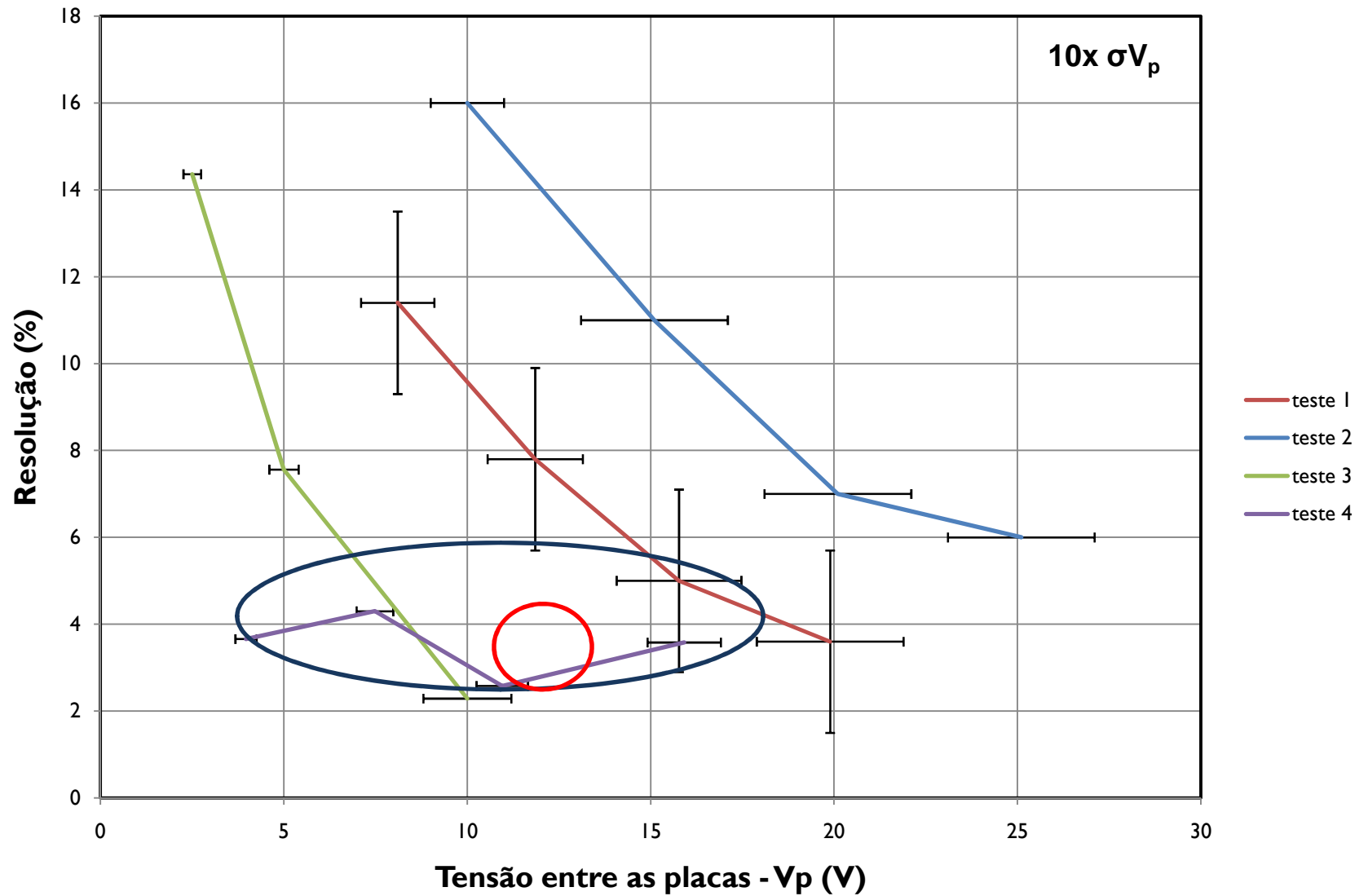
Resolução



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

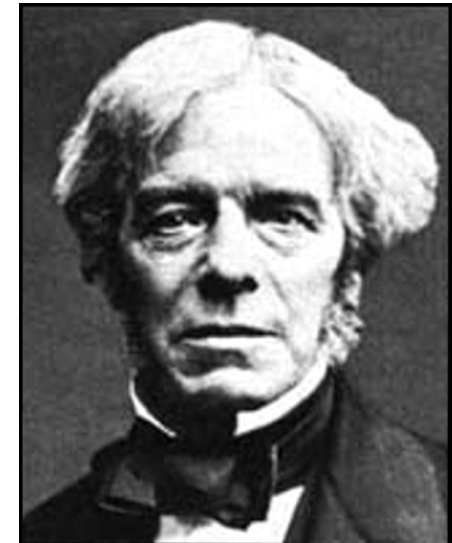
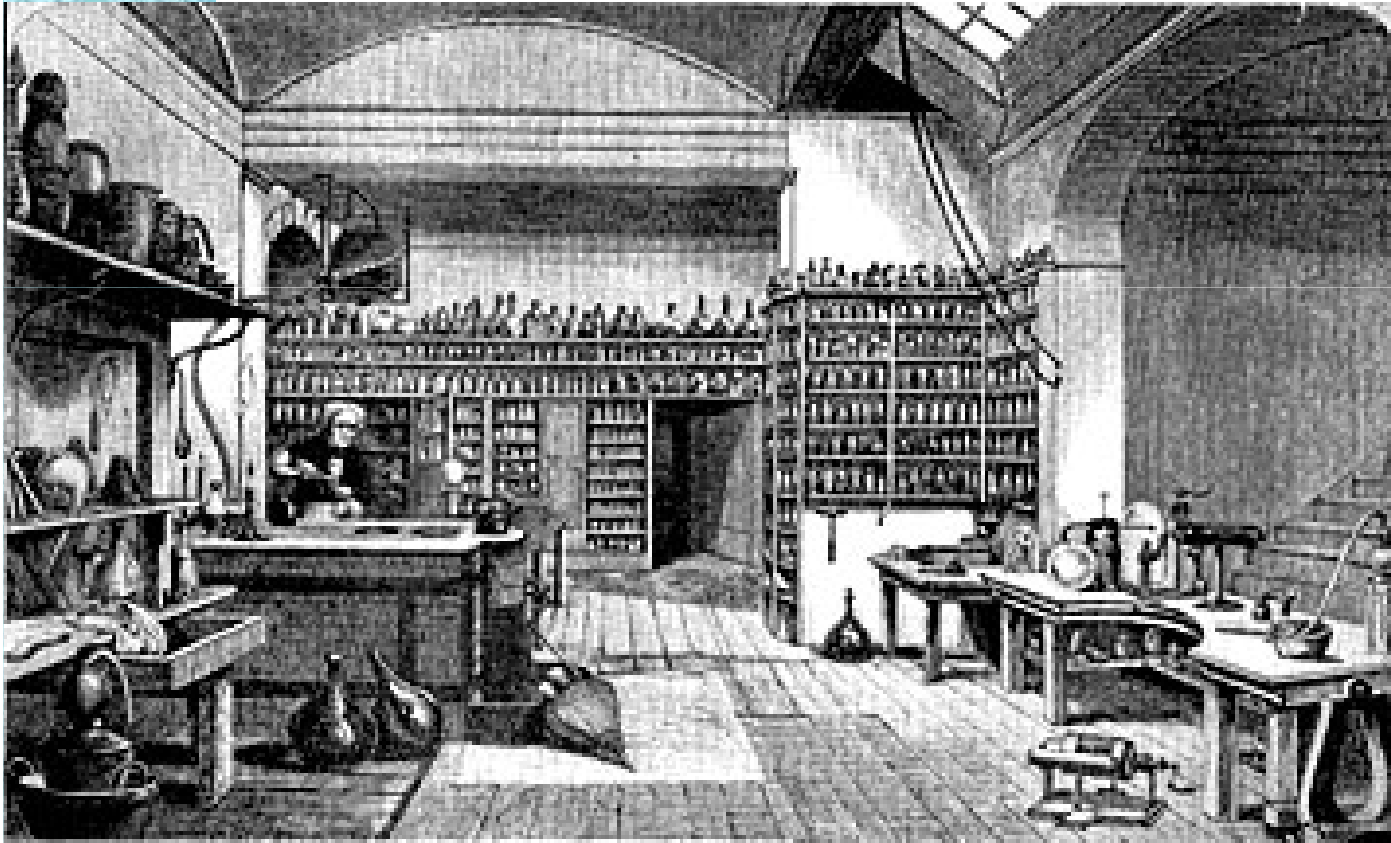
Vários grupos



