

Exp. 2 – Seletor
Parte 2 – Movimento de
elétrons em campo elétrico

Aula 8 - 2009

Prof. Henrique Barbosa
Edifício Basílio Jafet - Sala 100

Tel. 3091-6647

hbarbosa@if.usp.br

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

ESTA AULA

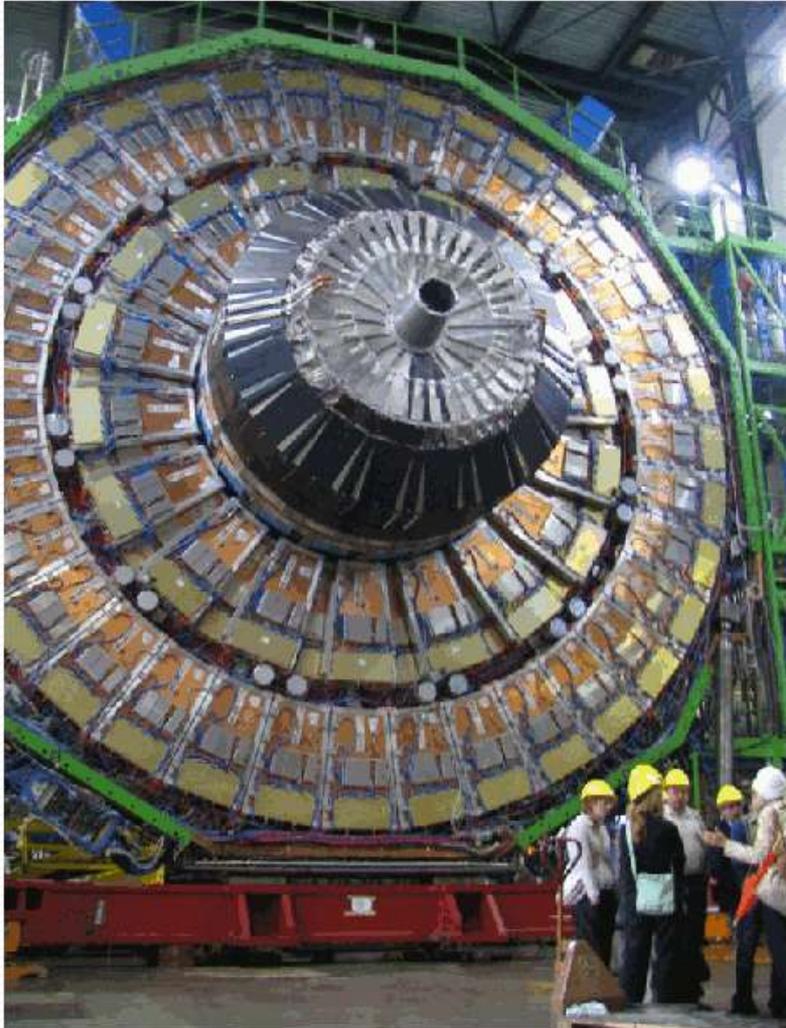
- Discussão das sínteses:
 - Simulação na cuba
 - Simulação numérica (FEEM/Excel)
- Modelo teórico simplificado
 - deflexão do feixe em função da tensão entre as placas e da tensão de aceleração
- Operação do TRC

Exp. 2 – Seletor de Velocidades

PROGRAMAÇÃO

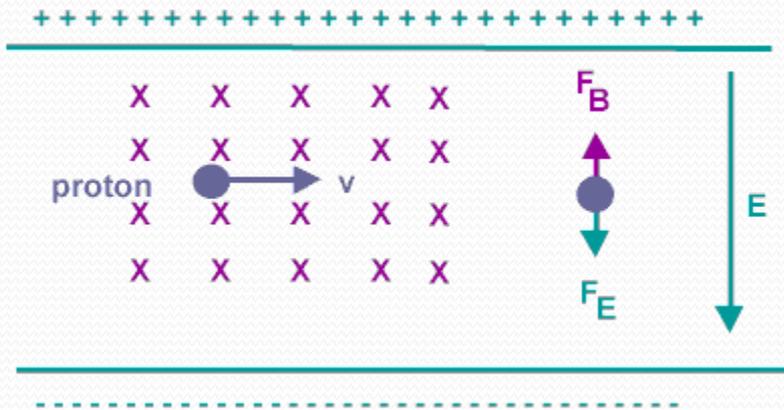
- Semana 1
 - Mapear o campo elétrico das placas defletoras
- Semana 2
 - Simular o campo elétrico das placas defletoras
- Semana 3
 - Estudar a deflexão do feixe em função da tensão entre as placas e da tensão de aceleração
- Semana 4
 - Mapear e simular o campo magnético das bobinas
- Semana 5
 - Estudar a deflexão do feixe em função da corrente nas bobinas e da tensão de aceleração
- Semana 6
 - Calibrar e obter a resolução do seletor de velocidades

Experiência 2 – Acelerador / Seletor



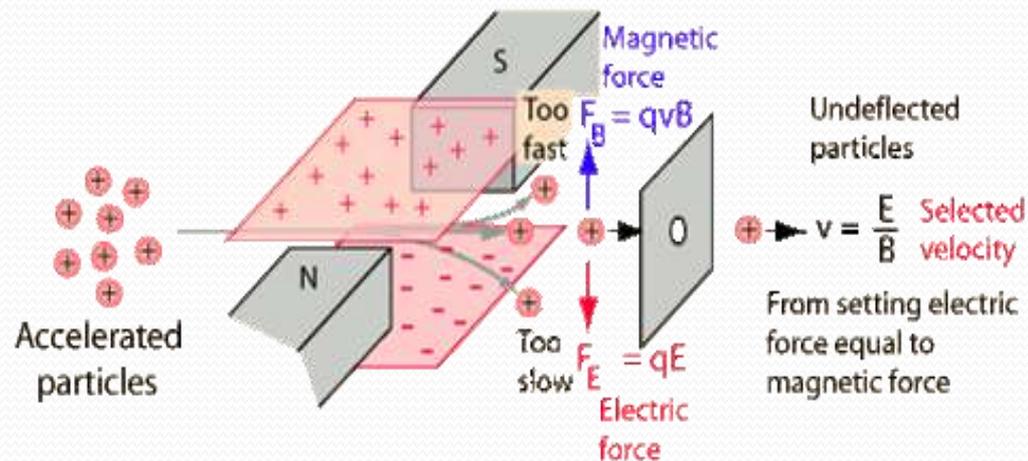
Mini acelerador do LabFlex com seleção de velocidades dos elétrons no feixe!

Funcionamento do Seletor

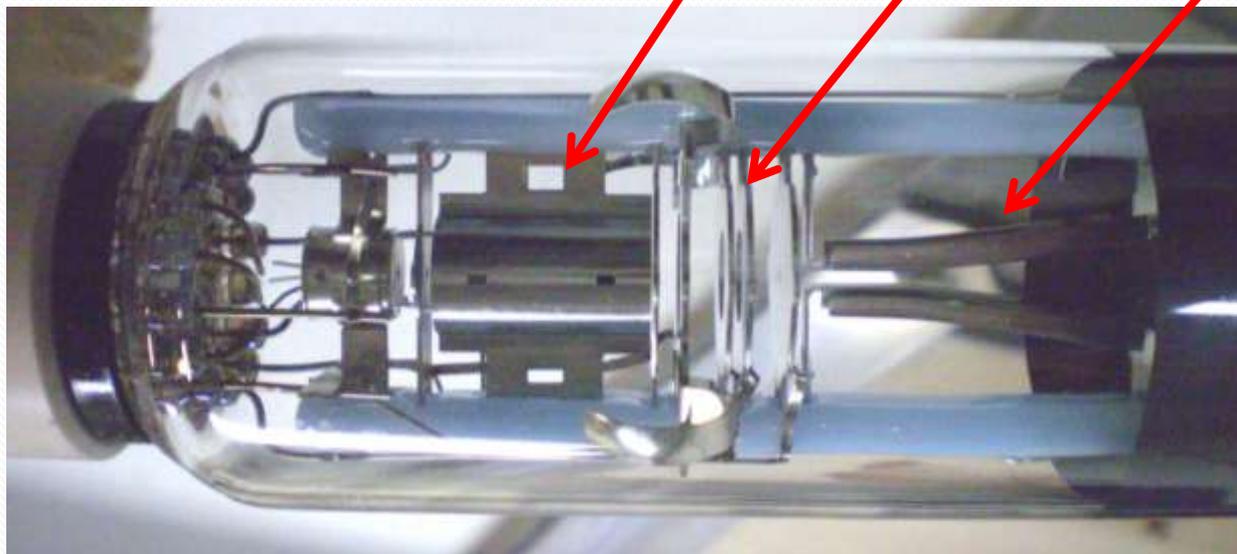
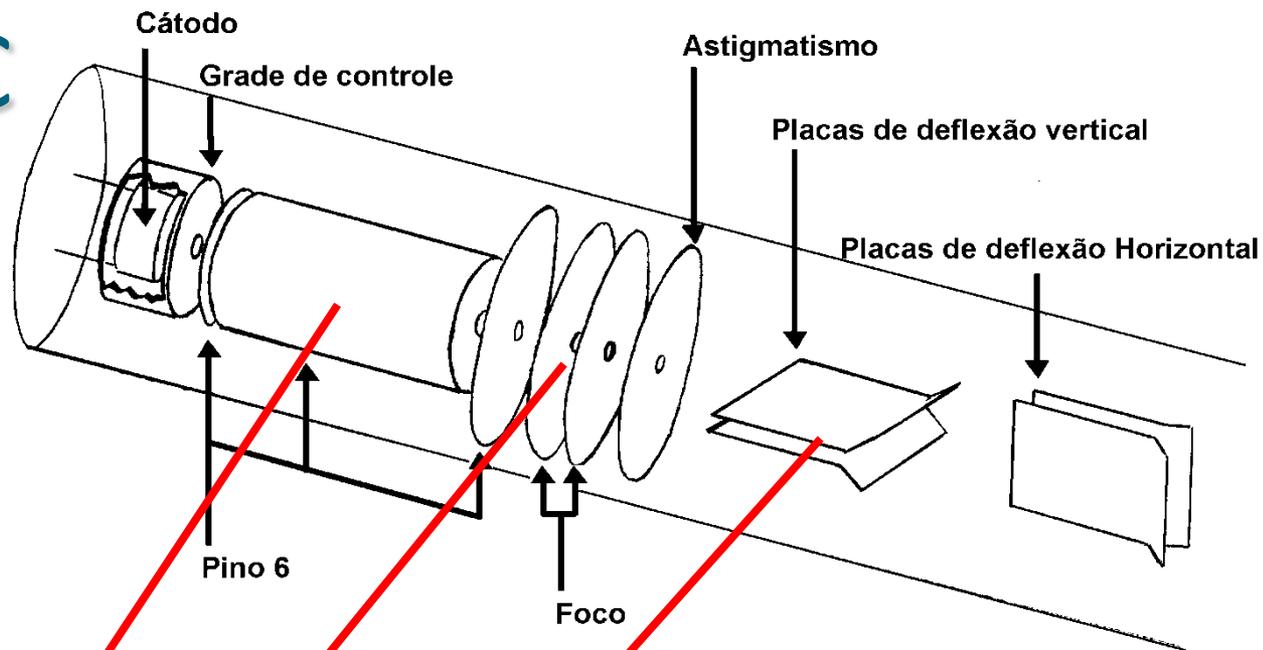


- São dois campos cruzados e perpendiculares à direção do feixe
 - um campo magnético
 - um campo elétrico
- **O segredo:** os campos são orientados de tal forma que F_E e F_B são opostas.

