

Prof. Antonio Domingues dos Santos
adsantos@if.usp.br

<http://lababerto.if.usp.br>

Ramal: 6886

Mário Schemberg, sala 205

Prof. Leandro Barbosa
lbarbosa@if.usp.br

Ramal: 7157

Ala1, sala 225

Profa. Eloisa Szanto
eloisa@dfn.if.usp.br

Ramal: 7111 Pelletron

Prof. Henrique
Barbosa
hbarbosa@if.usp.br

Ramal: 6647

Basílio, sala 100

Prof. Nelson Carlin
nelson.carlin@dfn.if.usp.br

Ramal: 6820

Pelletron

Prof. Paulo Artaxo
artaxo@if.usp.br

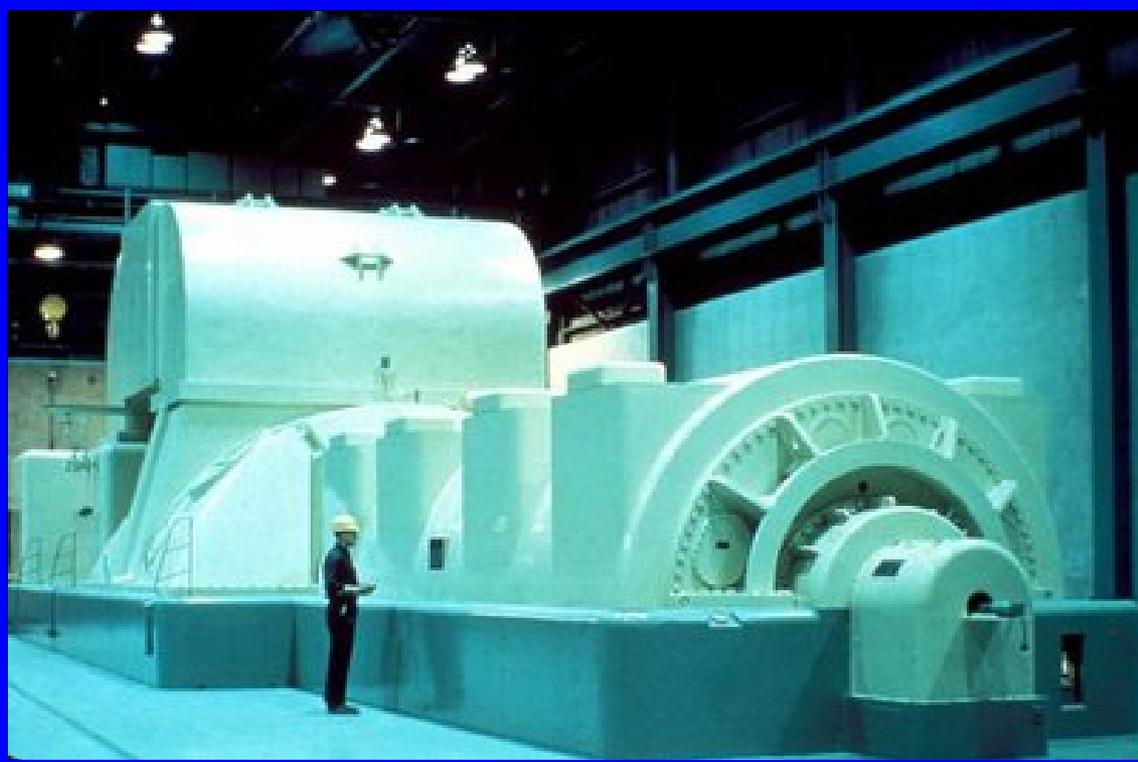
Ramal: 7016

Basilio, sala 101

LEI DE FARADAY

Física Experimental 3
Aula 1, Experiência 3

LEI DE FARADAY



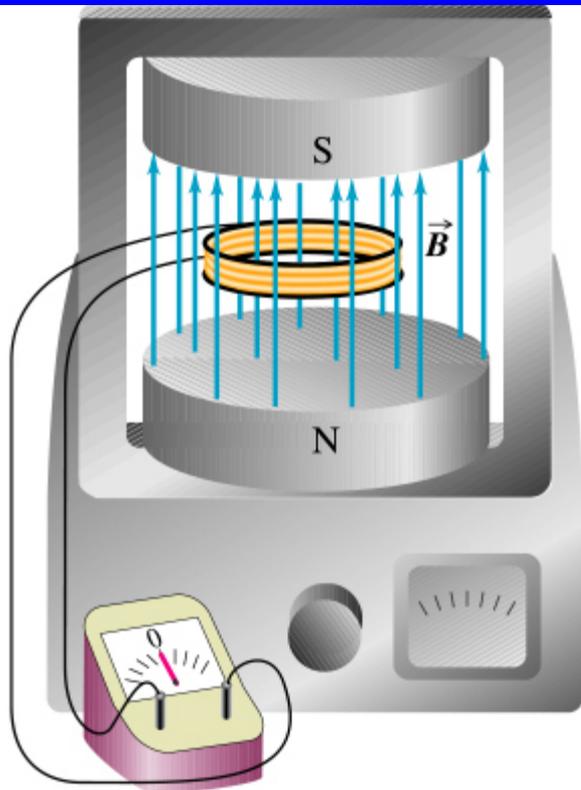
Produção de eletricidade para muita gente? A resposta foi copiar em escala maior o protótipo de gerador de Michael Faraday: fazendo nascer a era da eletricidade que dramaticamente revolucionou o modo de viver dos homens em todo o planeta.

Lei de Faraday

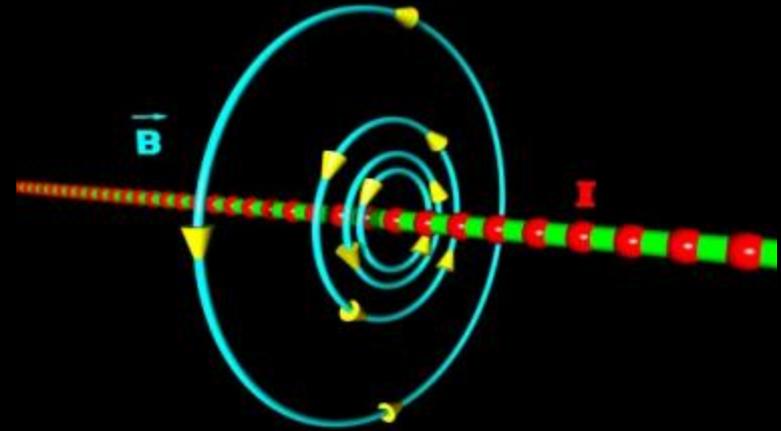
- Bobinas sonda: medida de campos magnéticos variáveis no tempo
- Campo magnético variável no tempo: um desafio
- Circuitos RL e RC

Lei de Faraday

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



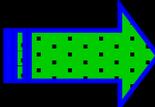
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

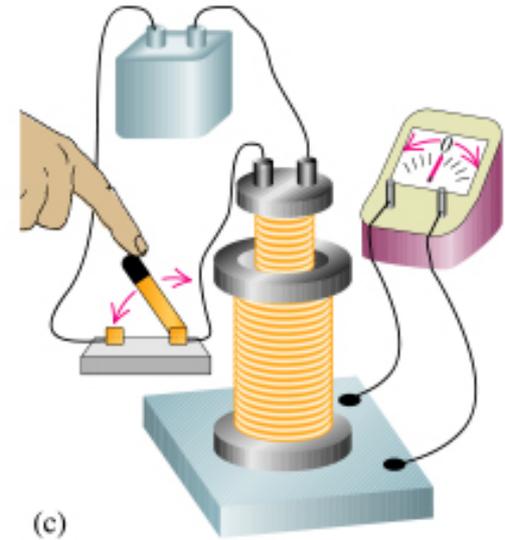
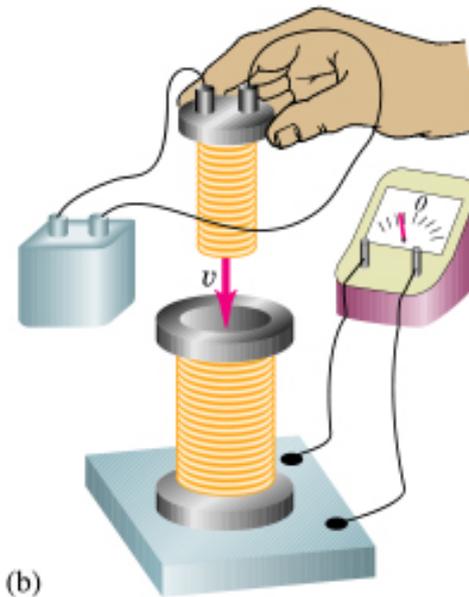
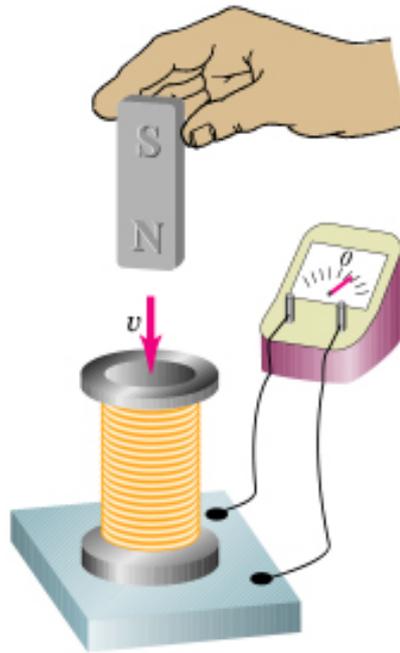


©2006 Yves Pelletier (ypelletier@ncf.ca)

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

Lei de Faraday

- O que Faraday descobriu: variação de B  i



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Lei de Faraday

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 vetor normal à área compreendida pelo circuito.

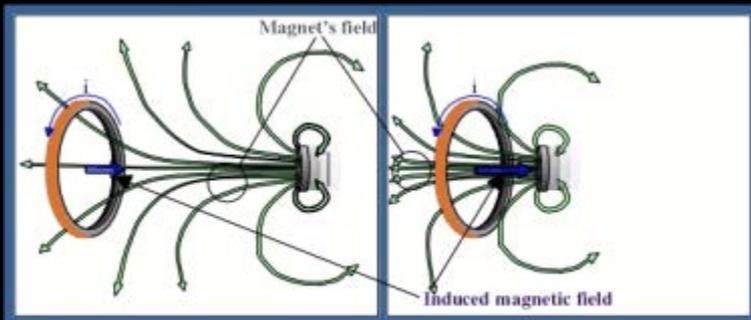


houver variação na área compreendida pelo circuito:

- a espira muda de tamanho
- ou, 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

Lei de Faraday

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



O ímã (eletro ou natural) se move em direção à espira de modo que o número de linhas de campo que ela compreende aumenta e uma corrente é induzida na espira

Precisa mudar a “quantidade” de linhas de campo que passam por dentro da espira, ou seja o que muda é o fluxo de \mathbf{B} através da espira.