Relatório

- 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

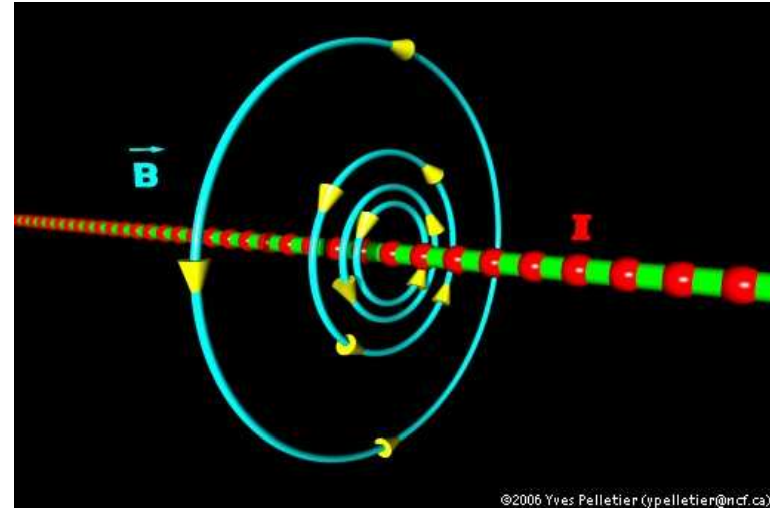
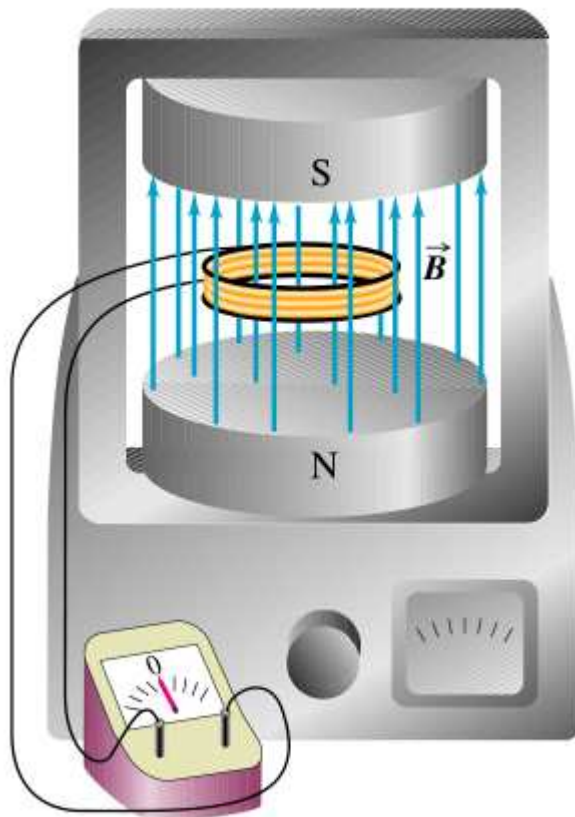
Esta Semana...A lei de Faraday



