



Física Experimental III

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

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

Experiência 3, Aula 2

Lei de Faraday

Prof. Henrique Barbosa

hbarbosa@if.usp.br

Ramal: 7070

Ed. Basílio Jafet, sala 229



TAREFAS SEMANA PASSADA

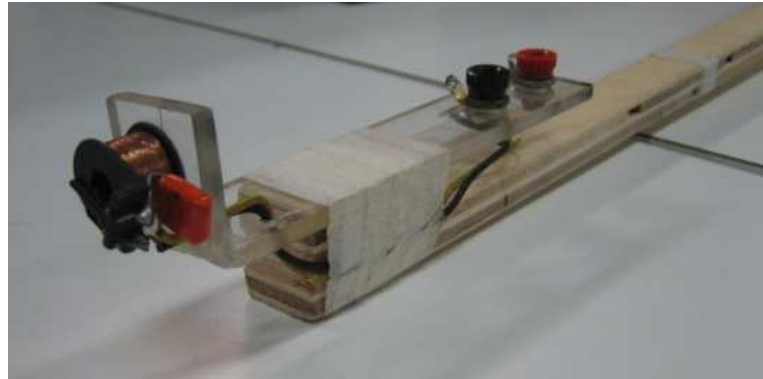


Tarefas da semana (primeira parte)



- 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?

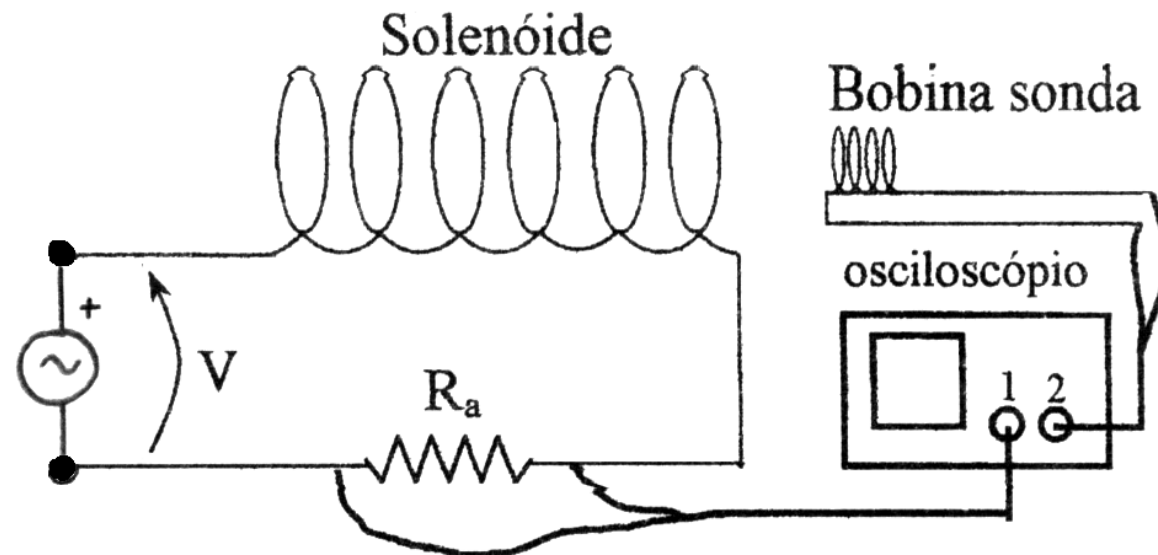
Tarefas da semana (segunda parte)



- 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?

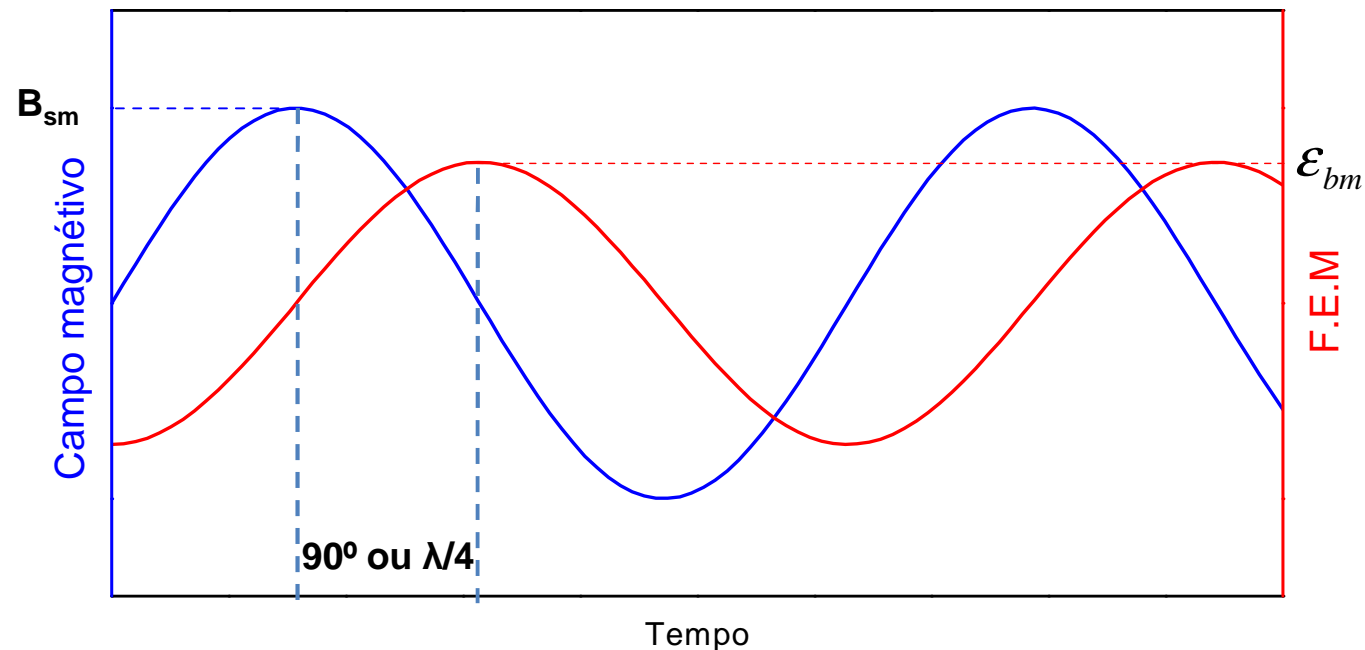
A FEM e o Campo Magnético

- Corrente $i_s(t) = i_{sm} \text{sen}(\omega t)$
- Campo $B_s(t) = \mu_0 n_s i(t)$
- Fluxo $N_b \phi_b = (n_b l_b)(A_b B_s(t))$
- F.E.M. $\varepsilon_b(t) = -n_b l_b A_b \mu_0 n_s \frac{d}{dt} i_s(t) = -n_b l_b A_b \mu_0 n_s \omega i_{sm} \cos(\omega t)$



A FEM e o Campo Magnético

- Corrente $i_s(t) = i_{sm} \text{sen}(\omega t)$ fora de fase
- Campo $B_s(t) = \mu_0 n_s i(t)$
- Fluxo $N_b \phi_b = (n_b l_b)(A_b B_s(t))$
- F.E.M.
$$\begin{aligned} \varepsilon_b(t) &= -n_b l A_b \mu_0 n_s \frac{d}{dt} i_s(t) = -n_b l A_b \mu_0 n_s \omega i_{sm} \cos(\omega t) \\ &= -\varepsilon_0 \cos(\omega t) \end{aligned}$$



A FEM e o Campo Magnético

- Corrente $i_s(t) = i_{Sm} \text{sen}(\omega t)$
- Campo $B_S(t) = \mu_0 n_s C(\theta) i(t)$
- Fluxo $N_b \phi_b = (n_b l_b)(A_b B_S(t))$

