

Seletor de Velocidades,

Parte 3 – Simulação do Campo Elétrico e
Mapeamento do Campo Magnético

Aula 3

Prof. Henrique Barbosa
Edifício Basílio Jafet - Sala 100

Tel. 3091-6647

hbarbosa@if.usp.br

<http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa>

Exp. 2 – Seletor de Velocidades

PROGRAMAÇÃO

- Semana 1
 - Movimento em campo elétrico
- Semana 2
 - Movimento em campo magnético
- Semana 3
 - Simular o campo elétrico e mapear o campo elétrico
- Semana 4
 - Calibrar o seletor de velocidades
- Semana 5
 - Obter a resolução do seletor de velocidades

TAREFAS SEMANA PASSADA



Para entregar, Parte 1

- Ligue o **TRC** e focalize o feixe na tela
 - Aplique uma tensão aceleradora **$V_{ac}=700V$**
 - Gire o **TRC** e alinhe com o campo magnético local
 - Procure fazer com que o feixe esteja focalizado e pelo menos sobre o eixo horizontal
 - Defina a origem neste ponto e deixe o TRC fixo nesta posição da bancada
 - Monte as bobinas de cada lado do tubo do TRC.
 - Elas devem estar alinhadas com as placas desviadoras verticais e entre si.
- Como verificar se as bobinas estão alinhadas entre si?

Como verificar o alinhamento das bobinas?

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



restre. As bobinas foram alinhadas pelo uso de uma bússola para verificar que o campo gerado por cada uma estava na mesma direção e sentido.

Parte 2, o campo magnético

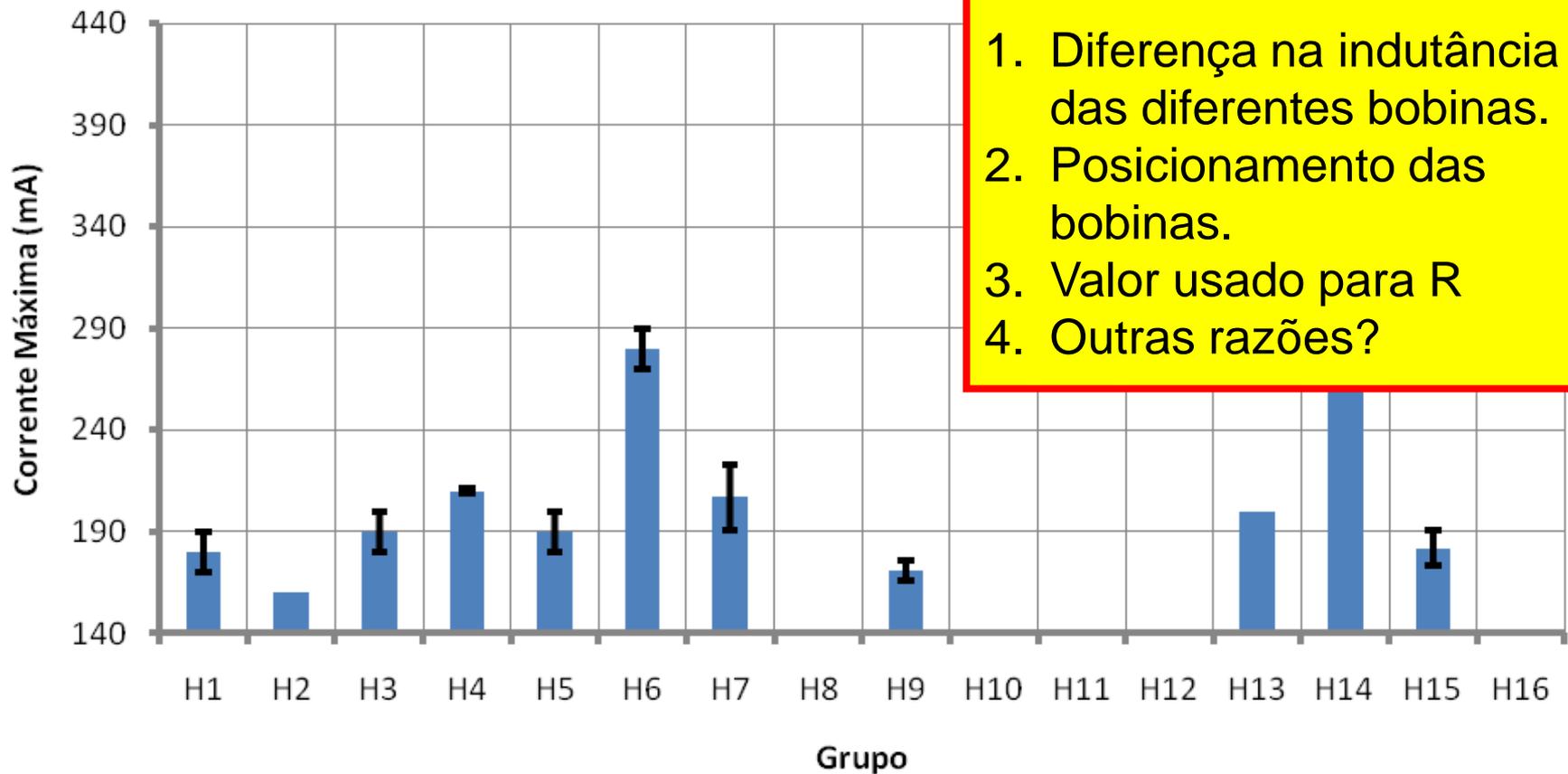
- Use um resistor de proteção de 10 ohms para medir a corrente pelas bobinas
- Aumente e diminua a corrente e verifique o que acontece com o feixe. Comente.
- Veja que a posição depende da corrente aplicada.
- Anote a corrente máxima que permita que o feixe continue visível na tela do **TRC**.
 - CUIDADO: Não passe de 2A e não mantenha uma corrente alta por muito tempo para não danificar as bobinas e nem o resistor de proteção.

Corrente máxima (mA) p/ 700V

ponto na tela			
H1	180 (10)	H9	171 (5)
H2	160 (?)	H10	1340 (?)
H3	190 (10)	H11	--
H4	210 (1)	H12	--
H5	190 (10)	H13	200 (?)
H6	280 (10)	H14	360 (20)
H7	207 (16)	H15	182 (9)
H8	--	H16	1780

Corrente máxima (mA) p/ 700V

1. Todos os TRC são iguais, com tela de 40mm.
2. Todo mundo orientou em relação ao campo local
Porque os valores são tão diferentes?



1. Diferença na indutância das diferentes bobinas.
2. Posicionamento das bobinas.
3. Valor usado para R
4. Outras razões?

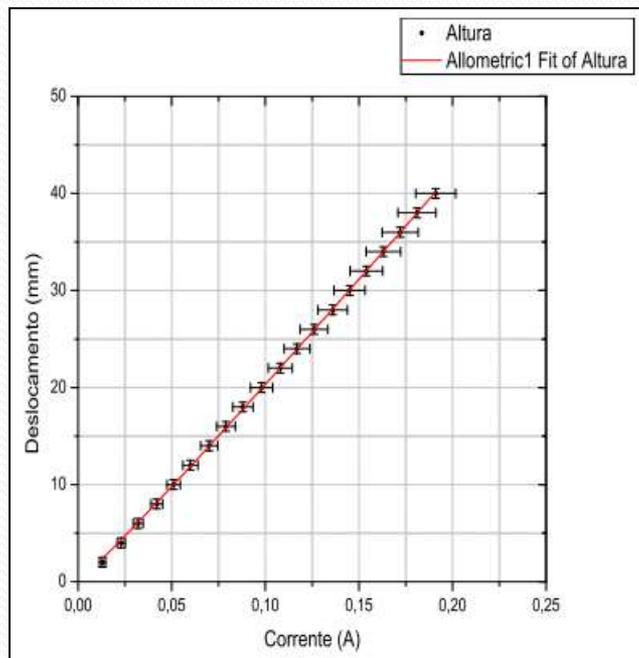
Parte 3, deslocamento $\times I_B$

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

$$h = Ci_b^\gamma$$

- 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

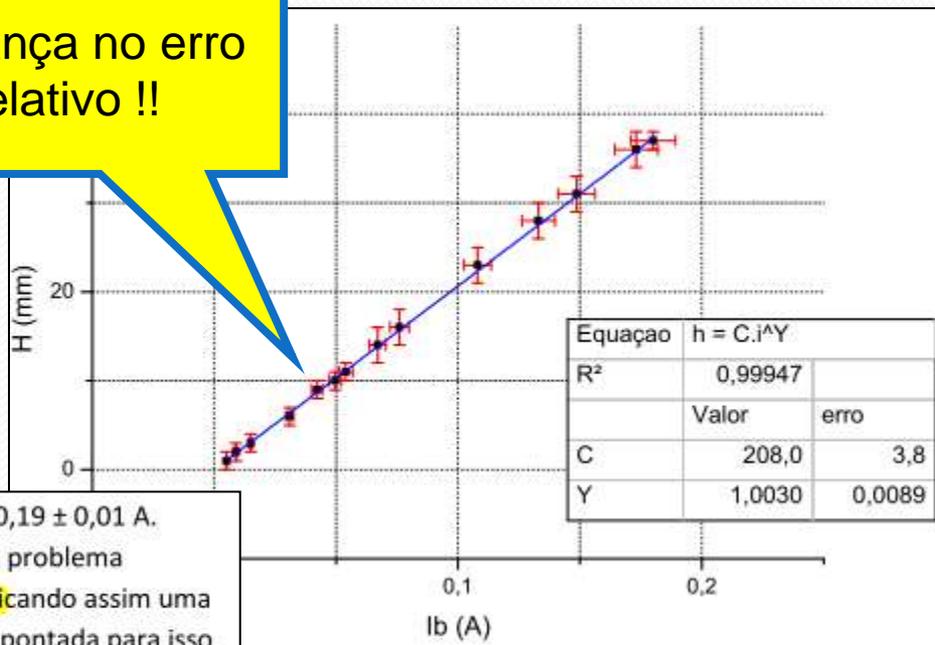


γ é constante.
C varia

Tabela 1 Resultados obtidos pelo ajuste

	$U_{ac} = 700 \text{ V}$		$U_{ac} = 850 \text{ V}$		$U_{ac} = 955 \text{ V}$	
	C	γ	C	γ	C	γ
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 !!

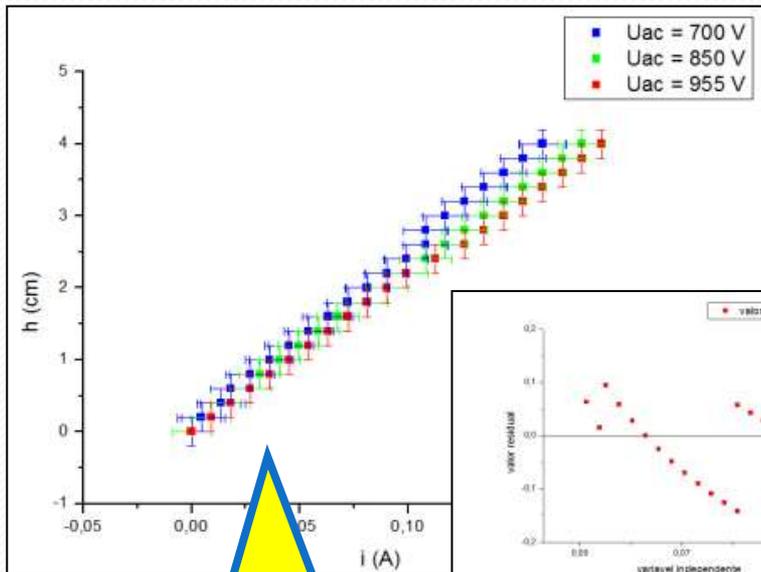


A corrente máxima tal que o ponto do TRC permanece na tela é de $0,19 \pm 0,01 \text{ A}$.
 Durante a medição da altura do ponto do seletor de velocidade, um problema encontrado foi que **quando sua altura aumentava, o ponto duplicava, justificando assim uma incerteza maior (cerca de 2mm) na medição da altura.** Uma possível razão apontada para isso é a oscilação (frequência de 60hz) da rede elétrica.

porque quem? testaram?

H x corrente – Grupo H02

- Fizeram para 3 correntes diferentes...



Faltam os ajuste nos gráficos

Faltam as incertezas nos resíduos

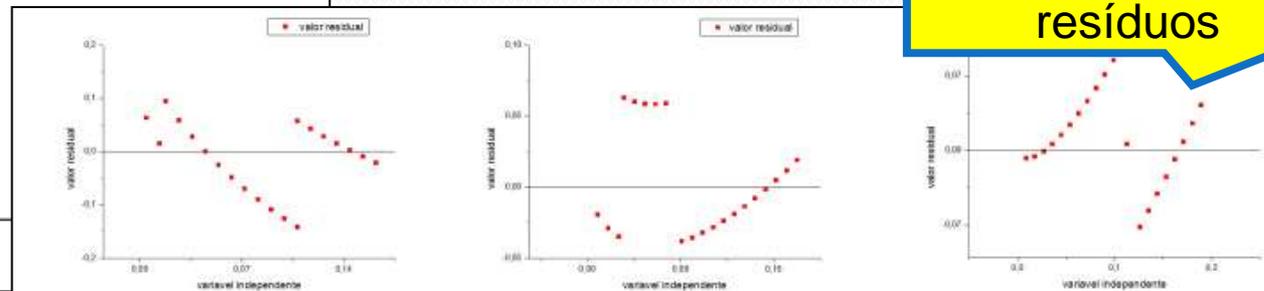
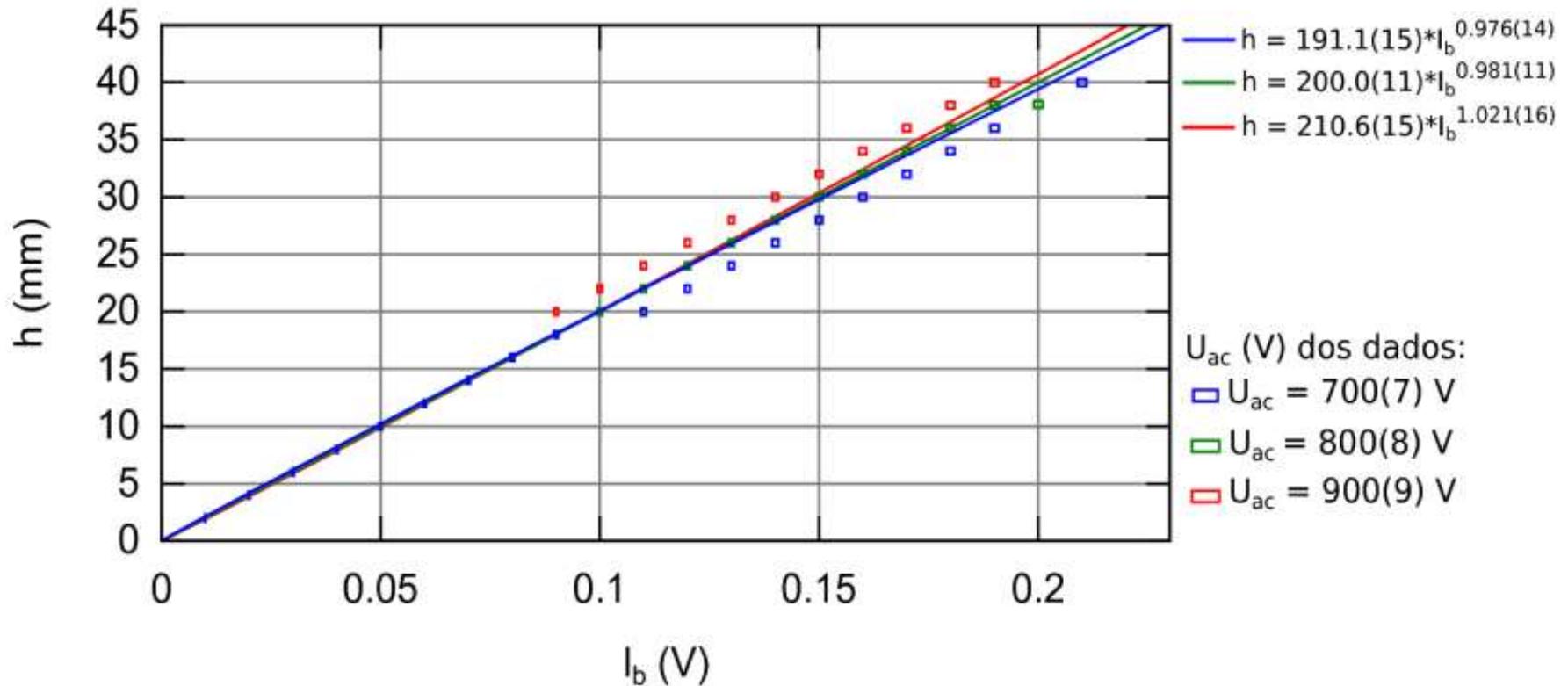


Figura 2: Gráficos dos dos resíduos do ajuste das curvas ajustadas de $I_B \times h$ para $U_{ac} = 700$ V, 850 V e 955 V respectivamente.

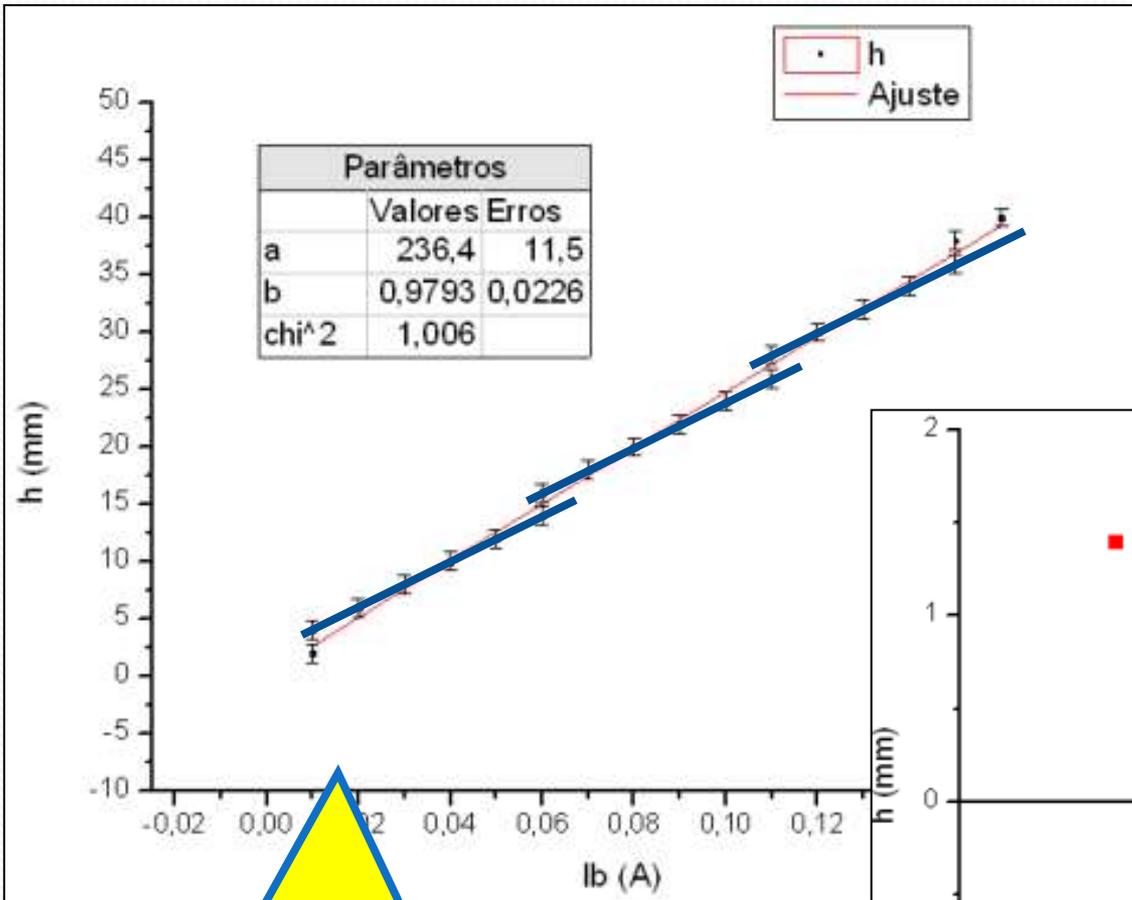
- A análise dos resíduos do ajuste nos mostra que os dados não apresentavam alta qualidade, fato provavelmente explicado pela escolha da escala de **200 V no multímetro**. Com isto, os valores medidos para as voltagens das quais foram obtidas os valores das correntes apresentaram baixa precisão e baixo 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

