

Lei de Faraday

Notas de aula: LabFlex:
www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex

Profa. Eloisa Szanto
eloisa@dfn.if.usp.br
Ramal: 7111
Pelletron

Física Exp. 3
Aula 2, Experiência 3
Bobina de Helmholtz

Prof. Henrique
Barbosa
hbarbosa@if.usp.br
Ramal: 6647
Basílio, sala 100

Prof. Nelson Carlin
nelson.carlin@dfn.if.usp.br
r
Ramal: 6820
Pelletron

Prof. Paulo
Artaxo
artaxo@if.usp.br
Ramal: 7016
Basilio, sala 101

Tarefas da semana (1)

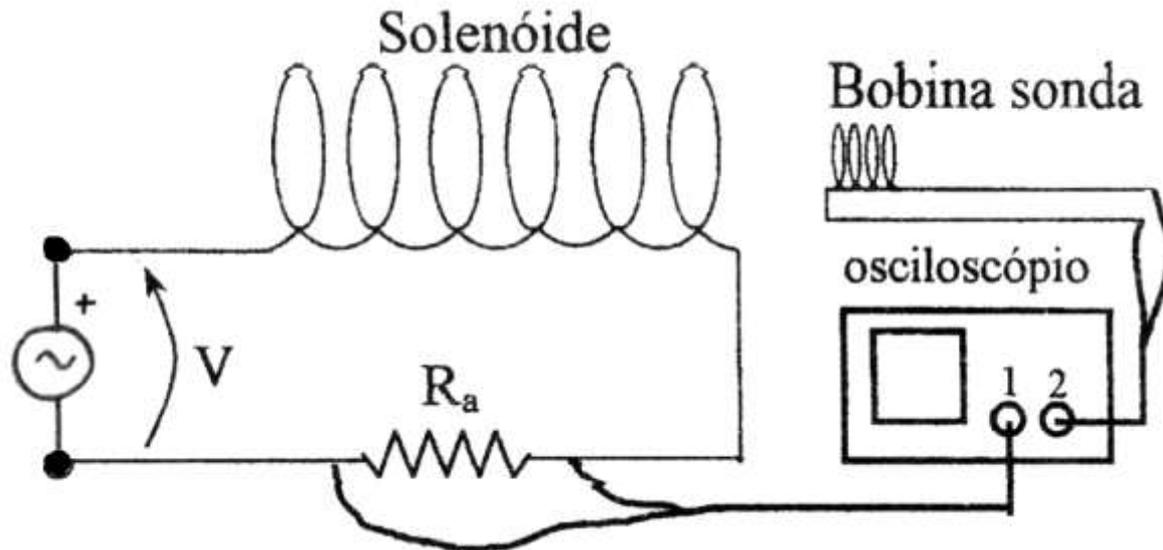
- **Calibração da bobina sonda em carretel:**
 - Usando a bobina sonda de área desconhecida, fazer gráfico da **f.e.m.** induzida em função da corrente no solenóide.
 - Ajustar os dados com a função apropriada e determinar a área efetiva da bobina sonda em carretel e compare com os resultados dos colegas.
 - Medir a defasagem entre o campo magnético (corrente) e a **f.e.m.** na bobina sonda (só precisa fazer para um valor de corrente, certo?).
 - Anotar número da bobina sonda que utilizou → **procure usar a mesma nas próximas aulas.**

Tarefas da semana (2)

- Para calibrar a bobina sonda com um solenóide a hipótese feita foi que o campo não varia dentro da área da bobina.
 - Verifique experimentalmente se isso é verdade. A posição da bobina, em relação à altura (diâmetro) dentro do solenóide afeta a medida? E o ângulo?
 - Explique como fez essa verificação e porque ela pode ser considerada confiável.
- Compare seu resultado com os de seus colegas.
- Comente.
- **Pergunta:** Deve existir alguma preocupação do alinhamento do solenóide com o campo magnético local? Porque?

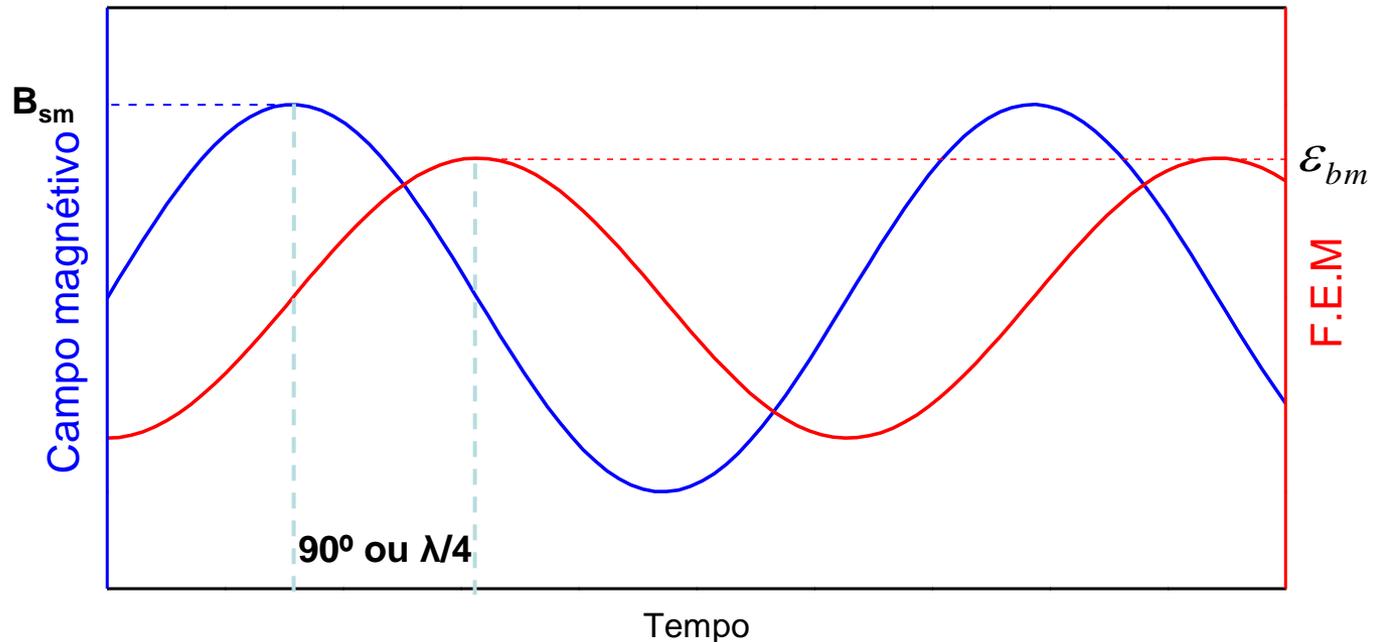
A FEM e o Campo Magnético

- 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. $\varepsilon_b(t) = -n_b l A_b \mu_0 n_s \frac{d}{dt} i_s(t) = -n_b l A_b \mu_0 n_s \omega i_{sm} \cos(\omega t)$