- F.E.M.
$$\varepsilon_b(t) = -n_b l A_b \mu_0 n_s C(\theta) \frac{d}{dt} i_s(t) = -n_b l A_b \mu_0 n_s \omega C(\theta) i_{Sm} \cos(\omega t)$$

$$= -\varepsilon_0 \cos(\omega t)$$

fora de fase

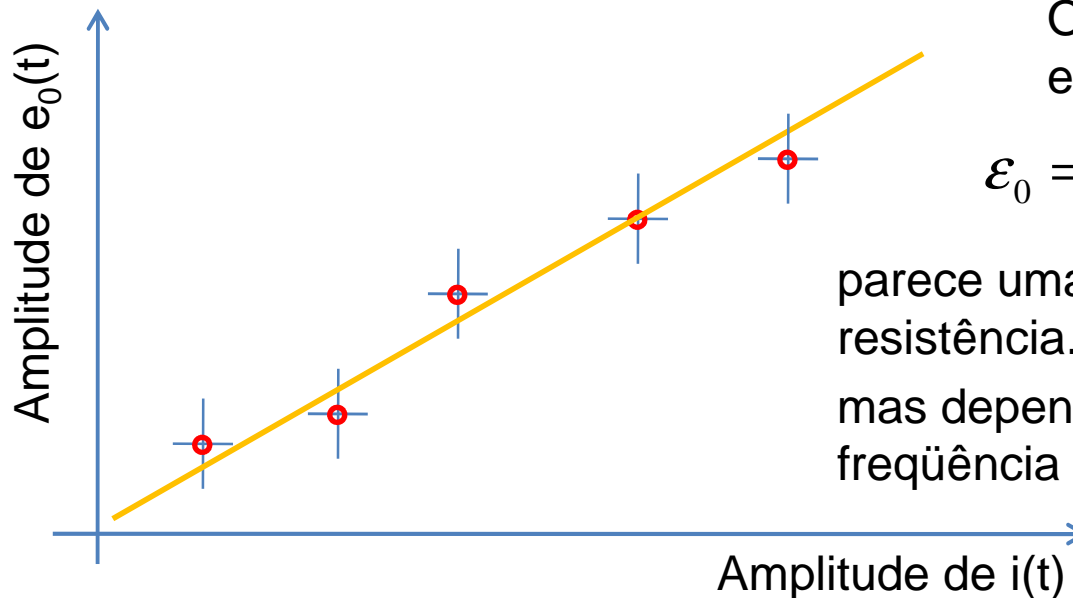
O que lembra esta expressão?

$$\varepsilon_0 = (n_b l A_b \mu_0 n_s \omega) i_{Sm}$$

parece uma resistência...

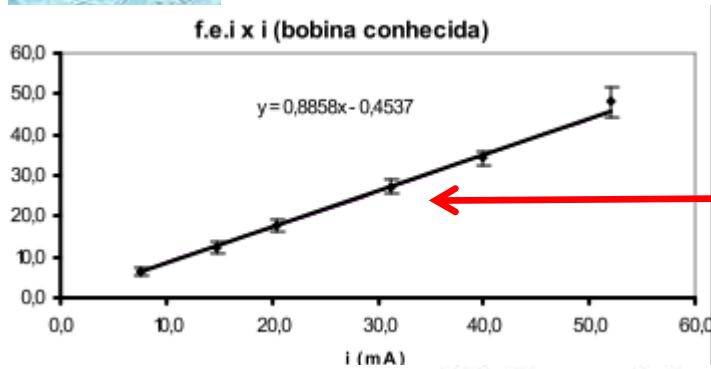
mas depende da frequência

É uma impedância que vem da indutância das bobinas!



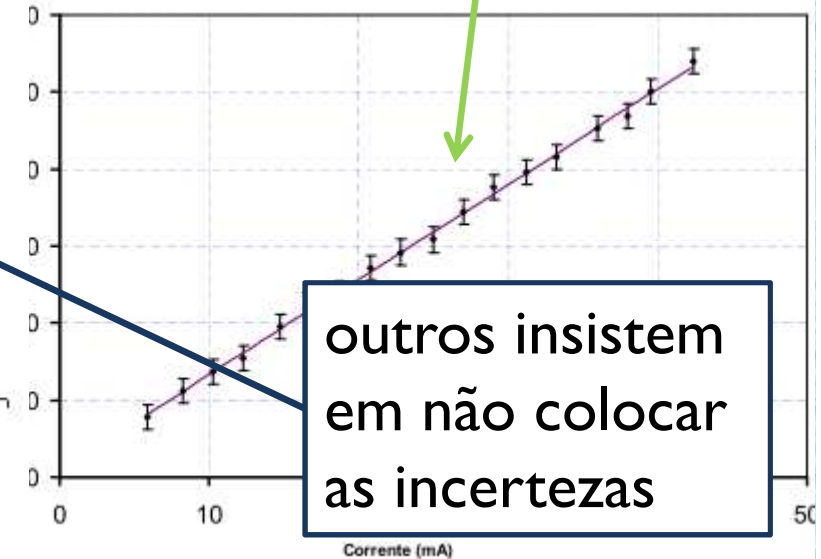
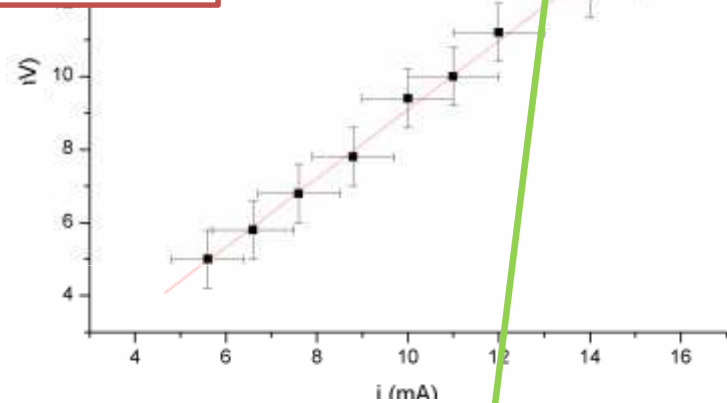
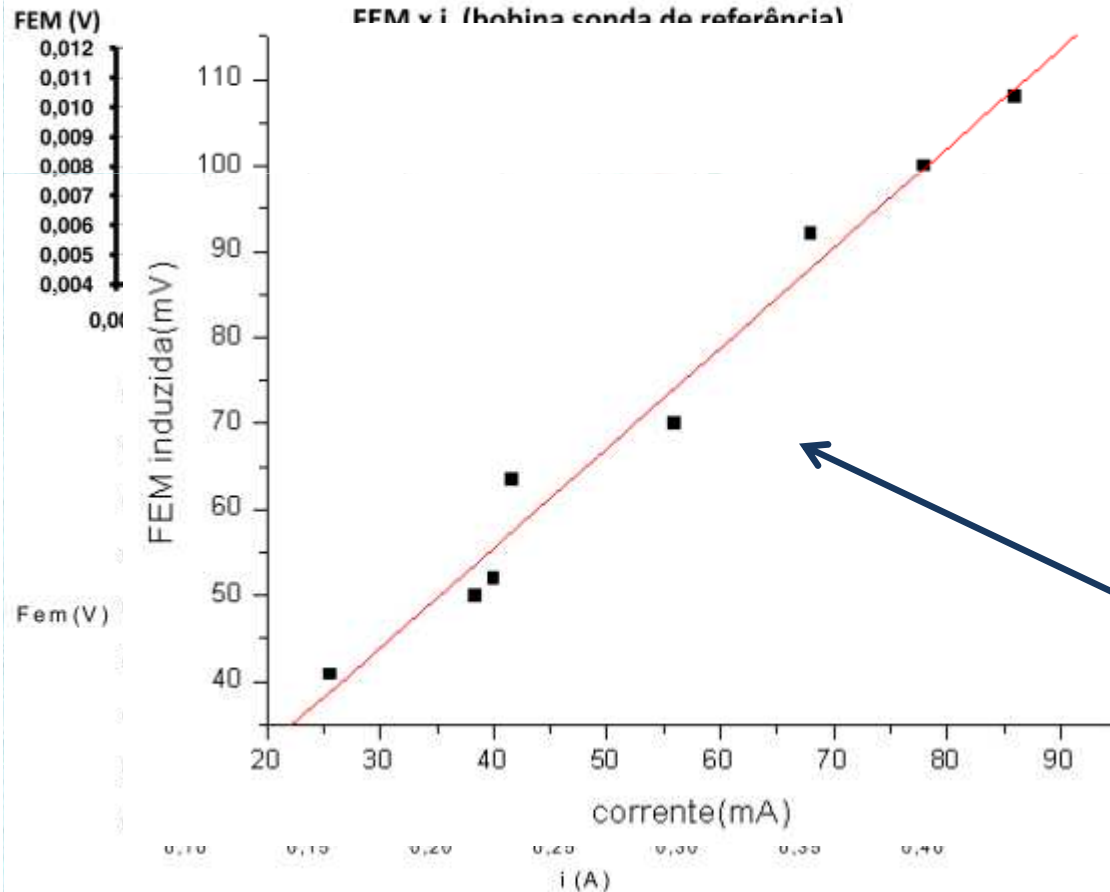