O fluxo é definido como o produto escalar do campo pelo vetor área da espira.

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

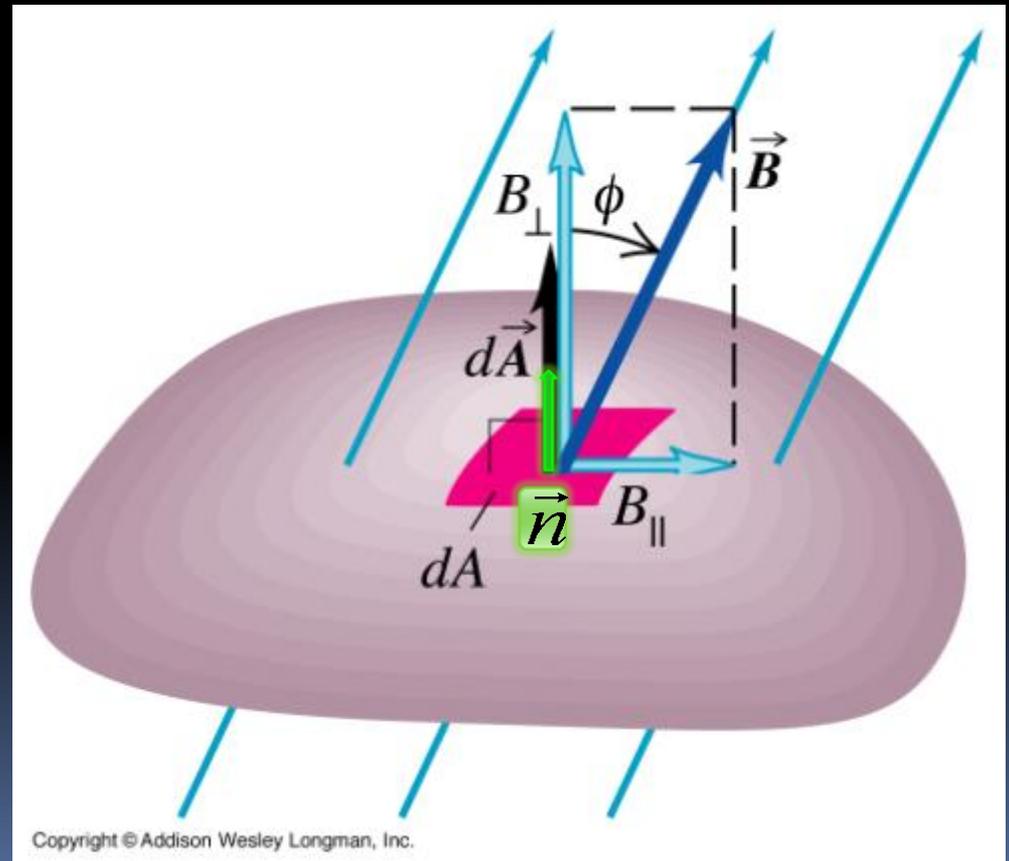
sistema MKS: unidade de fluxo magnético é o Weber: 1 weber = 1Wb = 1 T×m²

O vetor área da espira:

- O vetor área da espira tem módulo igual à área compreendida pela espira e direção e sentido da normal, \vec{n} , à área da espira.

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

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



Lei de Faraday

- Agora é possível escrever a **Lei de Faraday** de uma forma matemática:

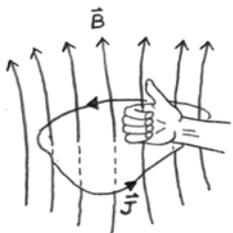
$$\mathcal{E} = - \left(\frac{dN\Phi_B}{dt} \right)$$

- **N** é o número de espiras e Φ_B é o fluxo.
- **A fórmula acima descreve todas as variações possíveis que provocam variação de fluxo:**
 - Variação da intensidade **B**
 - Variação do ângulo entre **B** e **normal**
 - Variação do valor absoluto da **área** do circuito

Lei de Lenz

- 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.**

O sentido da corrente: regra da mão direita

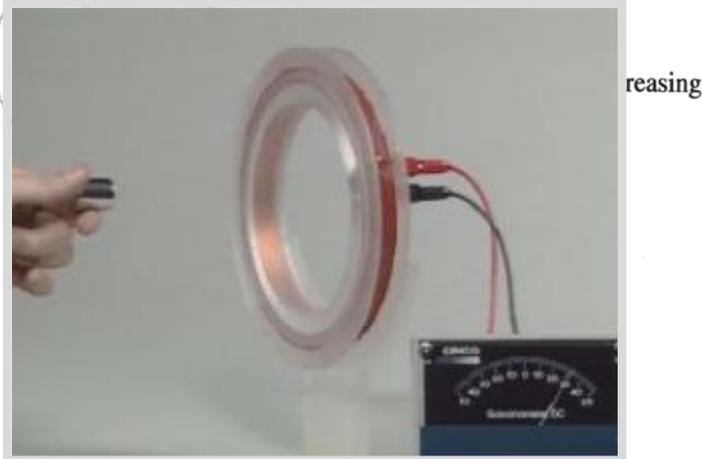
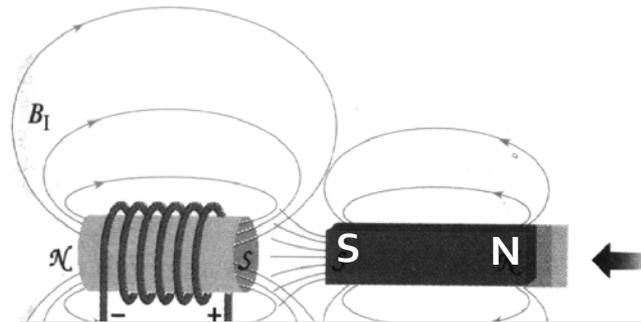


Um anel metálico cai (gravidade) no campo magnético de um ímã. A f.e.m. induzida gera uma corrente no anel, pela Lei de Lenz, o sentido da corrente é tal que torna mais lenta a sua queda: o campo induzido no anel tem sentido contrário ao do ímã.



<http://ocw.mit.edu/ans7870/8/8.02T/f04/visualizations/faraday/11-fallingcoilapp/11-fallingcoil320.html>

Lei de Lenz



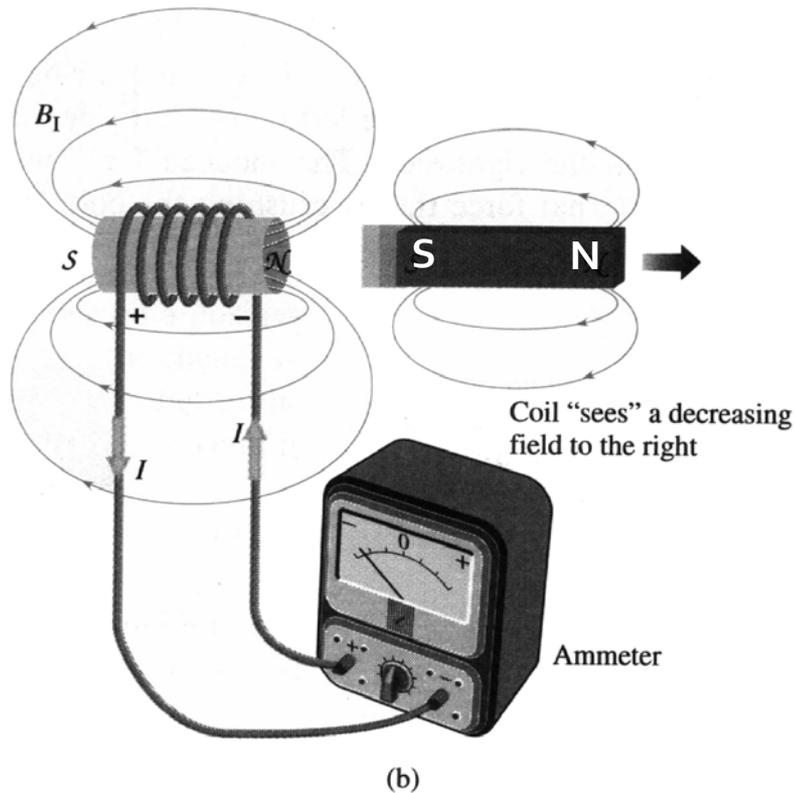
- o agente externo move um ímã permanente para o interior de uma bobina:

- o fluxo de 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.

necessária

Lei de Lenz



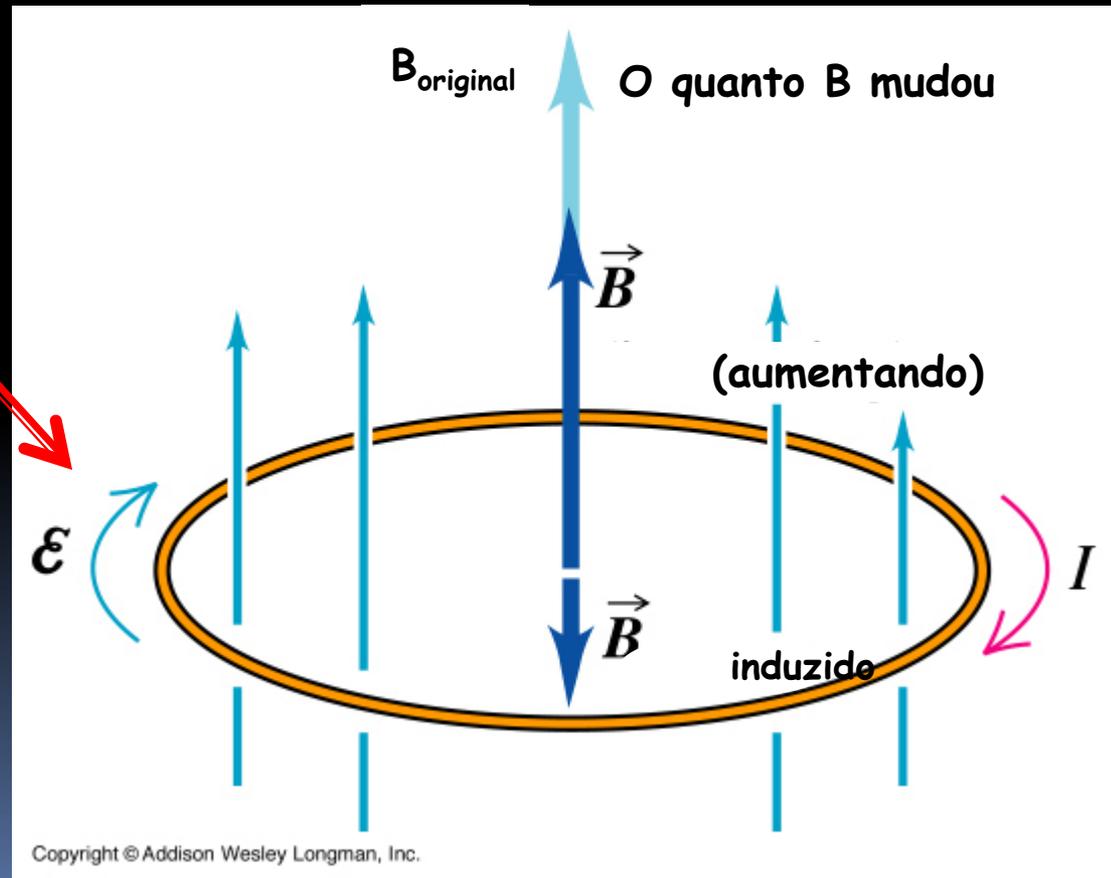
- um agente externo move um ímã permanente para fora de uma bobina:
- o fluxo de B através da bobina, estará **diminuindo**.
- o campo induzido vai se opor a essa variação, gerando um polo magnético contrário ao que está se distanciando.