Escolhe-se a intensidade dos campos tal que a partícula da velocidade de interesse passe sem ser desviada:

$$\vec{F}_E + \vec{F}_B = 0$$


O feixe: TRC

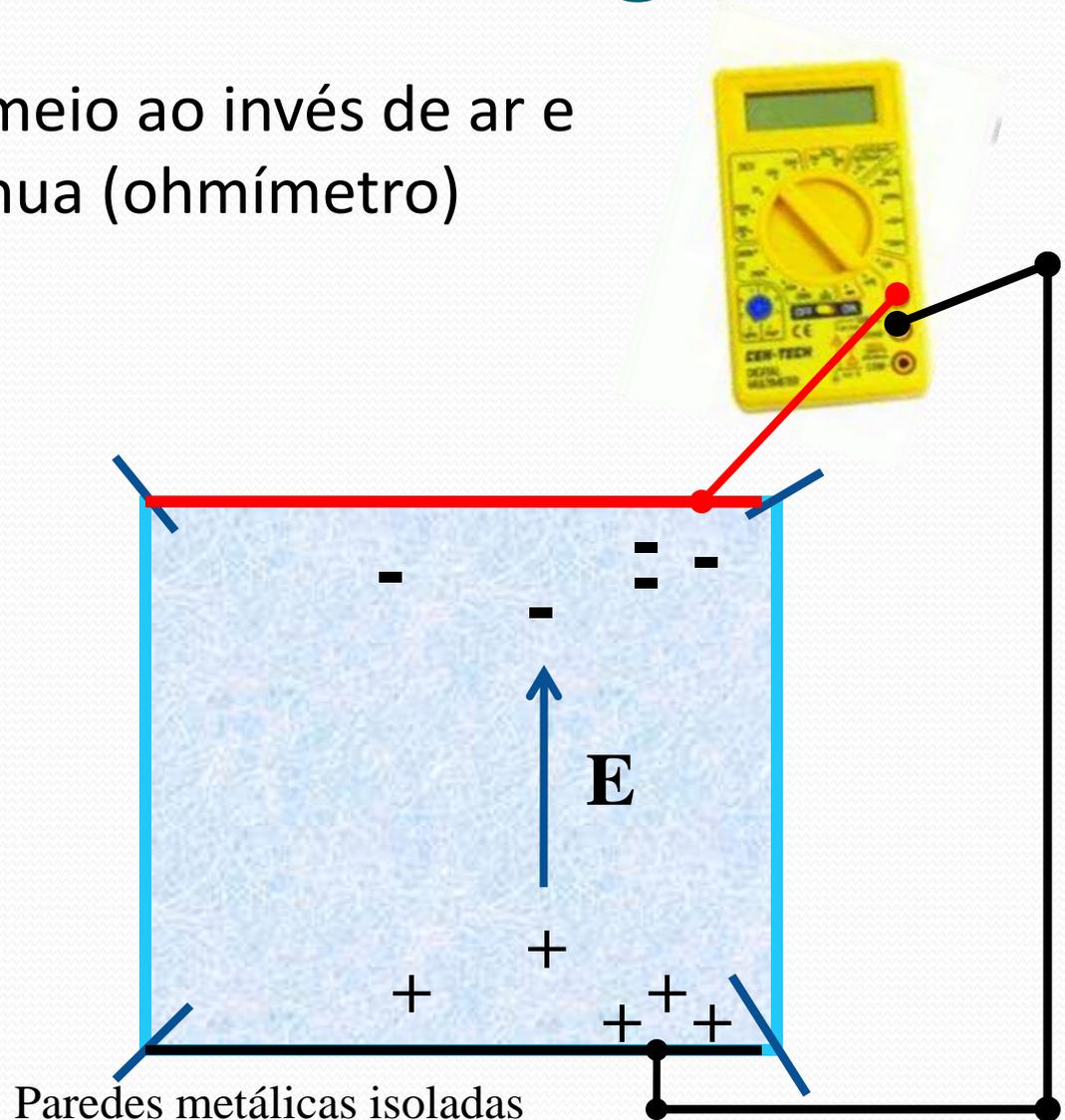


Atividades para 12/out – Parte 1

Resistência da cuba com Água

Vamos usar a água como meio ao invés de ar e medir com corrente contínua (ohmímetro)

- Qual a resistividade da cuba como um todo?
- Depende da altura da água?
- Varia com o tempo? Porque?
- Nossas hipóteses são satisfeitas se usarmos corrente contínua?



Atividades para 12/out – Parte 2

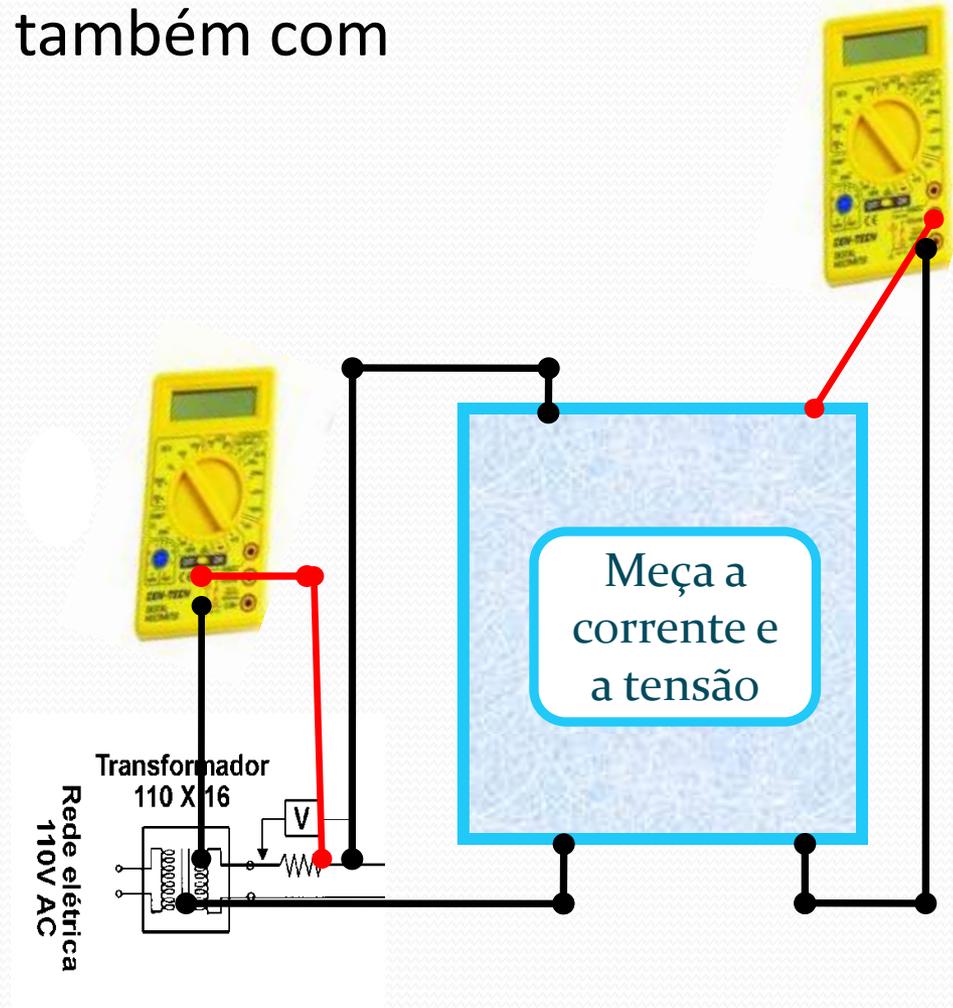
Resistência da cuba em AC

Só para garantir, vamos medir também com corrente alternada.

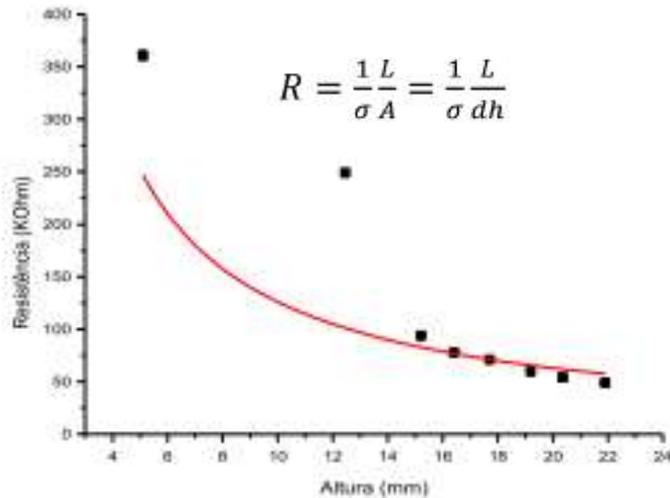
- Meça a tensão e a corrente atravessando a cuba
- Qual a resistividade da cuba?
 - Depende da altura da água?
 - Varia com o tempo? Porque?
 - Nossas hipóteses são satisfeitas se usarmos corrente alternada?