A FEM e o Campo Magnético

- Corrente $i_s(t) = i_{sm} \boxed{\text{sen}(\omega t)}$ 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. $\varepsilon_b(t) = -n_b l A_b \mu_0 n_s \frac{d}{dt} i_s(t) = \boxed{-n_b l A_b \mu_0 n_s \omega i_{sm}} \boxed{\text{cos}(\omega t)}$
 $= \boxed{\varepsilon_0} \text{cos}(\omega t)$



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

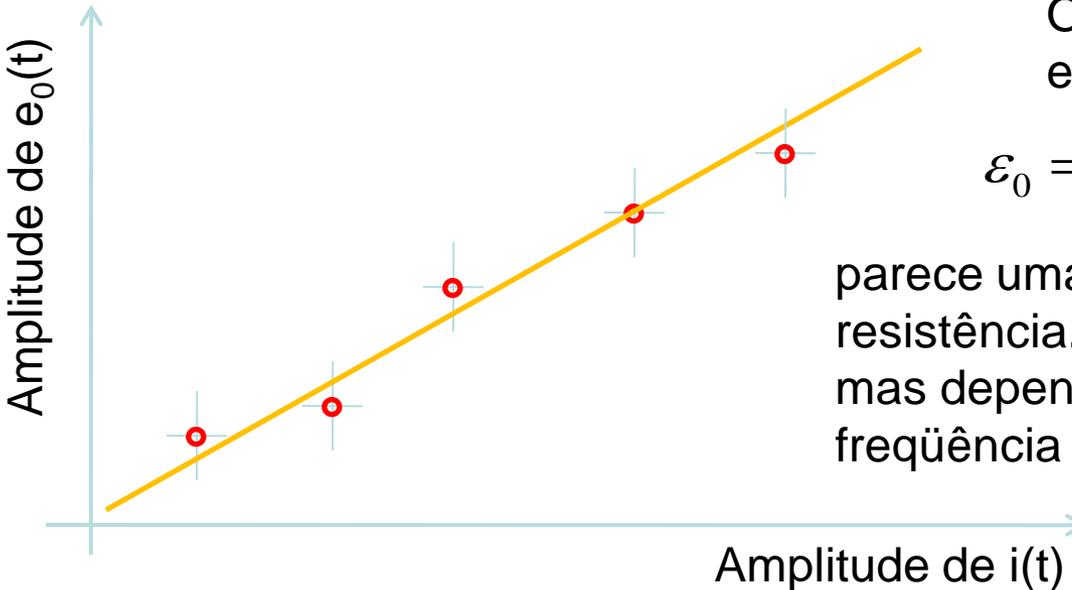
$$N_b \phi_b = (n_b l_b)(A_b B_s(t))$$

• F.E.M.

$$\begin{aligned} \varepsilon_b(t) &= -n_b l A_b \mu_0 n_s \frac{d}{dt} i_s(t) = -n_b l A_b \mu_0 n_s \omega i_{Sm} \cos(\omega t) \\ &= -\varepsilon_0 \cos(\omega t) \end{aligned}$$

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!

Como calcular a área efetiva?

Seja

$$\varepsilon_{bm} = A_{bef} w \frac{\mu_0 N_s}{L_s} \cos\left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right) i \quad (1)$$

Pelo fato da bobina sonda ter sido colocada próxima ao meio do solenoide , então podemos considerar que $\cos\left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right) \sim 1$, isso é factível pois nas medições a variação da f.e.i. era muito pequena por deslocamentos no eixo do raio do solenoide próximo ao meio, e também para deslocamentos transversais ao eixo do raio. Com isso, quando fizermos o ajuste de f.e.i. por i , a área efetiva da bobinha sonda será

$$A_{bef} = \frac{a L_s}{w \mu_0 N_s} \quad (2)$$

Onde a é o coeficiente angular do ajuste.

Correção do solenóide finito

- A correção era pequena:

- $\theta \sim 11$ graus

- $\cos \theta \sim 0.98$

$$B_{sm} = \frac{\mu_0 \cdot N_S}{L_S} \cdot \left(\frac{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}{2} \right) \cdot i_{sm} \sim 1$$

Pelo fato da bobina sonda ter sido colocada próxima ao meio do solenoide, então podemos considerar que $\cos \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \sim 1$, isso é factível pois nas medições a variação da f.e.i. era muito pequena por deslocamentos no eixo do raio do solenoide próximo ao meio, e também para deslocamentos transversais ao eixo do raio. Com isso, quando fizermos o

