



# Física Experimental III

Notas de aula: [www.fap.if.usp.br/~hbarbosa](http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa)

LabFlex: [www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex](http://www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex)

## Experiência 2, Aula 3

Prof. Henrique Barbosa

[hbarbosa@if.usp.br](mailto:hbarbosa@if.usp.br)

Ramal: 7070

Ed. Basílio Jafet, sala 229

# Condutividade da Água

**H<sub>2</sub>O**

**Condutividade Elétrica**

$(6,67 \pm 0,07) 10^{-5} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$

$(5,8 \pm 0,1) 10^{-5} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$

$(4,26 \pm 0,58) 10^{-1} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$

$(6,61 \pm 0,026) 10^{-5} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$

$(6,15 \pm 0,40) 10^{-5} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$

$0,15 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$

$(4,72 \pm 0,05) 10^{-6} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$

$(8,9 \pm 1,4) 10^{-5} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$

## Wikipedia

**Água do mar:**  $5 \times 10^{-2} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$

**De beber:**  $5 \times 10^{-6}$  até  $5 \times 10^{-4} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$

**Deionizada:**  $5.5 \times 10^{-8} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$



# Atividades da semana passada

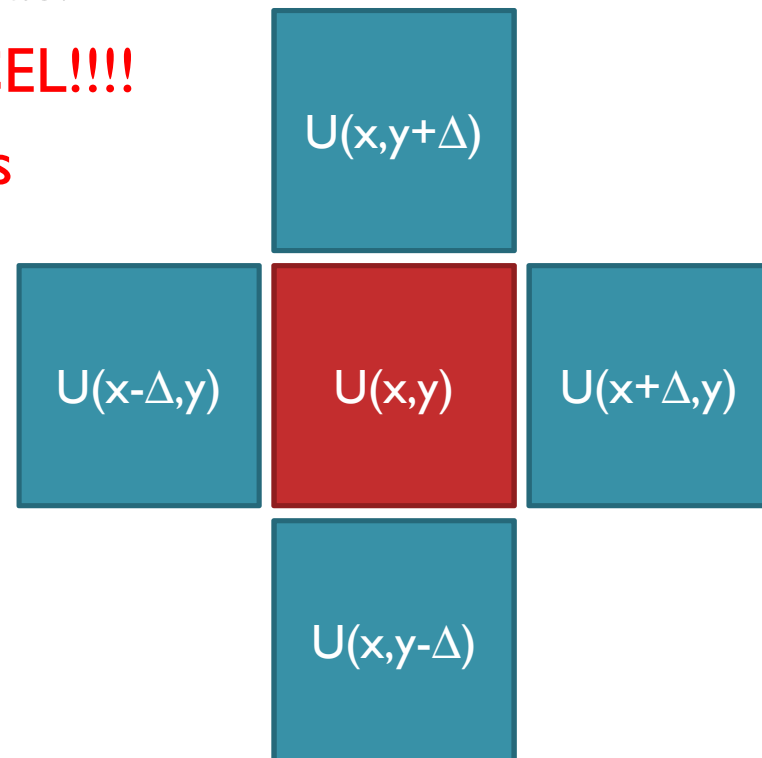
- Nós conseguimos entender o campo entre as placas?
  - Simulações para resolver a equação de Laplace para o sistema estudado.
- Colocando um elétron neste campo, nós conseguimos entender o movimento, dado a tensão de aceleração e a tensão entre as placas?

IMPORTANT!

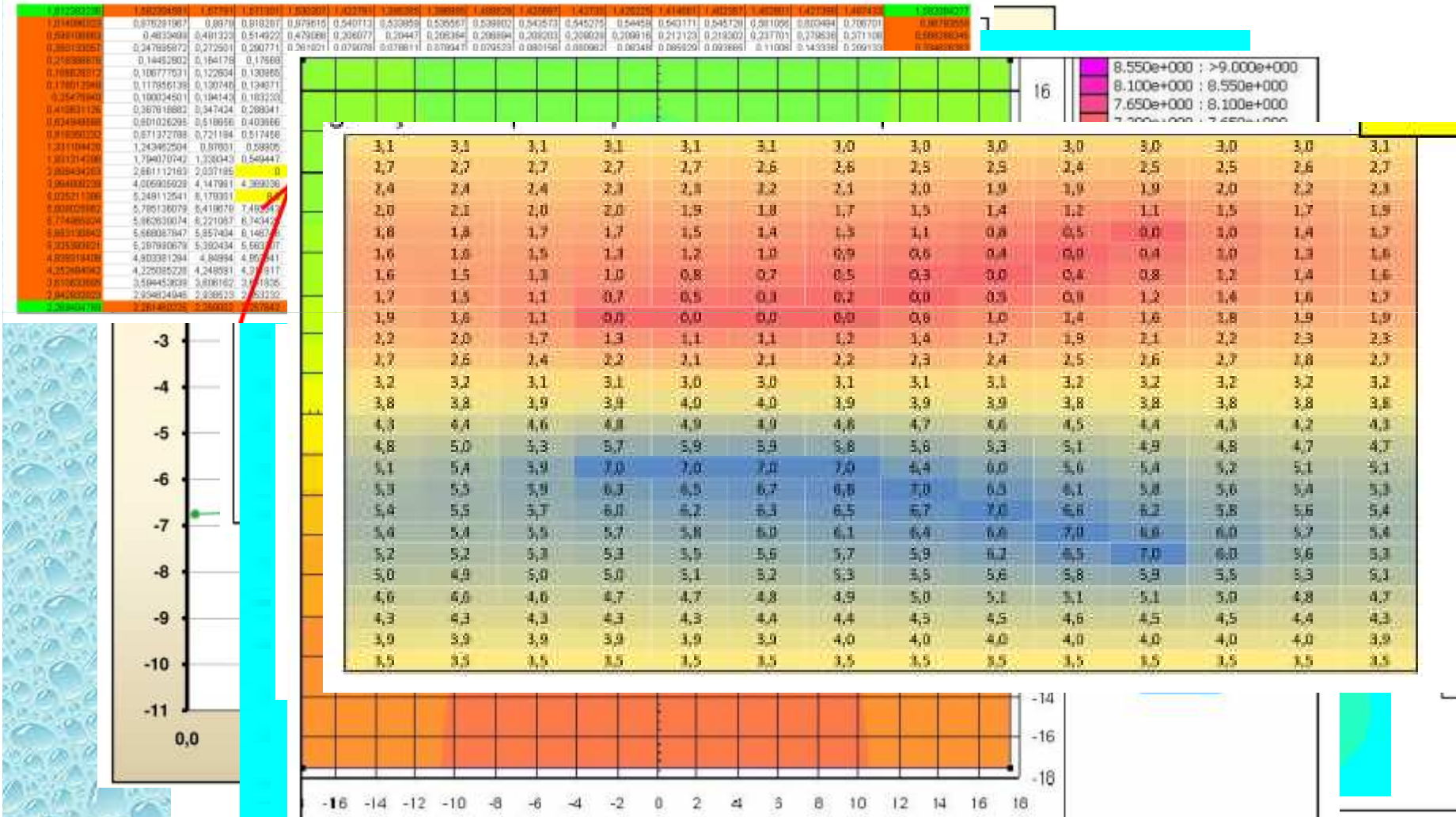
## Resolução numérica da equação de Laplace

- Ou seja:
  - A solução da equação de Laplace diz que o potencial em um ponto é dado pela MÉDIA SIMPLES dos potenciais nas vizinhanças.
    - Podemos usar o EXCEL!!!!
    - Conseqüências Físicas

$$V(x, y) = \frac{1}{4} \left( \begin{array}{l} V(x + \Delta, y) + \\ V(x - \Delta, y) + \\ V(x, y + \Delta) + \\ V(x, y - \Delta) \end{array} \right)$$



# POTENCIAIS





# CAMPO ELÉTRICO

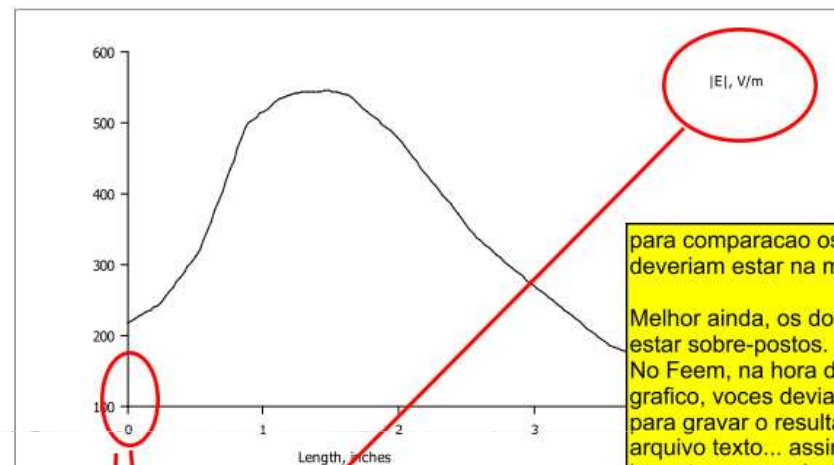
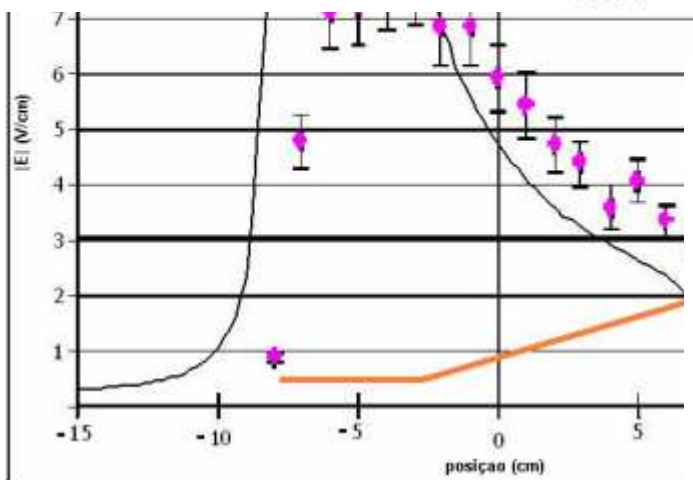
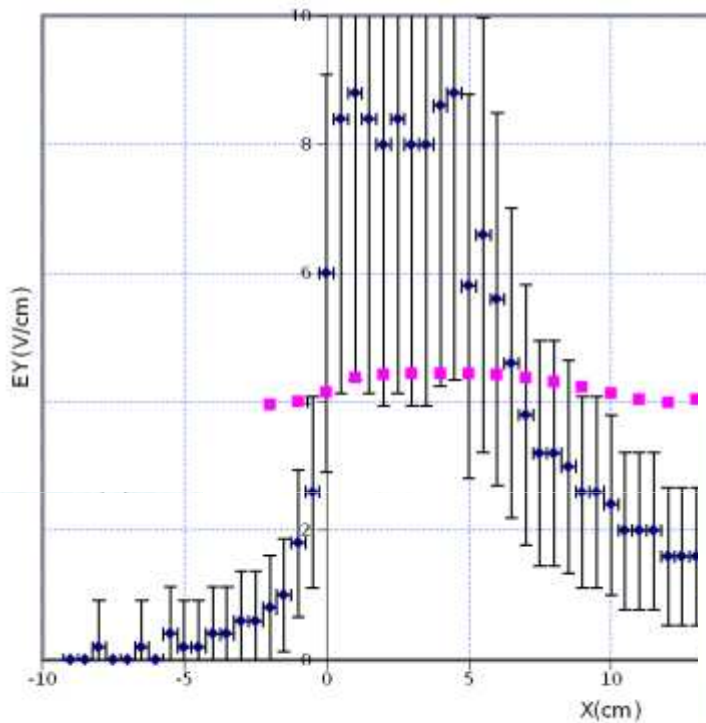
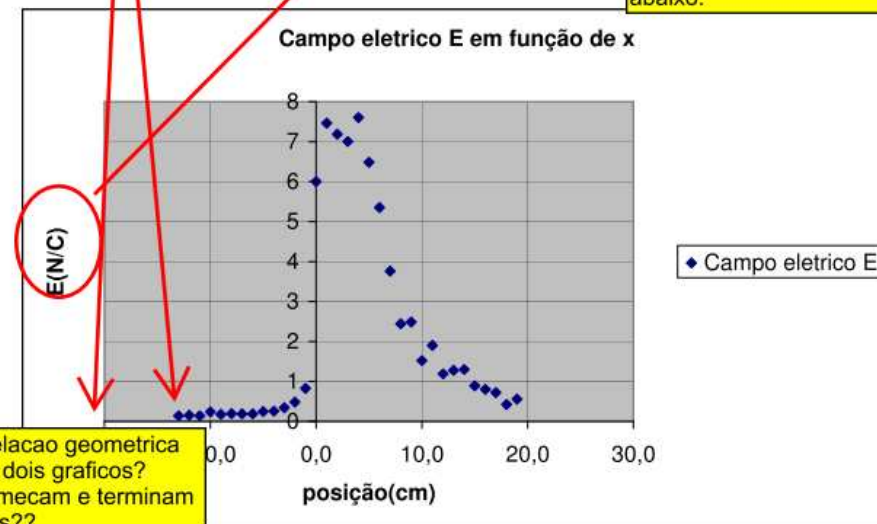


