

# Seletor de Velocidades

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

Física Exp. 3  
Aula 4, Experiência 2

Mapeamento Campo Magnético

Prof. Antonio Domingues dos Santos  
adsantos@if.usp.br  
Ramal: 6886  
Mário Schenberg, 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

Lembrete:

## Pergunta da semana

- Entreguem agora a pergunta da semana, e lembrem-se de anotar o nome do seu professor e do seu grupo!!

# Exp. 2 – Seletor de Velocidade

DISCUSSÃO

## PROGRAMAÇÃO

- Semana 1
  - Movimento em campo elétrico
- Semana 2
  - Simular o campo elétrico
- Semana 3
  - Movimento em campo magnético
- Semana 4
  - Mapear campo magnético
- Semana 5
  - Espectrômetro de massa parte 1
- Semana 6
  - Espectrômetro de massa parte 2

# Como verificar o alinhamento das bobinas?

**CUIDADO:** Tem muita interferência na sala, por isso a bússola não dá o campo local!



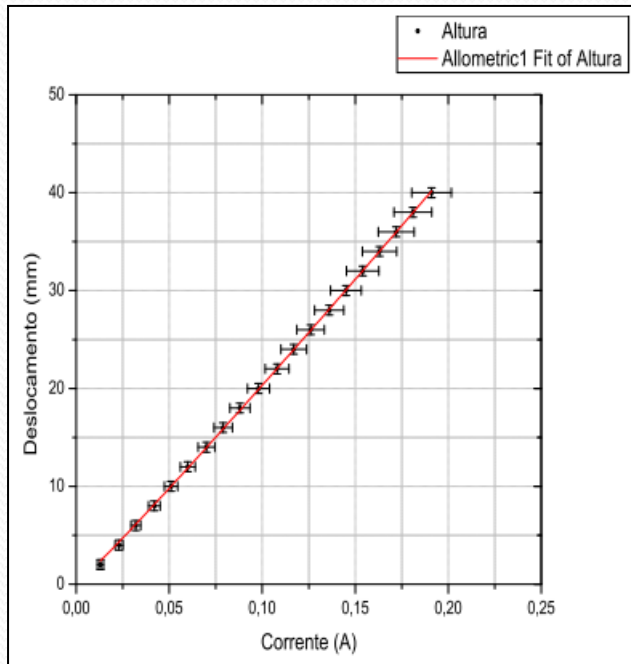
# Parte 1, deslocamento $\times I_B$

- Medir  $h$  em função de  $I_B$  para  $U_{ac}$  fixo ( $=v_{0x}$  fixo).
- Qual é a dependência funcional? Comece testando uma possibilidade simples:

$$h = C i_b^\gamma$$

- Fazer um gráfico de  $I_B$  em função de  $h$  para  $U_{ac}$  fixo que permita descobrir se a dependência funcional acima é adequada
  - Se for obtenha o expoente gamma. Compare com os valores obtidos por seus colegas
  - **Importante**: a grandeza fixa deve ser escolhida de modo a permitir o maior número possível de pontos medidos.

# H x corrente

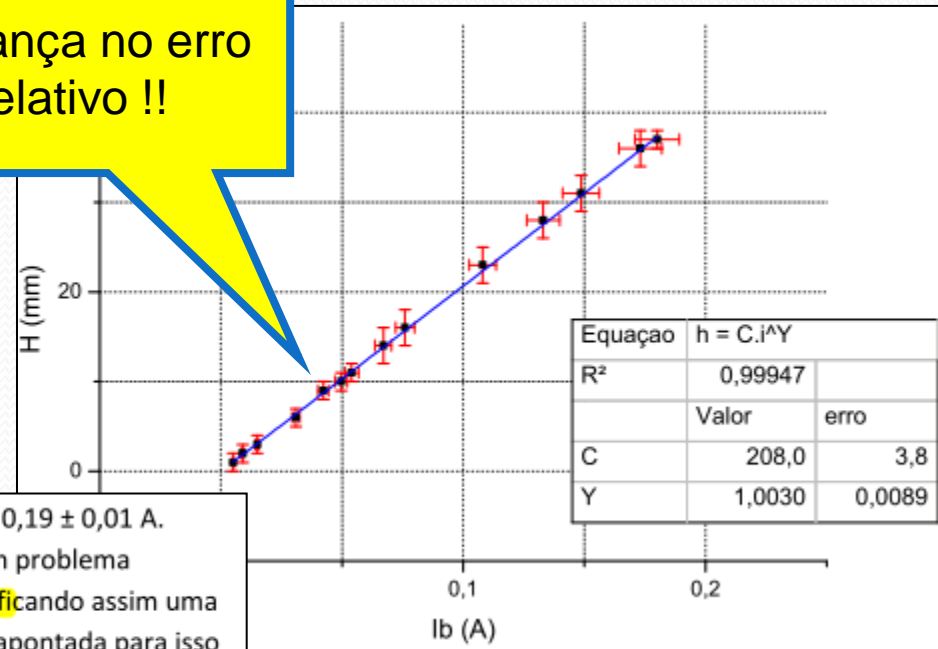


$\gamma$  é constante.  
C varia

Tabela 1 Resultados obtidos pelo ajuste

	$U_{ac} = 700 \text{ V}$		$U_{ac} = 850 \text{ V}$		$U_{ac} = 955 \text{ V}$	
	C	$\gamma$	C	$\gamma$	C	$\gamma$
valor	22,578	0,952	20,551	0,959	19,307	0,953
erro	0,899	0,018	0,432	0,010	0,416	0,011

Mudança no erro  
relativo !!



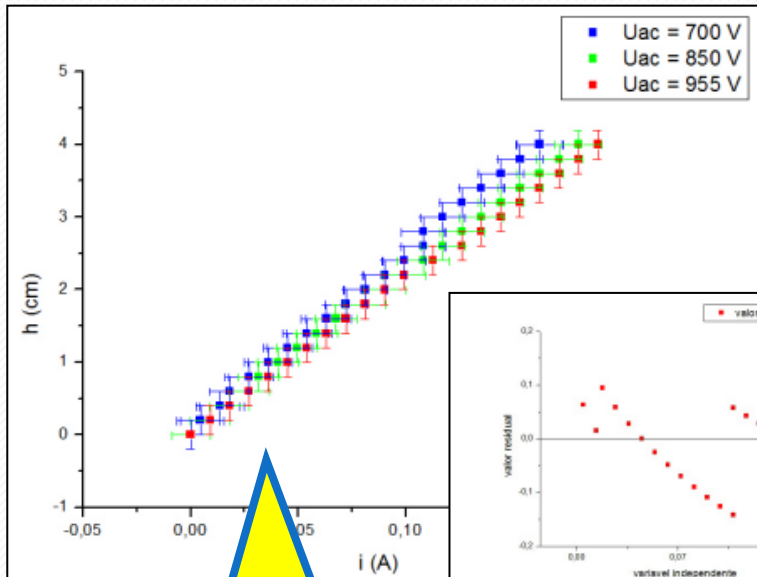
A corrente máxima tal que o ponto do TRC permanece na tela é de  $0,19 \pm 0,01 \text{ A}$ .

Durante a medição da altura do ponto do seletor de velocidade, um problema encontrado foi que **quando sua altura aumentava, o ponto duplicava, justificando assim uma incerteza maior (cerca de 2mm) na medição da altura.** Uma possível razão apontada para isso é a oscilação (frequência de 60hz) da rede elétrica.

porque quem? testaram?

# H x corrente

- Fizeram para 3 correntes diferentes...



Faltam os ajuste nos gráficos

Faltam as incertezas nos resíduos

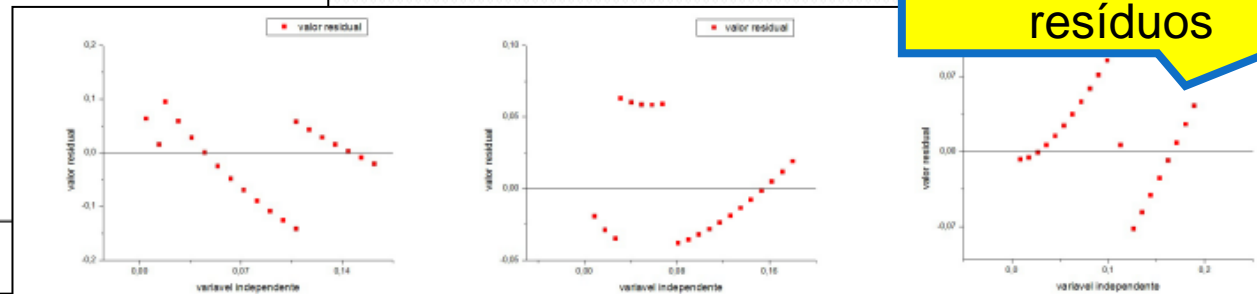
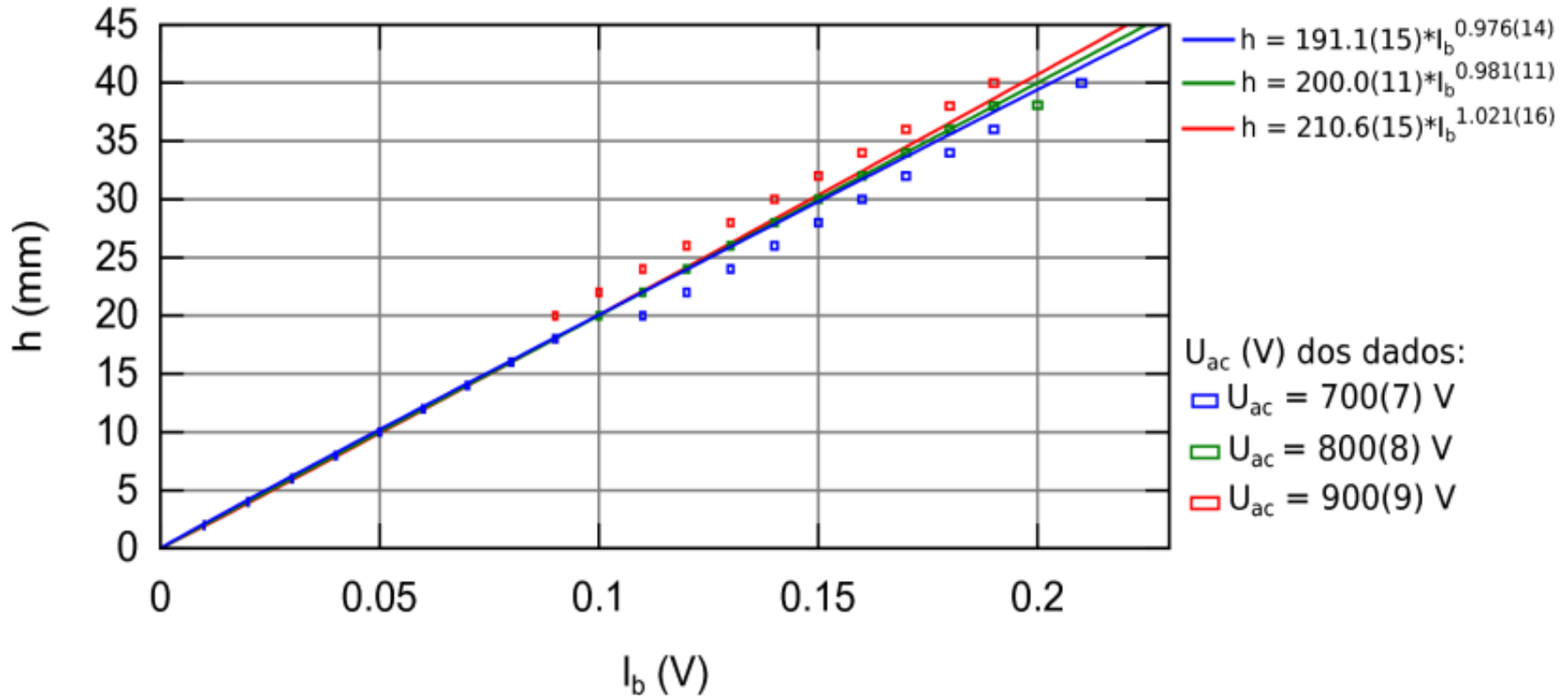


Figura 2: Gráficos dos dos resíduos do ajuste das curvas ajustadas de  $I_B \times h$  para  $U_{ac} = 700 \text{ V}$ ,  $850 \text{ V}$  e  $955 \text{ V}$  respectivamente.