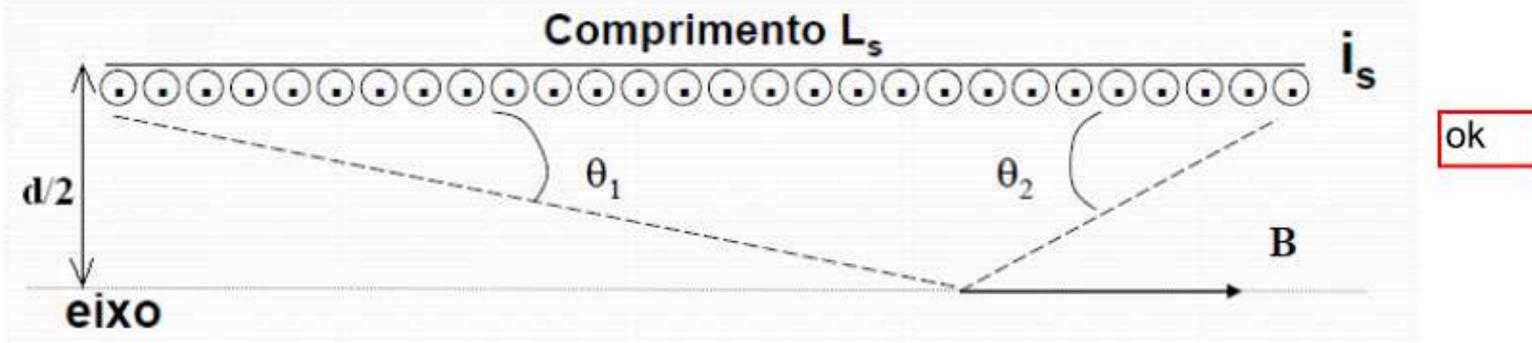


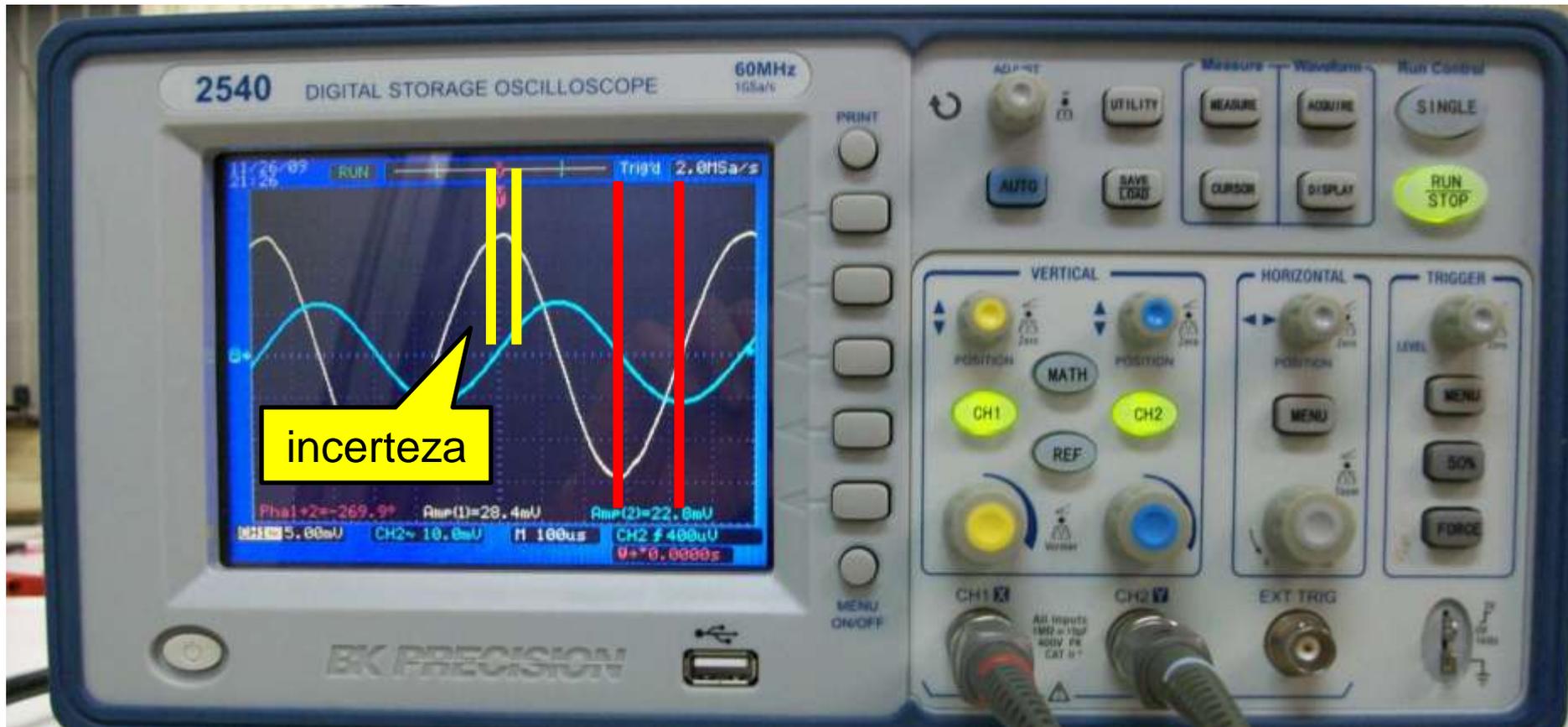
Figura 1: Arranjo interno do solenóide

A bobina sonda foi posicionada no centro do solenóide, ou seja, 40 cm dentro do solenóide e há 8,2 cm das extremidades do diâmetro, com essas medidas verificamos que os valores de θ_1 e θ_2 eram os mesmos, esse valor foi calculado a partir do $\cos \left(\text{tg}^{-1} \frac{8,2}{40} \right)$, obtendo assim o valor de 0,979.

ok

Como calcular a defasagem?

Medindo a defasagem entre as ondas da fem e da tensão no resistor, mediu-se o valor de $\Delta x = 80 (4) \mu s$, sendo que o comprimento de onda medido foi $\lambda = 330 (4) \mu s$ e a razão é $\Delta x / \lambda = 0,242(12)$, sendo o esperado $0,25$, isto é, defasagem de 90° , e com isso o resultado é compatível em uma incerteza.



Posição

Para verificar se o campo variava dentro da área do solenóide, a bobina foi movida radialmente e ao longo do eixo do solenóide e foi constatado que não havia alteração significativa na corrente induzida, as alterações maiores ocorreram apenas nas bordas do solenóide, a partir disso, pode-se concluir que o campo é constante dentro da área.

Porém, ao variar a bobina sonda os ângulos θ_1 e θ_2 sofriam alterações devido ao arranjo do solenóide e bobina, como já ilustrado na figura 1. A alteração desses valores interfere diretamente com o cálculo do valor da área, porém não gera mudanças muito significativas.

Pelo fato da bobina sonda ter sido colocada próxima ao meio do solenoide, então podemos considerar que $\cos\left(\frac{\theta_1+\theta_2}{2}\right) \sim 1$, isso é factível pois nas medições a variação da f.e.i. era muito pequena por deslocamentos no eixo do raio do solenoide próximo ao meio, e também para deslocamentos transversais ao eixo do raio. Com isso, quando fizermos o

Tabela 2 - Verificação da hipótese de não variação do campo magnético dentro da área da bobina.