Em qualquer caso o trabalho exercido pelo agente externo proporciona a energia necessária para gerar e manter a corrente induzida na bobina.

Lei da indução de Faraday

A força eletromotriz
auto induzida

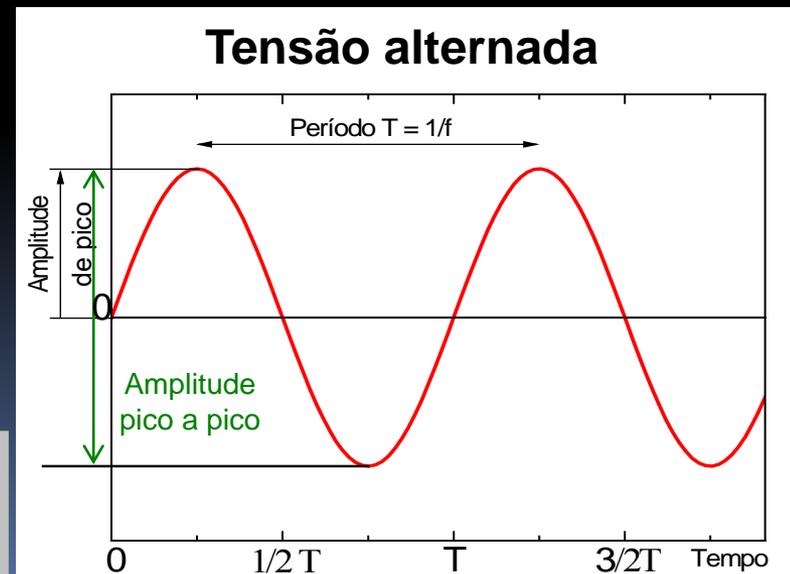
Neste caso B varia
porque a corrente
é variável no tempo



Como variar o fluxo de B através de uma bobina neste experimento

- Para ter f.e.i. em uma bobina vamos ter que ter o fluxo de campo através da bobina variando:
 - não vamos ficar movendo imãs ou girando bobinas, o mais simples é ter um eletroímã de uma configuração cujo campo seja fácil de calcular analiticamente e variamos a corrente nele:
 - e a corrente que vamos colocar é bem comportada: senoidal

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$



Comprovando a Lei de Faraday

- É possível comprovar a **Lei de Faraday**:
 - comparando quantitativamente a **f.e.i.** induzida com variação de fluxo de **B** que a criou
- Como fazer?
 - temos que conhecer os dois lados dessa equação
 - procurar a maneira mais fácil:

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

medimos

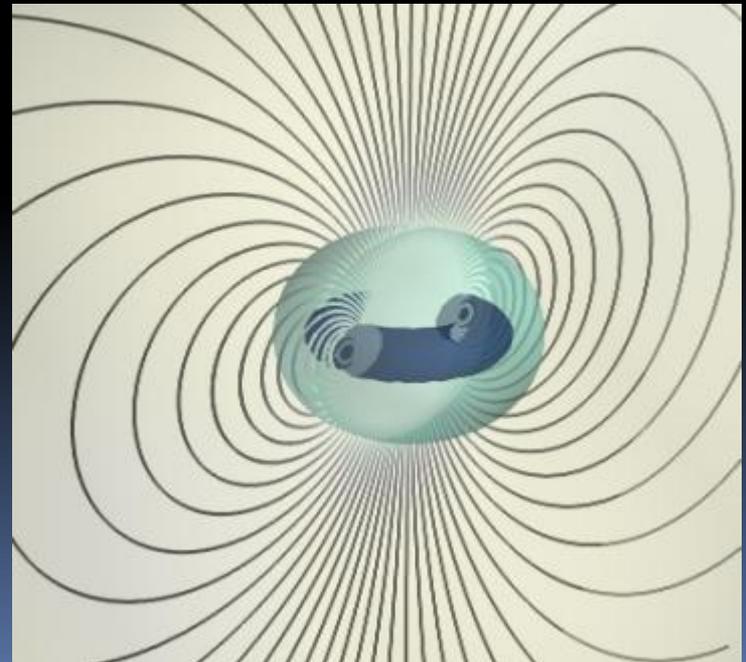
Procuo uma geometria cujo campo seja fácil de calcular. Mantenho tudo constante e vario o fluxo variando apenas a corrente que gera **B**

Temos que saber calcular

Lei da indução de Faraday

- Por outro lado, se a área da espira é conhecida, pode-se usar a **lei de Faraday** para mapear um campo desconhecido (é preciso ter uma idéia da simetria: saber o ângulo entre o campo e a normal à área) e medir a **f.e.i.** induzida numa espira:

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



0 proposto para esta semana:

- Comprovar a Lei de Faraday medindo um campo conhecido (solenóide no centro) com uma bobina de área conhecida
- E explorar outras **2** aplicações práticas da **lei de Faraday**:
 - Se conheço o campo mas não a área da bobina, posso achar essa área, medindo a **f.e.i.** na bobina, ou seja, **calibro** a bobina.
 - Conhecendo a área da bobina, posso medir o campo, e, melhor, posso mapear um campo magnético (desconhecido) no espaço. Nesse caso vou chamar a bobina de bobina sonda.
- A bobina sonda terá que ter **3** características:
 - **ter a área conhecida,**
 - **permitir a indução de uma f.e.i. mensurável**
 - **e ser pequena o bastante para mapear um campo com incerteza aceitável**

A bobina sonda

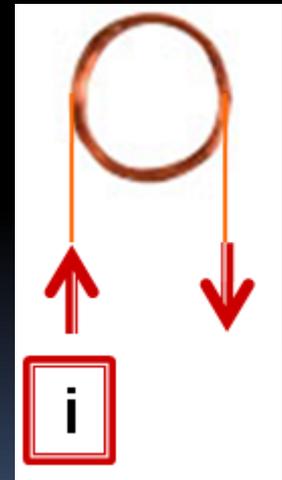
Uma **boa** bobina sonda:

- ▣ tem que ter uma área efetiva A_{bef} grande
- ▣ tamanho da bobina deve ser o menor possível: ela define com que precisão está mapeando o campo.

$$A_{bef} = \sum_{i=1}^n A_{bi}$$

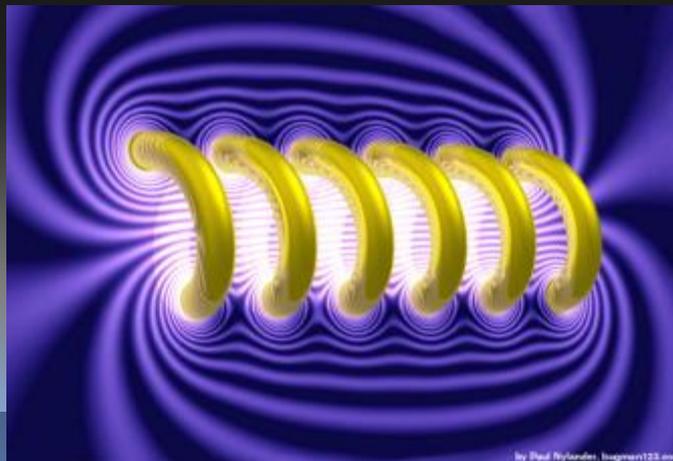
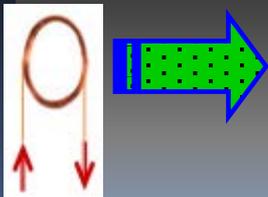
Como fazer?

- ▣ Enrolar um fio bem grande num carretel bem pequeno
- ▣ E a área? Não dá para calcular
- ▣ A solução é calibrar!