- A análise dos resíduos do ajuste nos mostra que os dados não apresentavam alta qualidade, fato provavelmente explicado pela escolha da escala de **200 V no multímetro**. Com isto, os valores medidos para as tensões das quais foram obtidas os valores das correntes apresentaram baixa precisão e baixo desvio padrão entre os dados dos medidores. Outra explicação para os padrões encontrados nos resíduo seria o desalinhamento das bobinas, que causaria erros sistemáticos.

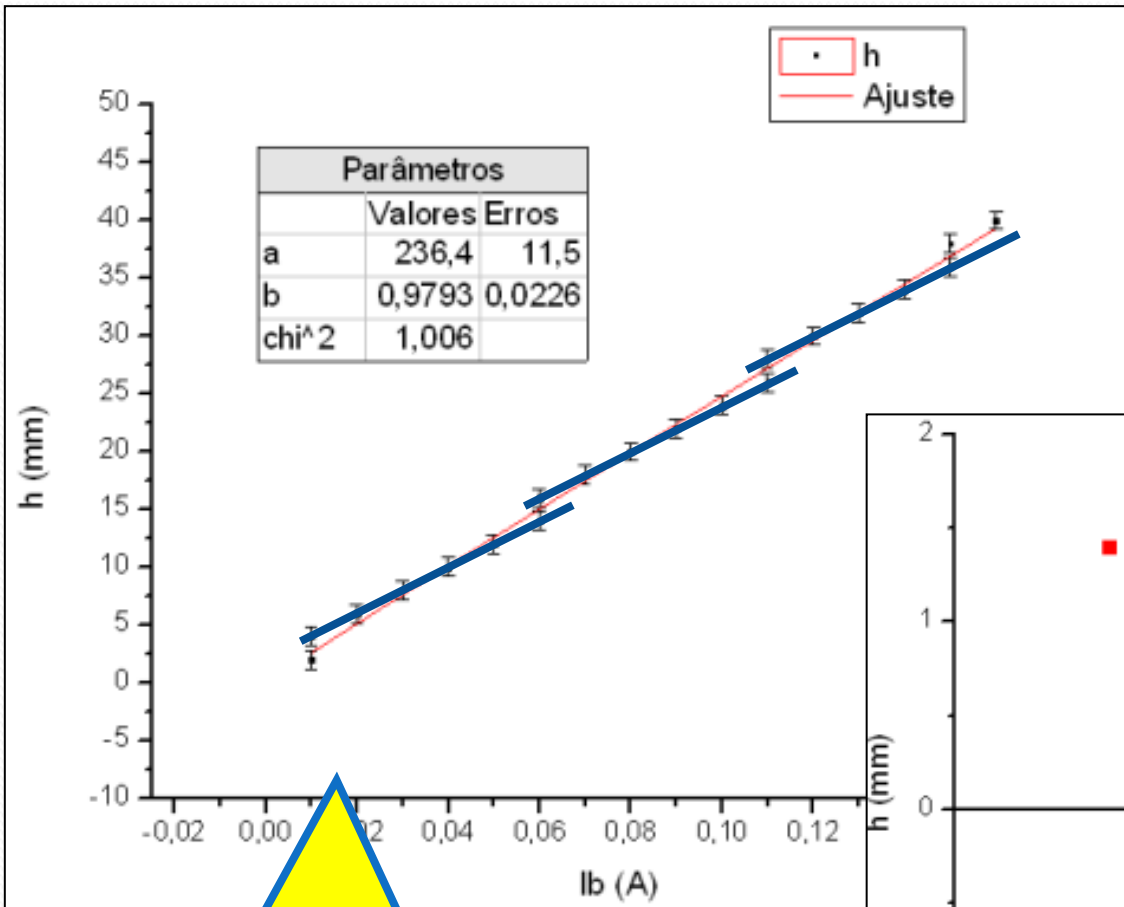
# H04 x corrente

Deslocamento x  $I_b$

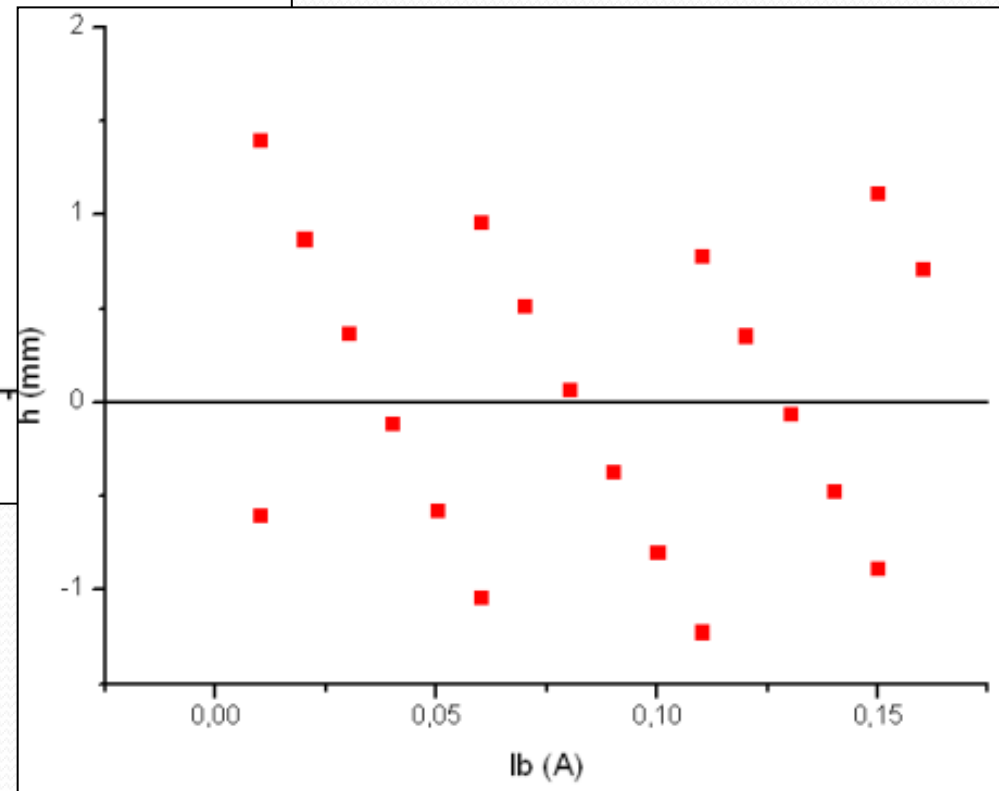




# Caso Interessante



- O que pode explicar esse padrão nos resíduos?



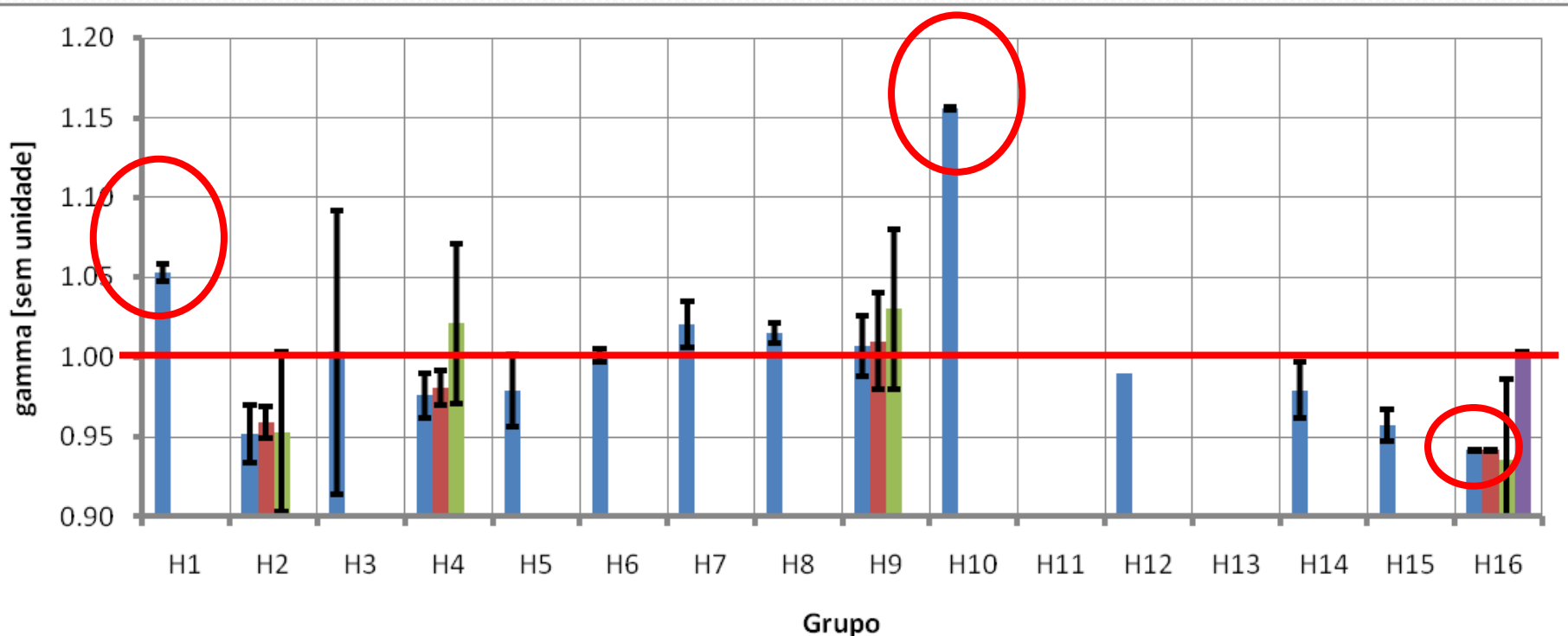
escala do multimetro?  
medida do h??

# H x corrente

	$\gamma$		$\gamma$
H1	1.053 (5)	H9	1.007(19) 1.01(3) 1.03(29)
H2	.952(18) .959(10) .953(11)	H10	<b>1.15628</b> (87)
H3	1.0030 (89)	H11	--
H4	.976(14) .981(11) 1.021(16)	H12	<b>0.989728 (?)</b>
H5	0.97 <b>93 (226)</b>	H13	--
H6	1.001 (4)	H14	<b>0.97929 (1727)</b>
H7	<b>1.02066 (1444)</b>	H15	0.957 (10)
H8	1.015 (6)	H16	.94176(39) .936(37) 1.00318(44)

# H x corrente

- Média =  $0.99 \pm 0.05$  (std)
- Exceto por alguns grupos, a maioria entrou valores compatíveis ( $3\sigma$ ) com  $\gamma=1$ , ou seja, **h** linear com **i**