Verificação da variação do campo dentro da área da bobina						
Medidas	1	2	3	4	5	6
Distância (cm)	4,50 (5)	16,50 (5)	31,80 (5)	34,00 (5)	37,40 (5)	45,40 (5)
Tensão (mV) (Campo B)	492,0 (6)	492,0 (6)	488,0 (8)	492,0 (6)	492,0 (6)	492,0 (6)

Campo da Terra

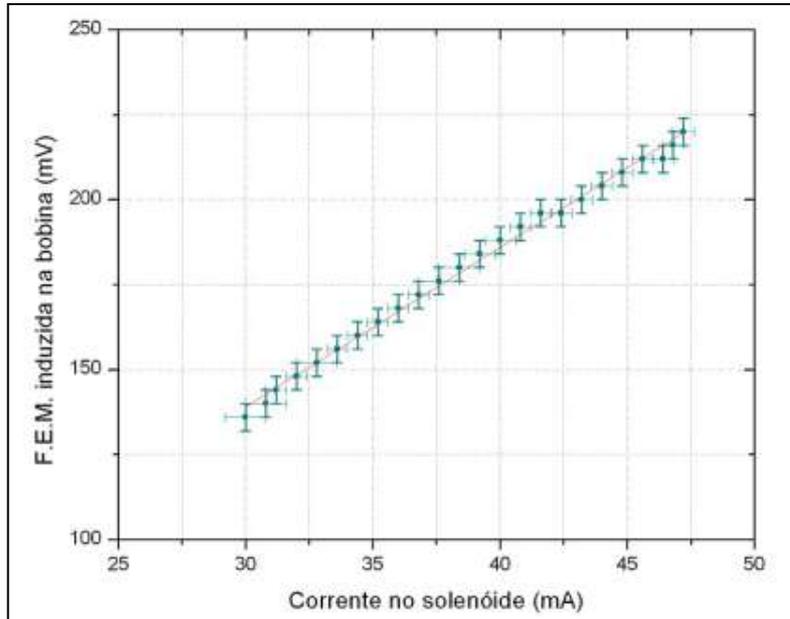
- Campo constante no tempo não produz variação no fluxo (a não ser que a geometria estivesse se movendo em relação a ele).

O campo magnético terrestre não interfere na força eletromotriz induzida na bobina sonda, por ser constante, portanto segundo a Lei de Faraday, esse campo não induz nenhuma força eletromotriz, isso ocorre, pois seu fluxo na área da bobina sonda não varia. Quando a bobina sonda é deslocada, o fluxo do campo magnético terrestre varia numa intensidade desprezível.

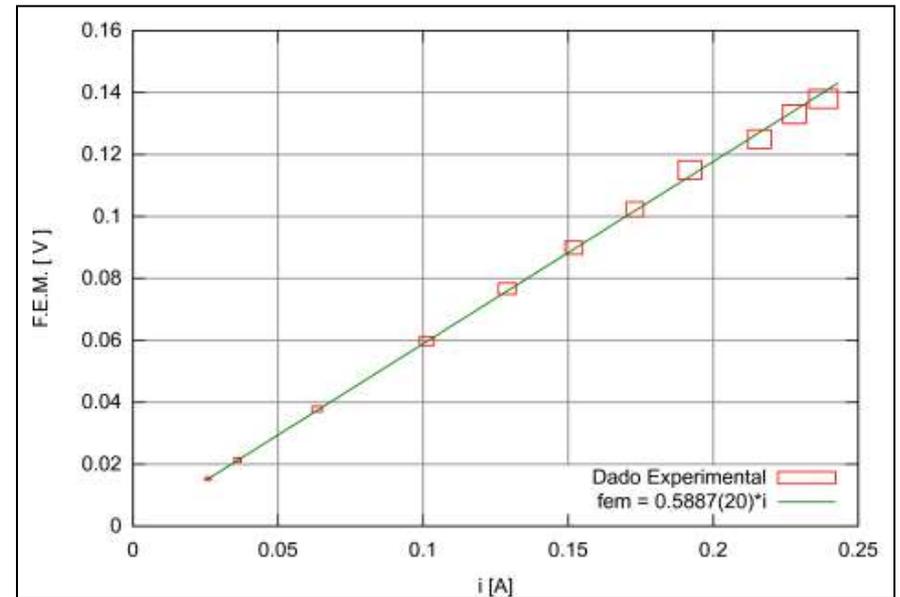
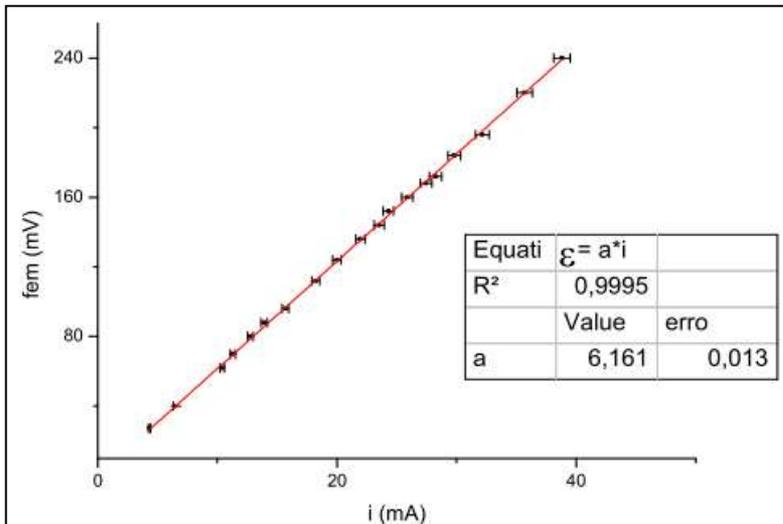
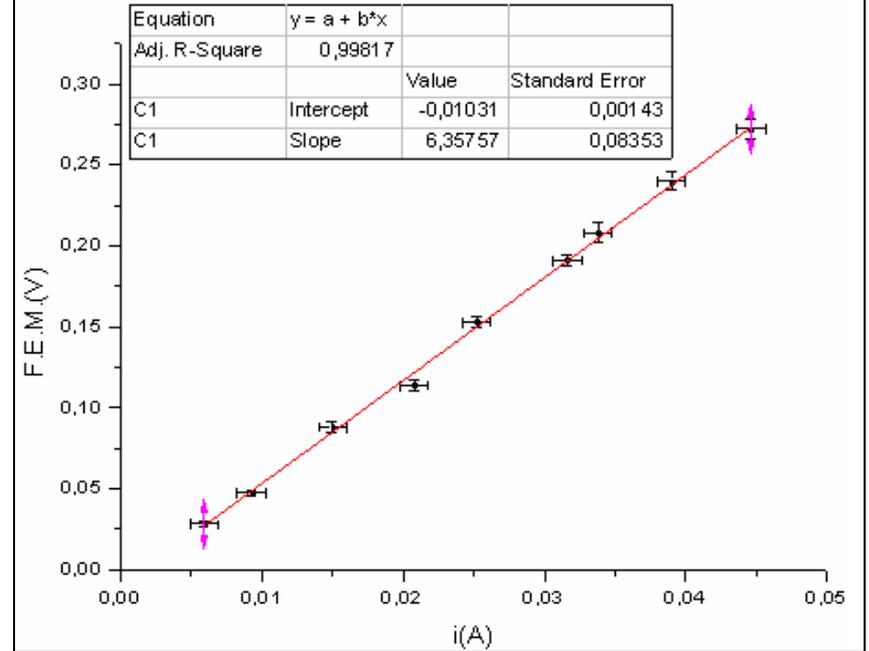
Não nos preocupamos com o campo magnético terrestre pois é a variação do fluxo que produz uma força eletromotriz induzida, e como o campo magnético terrestre em geral é constante, seu efeito pode ser desprezado.

