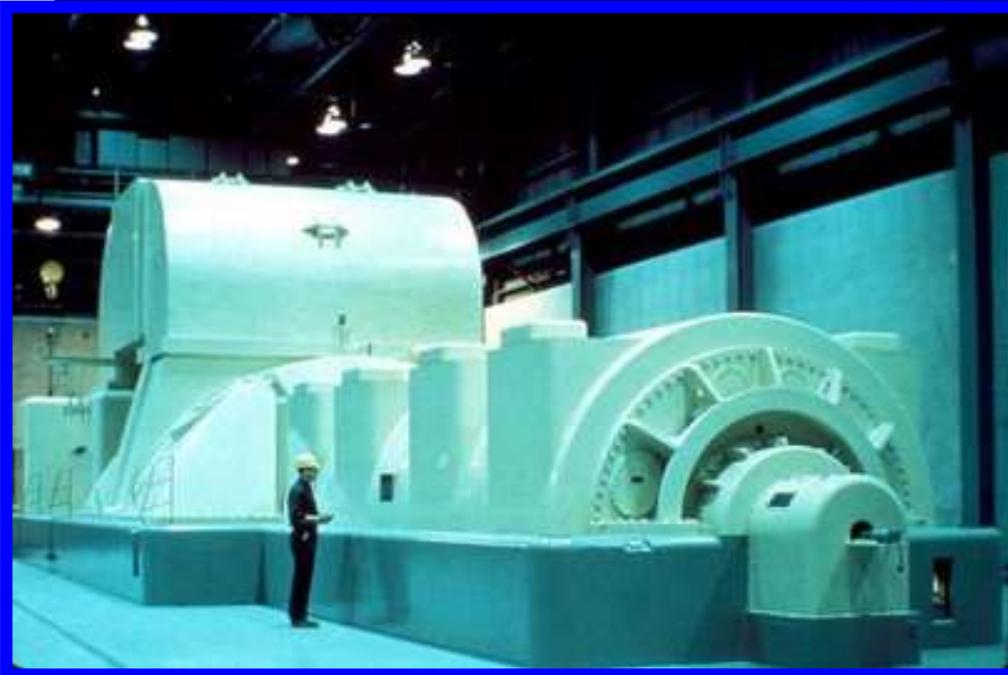


LEI DE FARADAY



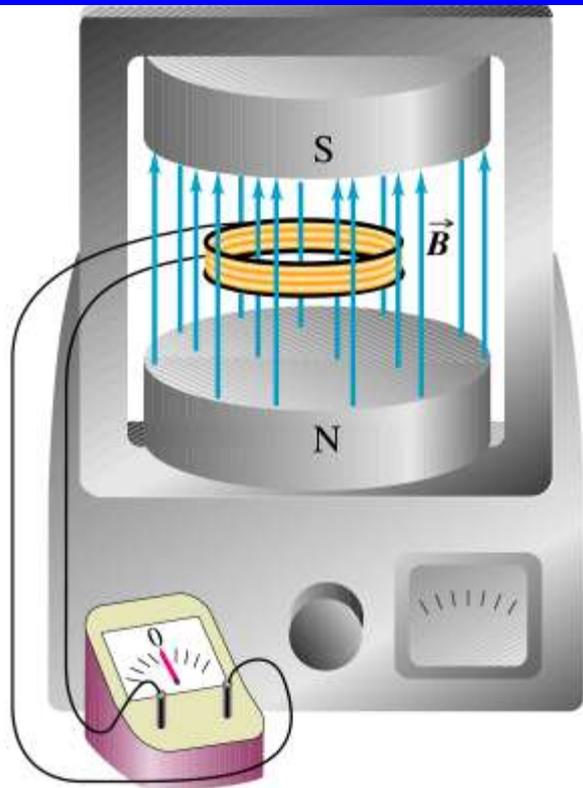
Laboratório de Física 3
2012

Profs: Eloisa Szanto - Henrique Barbosa -
Nelson Carlin- Paulo Artaxo - Vinicius

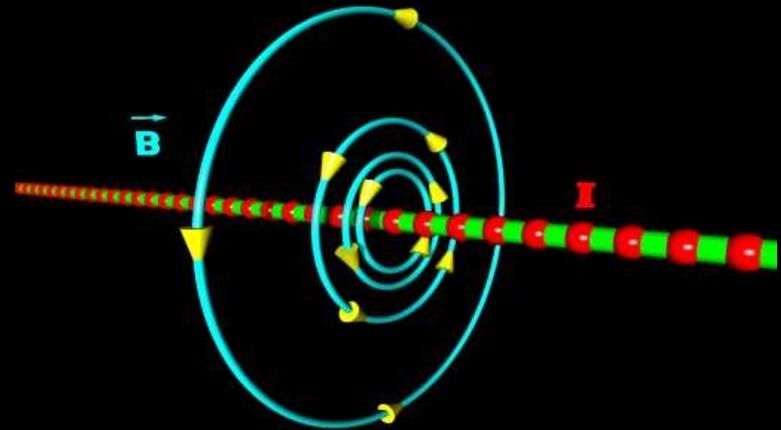
Produção de eletricidade para muita gente? A resposta foi copiar em escala maior o protótipo de gerador de Michael Faraday: fazendo nascer a era da eletricidade que dramaticamente revolucionou o modo de viver dos homens em todo o planeta.

Lei de Faraday

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



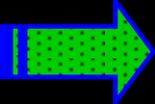
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

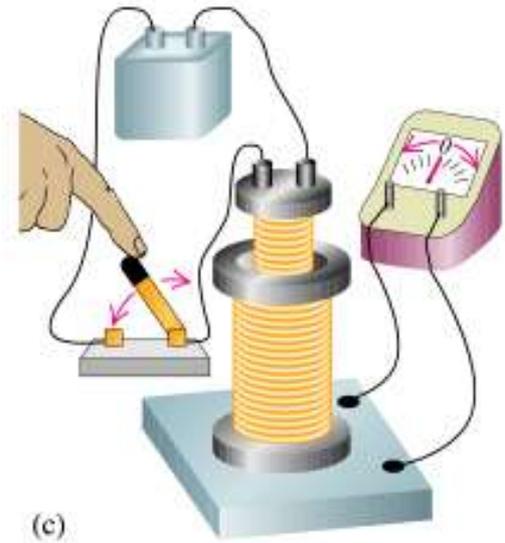
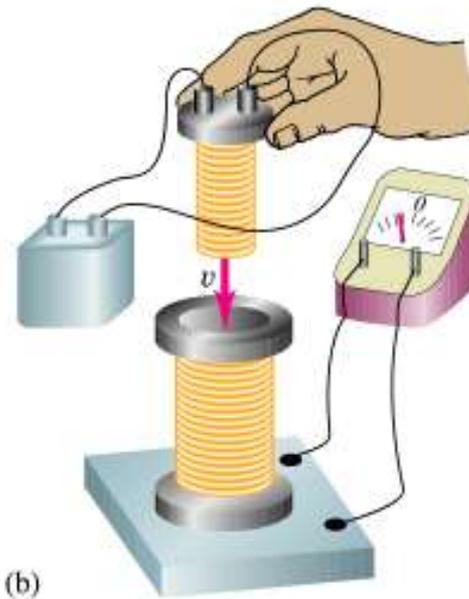
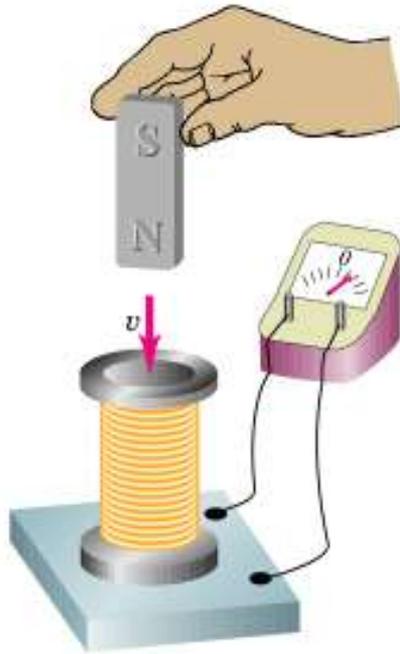


©2006 Yves Pelletier (ypelletier@nrc.ca)

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

Lei de Faraday

- 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.