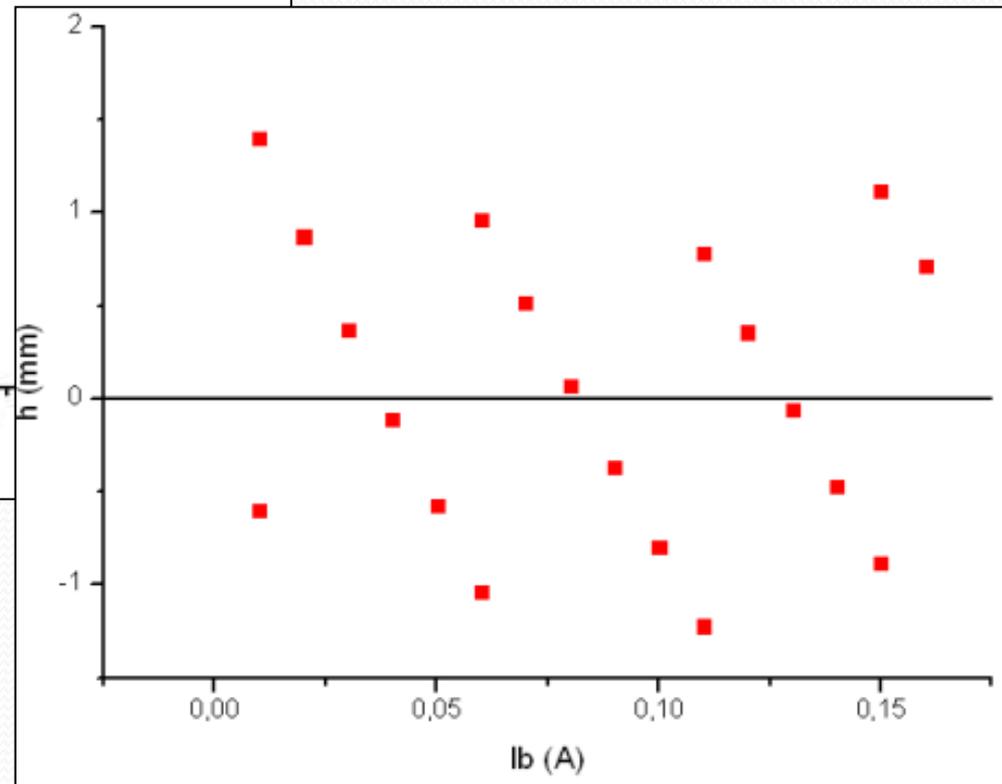


Caso Interessante



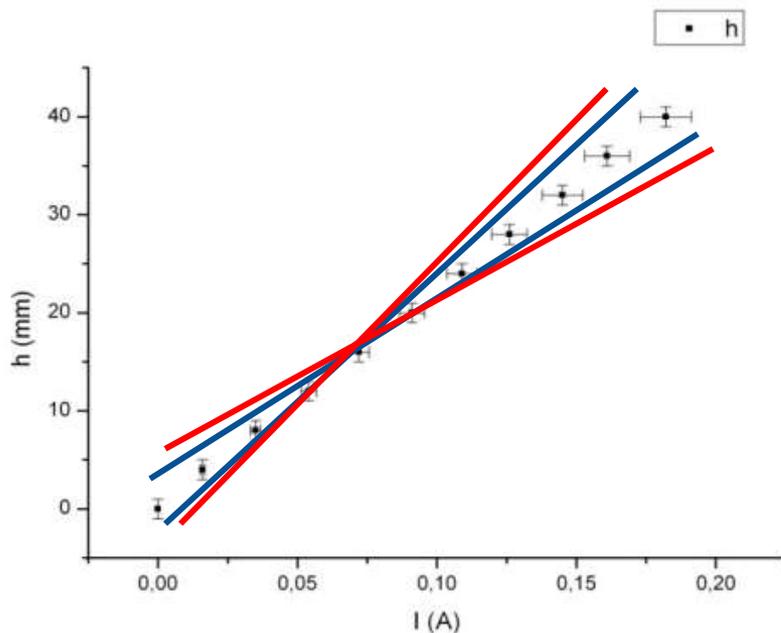
- O que pode explicar esse padrão nos resíduos?

escala do multímetro?
medida do h??

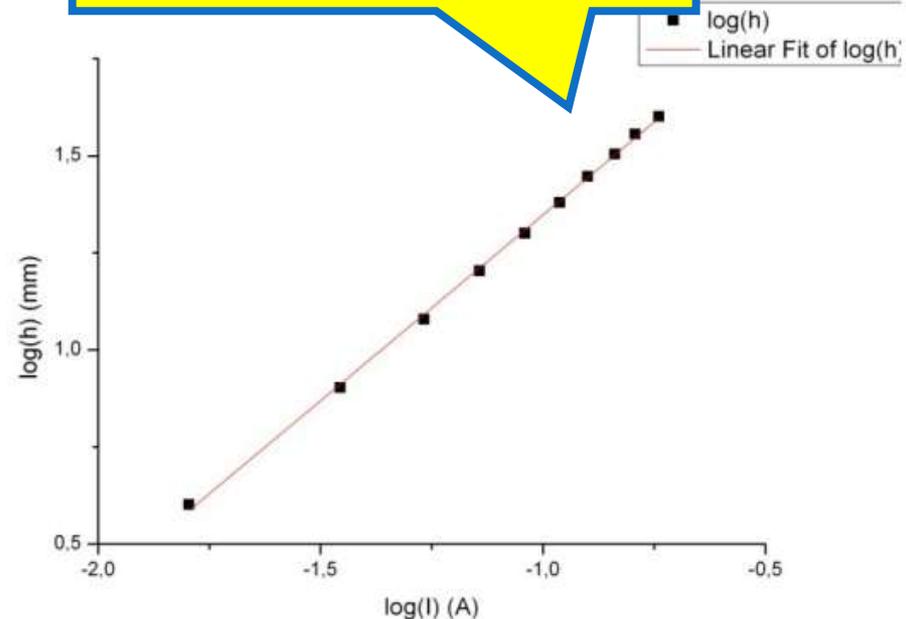


Problema

- Para a correta estimativa dos parâmetros no ajuste, é preciso considerar as incertezas.



Este grupo colocou dois graficos: um deles com os erros, outro apenas com o ajuste!



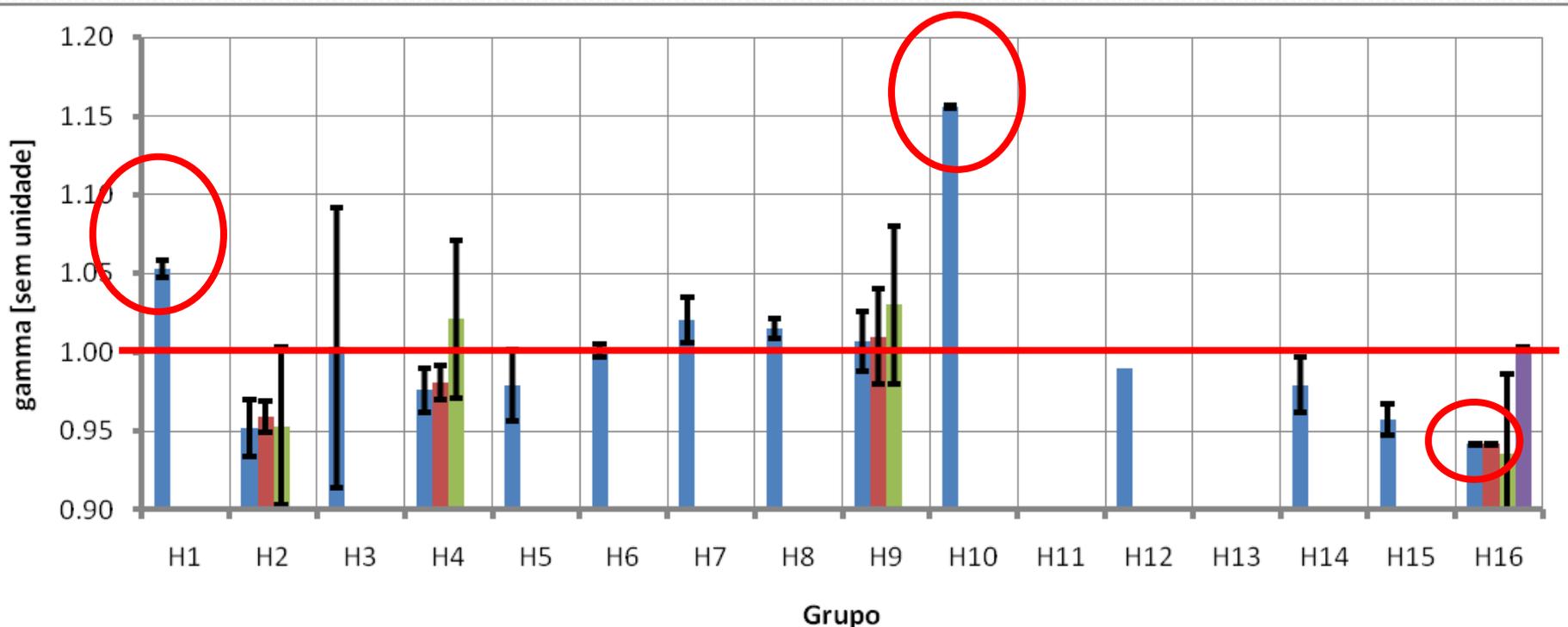
H x corriente

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

Algarismos significativos...
Incertezas...

H x corrente

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



Parte 4, deslocamento x Vac

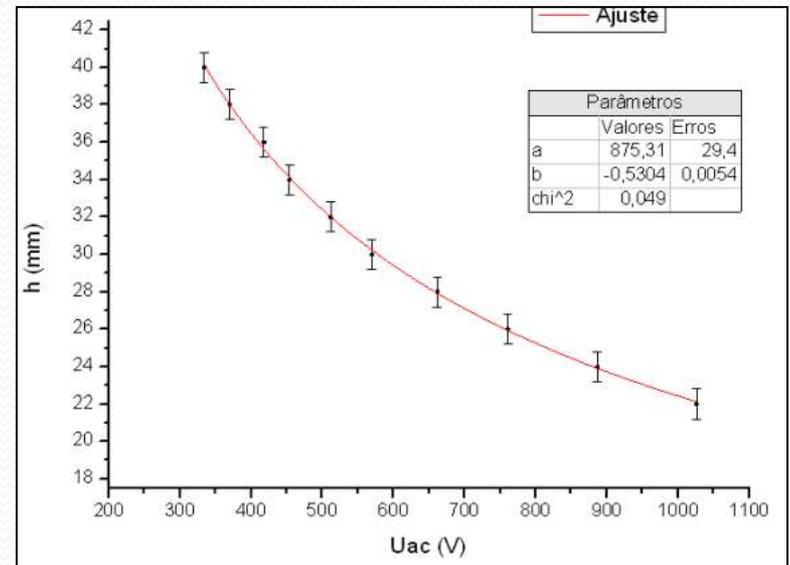
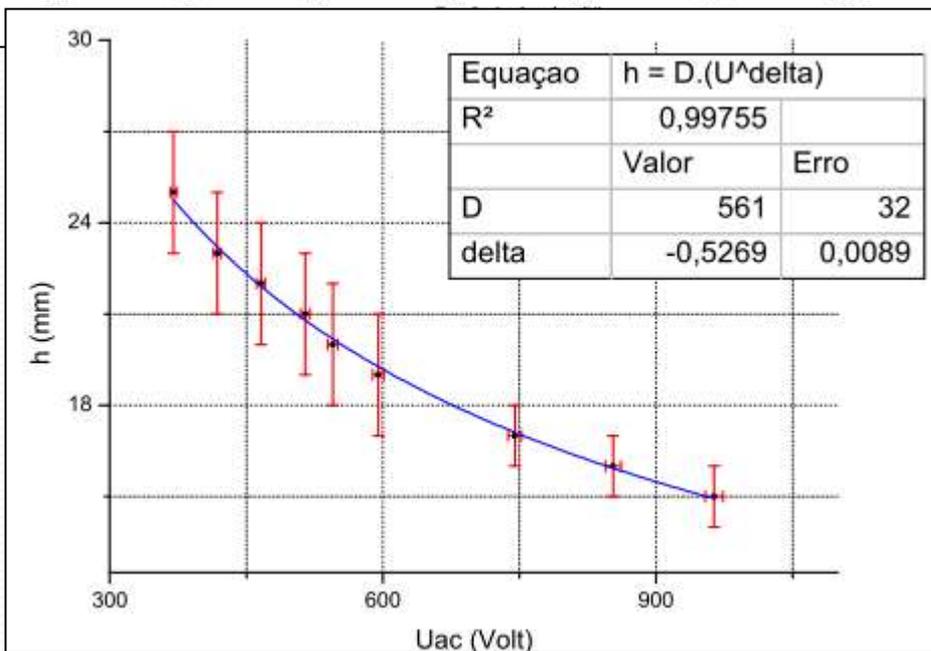
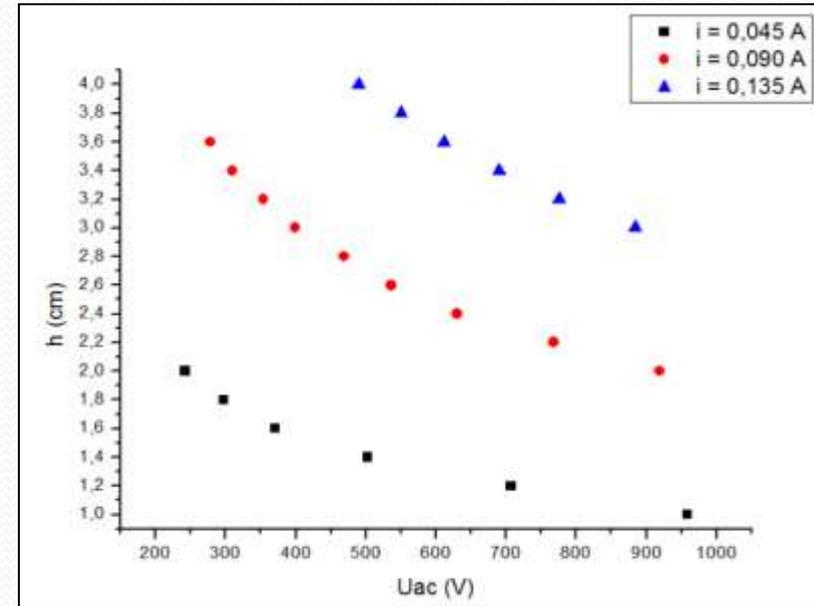
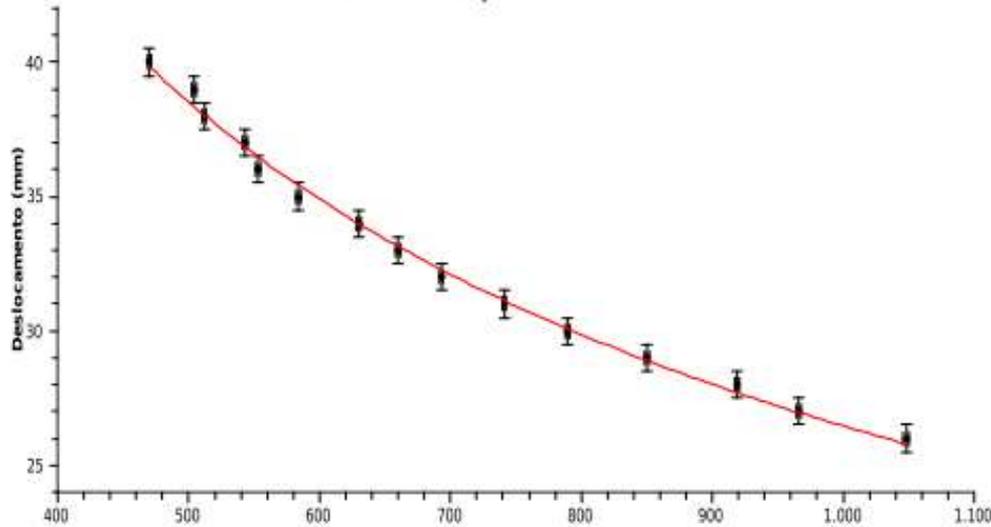
- Medir h em função de U_{ac} para I_B fixo.
- Qual é a dependência funcional? Comece testando uma possibilidade simples:

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

- 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.

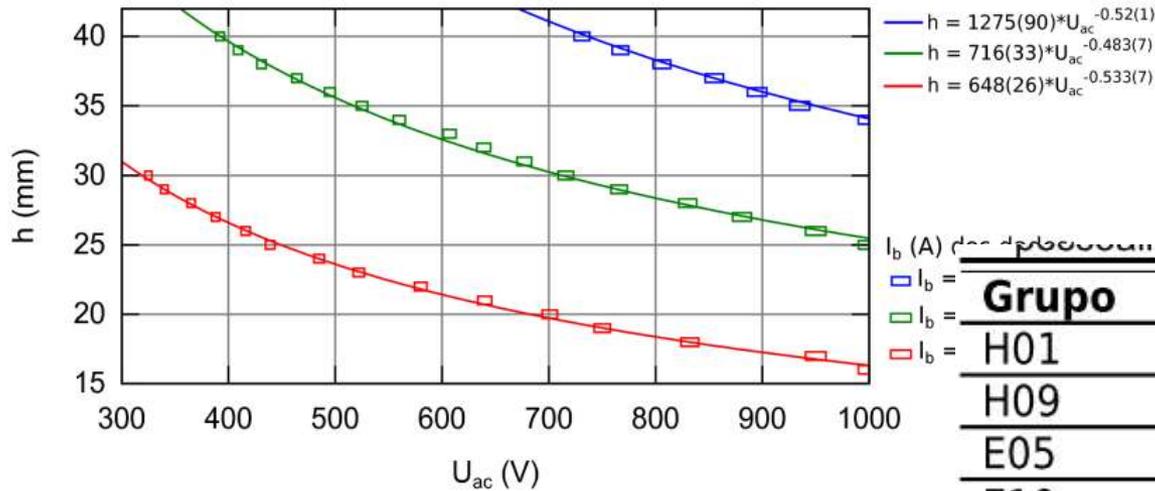
H x Tensão de aceleração

Deslocamento pela Tensão Aceleradora



H02

Deslocamento x U_{ac}



Grupo	Gama	Delta
H01	1.0528(46)	-0.542(9)
H09	1.007(19)	-0.63(3)
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} .