Conhecida



Alguns mediram poucos pontos

outros mediram muitos pontos

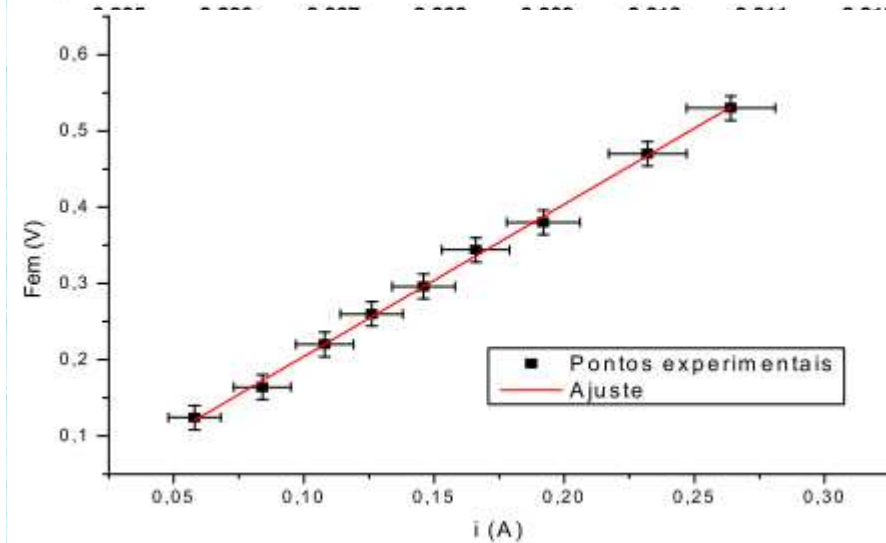
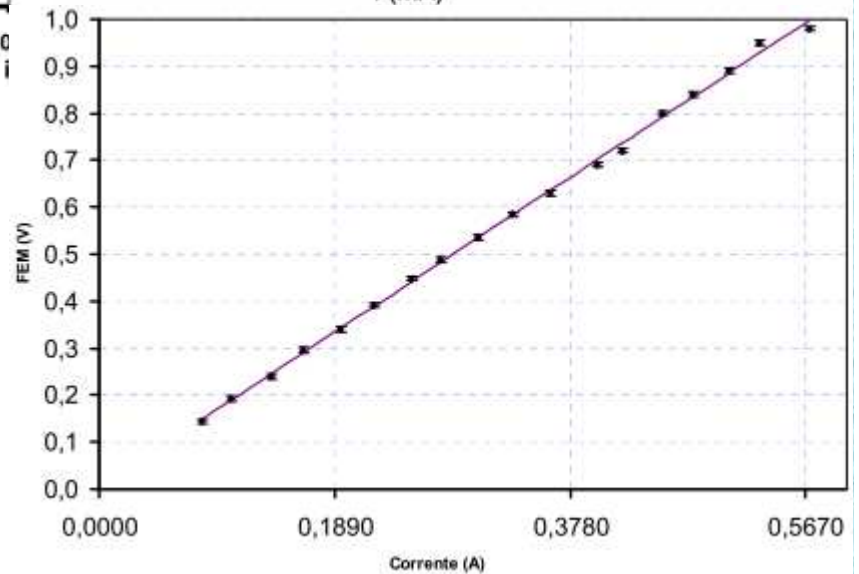
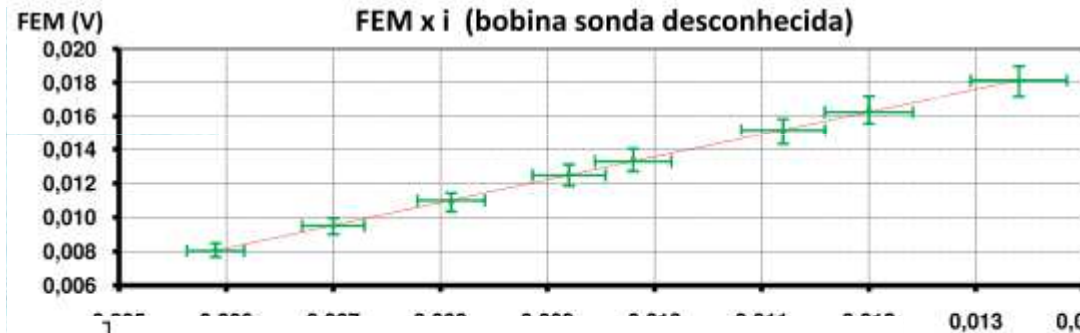
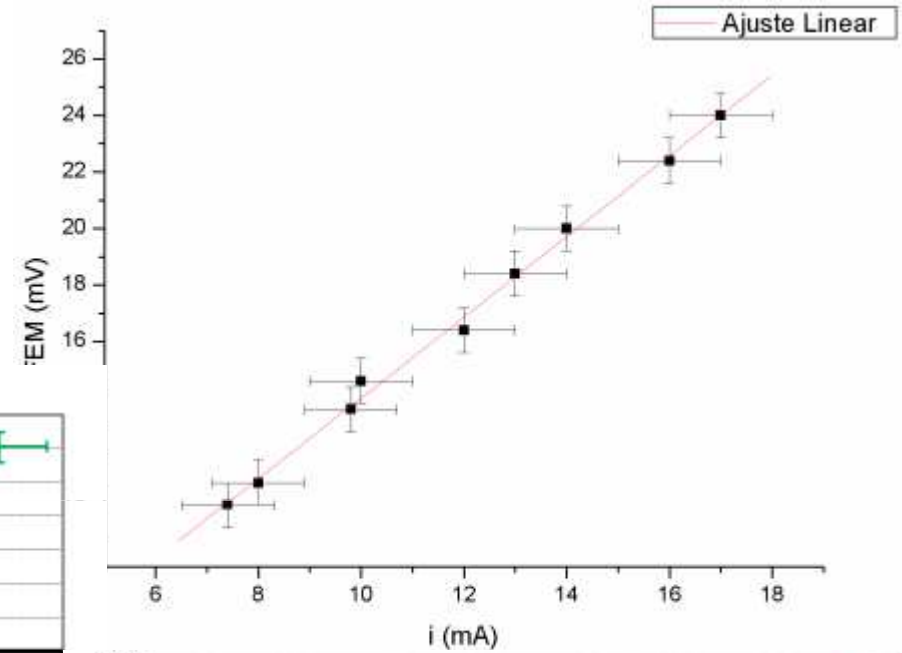
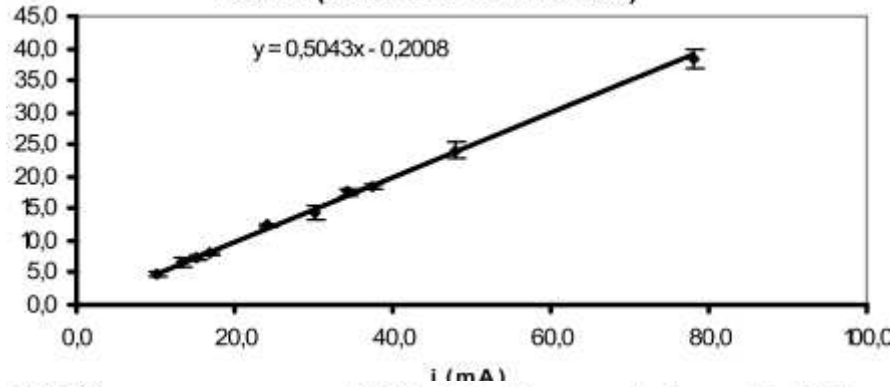