Para calibrar a bobina sonda:

- Escolho uma geometria que forneça um campo constante e que eu saiba calcular:
 - um solenóide longo alimentado com uma tensão alternada cujos parâmetros sejam conhecidos: $B_s = B_0 i_s$
 - campo de um solenóide longo não é difícil de calcular (desprezando os efeitos de borda: *vocês têm que verificar se se pode fazer essa aproximação*)
 - portanto o fluxo do campo através da bobina sonda também pode ser calculado



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

calculo

meço

descubro

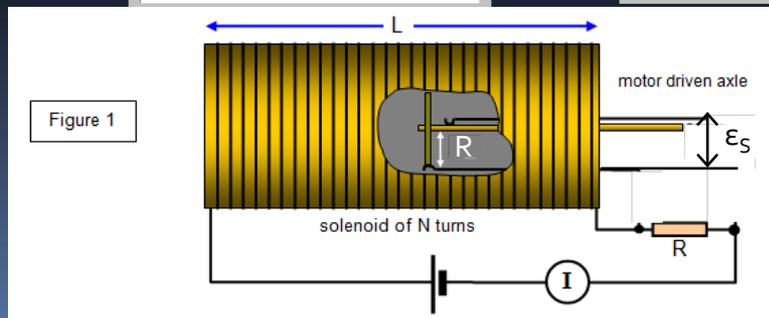
Calibração da bobina sonda

- Dentro do solenóide alimentado com uma corrente alternada conhecida, coloca-se a bobina sonda, b:
- Manter o que constante?
 - Ângulo entre o campo e o vetor área da espira onde a **f.e.m.** é induzida (e igual a zero)
 - Geometria do campo e geometria da espira
 - Só varia o campo variando a corrente no solenóide: mantendo a função constante (e conhecida: seno, cosseno) e variando o valor de pico da corrente.

$$i_S = i_{SP} \text{sen} \omega t$$

$$B_S = B_{SP} \text{sen} \omega t$$

i_{sp} = i de pico do solenóide



$$\epsilon_b = -A_{\text{bef}} \left(\frac{dB_S}{dt} \right)$$

O campo do solenóide infinito

- Esse campo é uma aproximação melhor que a do solenóide infinito:

sendo:

N_S o número de espiras do solenóide,

L_S seu comprimento,

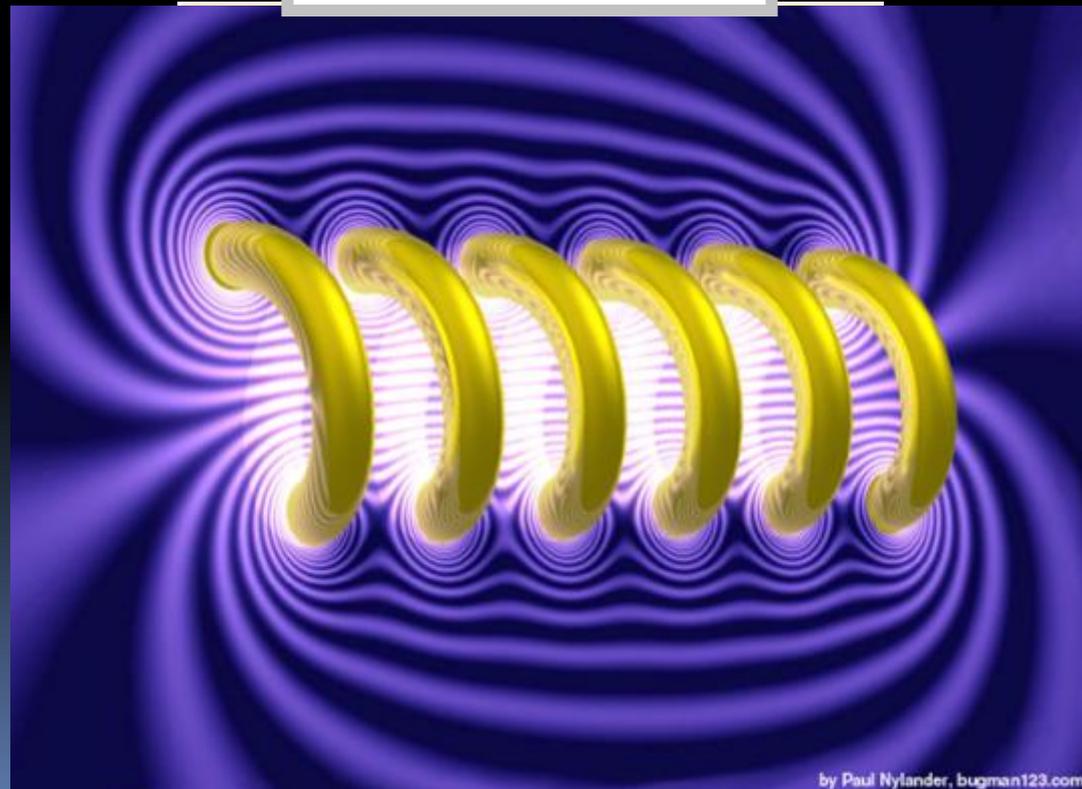
i_S a corrente que o percorre,

μ_0 ($\mu_0 = 1.26 \times 10^{-6} \text{H/m}$) é a permeabilidade magnética do vácuo (considerada aqui igual à do ar) e

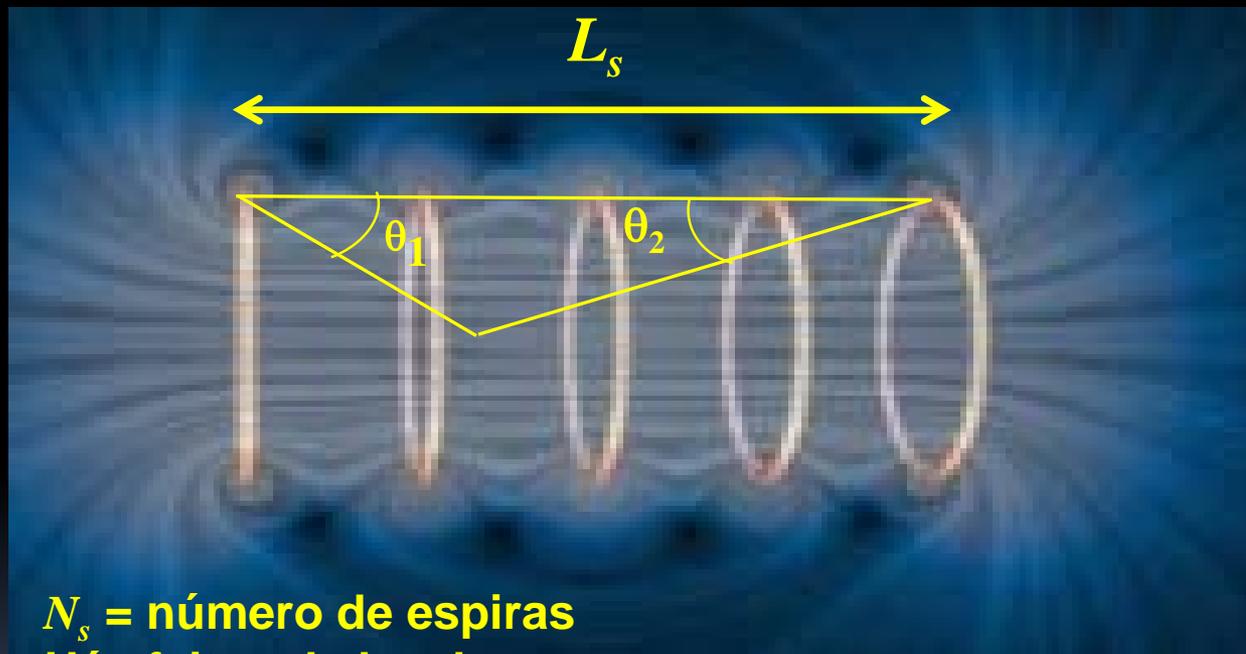
θ_1 e θ_2 são os ângulos indicados

$$B_{Sp} = \frac{\mu_0 N_S i_{Sp}}{L_S}$$

você pode deduzí-lo
fazendo algumas
aproximações



Solenóide longo com as linhas de campo



N_s = número de espiras

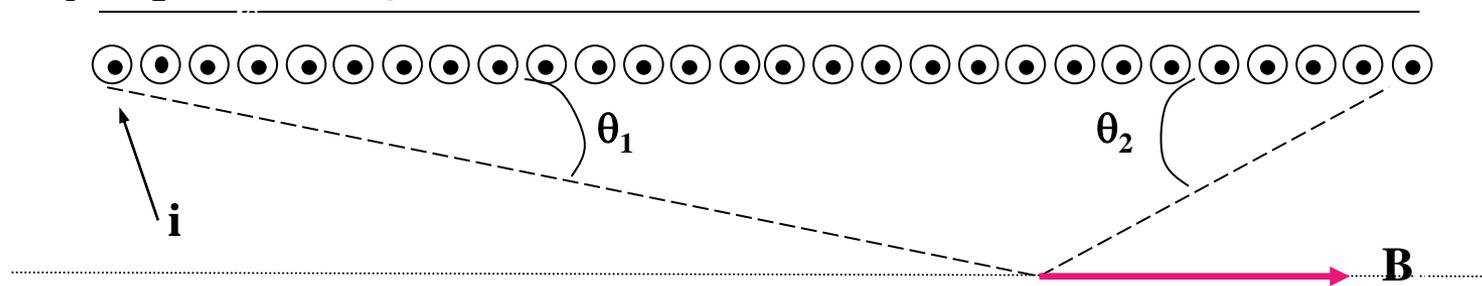
Há efeitos de borda

Quão constante é o campo no interior?

Correção para o campo de um solenóide longo

Esquema do solenóide:

θ_1 e θ_2 são os ângulos indicados



$$i_s = i_{sp} \text{sen}\omega t$$



- O campo de um solenóide finito percorrido por uma corrente i pode ser facilmente calculado, sobre o eixo, dentro do solenóide:

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

Não é difícil
chegar a \rightarrow

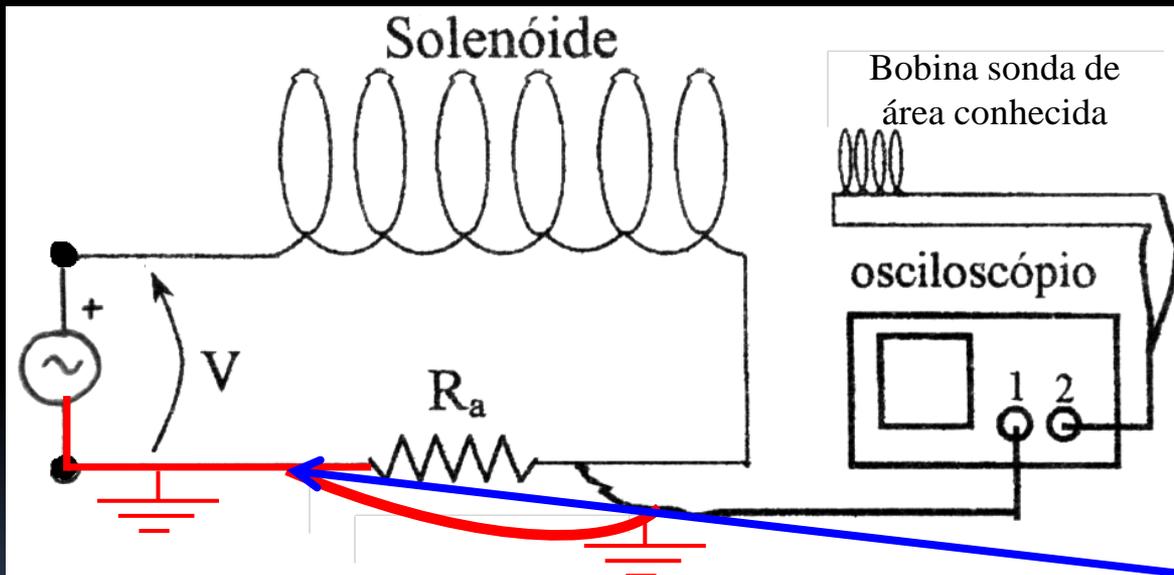
$$B_{sp} = \frac{\mu_0 N_s i_{sp}}{L_s} \left(\frac{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}{2} \right)$$

"P" quer dizer de pico

Verificação da Lei de Faraday

$$B_{Sp} = \frac{\mu_0 N_s}{L_s} \left(\frac{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}{2} \right) i_{Sp}$$

$$i_{Sp} = \frac{V_{RaP}}{R_a}$$



A amplitude da corrente no solenóide não deve ultrapassar **1,5A de pico** e **3KHz** de frequência.