Problema com as medidas – H8

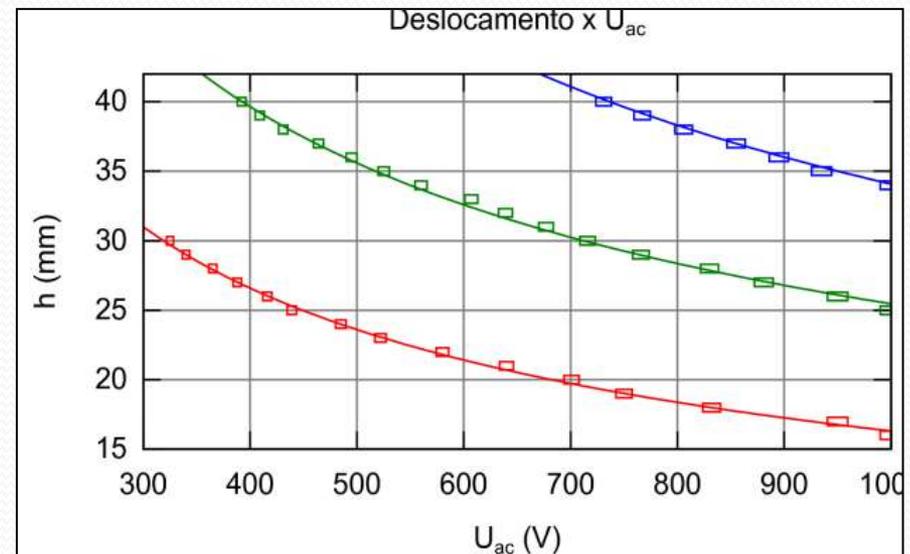
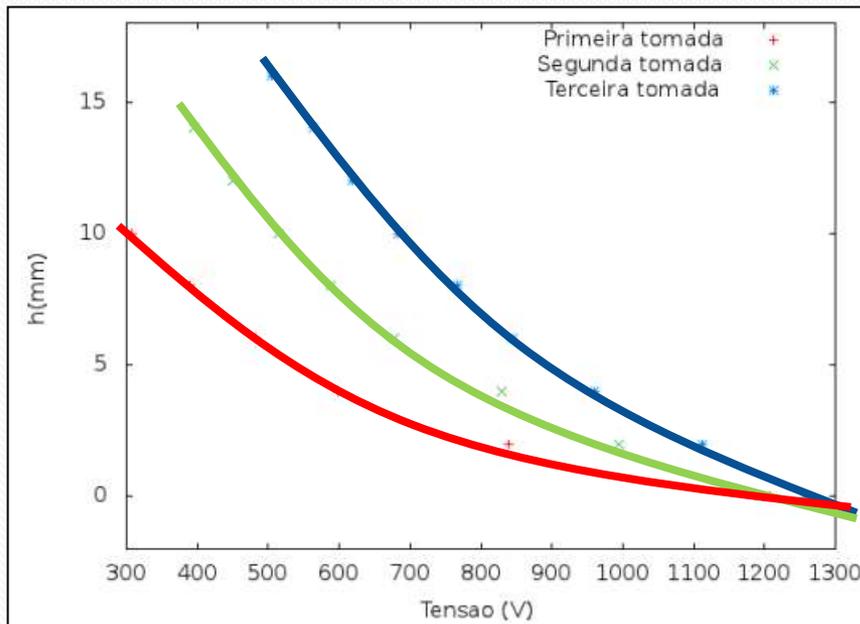
Queremos testar a hipótese de que a relação entre h e o potencial de aceleração U_{ac} seja da forma

$$h = U_{ac}^{\delta},$$

para tensões constantes entre as placas da ordem de 0,516 V, 1,062 V e 1,660 V, respectivamente.

Temos abaixo uma regressão para o valor de 1,660 V, cujo valor correto é 1,660(8) V. Essa foi nossa melhor tomada de medidas, e portanto foi a única para a qual fizemos a regressão; mesmo assim, o valor obtido do coeficiente δ difere muito do obtido pelos nossos colegas. Obtivemos

$$\delta = -2,15(24).$$

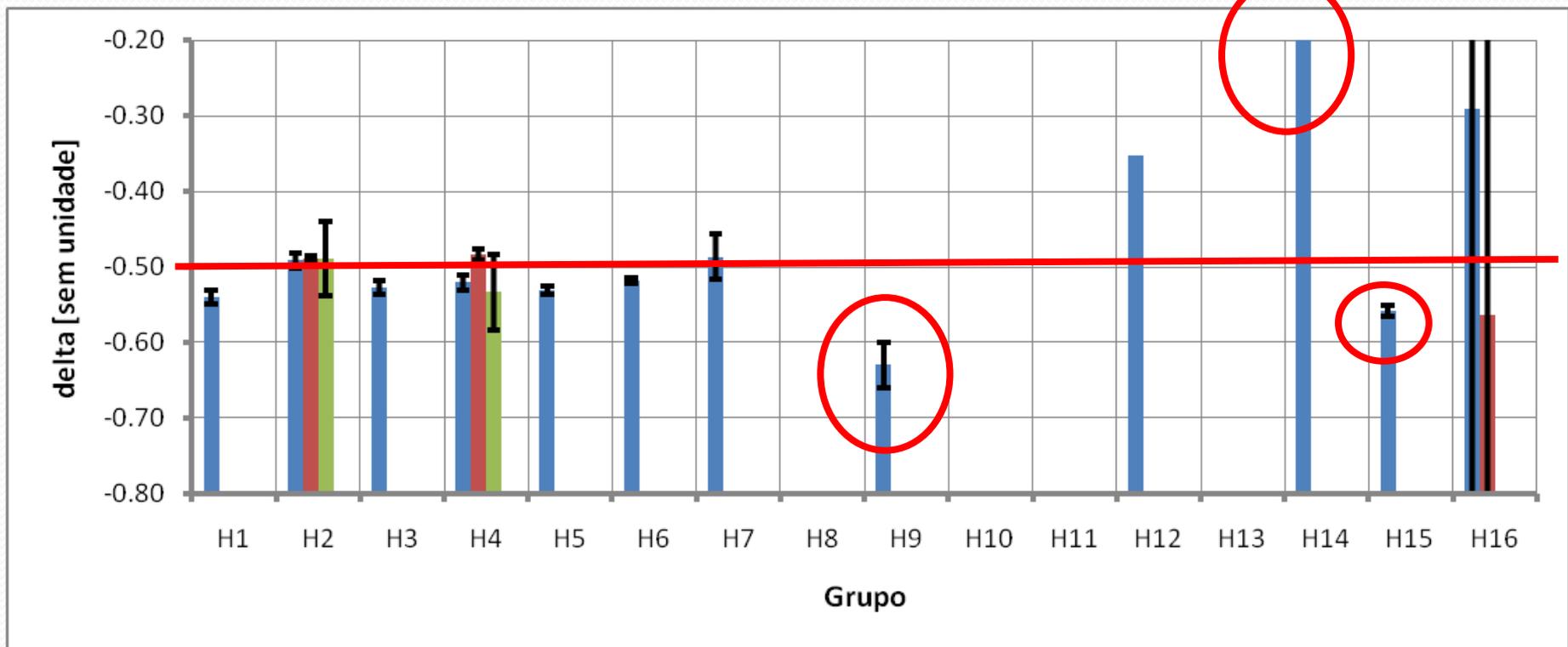


H x velocidade

	δ		δ
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	-0.351867
H5	-0.5304 (54)	H13	--
H6	-0.518 (4)	H14	1.0 ± 10^{-14}
H7	-0.4865 (300)	H15	-0.558 (7)
H8	-2.15 (24)	H16	-0.29111 ± 1.86052 -0.56368 ± 2.49457

H x velocidade

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



Como calcular o erro na corrente?

- Teve um grupo que dividiu as incertezas, usando a fórmula da lei de ohm!

A incerteza da Tensão nas placas σ_U é de 0,5% + 1d, e do resistor de 10 Ω σ_R é de 0,8% + 1d, sendo assim a incerteza da corrente foi calculada segundo a equação 3.

$$\sigma_I = \frac{\sigma_U}{\sigma_R}$$

errado! é preciso fazer a propagação de incerteza!! vocês não podem dividir os dois erros...



- Deviam ter feito a propagação de erros:

$$\sigma_i = \sqrt{\left(\frac{\sigma_U}{R}\right)^2 + \left(\frac{U * \sigma_R}{R^2}\right)^2} \quad (1)$$

$$i = \frac{V}{R} \quad \frac{\sigma_i}{i} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2}$$

Exp. 2 – Seletor de Velocidades

PROGRAMAÇÃO

- Semana 1
 - Movimento em campo elétrico
- Semana 2
 - Movimento em campo magnético
- Semana 3
 - Simular o campo elétrico e mapear o campo elétrico
- Semana 4
 - Calibrar o seletor de velocidades
- Semana 5
 - Obter a resolução do seletor de velocidades

A proposta para hoje

- Campo elétrico de um capacitor
 - Revisão teórica
 - Simulação numérica
 - Uso do programa FEMM
- Campo magnético entre as bobinas
 - Mapeamento com sensor HALL
 - Uso do data studio
- Dicas



1. Revisão Eletricidade

O potencial elétrico

- Definição de potencial: para um deslocamento qualquer $d\mathbf{r}$ na posição, a variação dV no potencial é dada por:

$$dV = -\vec{E} \cdot d\vec{r} = -E dr \cos \theta$$

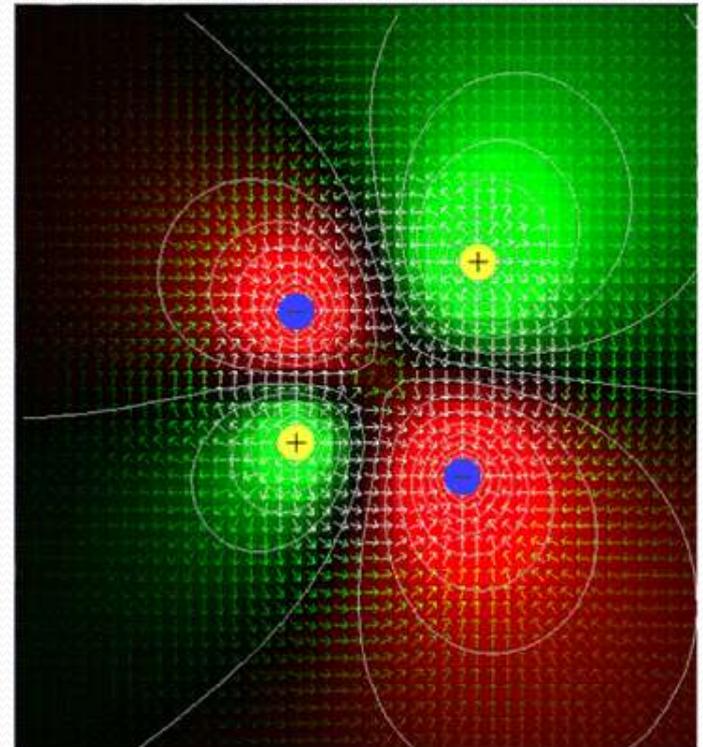
θ é o ângulo entre o vetor campo elétrico \mathbf{E} e o vetor deslocamento $d\mathbf{r}$ na posição

- a máxima variação dV no potencial ocorre quando $d\mathbf{r}$ e \mathbf{E} são paralelos
- quando $d\mathbf{r}$ e \mathbf{E} são perpendiculares entre si, $dV=0$, que significa que \mathbf{E} é perpendicular às superfícies equipotenciais.

Equipotenciais

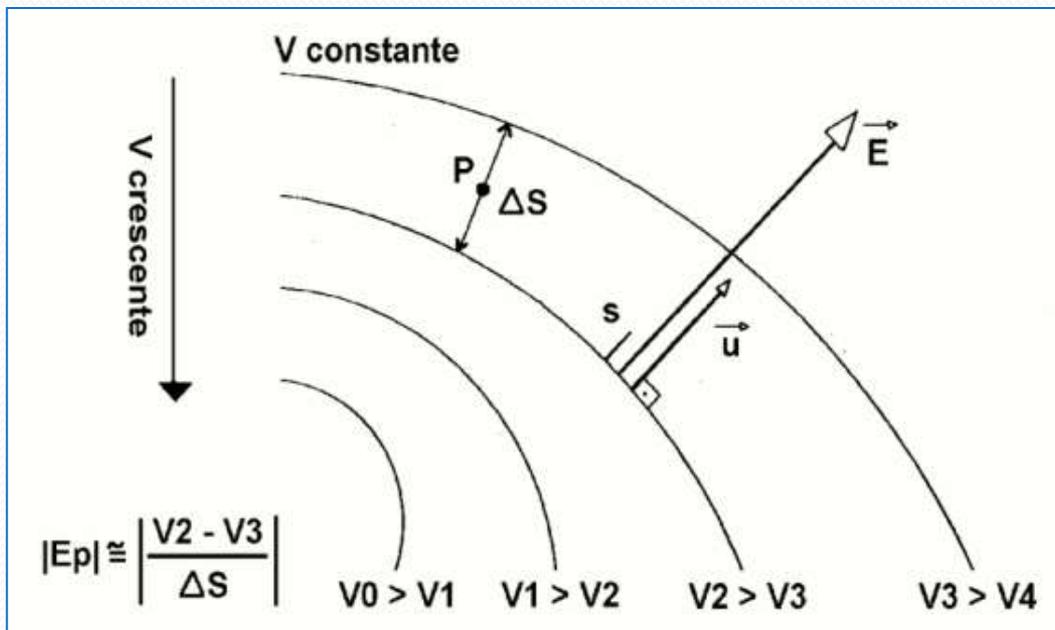
- As superfícies equipotenciais (3D) ou linhas equipotenciais (2D) são aquelas nas quais o potencial V é constante.

Ex.: A configuração é a de um quadrupolo elétrico: as linhas são as equipotenciais



O campo elétrico

- \mathbf{u} é um versor perpendicular à equipotencial e \mathbf{s} é a coordenada na direção do sentido de \mathbf{u} :



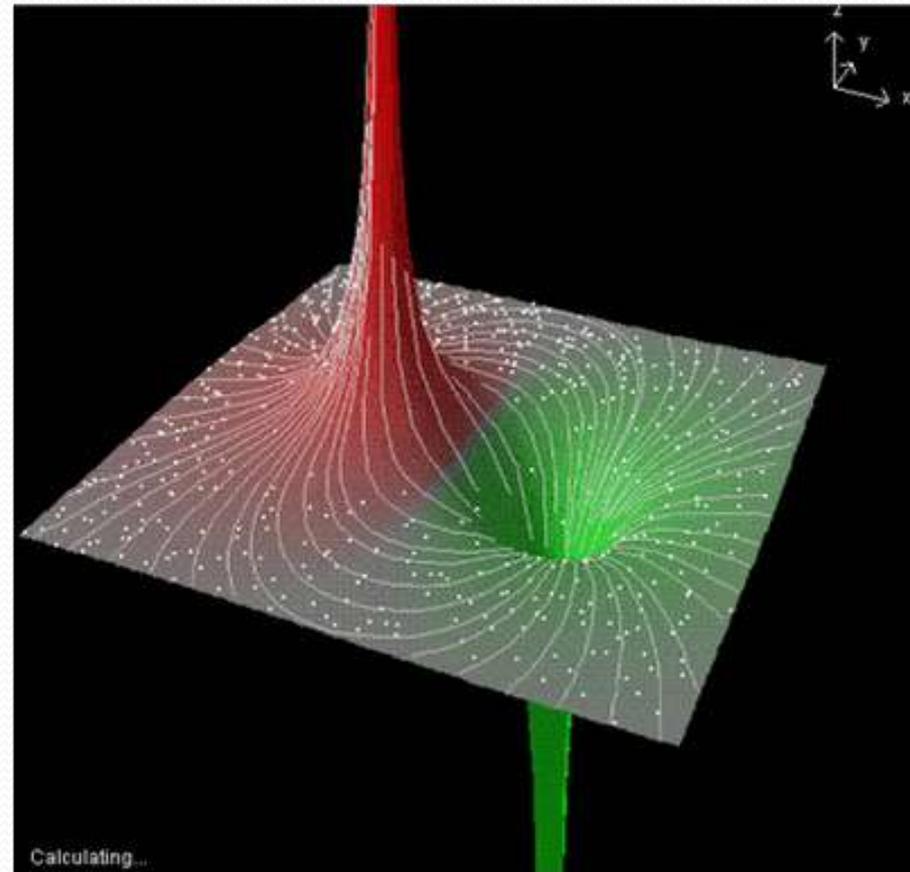
$$dV = -\vec{E} \cdot d\vec{s}$$

$$\vec{E} = -\left(\frac{dV}{ds}\right)\vec{u}$$

$$E \cong -\left(\frac{\Delta V}{\Delta s}\right)$$

Linhas de campo

- As linhas de campo são perpendiculares às equipotenciais.
- Ex.: A configuração é a de um dipolo elétrico, mostrando as linhas de campo tridimensionais.



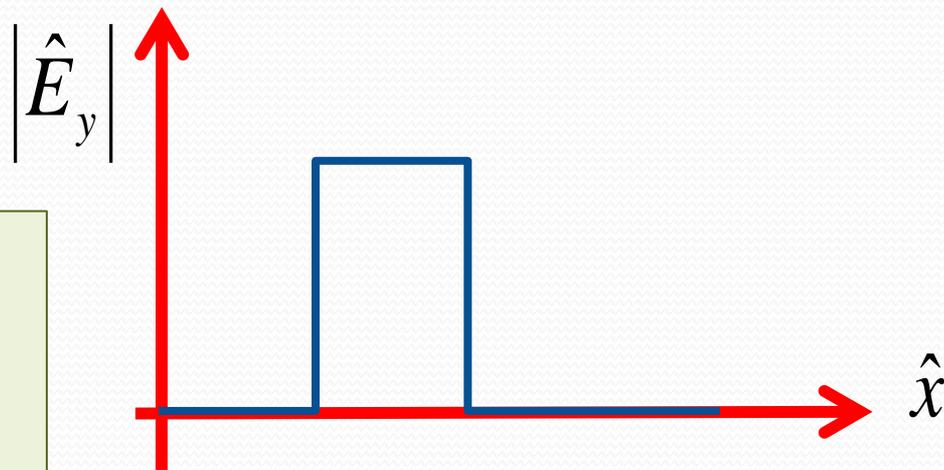
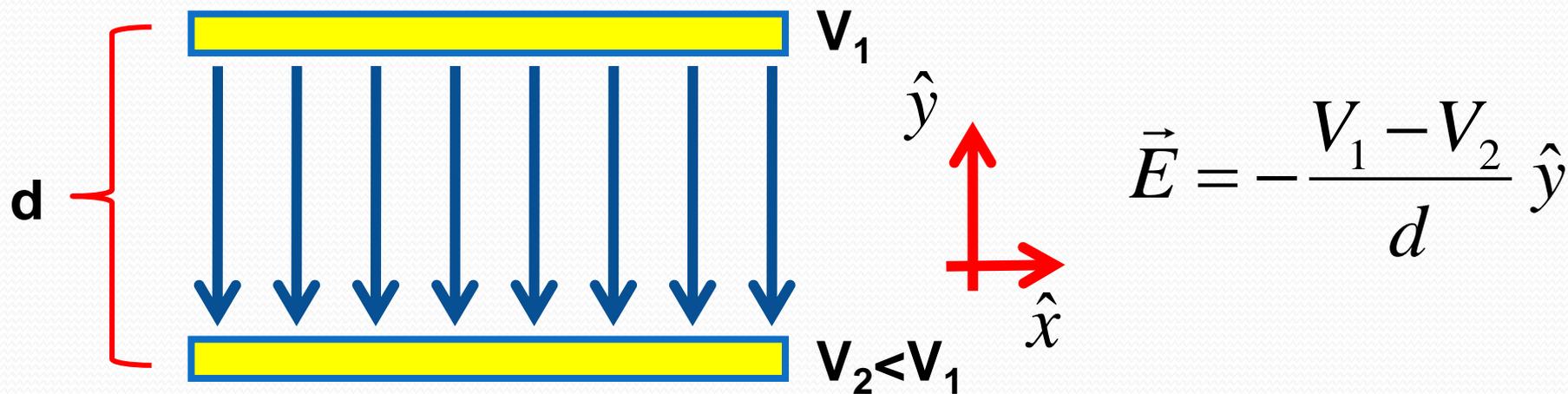
O campo elétrico

- Conhecendo-se a distribuição espacial do potencial pode-se calcular o campo.
 - O potencial nós sabemos medir (voltímetro)!
 - Calculamos o campo com
$$\vec{E} = -\left(\frac{dV}{ds}\right)\vec{u}$$
- Como determinar o potencial?
 - Analiticamente a partir da resolução das equações diferenciais que descrevem a geometria da configuração de cargas
 - Métodos numéricos → simulação computacional
 - Simulação experimental numa cuba eletrolítica bidimensional

Vamos fazer assim!