1791-1867

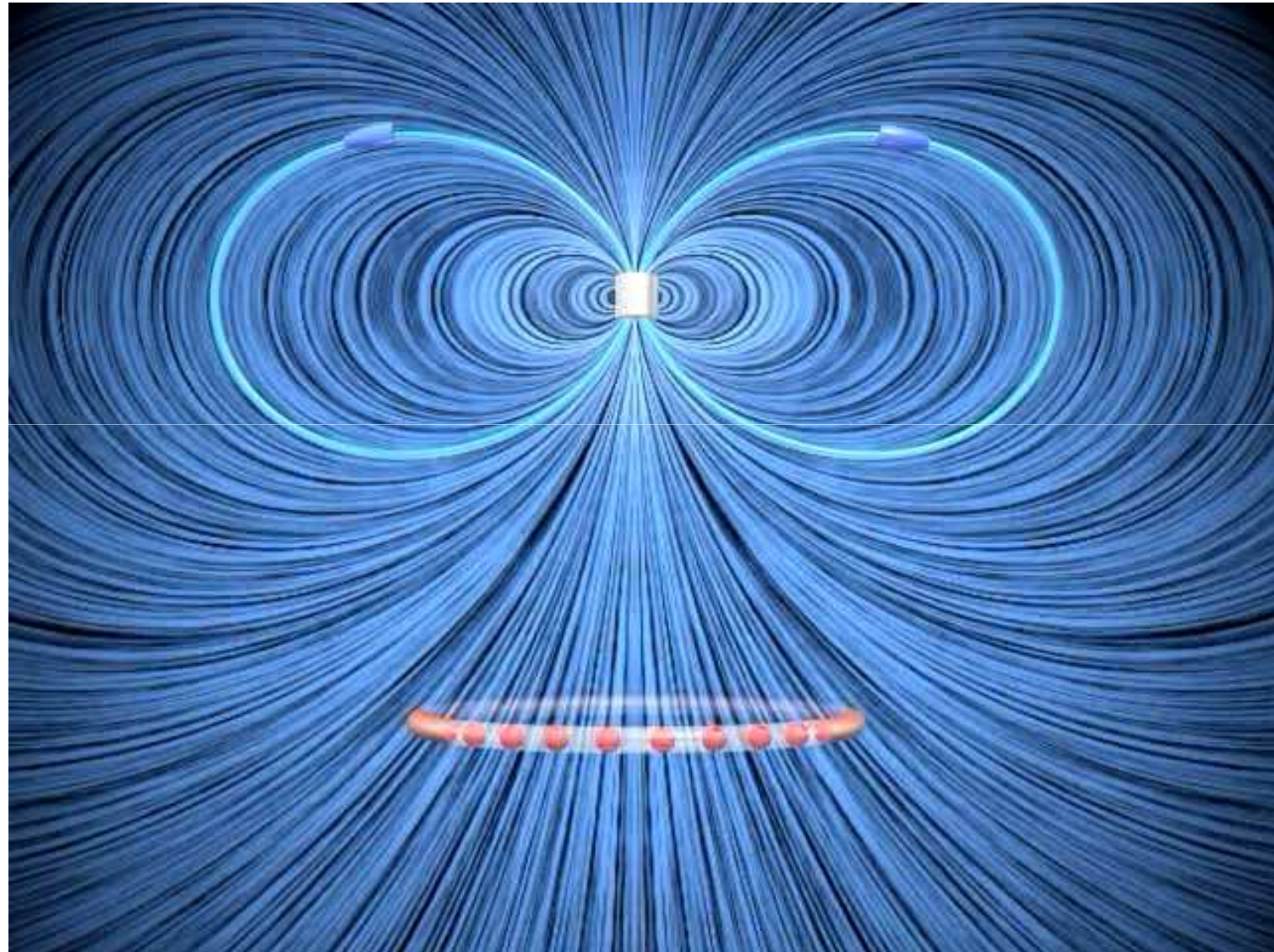
Lei de Faraday

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



$B(\text{const. no tempo}) \not\rightarrow i$

Lei de Faraday: exemplo



<http://web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D>

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.

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

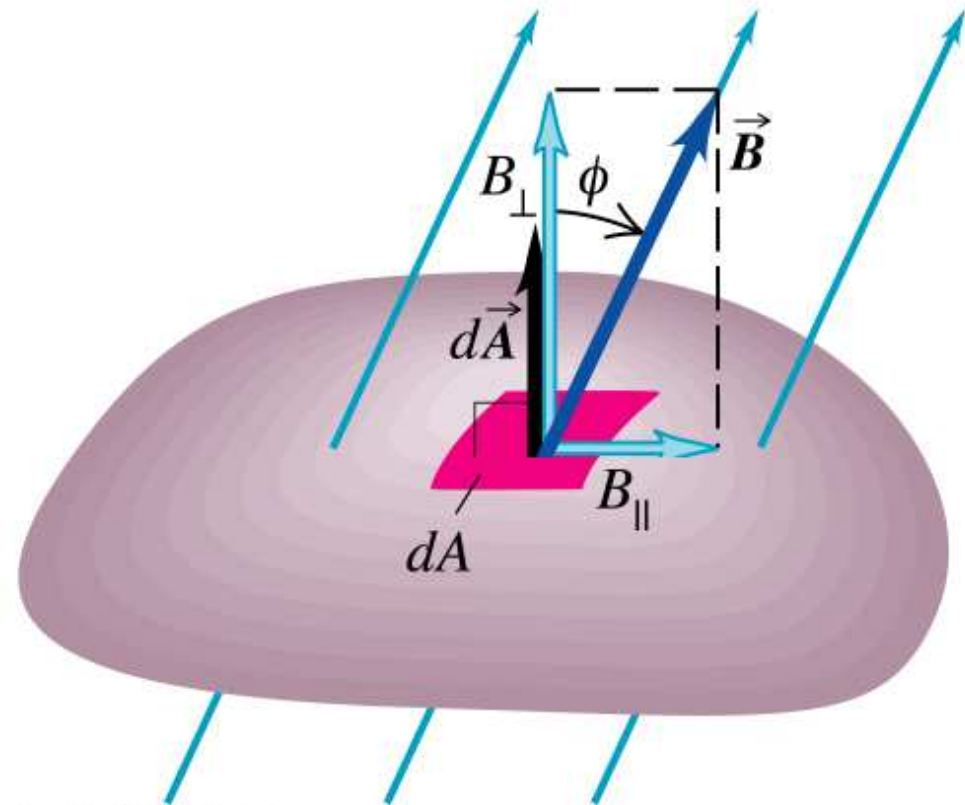
unidade de fluxo magnético é o Weber: 1 weber = 1Wb = 1 T m²

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.

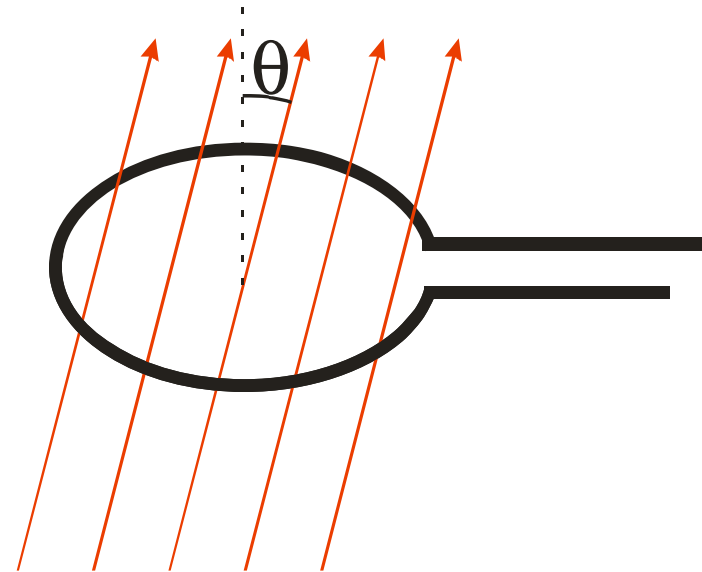
$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot \vec{n} da$$

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



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 .