outros insistem em não colocar as incertezas



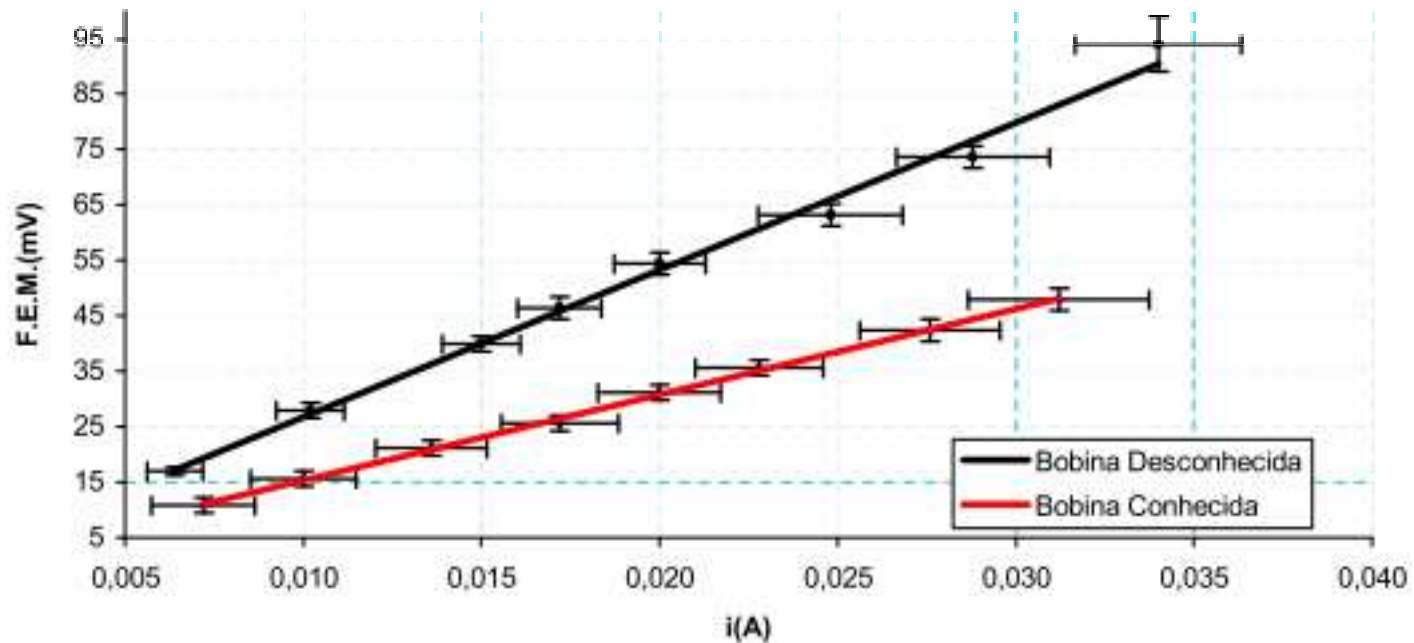
Desconhecida

f.e.i x i (bobina desconhecida)



Comparando as duas

- É muito mais fácil de visualizar o que está acontecendo se compararmos as duas medidas... um grupo fez isso:



Valores dos diversos grupos

	Formula	Conhecida		Desconhecida	
		Coef (V/A)	Aef (m2)	Coef (V/A)	Aef (m2)
E01	$\varepsilon = \frac{NA\omega\mu}{2\pi r} I$	0,8858	0,083	0,5043	<Aef
E02	$\varepsilon_0 = n_b A_b \omega \frac{\mu_0 N_s i_0}{2L_s}$		0,01128		0,01885
E04	$\varepsilon_0 = \frac{\mu_0 N_s}{2L_s} (\cos\theta_1 + \cos\theta_2) \omega NA i_0$	0,94(9)	0,10(2)	1,43(8)	0,14(1)
E05	$A_{bef} = e_b / w B_{sm}$ $B_{sm} = (\mu_0 N_s i_{sm} / L_s) \cdot (\cos\theta_1 + \cos\theta_2) / 2$	0,81(5)	0,096(6)	1,35(8)	0,162(9)
E07		1,61(7)	0,064240(7)	1,91(21)	0,1058(2)
E12	$angular = (A_{bef} \omega \mu_0 N_s) (\cos\theta_1 + \cos\theta_2) / 2L_s$	1,22(12)	0,0989(99)	1,99(8)	0,1526(65)
E13	$\varepsilon = \frac{-N \cdot A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \cdot i(t) \cdot (\cos\theta_1 + \cos\theta_2) \cdot N_s \cdot \mu_0}{2L_s}$	1,25(3)	0,0960(2)	1,742(4)	0,1890(3)

0,09m2

0,16 a 0,28m2



Campo Magnético da Terra

- Deve existir alguma preocupação do alinhamento do solenóide com o campo magnético local? Porque?

O solenóide estudado **NÃO** foi alinhado com o campo magnético terrestre. Porém foi percebido que não tomar tal cuidado foi um **ERRO**, já que a magnitude média do campo magnético terrestre é em torno de $50 \mu\text{T}$, enquanto o campo magnético no interior do solenóide, como visto acima, foi em torno de $15 \mu\text{T}$.

Durante a experiência não foi levado em consideração o campo magnético terrestre, aproximadamente constante, pois este não influiria na fem induzida, já que somente campos variáveis geram corrente nas bobinas sonda.

Além disso deixamos a bobina fora do solenóide com o osciloscópio ligado e claramente, não detectamos nenhum campo magnético forte o suficiente para fazer qualquer medição, portanto, não precisaríamos nos preocupar com o campo magnético da Terra.

Notas...

A área efetiva da primeira bobina é menor que da segunda bobina, um resultado estranho que só poderia ser justificado pelo fato de a bobina 1 ter apenas uma camada de espiras enquanto a segunda que é consideravelmente menor, possui camadas sobrepostas, explicando o resultado obtido, mas essa hipótese não é muito plausível, pois a diferença entre as áreas é muito grande, fortalecendo a hipótese de que fizemos medições erradas.

0,064240(7) m²

Teorico: 0,09

0,1058(2) m²

0,18

Introdução:

Correntes elétricas estáveis no tempo geram campos magnéticos também estáveis no tempo, mas campos magnéticos estáveis não geram correntes elétricas estáveis. De fato, campos magnéticos constantes no tempo não transferem energia para cargas livres, isto é, não realizam trabalho sobre elas. Uma corrente constante, percorrendo um fio em repouso e próximo a outro fio, não induz corrente nesse outro fio.

Mapeamento do campo

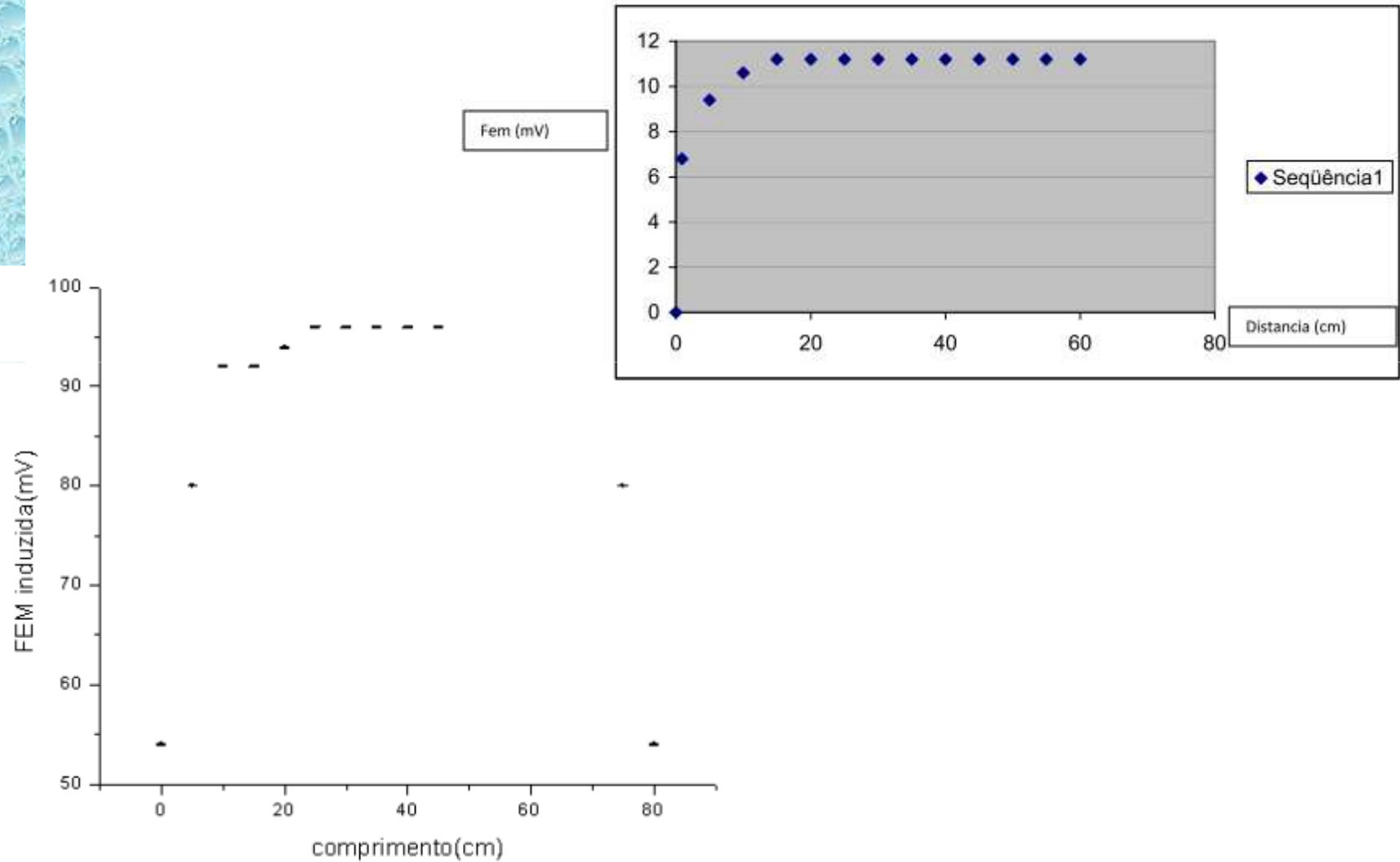
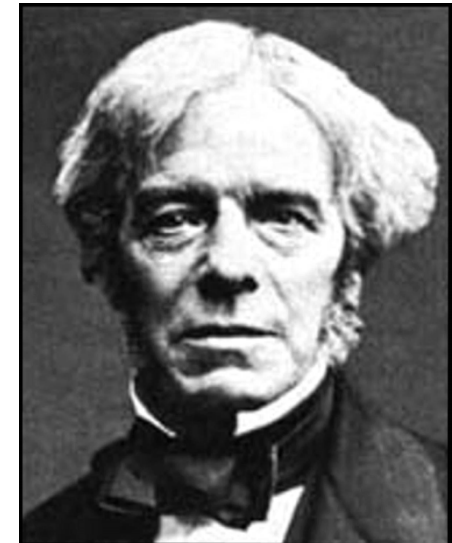