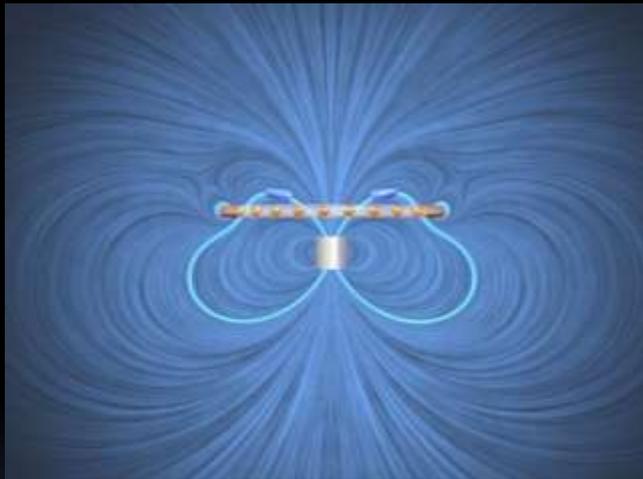
houver variação na área compreendida pelo circuito, ou espira



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

Lei de Faraday

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



FallMagSuperAbove_640.mpeg

O que está mudando é 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.

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

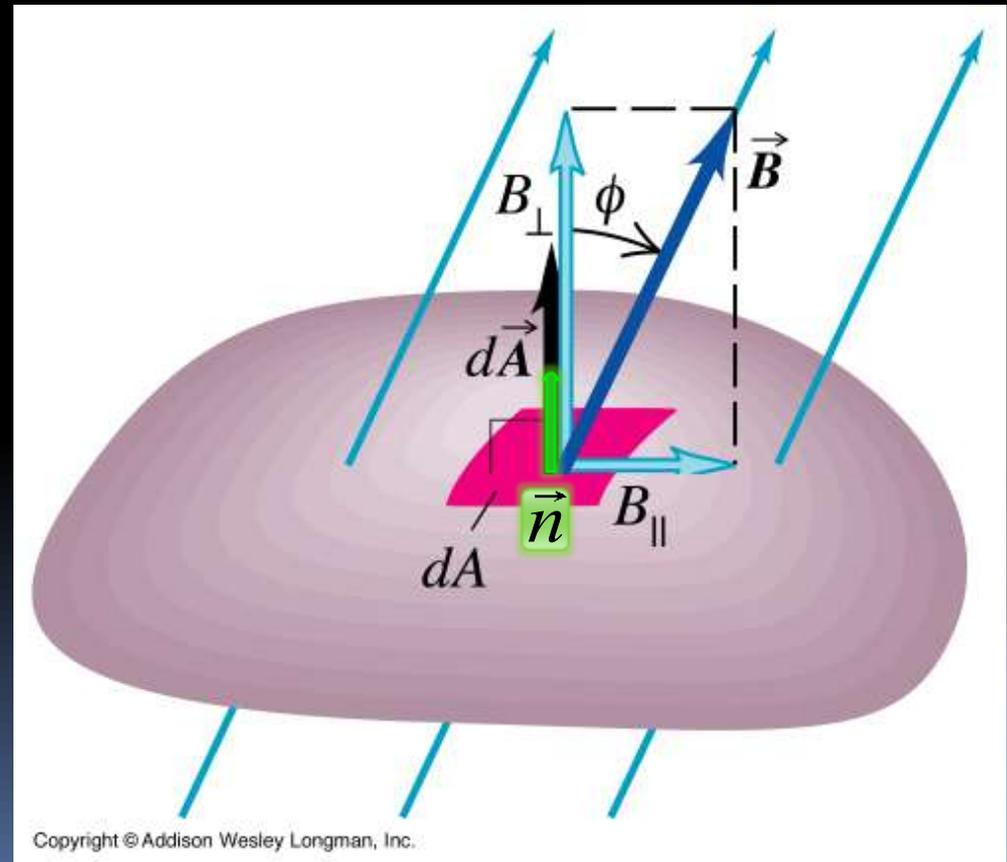
sistema MKS: unidade de fluxo magnético é o Weber: 1 weber = 1Wb = 1 T×m²

Lei de Faraday

- 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:

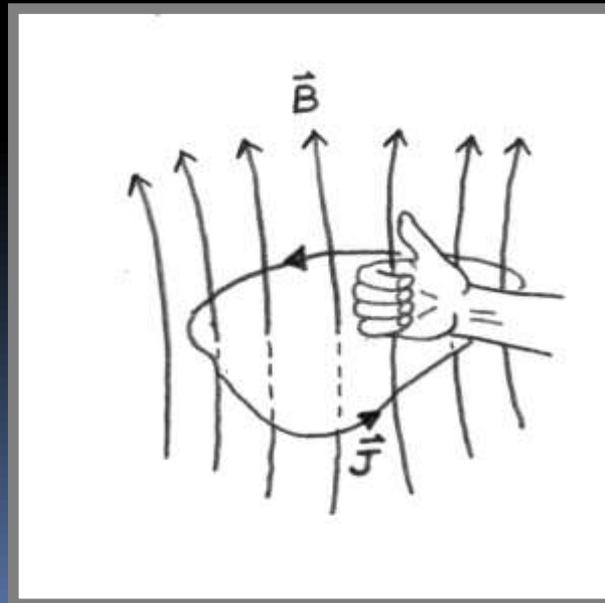
$$\mathcal{E} = - \left(\frac{dN\Phi_B}{dt} \right)$$