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

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

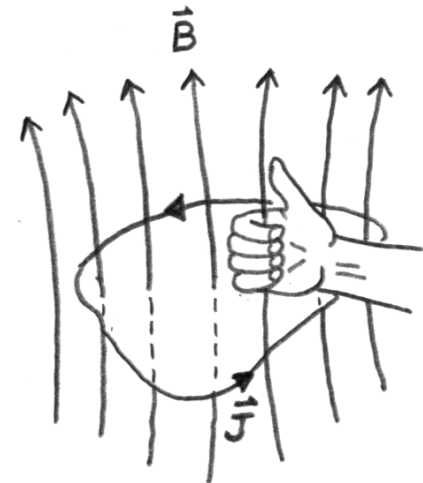
Indução devida a variação temporal do campo magnético (supondo apenas mudança de amplitude)

Indução devida a mudança da geometria ou posição da bobina

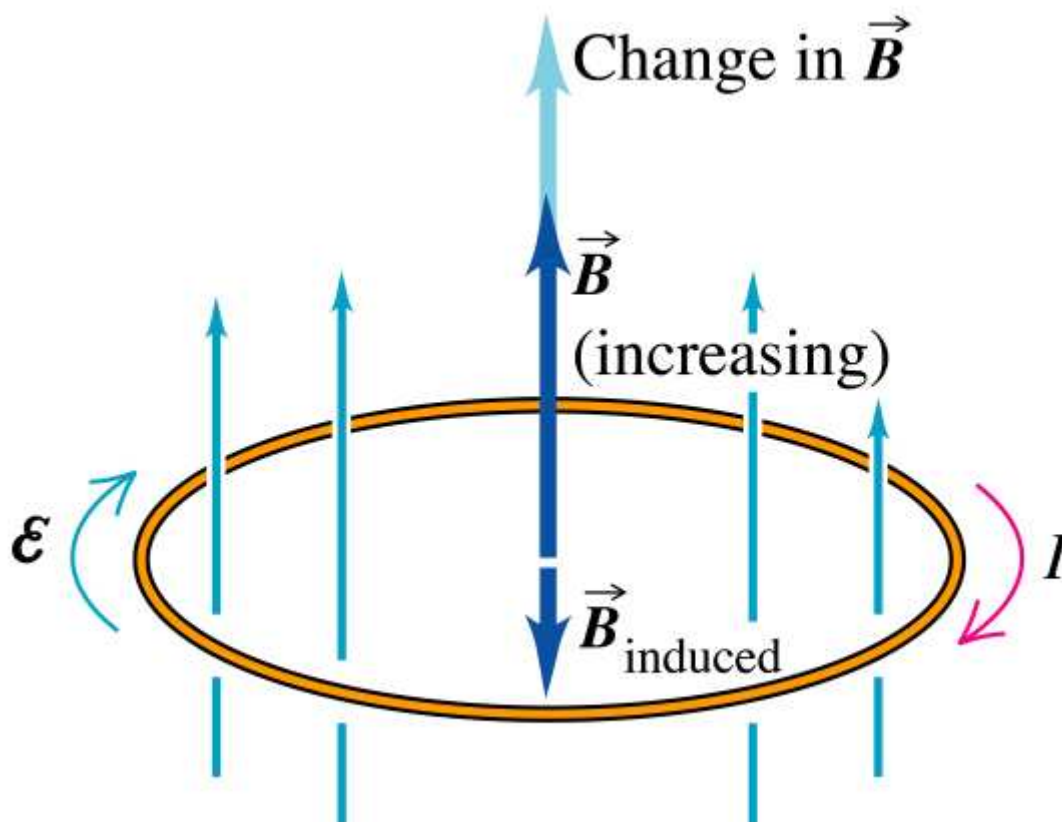
Interpretação

- 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 e de uma bobina de Helmholtz

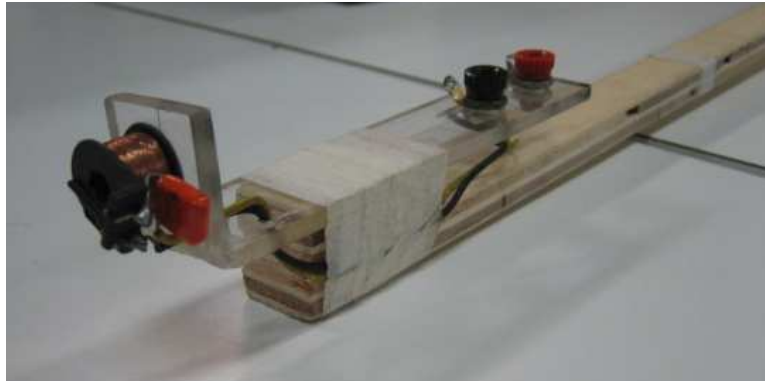


Objetivos para esta semana

- 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

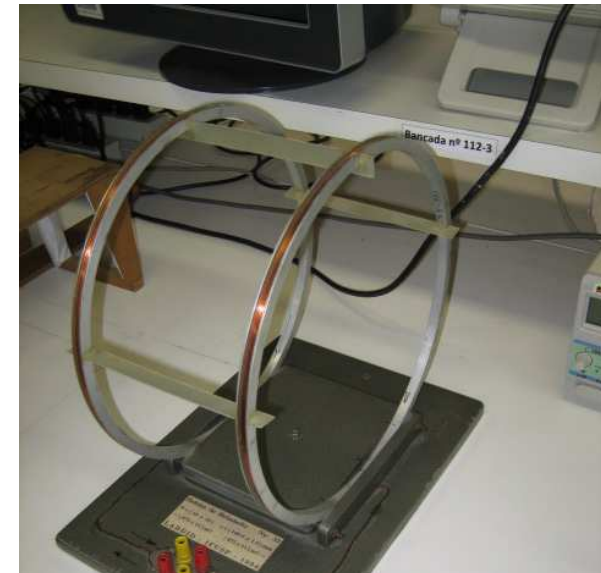
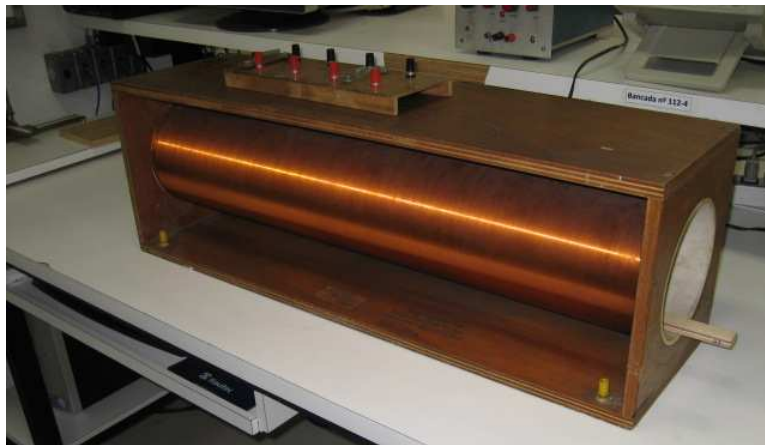
Equipamentos básicos do laboratório

- Bobinas sonda



- Bobina de Helmholtz

- Solenóide de referência



Como verificar experimentalmente a lei de Faraday?

Para comprovar a **lei de Faraday**, é necessário um campo magnético variável conhecido.