Gráfico 1. Variação da FEM induzida em mV, ao longo do solenóide. Incertezas para a FEM induzida não está no gráfico pois esquecemos de medi-la.

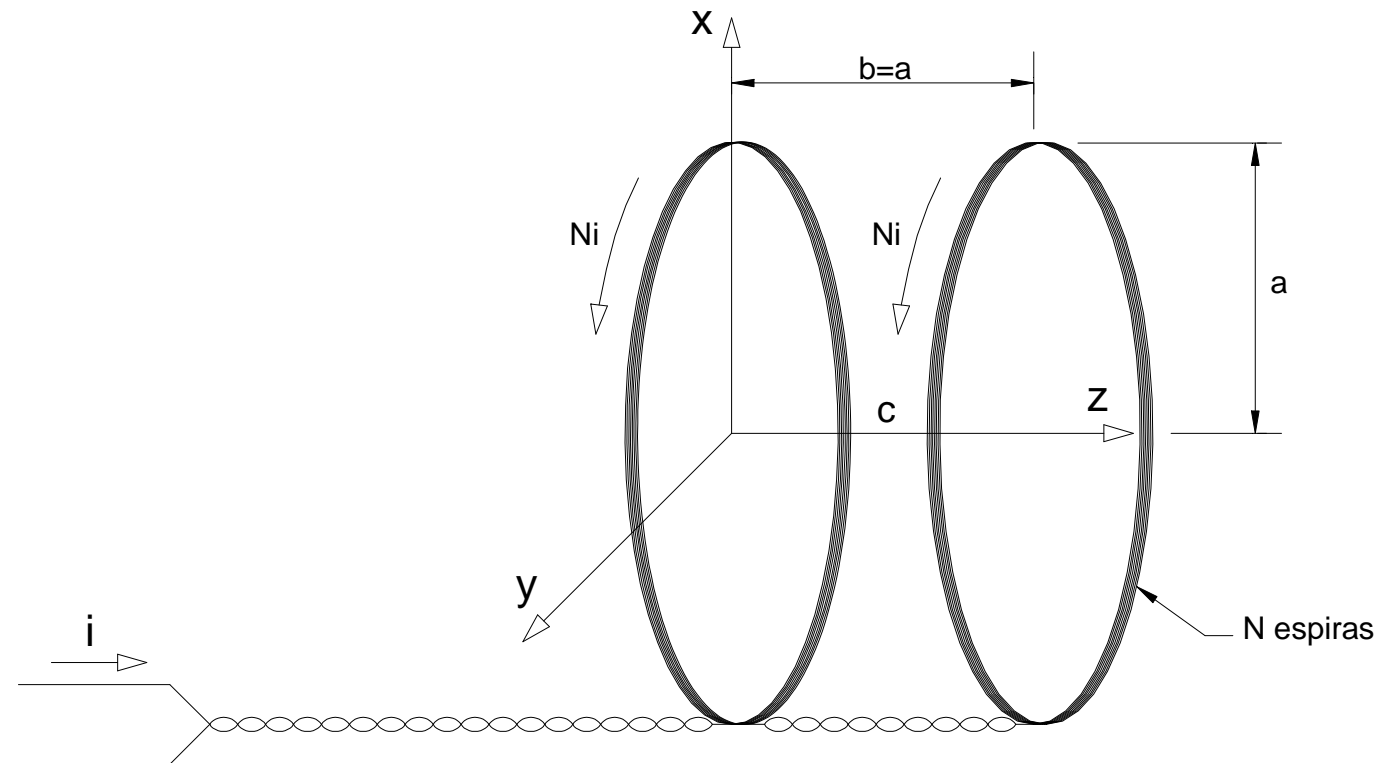
Esta Semana...A lei de Faraday



1791-1867

Lei de Faraday: mapeamento

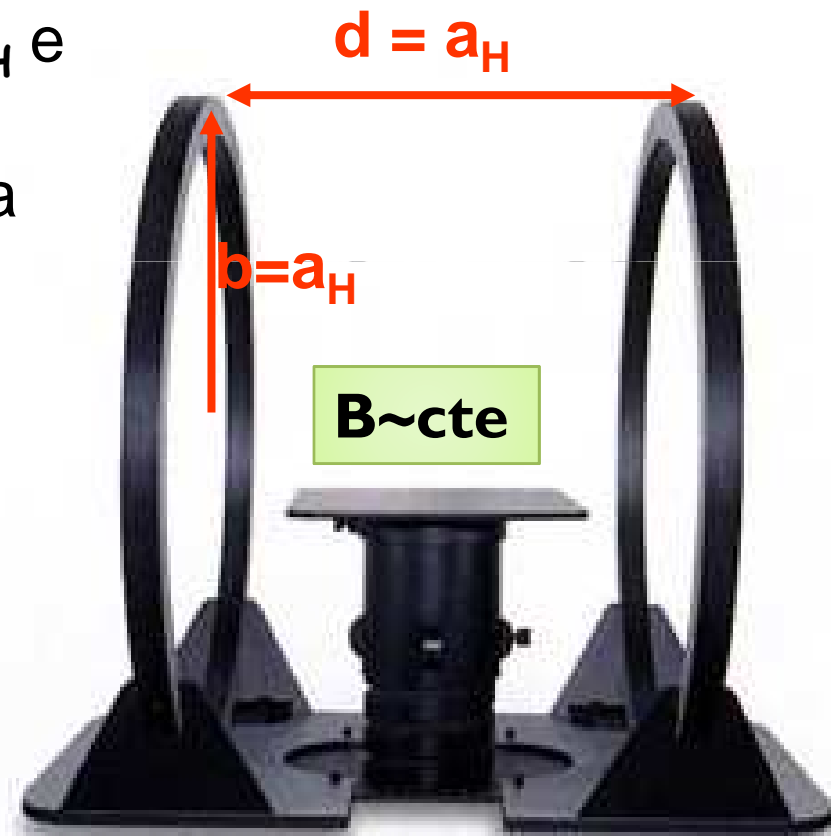
- O fenômeno da indução pode ser utilizado para mapear um campo elétrico desconhecido.
- Para mostrar como isso pode ser feito, vamos mapear o campo de uma configuração de correntes conhecida como **bobina de Helmholtz**.