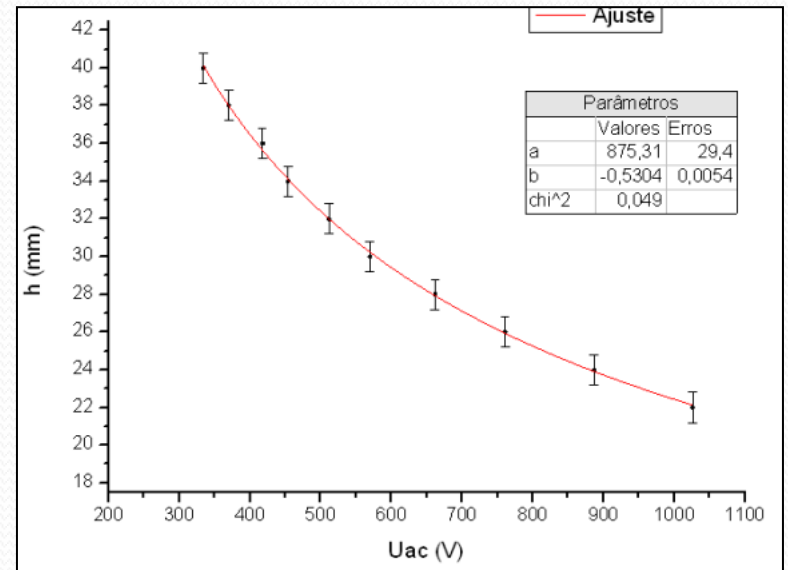
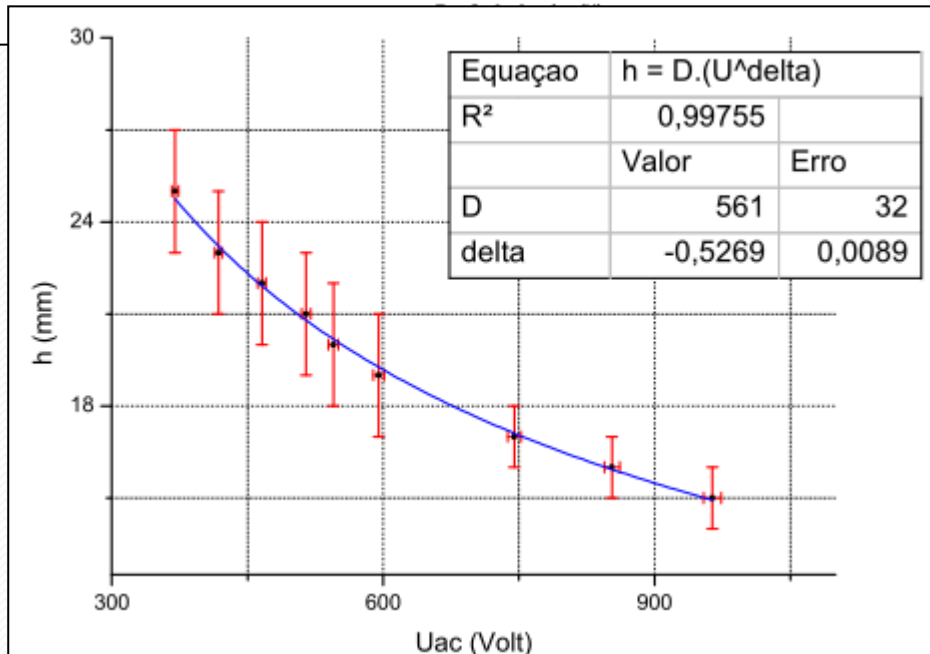
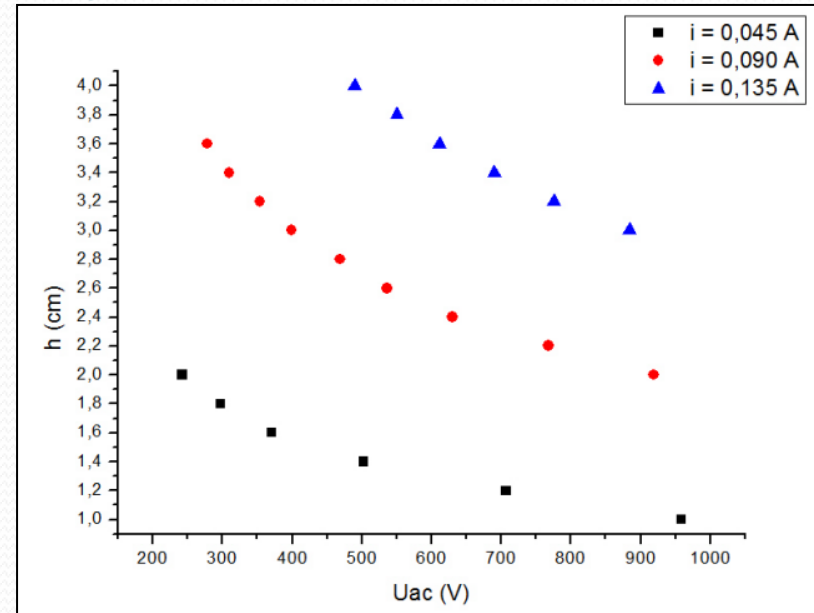
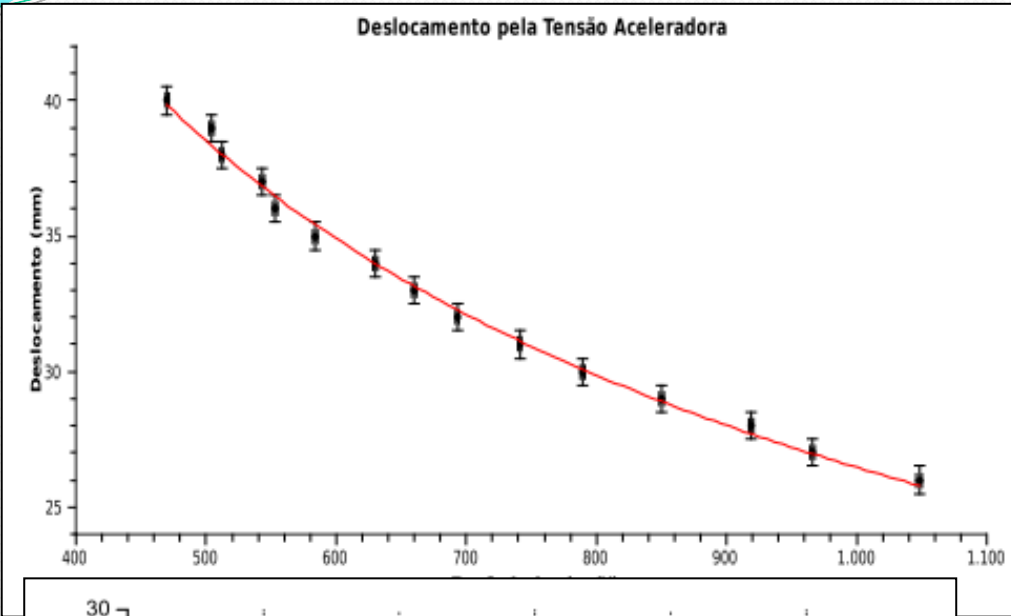
# Parte 2, deslocamento x Vac

- Medir  $h$  em função de  $U_{ac}$  para  $I_B$  fixo.
- Qual é a dependência funcional? Comece testando uma possibilidade simples:

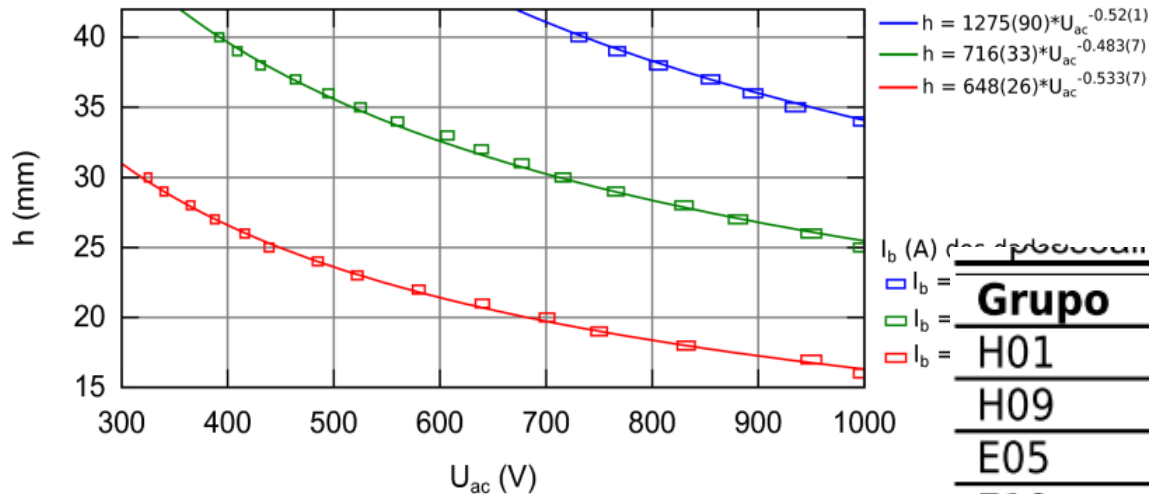
$$h = DU_{ac}^{\delta}$$

- Fazer um gráfico de  $h$  em função de  $U_{ac}$  para  $I_B$  fixo que permita descobrir se a dependência funcional acima é adequada
  - Se for obtenha o expoente delta. Compare com os valores obtidos por seus colegas
  - **Importante**: a grandeza fixa deve ser escolhida de modo a permitir o maior número possível de pontos medidos.

# H x Tensão de aceleração



## H02

Deslocamento x  $U_{ac}$ 

$I_b$  (A) das tabelas, e os valores mais próximos de 0,0

	$I_b =$	<b>Grupo</b>	<b>Gama</b>	<b>Delta</b>
	$I_b =$	H01	1.0528(46)	-0.542(9)
	$I_b =$	H09	1.007(19)	-0.63(3)
	$I_b =$	E05	1.01(1)	-0.531(6)
		E10	1.092(19)	-0.455(12)
		J03	1.006(3)	-1.11(15)
		J12	1.025(5)	-0.566(5)

Comparando os resultados obtidos em todas as curvas com os obtidos pelos demais grupos, percebeu-se coerência com a maioria deles, apesar de alguns valores serem discrepantes (provavelmente devido a erros sistemáticos/problema no equipamento).

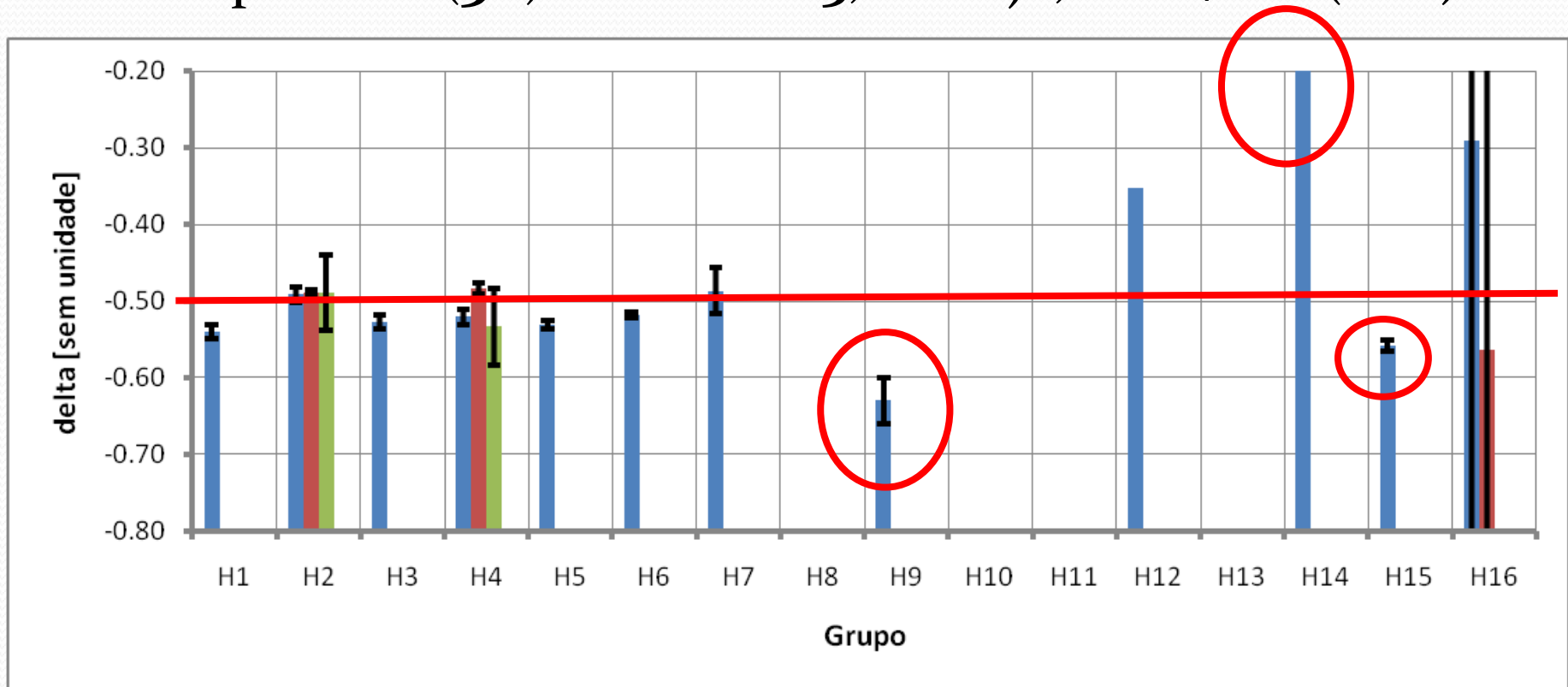
Gama teve o valor próximo a 1 e delta próximo a -0.5, mostrando assim uma dependência aproximadamente linear entre o deslocamento e a corrente, porém inversamente proporcional à raiz quadrada de  $U_{ac}$ .