Gráfico 3: Simulação de campo elétrico em função do eixo x utilizando o software Femm.

para comparacao os dois graficos deveriam estar na mesma escala.

Melhor ainda, os dois deveriam estar sobre-postos. No Feem, na hora de fazer o grafico, voces deviam ter pedido para gravar o resultado em um arquivo texto... assim podiam importar no excel e "plotar" por cima dos pontos experimentais abaixo.



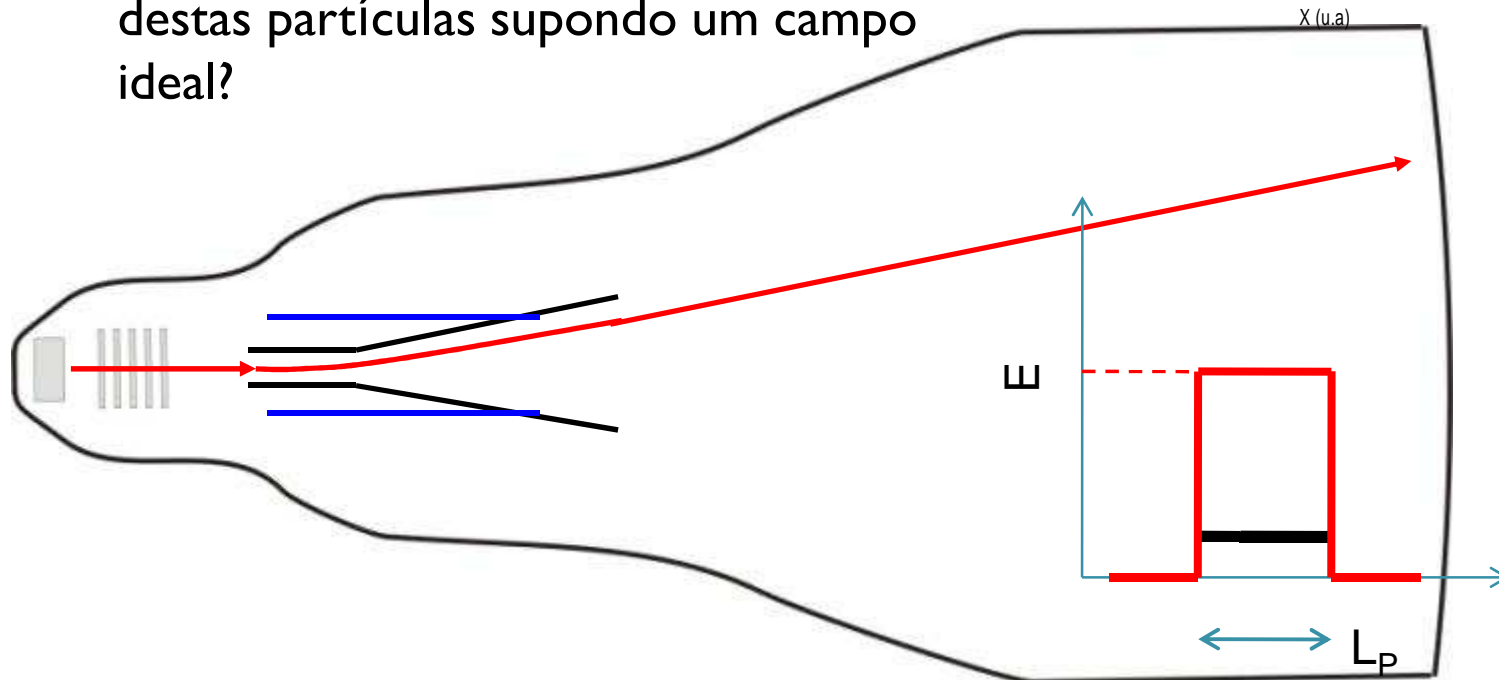
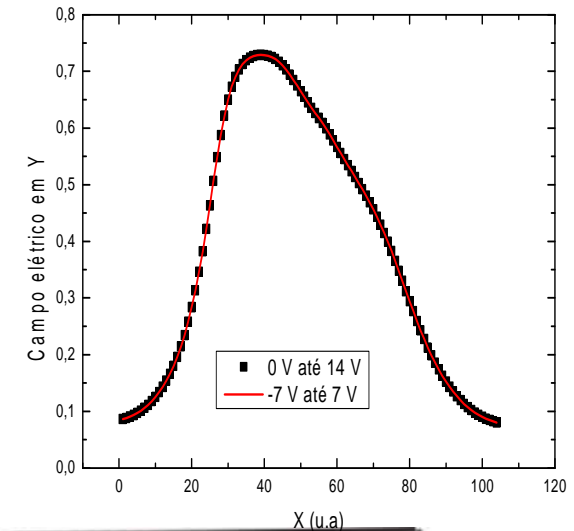
qual a relacao geometrica entre os dois graficos? onde comecam e terminam as placas??

Gráfico 4: Variação de E em função de x obtida em laboratório.



# Movimento em campo elétrico

- Problema real
  - Efeitos de borda, campo não uniforme
- Tentativa teórica
  - Solução do problema ideal
  - Podemos descrever o movimento destas partículas supondo um campo ideal?



## Movimento de uma partícula em um campo uniforme

- Em uma situação com um sistema ideal, temos:

$$h = A' \frac{V_P}{V_{AC}}$$

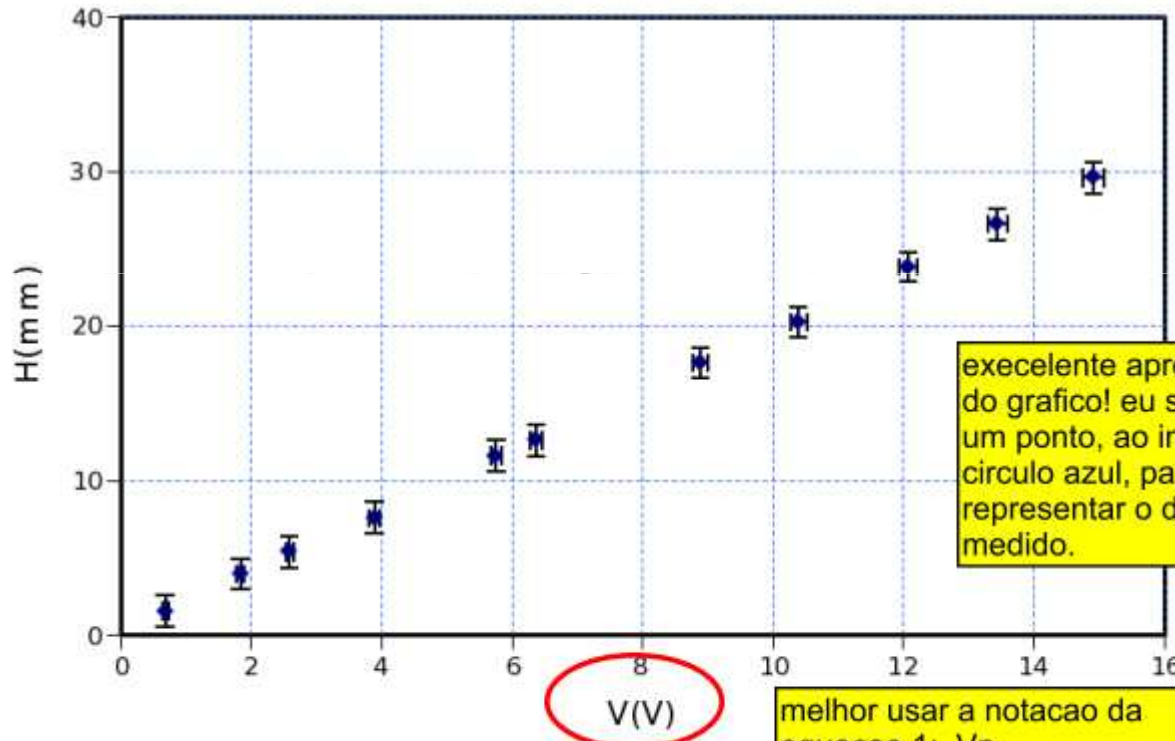
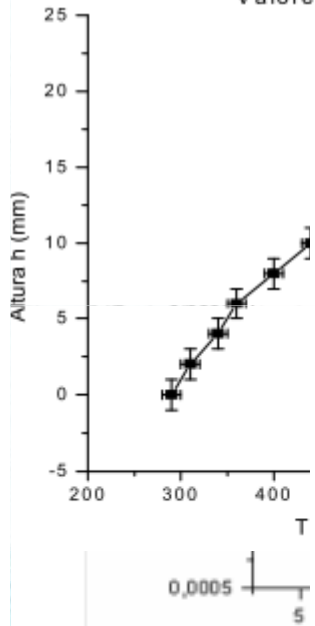
- O deslocamento é proporcional à tensão entre as placas e inversamente proporcional à tensão de aceleração dos elétrons
- Será que esta hipótese é verdadeira? Será que podemos simplificar o problema de campo não uniforme para um problema ideal?