Em caso afirmativo:

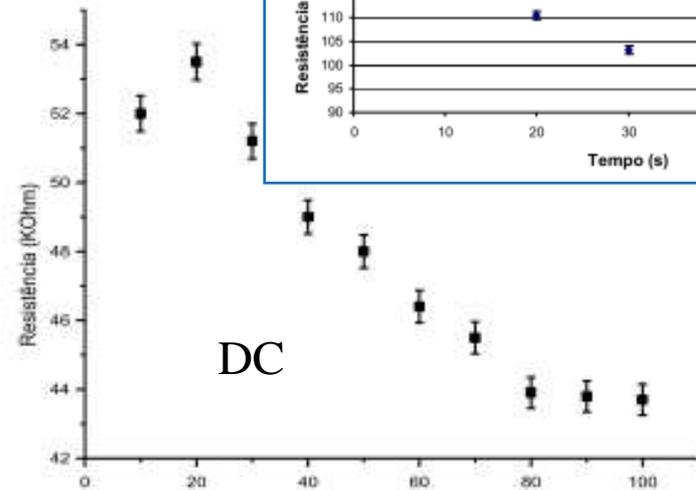
- Calcule R_{cuba} e compare com R_V
- Calcule $\sigma_{\text{H}_2\text{O}}$ e compare com σ_{Cu}



Boa análise



Segundo a fórmula (1) os dados deveriam se ajustar adequadamente a curva vermelha, isso não ocorre exatamente. Essa fórmula é válida para meios ôhmicos, mas antes de afirmar que nosso meio não é ôhmico vamos analisar a figura 2.



Na figura 2 podemos observar que a resistência varia com o tempo, o que torna as medidas da figura 1 pouco confiáveis. A explicação para esse fenômeno é que quando utilizamos corrente contínua temos uma movimentação constante de elétrons, ou seja, nosso meio não obedece à hipótese (3) quando utilizamos corrente contínua.

Boa análise

- Repetiram as medidas com corrente alternada...

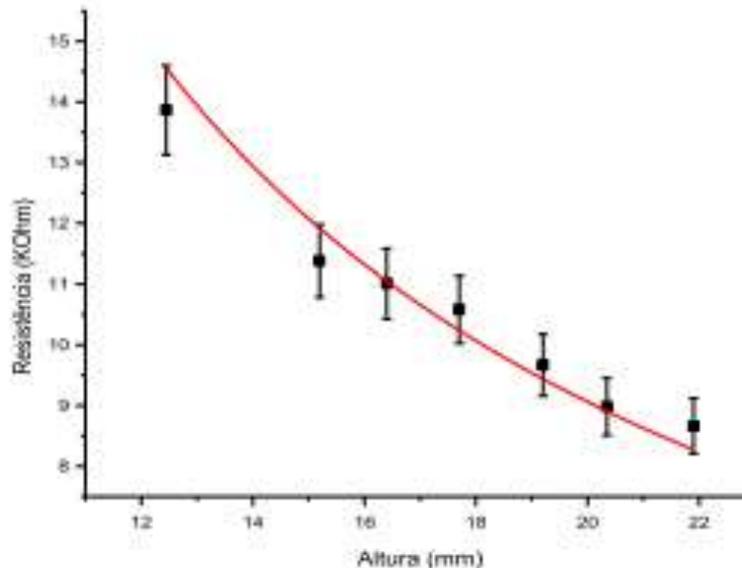
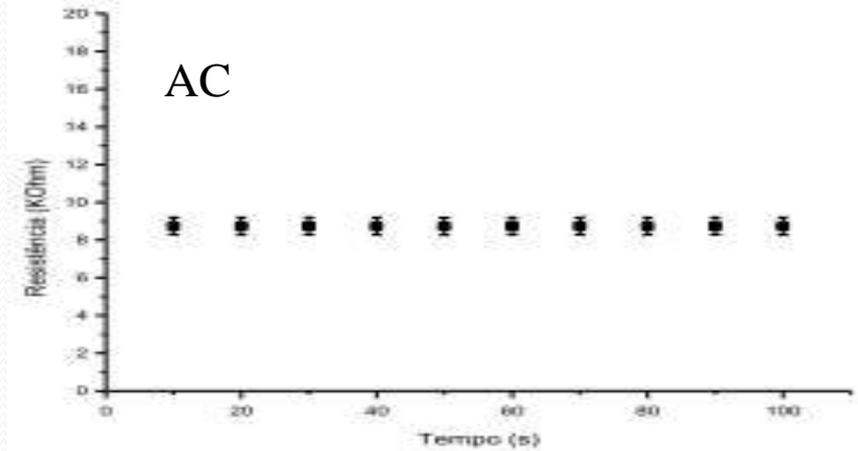


Figura 4: Gráfico da Resistência pela altura da água, e a curva ajustada (em vermelho) é do tipo $y=A/x$, onde A vale $181,2 \pm 2,6$.



Pelo coeficiente A obtido na figura 4 podemos determinar a condutividade da cuba com água, pela seguinte fórmula:

$$A = \frac{L}{d\sigma} \leftrightarrow \sigma = \frac{L}{dA} \quad (2)$$

Onde obtemos um $\sigma = 5,519(79) \cdot 10^{-3} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ que é muito menor que o do cobre, o que verifica nossa hipótese (1).

Resistividade AC/DC

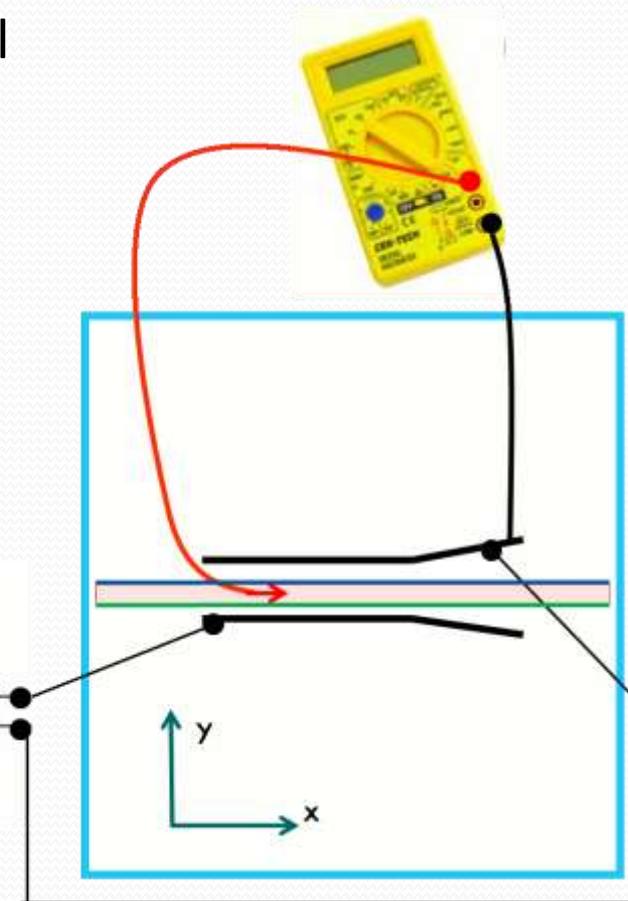
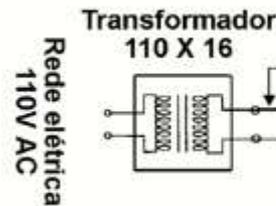
| | DC: | AC: σ_{h_2o} (Ω m) | Incerteza |
|-----|---------------------|-----------------------------------|-----------|
| H01 | 1204(35) Ω m | 219(23) | 11% |
| H02 | 150-85 Ω | 146 (14) | 10% |
| H03 | 50-44 k Ω | 181.19 (79) | 44% |
| H04 | -- | 123 (2) | 2% |
| H05 | 160-70 k Ω | 169(33) | 20% |
| H06 | 42-161k Ω | 202(65) 302(32) | 32% 11% |
| H07 | Variável | 163.78 (81) | 49% |
| H08 | 220-590k Ω | 176(12) 173(8) 175(6) | 7% 5% 3% |
| H09 | | | |
| H10 | 125-90k Ω | 220000 | |

Atividade para 12/out – Parte 3

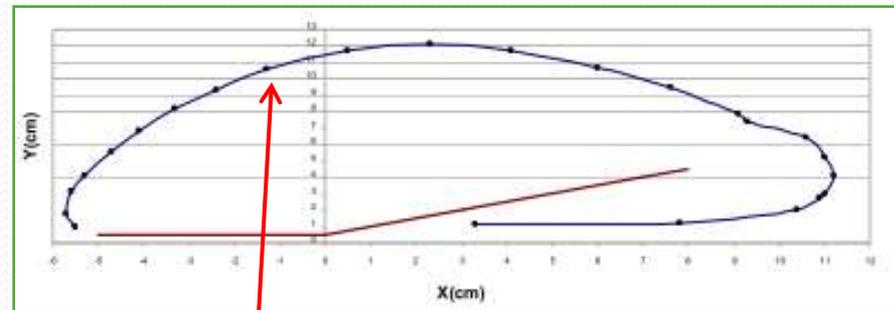
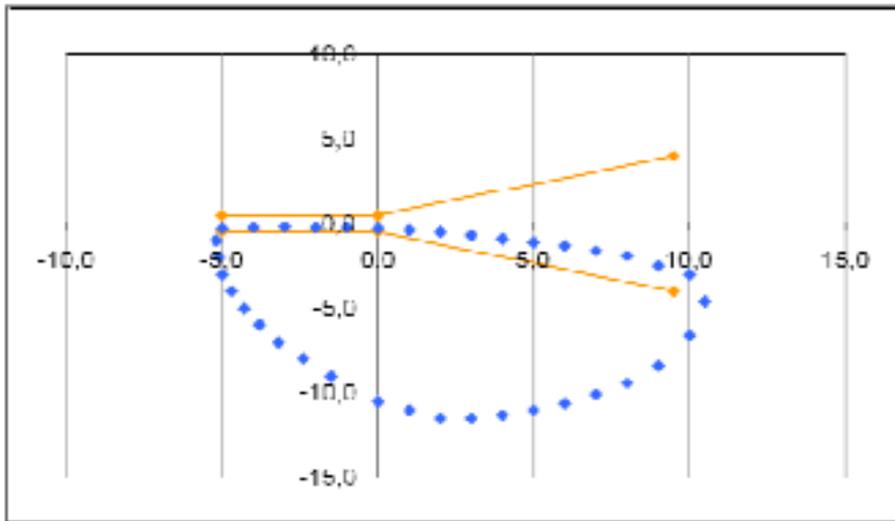
Mapeamento do Campo e Potencial

OK, agora que sabemos como simular as placas, vamos usá-las para saber como varia o campo elétrico nesta região.