Já quanto ao campo gravitacional terrestre, ele é muito menor do que o causado pelo solenóide, portanto não interfere significativamente nas medidas.

F.E.I. x Corrente



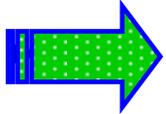
Parte 1



Comparação (Turma 2011)

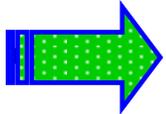
	LS (cm)	DS (cm)	f (Hz)	NS	Def. (deg)	AreaEff (m2)
H1	80.00 (5)	16.40 (5)	3008 (?)	840 (10)	87 (?)	0.19 (9)
H2					-264.3 (?)	
H3	80.0 (2)		3014.9 (40)	840 (10)		0.246 (12)
H4					89.97 (?)	0.1533 (19)
H5					69 (3) 90 (?)	4.67 (13) cm²
H6						0197 (12) cm²
H7	80.0 (2)	16.4 (2)	3044 (10)	840 (10)	105 (2)	0.223 (15)
H8					96 (5)	0.257 (2)
H9					77.1 (14)	0.143 (91)
H10	80.0 (2)	16.4 (2)			92 (11)	0.220 (5)

Lei de Faraday



Última aula:

- Verificaram a Lei de Faraday
- Calibraram a bobina sonda em carretel

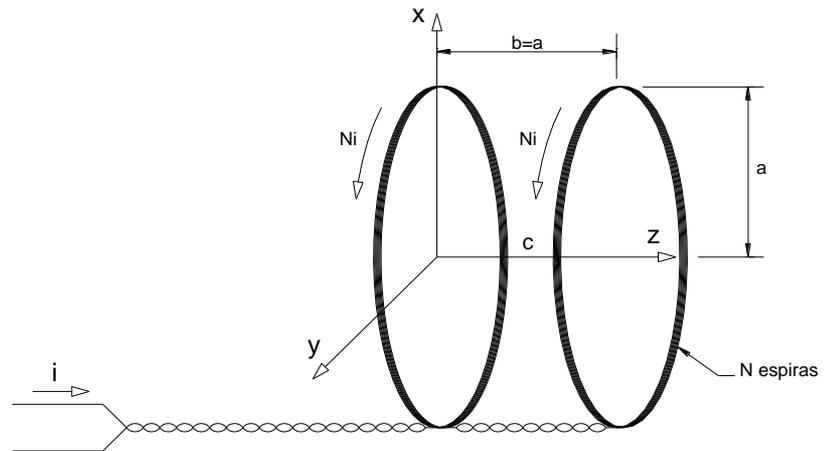


Esta aula:

- Mapear o campo da bobina de Helmholtz

Lei de Faraday: mapeamento

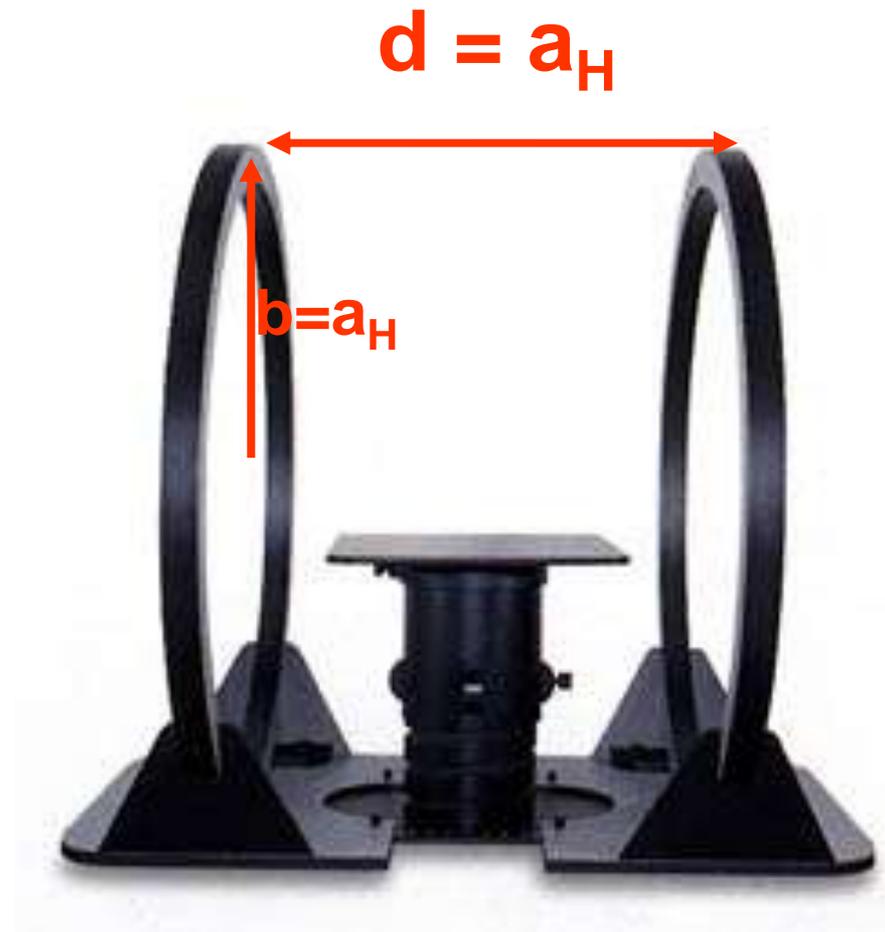
- O fenômeno da indução pode ser utilizado para mapear um campo elétrico desconhecido.
- Para mostrar como isso pode ser feito, vamos mapear o campo de uma configuração de correntes conhecida como **bobina de Helmholtz**.
- A **bobina de Helmholtz** consiste de um par de bobinas circulares de raio a_H e N_H espiras cada uma, separadas por uma distância b



Lei de Faraday: 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 $b = a_H$.