# Resultados

o que aconteceu?  
Alguem esbarrou nos

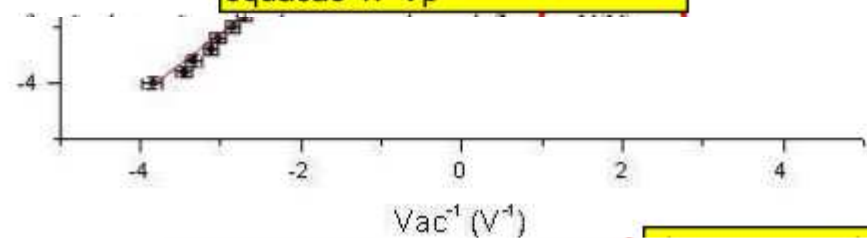
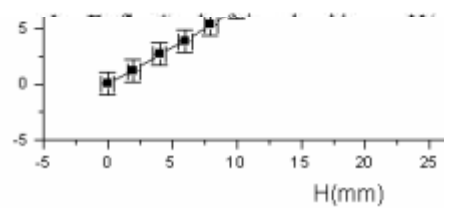
Valores obtidos para tensão fixa entre as placas



excelente apresentacao do grafico! eu so usaria um ponto, ao inves de um circulo azul, para representar o dado medido.

valor de  $V_p$ ?

melhor usar a notacao da equacao 1:  $V_p$



## Quem é a constante A'?

- Sabemos que

$$h = \frac{qEL_P}{mv_{0x}^2} \left( \frac{L_P}{2} + D_{PS} \right) = A \frac{E}{v_{0x}^2}$$

- Mas também sabemos que (ver aula passada)

$$E = V_P/d$$

$$1/2mv_{0x}^2 = qV_{AC}$$

- Podemos então escrever que

$$h = \frac{L_P V_P}{2dV_{AC}} \left( \frac{L_P}{2} + D_{PS} \right) = A' \frac{V_P}{V_{AC}}$$



## Quem é a constante $A'$ ?

- Ou seja

$$A' = \frac{L_P}{2d} \left( \frac{L_P}{2} + D_{PS} \right)$$

- Experimentalmente, medimos o valor da constante  $A'$ .
- Ela não depende do tipo de partícula que passa pelo TRC. Depende apenas de como ele foi construído

# Resultados da Constante A

$A' (V_p)$	$A' (V_{ac})$
$(141,4 \pm 4,4)$ cm	$(0,173 \pm 0,016)$ cm
$(173,4 \pm 0,4)$ cm	$(155,6 \pm 0,6)$ cm
$(176 \pm 5,7)$ cm	$(176,8 \pm 5,7)$ cm
$(183 \pm 2)$ cm	$(179 \pm 6)$ cm
$(1,91 \pm 0,073)$	$(1,088 \pm 0,56)$
$(158,2 \pm 2,2)$ cm	

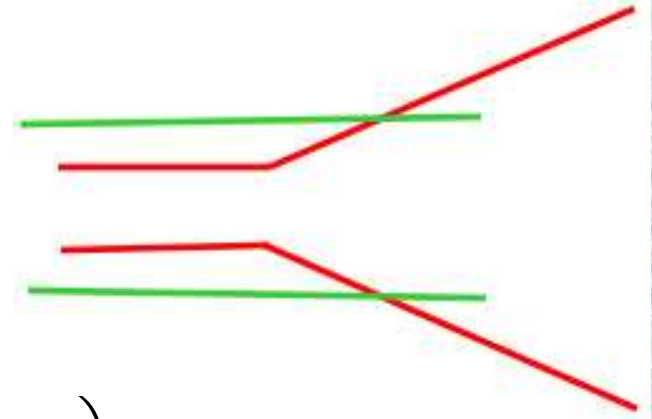
**$(168 \pm 15)$  cm**

## Quem é a constante $A'$ ?

- Ou seja

$$A' = \frac{L_P}{2d} \left( \frac{L_P}{2} + D_{PS} \right)$$

- Contudo, quais são as dimensões das placas equivalentes ( $L_P$ ) e a distância ( $d$ ) entre elas?
- Tenho duas variáveis e apenas uma medida. Como eu resolvo esta ambigüidade?



## Quem é $L_P$ e $d$ ?

- Vamos lembrar alguns conceitos sobre movimento, em especial impulso de uma força

$$\vec{I} = \Delta\vec{p} = \int_0^t \vec{F}(t) dt$$

- No nosso caso ideal, a força é constante com módulo dado por  $qE$ . Nesta situação:

$$\vec{I} = \int_0^t \vec{F}(t) dt = \int_0^t q\vec{E} dt = q\vec{E}t = q\vec{E} \frac{L_P}{v_{0x}}$$

## Quem é $L_P$ e $d$ ?

- Lembrando que o deslocamento na tela do TRC vale:

$$h = \frac{qEL_P}{mv_{0x}^2} \left( \frac{L_P}{2} + D_{PS} \right)$$

- E sabendo que o impulso, na direção  $y$ , tem módulo  $qEL_P/v_{0x}$ , e sabendo que o momento inicial da partícula vale  $p = mv_{0x}$ , temos:

$$h = \frac{I}{p} \left( \frac{L_P}{2} + D_{PS} \right) = Cte \frac{\Delta p}{p}$$



## Quem é $L_p$ e $d$ ?

- Ou seja, o deslocamento está diretamente relacionado ao impulso fornecido pelo campo elétrico

$$h = Cte \frac{\Delta p}{p}$$

- Podemos utilizar esta informação para fazer uma escolha educada para o comprimento efetivo das placas.
  - Onde se dá o impulso que altera o deslocamento da partícula?



## Quem é $L_p$ e $d$ ?

- No caso ideal temos que:

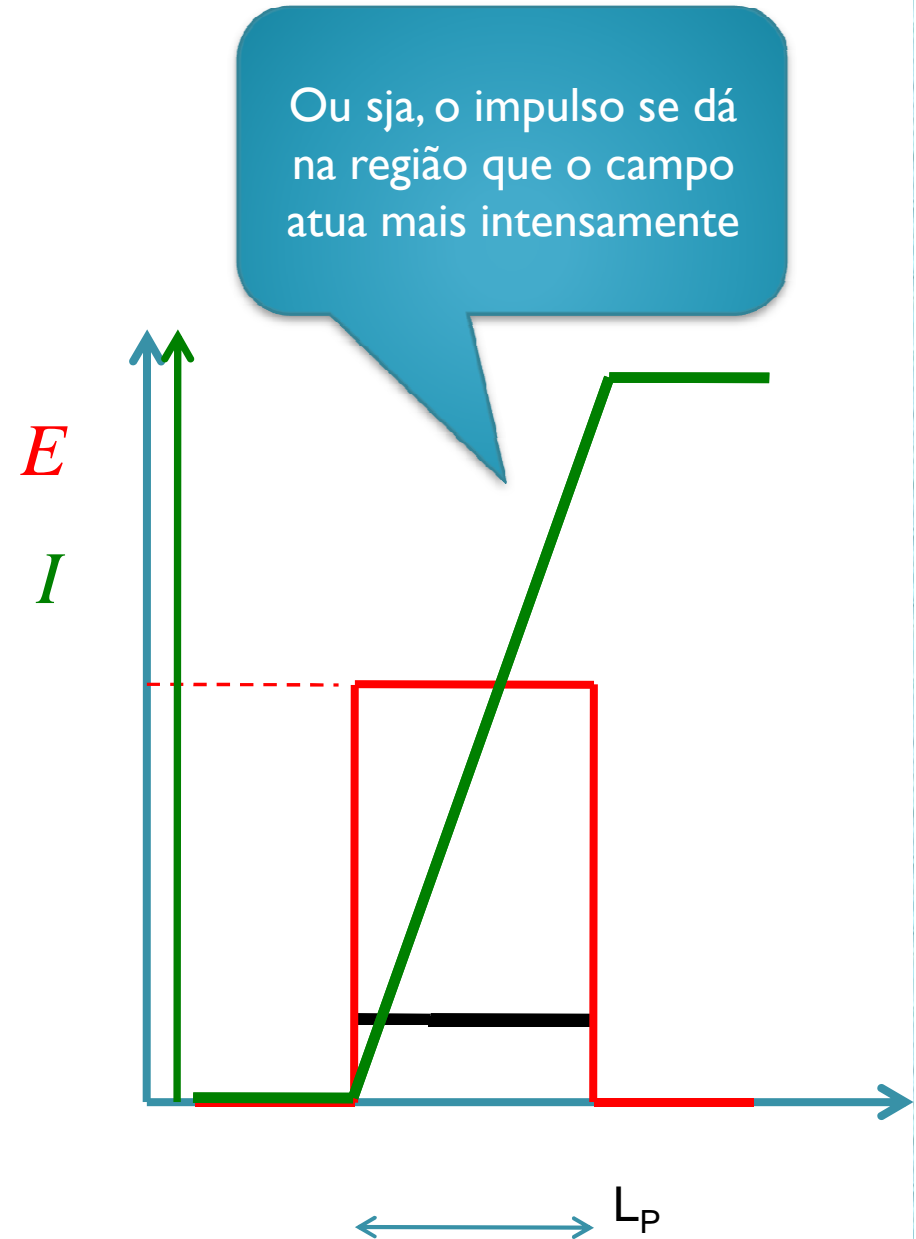
$$\vec{I} = q\vec{E}t$$

- Como:

$$v_{0x} = \frac{x}{t} \Rightarrow t = \frac{x}{v_{0x}}$$

- Temos:

$$\vec{I} = \frac{q\vec{E}}{v_{0x}} x$$



IMPORTANTE!

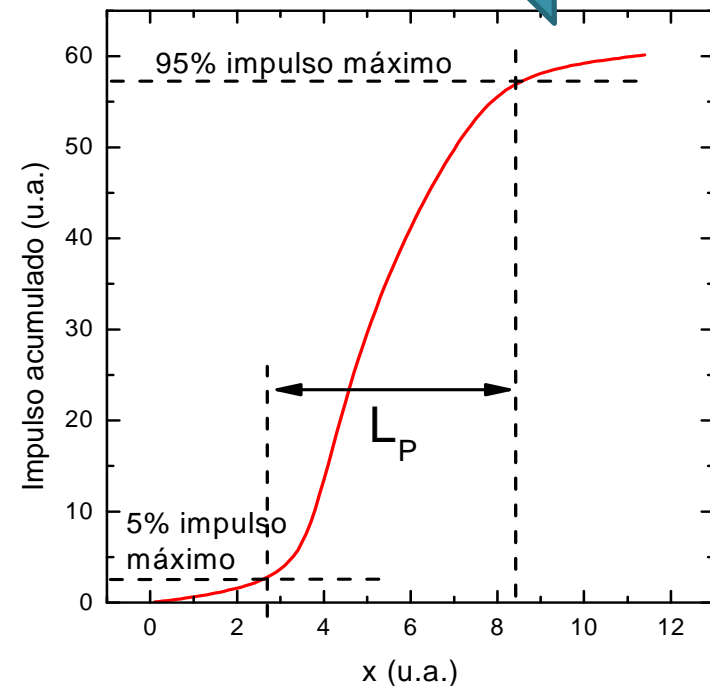
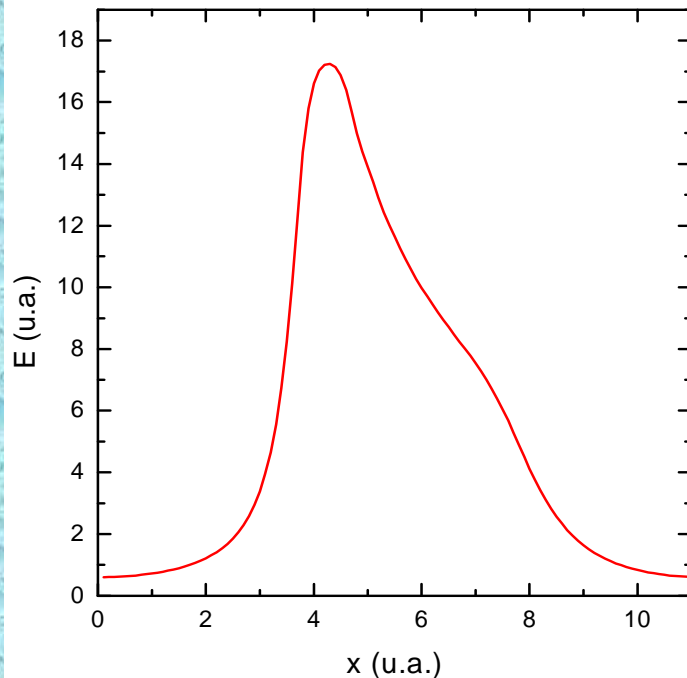
## Quem é $L_P$ e $d$ ?