- 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

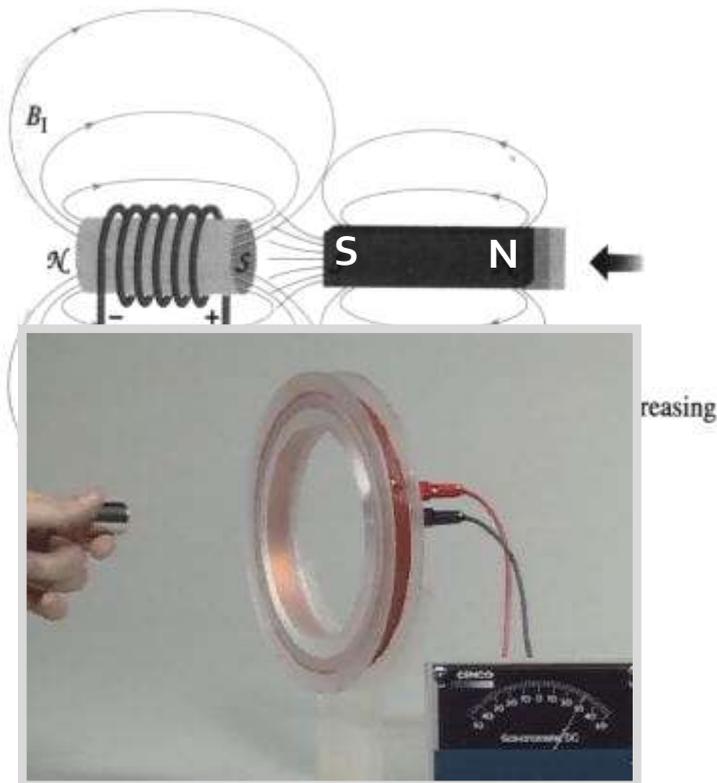
Lei de Faraday

- 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.**

regra da mão
direita



Lei de Lenz



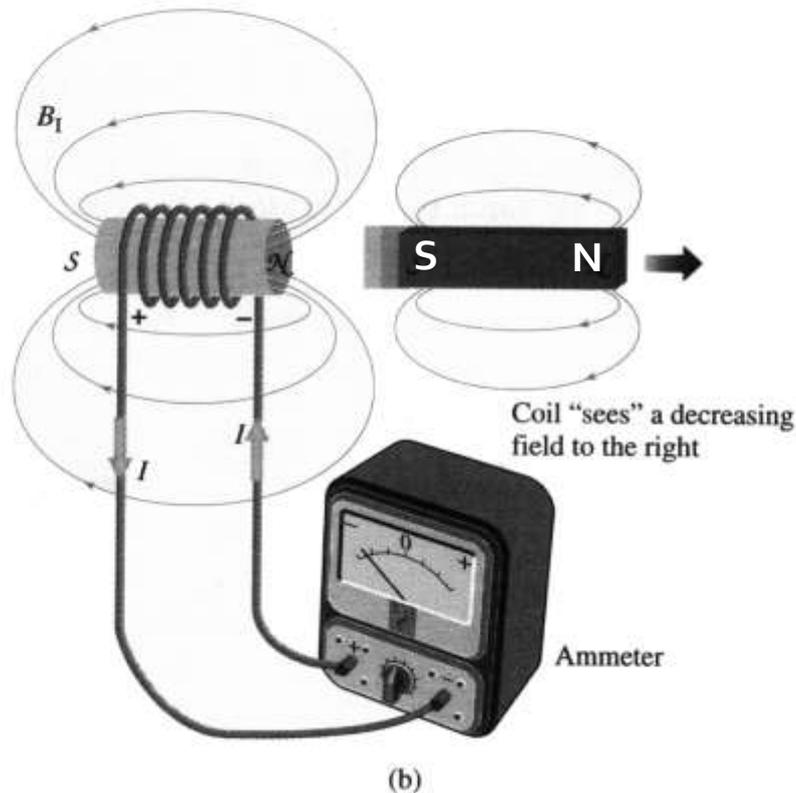
- o agente externo move um ímã permanente para o interior de uma bobina

- 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.

• O trabalho exercido pelo agente externo proporciona a energia necessária para gerar e manter a corrente induzida na bobina.

Lei de Lenz



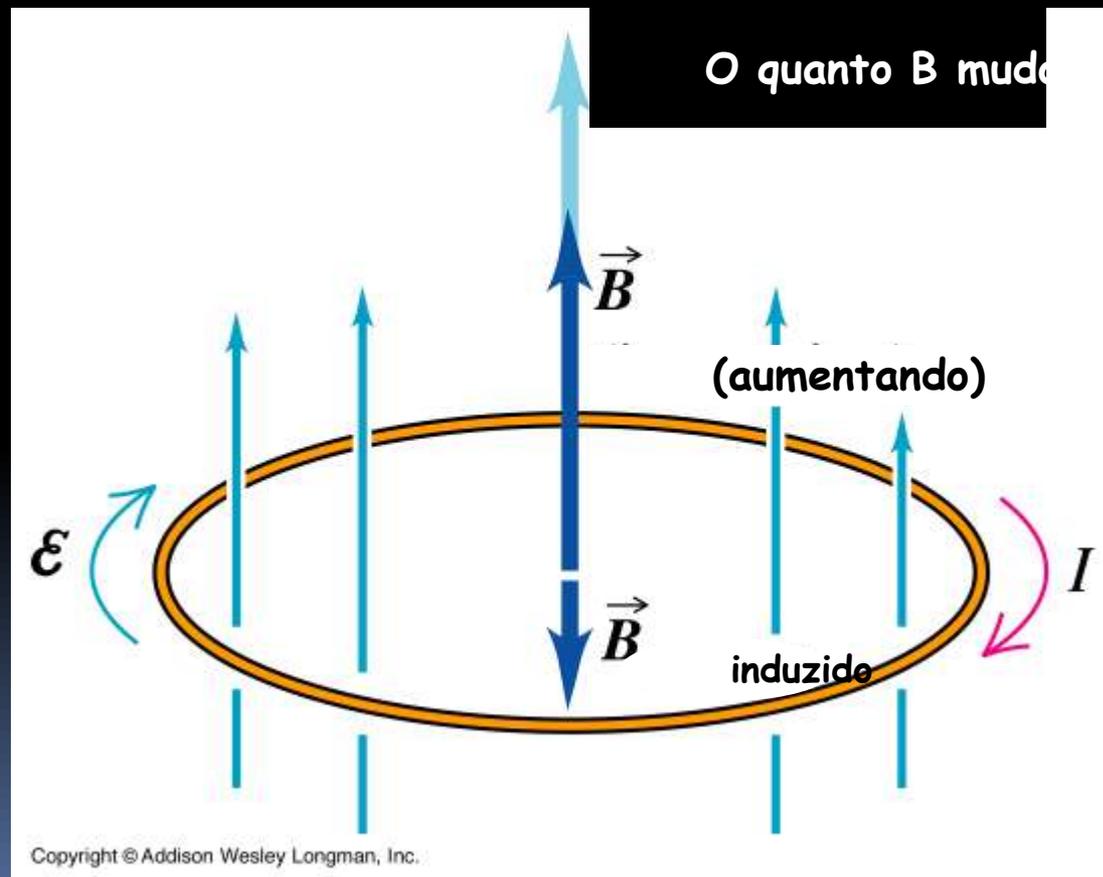
- um agente externo move um ímã permanente para fora de uma bobina:
- o fluxo de B através da bobina estará **diminuindo**.
- o campo induzido vai se opor a essa variação, gerando um polo magnético contrário ao que está se distanciando.

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



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:

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

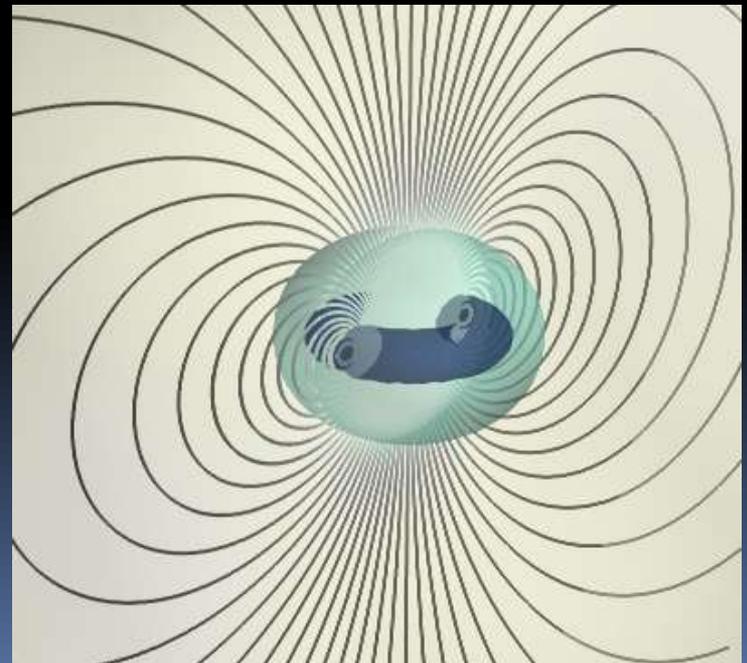
medimos

Temos que saber
calcular

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

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), medindo a **f.e.i.** induzida numa espira



Para hoje:

- Vamos explorar **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**
- E ainda posso comprovar a Lei de Faraday medindo um campo conhecido (solenóide no centro) com uma bobina de área conhecida.