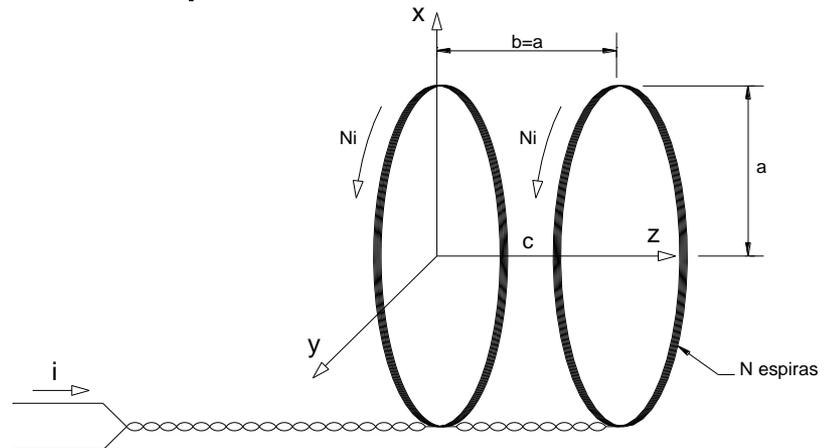
Essa configuração de correntes gera um campo quase uniforme no interior da bobina



Lei de Faraday: 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

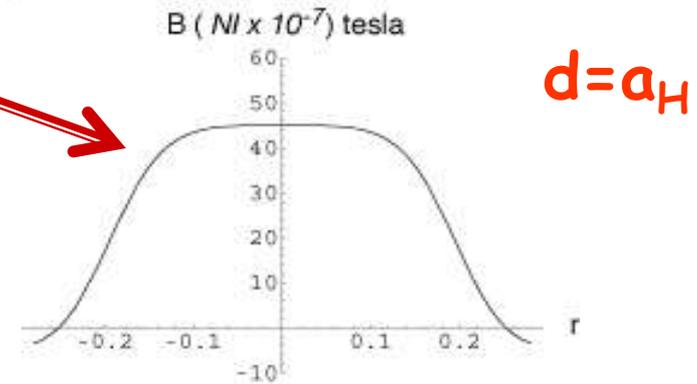
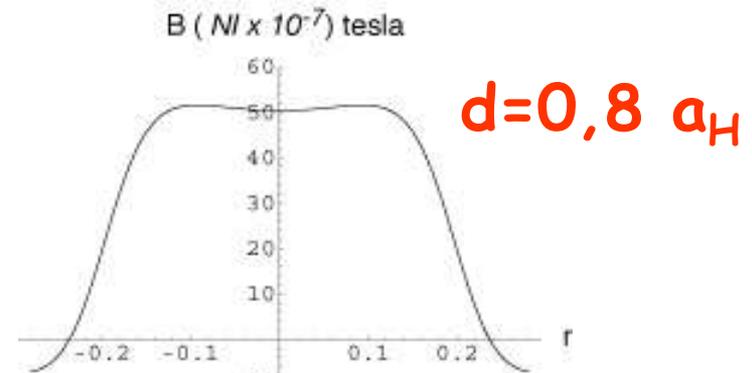
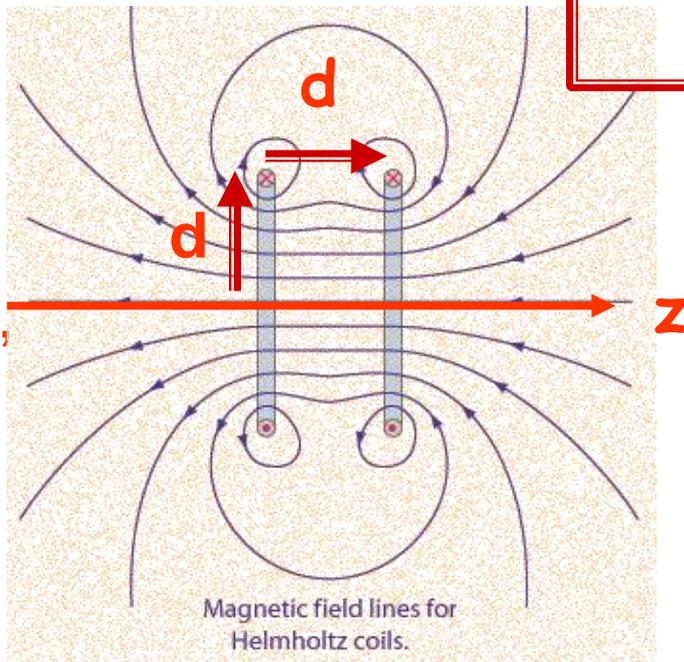
A origem
é escolhida
sua!