- Calculando o impulso acumulado

$$\vec{I}(x) = \int_0^t \vec{F}(t) dt = \int_0^x \frac{q\vec{E}}{v_{0x}} dx$$

Usar o campo simulado

Calculo  $L_P$  a partir deste gráfico



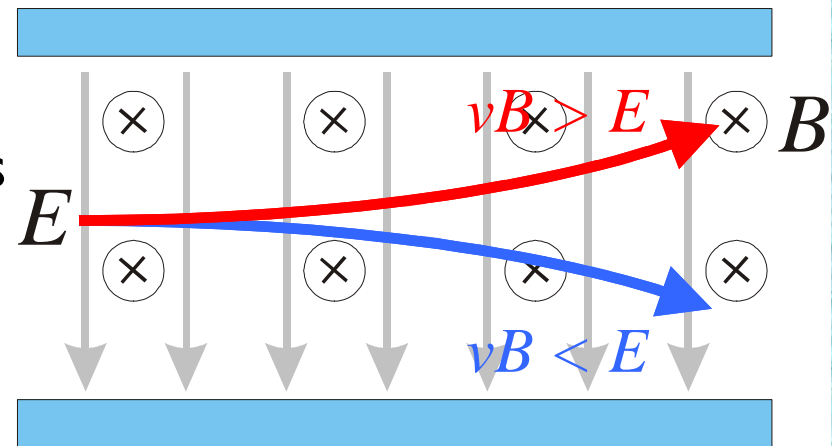
IMPORTANT!

# Atividades da semana (I)

- Da simulação do campo, fazer o gráfico de impulso acumulado em função do comprimento.
  - Determinar o comprimento efetivo das placas ( $L_p$ )
    - Usar como limites 5% e 95% do impulso máximo acumulado como limites
    - Dica: use o Excel e faça a integral como a soma de pequenos retângulos
- Determinar a distância efetiva ( $d$ ) entre as placas e a distância da  $D_{PS}$  a partir dos resultados acima.
- Comparar o comprimento e distância com os valores geométricos do TRC

# Objeto de estudo: o Filtro de Wien

- O filtro de Wien consiste de uma configuração de campo elétrico e magnético cruzados (perpendiculares) e perpendiculares à velocidade **inicial** da partícula incidente



$$\dot{v}_0 = v_0 \hat{i}$$

$$\dot{B} = -B \hat{j}$$

$$\dot{E} = E \hat{k}$$

$$m \frac{d}{dt} \vec{v} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

$$m \frac{d}{dt} \vec{v} = q(E - vB) \hat{k}$$

Aceleração apenas na direção  $k$ . Sentido depende das intensidades de  $E$ ,  $v$  e  $B$

# Metodologia a ser adotada

- Isolar o campo elétrico
  - Como gerar o campo elétrico
  - Estudar o campo elétrico gerado
  - Do que depende o campo? Qual a intensidade em cada ponto do espaço e como a geometria do problema altera este campo?
- Entender como é o movimento de partículas dentro deste campo elétrico?
  - Como gerar estas partículas?
  - Podemos descrever o movimento destas partículas teoricamente? Quais os compromissos adotados e as limitações teóricas e experimentais?

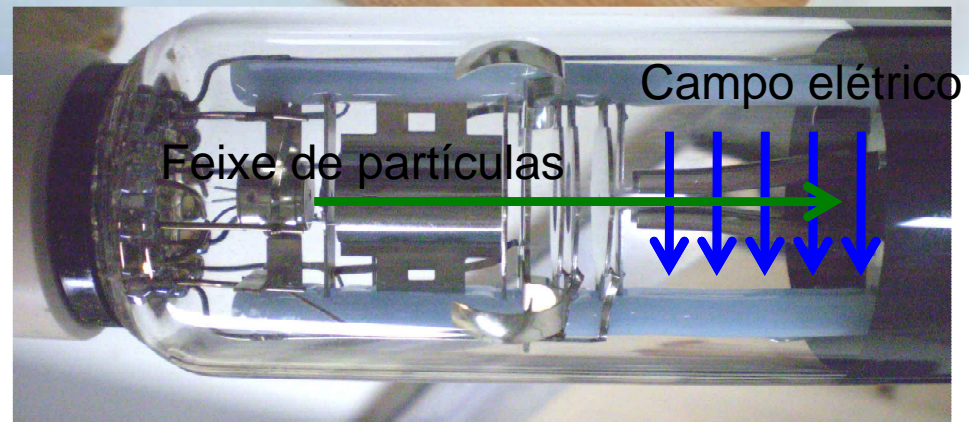
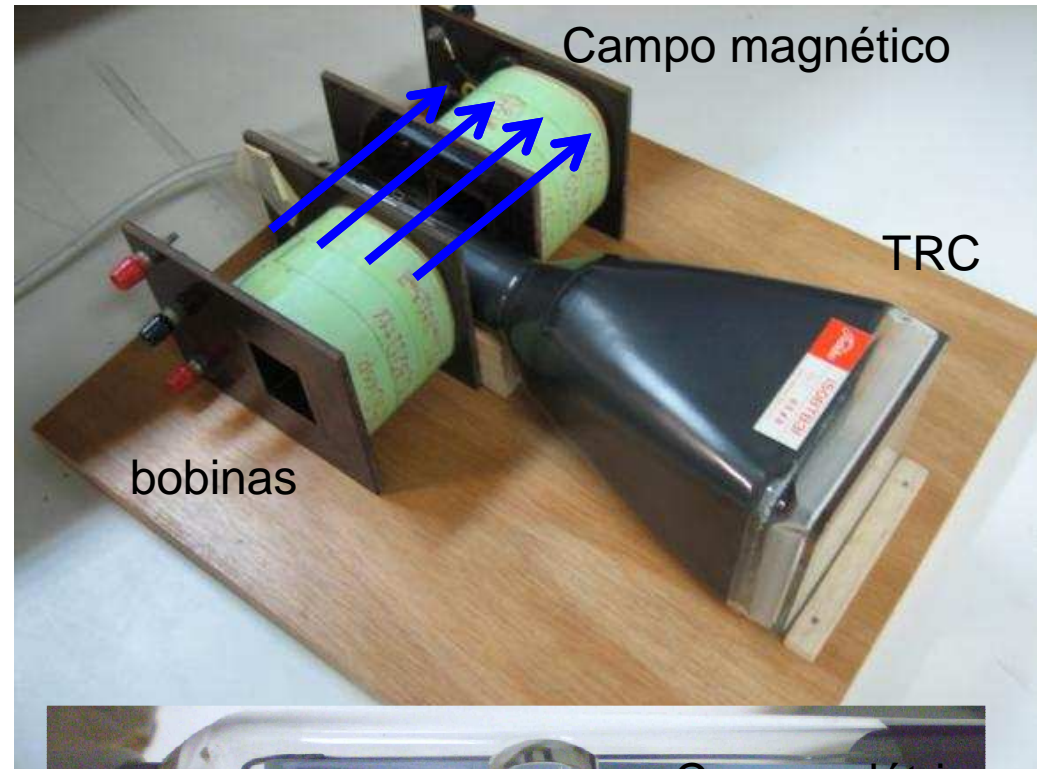


# Metodologia a ser adotada

- Isolar o campo magnético
  - Como gerar o campo magnético?
  - Como estudar este campo? Como medi-lo?
  - Do que depende este campo? Podemos entendê-lo teoricamente?
- Como é o movimento destas partículas dentro deste campo magnético?
  - Podemos descrever este movimento teoricamente? Como fazer um experimento para testar as hipóteses teóricas?
  - Quais as limitações e aproximações adotadas

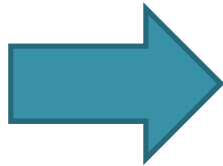
# Nosso acelerador de partículas

- TRC
  - Produz feixe de elétrons acelerados e propicia campo elétrico
  - Tela é o detector de partículas
- Bobinas
  - Campo magnético



# Como medir campos magnéticos?

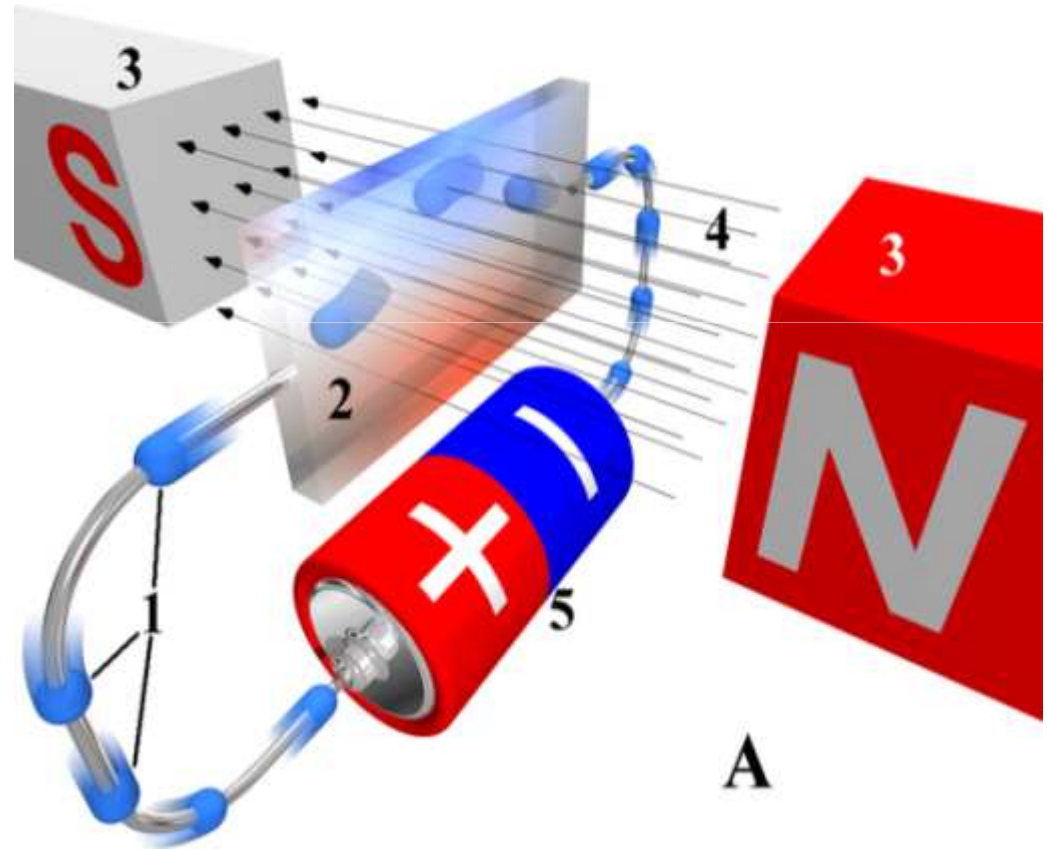
- Muitas técnicas
  - Bússola
    - somente direção do campo
  - Bobinas sondas
    - Campos com fluxo variável
  - Medidor por efeito Hall
    - campos estáticos diversos
  - TRC
    - Movimento de elétrons no campo