# H x velocidade

	$\delta$		$\delta$
H1	-0.54 (1)	H9	-0.63 (3)
H2	-.491 (10) -.489 (3) -.489(6)	H10	--
H3	-0.5269 (89)	H11	--
H4	-0.52 (1) -0.483 (7) -0.533 (7)	H12	<b>-0.351867</b>
H5	-0.5304 (54)	H13	--
H6	-0.518 (4)	H14	<b><math>1.0 \pm 10^{-14}</math></b>
H7	-0.4865 <b>(300)</b>	H15	-0.558 (7)
H8	<b>-2.15 (24)</b>	H16	<b><math>-0.29111 \pm 1.86052</math></b> <b><math>-0.56368 \pm 2.49457</math></b>

# H x velocidade

- Média =  $-0.5 \pm 0.6$  (std)
- Média (excluindo outliers) =  $-0.50 \pm 0.08$  (std)
- Exceto por alguns grupos, a maioria entrou valores compatíveis ( $3\sigma$ ) com  $\delta = -0.5$ , ou seja,  $h \sim 1/\text{raiz}(\text{Vac})$





# Conclusões da semana

- Propomos:

$$h = C i_b^\gamma \quad h = D U_{ac}^\delta$$

- Medimos:

- $\gamma = 0.99 \pm 0.05$  (std)
- $\delta = -0.5 \pm 0.6$  (std)

- Portanto:

$$h_{magnético} \propto \frac{i}{\sqrt{U_{ac}}}$$

Mas como é que o deslocamento na tela depende da corrente?

A força magnética não é  $F_m = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$  ?

# Exp. 2 – Seletor de Velocidades

## PROGRAMAÇÃO

- Semana 1
  - Movimento em campo elétrico
- Semana 2
  - Simular o campo elétrico
- Semana 3
  - Movimento em campo magnético
- Semana 4
  - Mapear campo magnético
- Semana 5
  - Espectrômetro de massa parte 1
- Semana 6
  - Espectrômetro de massa parte 2

# Objeto de estudo

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

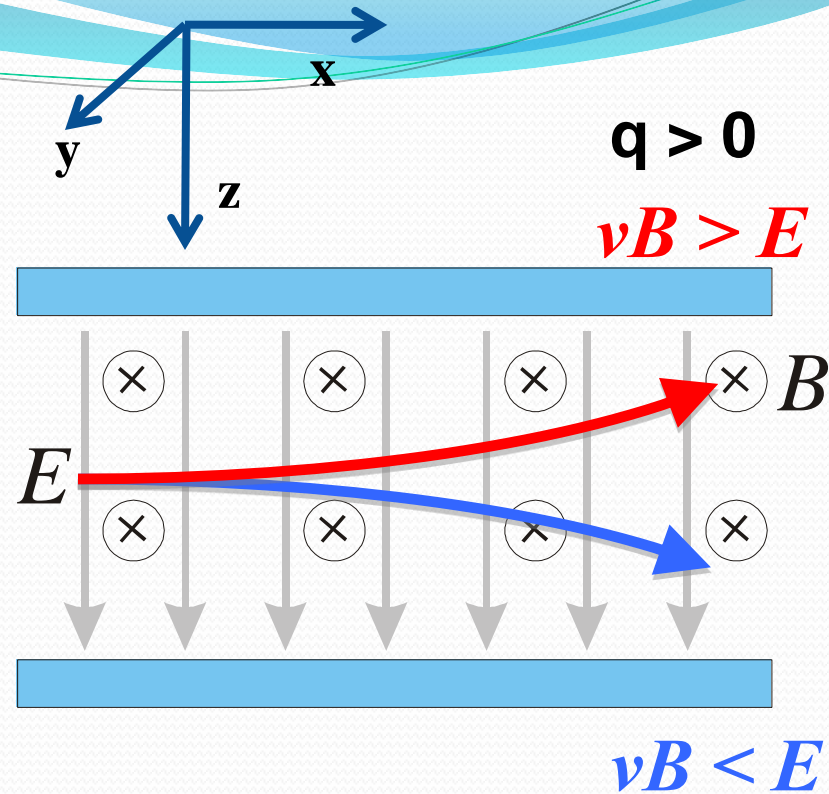
$$\vec{v}_0 = v_0 \hat{i}$$

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

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

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

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



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

# Movimento de uma partícula carregada no campo magnético das bobinas.

- **Qual** vai ser o desvio sofrido pelo feixe de elétrons, medido na tela do tubo de raios catódicos, ao passar por esse campo, em termos de:
  - dimensão da região onde o campo atua ?
  - da corrente nas bobinas ?
  - da distância da borda desse campo à tela do tubo ?
  - da energia do feixe de elétrons ?

# Com a resposta

- ... poderemos saber que **corrente** vamos precisar, nas **bobinas**, para **defletir de (h)cm** um **feixe de energia** ( $E_{\text{feixe}}$ )eV.
- Antes de desenvolver o modelo (próxima aula) vamos medir o campo magnético na região entre as bobinas
- Como fazer isso? Montando as bobinas exatamente na geometria necessária para o seletor de velocidades e usando um **medidor de campo magnético**.

**Antes precisamos pensar**

# Campo magnético das bobinas.

- Do que depende o campo magnético entre as bobinas?

- No de espiras
- Geometria das bobinas
- Posição relativa entre as duas
- Corrente elétrica

} Fixos

} Podemos variar

- Então, vamos escrever o campo magnético como uma função da corrente:

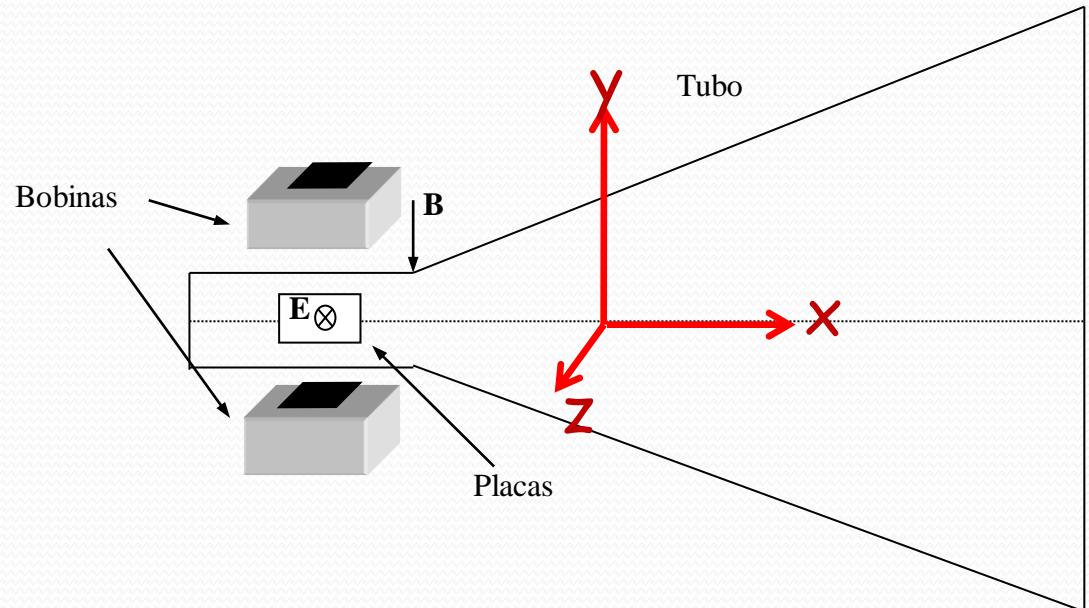
$$\vec{B} = \beta(\vec{r})i$$

$\beta$  pode ser uma constante ou uma função da posição, isso precisa ser verificado experimentalmente

# Como é o campo entre as bobinas

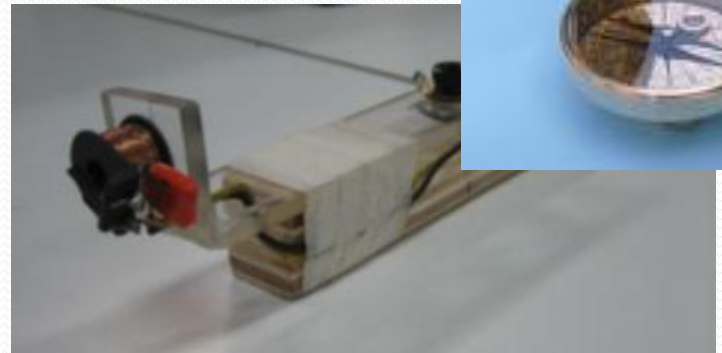
- Bobinas ideais:  $\mathbf{B} = -\nabla\phi$
- Bobina ideal existe?
- Então vamos medir as componentes ( $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ ) do campo magnético na região entre as bobinas: ao longo dos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ .
- Isso é suficiente?

Como medir o campo magnético ??



# Como medir campos magnéticos?

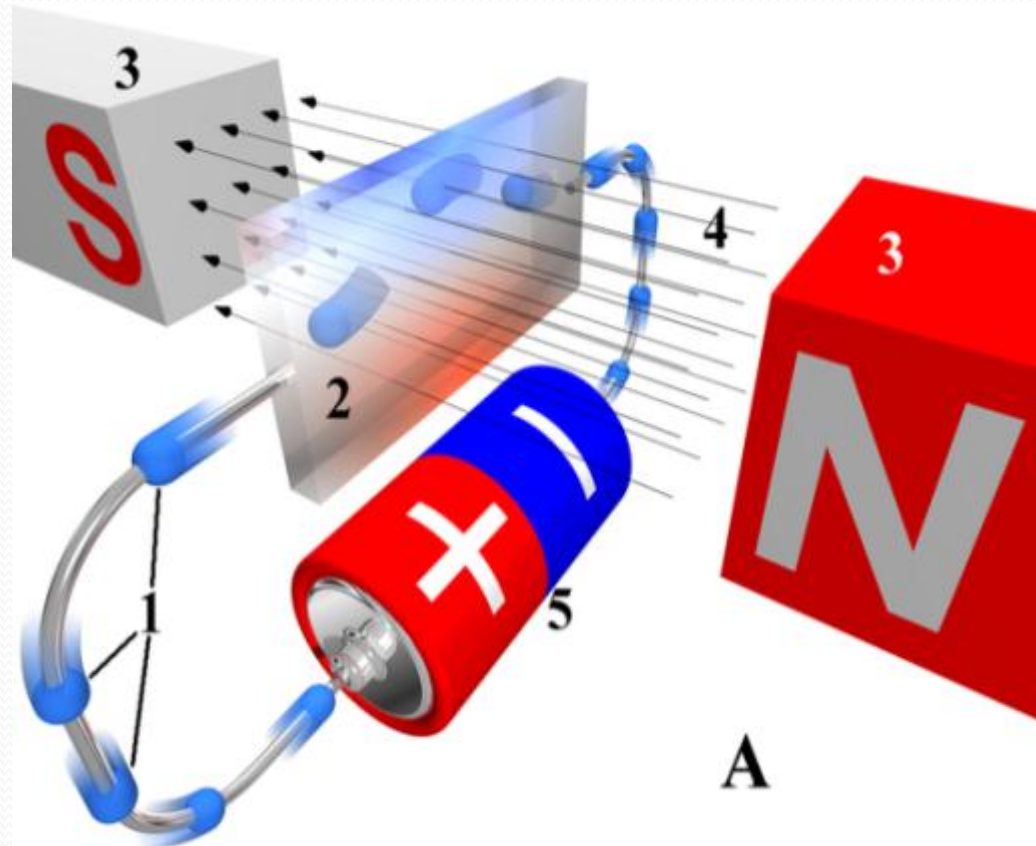
- Muitas técnicas
  - Bússola
    - Somente direção do campo
  - Bobinas sondas
    - Campos com fluxo variável
  - Medidor por efeito Hall
    - Campos estáticos diversos
  - TRC
    - Movimento de elétrons no campo