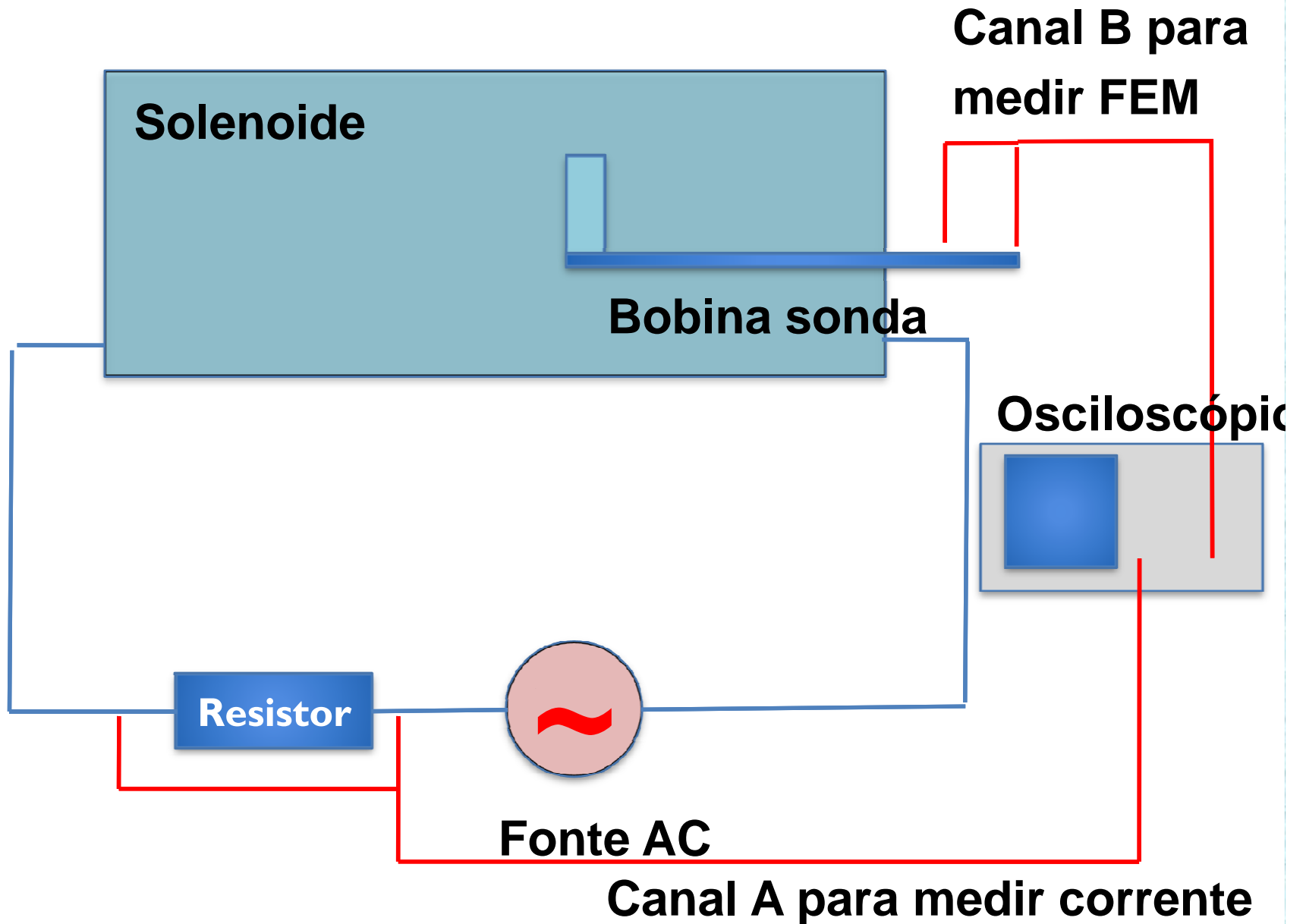
Essa geometria poderia ser um solenóide e o circuito onde vai ser induzida a força eletromotriz, uma pequena bobina de **área efetiva** conhecida: A_{bef} .

Se o solenóide for alimentado com uma tensão alternada cujos parâmetros sejam conhecidos, podemos calcular o campo magnético no solenóide, seu fluxo através da bobina e, portanto, a **f.e.i.** na bobina sonda:

$$\mathcal{E}_b = -A_{bef} \left(\frac{dB_s}{dt} \right)$$

Se B_s for uniforme na área A_{bef}

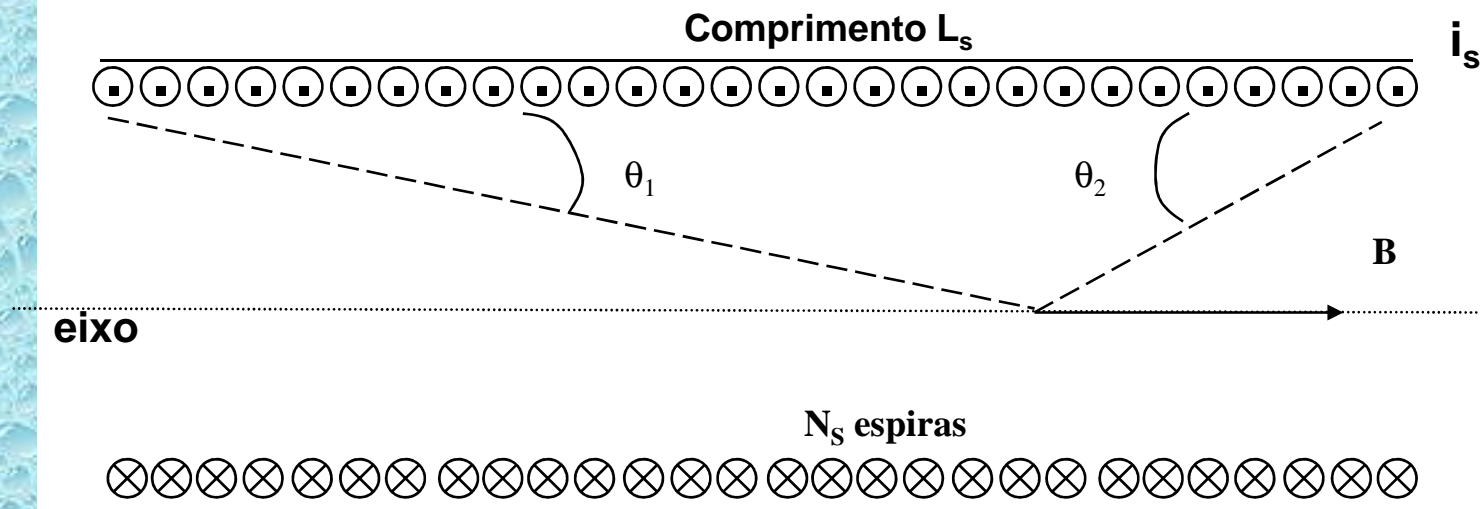
Arranjo experimental



Campo Magnético de um Solenóide

Lei de Biot-Savart

- Esquema do solenóide: $i_s = i_{Sm} \text{ sen } \omega t$



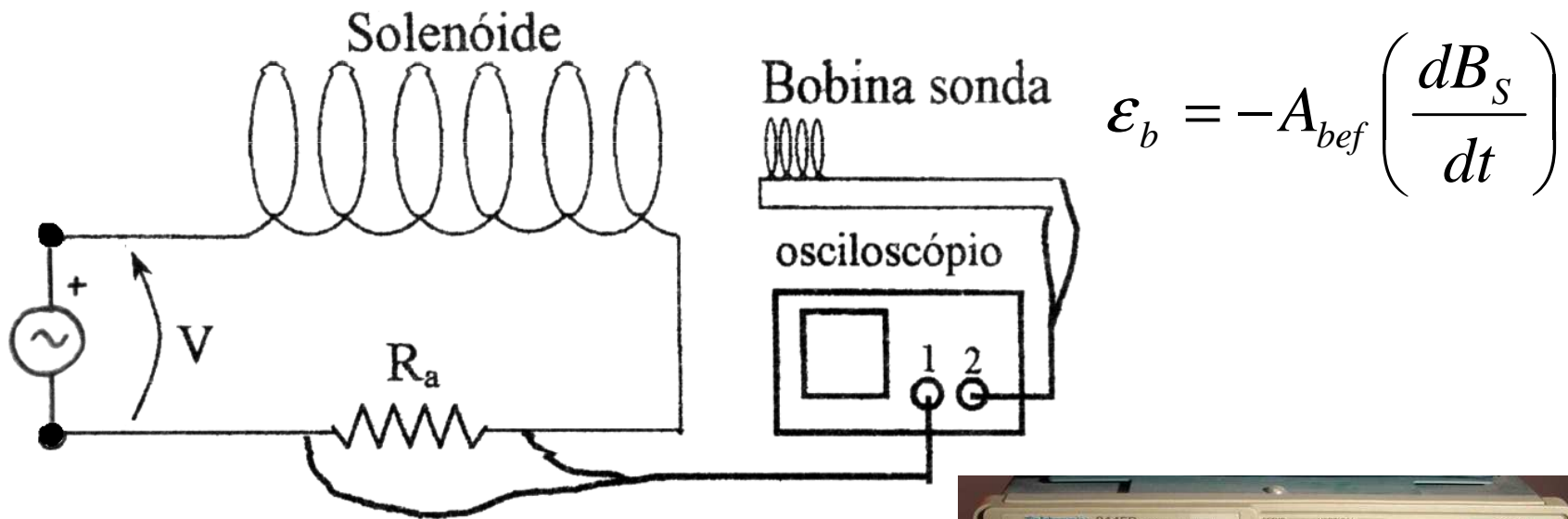
$$B_s = \frac{\mu_0 N_s}{L_s} \left(\frac{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}{2} \right) i_{Sm} \text{ sen } \omega t \quad B = B_{Sm} \text{ sen } \omega t$$

Campo de referência criado pelo solenóide grande

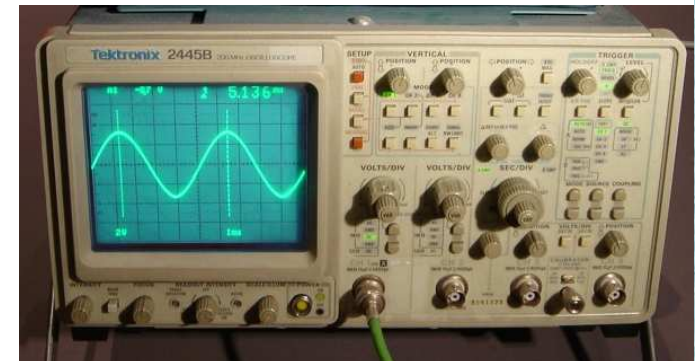
Observações

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**.



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



A F.E.M. Induzida

$$\mathcal{E}_b = -A_{bef} \left(\frac{dB_s}{dt} \right)$$

$$B = B_{Sm} \text{sen } \omega t$$

- Se as áreas de todas as espiras são iguais, $A_{bef} = n_b A_b$.

$$\mathcal{E}_b = -n_b A_b \omega B_{sm} \text{cos } \omega t$$

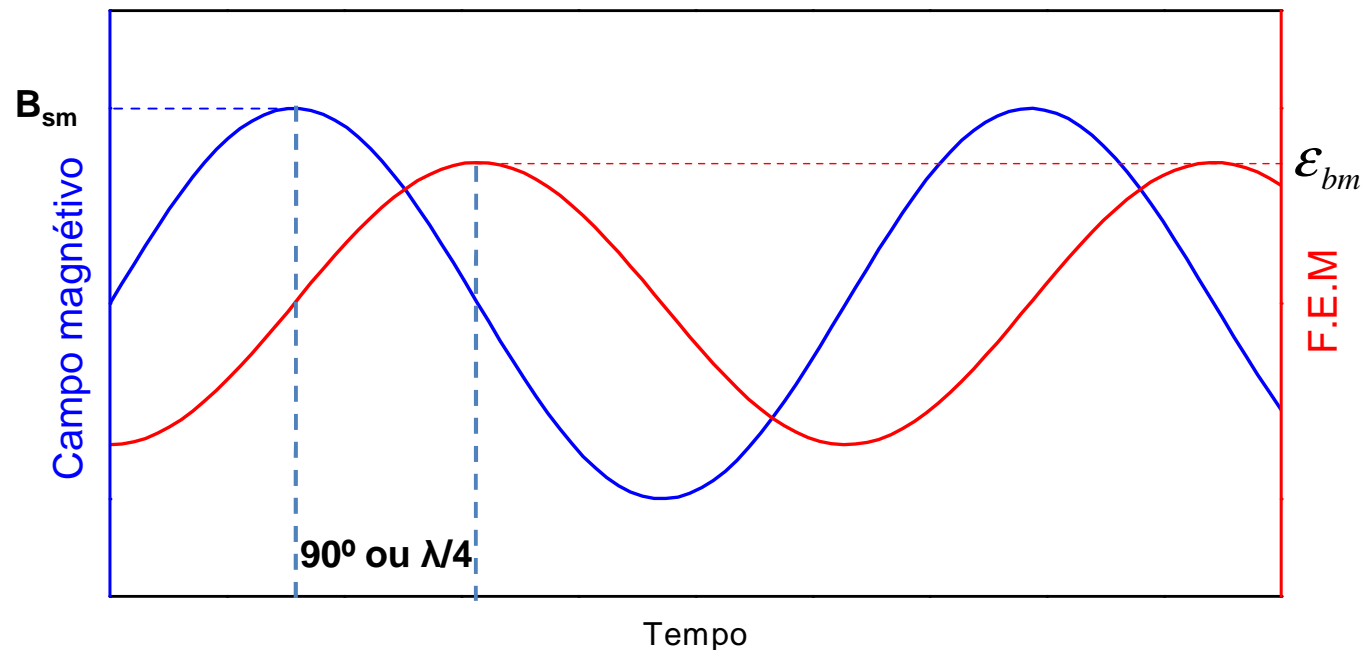
- Calcula-se \mathcal{E}_b e compara-se com o valor medido na bobina sonda (canal 2 do osciloscópio)