Capacitor Ideal $\vec{E} = -\vec{\nabla}V$

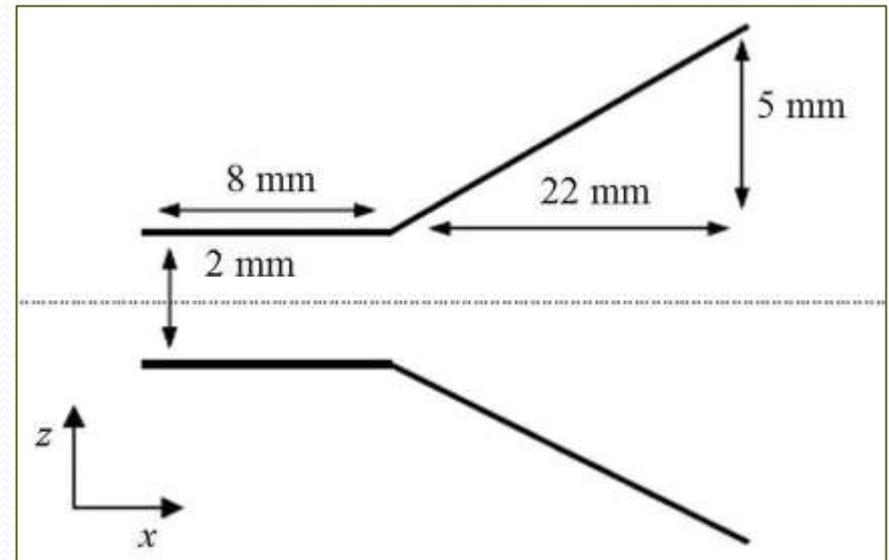
- Como é o campo elétrico de um capacitor ideal?



Campo elétrico uniforme em modulo, direção e sentido, que só existe dentro do capacitor ideal (placas paralelas e infinitas).

Capacitor do TRC

- Continua valendo que: $\vec{E} = -\vec{\nabla}V$



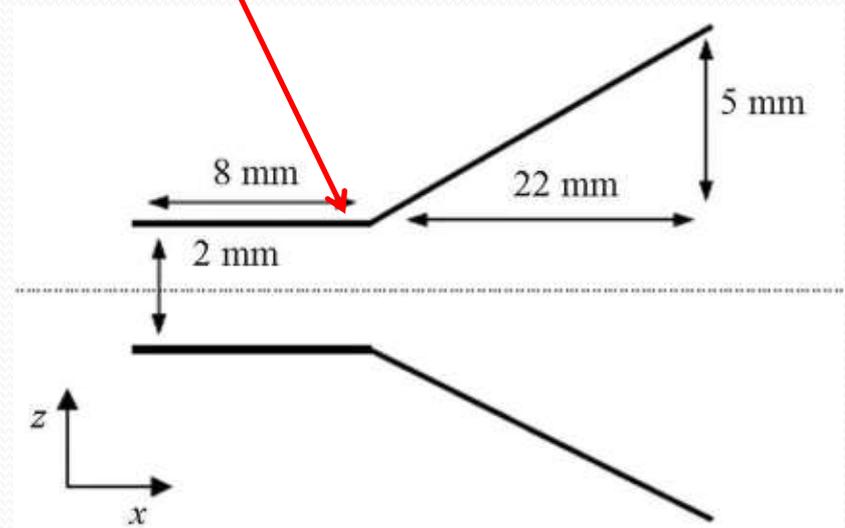
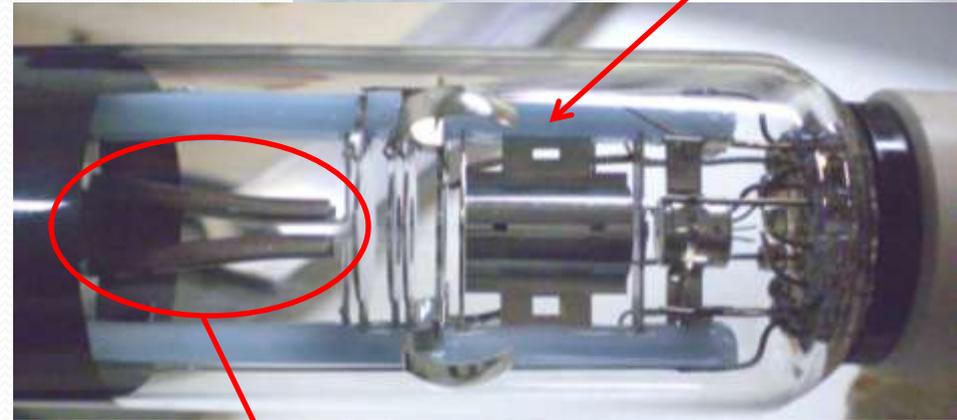
- Mas como calculamos o campo e ou o potencial??



2. Simulação Numérica

Precisamos conhecer o campo elétrico entre as placas

- Com o modelo em escala, vocês vão começar a responder as seguintes questões
- Como é o campo?
- É uniforme?
- Há efeitos de borda?
- Quais são as superfícies equipotenciais?



Comparação teórica

Para determinar o potencial, precisamos resolver as equações do EM

- Lei de Gauss

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \Rightarrow \quad \vec{\nabla} \cdot (-\nabla \cdot V) = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

- Equação de Poisson para o potencial

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$$

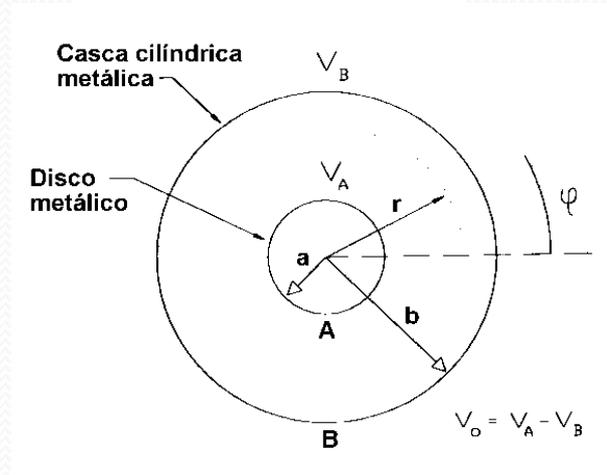
- Na ausência de cargas livres (Equação de Laplace)

$$\nabla^2 V = 0$$

Resolvendo a equação de Laplace

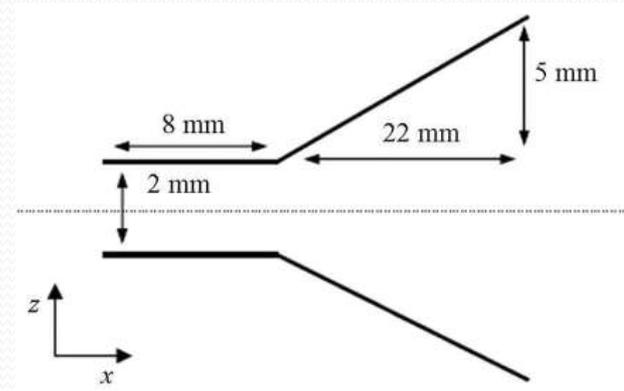
$$\nabla^2 V = 0$$

- Sistemas simétricos
 - Resolução algébrica fácil



$$V(r) = A \ln r + B$$

- Sistemas mais complexos
 - Como resolver?



$$V(x, y) = ?$$

Resolução numérica da equação de Laplace

- Vamos olhar o Laplaciano em duas dimensões:

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2}{\partial x^2} V(x, y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} V(x, y) = 0$$

- Como calcular estas derivadas?
 - Aproximação numérica para derivada

$$\frac{\partial}{\partial x} V(x, y) \approx \frac{\Delta V}{\Delta x} = \frac{V(x + \Delta x/2, y) - V(x - \Delta x/2, y)}{\Delta x}$$

Resolução numérica da equação de Laplace

- Vamos agora calcular a derivada segunda

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2}{\partial x^2} V(x, y) &\approx \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{V(x + \Delta x / 2, y) - V(x - \Delta x / 2, y)}{\Delta x} \right) \\ &\approx \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{\partial}{\partial x} V(x + \Delta x / 2, y) - \frac{\partial}{\partial x} V(x - \Delta x / 2, y) \right)\end{aligned}$$

- Vamos calcular o primeiro termo da expressão acima:

$$\frac{\partial}{\partial x} V(x + \Delta x / 2, y)$$

Resolução numérica da equação de Laplace

- Cálculo do primeiro termo:

$$\frac{\partial}{\partial x} V(\overbrace{x + \Delta x/2}^{x_0}, y) = \frac{V(\overbrace{x + \Delta x/2 + \Delta x/2}^{x_0}, y) - V(\overbrace{x + \Delta x/2 - \Delta x/2}^{x_0}, y)}{\Delta x}$$

- Ou seja:

$$\frac{\partial}{\partial x} V(x + \Delta x/2, y) = \frac{V(x + \Delta x, y) - V(x, y)}{\Delta x}$$

- Do mesmo modo para o segundo termo:

$$\frac{\partial}{\partial x} V(x - \Delta x/2, y) = \frac{V(x, y) - V(x - \Delta x, y)}{\Delta x}$$

Resolução numérica da equação de Laplace

- Assim, as derivadas segunda, em x e y, valem:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} V(x, y) = \frac{V(x + \Delta x, y) - 2V(x, y) + V(x - \Delta x, y)}{\Delta x^2}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} V(x, y) = \frac{V(x, y + \Delta y) - 2V(x, y) + V(x, y - \Delta y)}{\Delta y^2}$$

- Se escolhermos $\Delta x = \Delta y = \Delta$ pode-se resolver a equação de Laplace facilmente

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} V(x, y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} V(x, y) = 0$$

Resolução numérica da equação de Laplace

- Substituindo as derivadas calculadas e fazendo $\Delta x = \Delta y = \Delta$ a equação de Laplace fica:

$$\frac{V(x + \Delta, y) + V(x - \Delta, y) - 4V(x, y) + V(x, y + \Delta) + V(x, y - \Delta)}{\Delta^2} = 0$$

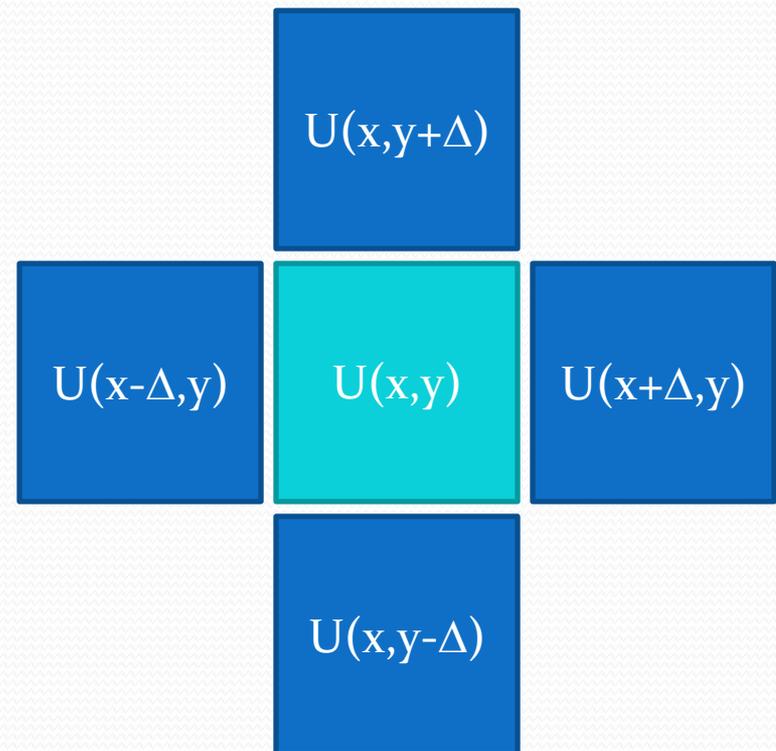
- Isolando o termo $V(x, y)$, encontramos:

$$V(x, y) = \frac{V(x + \Delta, y) + V(x - \Delta, y) + V(x, y + \Delta) + V(x, y - \Delta)}{4}$$

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!!!!

$$V(x,y) = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} V(x+\Delta, y) + \\ V(x-\Delta, y) + \\ V(x, y+\Delta) + \\ V(x, y-\Delta) \end{pmatrix}$$



Criando um

de Trabalho	Mos
✓ f_x	=0,25*(E26+F2+E3+D2)

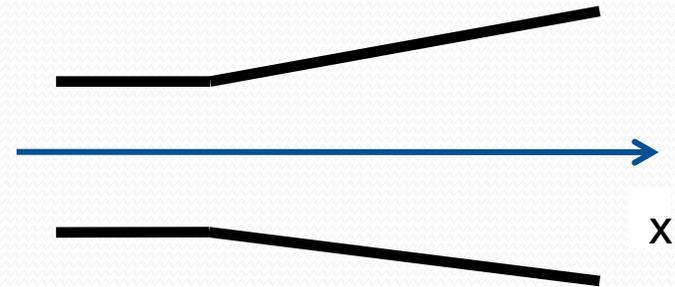
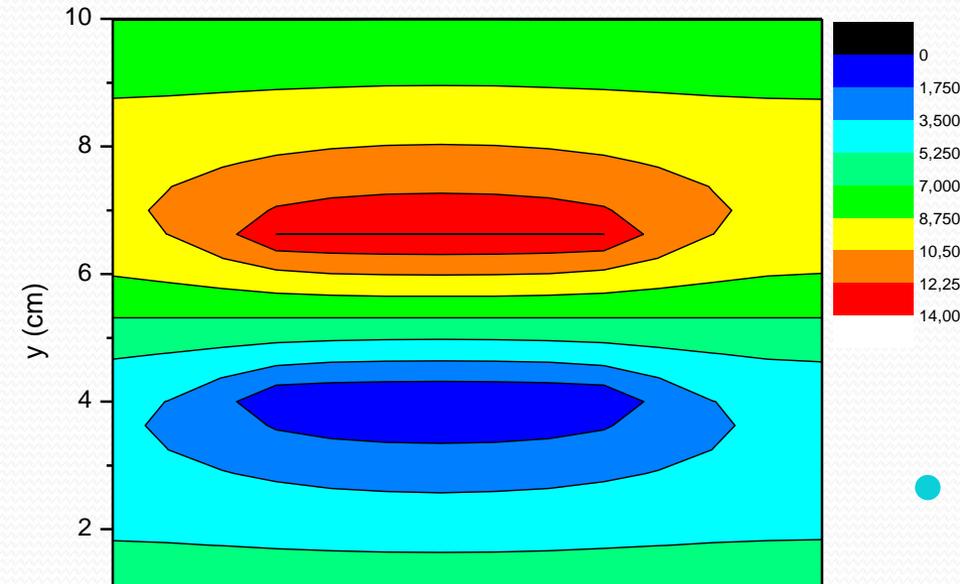
Alinhamento
 (I13+J14+I15+H14)

	D	E	F
02	6,386184	=0,25*(E26+F2+E3+D2)	6,354573
91	5,809742	5,770682	5,736701
31	5,237632	5,168216	5,108773
97	4,671778	4,557722	4,460411

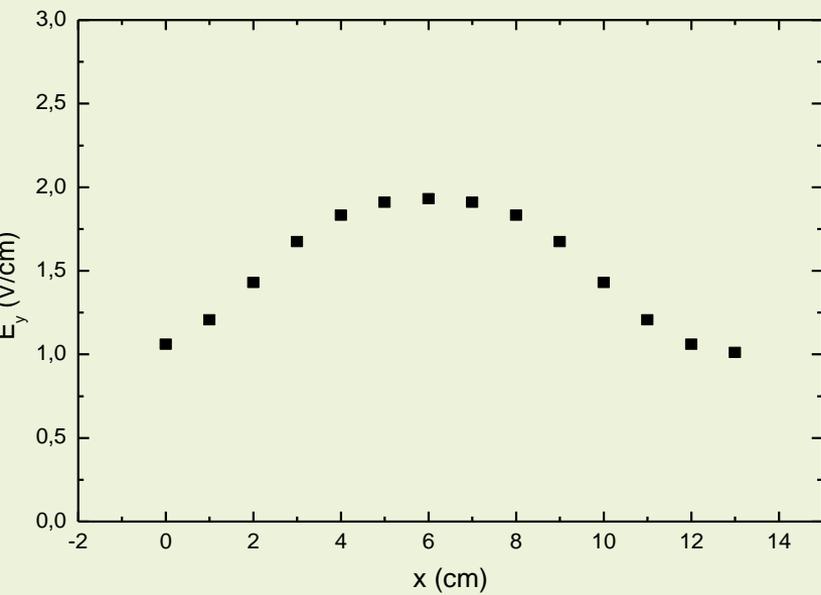
- Definir o tamanho da célula equivalente (Amarelo para diferenciar)
- Definir as condições de contorno
 - Amarelo para diferenciar
- Programar as equações nas células
- Estabelecer bordas cíclicas para simular o infinito
- Mandar calcular (F9) até convergir.

The screenshot shows a grid of numerical data in Excel. A yellow highlighted area is visible in the top right. Red arrows point from the top-left table to specific cells in the Excel grid, indicating the mapping of the formula and data. The grid contains values such as 4,080311, 4,10847, 4,212754, 6,03426, 7,965734, 8,775445, 8,837, 9,919689, 11,93112, 6,967447, and 6,968.

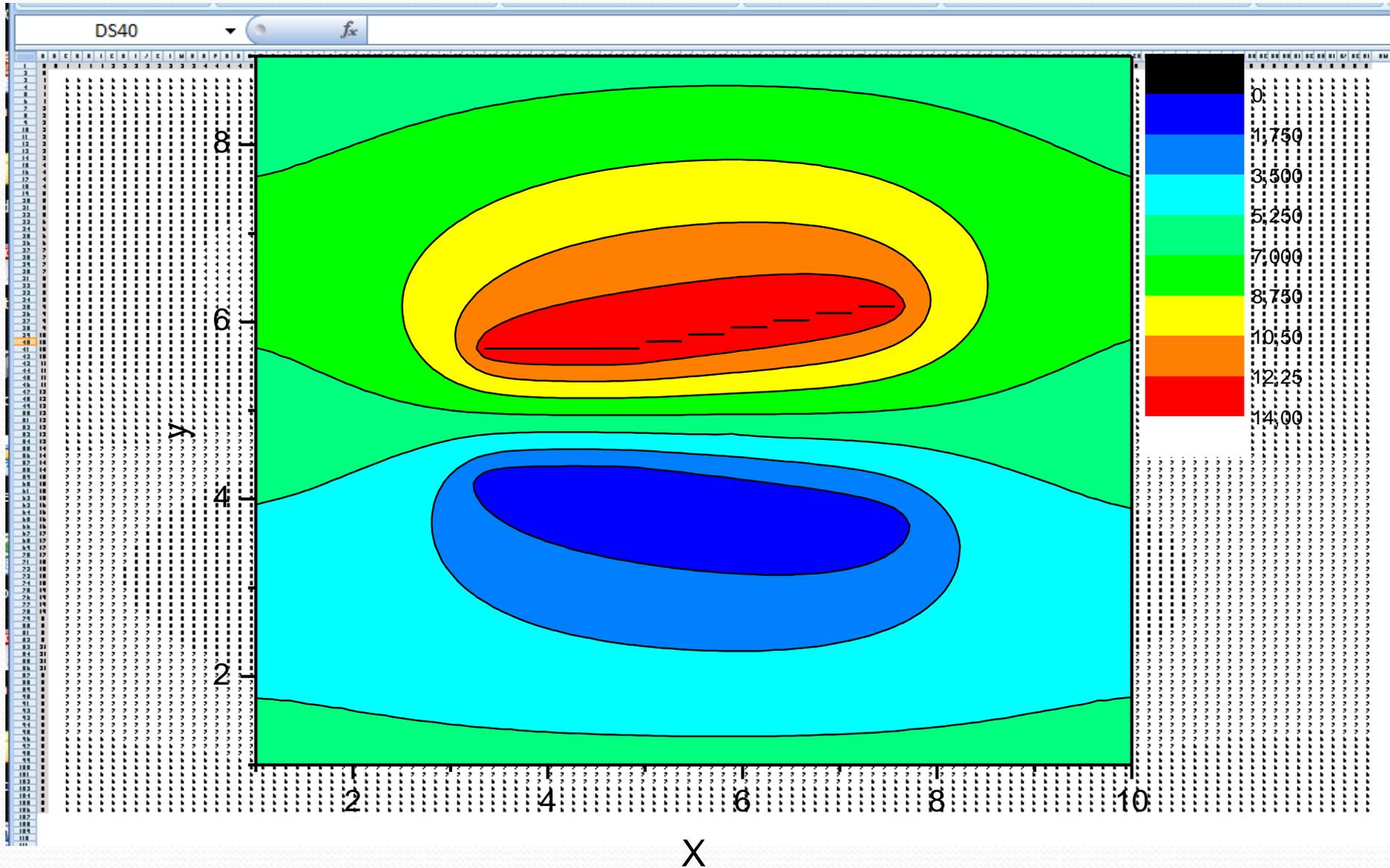
Criando um Excel para calcular o Laplaciano