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

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

Lembre de colocar os pontos de terra do osciloscópio e gerador juntos, senão a diferença que pode haver entre eles mata o sinal

Tarefa 1: verificação da Lei de Faraday

- As áreas de todas as espiras não são iguais: $A_{bef} = \sum_{i=1 \rightarrow n} A_i$.

$$\varepsilon_{bp} = -A_b \omega \left(\frac{\mu_0 N_S}{L_S} \left[\frac{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}{2} \right] \frac{V_{Rap}}{R_a} \right) \cos \omega t$$

$$\varepsilon_{bp} = -A_b \omega B_{sp} \cos \omega t$$

- Mede-se ε_{bp} , calcula-se o valor da amplitude do campo do solenóide através da corrente ($i = \text{canal } 2$ do osciloscópio), ω também é medida no osciloscópio e a área, A_b , da bobina pode ser calculada. Conhecendo os 2 lados da equação pode-se verificar a lei de Faraday:

$$A_b = \frac{\varepsilon_{bp}}{\omega B_{Sp}}$$

Calibração da bobina sonda: medida

- Vamos fazer exatamente a mesma coisa, com a mesma montagem, só que, agora, a bobina sonda tem área desconhecida: ela é muito menor em diâmetro que a de área conhecida, mas tem muito mais enrolamentos:

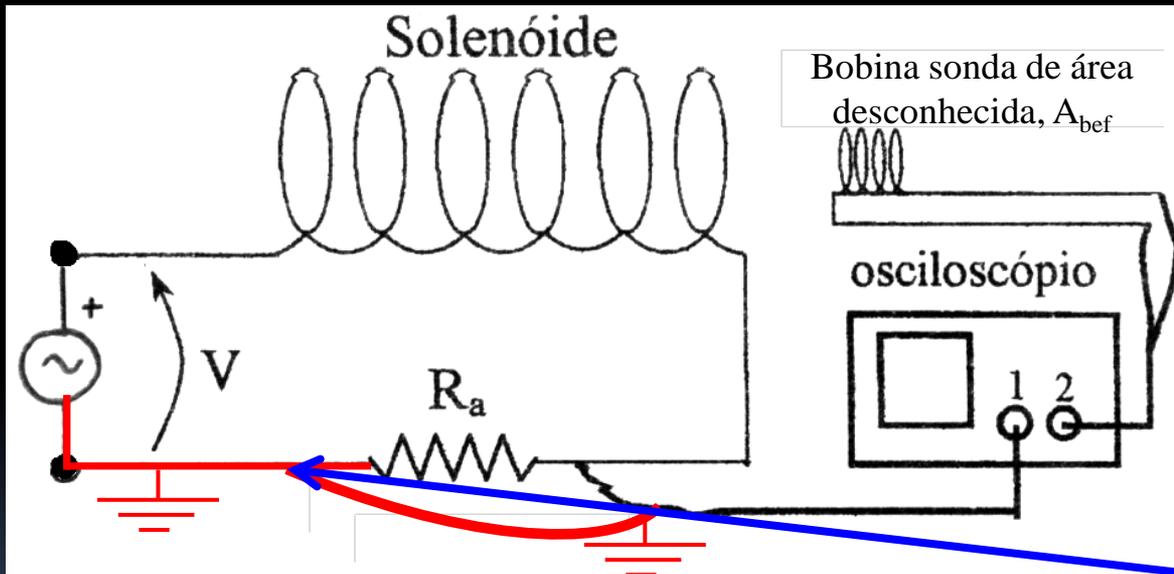


A que vão usar é desse tipo, enrolada em torno de um carretel preto.

Tarefa 2: Calibração da bobina sonda

$$B_{Sp} = \frac{\mu_0 N_s}{L_s} \left(\frac{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}{2} \right) i_{Sp}$$

$$i_{Sp} = \frac{V_{RaP}}{R_a}$$



A amplitude da corrente no solenóide não deve ultrapassar **1,5A de pico** e **3KHz** de frequência.

meço

conheço

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

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

Lembre de colocar os pontos de terra juntos, senão a diferença que pode haver entre eles mata o sinal

Tarefa 3: medir campo do solenóide finito ao longo do eixo

- Para medir o campo ao longo do eixo de um solenóide finito, passamos uma corrente por ele e medimos a f.e.m. numa bobina sonda de área conhecida, deslocada de 2 em 2 cm ao longo do eixo:

$$\varepsilon_{bp} \cos \omega t = -A_{bef} \omega B_{sp} \cos \omega t$$

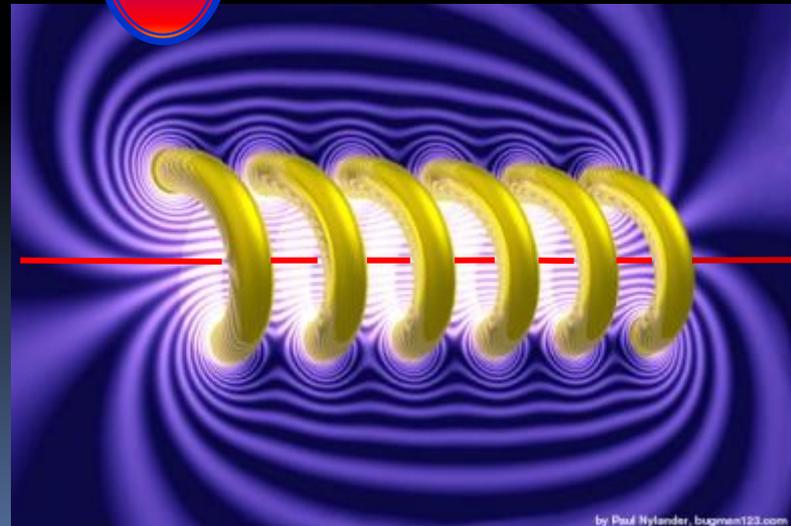
$$B_{Sp} = \frac{\varepsilon_{bp}}{\omega A_{beff}}$$

meço

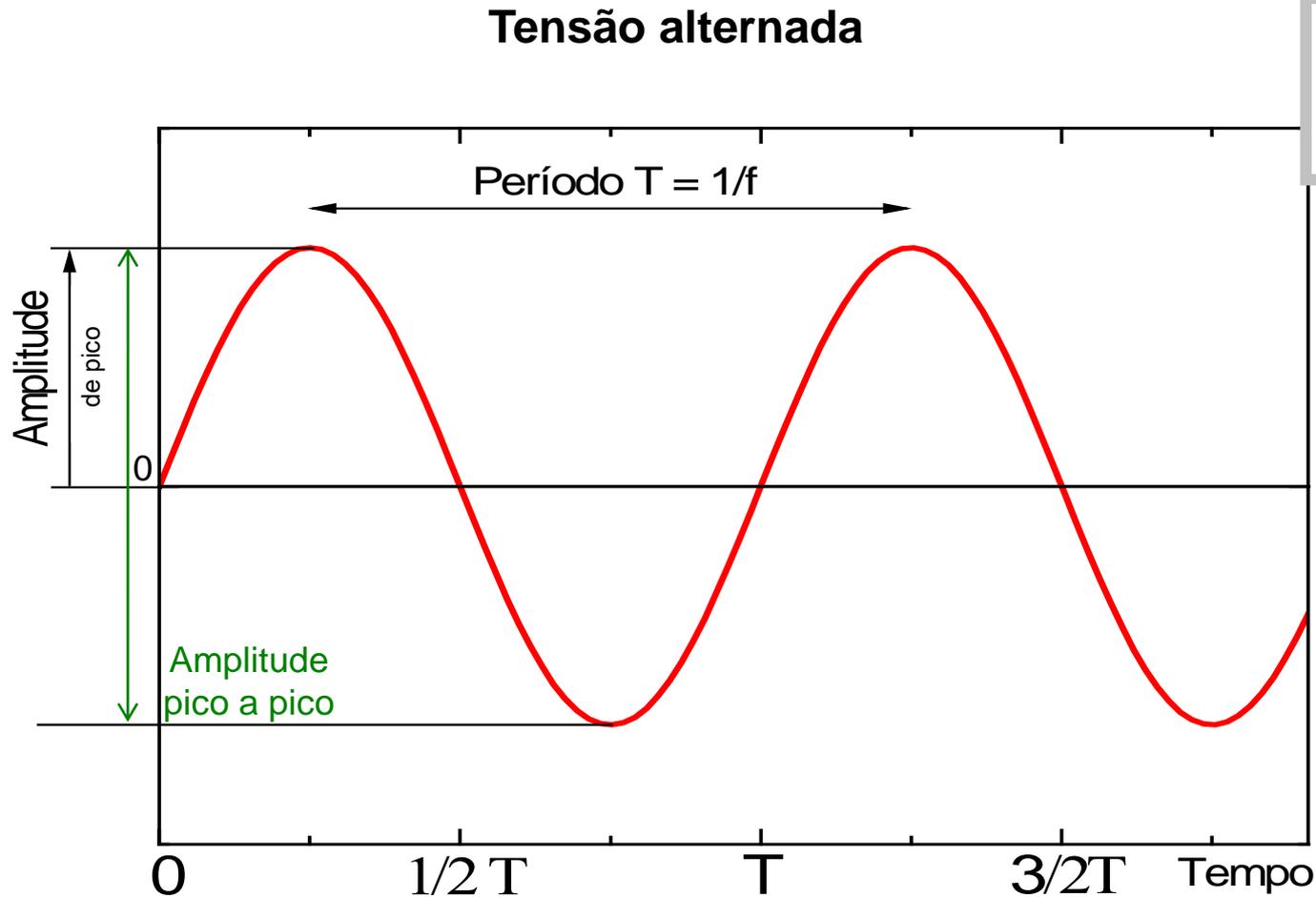
meço

conheço

?