90°

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

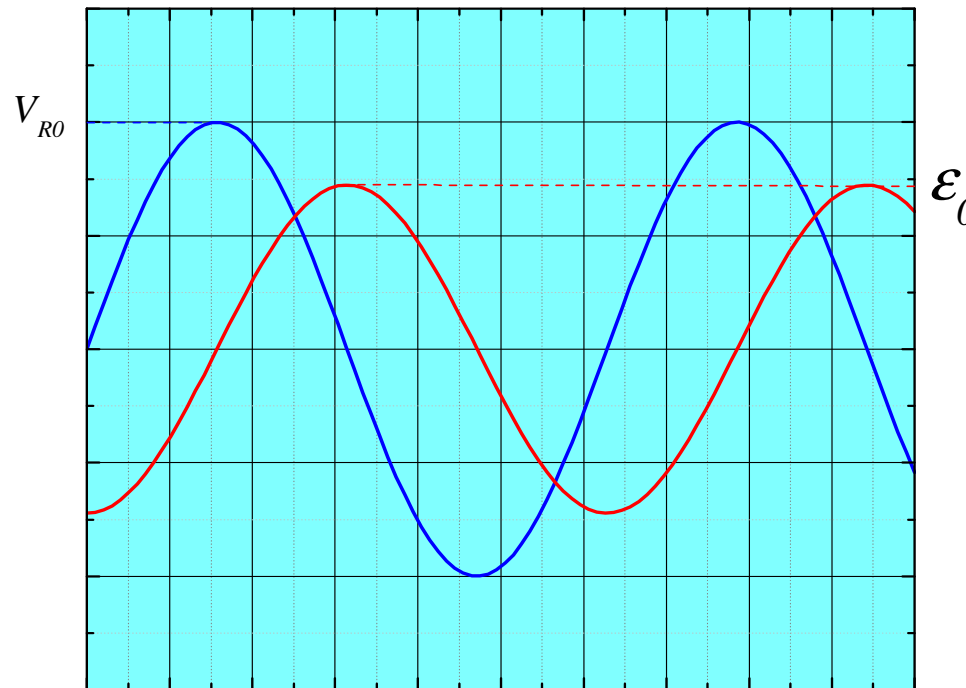
A FEM e o Campo Magnético

- Campo $B_S(t) = \frac{\mu_0 N_S i_{sm}}{L_S} \left(\frac{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}{2} \right) \text{sen}(\omega t) = B_{sm} \text{sen}(\omega t)$
- F.E.M. $\varepsilon_b(t) = -n_b A_b \omega B_{sm} \cos(\omega t) = \varepsilon_{bm} \text{sen}(\omega t - \pi / 2)$