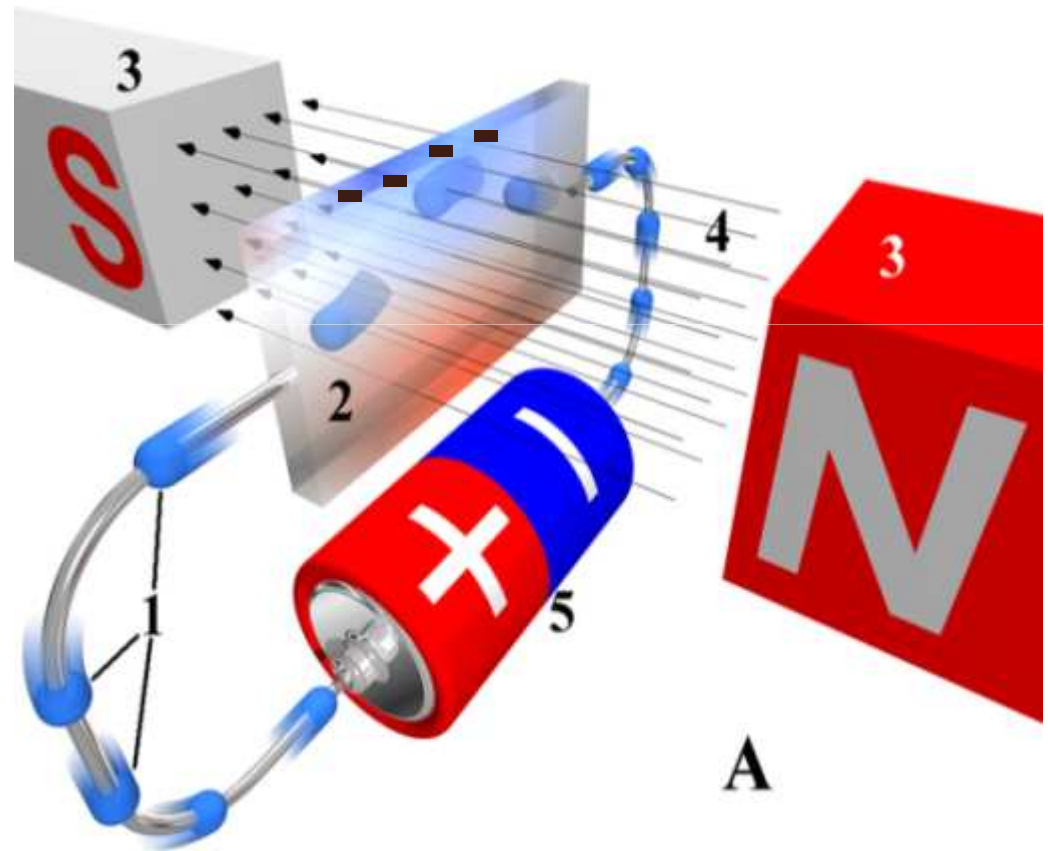
# O efeito Hall

- Quando uma corrente em um condutor é inserida em um campo magnético uma força atua sobre os portadores de carga modificando a sua distribuição dentro do condutor.



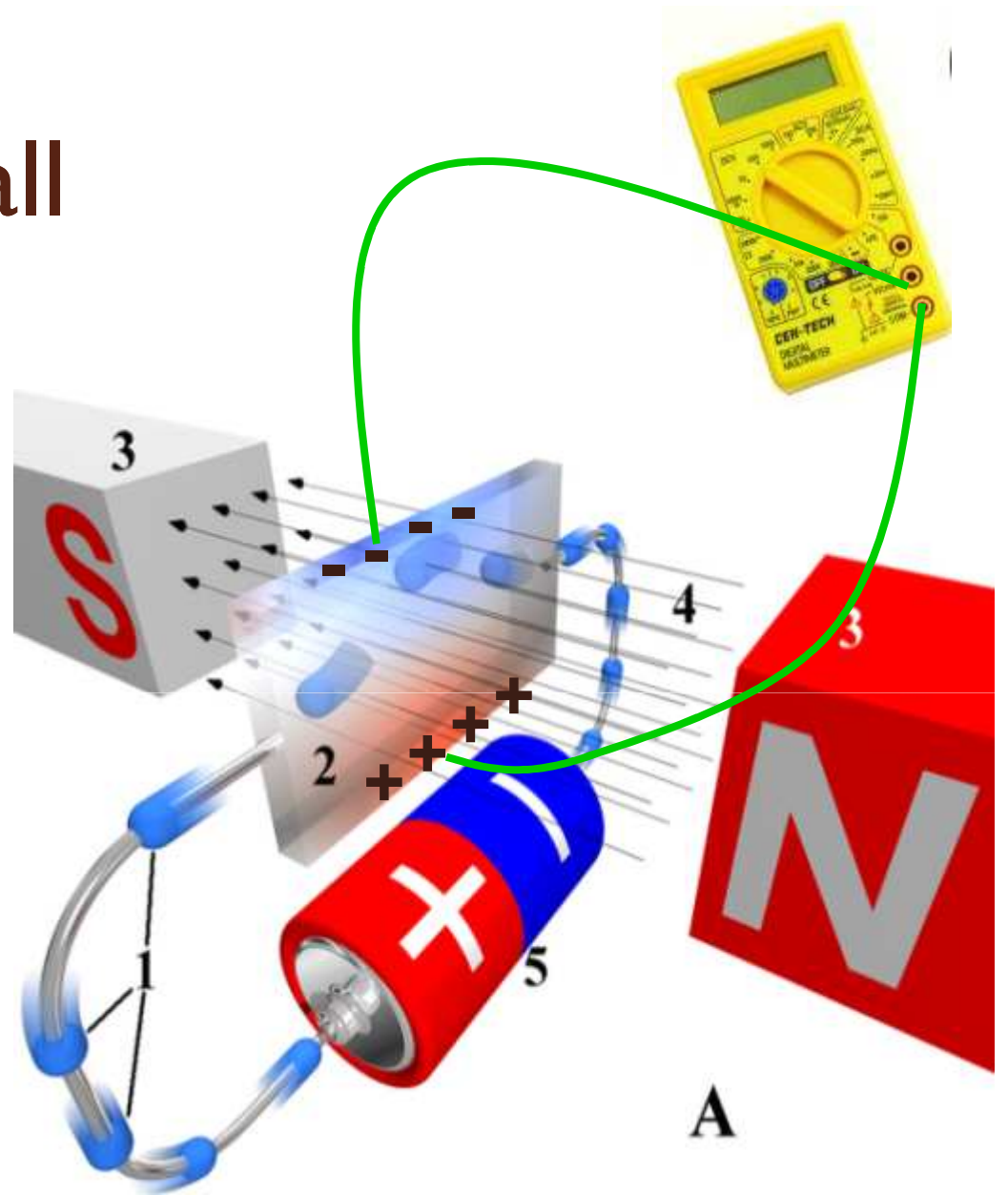
# O efeito Hall

- Esta mudança de distribuição de cargas no condutor cria uma diferença de potencial entre as superfícies do mesmo



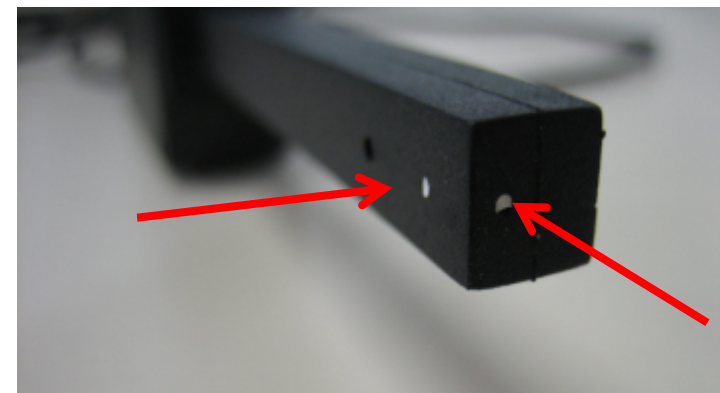
# O efeito Hall

- A medida desta diferença de potencial é proporcional ao campo magnético



# O Sensor Hall de Lab III

- DataStudio
- Ponta de prova
  - Dois sensores
    - Selecionados por chave
    - Note que o sensor mede a componente transversal do campo magnético.
    - Escolha o sensor de acordo com a medida que se quer efetuar
  - Possibilidade de selecionar sensibilidade
    - Similar a escala do voltímetro
  - Botão de calibração (Tare)