Bobina de Helmholtz

A bobina de Helmholtz par de bobinas circulares de raio a_H e N_H espiras cada uma, separadas por uma distância $b = a_H$.

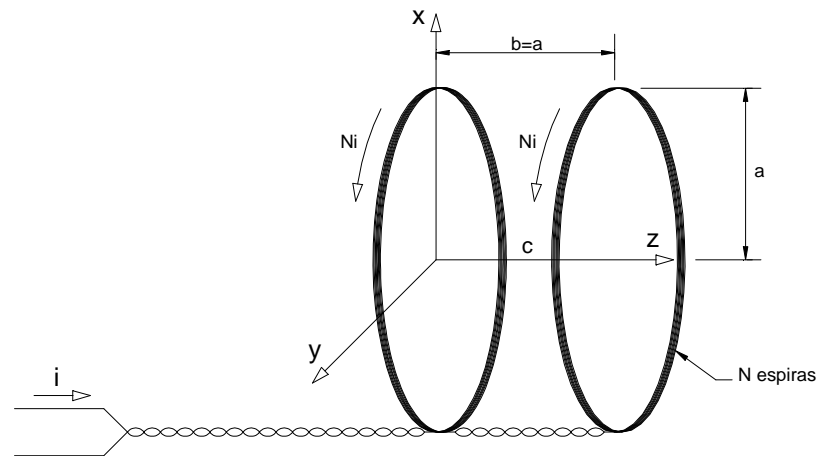
Essa configuração de correntes gera um campo quase uniforme no interior da bobina



Bobina de Helmholtz

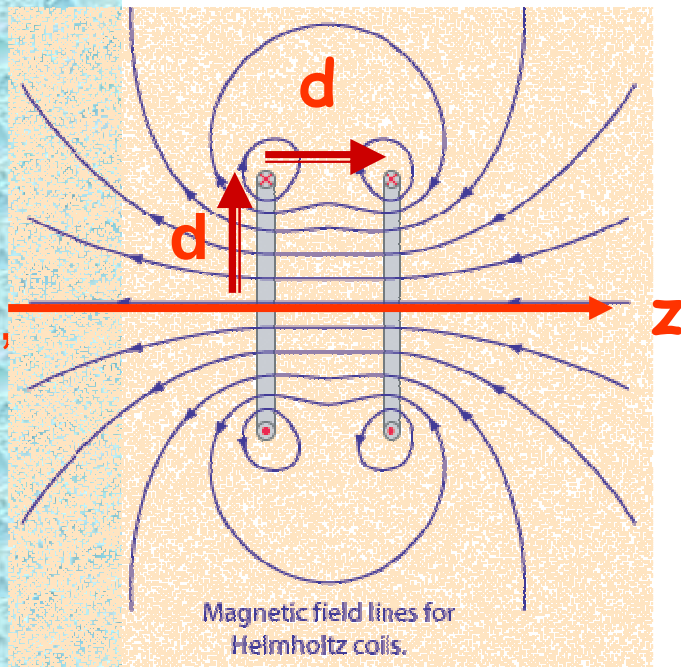
- Essa configuração permite o cálculo teórico do campo ao longo do eixo z . O procedimento não é complicado:
 1. Suponha que só exista uma bobina (raio= a) em $z=0$. Calcule o campo dessa bobina ao longo de z ($i_b = N_b i$).
 2. Superponha a esse campo o campo de outra bobina idêntica, mesma corrente, situada em $z=a$.
 3. Terá uma expressão para o campo, dependente de z , que pode ser comparada com a medida experimental

**A origem á
escolha sua!**

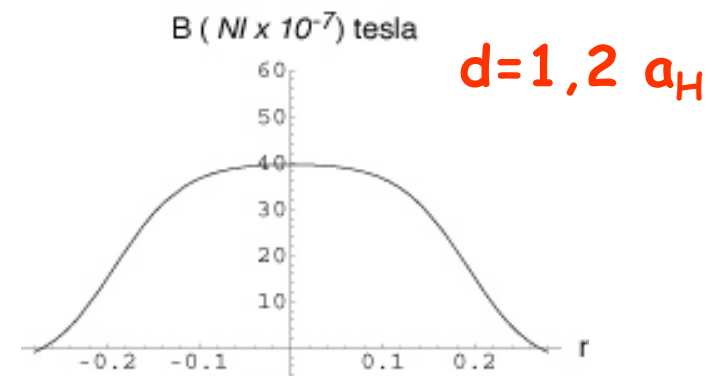
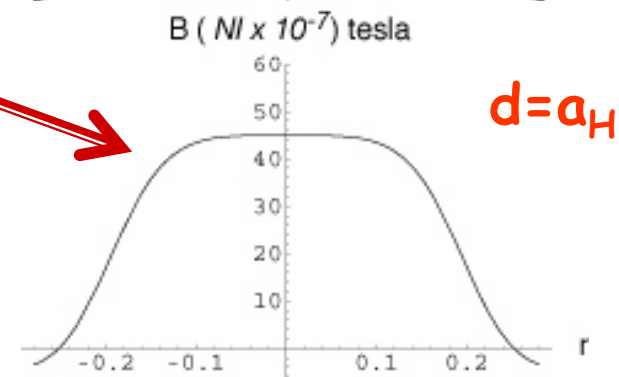
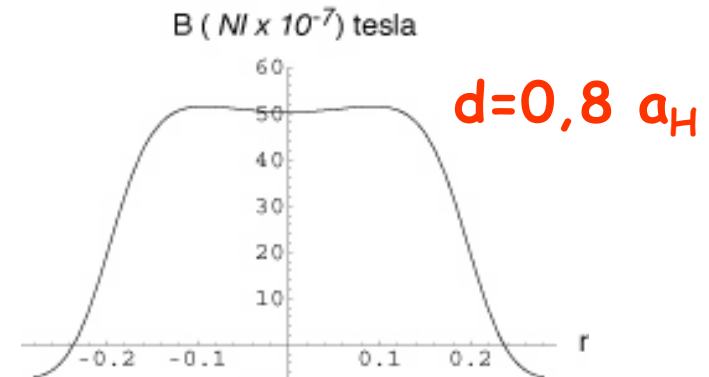


Helmholtz

O campo magnético B_z ao longo do eixo z , (que passa pelos centros das bobinas) depende da distância d entre as bobinas:

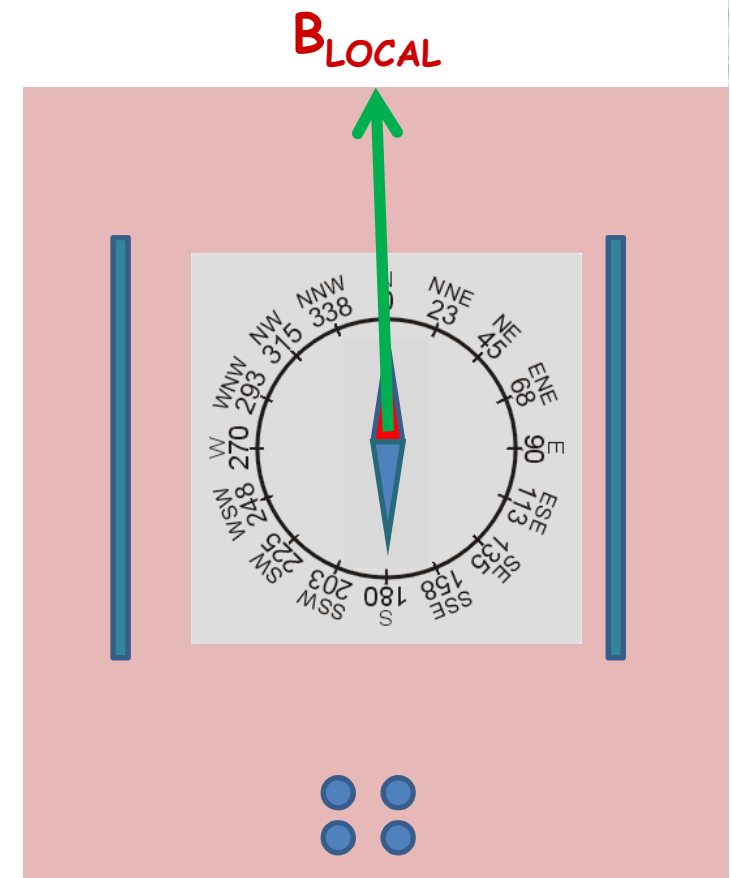


Esse é o campo da bobina de Helmholtz

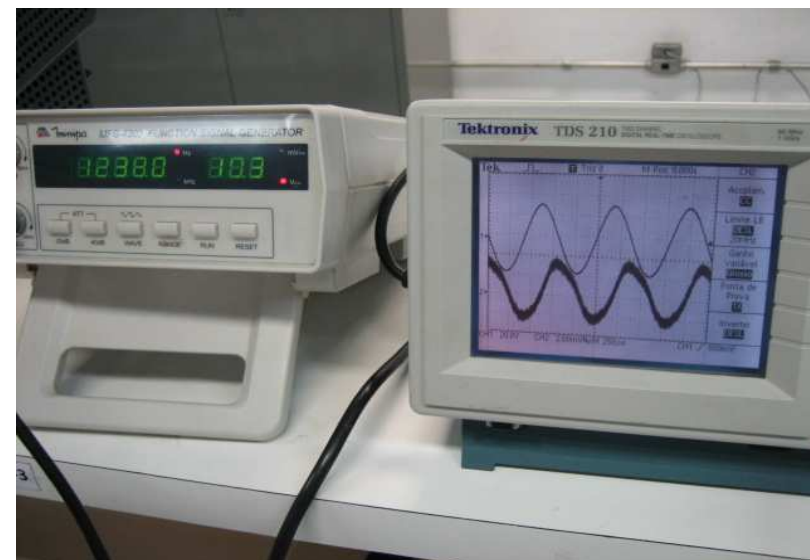
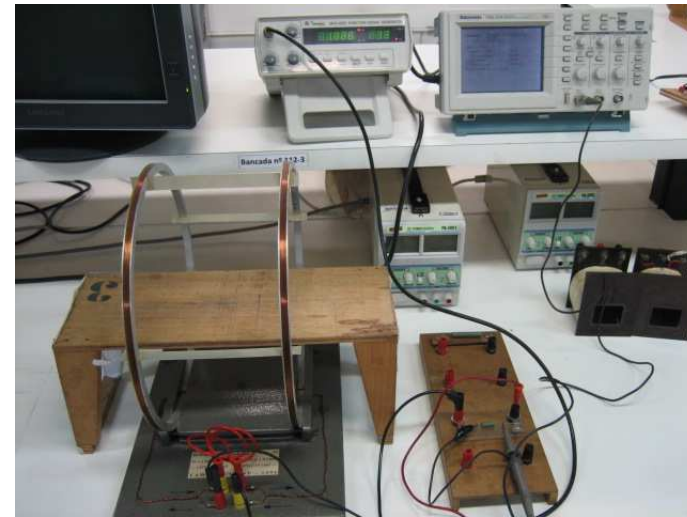
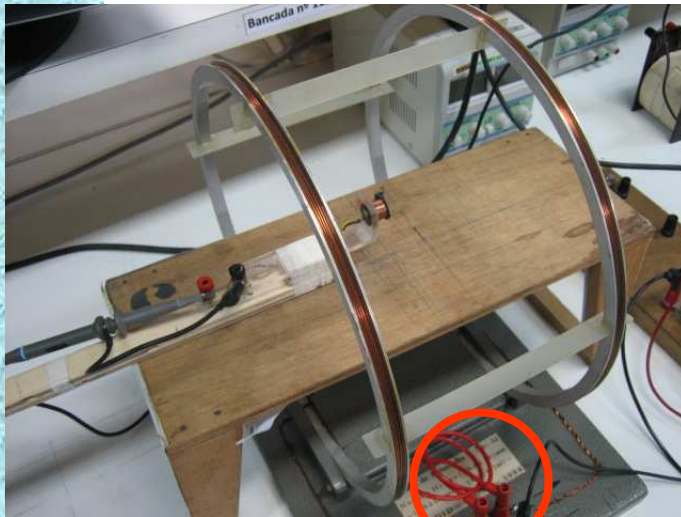


Lei de Faraday: Blocal?

- Antes de começar o mapeamento é necessário pensar sobre B_{local} .
- Coloque a bússola no interior da **bobina de Helmholtz** com ela desligada
- A agulha se alinha com B_{local}
- Como o campo local afeta as medidas que está fazendo?



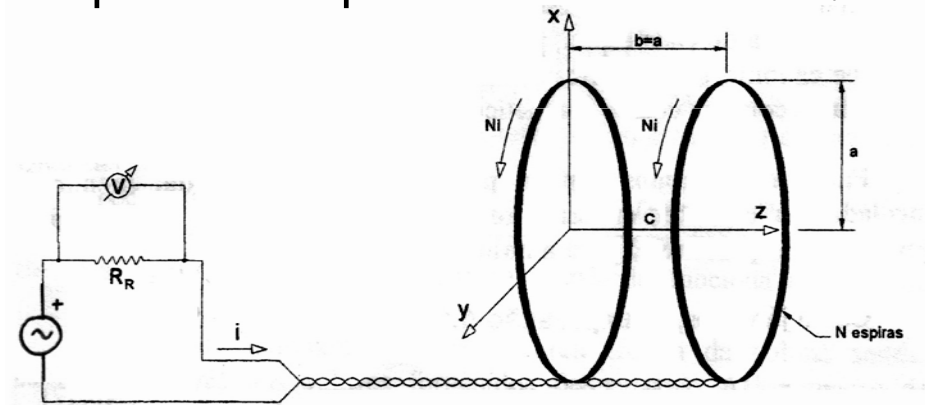
Lei de Faraday: montagem



Lei de Faraday: mapeamento

Vamos mapear o campo da bobina de Helmholtz **utilizando a bobina sonda menor que foi calibrada.**

Estamos interessados na **forma geométrica** e nos **valores** do campo magnético produzido pela bobina de Helmholtz.





Lei de Faraday: Helmholtz

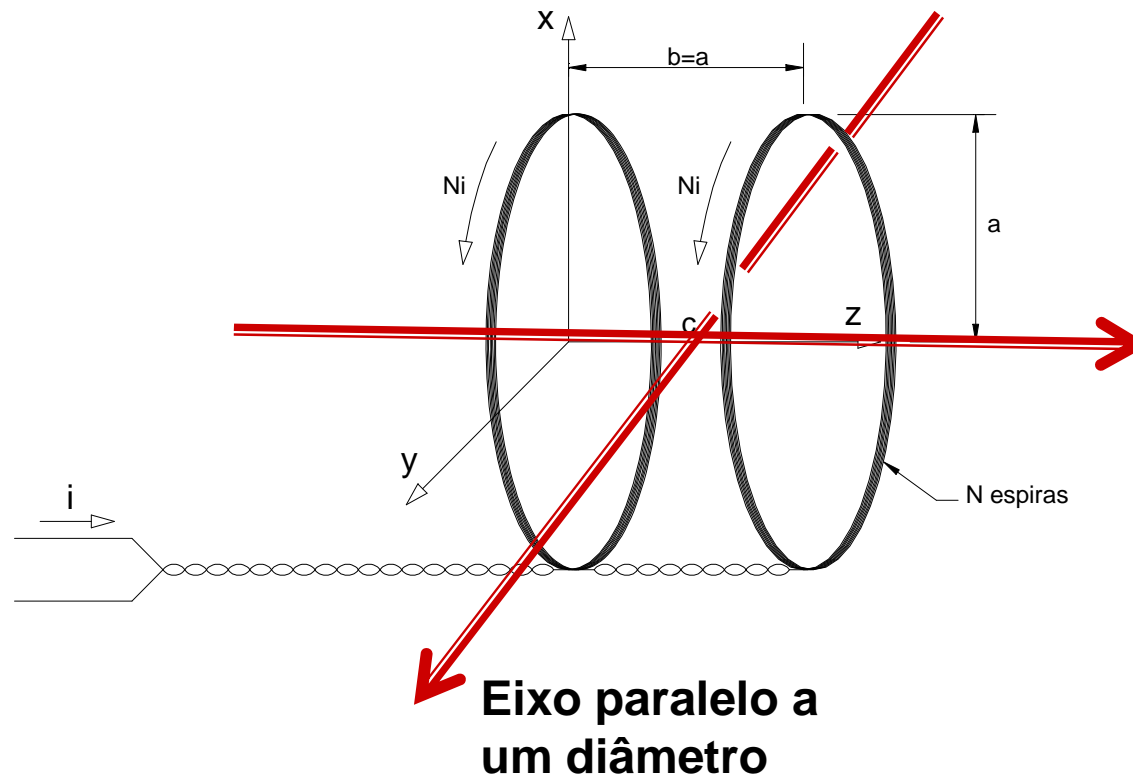
- Esse campo vai ser medido mas pode também ser:
 - simulado
 - calculado analiticamente
- **Simulação:** QField ou FEMM em escala e com a corrente usada na experiência.
- **Cálculo analítico:** no eixo z (que passa pelo centro das espiras), superpondo os campos das 2 espiras. Verificar analiticamente como o campo se comporta entre as duas espiras e onde ele é constante (derivada = 0)