- O problema é simétrico em torno do eixo x... Porque o potencial não é simétrico?
- O Potencial é definido a menos de uma constante, i.e., a grandeza física é o campo elétrico



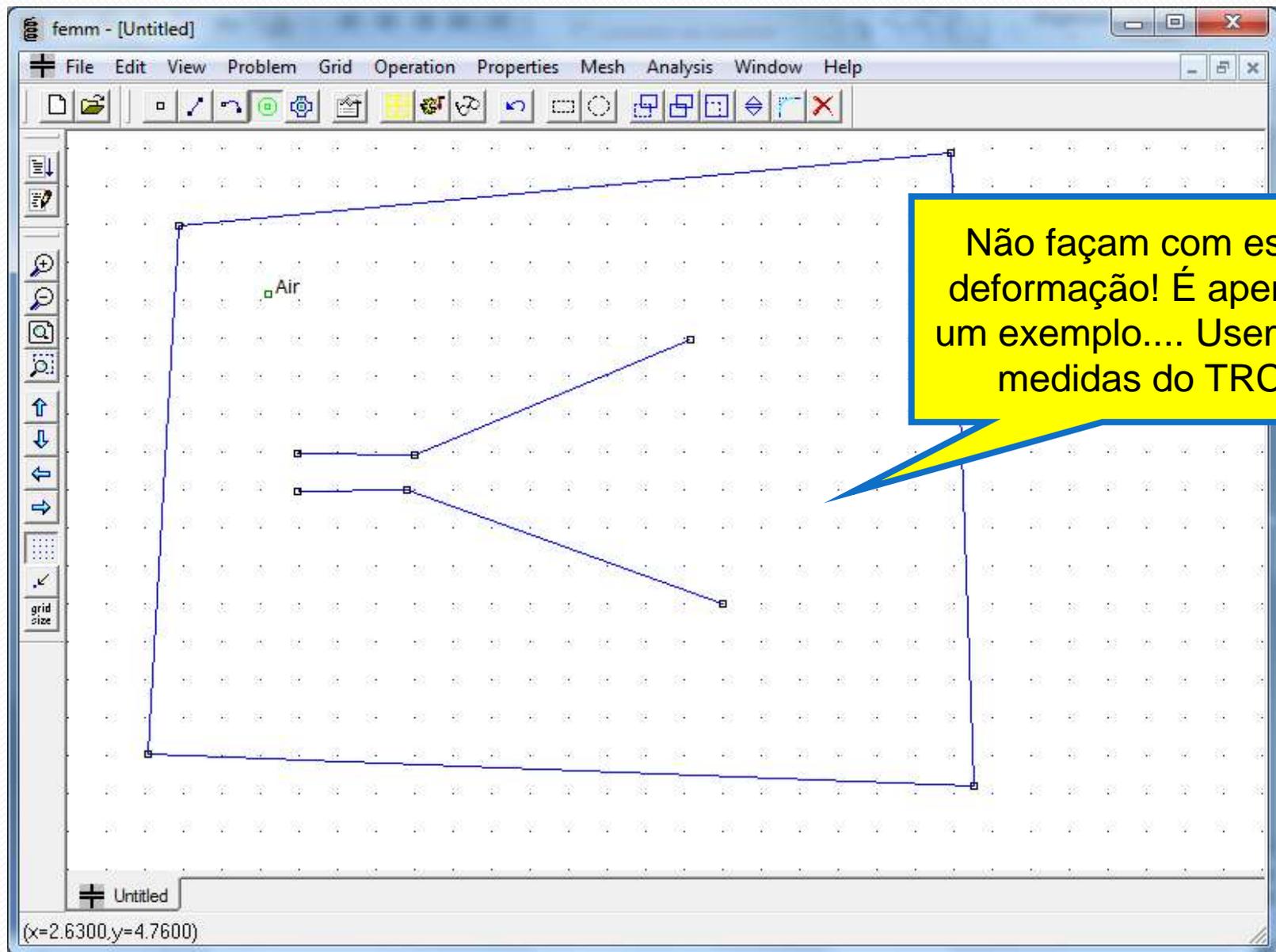
Um exemplo com uma malha grande





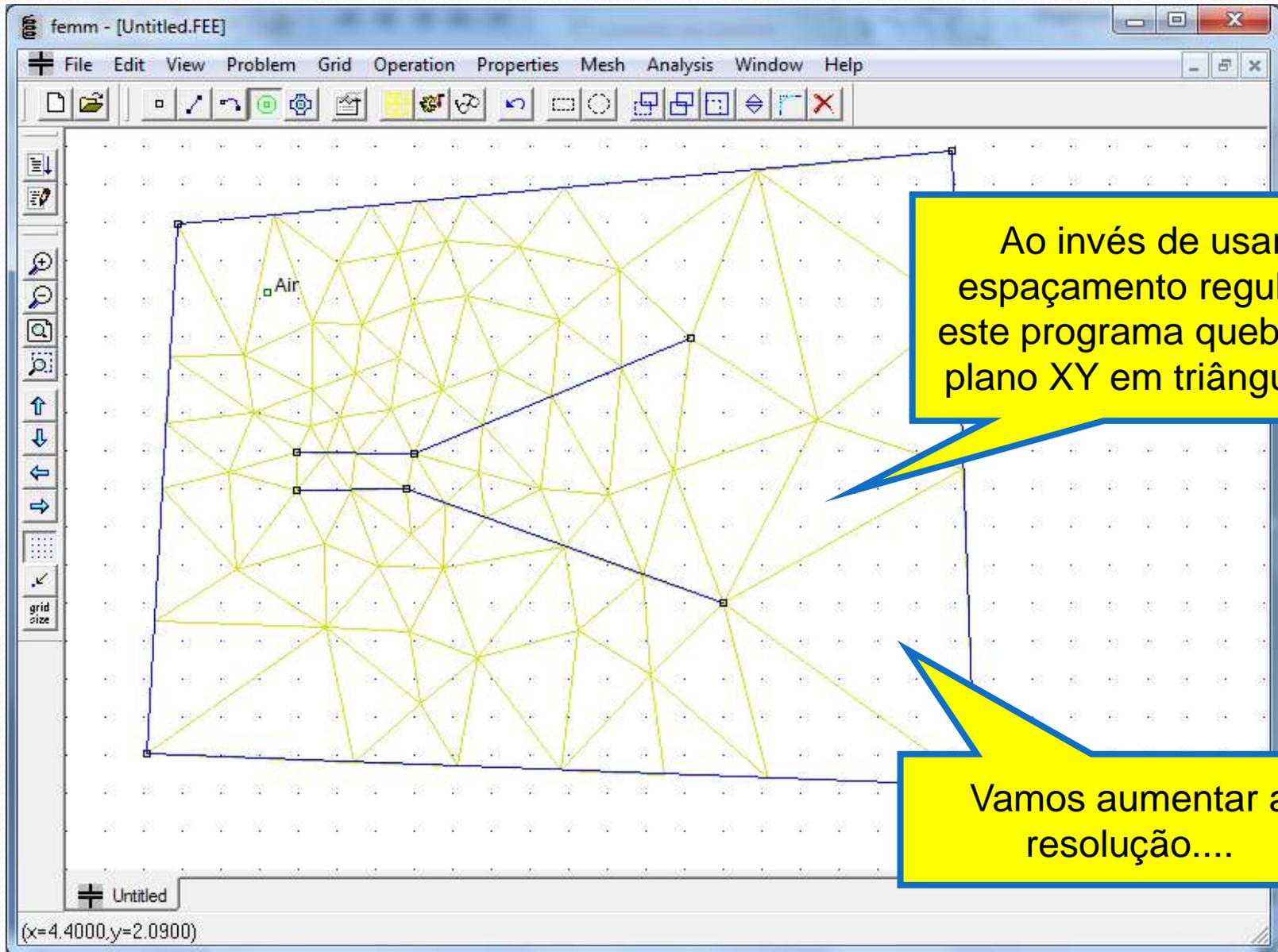
3. Uso do programa FEMM

Primeiro definimos o problema



Não façam com esta deformação! É apenas um exemplo... Usem as medidas do TRC

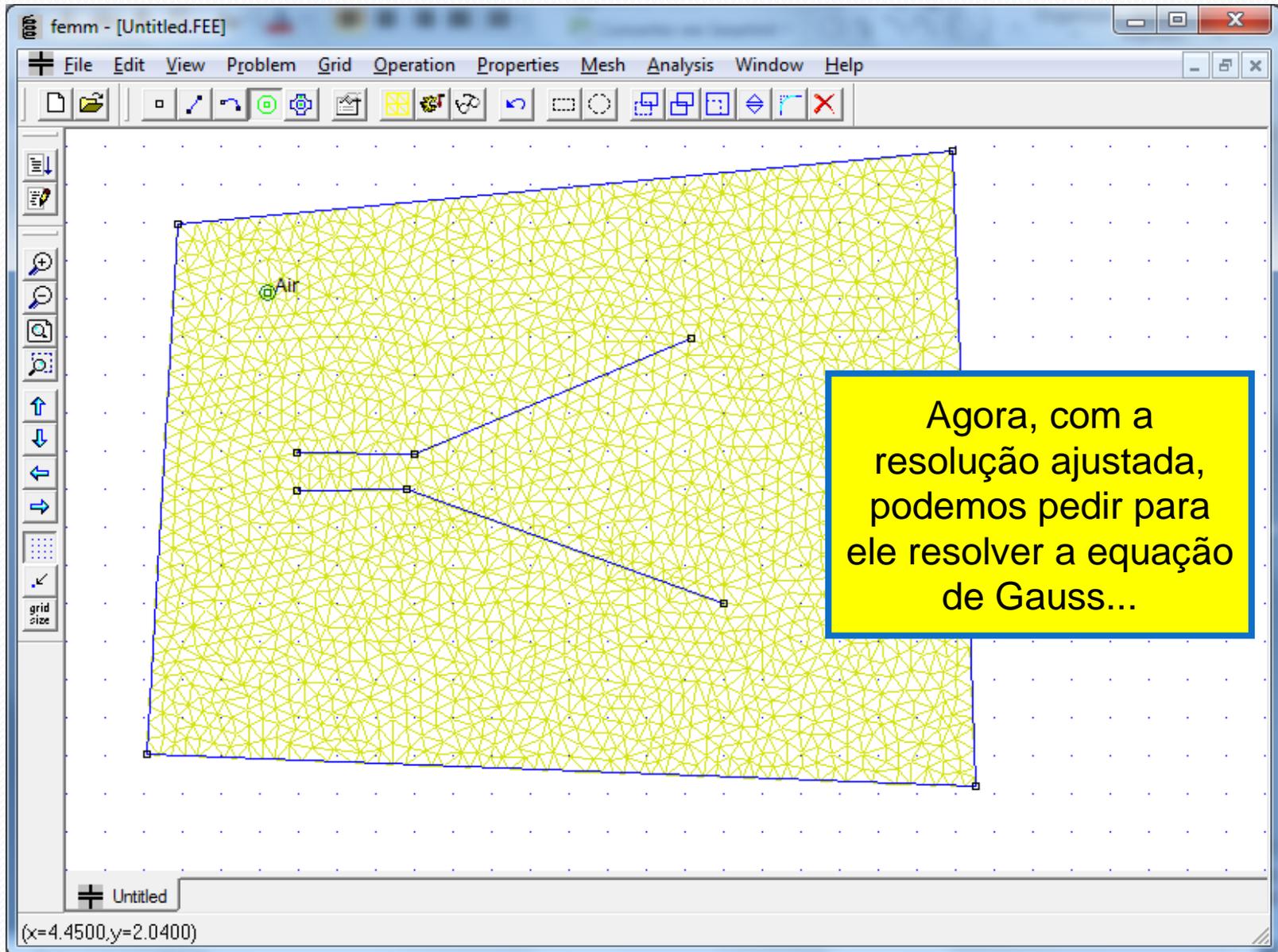
Criamos a malha



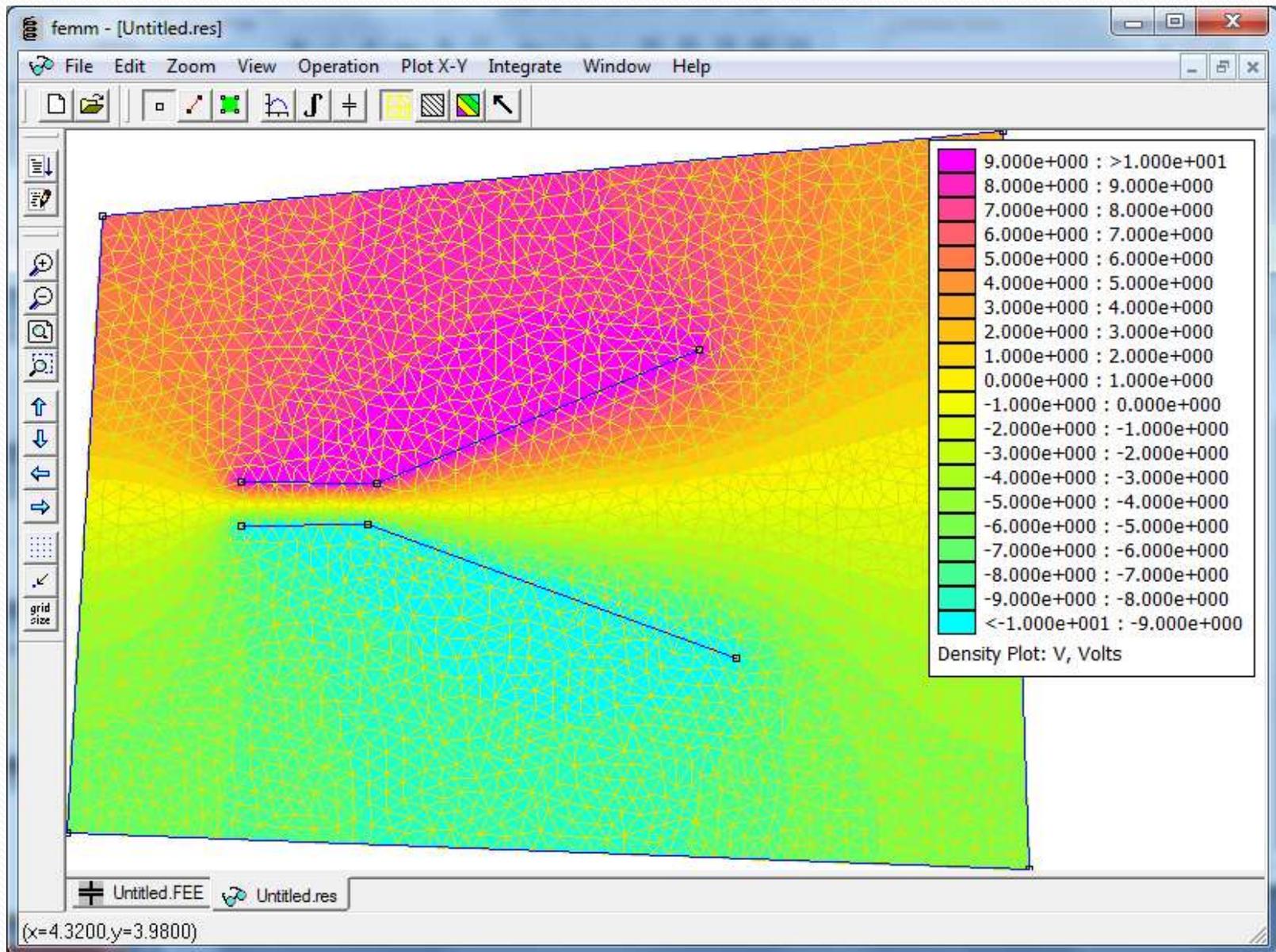
Ao invés de usar espaçamento regular, este programa quebra o plano XY em triângulos

Vamos aumentar a resolução....

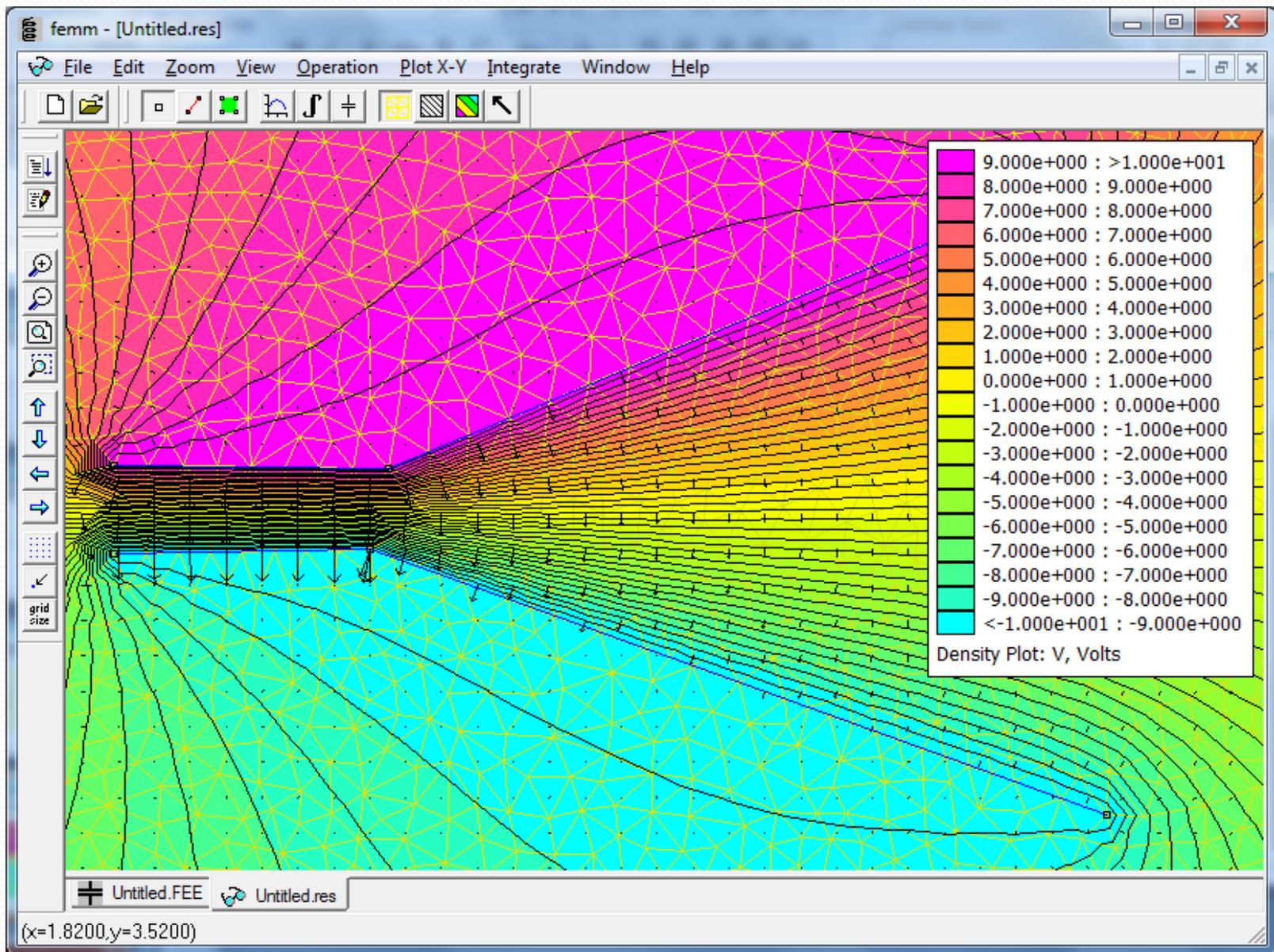
Agora sim...



Mapa do potencial elétrico



Equipotenciais e Vetor Campo E.