- Medir uma volta completa de uma equipotencial
- Fazer um gráfico do potencial ao longo da linha média entre as placas
- Fazer um gráfico do campo elétrico, E_x e E_y , ao longo da linha média entre as placas
 - Qual a componente mais importante?
 - O campo é uniforme dentro e fora das placas?
 - Existem efeitos de borda?
- Lembre-se, para calcular E :
 - $E_x \sim \Delta V_x / \Delta X$
 - $E_y \sim \Delta V_y / \Delta Y$

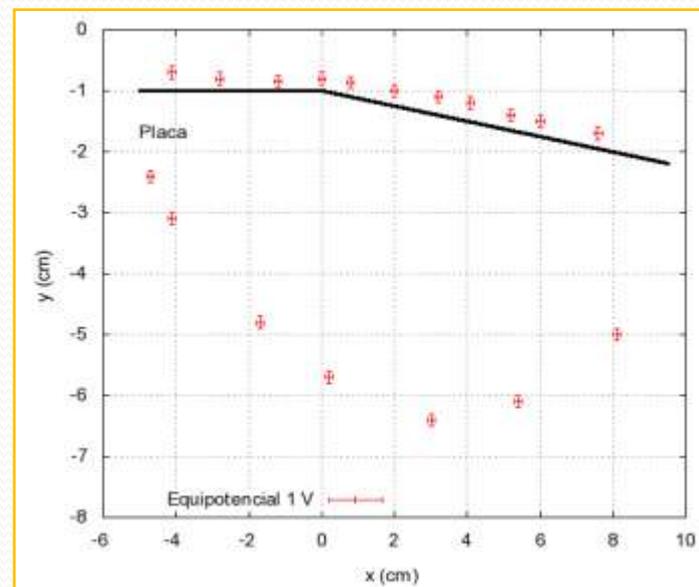
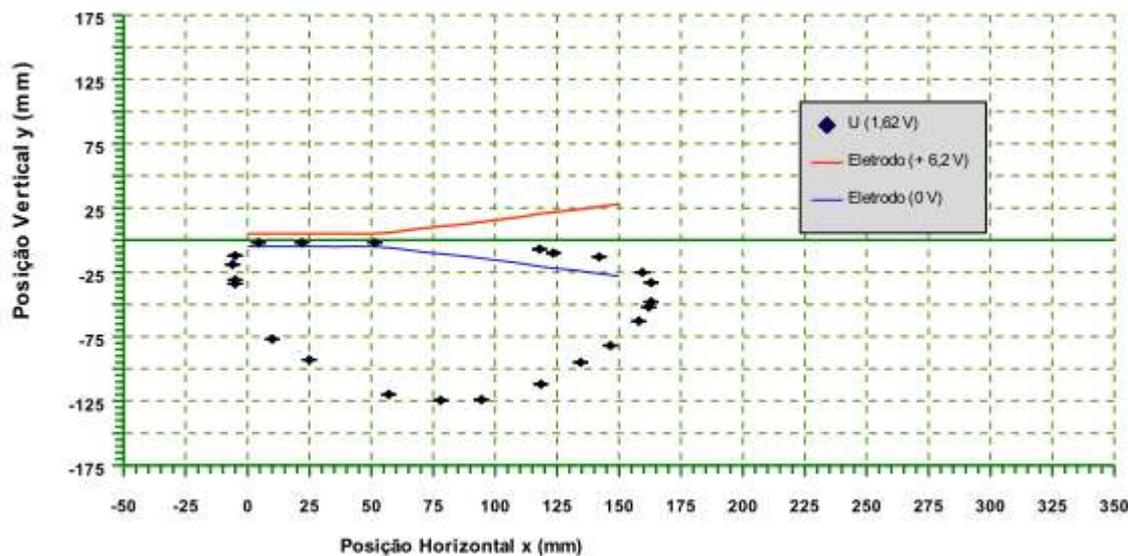


Equipotencial



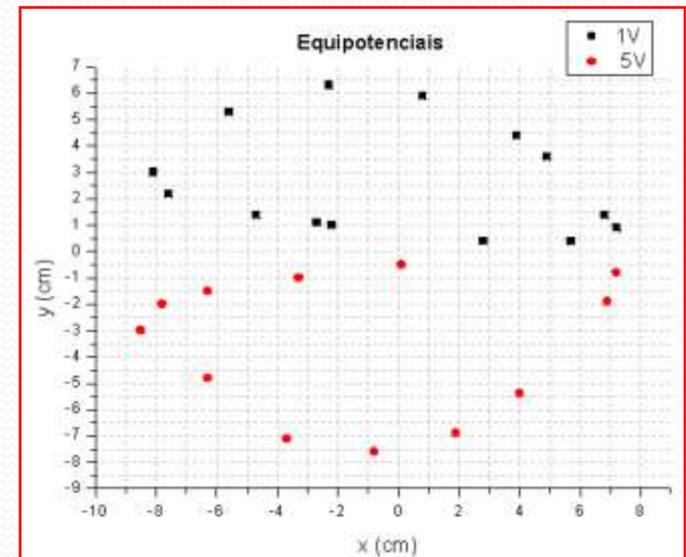
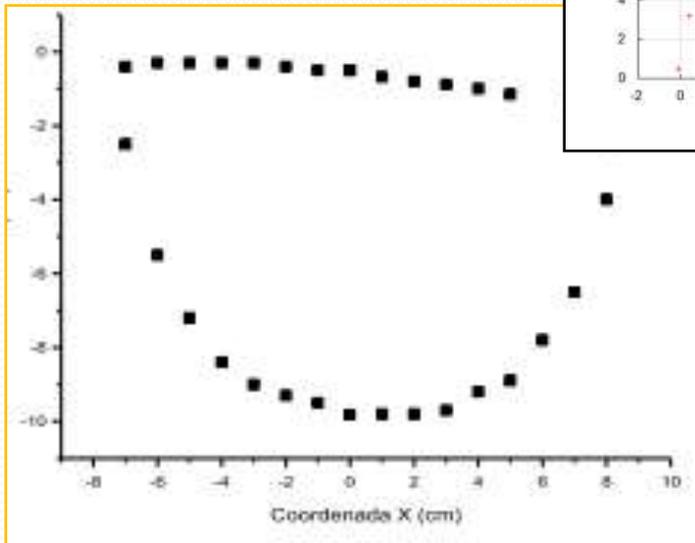
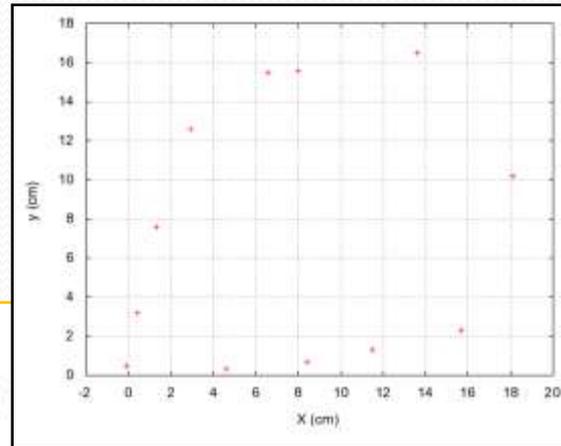
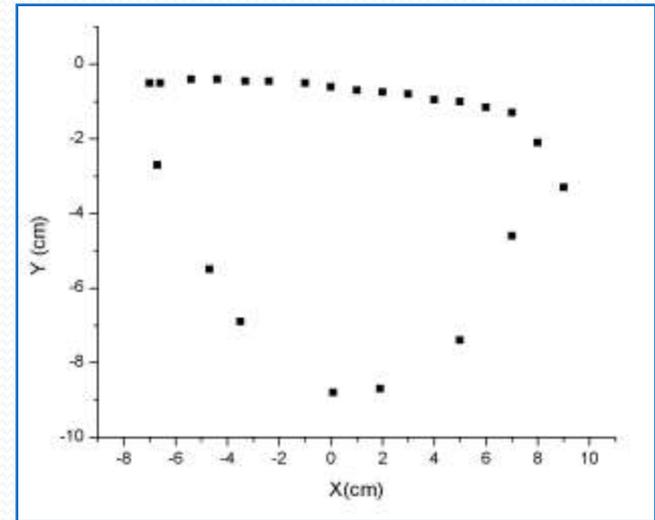
Alguns grupos esqueceram de colocar a incerteza na posição em que foi medida a equipotencial

GRÁFICO 1:- EQUIPOTENCIAL $U = 1,62 \text{ V}$



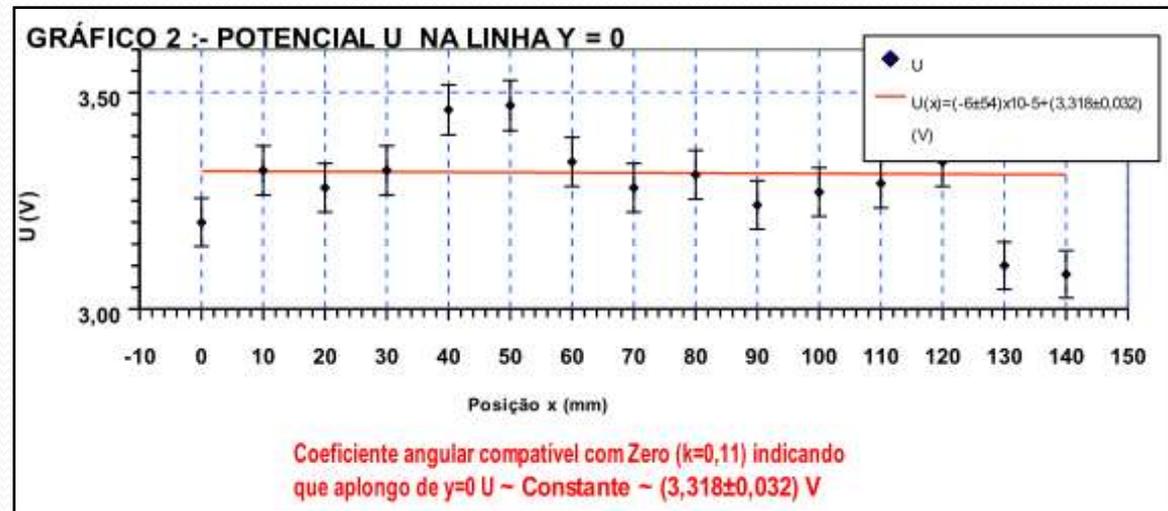
Equipotencial

- E alguns esqueceram de colocar a posição dos eletrodos!