A bobina sonda

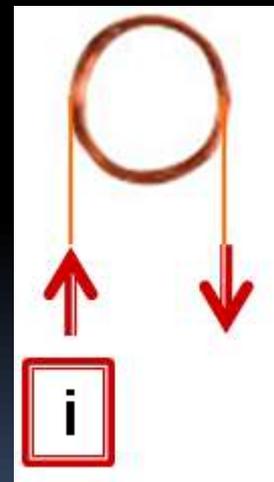
Uma **boa** bobina sonda:

- ▣ tem que ter uma área efetiva A_{bef} grande
- ▣ tamanho da bobina deve ser o menor possível

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

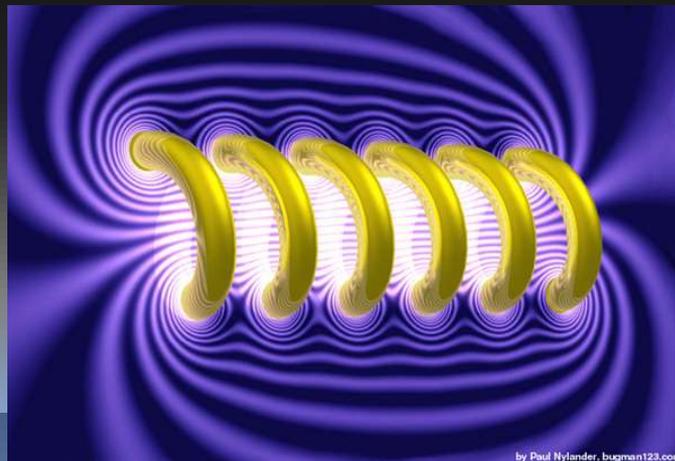
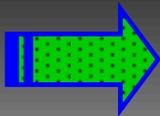
Como fazer?

- ▣ 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)
 - portanto o fluxo do campo através da bobina sonda também pode ser calculado



by Paul Nylander, bugman123.com

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

Diagram illustrating the calculation of the induced EMF (ε_b) in a probe coil. The equation is shown with red circles around ε_b , A_{bef} , and $\frac{dB_s}{dt}$. Red arrows point from these terms to blue boxes labeled "meço" (measure) and "descubro" (discover). A red arrow also points from the entire equation to a blue box labeled "calculo" (calculate).

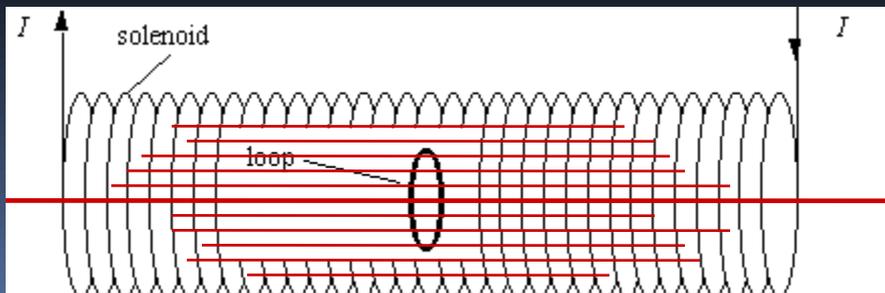
Calibração da bobina sonda

- Dentro do solenóide alimentado com uma corrente alternada conhecida, coloca-se a bobina sonda:

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

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

- 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.



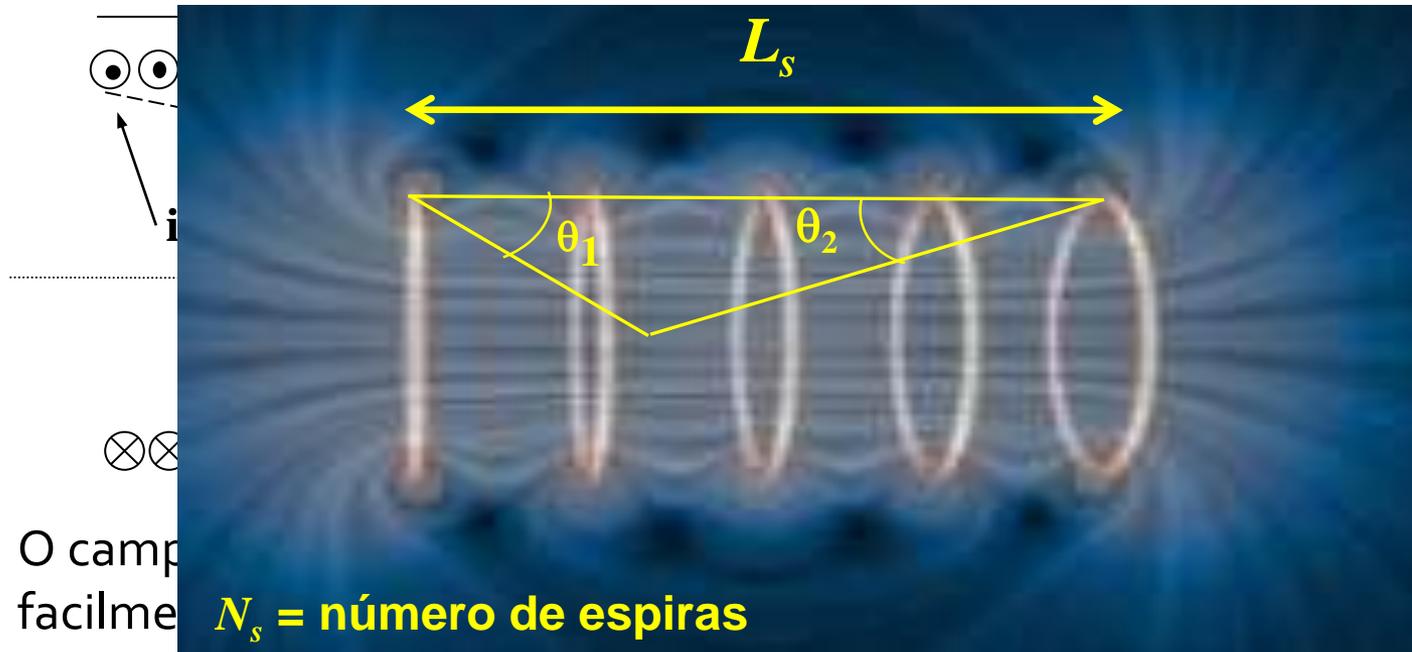
$$\varepsilon_b = -A_{\text{bef}} \left(\frac{dB_s}{dt} \right)$$

Campo de um solenóide longo

$i_{sp} = i$ de pico do solenóide

- Esquema do solenóide:

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



- O campo facilmente

ode ser

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

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

O campo do solenóide finito

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

sendo:

N_s o número de espiras do solenóide,

L_s seu comprimento,

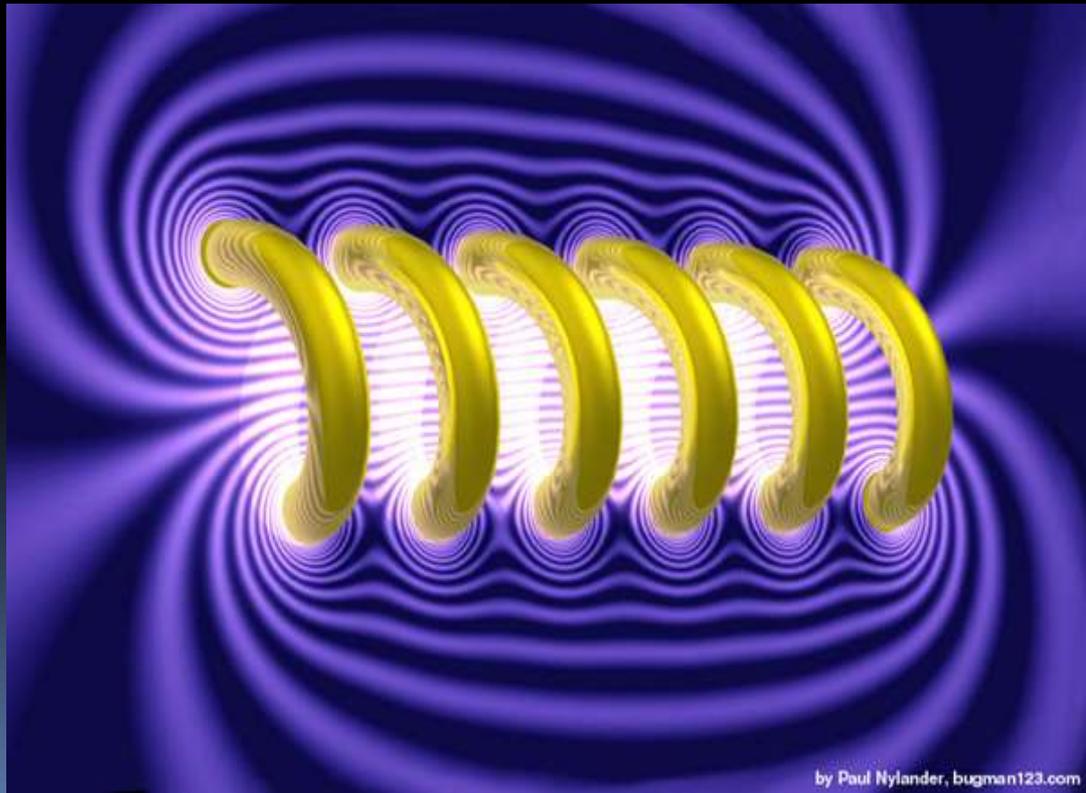
i_s a corrente que o percorre,

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

$$B_{Sp} = \frac{\mu_0 N_s i_s}{L_s} \frac{\sin \theta_1 + \sin \theta_2}{2}$$

e você pode deduzí-lo
fazendo algumas
aproximações

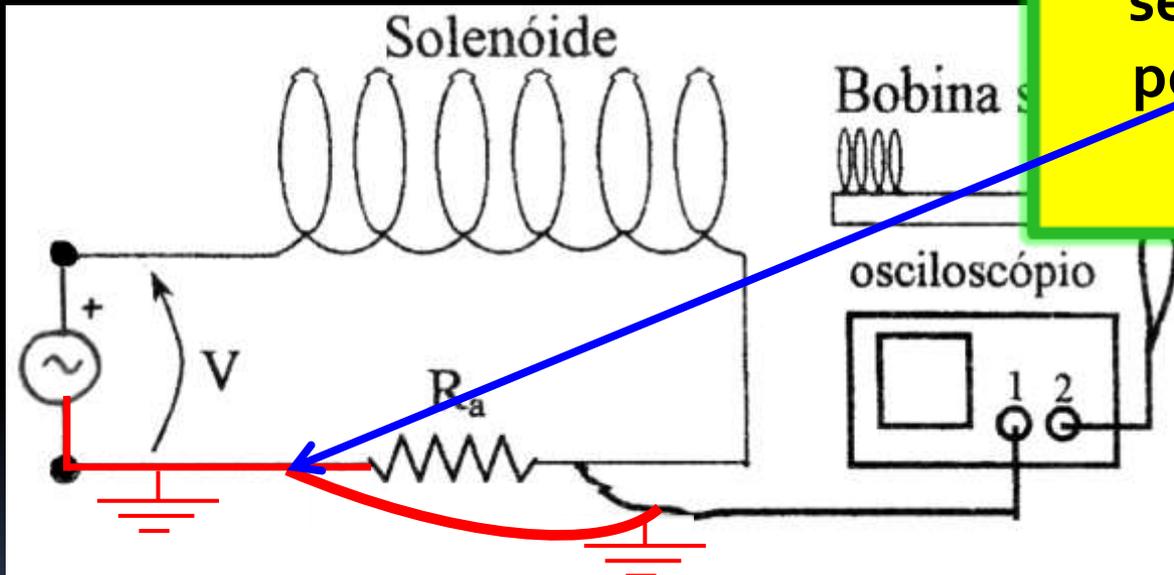


Calibração da bobina sonda: medida

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

i_{Sp}

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



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

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.

Calibração da bobina sonda

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

$$e_{bp} = -A_{bef} \omega \frac{\mu_0 N_s}{L_s} \frac{\cos q_1 + \cos q_2}{2} \frac{V_{Rap}}{R_a} \cos \omega t$$

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

- 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 obtém-se a área efetiva da bobina:

$$A_{bef} = \frac{\varepsilon_{bp}}{\omega B_{sp}}$$

O campo do solenóide finito: medida

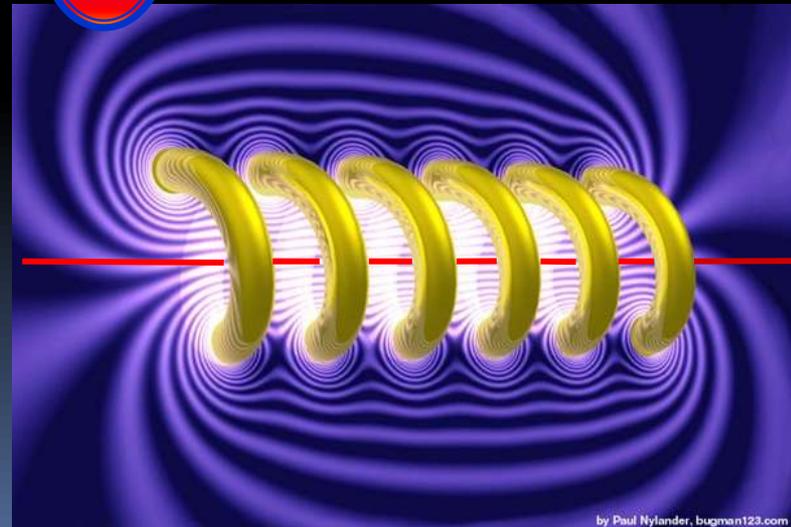
- Para medir o campo ao longo do eixo de um solenóide finito, passamos uma corrente por ele e medimos a f.e.m. numa bobina sonda de área conhecida, deslocada de 1 em 1 cm ao longo do eixo:

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

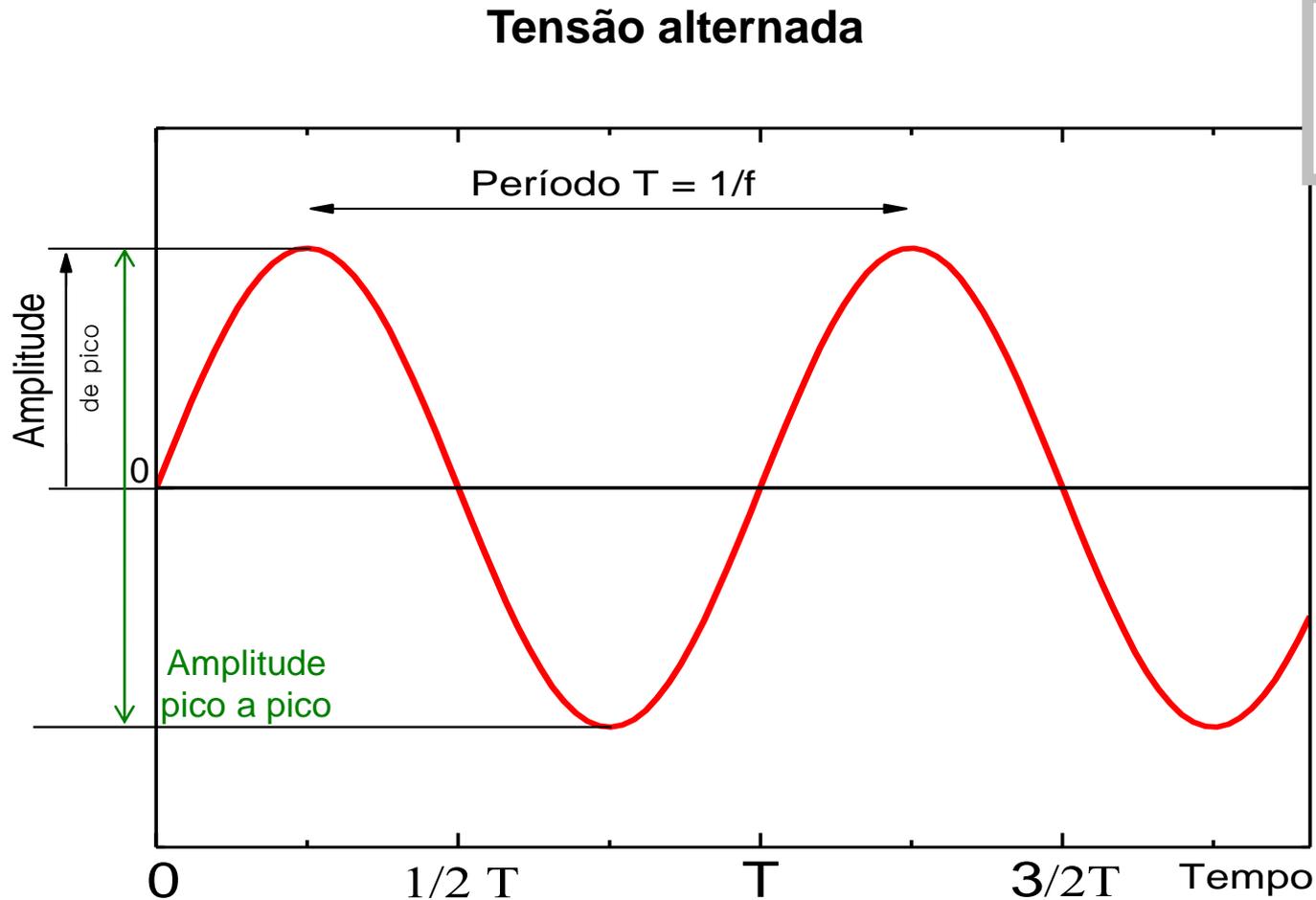
$$B_{sp} = \frac{\varepsilon_{bp}}{\omega A_{beff}}$$

meço

conheço



Tensão alternada: senoidal



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

nesse caso
um cosseno

Medida simultânea de:

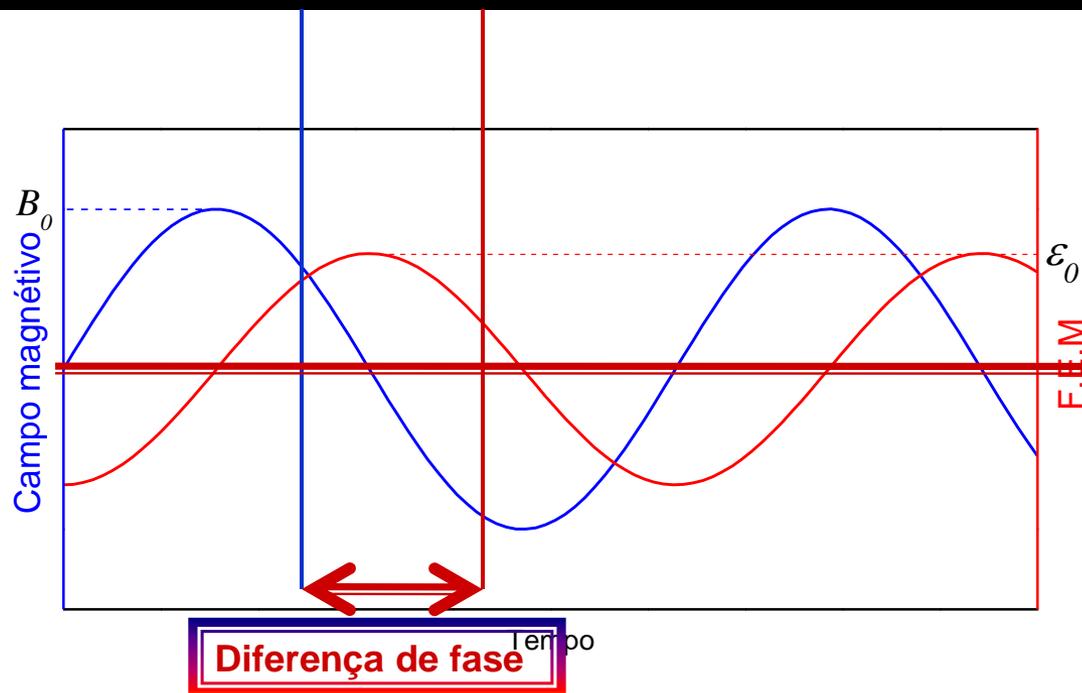
- **Campo:**

$$B(t) = \underbrace{\frac{\mu_0 N_s i_p}{2L_s} (\cos q_1 + \cos q_2)}_{B_0} \times \sin(\omega t) = B_0 \sin(\omega t)$$

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

$$e = - \underbrace{B_0 N A \omega}_{\epsilon_0} \cos(\omega t) = -e_p \cos(\omega t)$$

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

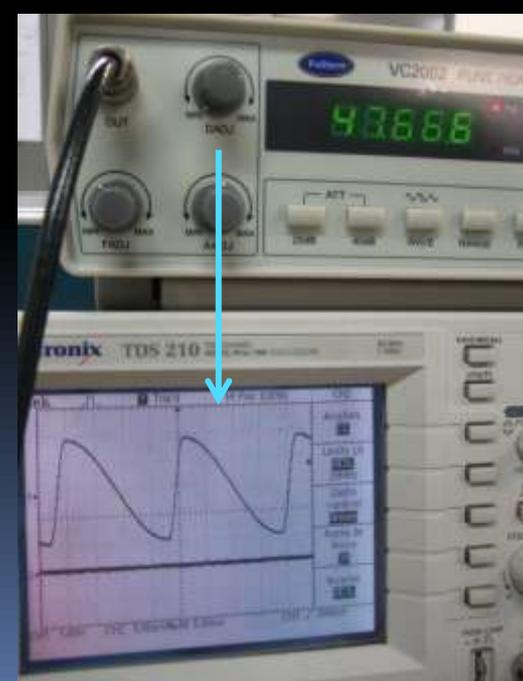
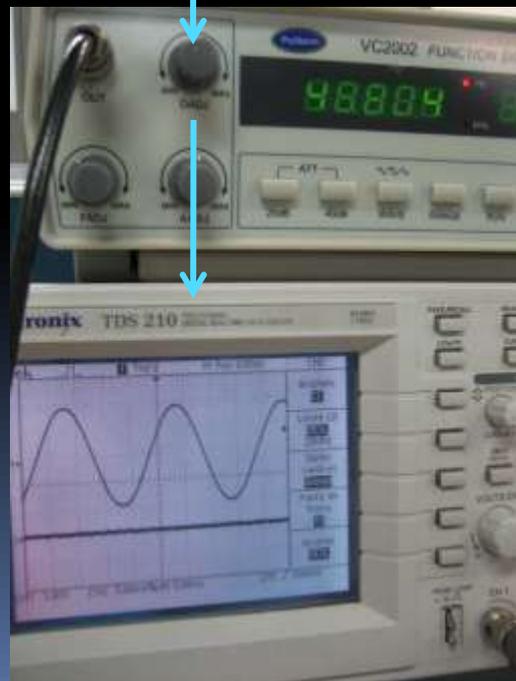
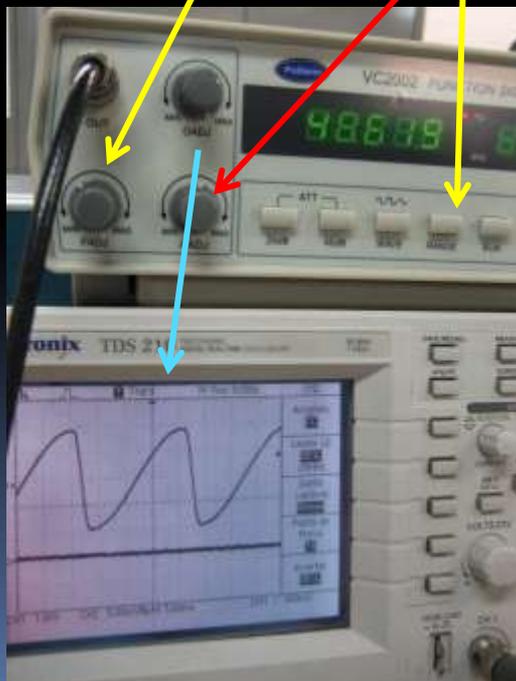