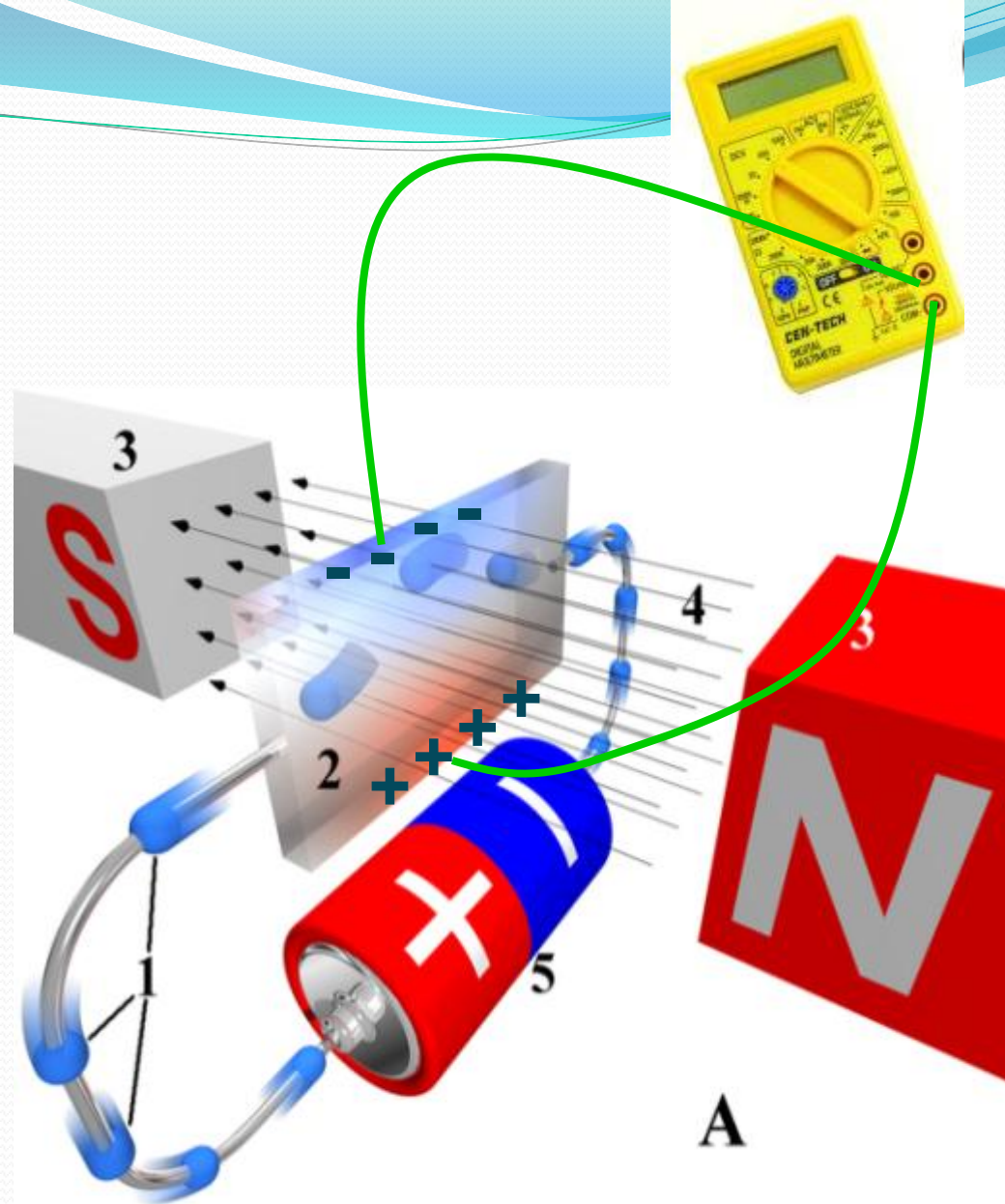
# O efeito Hall

- 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.



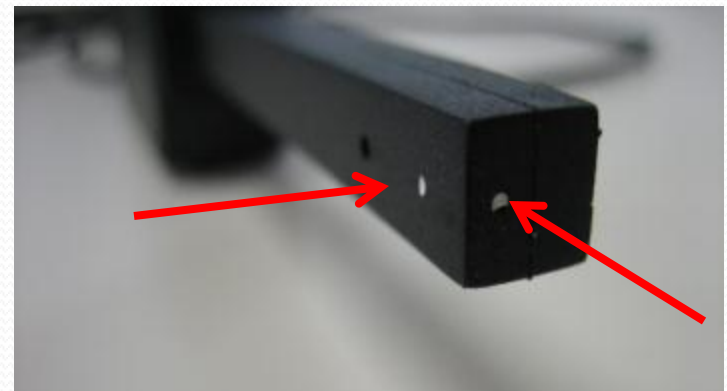
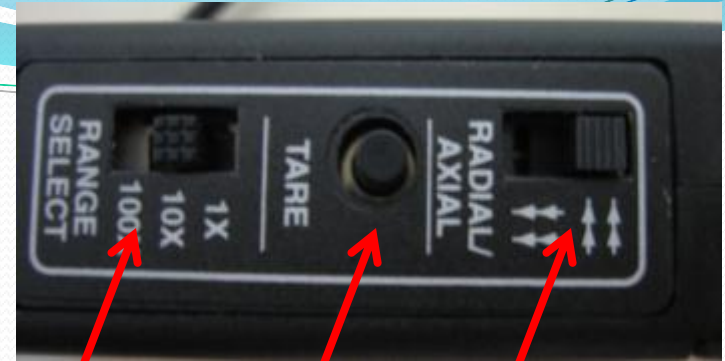
# O efeito Hall

- Esta mudança de distribuição de cargas no condutor cria uma diferença de potencial entre as superfícies do mesmo
- A diferença de potencial é proporcional ao campo magnético



# O Sensor Hall

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



# Algumas peculiaridades do sensor Hall do lab



**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

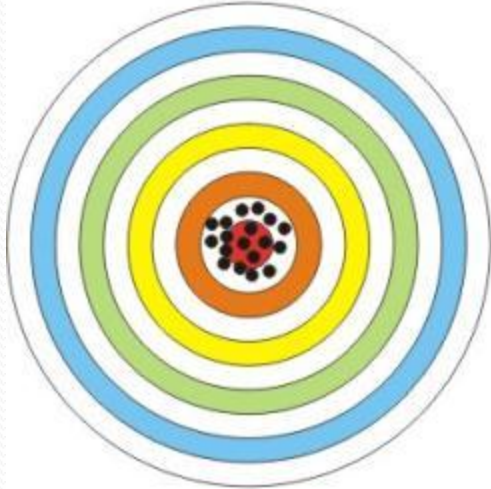
**Note:** The Hall Effect sensing elements used in the CI-6520A are temperature compensated. However when measuring very low magnetic field levels ( $\pm 10$  gauss scale) some temperature dependent variation may be observed in the output. It is on the order of a few

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.

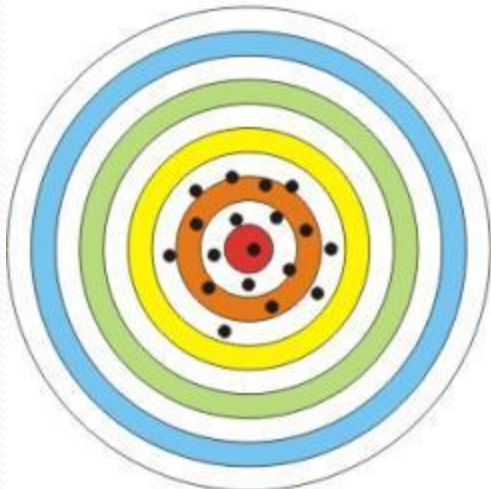
This will allow the sensing element to come to thermal equilibrium and will yield more stable results.

# Acurácia e precisão

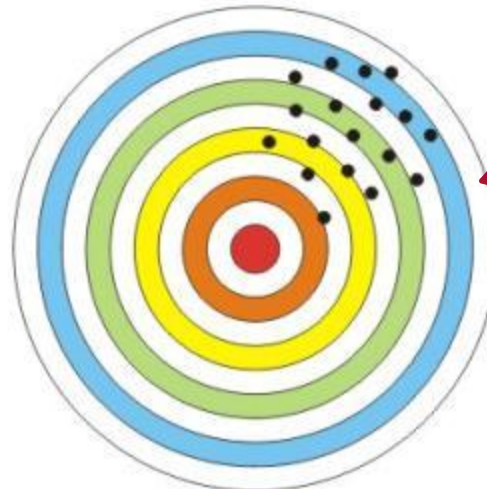
Alta acurácia  
Alta precisão



Baixa acurácia  
Alta precisão



Alta acurácia  
Baixa precisão



Baixa acurácia  
Baixa precisão

O nosso sensor Hall enquadra-se nesta categoria para a escala da medida que queremos realizar.

# Medida do campo das bobinas

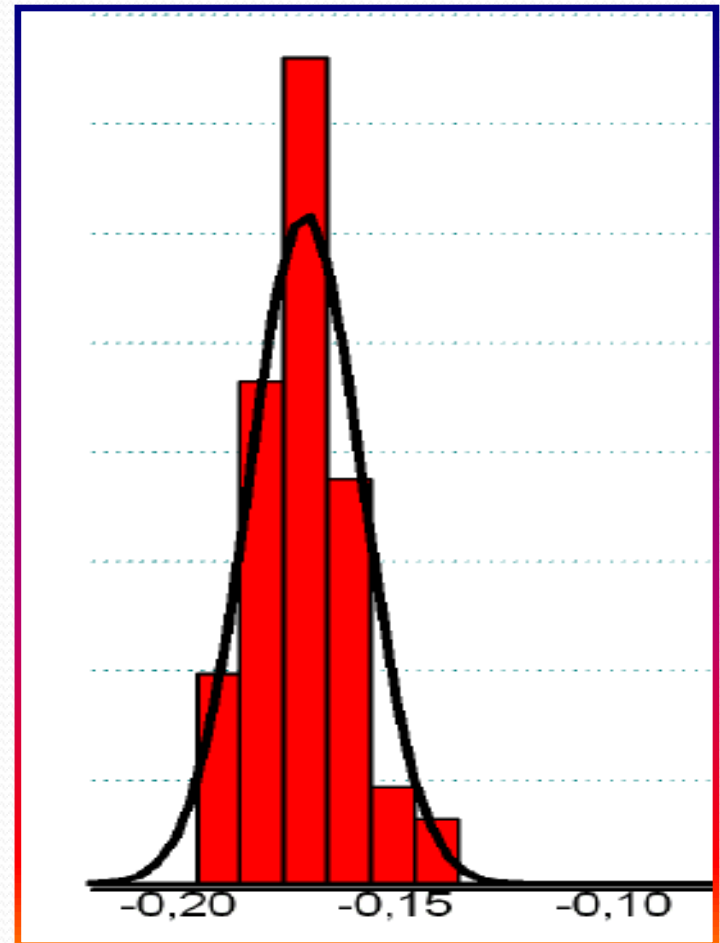
- Como minimizar problemas de acurácia
  - Eu não sei onde está o zero. O que fazer?
  - Calibrar o sensor com a câmara de zero Gauss
  - **Ou simplesmente usar o Tare do sensor!!!**
- Mesmo assim a estabilidade é um problema sério do sensor Hall na escala mais sensível (X100)



# Medida do campo das bobinas

- E a precisão? A melhor forma é fazendo medidas estatísticas.
  - Se a incerteza de uma medida é:  $\sigma = 0,050 \text{ G}$
  - E eu fizer N medidas, tenho que a incerteza da média vale

$$\sigma_{\text{média}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$



# Uso do Data Studio – Sensor HALL

Cada “run” é uma tomada de dados

Precisa configurar a interface para o sensor HALL

Em  $\Sigma$  de uma janela “Digits” você pedir a média ou o desvio padrão dos dados de um run!

Grafico, multimetro, histograma, ...

Vejam o tutorial no site!