Lei de Faraday: Helmholtz

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

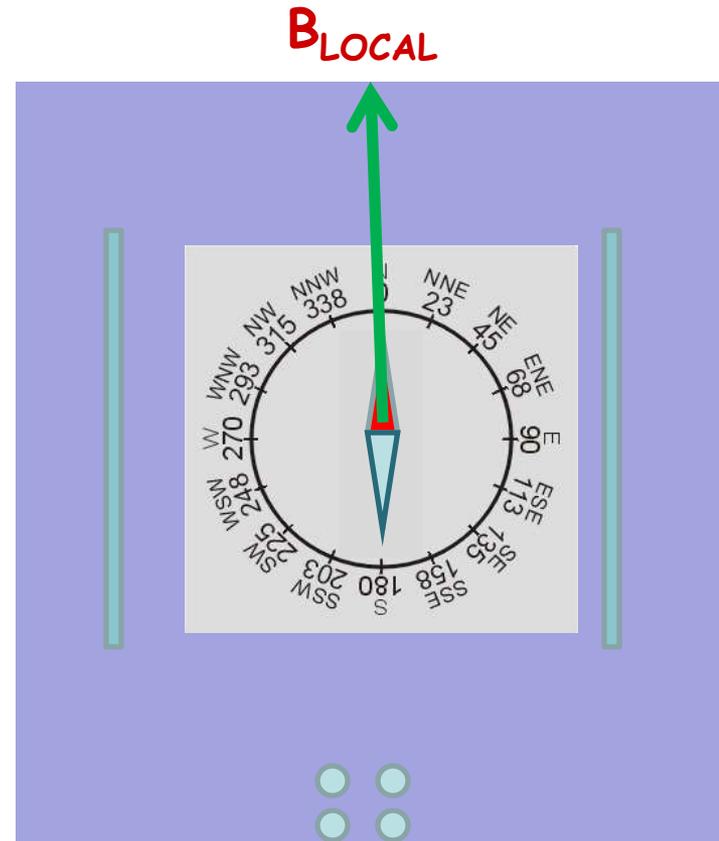
Esse é o campo da bobina de Helmholtz



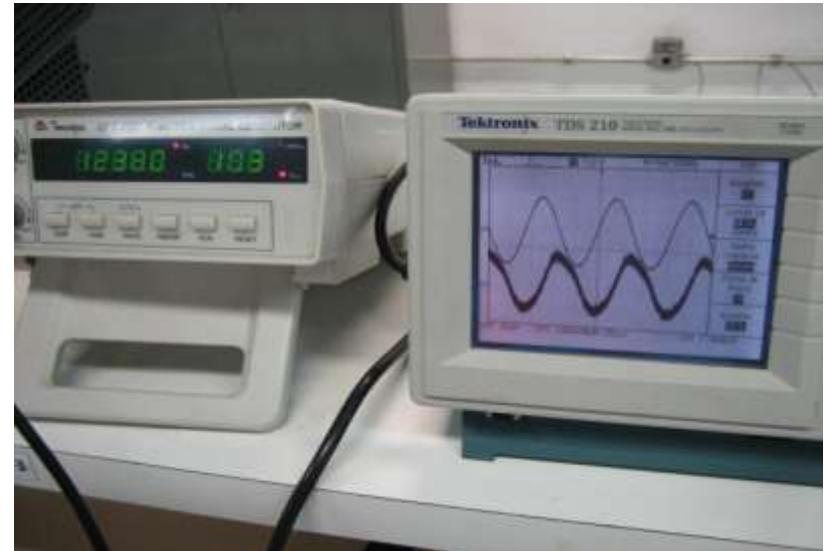
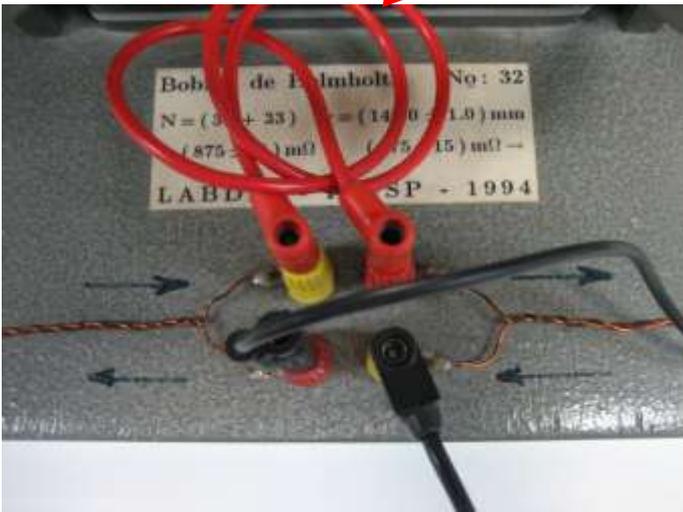
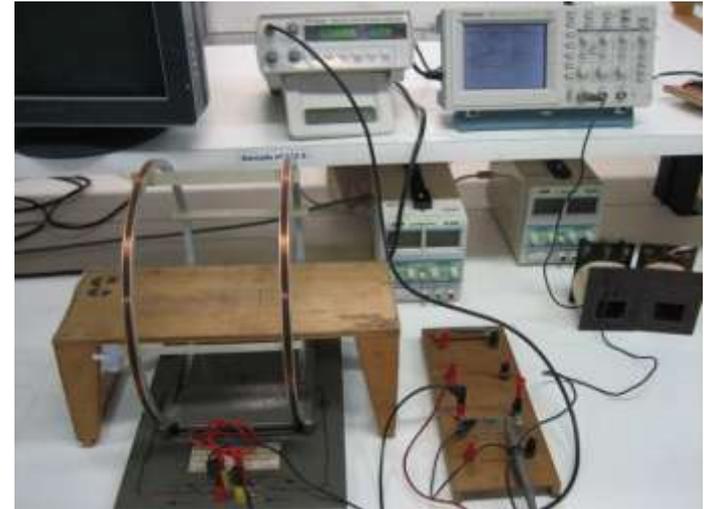
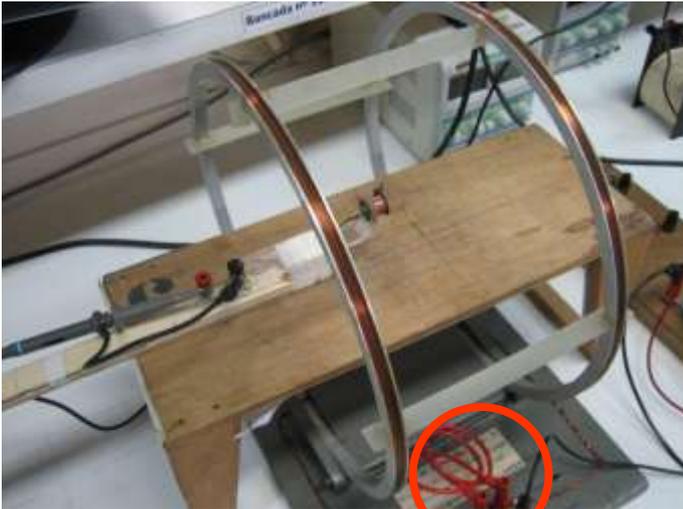
$d = 1,2 a_H$

Lei de Faraday: B_{local} ?

- 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?