# Algumas peculiaridades do sensor Hall do laboratório



Table 1  
Magnetic Sensor Specification Chart

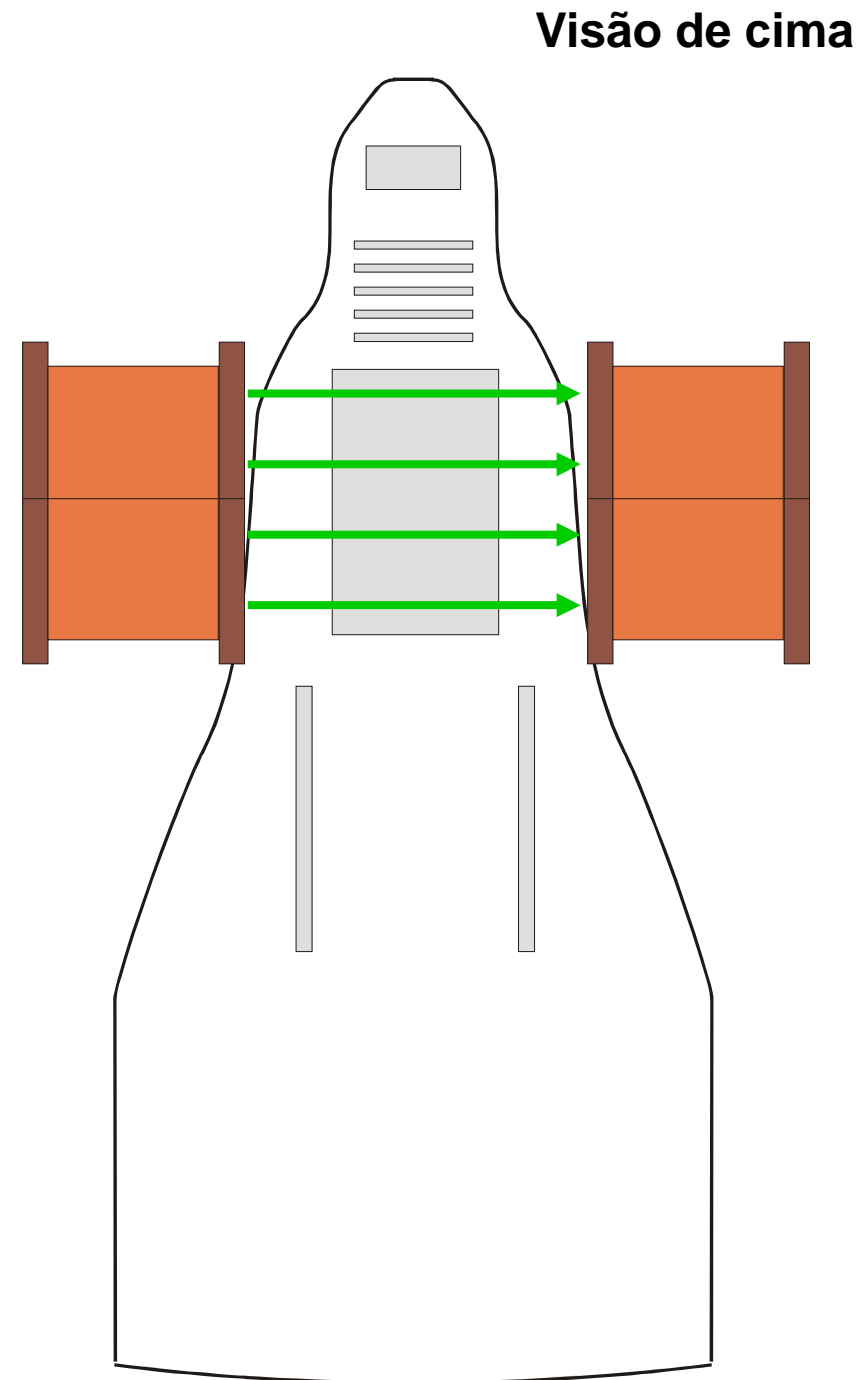
Range	Gain	Resolution	Accuracy	Calibration Factor
$\pm 1000$ gauss	1X	0.5 gauss	100 gauss	100 gauss/volt
$\pm 100$ gauss	10X	0.05 gauss	10 gauss	10 gauss/volt
$\pm 10$ gauss	100X	0.050 gauss	1 gauss	1 gauss/volt

**Note:** The Hall Effect sensing elements used in the CI-6520A are temperature compensated. However when measuring very low magnetic field levels ( $\pm 10$  gauss scale) some temperature dependent variation may be observed in the output. It is on the order of a few gauss. For the best results when using the 100X ( $\pm 10$  gauss) scale the sensor should be connected to the interface for 5 to 15 minutes before data is collected.

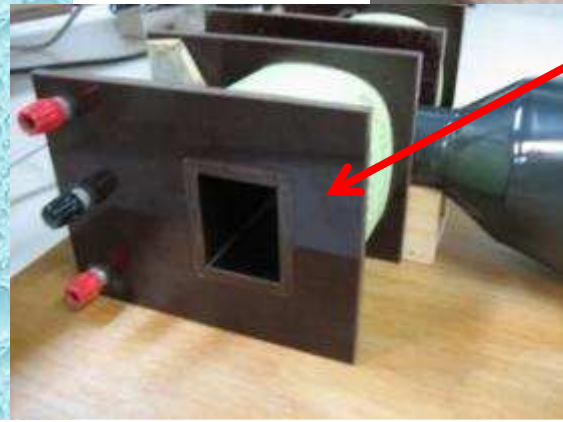
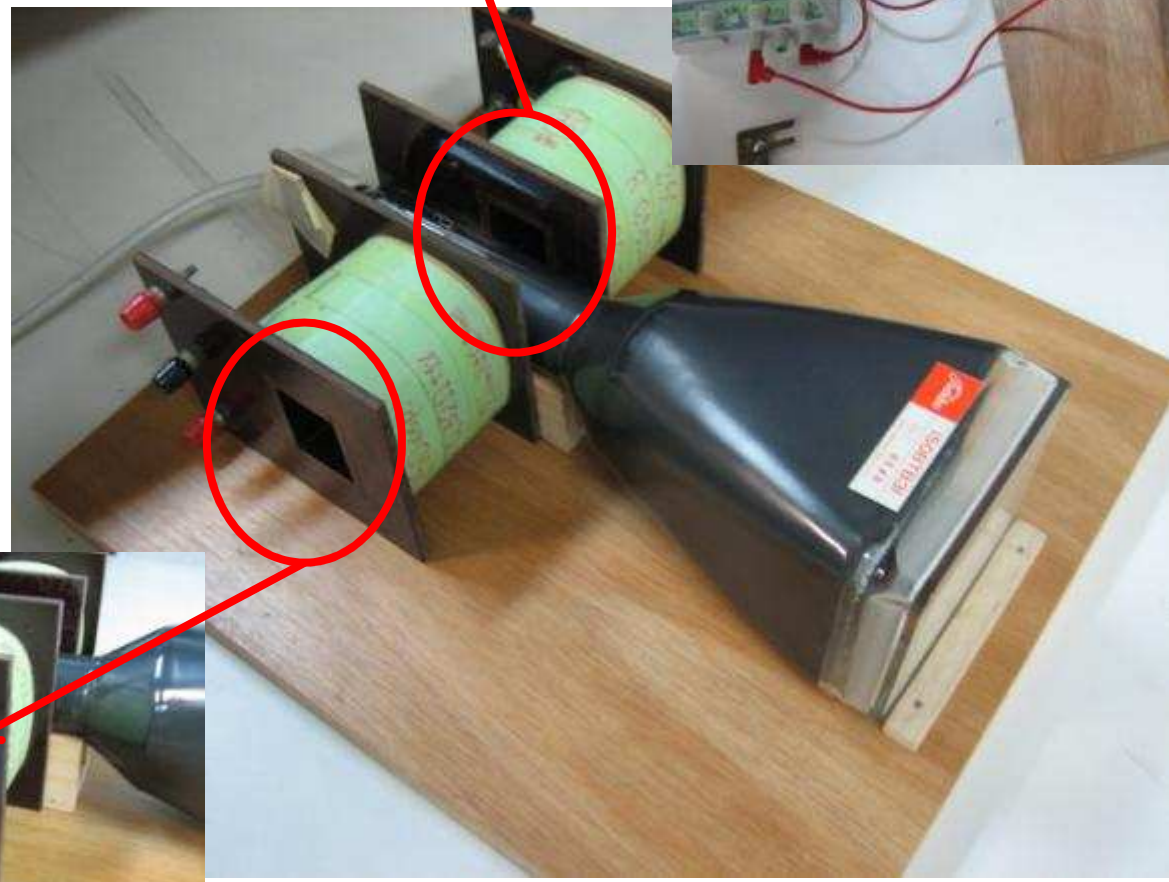
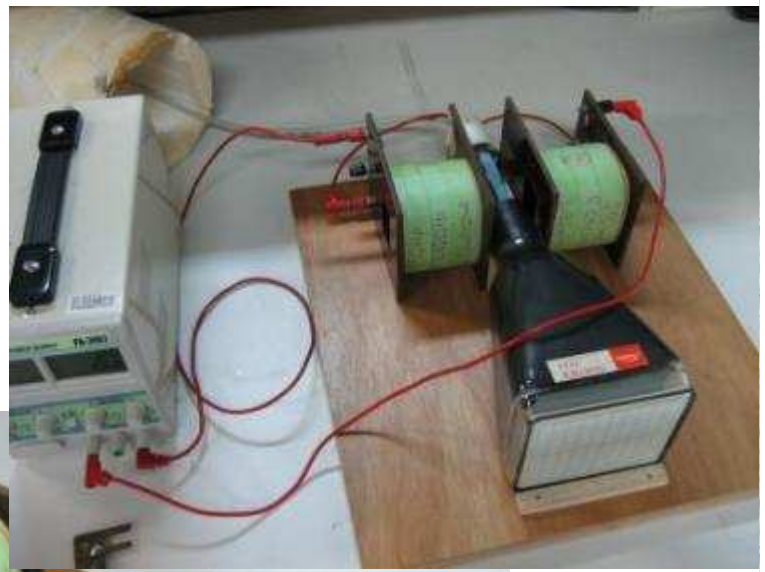
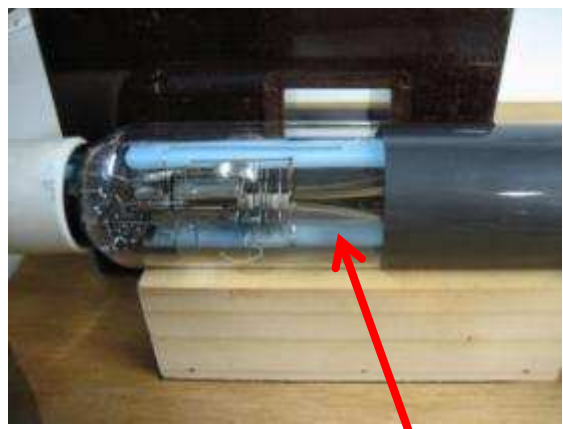
This will allow the sensing element to come to thermal equilibrium and will yield more stable results.

## O nosso seletor de velocidades

- Tubo de raios catódicos para a parte de campo elétrico
- E o campo magnético?
  - Duas bobinas ligadas em série



Na prática...