cada canal do
osciloscópio é um
voltímetro

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

O Gerador de áudio

- Ajuste de **freqüência** e **amplitude**
- Cuidado com a **forma do pulso**, há um ajuste



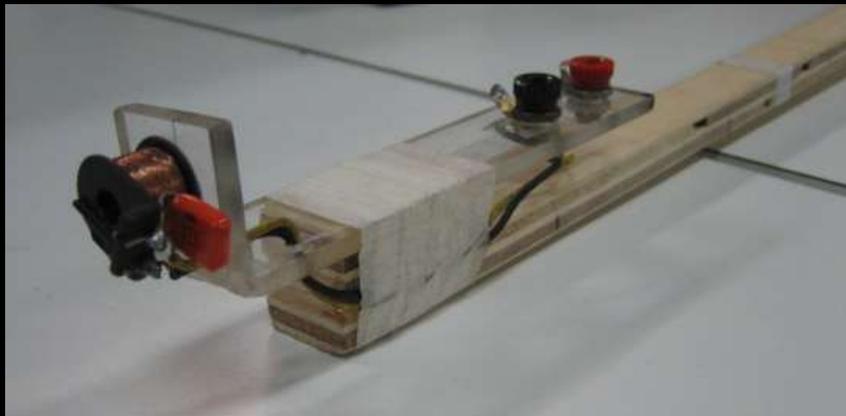
O que vai ser preciso:



o osciloscópio que vai usar é um modelo um pouco diferente na aparência, mas com as mesmas funções

As medidas:

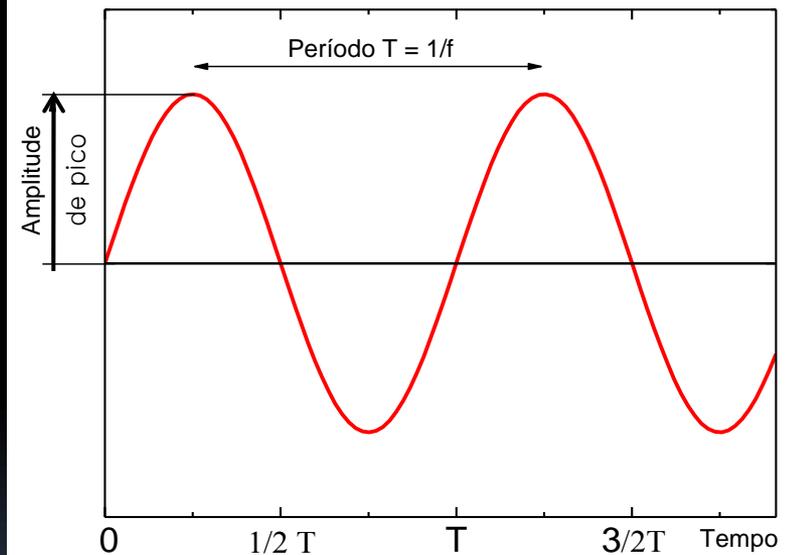
- Bobina sonda em carretel



- Solenóide de referência



Tensão alternada



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

Funções matemáticas

Tomada de dados

Congela imagem na tela

Armazena dados, imagens, pode exportar, etc



controle da escala: volts/div para os 2 canais

controle da escala de tempo: s/div

controle do gatilho

23:39

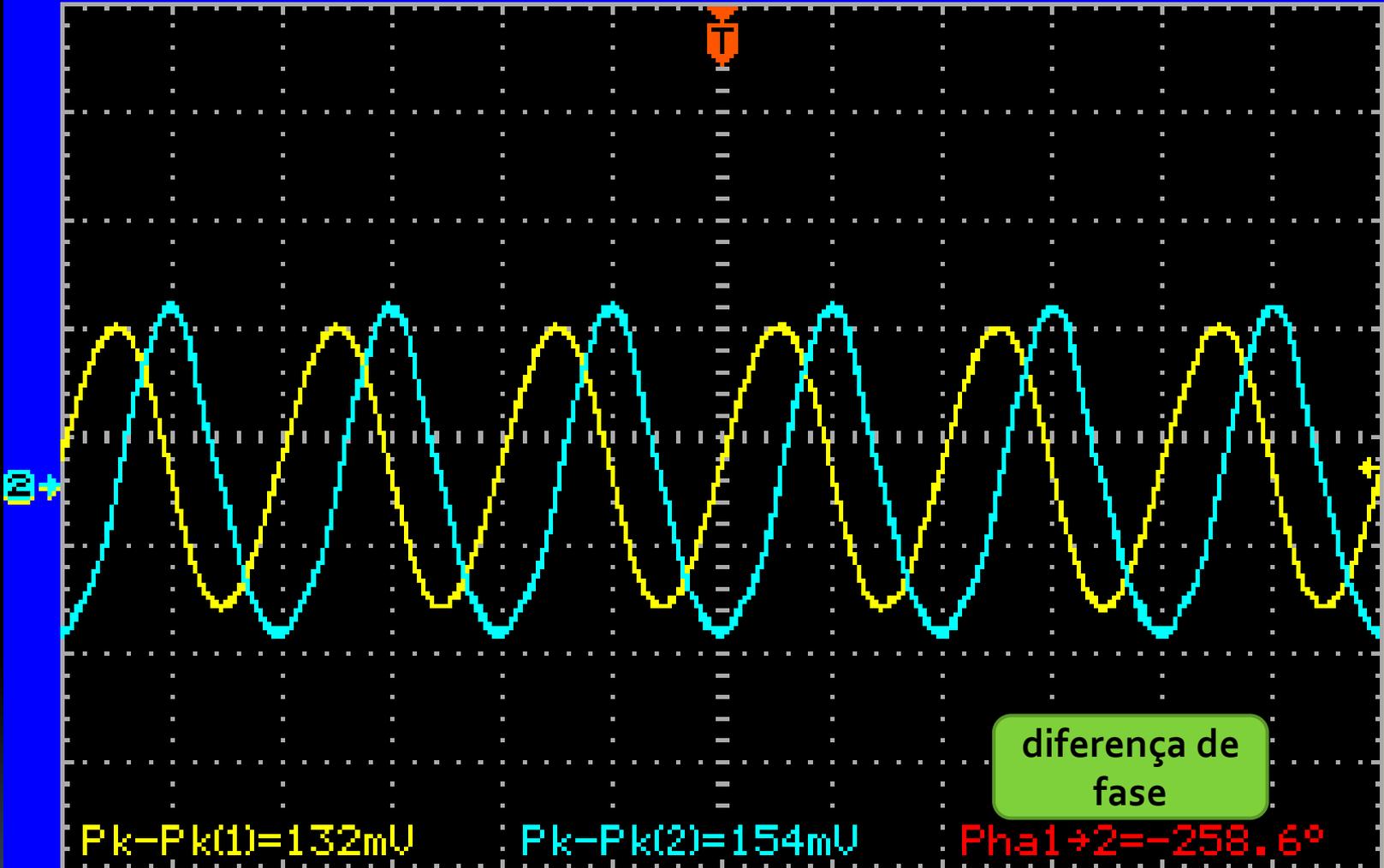


RUN



Trig'd

400kSa/s



Pk-Pk(1)=132mV

Pk-Pk(2)=154mV

Pha1→2=-258.6°

50.0mV

CH2=50.0mV

M 500us

CH1 f 10.0mV

0.0000s

amplitude
pico a pico

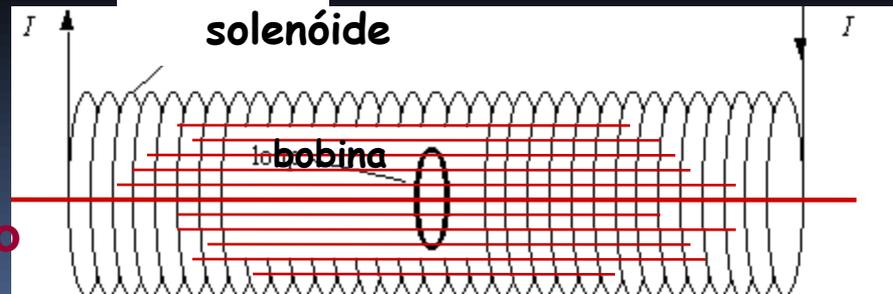
diferença de
fase

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

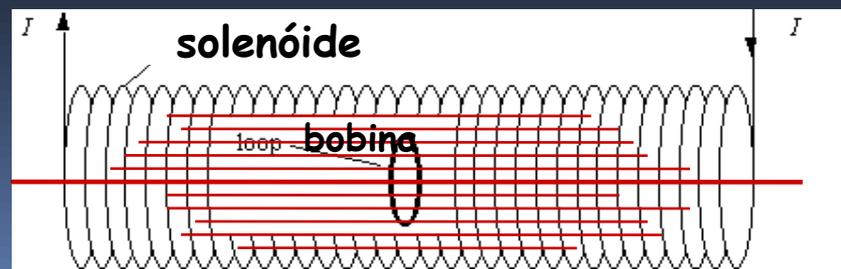


Para hoje: comprovação da Lei de Faraday:

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

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

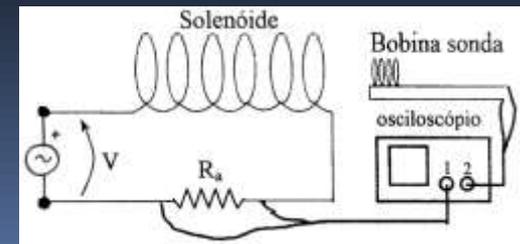
$$\varepsilon_b = -A_{\text{bef}} \omega \left(\frac{\mu_0 N_s}{L_s} \left[\frac{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}{2} \right] \frac{V_{\text{Rap}}}{R_a} \right) \cos \omega t$$



Para hoje: comprovação da Lei de Faraday:

- Meça a f.e.m. para vários valores de pico da corrente.
- Faça um gráfico da f.e.m. em função do valor de pico do campo magnético ou da corrente, se preferir.
- Faça o ajuste e calcule a área da bobina.
- Compare com o valor nominal.

**ATENÇÃO AOS
TERRAS!!!**



Para hoje: 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.

Para hoje: calibração da bobina sonda

- 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.
- Compare seu resultado com os de seus colegas.
- Comente.
- **Pergunta:** Deve existir alguma preocupação a respeito do alinhamento do solenóide com o campo magnético local? Porque?

Para hoje: pergunta

- E tudo o que a gente mediu calculou e concluiu é válido?
- PORQUE?

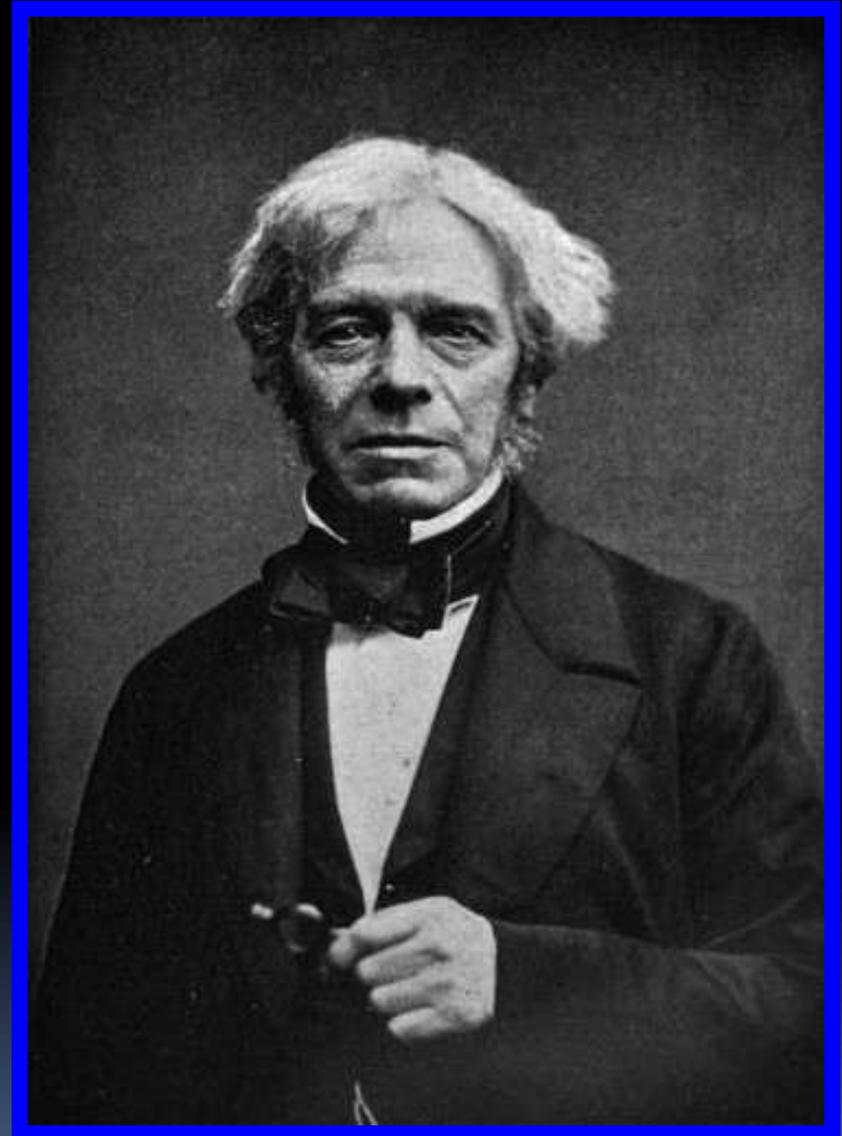
Michael Faraday deveria ser um nome por nós invocado todos os dias.

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)





GOOD LUCK!

GOOD LUCK!

GOOD LUCK!

GOOD LUCK!

GOOD LUCK!