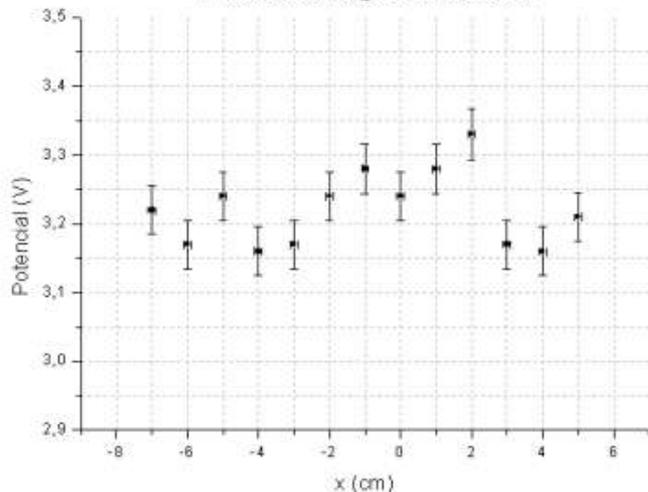


Potencial – Boa análise

- Por simetria, o potencial ao longo da linha imaginária que separava as duas placas devia ser constante.
- Um grupo percebeu isso e verificou, através de um ajuste linear, se seus dados estavam de acordo.



Potencial ao longo da linha média



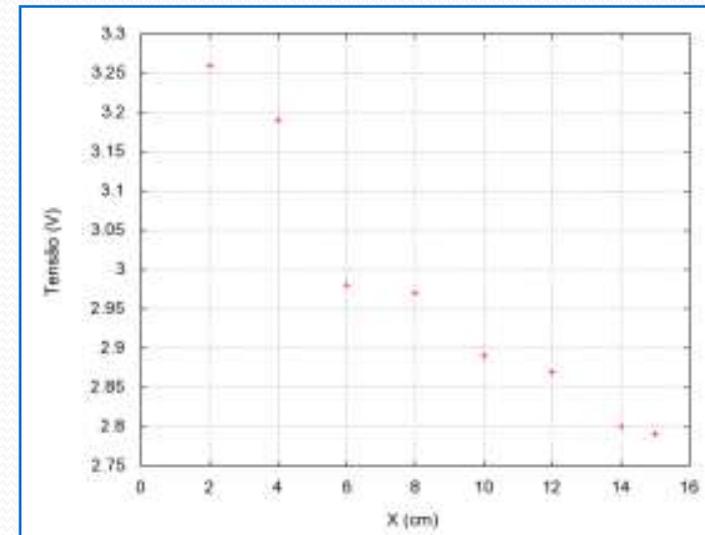
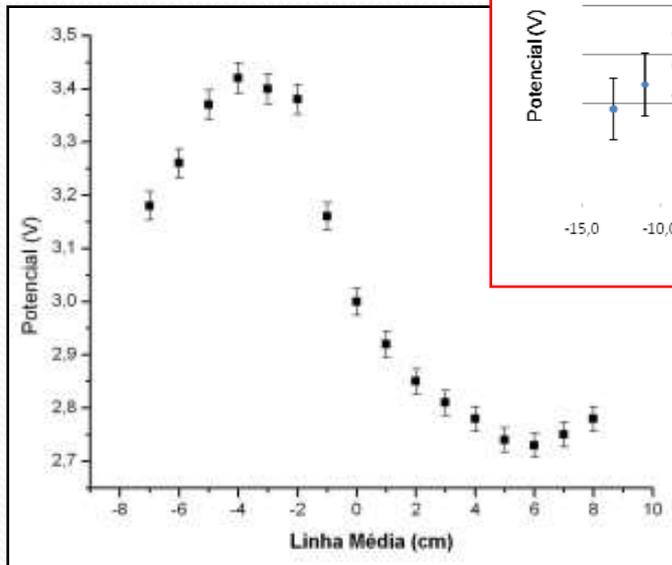
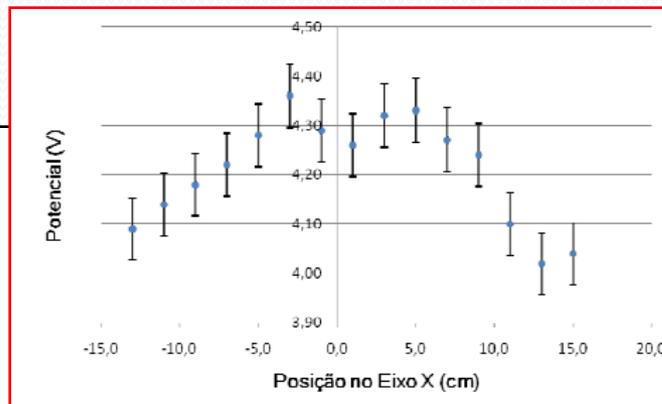
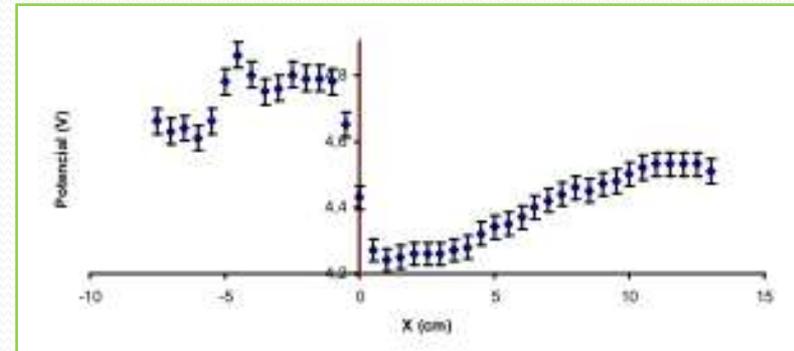
Outros grupos mediram um potencial razoavelmente constante, mas não verificaram

Potencial

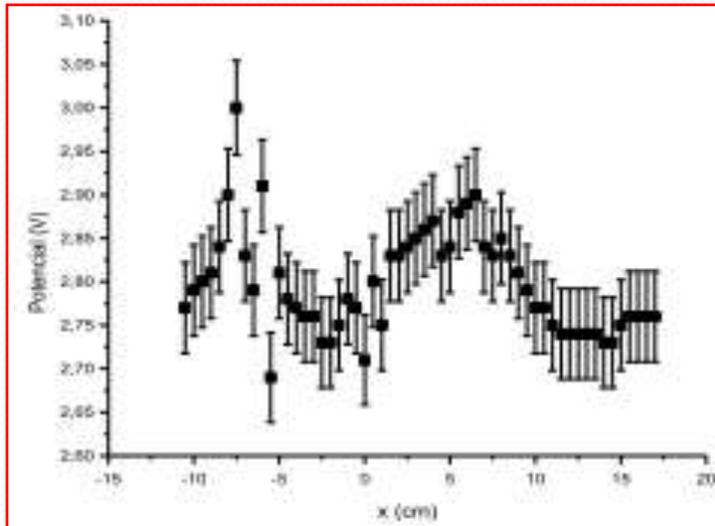
- Outros grupos não mediram um potencial constante.

Possíveis causas são:

- Desalinhamento dos eletrodos,
- Eletrodos tortos,
- Partes oxidadas e outras não,
- Etc...



Potencial – Mais um motivo



Em seguida medimos o potencial ao longo da linha média entre as placas defletoras (figura 6).

O resultado da figura 6 não foi exatamente o esperado, esperávamos uma parte reta entre as partes paralelas das placas. O motivo que isso ocorreu pode ser melhor explicado após observado a figura 7.

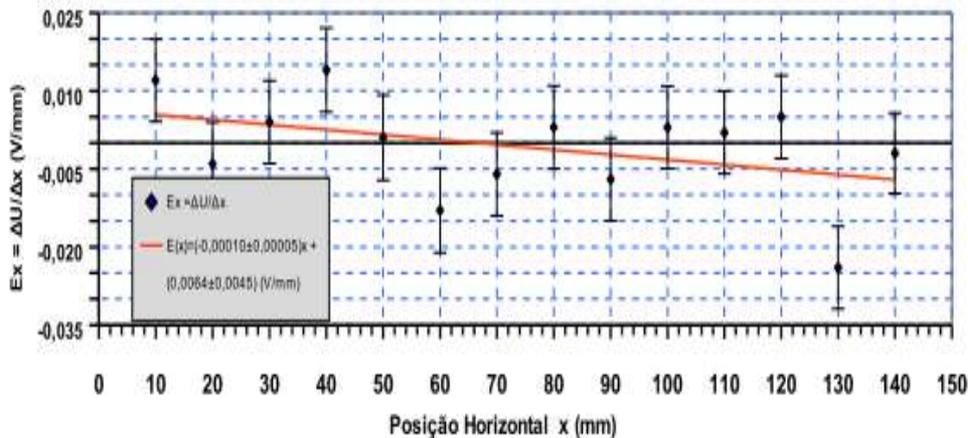
Como podemos observar na figura 7 a componente y do campo é muito mais significativa que a componente x, e isso deve-se a simetria das placas em torno do eixo x. E isso mostra a resposta do problema que encontramos na figura 6, pois como a componente y é muito mais importante qualquer desvio da linha média exata entre

as placas não nos fornecerá o resultado adequado, e como ajustamos o traçado a olho com auxílio de um braço mecânico possivelmente houve esse desvio, podendo o medidor errar ou o braço mecânico possuir um “jogo”, o que torna a linha não perfeitamente reta