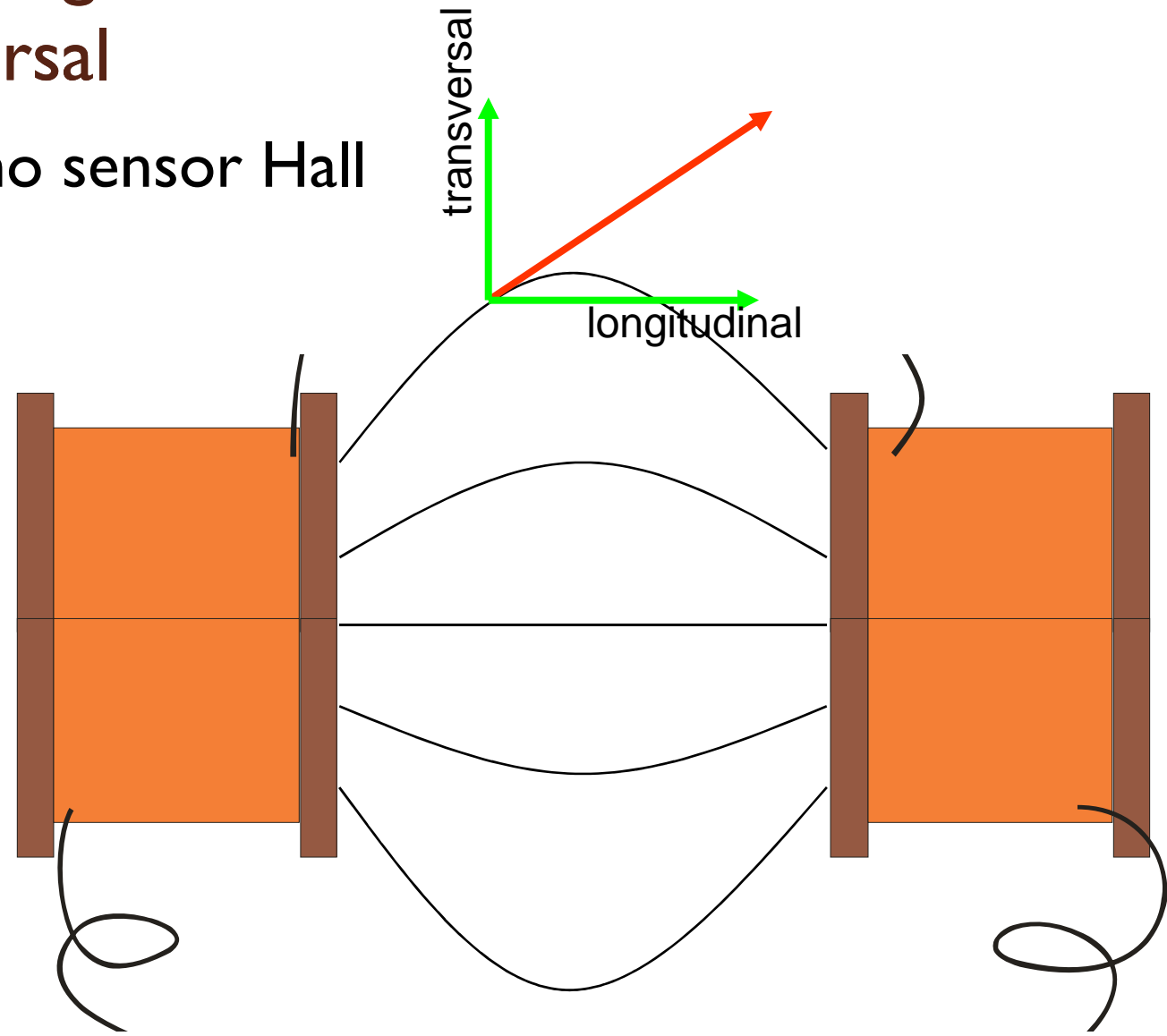
## Objetivos experimentais da semana

- Montar as bobinas que serão utilizadas para o mapeamento do campo magnético
- Mapear o campo magnético em 3D nas direções:
  - Longitudinal
  - Transversal



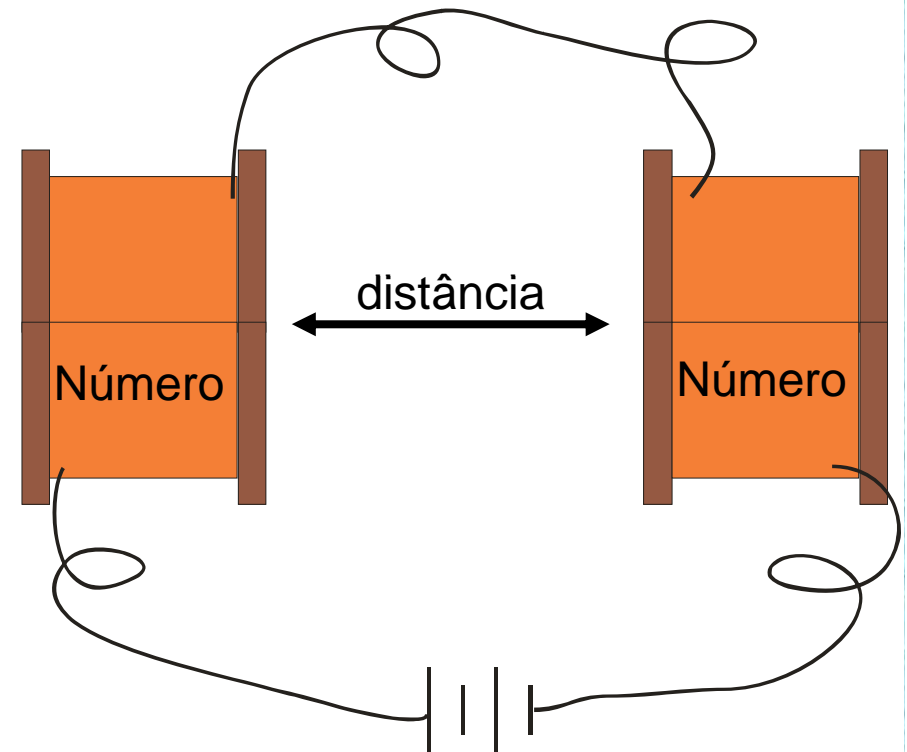
# Campo longitudinal e transversal

- Chave no sensor Hall

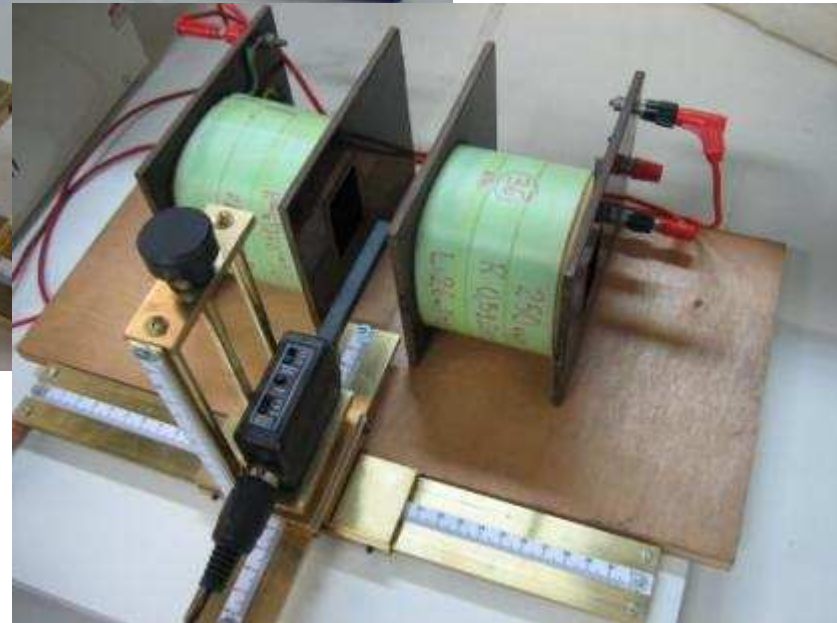
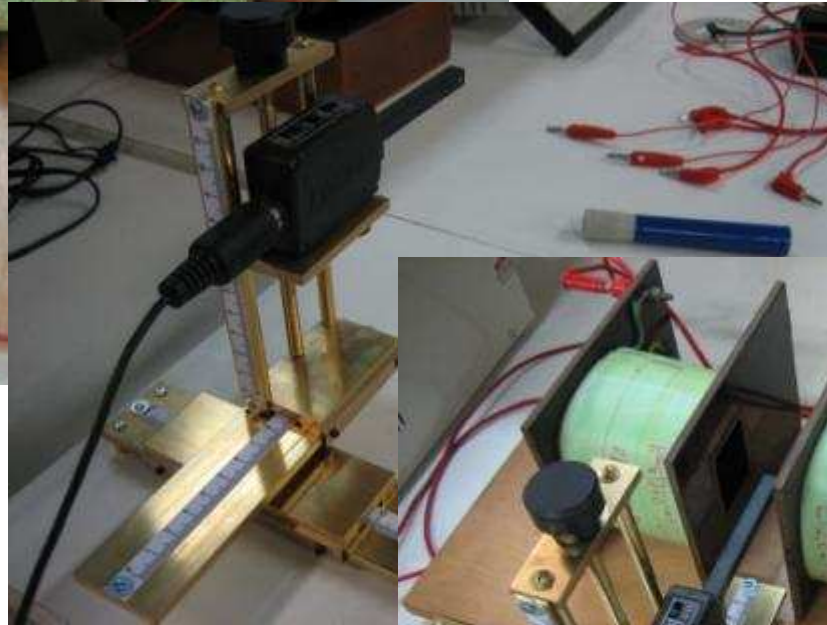
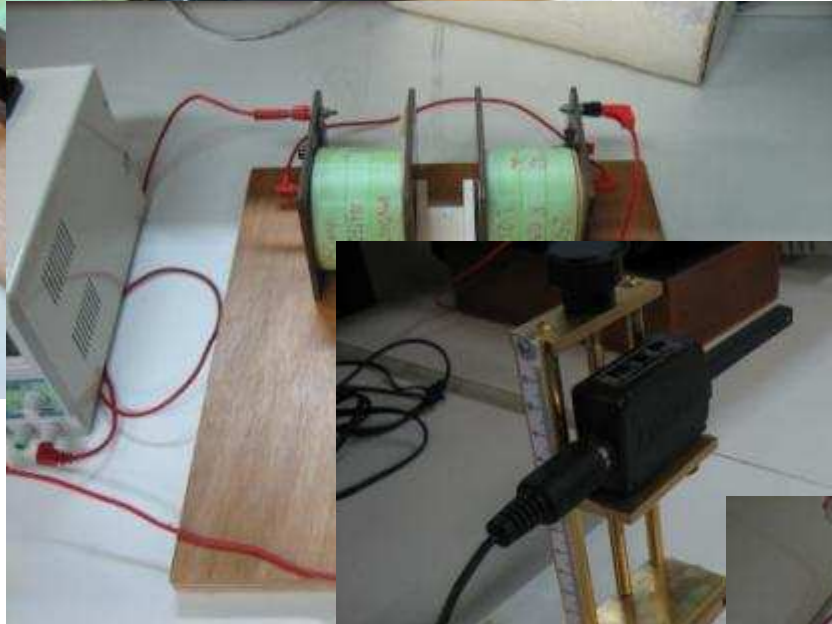
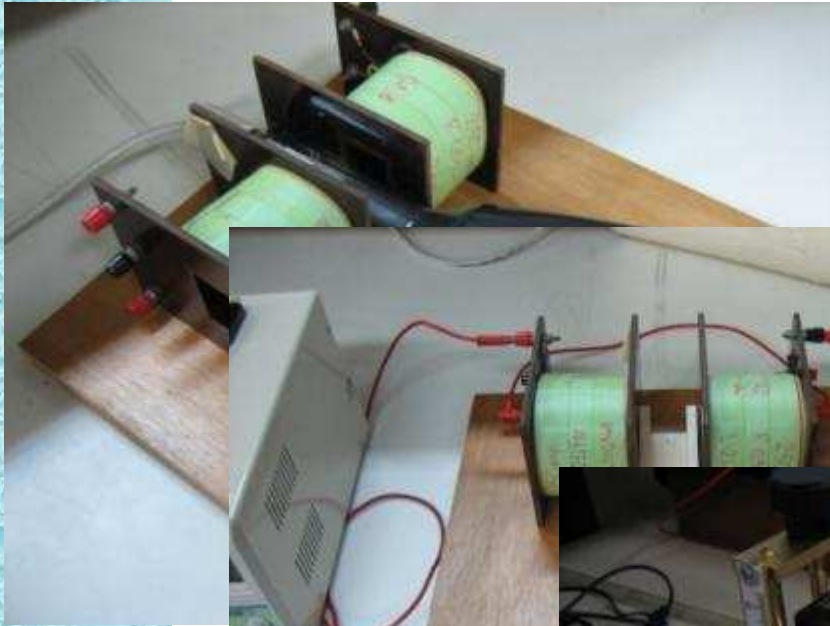


# Arranjo experimental

- Montar as bobinas conforme mostra a figura abaixo
- Anotar número das bobinas e distância entre elas
  - Utilizar o suporte do TRC como referência
- Fiquem atentos com as ligações. Queremos que os campos se somem coerentemente
- Procedimento
  - Com as bobinas desligadas.
    - Zerar (tara) o medidor Hall
  - Aplicar corrente à bobina
    - Não exceder 2 A