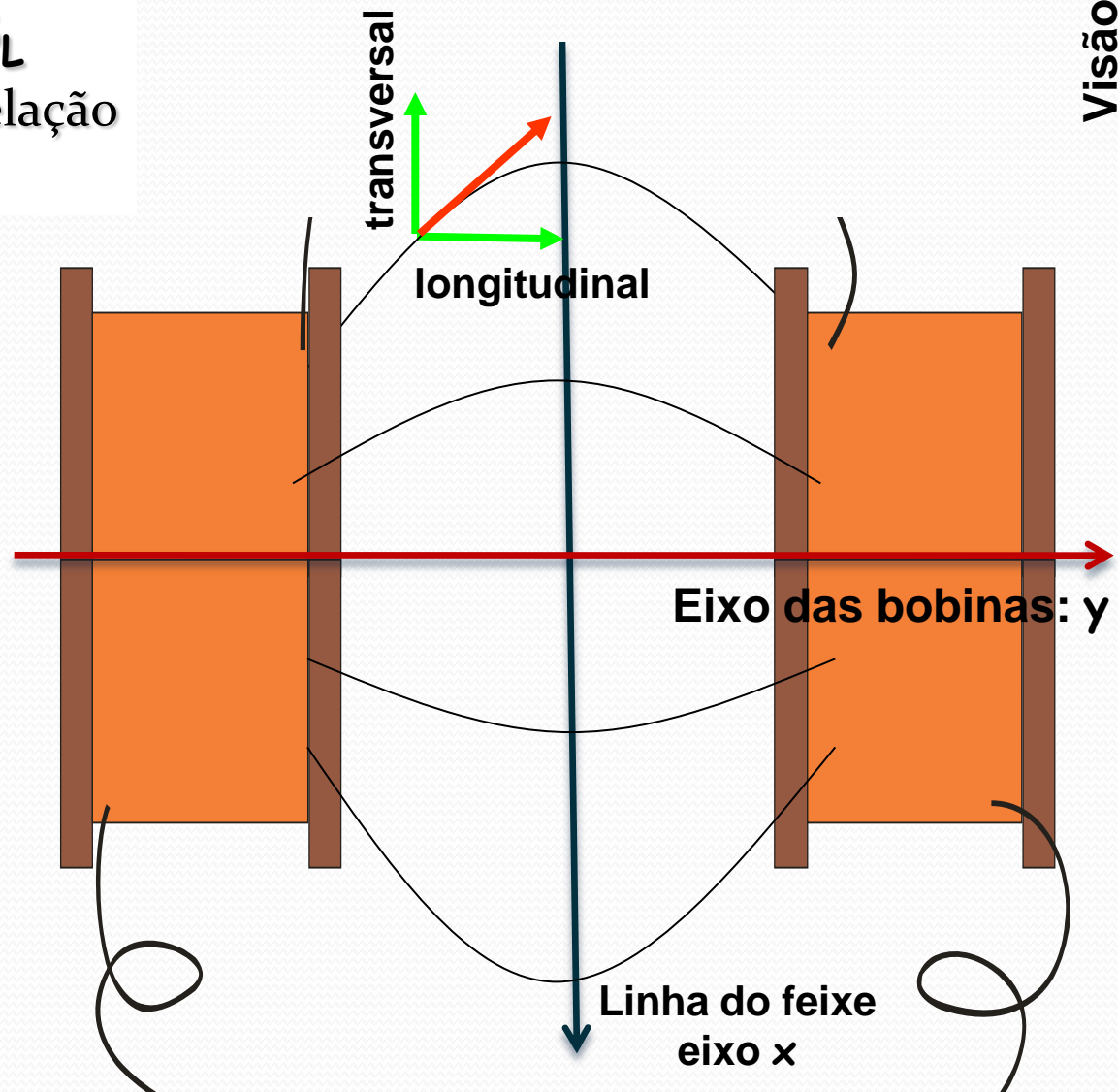
The screenshot displays the Data Studio software interface. The main window shows a graph of Magnetic Field Strength (gauss) versus time. A data point is visible at approximately 2.0 seconds with a value of -4 gauss. The interface includes a menu bar (File, Edit, Experiment, Window), a toolbar with buttons for Summary, Setup, Calculate, and Curve Fit, and a sidebar with a Data tree and a Displays list. The Displays list includes Digits, FFT, Graph, Histogram, Meter, Scope, Table, and Workbook. A 'Digits' window is open, showing a table with columns for 'Magnetic Field Strength (10X), Ch A' and 'Run #1', and a value of -4 gauss. A 'Keyboard 1' dialog box is also visible, showing a value of 7 mm. A 'Science Workshop 750' device is shown in the background.



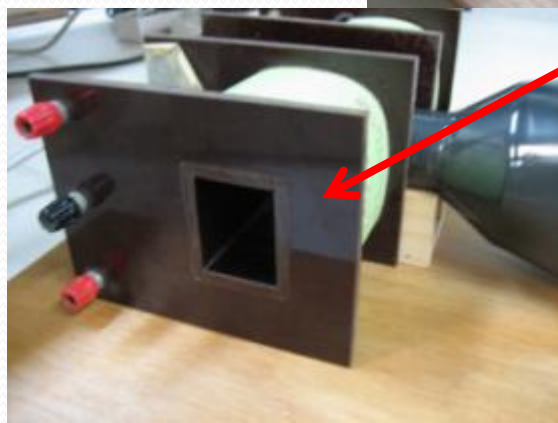
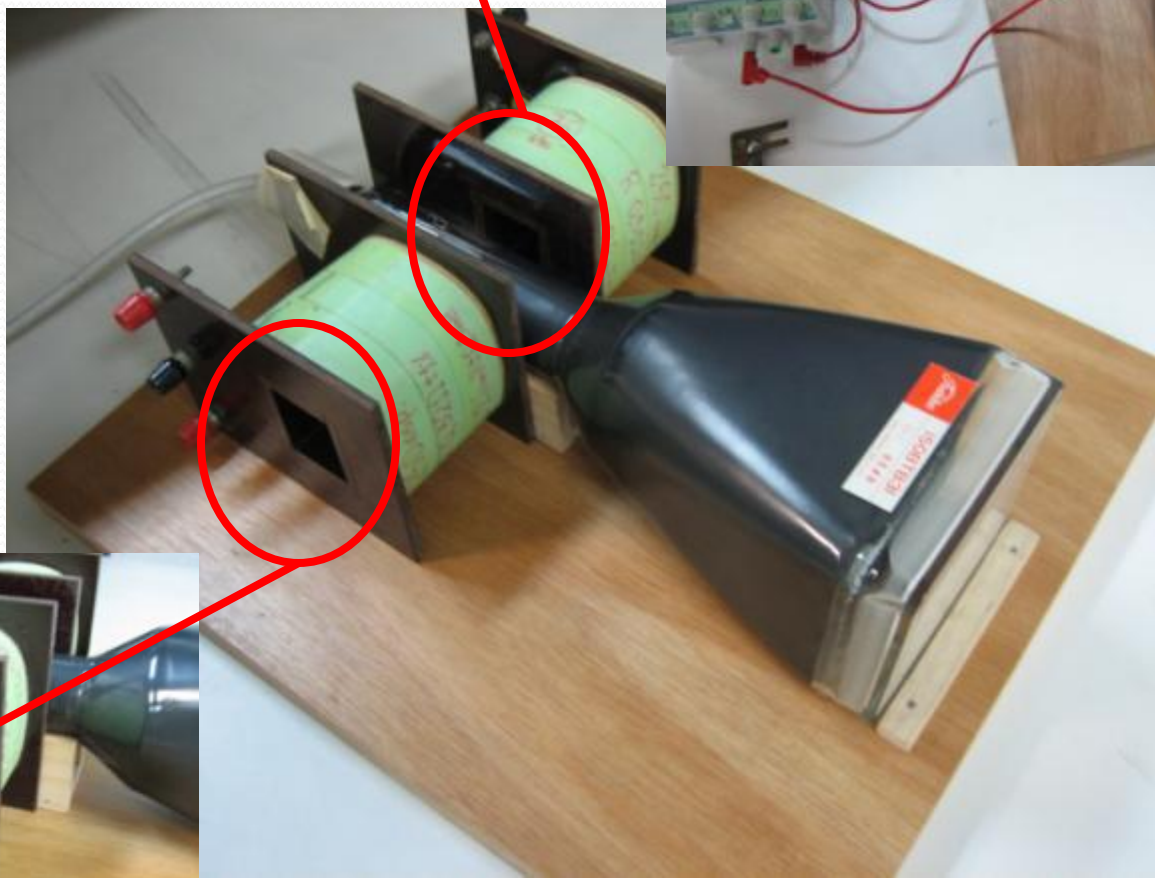
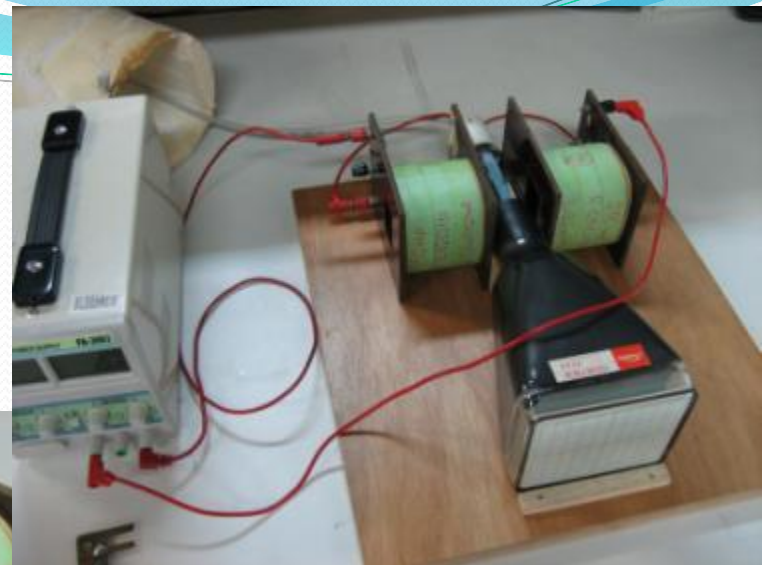
# Medida do campo das bobinas

Campo longitudinal  $\mathbf{B}_L$   
e transversal  $\mathbf{B}_T$ , em relação  
ao eixo das bobinas,  $\mathbf{y}$

- Chave no sensor Hall  $\rightarrow$  olhe as flechas:
  - elas indicam o sentido da componente que está sendo medida