Tensão alternada: senoidal



$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

nesse caso é
um cosseno

Medida simultânea de:

- **Campo:**

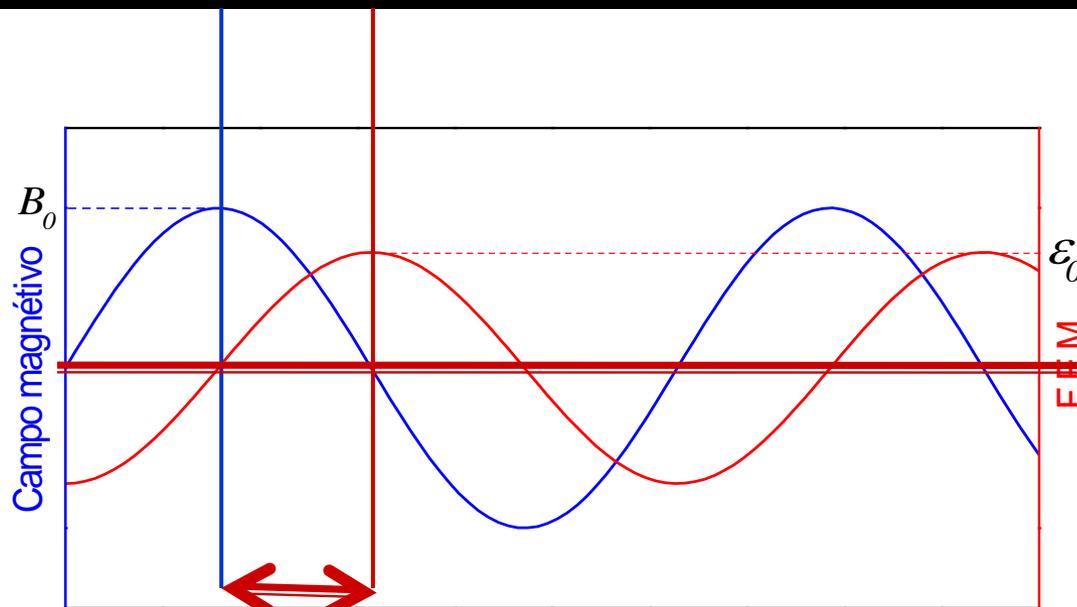
$$B(t) = \underbrace{\frac{\mu_0 N_s i_p}{2L_s} (\cos\theta_1 + \cos\theta_2)}_{B_0} \cdot \sin(\omega t) = B_0 \sin(\omega t)$$

- **f.e.m.:**

$$\varepsilon = - \underbrace{B_0 N A \omega}_{\varepsilon_0} \cos(\omega t) = -\varepsilon_p \cos(\omega t)$$

(NA) ou A_{beff}
é a área da
bobina
sonda

cada canal do
osciloscópio é um
voltímetro



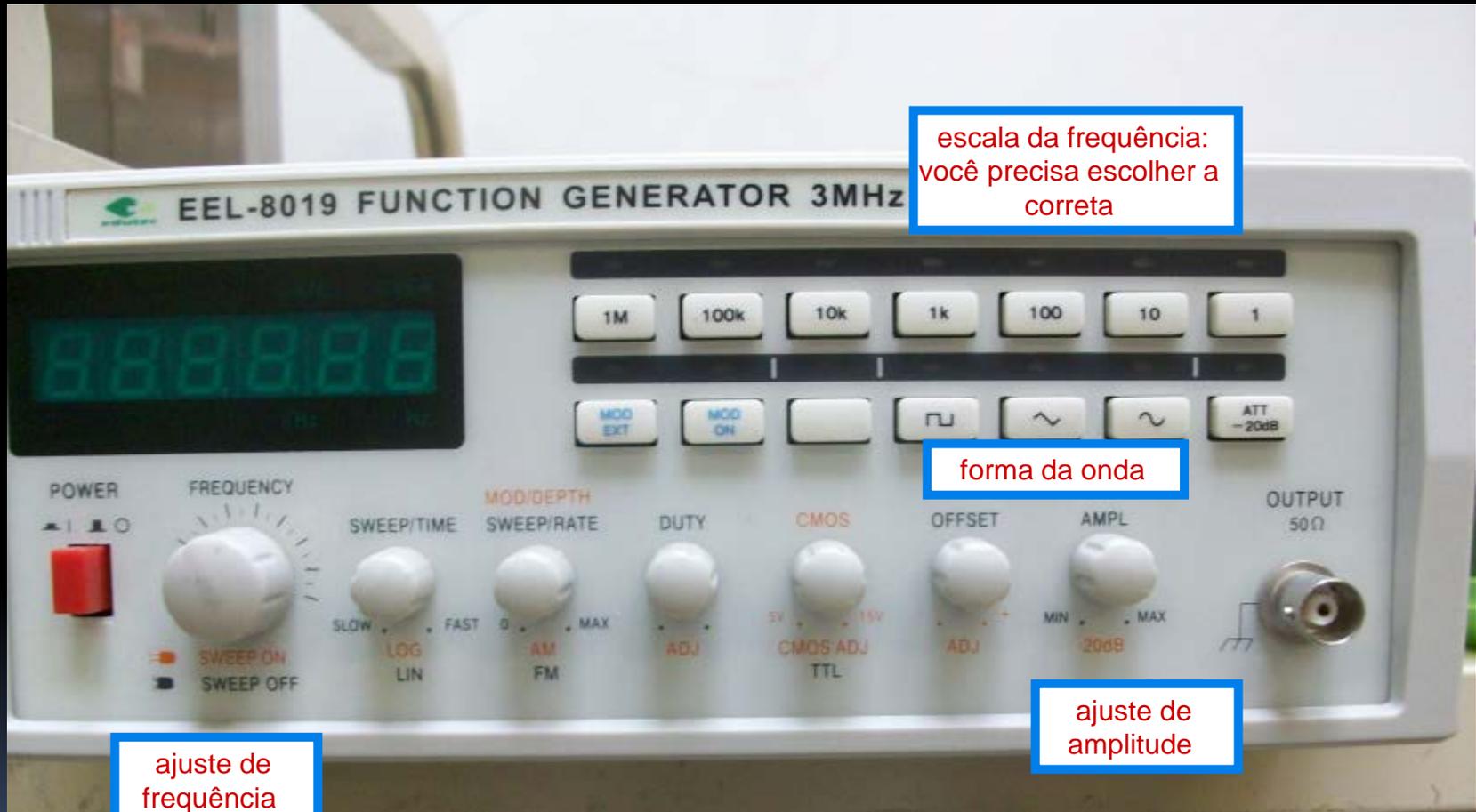
Diferença de fase

Tempo

$\varepsilon = 0$

$1T \rightarrow 2\pi$ rad com essa
equivalência pode calcular a
diferença de fase em
radianos

O gerador de áudio



escala da frequência:
você precisa escolher a
correta

forma da onda

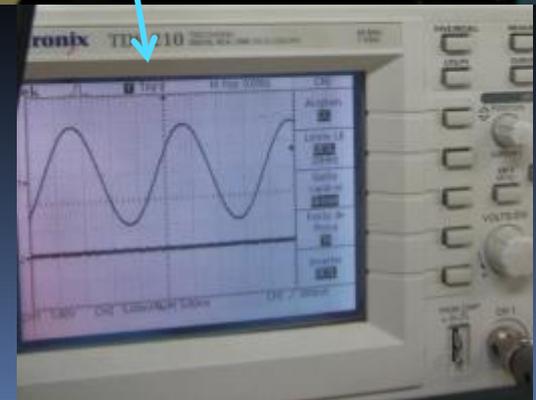
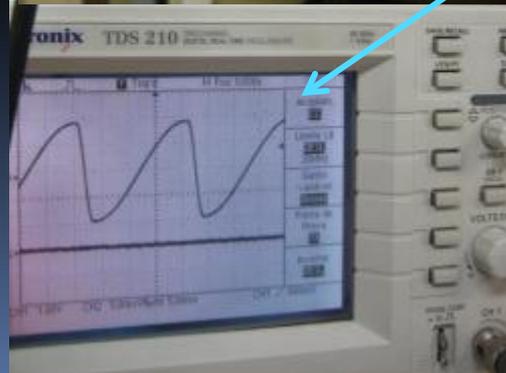
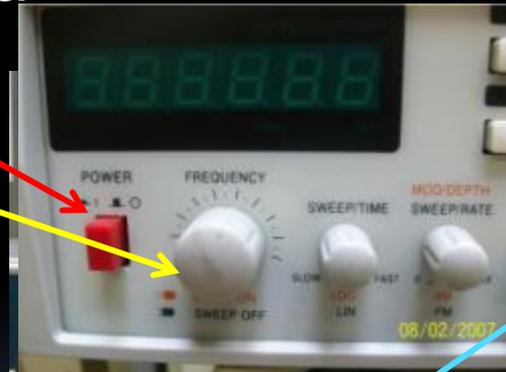
ajuste de
frequência

ajuste de
amplitude

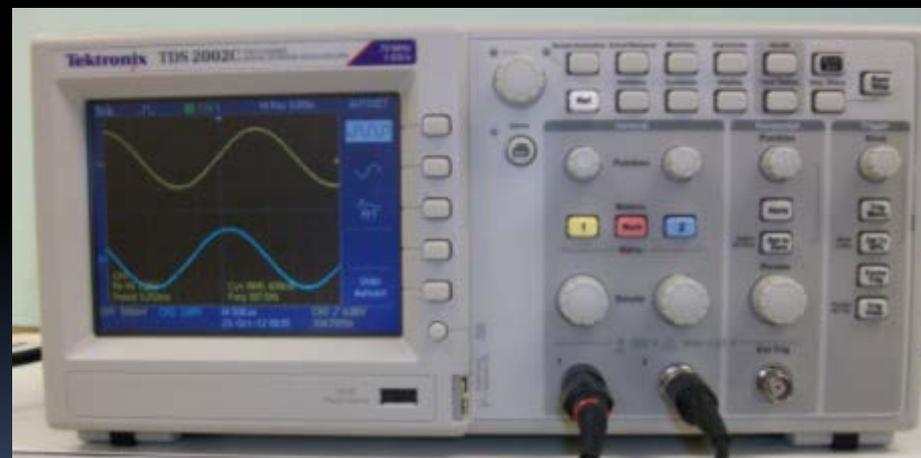
use a saída traseira

O gerador de áudio

- Utilize a saída traseira: ela tem impedância similar ao circuito
- Ligue o **Power** ajuste a **freqüência e**
- Ajuste a **amplitude**
- Cuidado com a **forma do pulso**, há um ajuste