Campo elétrico – Boa análise

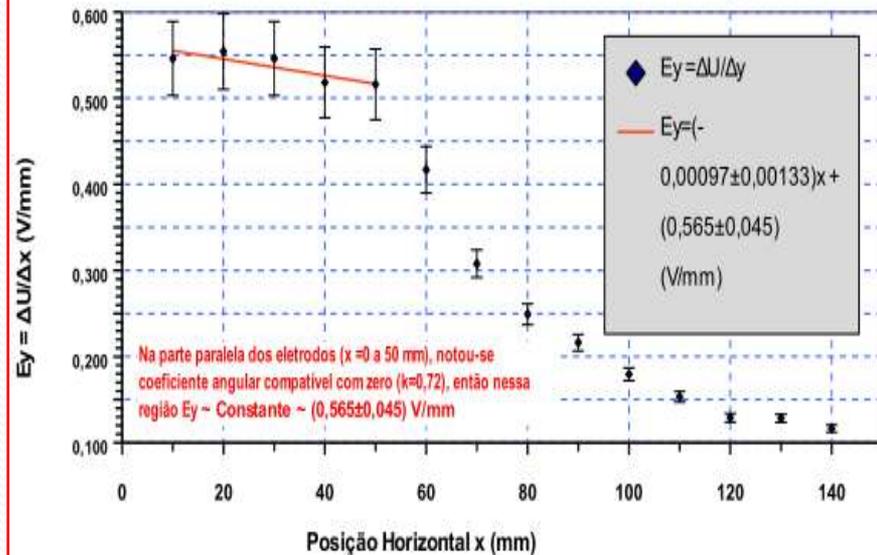
- Também por simetria, o campo elétrico ao longo da linha média devia ser totalmente perpendicular, isto é, $E_x=0$
 - Um grupo verificou se o coeficiente angular era compatível com zero ou não!
 - Ajustaram uma reta na parte paralelas, onde E_y é aprox. constante => coef angular compt. com zero e valor médio

GRÁFICO 3:- COMPONENTE HORIZONTAL DO CAMPO ELÉTRICO NA LINHA $y = 0$



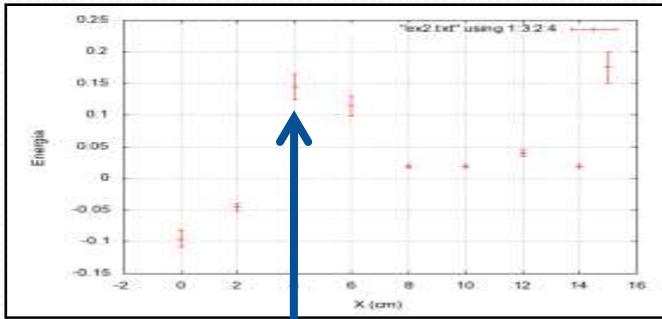
Coeficientes angular e linear compatíveis com Zero ($K's = 2$ e $1,4$)
indicando $E_x = 0$ ao longo de $y=0$ (medial entre eletrodos)

GRÁFICO 4 :- COMPONENTE VERTICAL DO ELÉTRICO VERTICAL NA LINHA $y = 0$

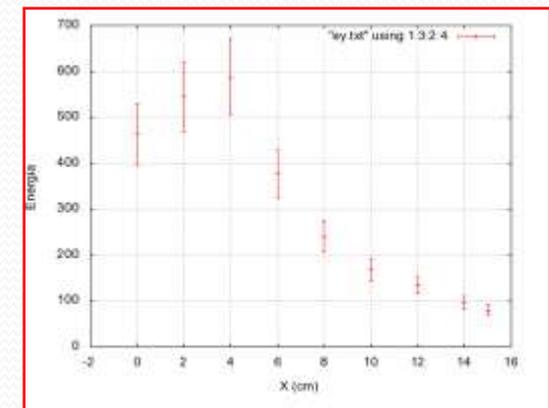
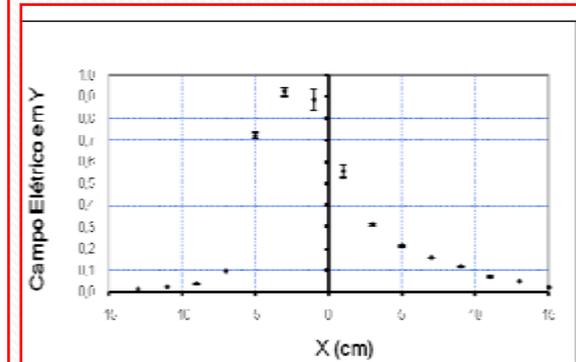
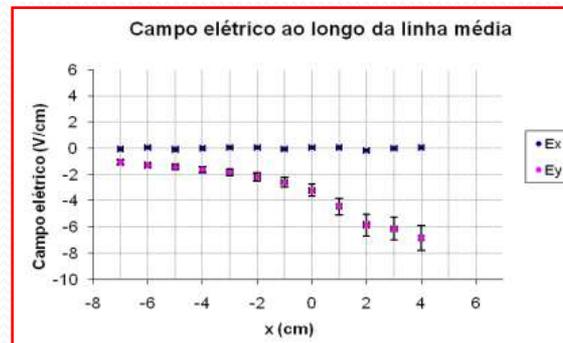
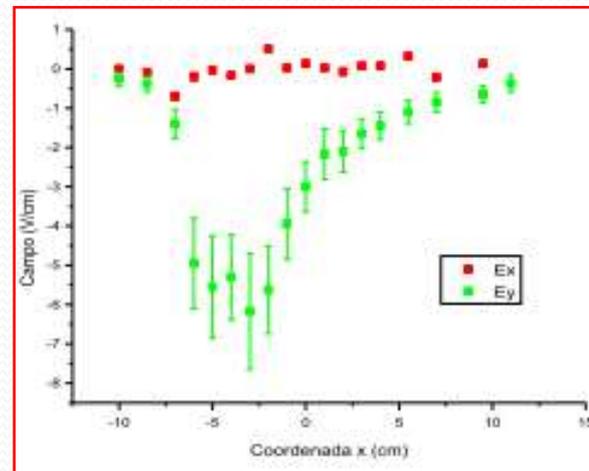
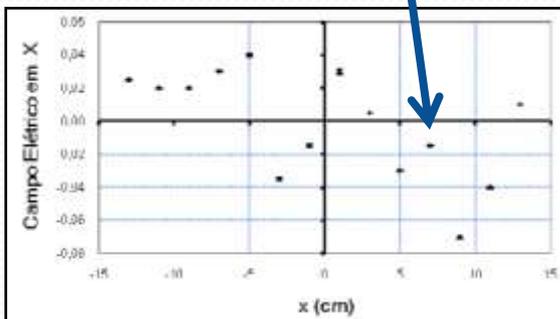
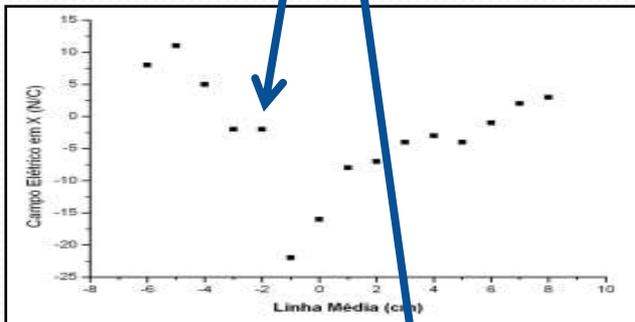


Campo elétrico

- A maioria não indicou a posição das placas... Difícil julgar se o campo é ou não constante em cada região e onde estão os efeitos de borda

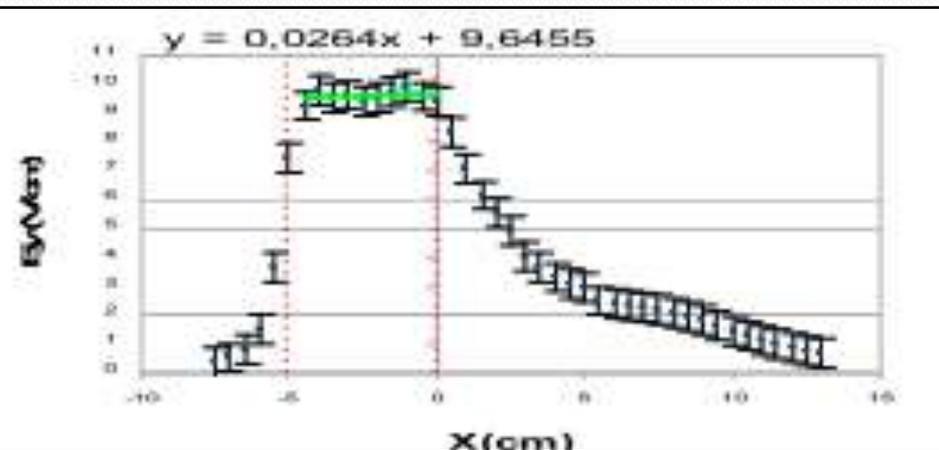
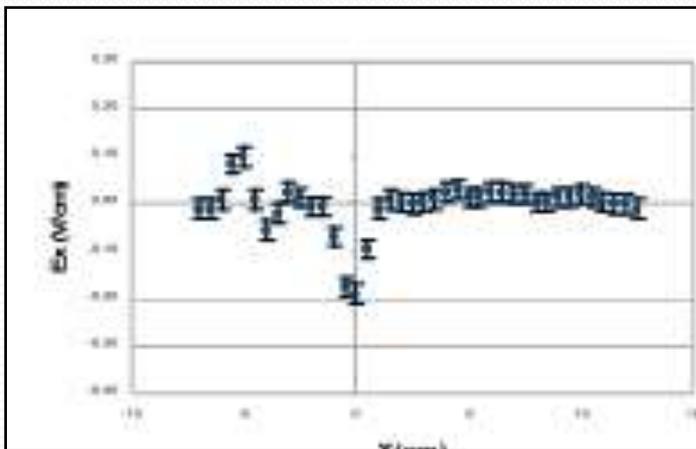
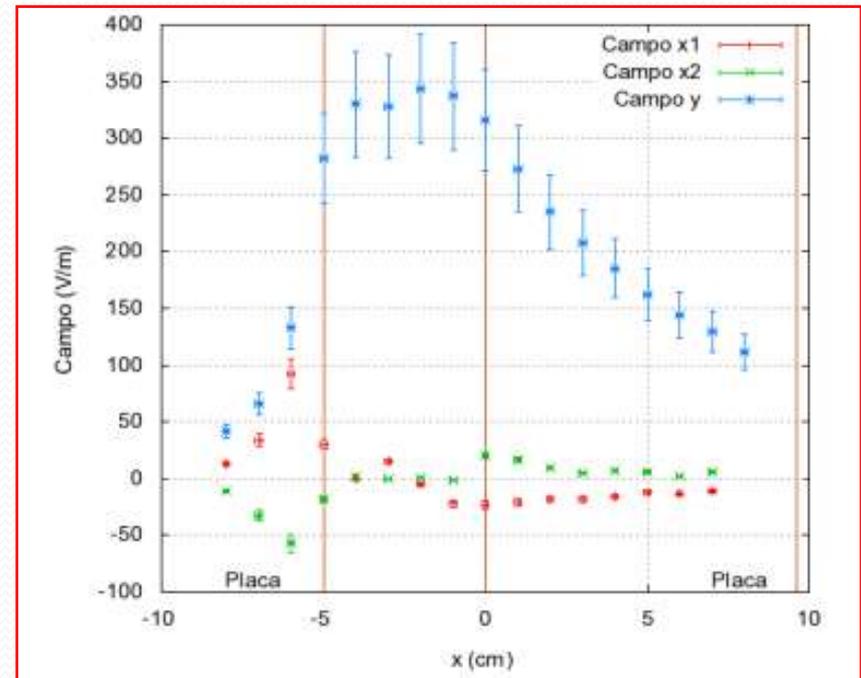


Cuidado com as incertezas!