Henrique Barbosa

[Home](#) | [View](#) | [Print](#)

- Pesquisa
- Linhas de Pesquisa
- Lista de Publicações
- Projetos de Pesquisa
- Bolsistas
- Oportunidades
- Ensino
- Disciplinas
- Tutoriais**
- Outros
- Ubuntu
- Contato
- Pessoal
- Secretaria

Tutoriais

Filed in: Site.Tutoriais - Modified on : Mon, 15 Aug 11

Modelo de Síntese (curta) (2011)

Como preparar uma síntese? Siga o modelo abaixo:

- [modelo_sintese2011.doc](#) <-- em formato word 97-2003
- [modelo_sintese2011.pdf](#) <-- em formato pdf

Outros Software

- FEMM
 - [Apresentação PPT sobre campos elétricos - Versão 1 \(26 de outubro 2010\)](#)
 - [Tutorial para campos elétricos - Versão 1 \(26 de outubro 2010\)](#)
 - [Tutorial para campos magnéticos - Versão 2 \(7 de outubro 2009\)](#)
 - [Script "lua" para exportar os dados de um mapa 2D do FEMM para um arquivo texto. - Versão 1.1 \(23/out\)](#)
- RayTrace
 - [Planos principais](#) - Como desenhar a posição do plano principal e medir h automaticamente.

Planilhas

- [fitpoly.ods](#) Planilha do OpenOffice para ajustar um polinômio de qualquer grau a um conjunto de dados.

1,512 Visitors
6 Nov 2010 - 16 Aug 2011

ClustrMaps® Click

Visitantes: 00888
Desde 29 Out 200

Tarefas da Semana – Parte 1

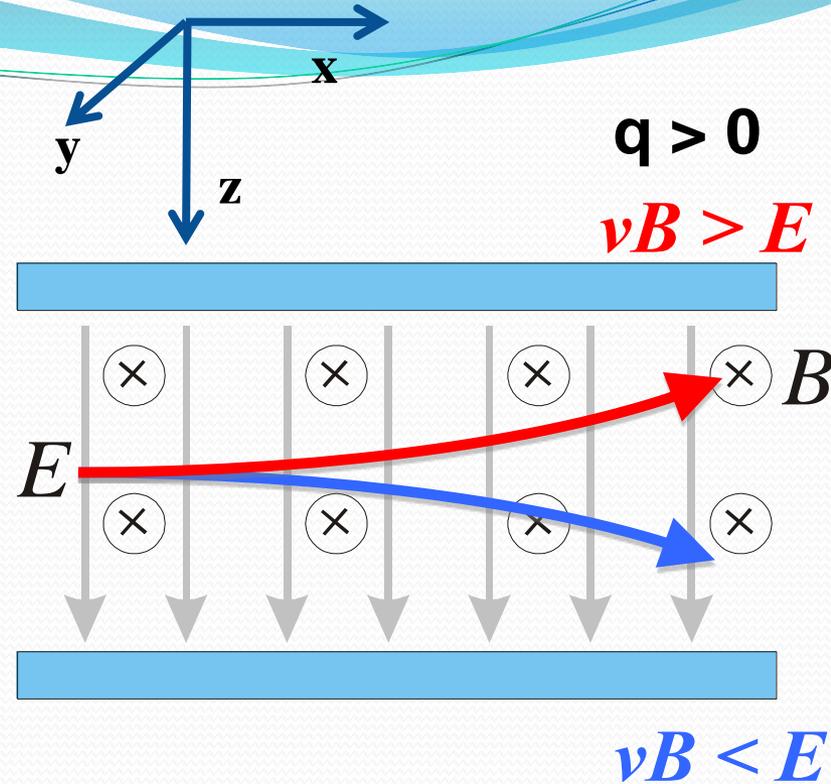
- Simule, em escala o campo elétrico das placas do TRC.
 - As medidas estão no site e o tutorial também!
 - Os monitores e professores podem ajudá-lo
- Entregue o gráfico do campo elétrico, em função da distância à origem (você define).
 - Ao longo da linha que o feixe percorre, que é o que interessa
 - Entregar os gráficos com a simulação, colocando E_x e E_y no mesmo gráfico, e indicando a posição das placas.
- A partir dos seus resultados:
 - O campo elétrico é uniforme? Há efeitos de borda?



4. Mapeamento do campo magnético

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:

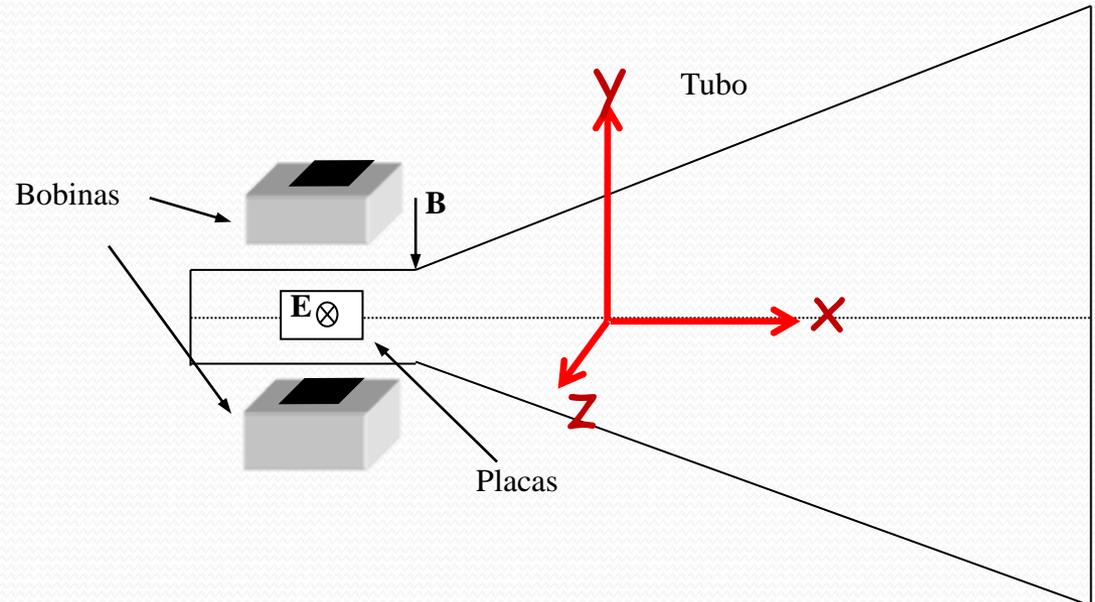
$$\vec{B} = \beta(\vec{r})i$$

β pode ser uma constante ou uma função da posição, isso precisa ser verificado experimentalmente

Como é o campo entre as bobinas

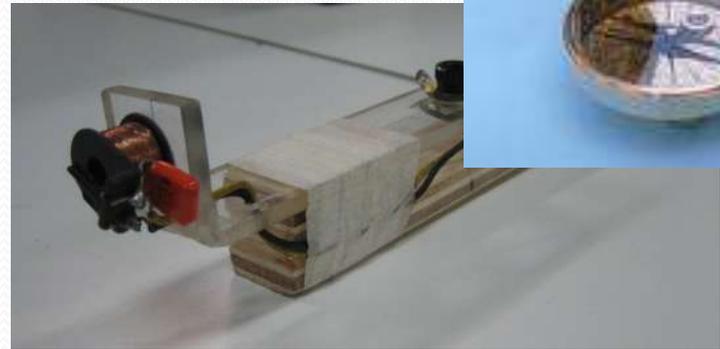
- Bobinas ideais: $\mathbf{B} = -\nabla\phi$
- Bobina ideal existe?
- Então vamos medir as componentes (B_x , B_y , B_z) do campo magnético na região entre as bobinas: ao longo dos eixos x , y e z .
- Isso é suficiente?

Como medir o campo magnético
??



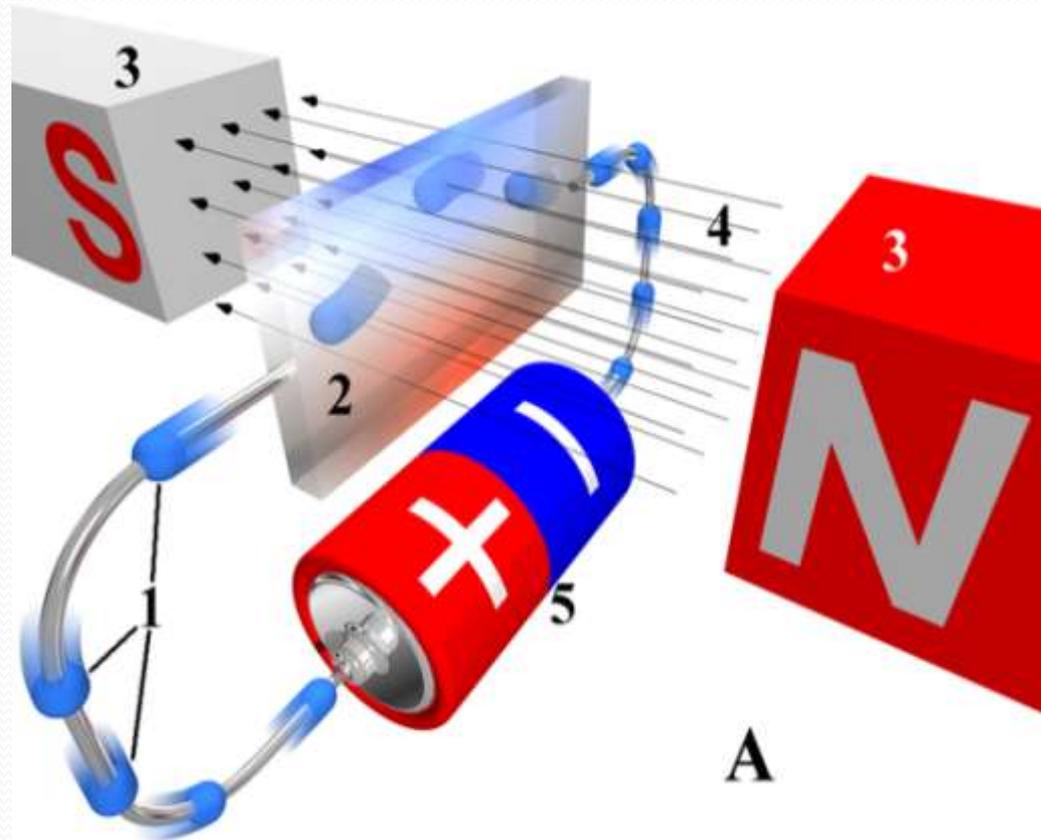
Como medir campos magnéticos?

- 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



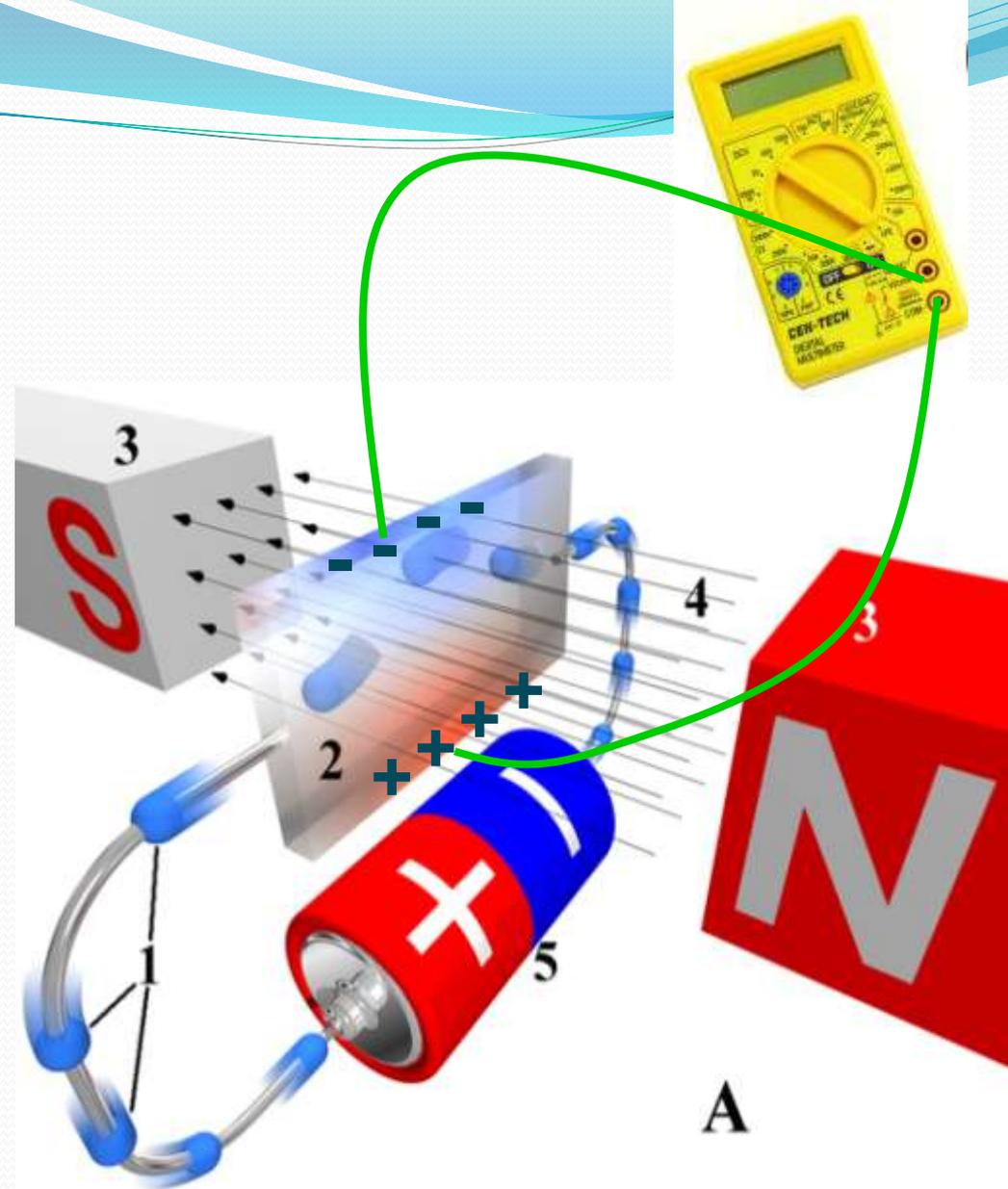
O efeito Hall

- 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.



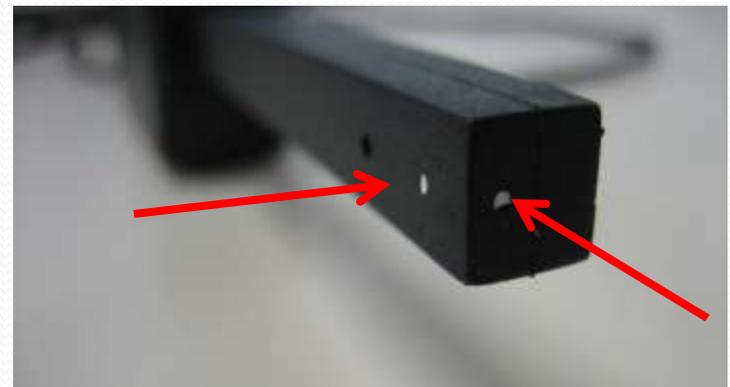
O efeito Hall

- 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



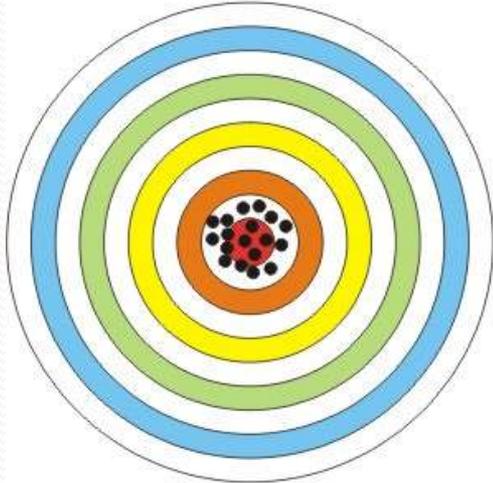
Table 1
Magnetic Sensor Specification Chart

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

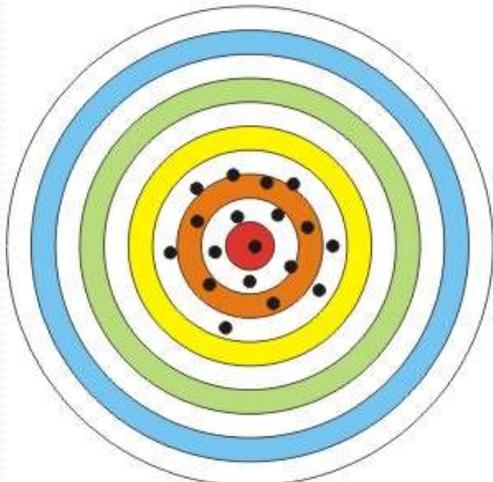
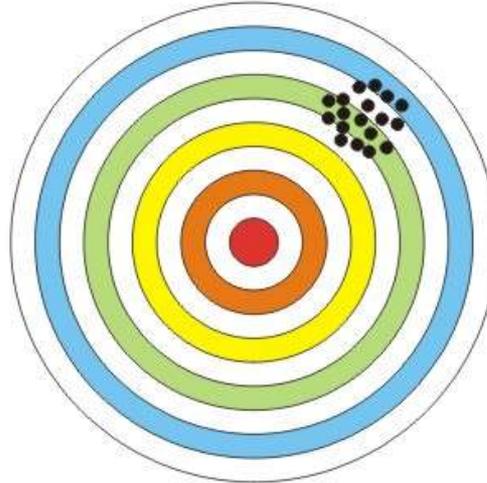
Note: The Hall Effect sensing elements used in the CI-6520A are temperature compensated. However when measuring very low magnetic field levels (± 10 gauss scale) some temperature dependent variation may be observed in the output. It is on the order of a few gauss. For the best results when using the 100X (± 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

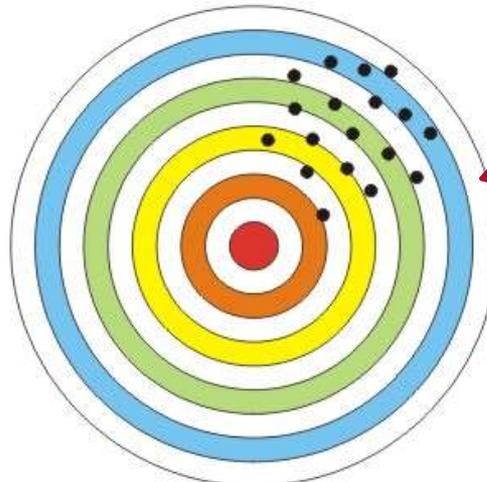
Alta acurácia
Alta precisão



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

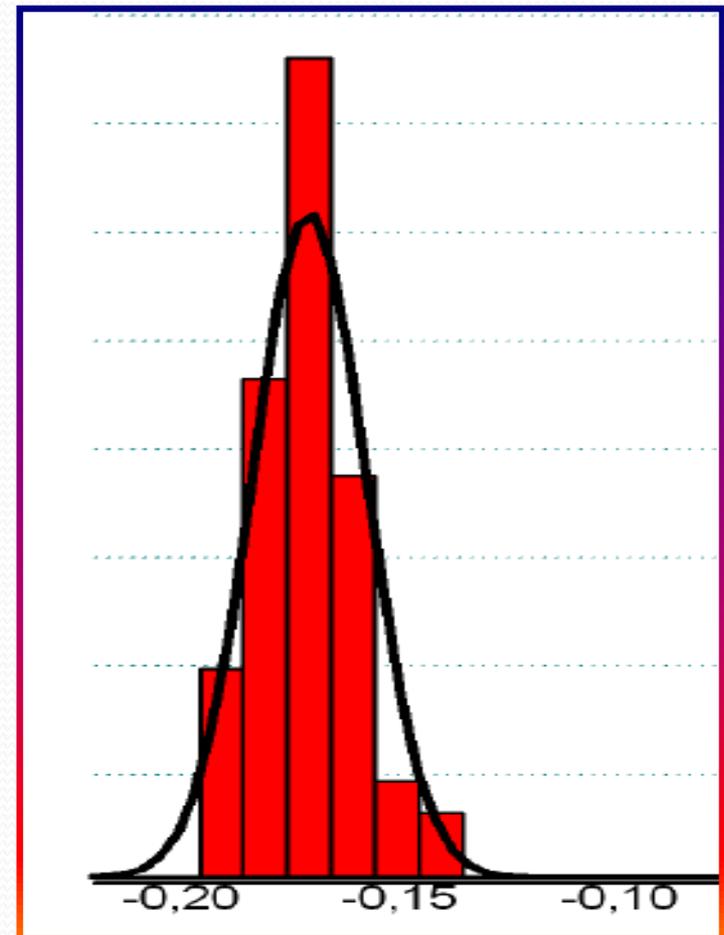
- Como minimizar problemas de acurácia
 - Eu não sei onde está o zero. O que fazer?
 - Calibrar o sensor com a câmara de zero Gauss
 - Ou simplesmente usar o Tare do sensor.
- Mesmo assim a estabilidade é um problema sério do sensor Hall na escala mais sensível (X100)