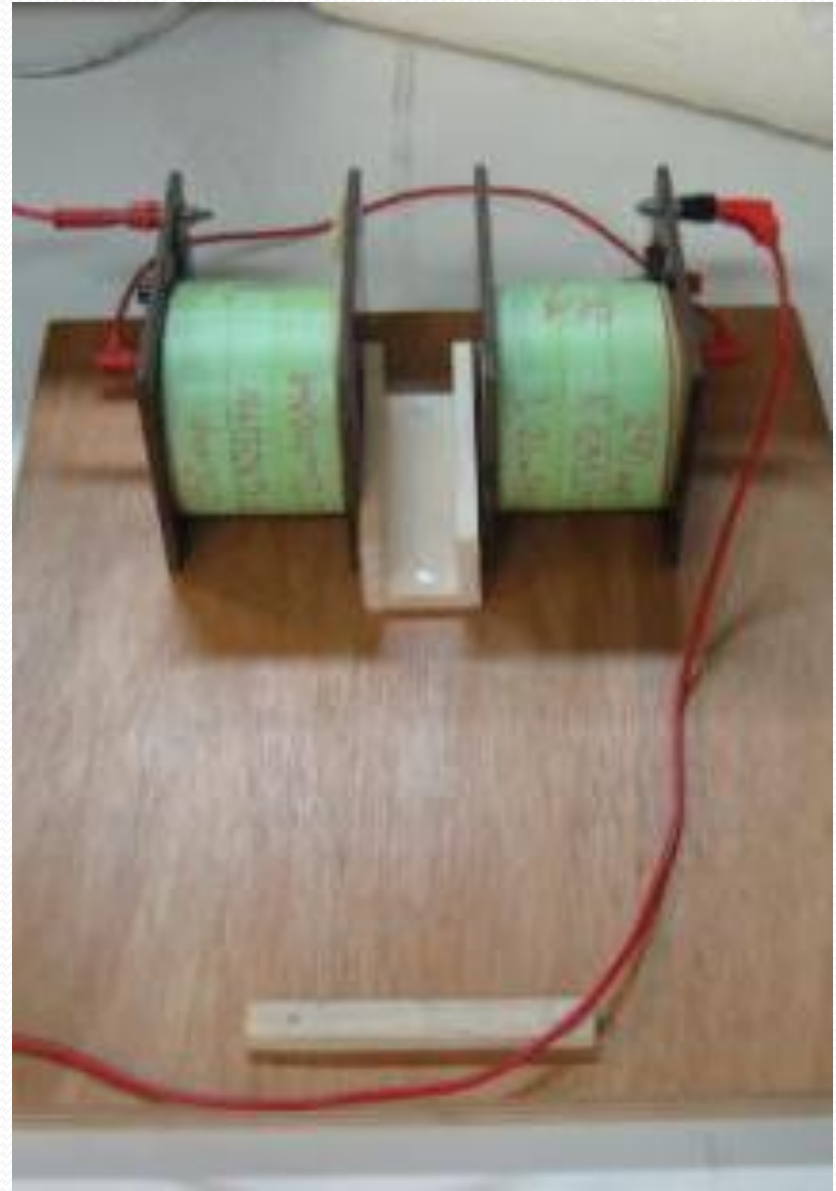


# Na prática

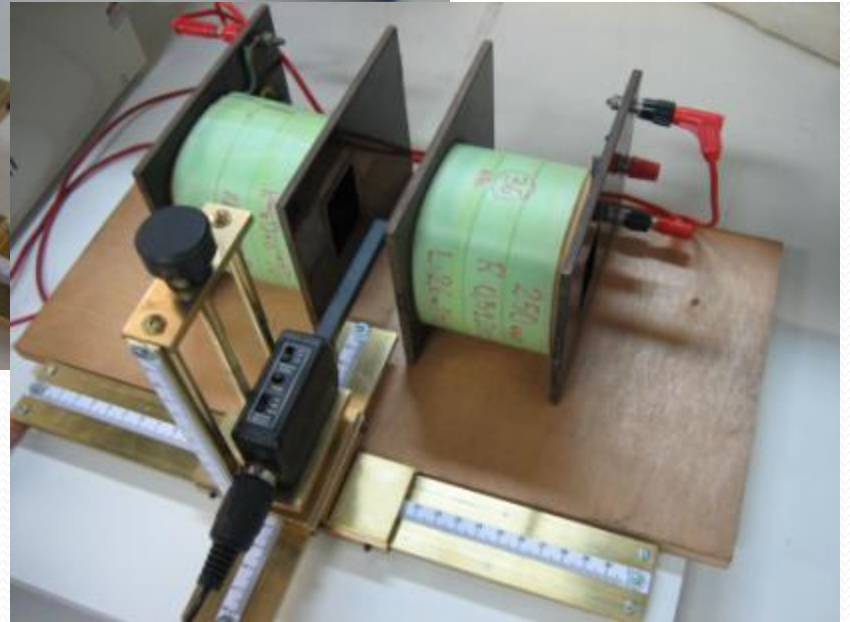
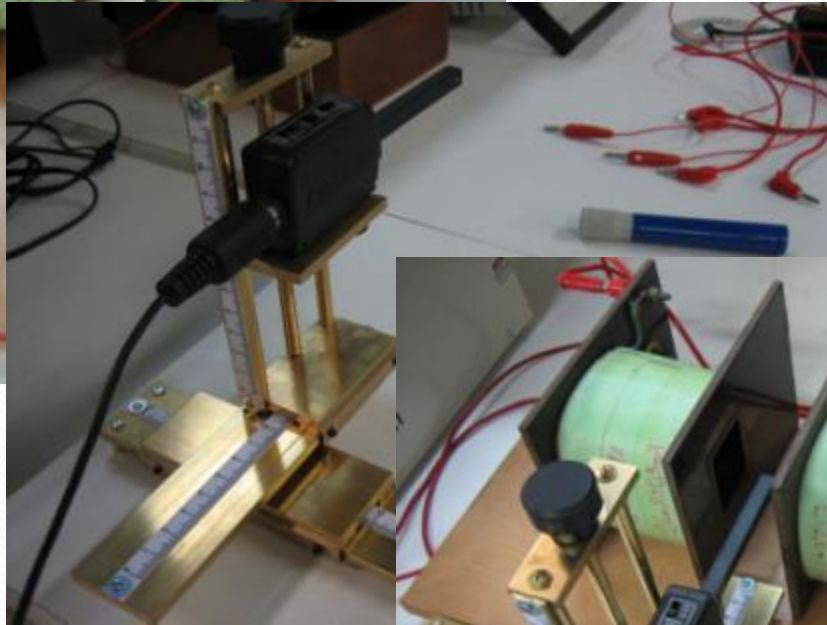
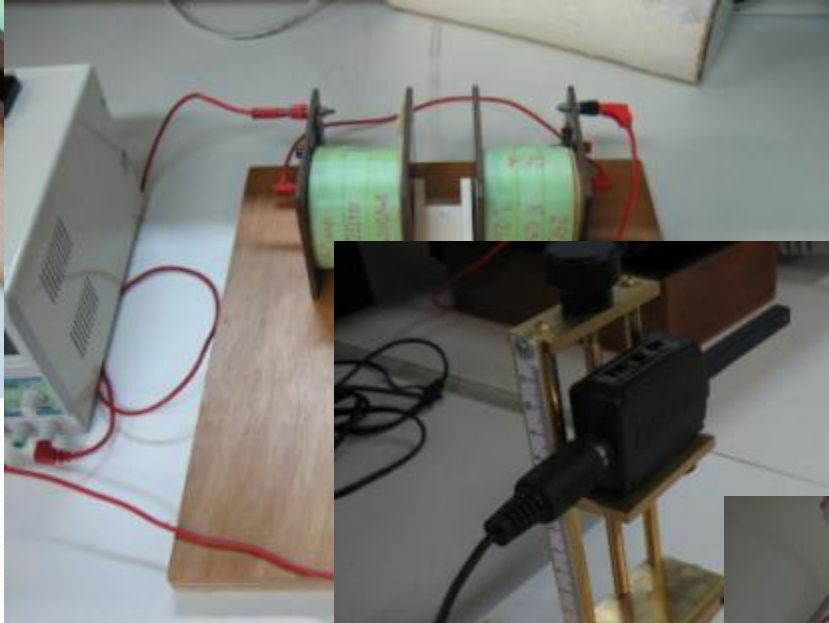
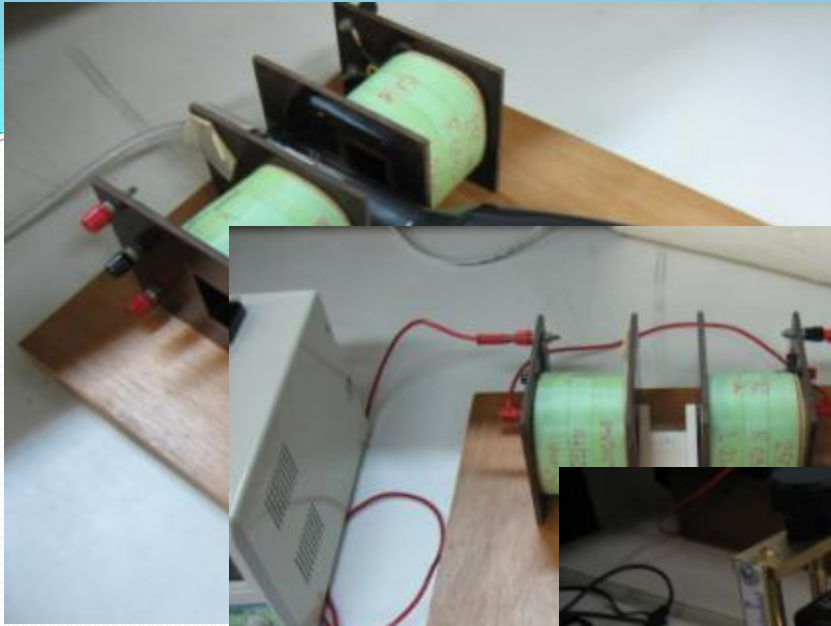


# Arranjo experimental

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

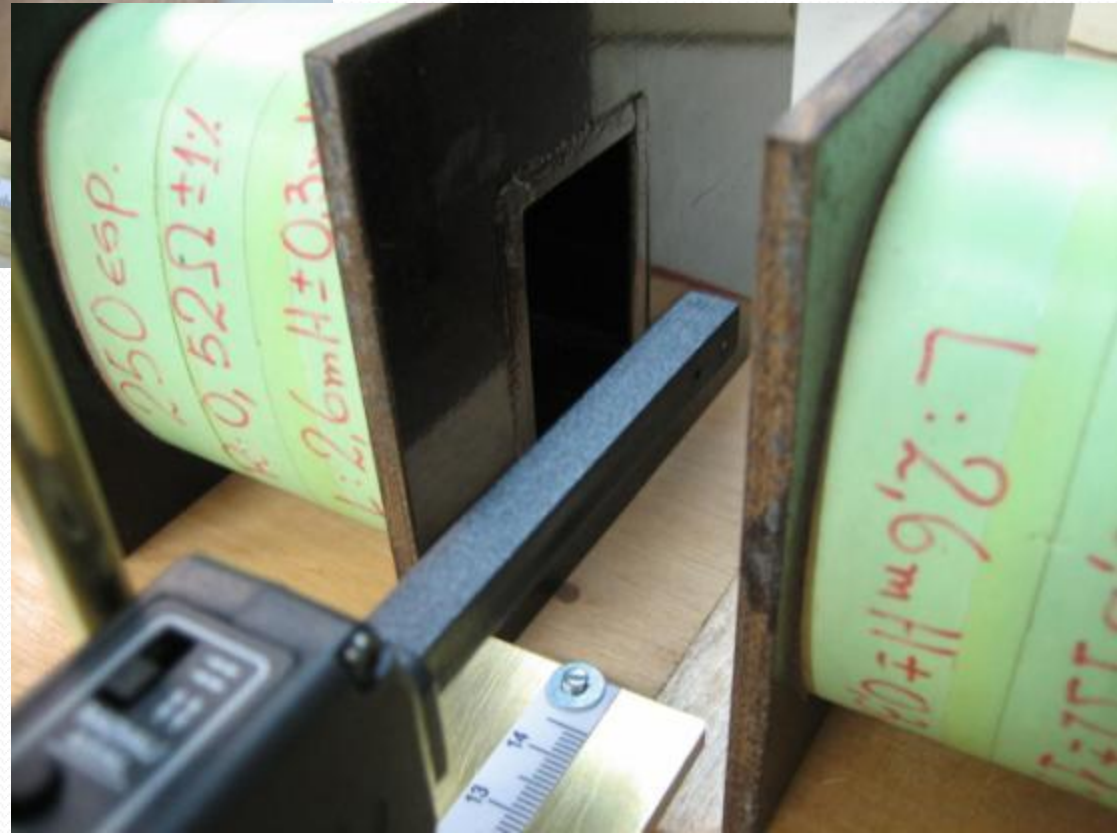
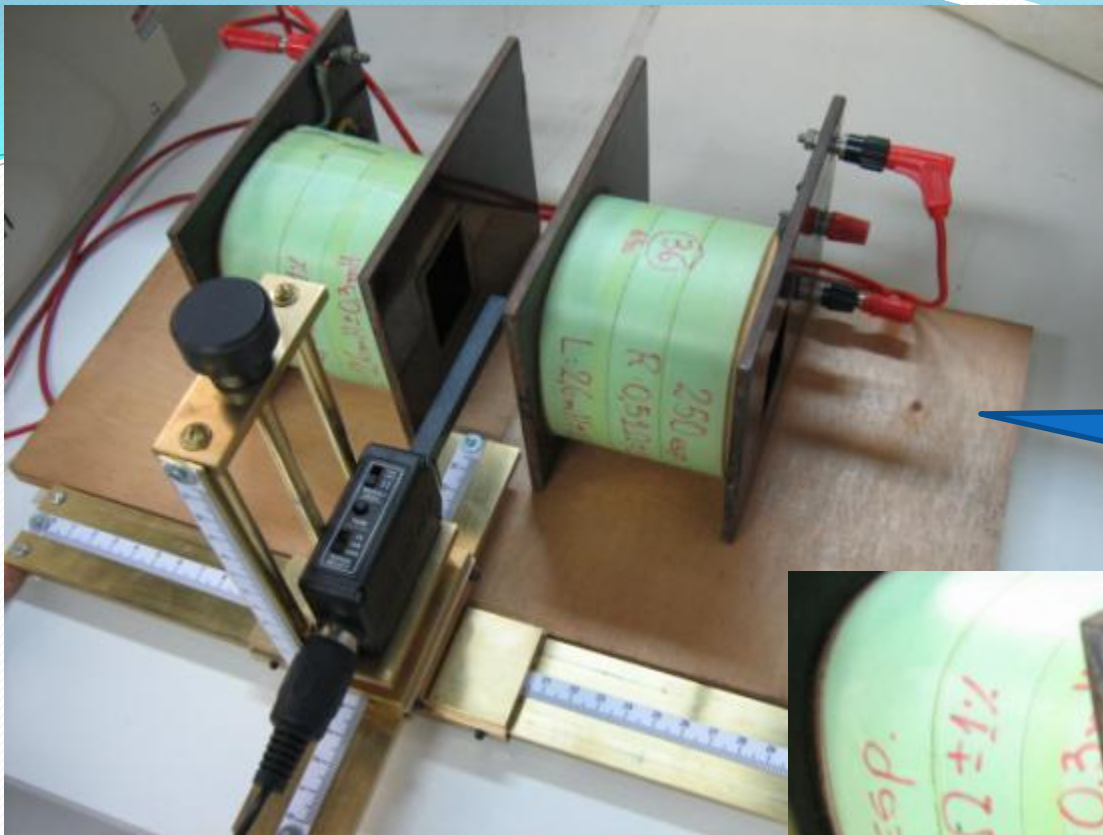