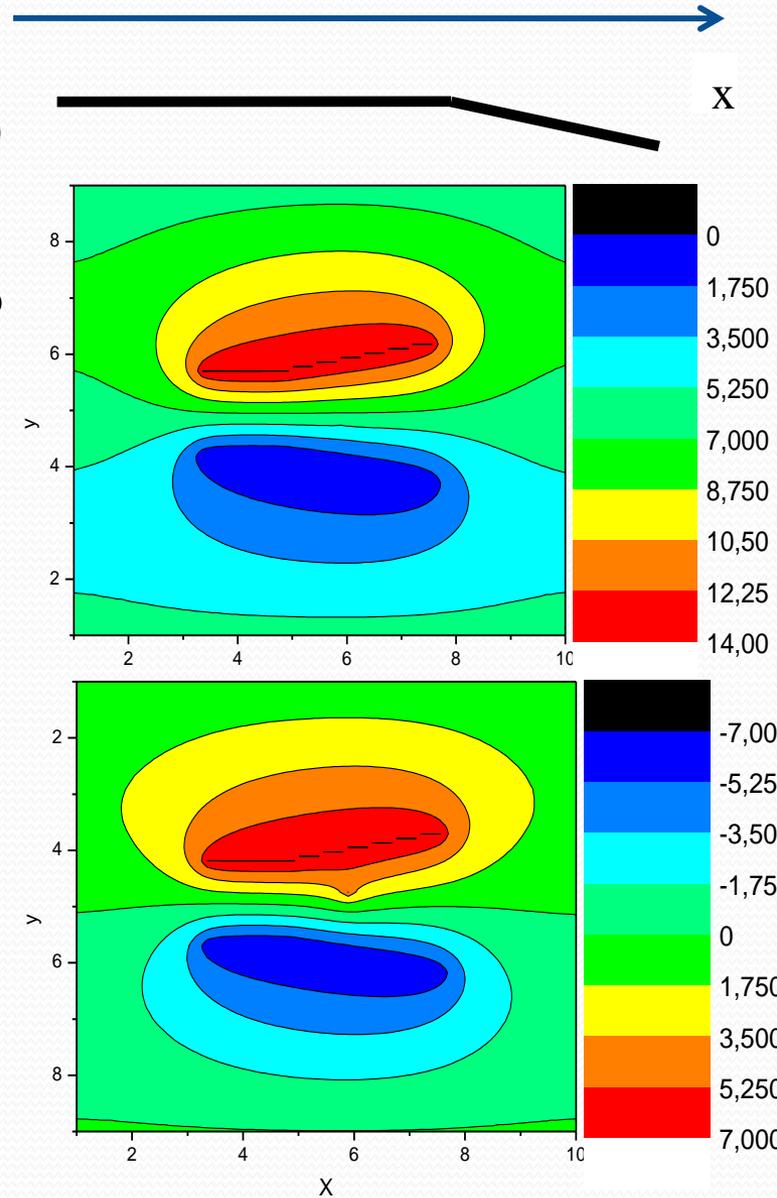
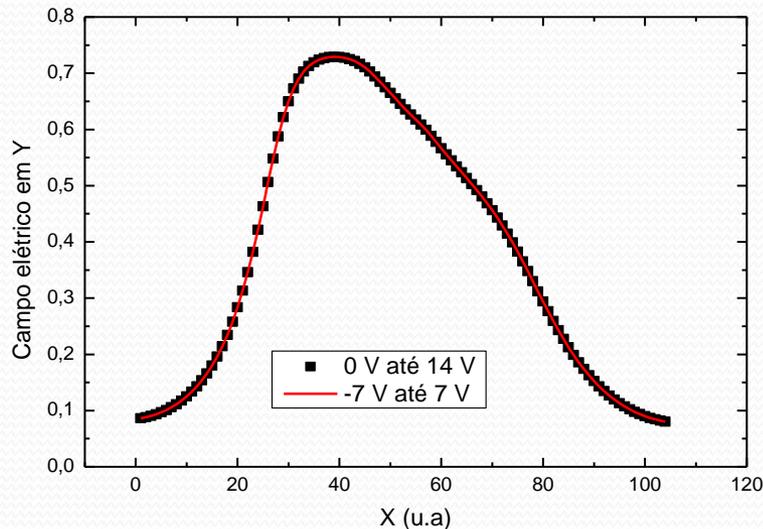
Campo elétrico

- Vejam a diferença nestes gráficos...



Simetrias...

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



Atividades para 19/10 – Parte 4

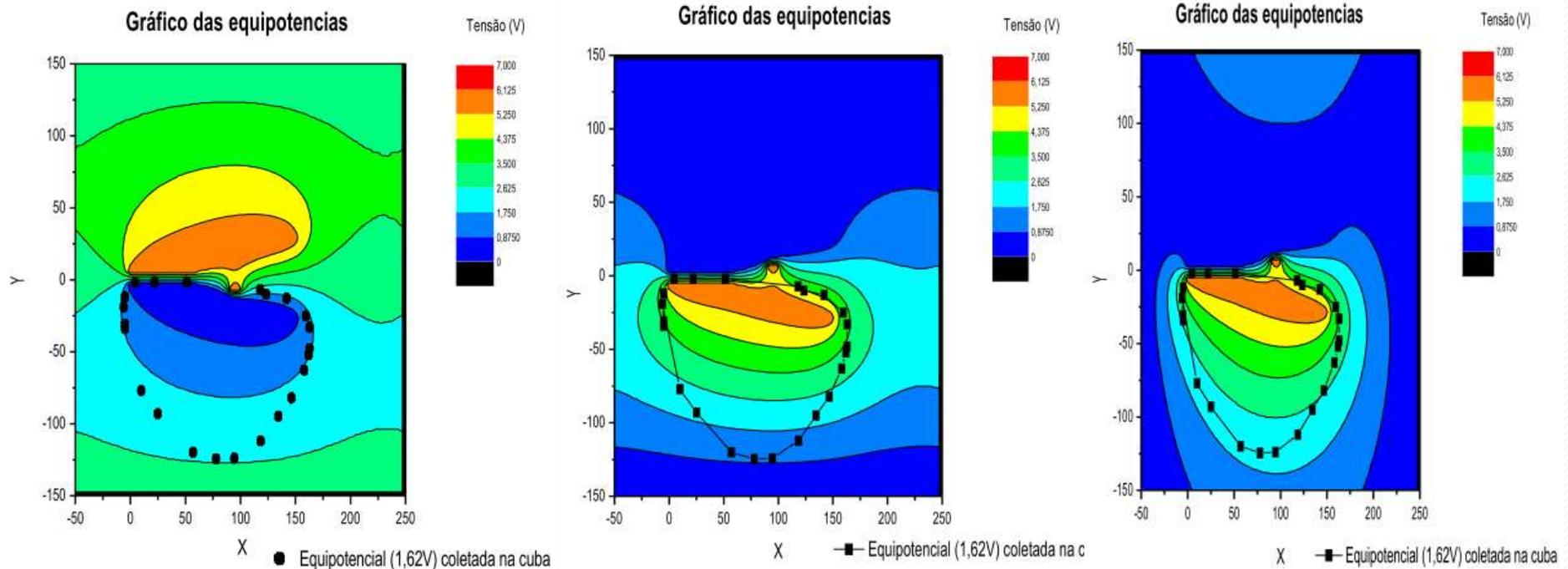
- Implementar a geometria das placas utilizadas no Excel e resolver o problema numericamente.
 - Tem também o programa FEMM, que faz a mesma coisa (quem quiser tentar). VEJAM o tutorial no meu site!!!
- Calcular as componentes do campo ao longo do eixo de simetria e superpor aos dados experimentais
 - Entregar os gráficos com a simulação superposta aos dados experimentais (E_x , E_y e equipotencial).
- O que parece mais preciso: a simulação na cuba ou no software?

Atividades para 19/10 – Parte 5

- A partir dos seus resultados:
 - O campo elétrico é uniforme? Há efeitos de borda?
- Tente estimar:
 - Qual é o campo elétrico médio (constante) que uma partícula sentiria ao atravessar essas placas ao longo do eixo de simetria?
 - Qual é o tamanho efetivo das placas (se fosse um capacitor de placas paralelas)?
- Discuta como você chegou a esses valores.