Medida do campo das bobinas

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

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

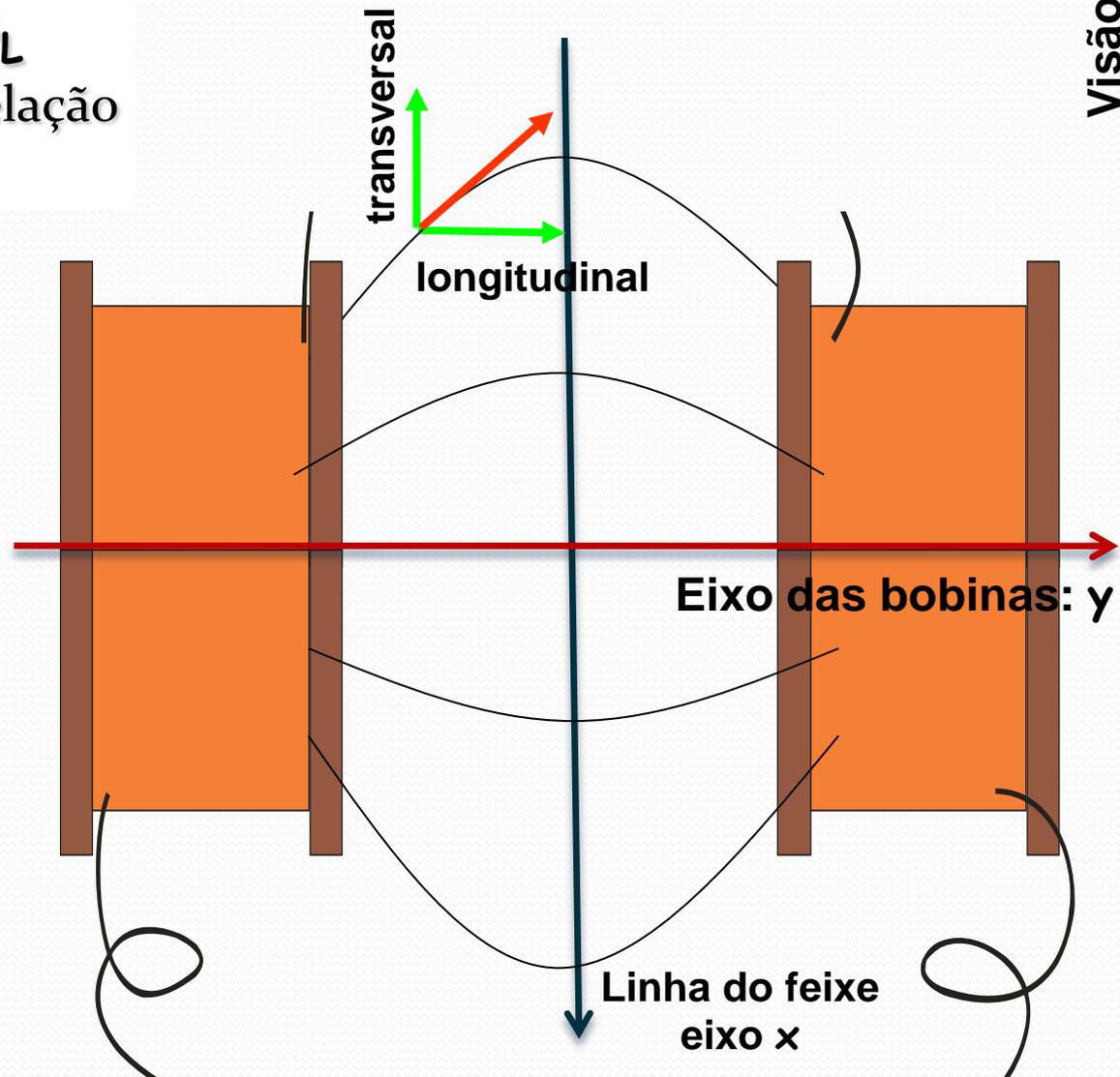


Medida do campo das bobinas

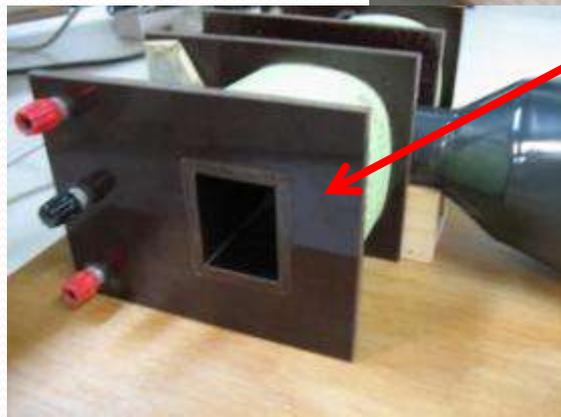
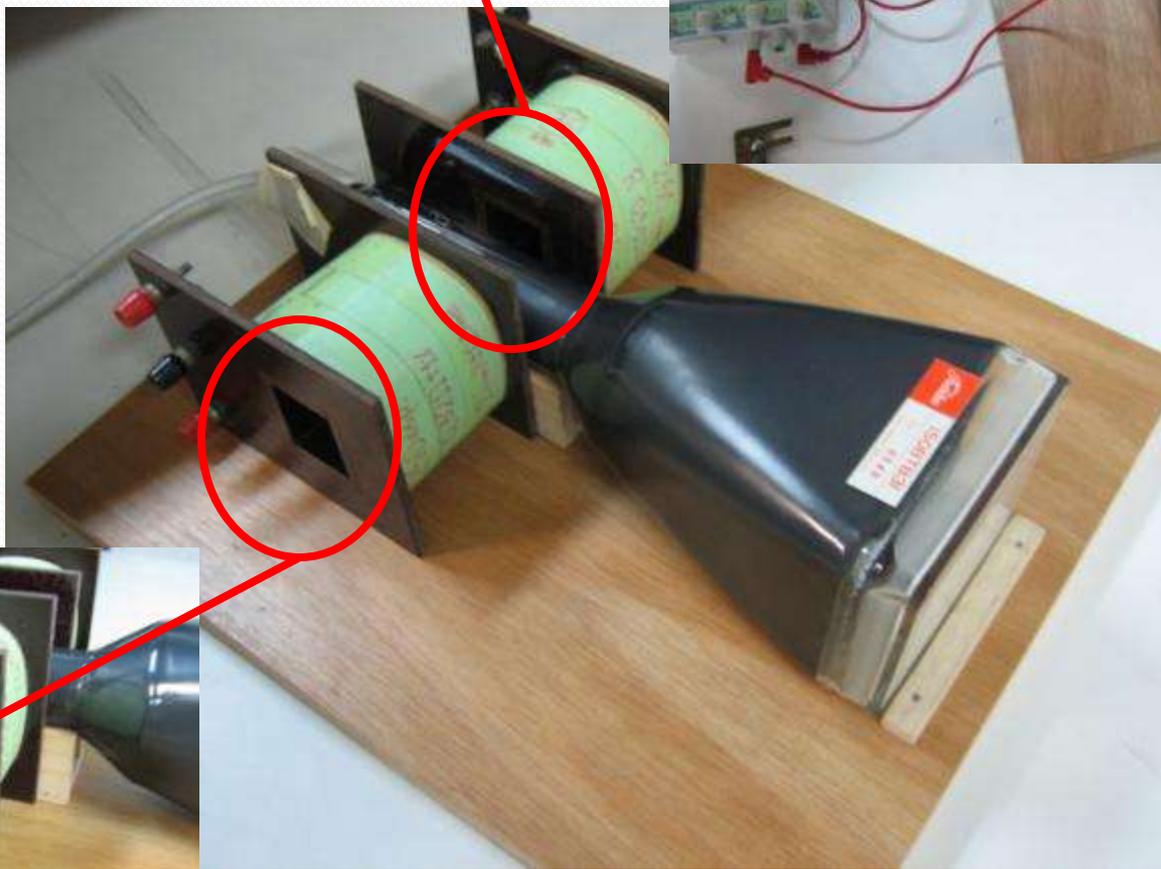
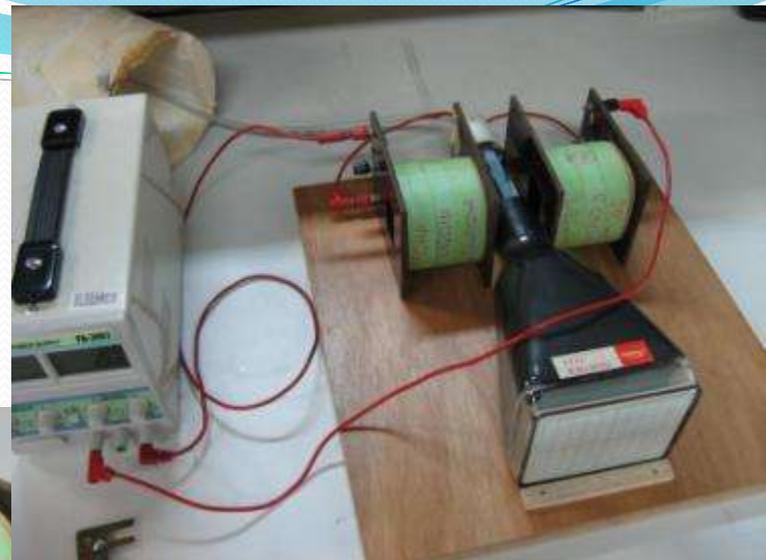
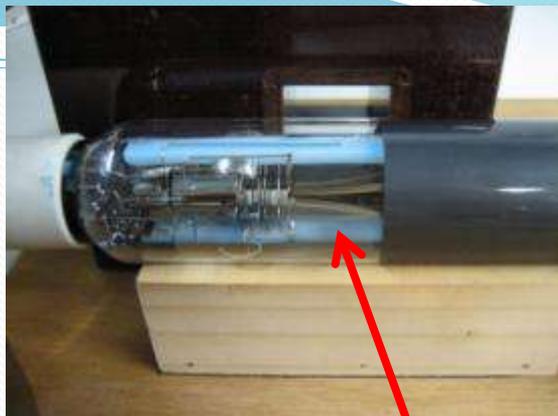
Visão de cima

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

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

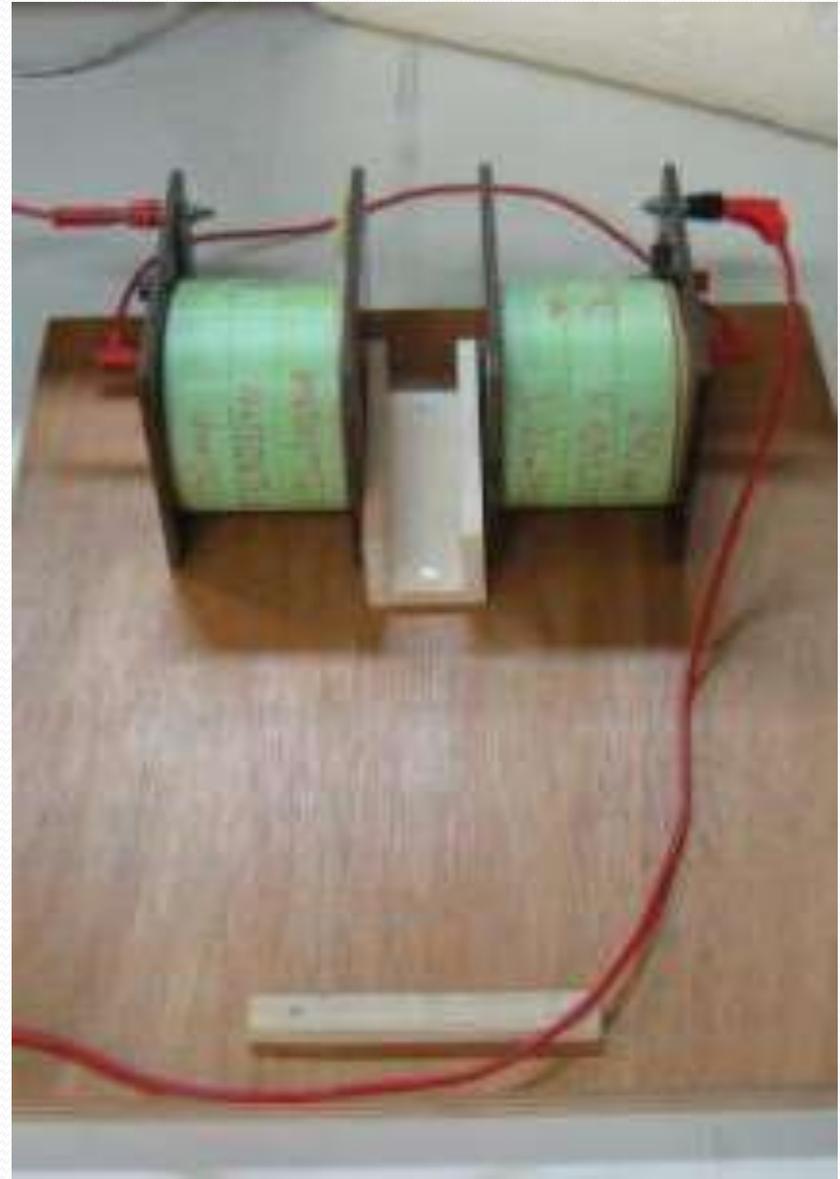


Na prática

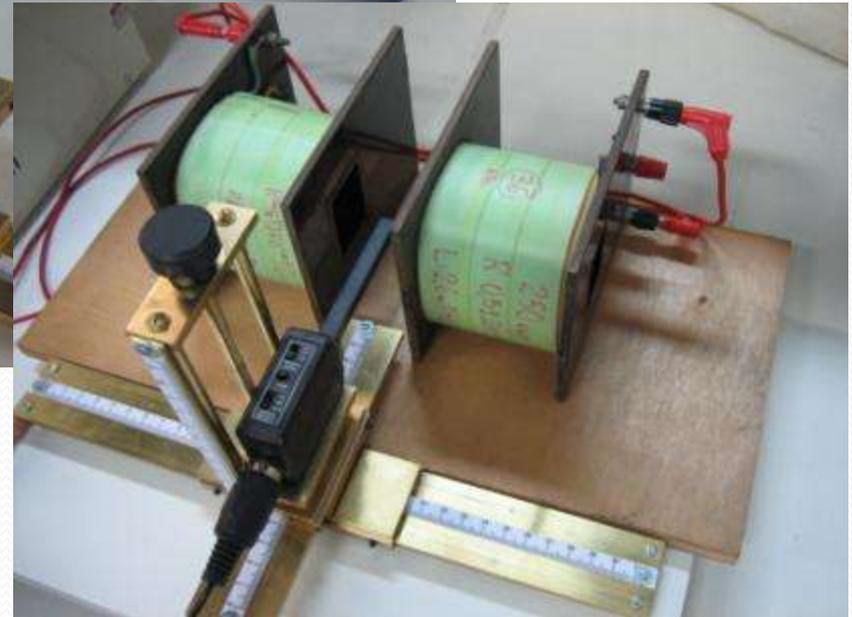
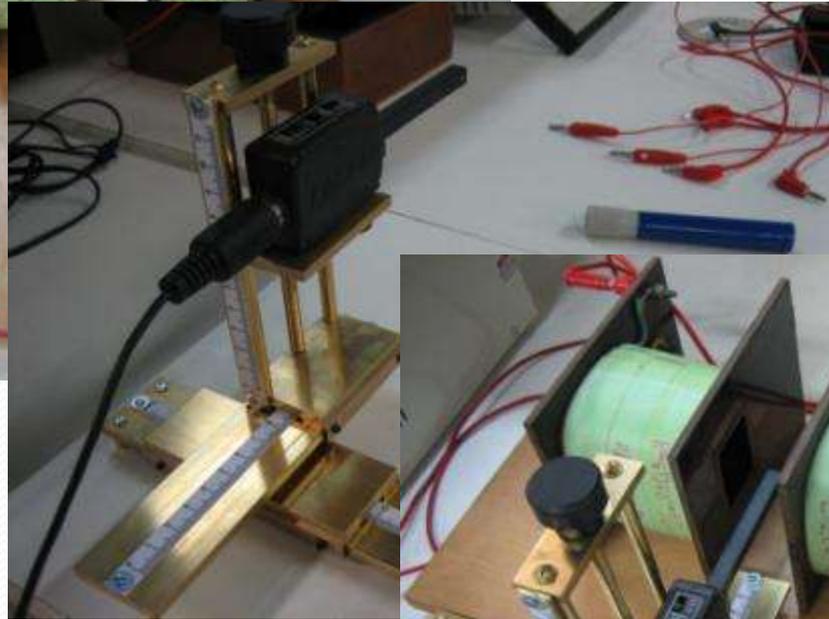
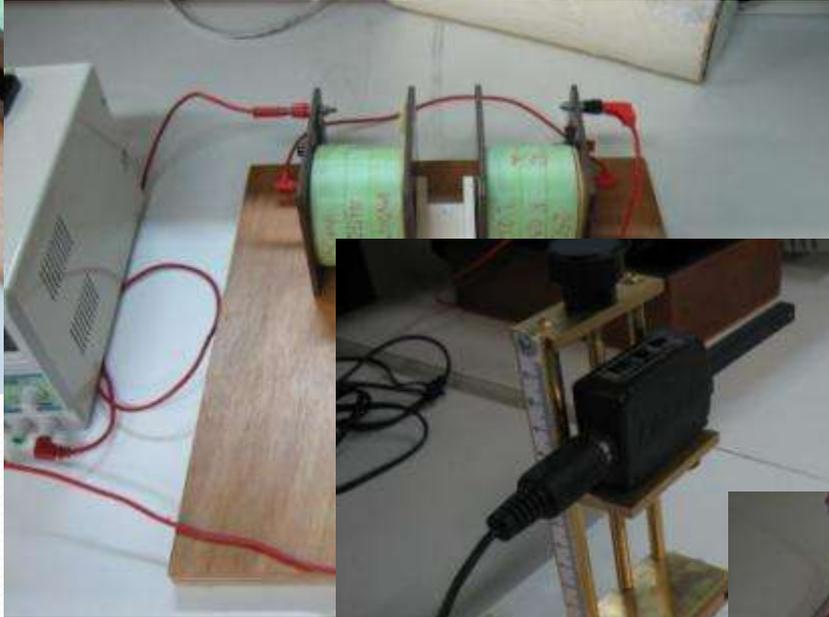
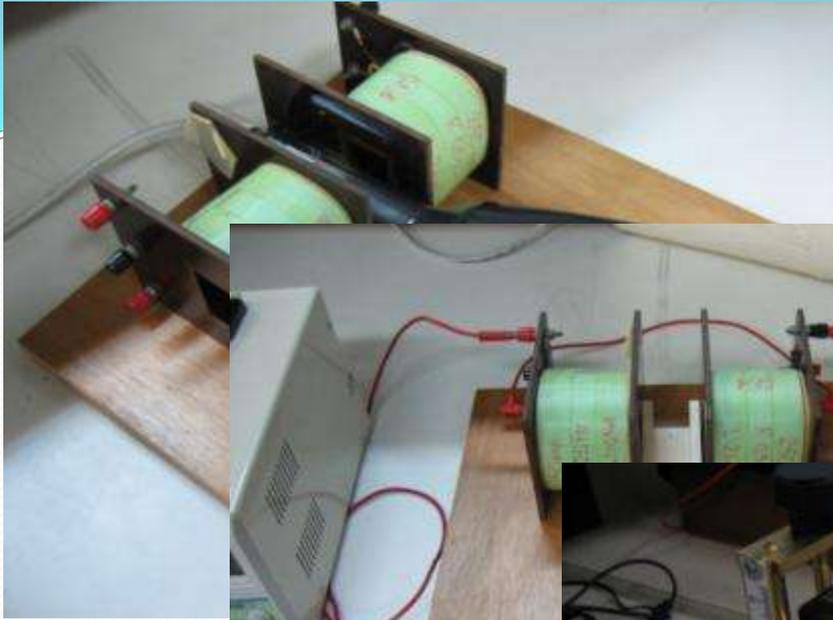