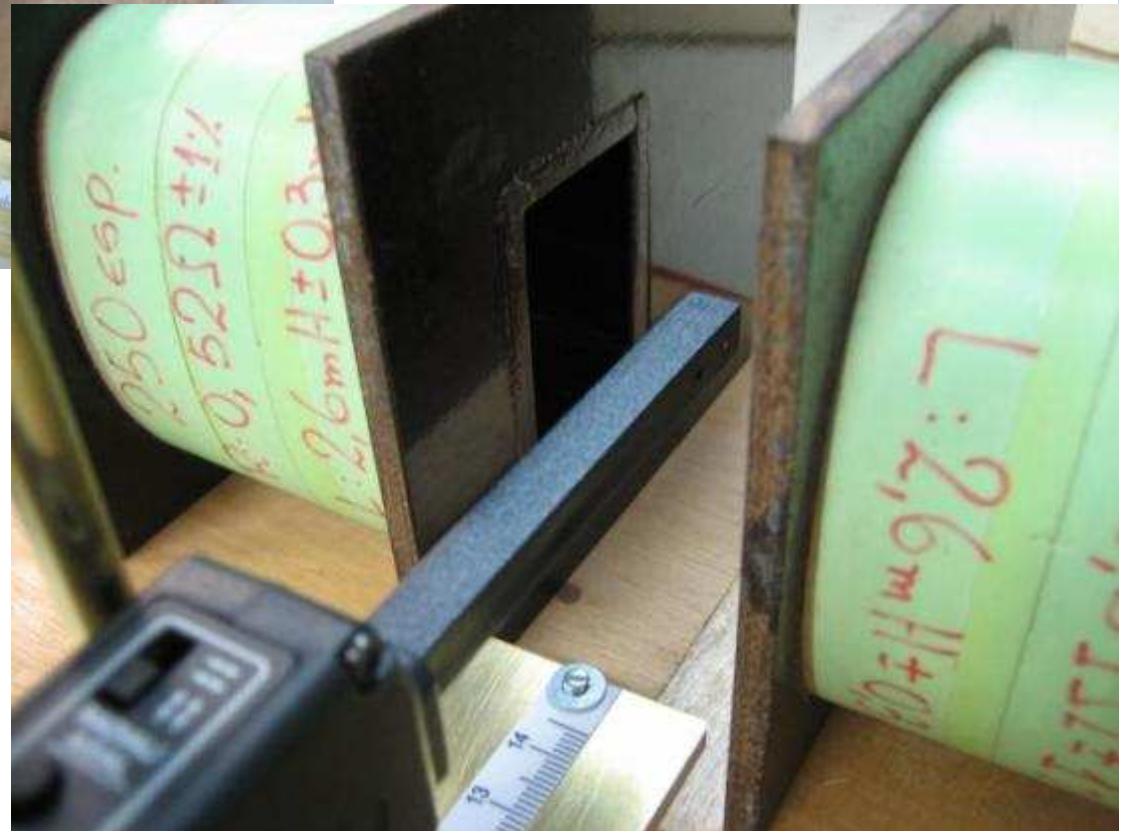
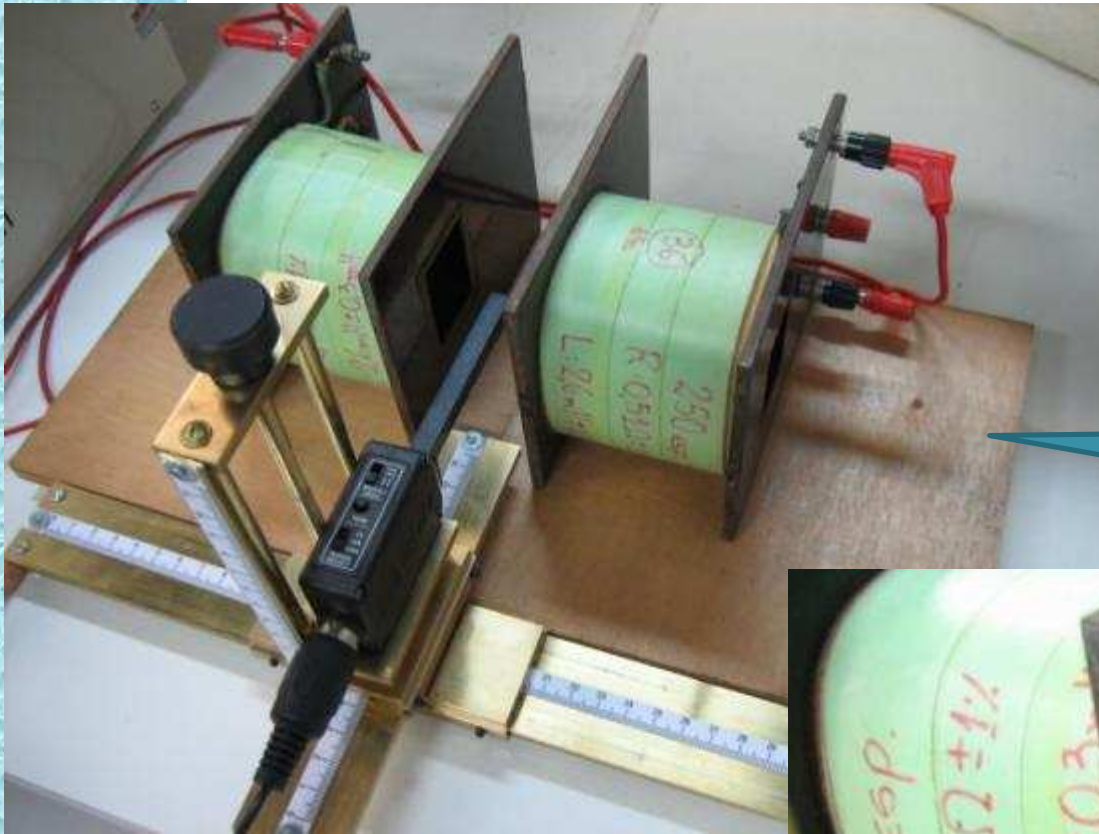


Na prática...



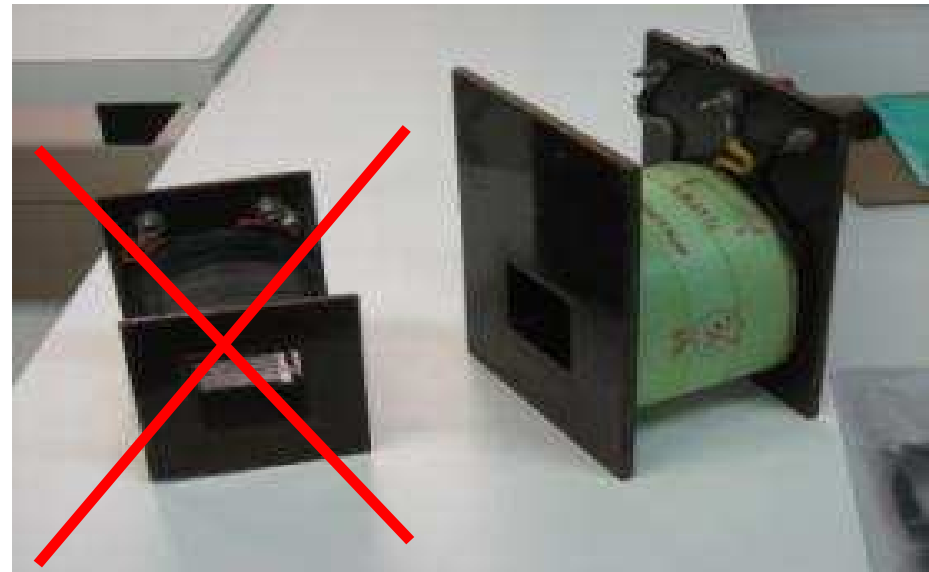
# Na prática...

Suporte de madeira para poder centralizar o medidor Hall



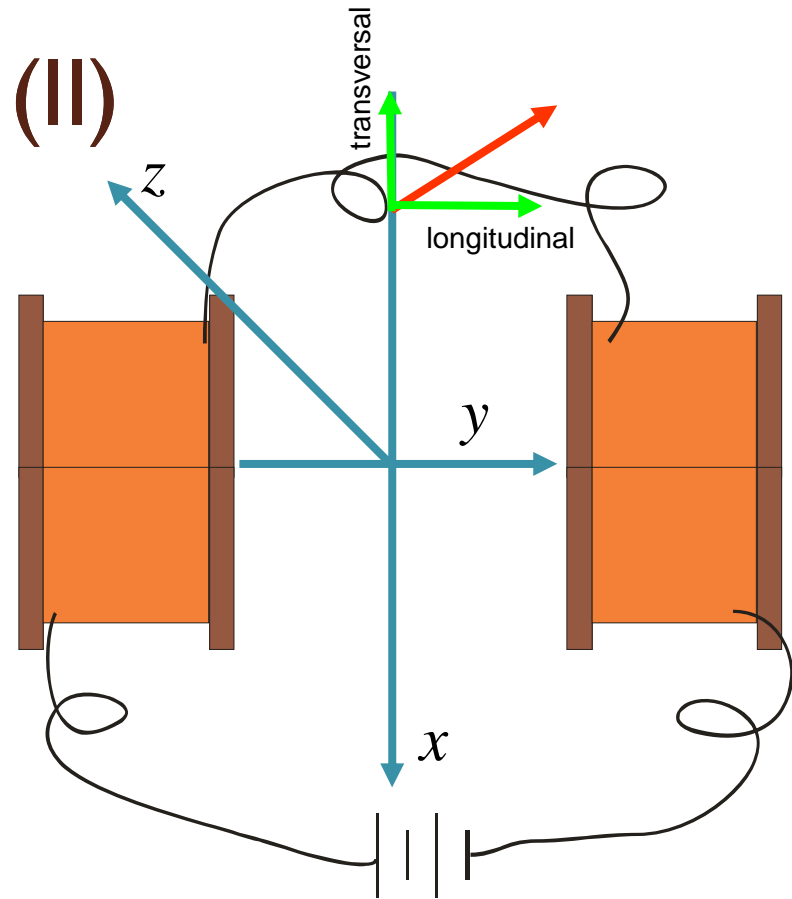
# Cuidado experimental

- Parear bobinas
  - Temos 3 tipos de bobinas
    - 100, 250 e 500 espiras
      - Usar o mesmo tipo pois senão o campo não será simétrico
- Anotar o numero da bobina utilizada
- Usar bobinas grandes



## Atividades da semana (II)

- Fazer gráfico de  $B_T$  e  $B_L$  ao longo do eixo  $x$ .
  - Fixar  $y, z$  no centro entre as bobinas
- Fazer gráfico de  $B_T$  e  $B_L$  ao longo do eixo  $y$ .
  - Fixar  $x, z$  no centro entre as bobinas
- Fazer gráfico de  $B_T$  e  $B_L$  ao longo do eixo  $z$ .
  - Fixar  $x, y$  no centro entre as bobinas
  - O resultado obtido é razoável? O que você esperaria?
- Fazer gráfico de  $B$  em função da corrente no centro entre as bobinas e verificar a dependência com a corrente
  - A dependência de  $B$  com  $i$  no centro é a mesma em todos os pontos? Porque?
    - Dica teórica: Olhe as equações de Maxwell



Não esquecer as atividades da semana (I)