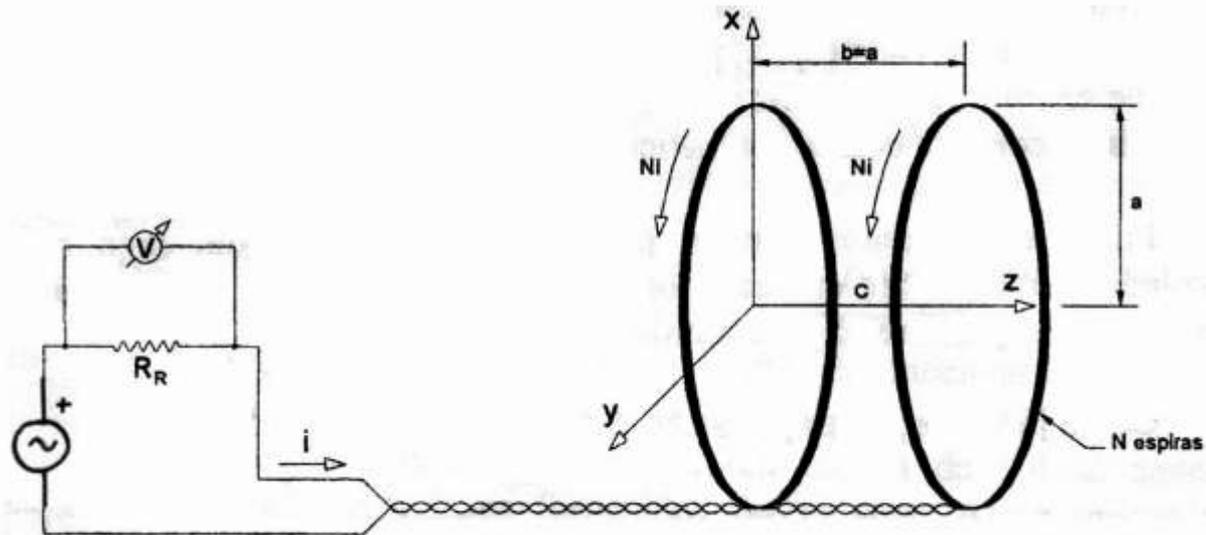
Lei de Faraday: montagem



Lei de Faraday: mapeamento

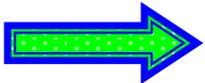
Vamos mapear o campo da bobina de Helmholtz **utilizando a bobina sonda menor que foi calibrada.**

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

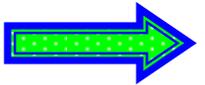


Lei de Faraday: Helmholtz

- Esse campo vai ser medido mas pode também ser:



simulado



calculado analiticamente

- **Simulação: 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. Impor a condição de campo constante: para (distância=raio), derivada primeira = **zero**, derivada segunda positiva.

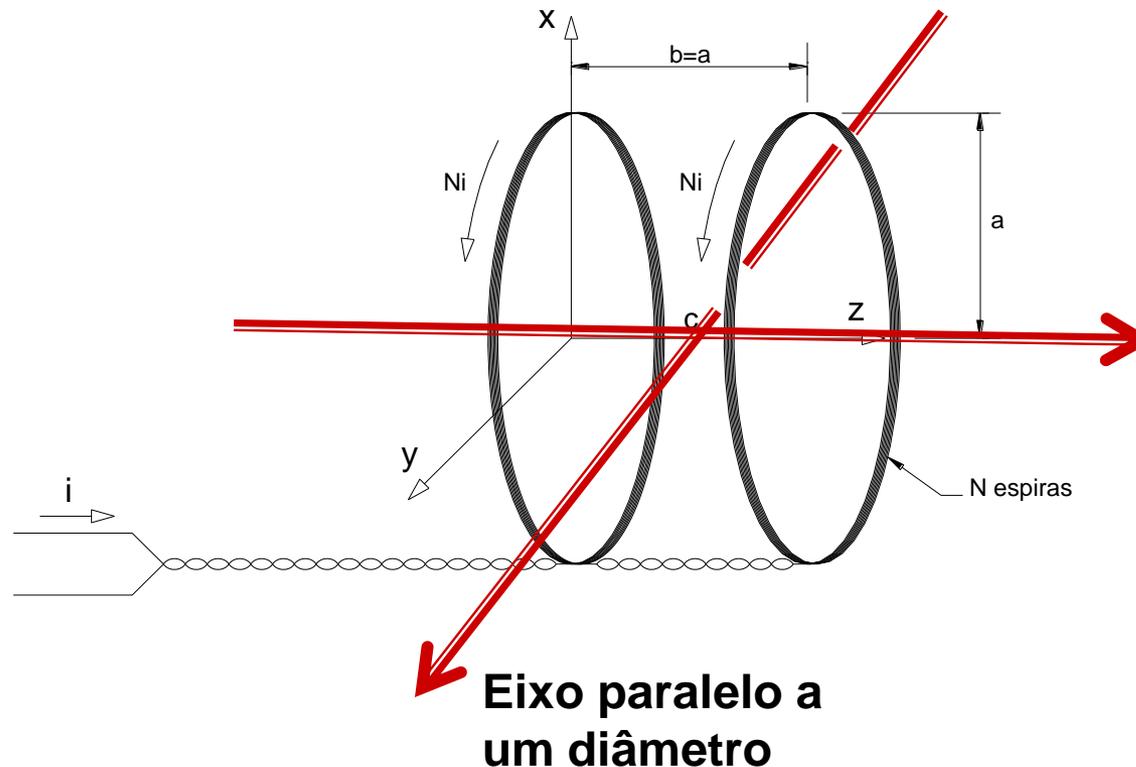
$$B = \frac{8}{5^{3/2}} \frac{\mu_0 N_H i}{a_H}$$

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 do eixo paralelo ao diâmetro que passe pelo centro: 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** e ao longo do eixo paralelo ao diâmetro
 - Explicitar a fórmula teórica utilizada para **B(z)**

Lei de Faraday: Helmholtz

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



Campo Helmholtz: 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:

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

- 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** 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.
- Comente o resultado na síntese desta experiência

Lei de Faraday: comprovação

- **Para hoje:**
 - Mapear o campo da bobina de Helmholtz
 - Simular esse campo no FEMM
 - Solução analítica
- Superpor dados à simulação e ao cálculo analítico: tudo no mesmo gráfico para comparação para o campo da bobina de Helmholtz.
- 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:Dicas 1

- Usaremos uma resistência auxiliar de 10 Ohm.
- Frequência da onda gerada é de 3KHz
- Medir o campo no centro dos eixos da bobina de helmholtz(para isto a sonda deve ficar deitada sobre a mesa de apoio).
- Medir a corrente para a simulação do FEMM.

Lei de Faraday:Dicas 1

- Medir o Campo para as componentes x e y ao longo do eixo x.
- Medir o Campo para as componentes x e y ao longo do eixo y.
- Comparar o resultado com a simulação do FEMM.
- Comparar o resultado com a solução analítica.
- Montar uma tabela e enviar para o grupo de emails com o valor da área efetiva e o número da sonda calibrada na semana passada.