0 que vai ser preciso:

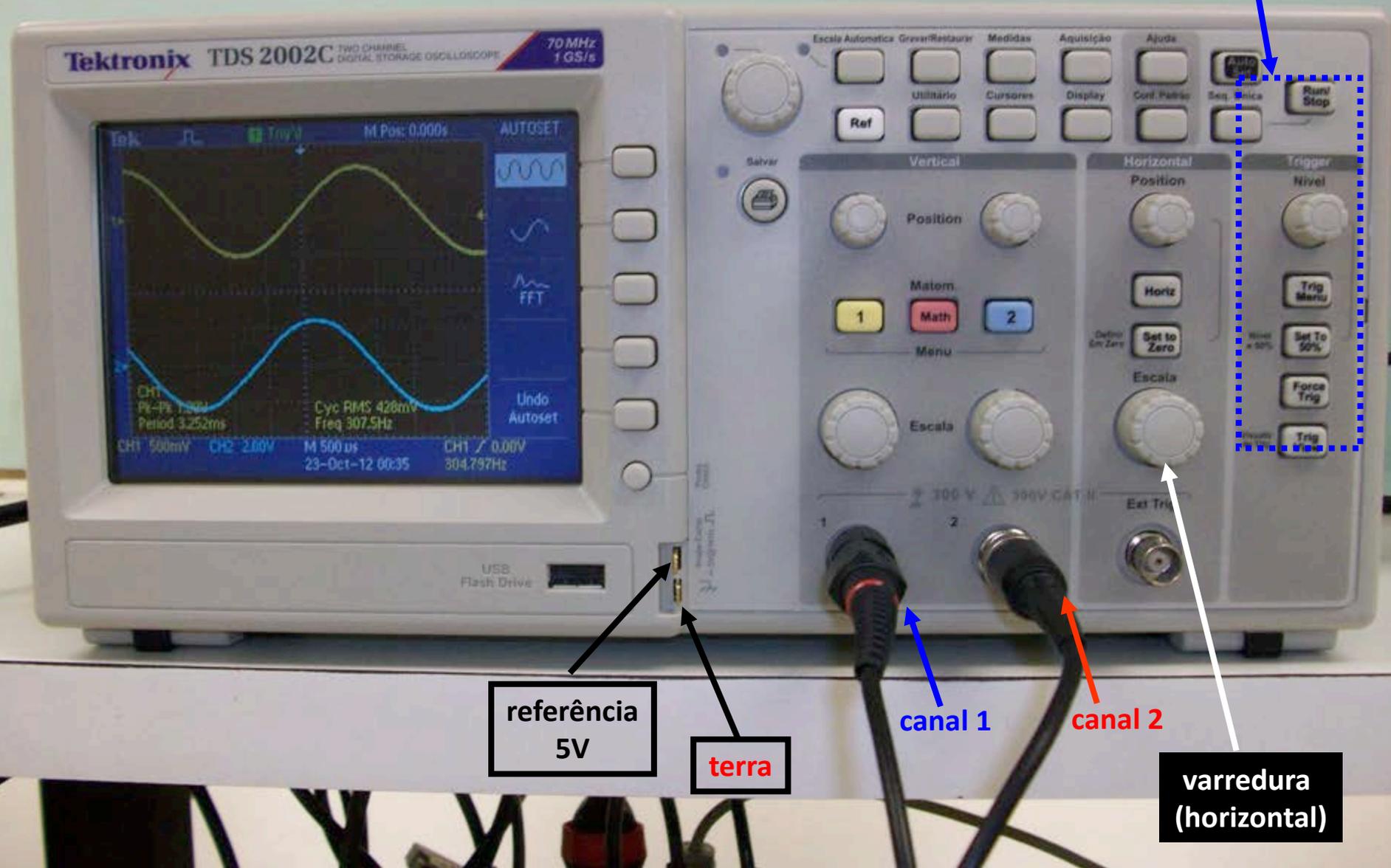


o osciloscópio que vai usar

O osciloscópio

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

gatilho (trigger)



referência
5V

terra

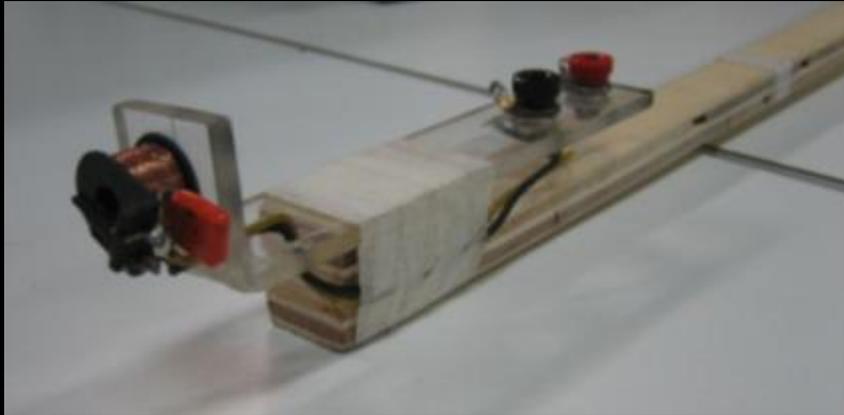
canal 1

canal 2

varredura
(horizontal)

O material:

- Bobina sonda em carretel

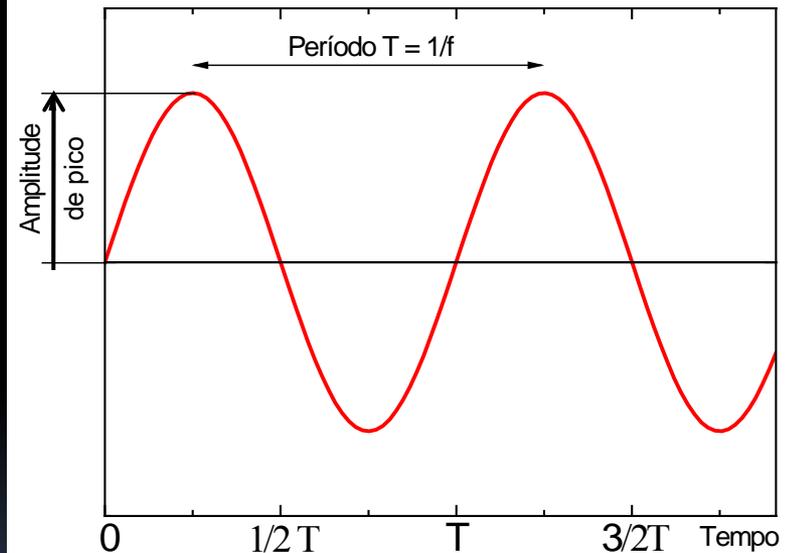


- Solenóide de referência



o gerador que fornece a corrente:

Tensão alternada



$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

23:39

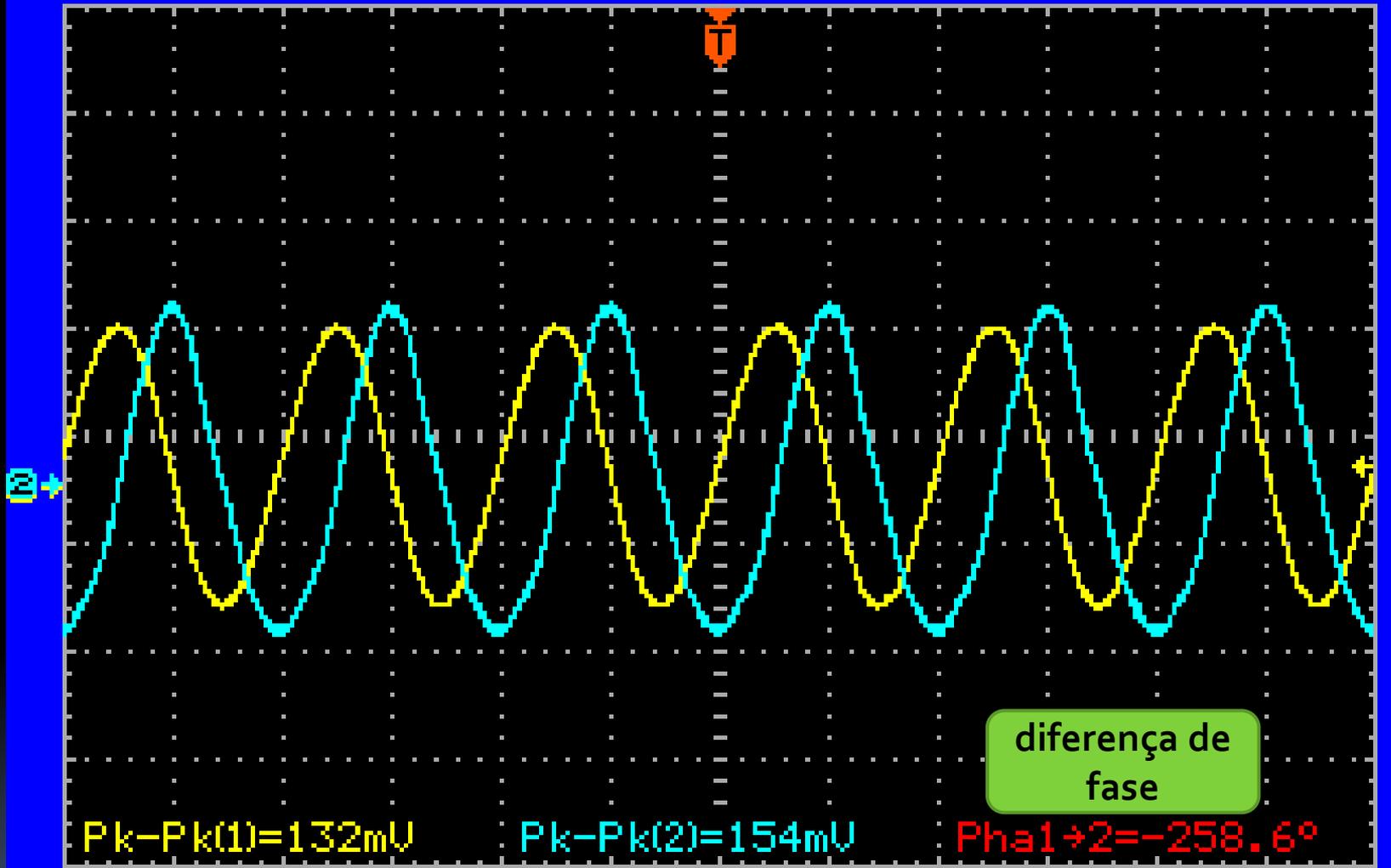


RUN



Trig'd

400kSa/s



50.0mV

CH2= 50.0mV

M 500u=

CH1 f 10.0mV

Volts /divisão

tempo/divisão

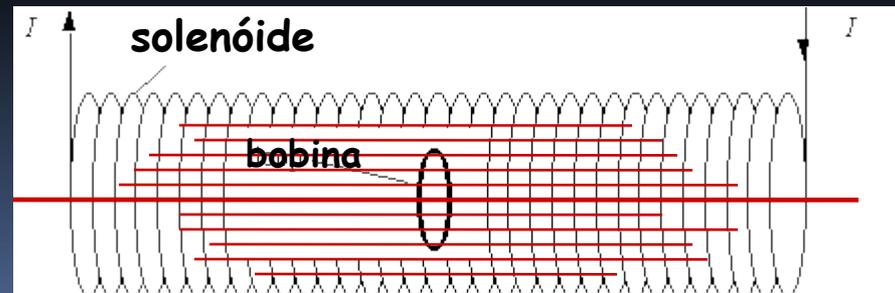
0.0000s

Lei de Faraday: comprovação

- O campo de amplitude constante e conhecido eu oriento paralelo ao vetor área da bobina sonda.
- Essas condições permitem calcular o fluxo do campo de maneira simples:

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot \vec{n} da \equiv A_{btotal} B = N_b A_b B$$

Se o ângulo entre B e o vetor área, ou a parte geométrica de B não forem constantes em toda a área da bobina sonda não é possível fazer a aproximação acima

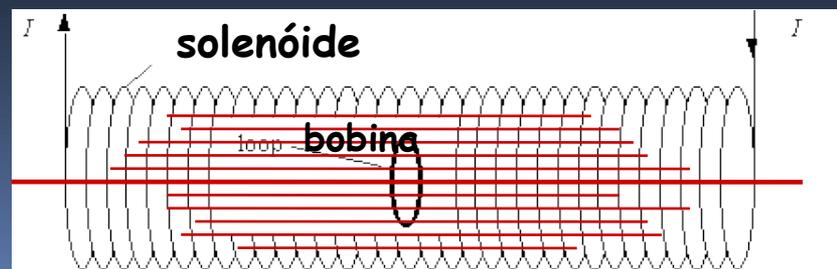


Como fazer: comprovação da Lei de Faraday

- O vetor área da bobina sonda deve ser orientado paralelo ao eixo do campo de amplitude constante e conhecido (no centro do solenóide). Como garantir isso?
- A bobina é uma cuja área pode-se calcular analiticamente:
 $A_b = N_b A_{b0}$
- Use o circuito do slide 20 e prove que os dois lados dessa equação são iguais.

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

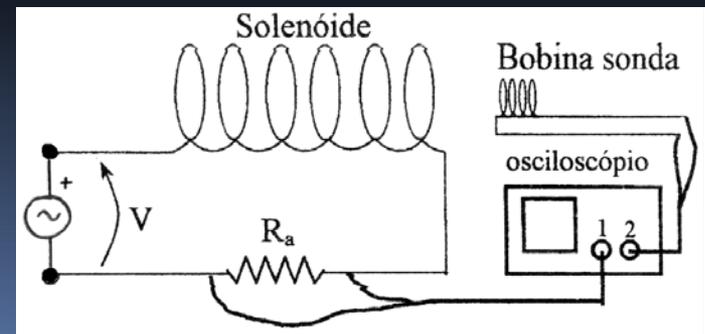
$$\varepsilon_b = -A_{\text{bef}} \omega \left(\frac{\mu_0 N_s}{L_s} \left[\frac{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}{2} \right] \frac{V_{\text{Rap}}}{R_a} \right) \cos \omega t$$



Tarefa 1: comprovação da Lei de Faraday:

- Meça a f.e.m. para 1 valor de pico da corrente.
- Calcule a área da bobina.
- Compare com o valor nominal.

**ATENÇÃO AOS
TERRAS!!!**



Tarefa 2: calibração da bobina sonda

- **Calibração da bobina sonda em carretel:**
 - O mesmo circuito que estava usando: só muda a bobina sonda.
 - Usando a bobina sonda de área desconhecida, fazer gráfico da **f.e.m.** induzida em função da corrente no solenóide (valor de pico).
 - Anotar número da bobina sonda utilizada.
 - Medir a defasagem entre o campo magnético (corrente) e a **f.e.m.** na bobina sonda. Compare com o resultado previsto teoricamente e com os dos colegas.
 - Ajustar os dados e determinar a área efetiva da bobina sonda em carretel.

Tarefa 3: medir o campo do solenóide ao longo do eixo

- **Medida do campo do solenóide:**
 - O mesmo circuito que estava usando e procure usar a bobina sonda em carretel que calibrou (ou pergunte o valor da área dela para quem a calibrou e coloque a ref)
 - Usando a bobina sonda, fazer gráfico da **f.e.m.** induzida em função da posição da mesma ao longo do eixo que passa pelo centro do solenóide (**de 2 em 2 cm**).
 - Meça até chegar a 10 cm fora do solenóide
 - Verifique que está medindo no eixo central
 - Você pretende começar a medir a partir de que ponto? Escolha e justifique sua escolha.
 - Compare com o resultado com o previsto teoricamente: sobreponha no mesmo gráfico .

Os erros experimentais

- Pense como devem ser os erros experimentais: o manual do osciloscópio estará na sala.
- No caso da medida do campo do solenóide pense como vai determinar o erro da posição:
 - há o erro da escala
 - e o erro da ponta de prova

Dicas

- 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. Explique e justifique como fez. Comente.
- Compare seu resultado com os de seus colegas e' fundamental: você não entrega o trabalho com erro de cálculo ou falha na tomada de dados.
- Converse com os colegas já enquanto toma dados. Coloque essas comparações no seu relatório.

Para hoje: pergunta

- **Pergunta:** Deve existir alguma preocupação a respeito do alinhamento do solenóide com o campo magnético local? Porque?
- E tudo o que a gente mediu calculou e concluiu é válido?
- PORQUÊ? E JUSTIFIQUE>

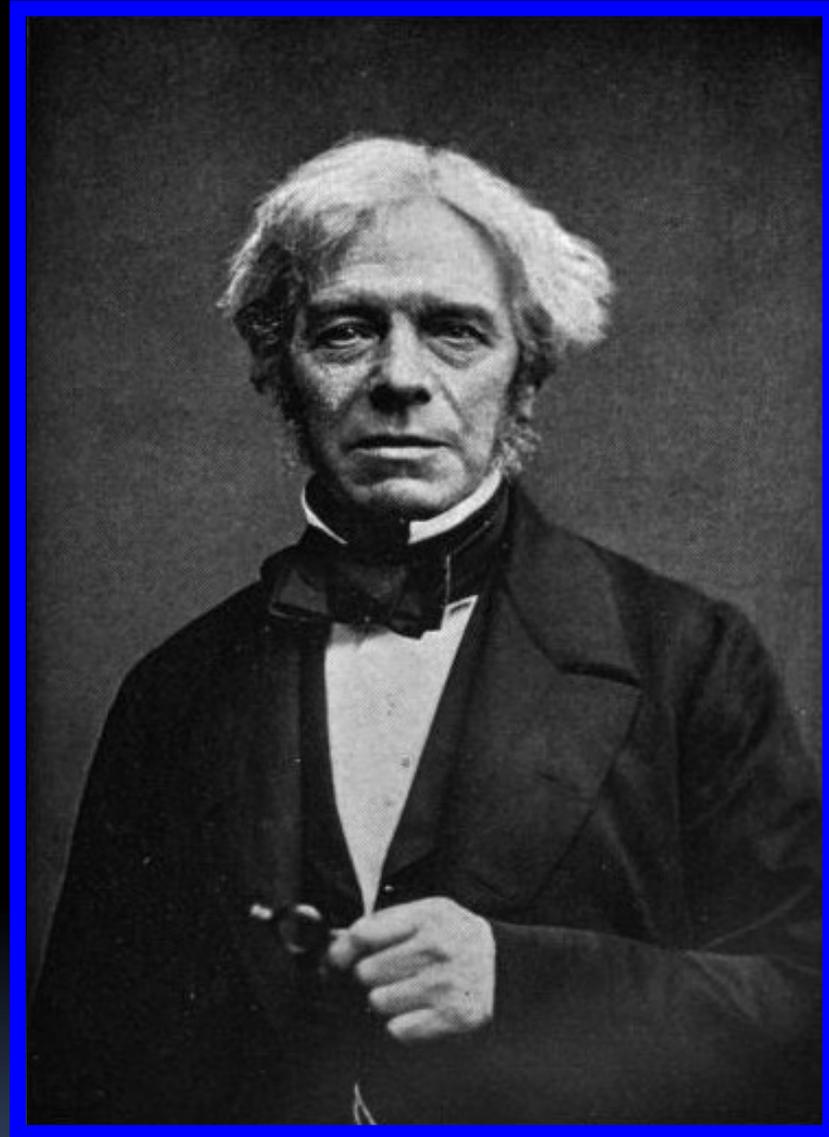
Michael Faraday deveria ser um nome por nós invocado todos os dias.

Faraday inventou o primeiro motor e o primeiro gerador elétrico. E ele descobriu muitos dos princípios fundamentais que governam a física dos fenômenos elétricos e isso sem nenhum treinamento matemático.

Faraday, como Edson, praticamente não teve educação formal, mas ele lia vorazmente, começou a trabalhar muito cedo e adorava "experimental" o que atraiu a atenção do químico Sir Humphrey Davy que o contratou como secretário.

Até onde se sabe, **Faraday** nunca escreveu uma equação na vida, o que não o impediu de fazer descobertas revolucionárias.

Mesmo **Maxwell**, fluente como era em matemática, preferia as demonstrações experimentais em que Faraday era imbatível: "**scientific truth should be presented in different forms and should be regarded as equally scientific**" (Maxwell)



O que não quer dizer que não devem estudar cálculo!!!!

O projeto

- O projeto deve constar de
- medidas (com incertezas),
- análise dos dados
- Comparação com valores esperados ou existentes ou com modelos
- Fazer um poster para apresentar o projeto.

As datas

- O projeto, deve ser apresentado no dia 29 de novembro, quando o curso termina.
- E deverão ficar expostos por uma semana.
- Vocês não terão experimentos nas 2 semanas antes da apresentação do projeto.
- Os autores devem permanecer ao lado dos posters durante a manhã de terça, começando às 8:00 hrs.