Arranjo experimental

- 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

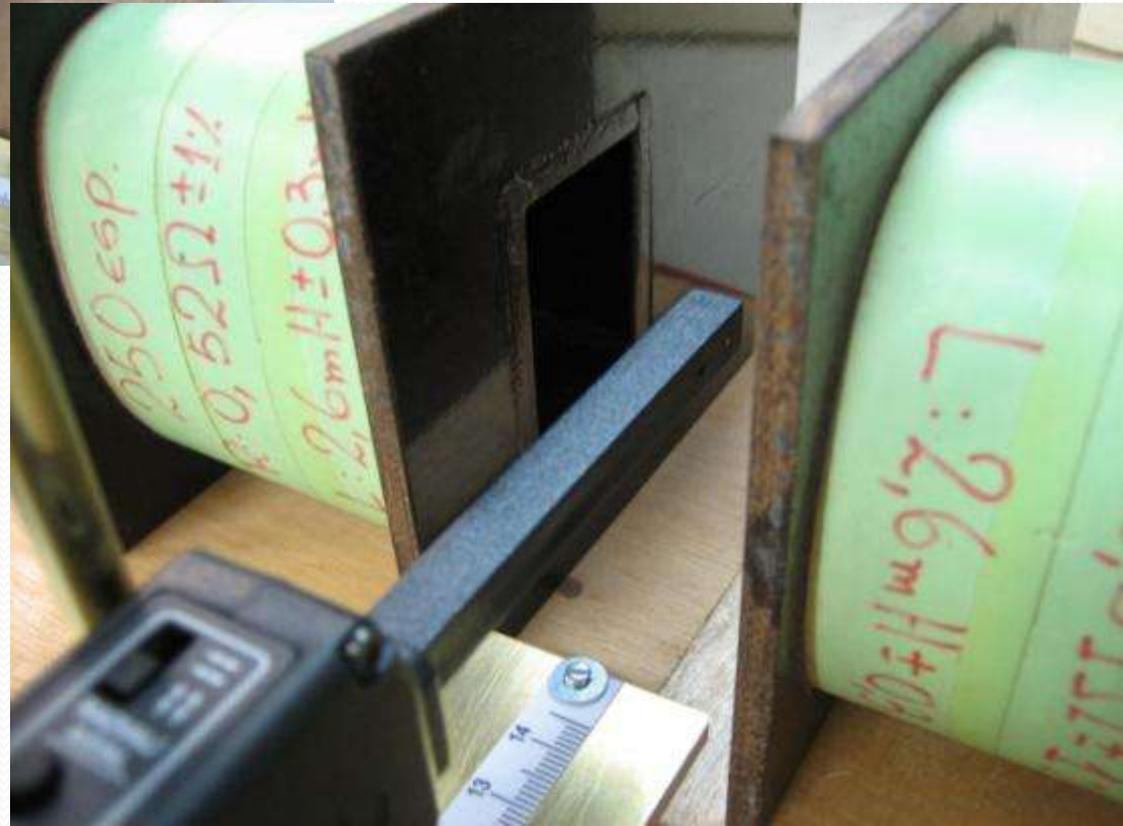
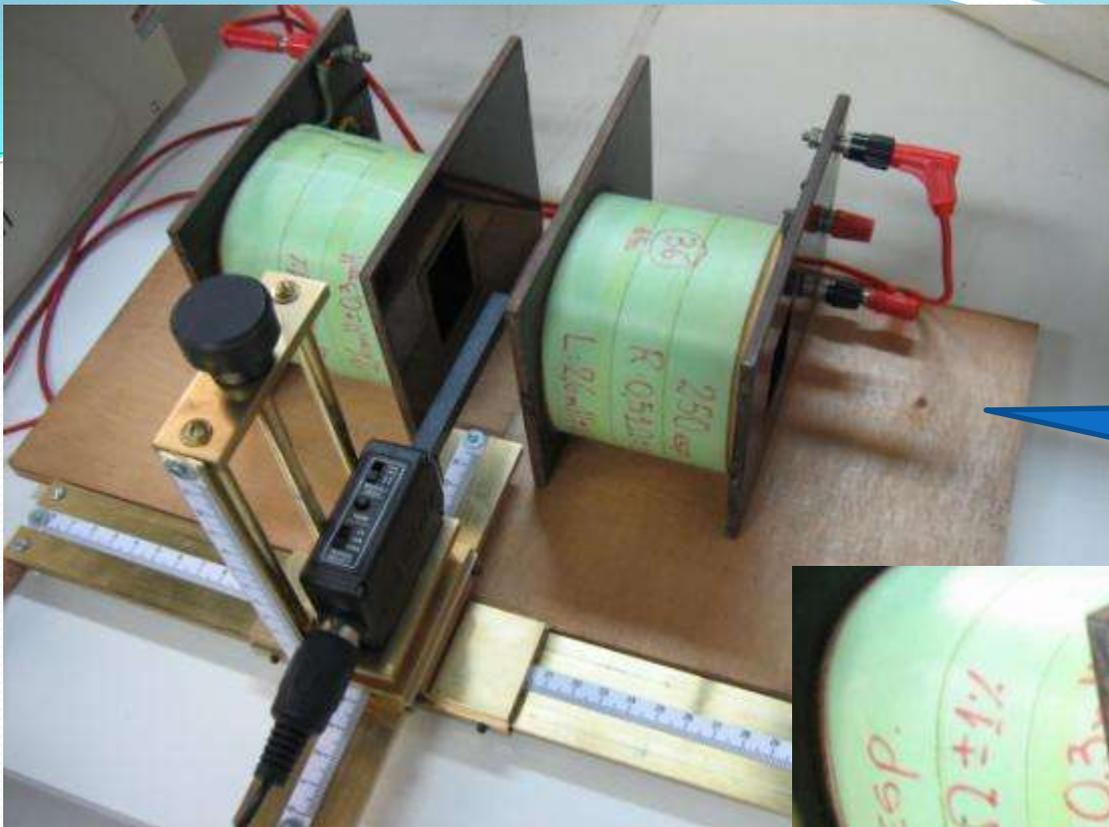


Na prática...



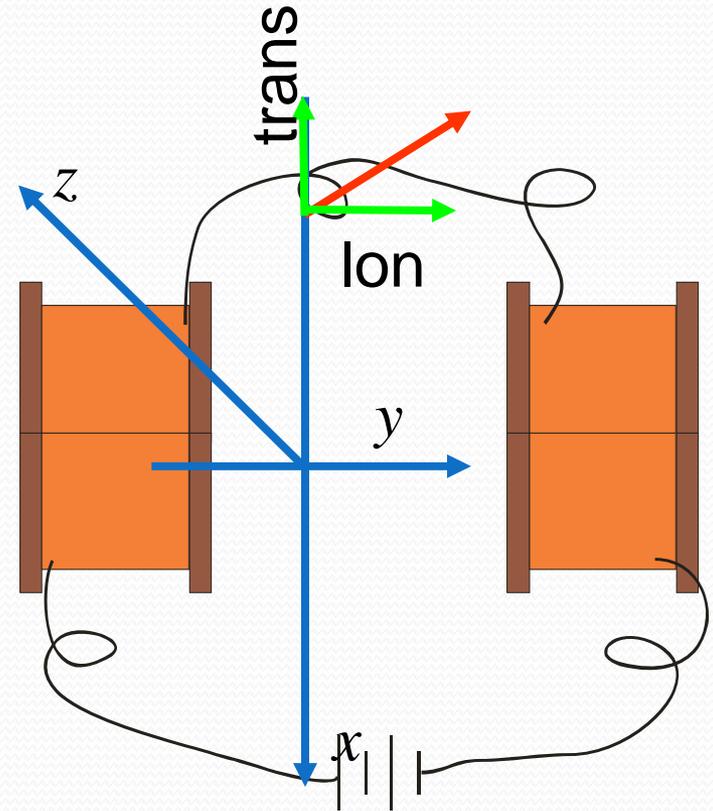
Na prática...

Suporte de madeira para poder centralizar o medidor Hall



Para entregar – Parte 2

- Fazer **1** gráfico de B_{lon} ao longo do eixo x para **3** valores de corrente nas bobinas.
- Para **1** das correntes fazer **1** gráfico de B_{trans} e B_{lon} ao longo do eixo x .
 - Argumente fisicamente porque não é preciso medir o campo transversal e nem o campo nos outros eixos
- Fazer **1** gráfico de B_{lon}/i ao longo do eixo x para as **3** correntes medidas
 - O resultado obtido é razoável? O que você esperaria? Discuta a linearidade entre campo e corrente.



5. Dicas



Uso do Data Studio – Sensor HALL

Cada “run” é uma tomada de dados

Precisa configurar a interface para o sensor HALL

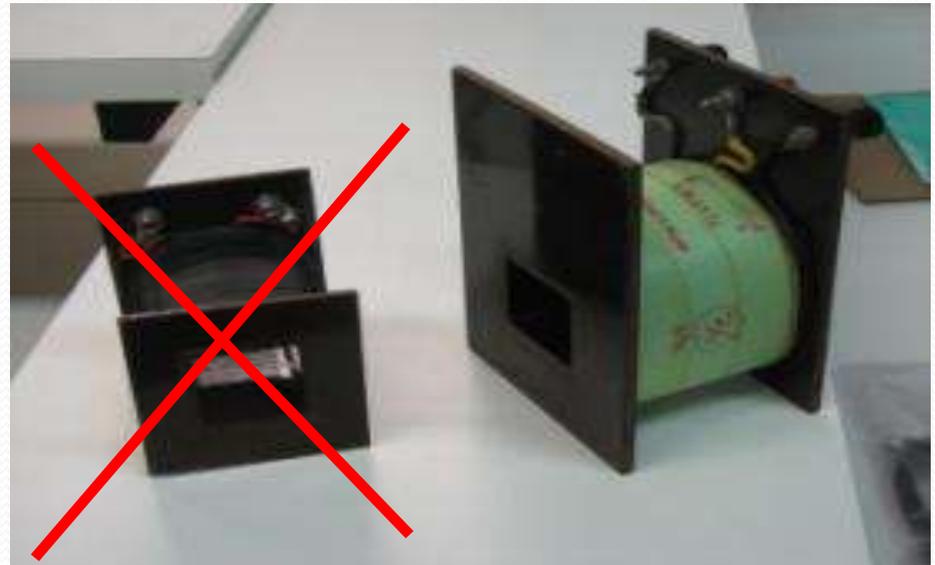
Grafico, multimetro, histograma, ...

Vejam o tutorial no site!

The screenshot displays the Data Studio software interface. The 'Data' panel on the left lists several data sources, including 'Magnetic Field Strength (10X), Ch A (gauss)' and 'Keyboard 1 (mm)'. The 'Experiment Setup' window in the center shows the 'Science Workshop 750' interface with a 'Magnetic Field Sensor' connected to the 'Keyboard 1' port. A dialog box prompts for a value for 'Keyboard 1' (7 mm). The 'Graph 1' window on the right shows a plot of 'Magnetic Field Strength' with a value of -4 gauss. The 'Digits 1' window at the bottom shows the magnetic field strength as -4 gauss.

Cuidado experimental 1

- 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

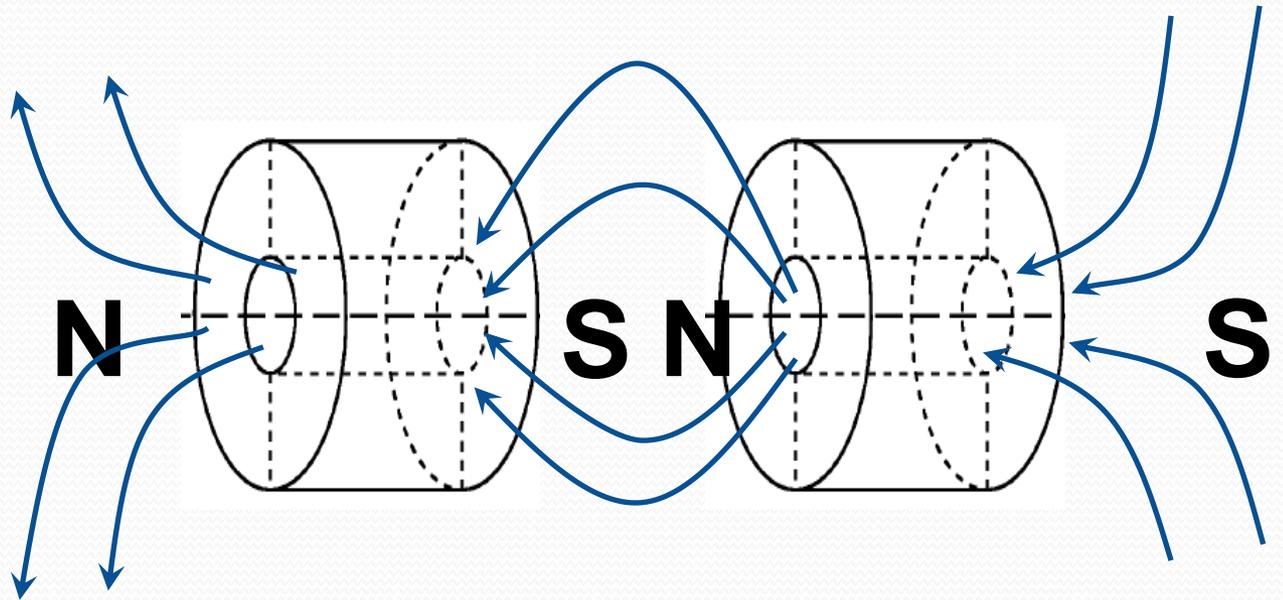
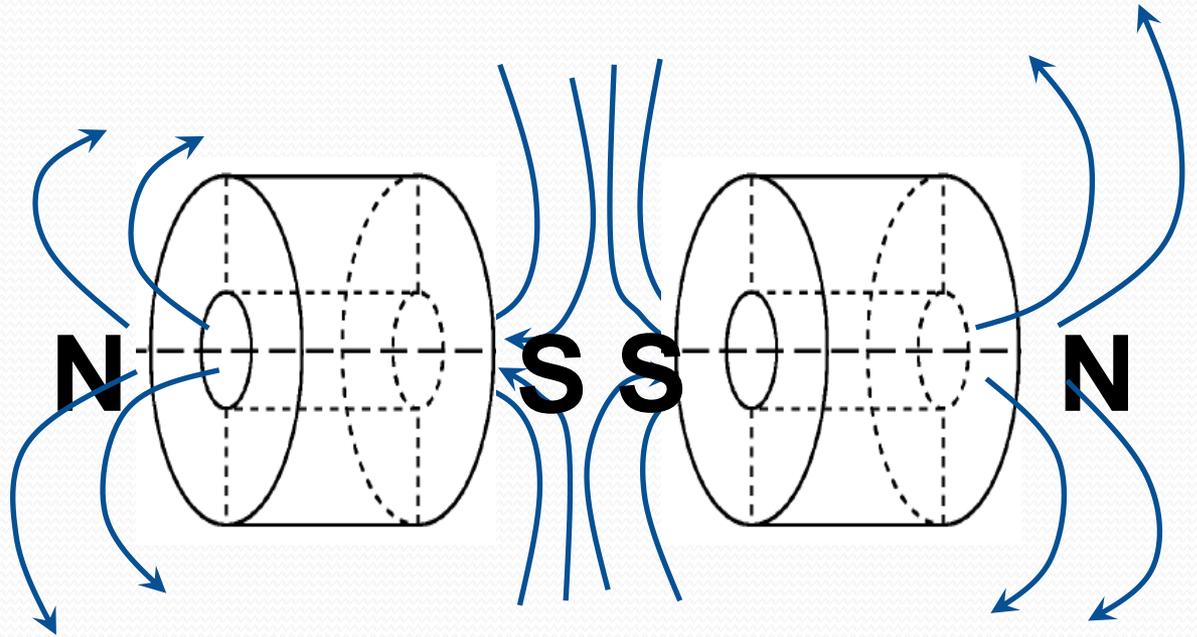


Cuidado experimental 2

- 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



Cuidado 3

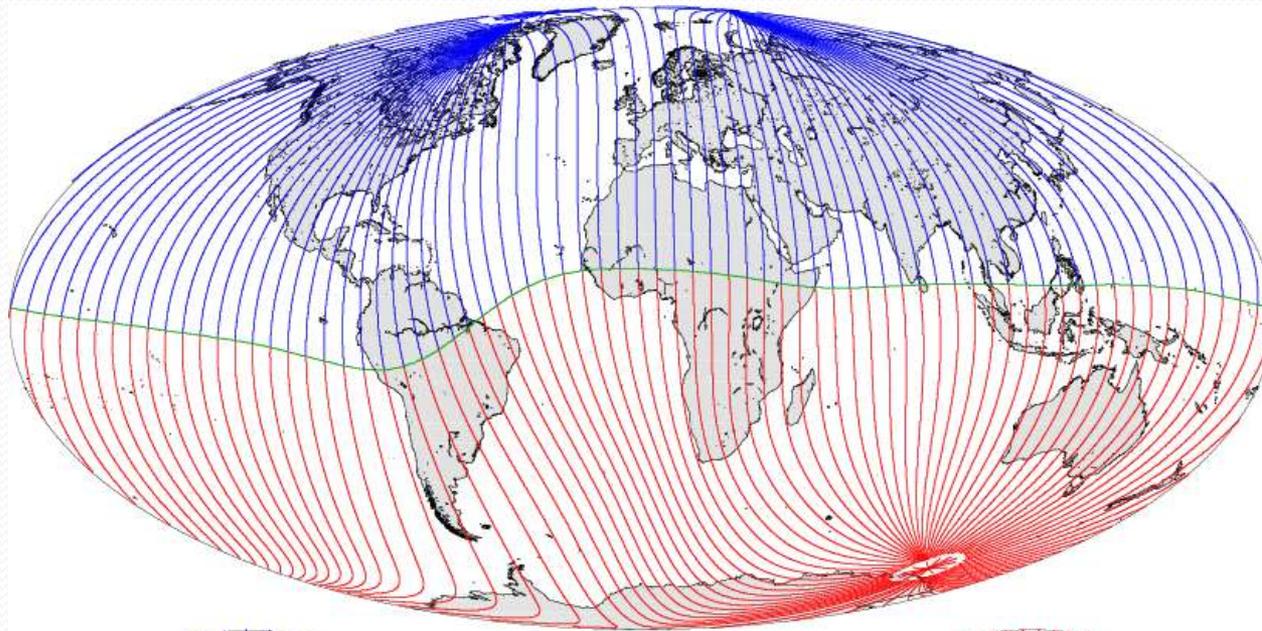


Medida do campo das bobinas

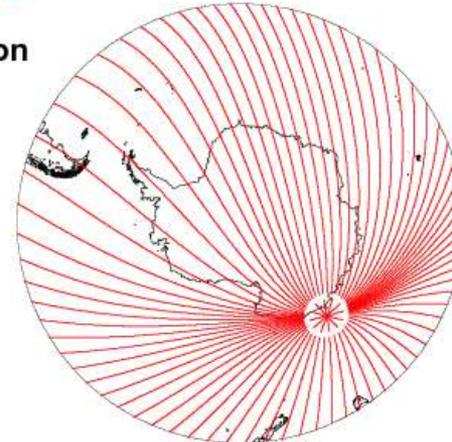
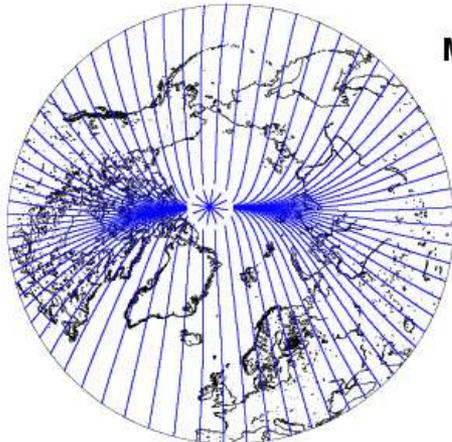
- Selecione o sensor a ser utilizado
- calibre o sensor
 - Ambiente com campo = 0
 - Como?
 - Câmara de referência
 - Região com campo nulo
- Posicione o sensor na região a ser medida e use o DataStudio



Bom trabalho!



**Magnetic Field Direction
2010**



<http://geomag.org>, 2008