# Na prática...



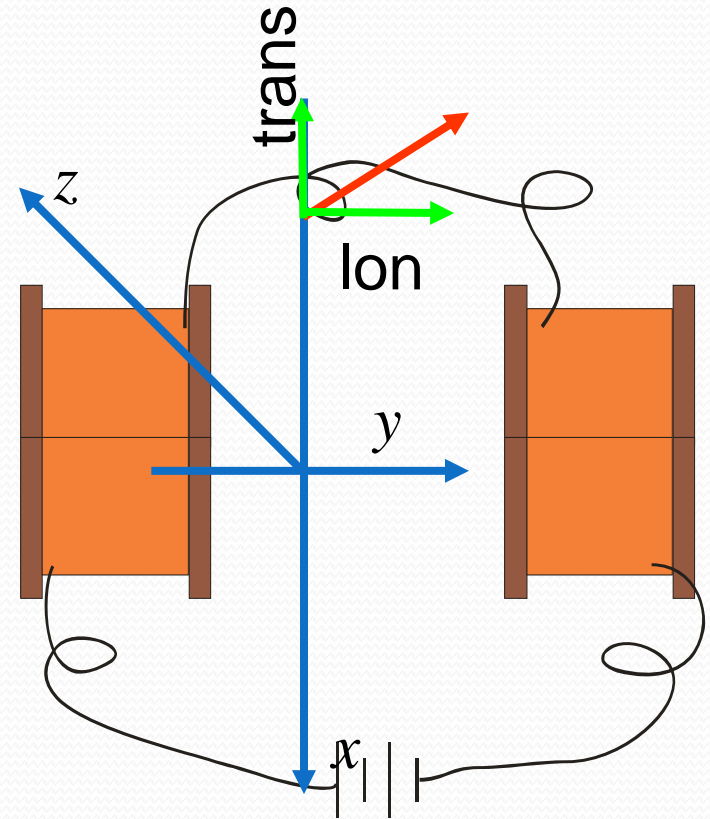
# Na prática...

Suporte de madeira  
para poder  
centralizar o medidor  
Hall



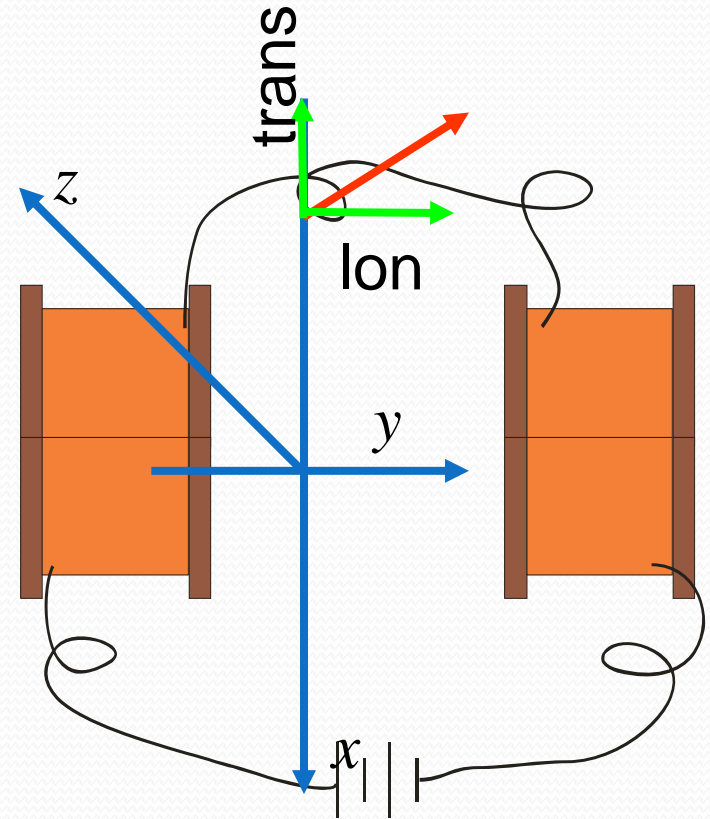
# Para entregar – parte 1

- Fazer **1** gráfico de  $\mathbf{B}_{\text{lon}}(x)$  ao longo do eixo  $x$  para **3** valores de corrente nas bobinas.
  - Para uma das correntes, medir também  $\mathbf{B}_{\text{trans}}$ . Neste caso, plotar junto com o  $\mathbf{B}_{\text{lon}}$  medido na mesma corrente
- Fazer **1** gráfico de  $\mathbf{B}_{\text{lon}}(x)/i$  ao longo do eixo  $x$  para as **3** correntes medidas
  - O resultado obtido é razoável? Você esperava a linearidade entre campo e corrente? Porque? Explique.



# Para entregar – parte 2

- Para **1** das correntes fazer **1** gráfico de  $\mathbf{B}_{\text{trans}}$  e  $\mathbf{B}_{\text{lon}}$  ao longo do eixo  $\mathbf{x}$  e outro gráfico para estas componentes ao longo do eixo  $\mathbf{y}$ .
  - Argumente fisicamente porque não é preciso medir os campos ao longo do eixo  $\mathbf{z}$



# Pergunta da semana

- Como funciona um espectrômetro de massas?
- É possível determinar a razão carga/massa do elétron a partir das medidas isoladas que você já fez (semana 1 e semana 3)?



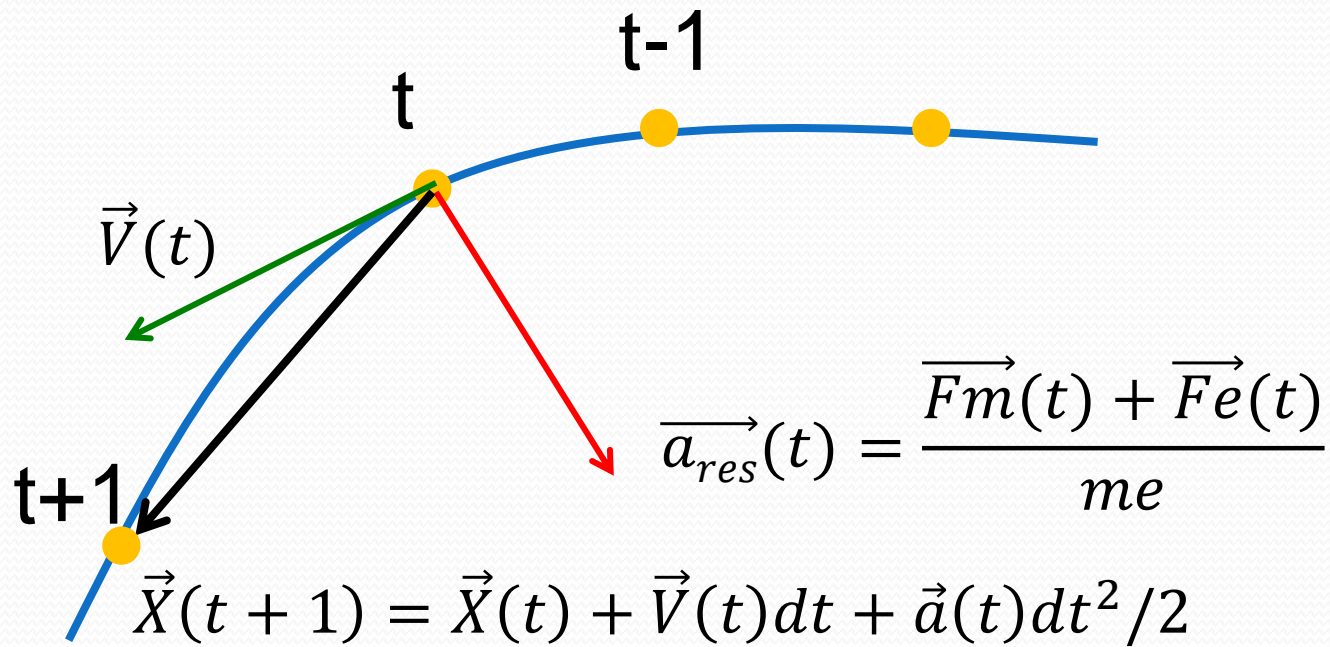
# Simulação

- Para as 2 últimas semanas desta experiência, vocês terão que desenvolver uma simulação numérica do experimento.
- Objetivo:
  - Simular a trajetória do elétron, com velocidade inicial  $\mathbf{v}_0$  e sujeito a campos ideais  $\mathbf{E}(\mathbf{x})$  e  $\mathbf{B}(\mathbf{x})$ , para encontrar a posição de impacto na tela do TRC.
- Poderão usar a linguagem que preferirem (C, C++, Java, Fortran, Matlab, etc...) => Melhor começarem logo...
- A partir da resposta da semana (slide anterior), vocês irão usar o programa para simular o funcionamento de um espectrômetro de massa.

# Dica 1 – Algoritmo

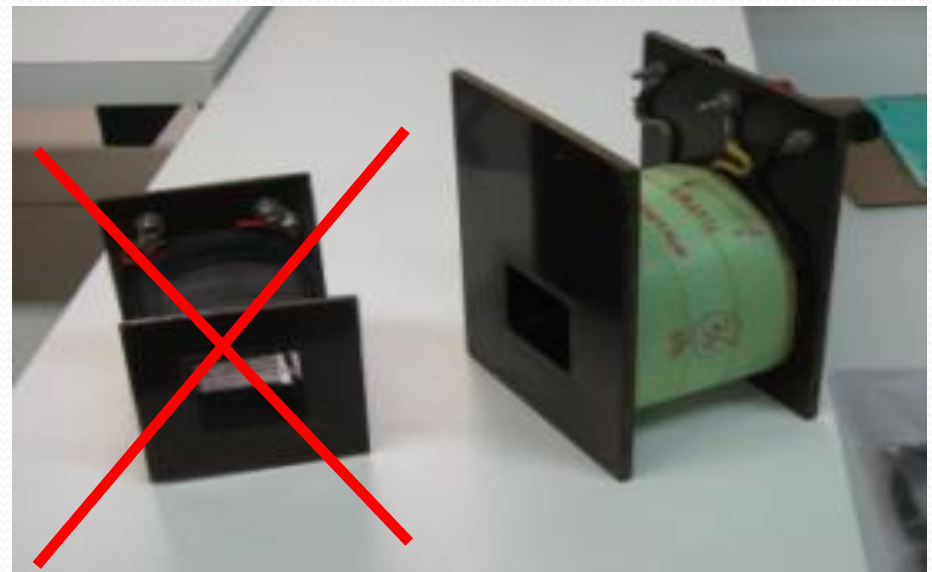
- Inicializar vetor posição no ponto de partida.
  - $\mathbf{X} = (x_0, 0, 0)$
- Calcular velocidade inicial, q  $V_{ac} = m_e v_0^2/2$ 
  - $\mathbf{V} = (v_0, 0, 0)$
- Loop no tempo, com passo dt
  - Qual o campo elétrico em  $\mathbf{X}$ ?  $\Rightarrow \mathbf{F}_e = q \mathbf{E}(\mathbf{X})$
  - Qual o campo magnético em  $\mathbf{X}$ ?  $\Rightarrow \mathbf{F}_m = q \mathbf{V} \times \mathbf{B}(\mathbf{X})$
  - Aceleração neste ponto,  $\mathbf{A} = (\mathbf{F}_e + \mathbf{F}_m)/m_e$
  - Atualizar posição  $\mathbf{X}$  e velocidade  $\mathbf{V}$ 
    - $\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{X}(t) + \mathbf{V}(t) dt + \mathbf{A}(t) dt^2 / 2$
    - $\mathbf{V}(t+1) = \mathbf{V}(t) + \mathbf{A}(t) dt$
- Gravar  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{V}$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$ , para cada time-step, para analisar depois.

# Dica 1 - Algoritmo



# Dica 2

- 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



# Dica 3

- Não confiem na leitura da corrente ou tensão diretamente na fonte DC
  - Não usem o multímetro com amperímetro!
  - Usar um resistor de proteção de **10 ohms** que limite a corrente máxima no circuito em **1.5 A**
- 
- NÃO DEIXEM O RESISTOR ESQUENTAR



# Dica 4