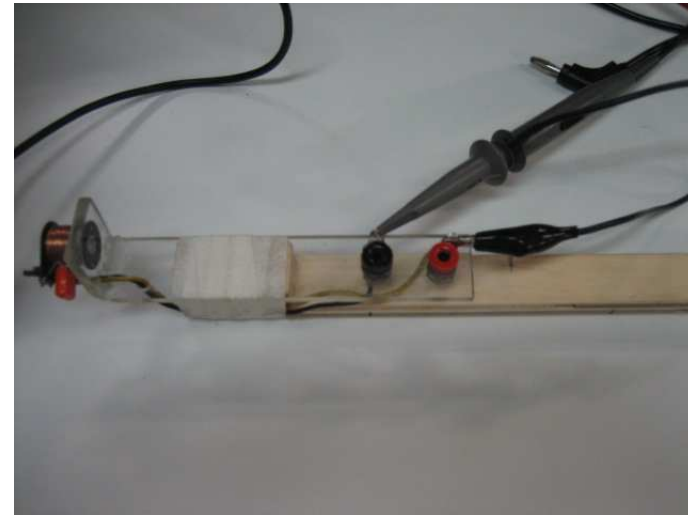
Na prática – medidas realizadas

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



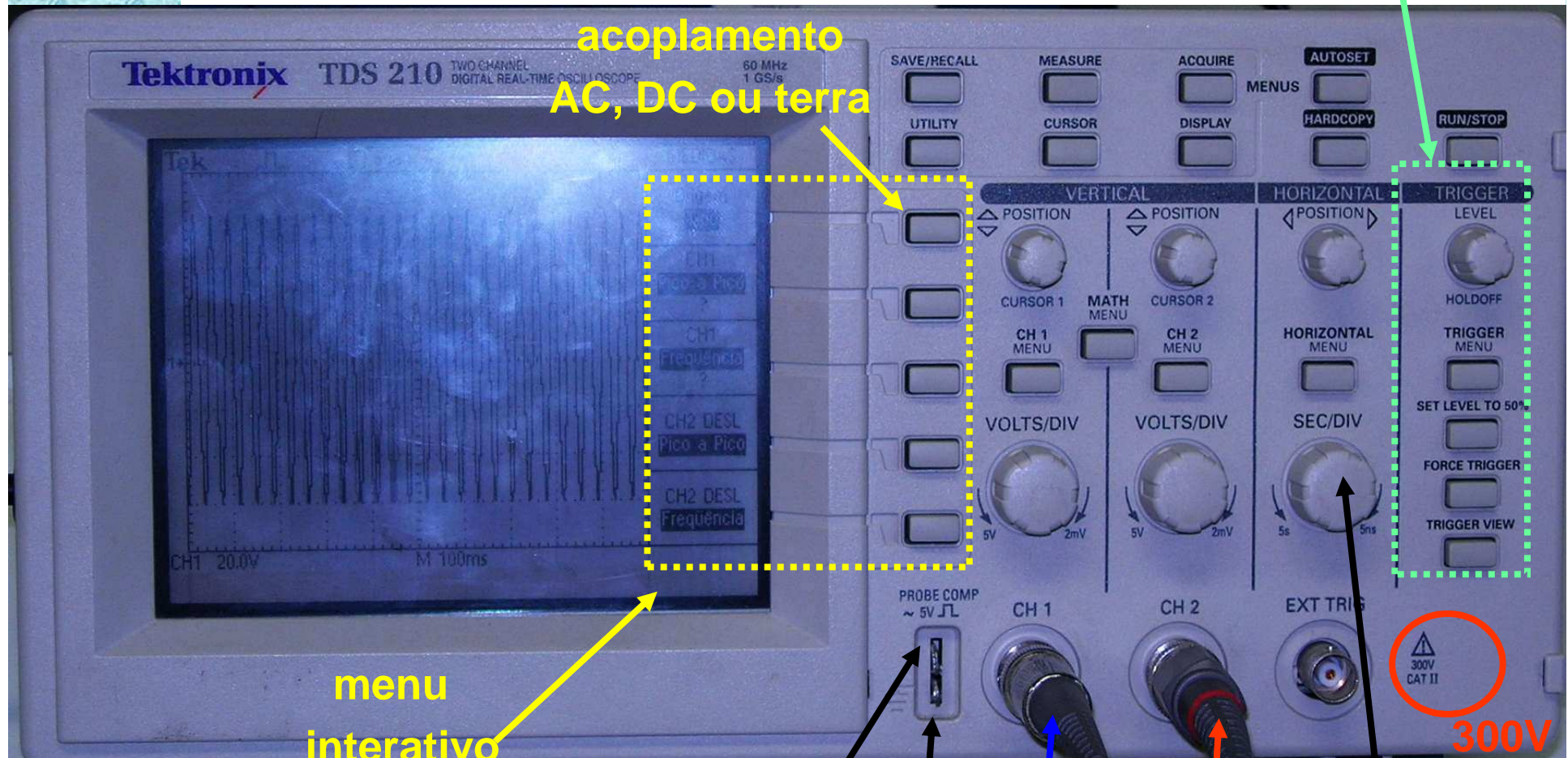
Tela do osciloscópio

Arranjo experimental



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)

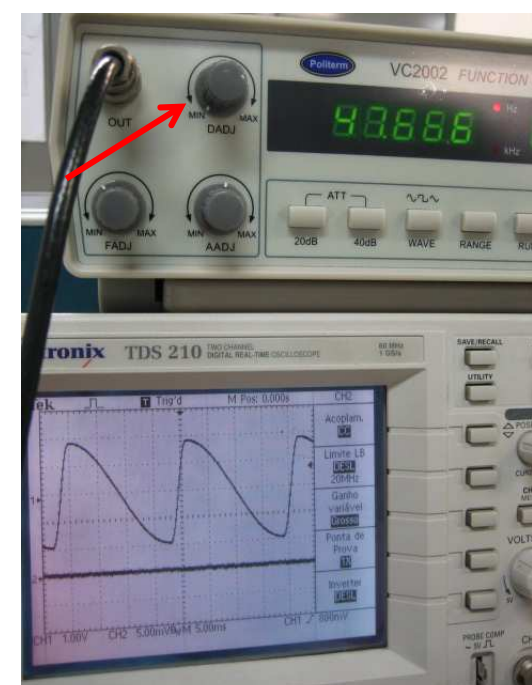
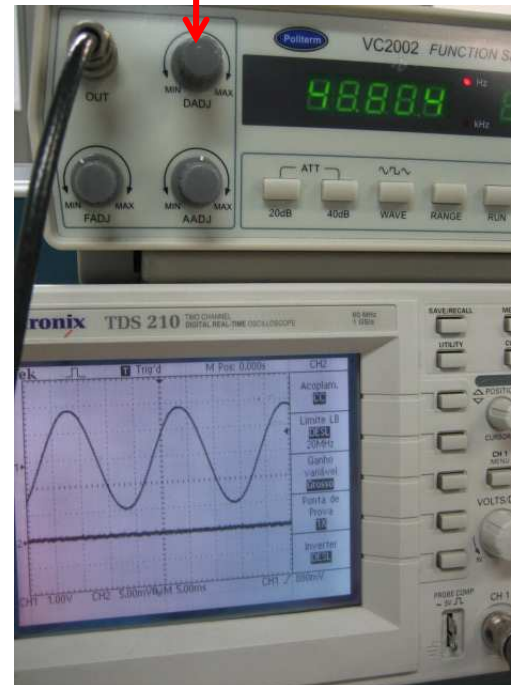
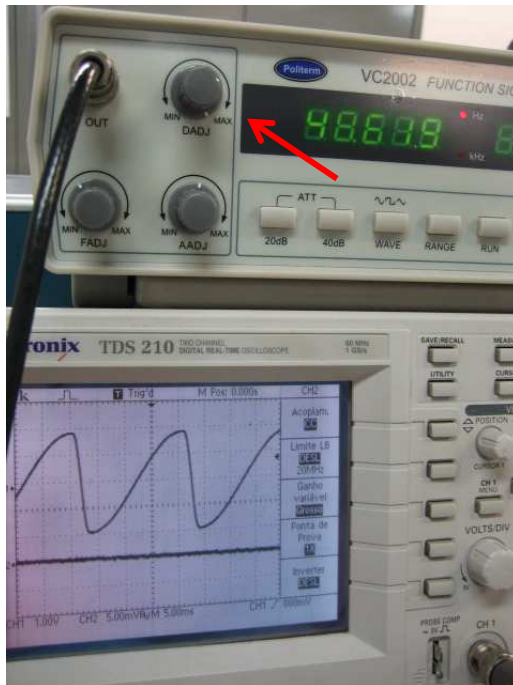
300V

Osciloscópio



Ajuste do gerador de áudio

- Ajuste de frequência e amplitude
- Cuidado com duty cycle

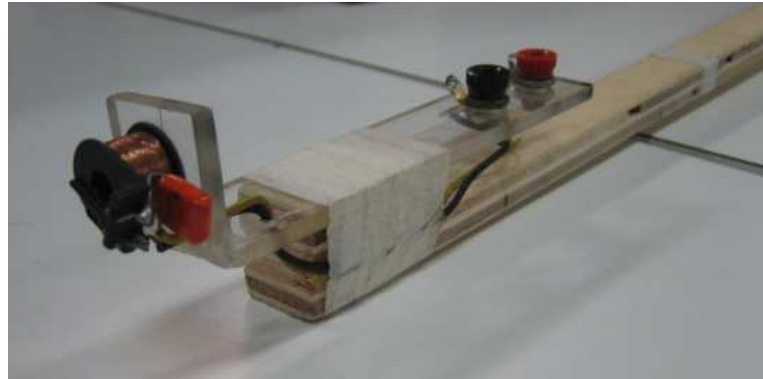


Tarefas da semana (primeira parte)



- Usando a bobina sonda de referência
 - verificar que o campo é constante no interior do solenóide
 - Fazer gráfico da F.E.M. induzida em função da corrente no solenóide.
 - Ajustar os dados e determinar a área efetiva da bobina
 - Comparar esta área com aquela calculada geometricamente a partir dos parâmetros da bobina
 - Medir a diferença de fase entre o campo magnético (corrente) e a FEM induzida na bobina. Está de acordo com o esperado?

Tarefas da semana (segunda 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
 - Comparar esta área com a da outra bobina. Qual é maior? Porque?
 - Anotar o número da bobina para a próxima semana
- Pergunta “teórica”
 - Deve existir alguma preocupação do alinhamento do solenóide com o campo magnético local? Porque?