Lei de Faraday: Helmholtz

- Montar o circuito para gerar o campo da **Bobina de Helmholtz**
 - Anote as características geométricas da bobina
 - Aplicar corrente alternada (máximo 1,5 A)
 - Escolher frequência adequada
 - Lembre-se que quanto maior a frequência maior o sinal induzido
- Utilizando a bobina sonda calibrada, medir o campo gerado pela **bobina de Helmholtz** ao longo do eixo-**z** e radial de **1 em 1cm**
 - Não se limitem somente entre as bobinas. Meça fora delas também.
- Comparar (graficamente) o valor **experimental** com previsões **teóricas** e da **simulação**, para o campo ao longo de **z**
 - Explicitar a fórmula teórica utilizada para **B(z)**

Lei de Faraday: Helmholtz

- Mapeamento ao longo dos eixos:
 - **Z**
 - paralelo ao diâmetro



hipóteses válidas?

- Para calcular o campo magnético usando uma bobina sonda a hipótese feita foi que o campo não varia dentro da área da bobina:

$$\varepsilon = -\left(\frac{dN\Phi_B}{dt}\right) \quad \Phi_B = \int \vec{B} \cdot \vec{n} da \equiv A_{b\text{total}} B = N_b A_b B$$

- Foi verificado que essa hipótese é verdadeira no caso do campo do solenóide. Lembra como verificou isso?
- E para o caso da **bobina de Helmholtz**? Será que a hipótese acima continua verdadeira?

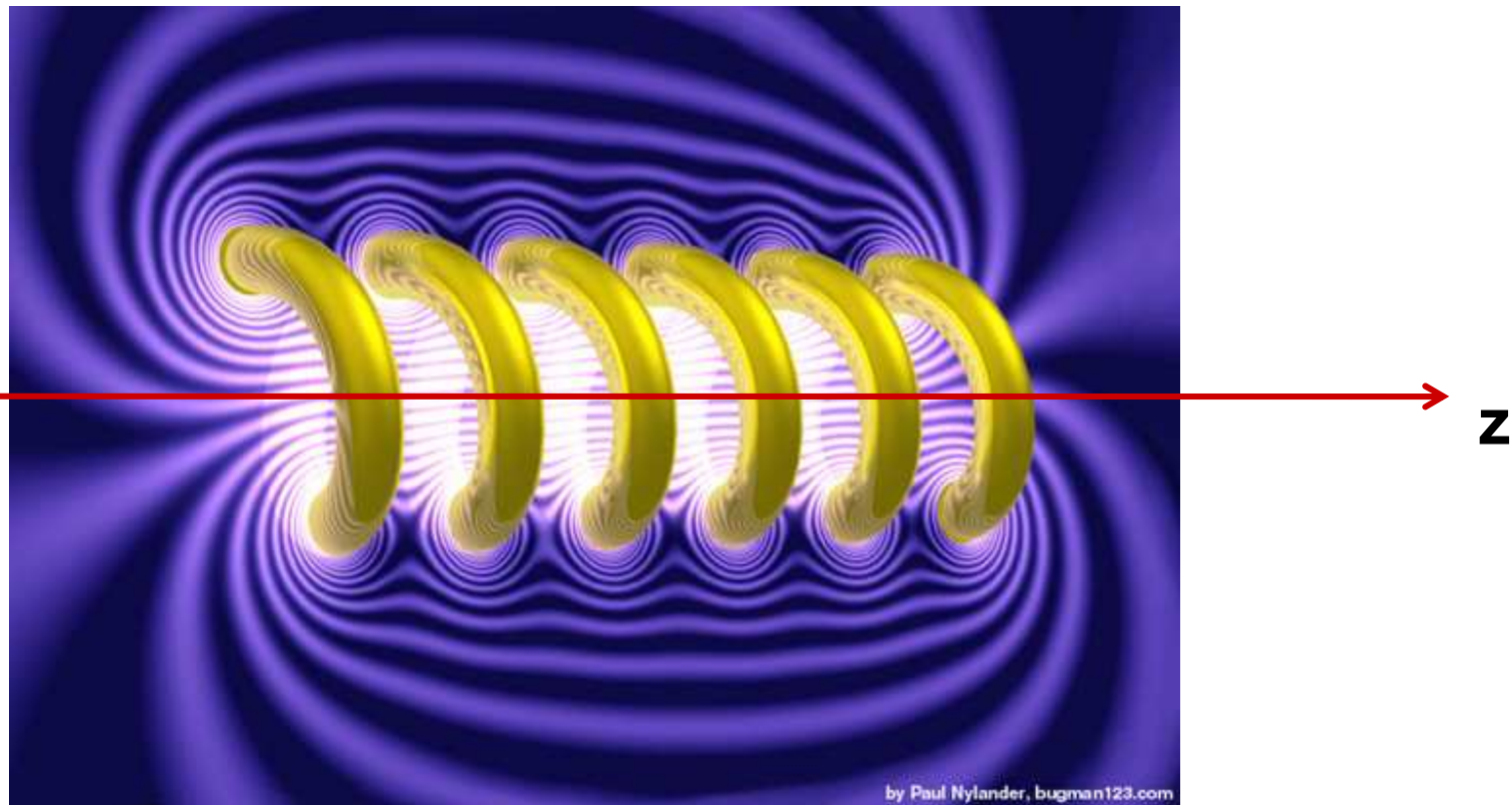


Helmholtz: verificação

- Você vai usar o programa **FEMM** (ou **Qfield**) para simular o campo da **bobina de Helmholtz**.
- Aproveite essa simulação para verificar se o campo B_H é constante dentro da área da **bobina sonda** utilizada.

campo de borda do solenóide

- O solenóide é finito, portanto em algum ponto dentro do solenóide o campo deixa de ser constante e começa a cair e continua caindo fora.





campo de borda do solenóide

- Queremos saber em que ponto dentro do solenóide isso ocorre. Ou, até que ponto o campo do solenóide pode ser considerado constante.
- Mapear o campo do solenóide ao longo do eixo **z** que passa pelo seu centro, de **1** em **1cm**. Comece no centro do solenóide e continue até o campo se aproximar de zero (até onde for possível medir dentro dos erros experimentais).
- Faça um gráfico desse campo em função de **z** e superponha a ele o resultado analítico e o resultado da simulação.
- Comente



Lei de Faraday: campo de borda do solenóide

- Na experiência da calibração da bobina sonda, você se preocupou em colocar a bobina sonda no eixo do solenóide?
 - Sim?
 - Não?
 - Porque?
- E no mapeamento do campo do solenóide, deve haver essa preocupação? Porque?



Lei de Faraday: comprovação

- **Para hoje:**
- Mapear o campo da bobina de Helmholtz
- Simular esse campo
- Mapear o campo do solenóide
- Simular esse campo
- **Superpor dados à simulação e ao cálculo analítico: tudo no mesmo gráfico para comparação tanto para o campo da bobina de Helmholtz quanto para o campo do solenóide.**
- Prestar atenção na incerteza espacial do mapeamento experimental.
A bobina não é pontual. Ela possui dimensões que geram uma imprecisão na medida de posição. **Estimar esta incerteza.**

Lei de Faraday: Helmholtz

- Lembretes:

- Área da sonda p/ comp da lei de Faraday = $0,093\text{m}^2$
- Área da bob sonda p/ mapeamento; = $\sim 0,14$ a $0,19\text{m}^2$
- Bh varia de acordo com a corrente, a ordem de grandeza $\sim 10^{-5}\text{T}$
- O melhor é colocar a tensão máxima do gerador de áudio - saída traseira que é a de baixa impedância, se forem os geradores antigos. Se forem os novos a saída de baixa imp está no dispositivo que está em cima dele.