Cuba vs Simulação – boa análise

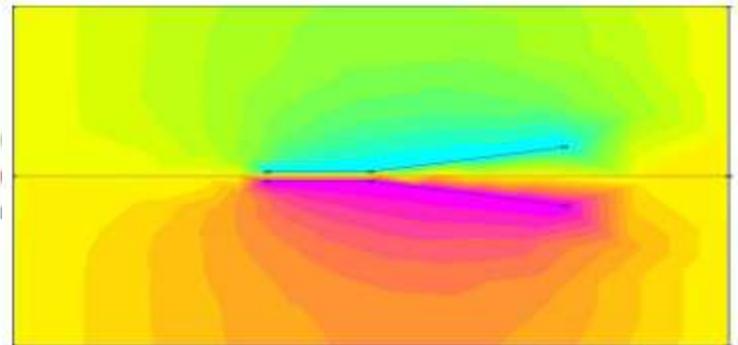
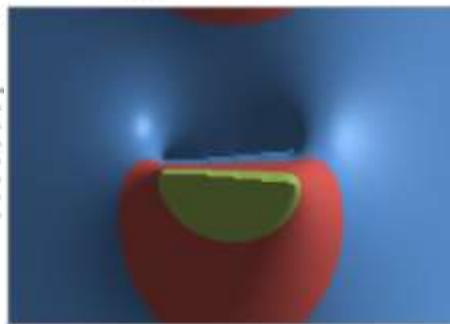
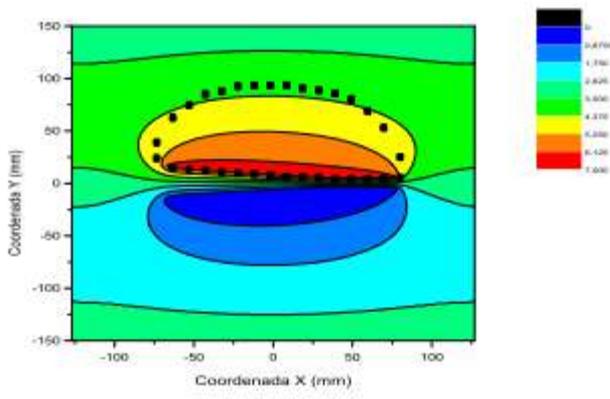
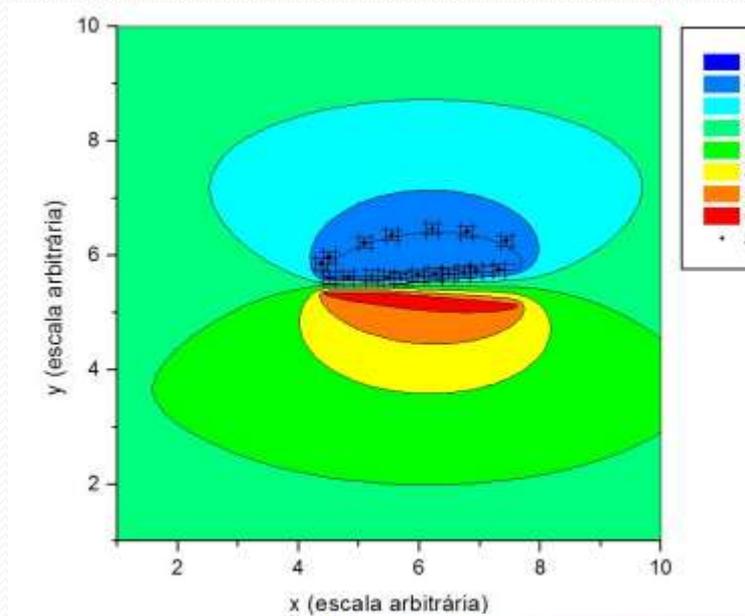
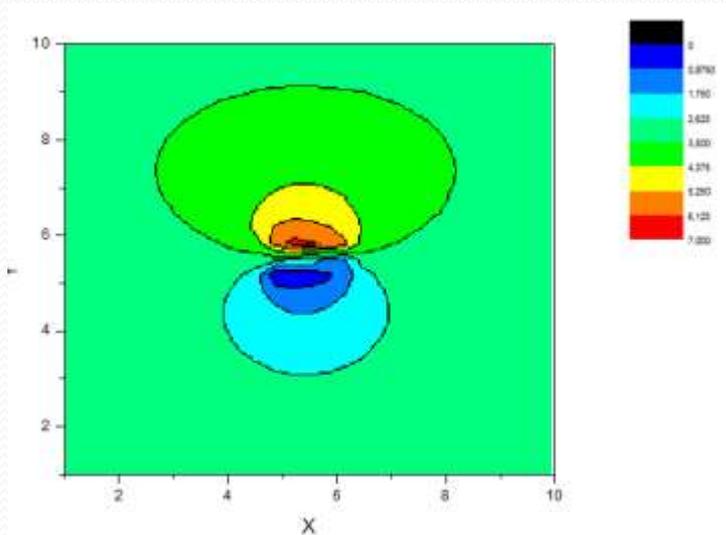
- 3 condições de contorno diferentes. Nenhuma está perfeita, mas percebe-se muito bem o efeito.



O grupo achou essa melhor....

Eu achei esta aqui.

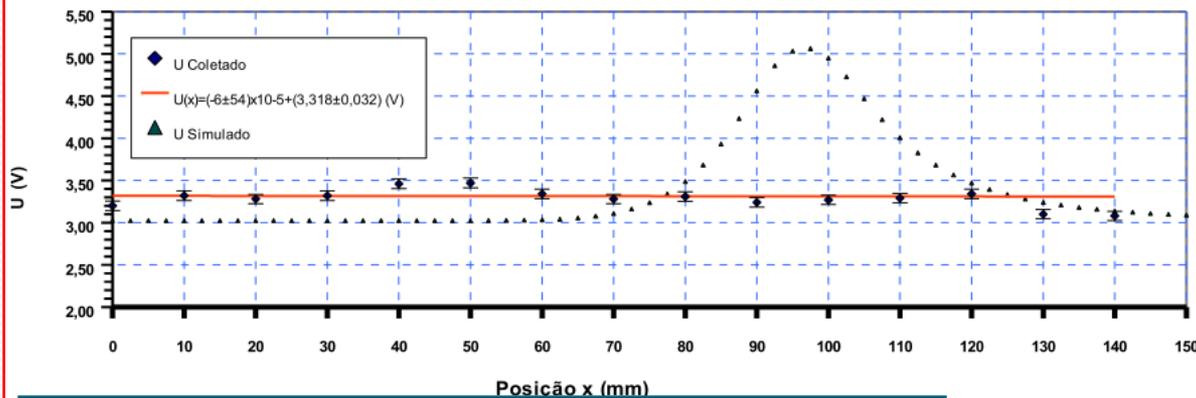
Comparação Cuba x Sim. Numérica



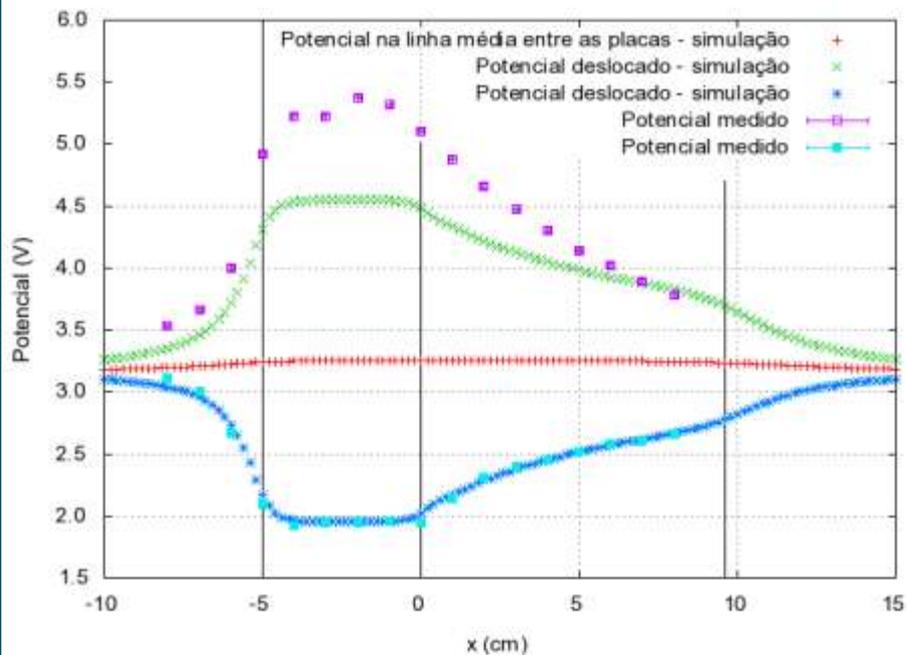
Alguns grupos não colocaram os pontos medidos na cuba!

Potencial

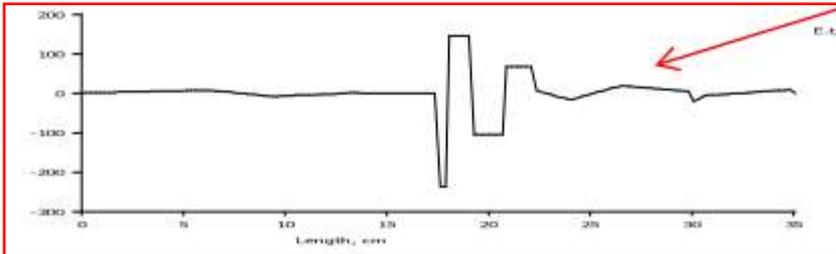
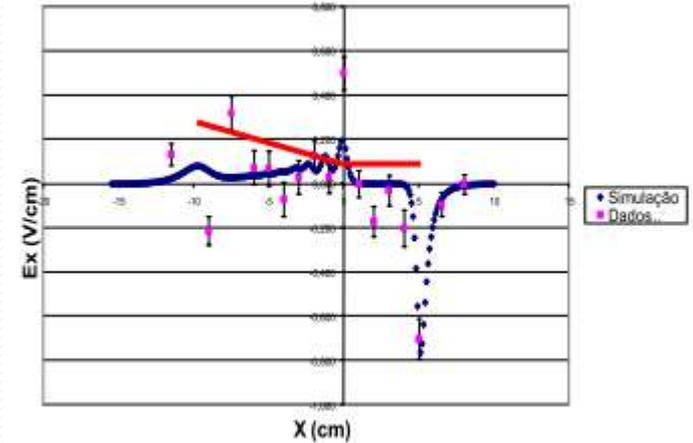
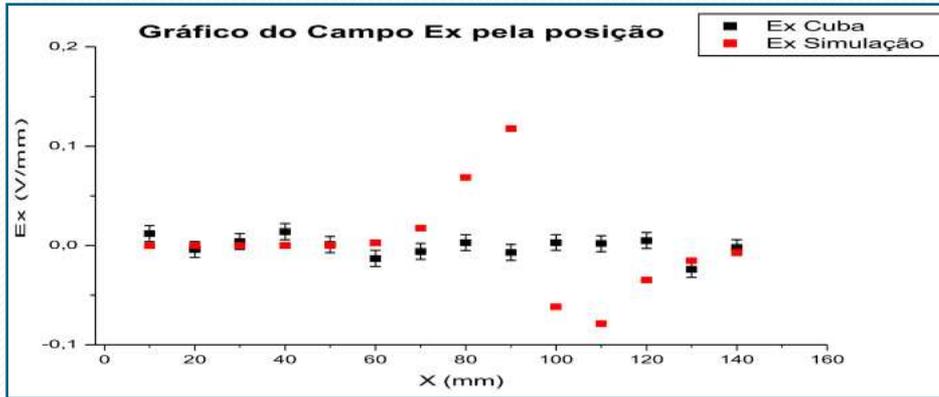
POTENCIAL U COLETADO VS SIMULADO NA LINHA Y = 0



A maioria esqueceu de fazer o gráfico do potencial ao longo do eixo de simetria e/ou esqueceu de comparar com os dados da cuba.



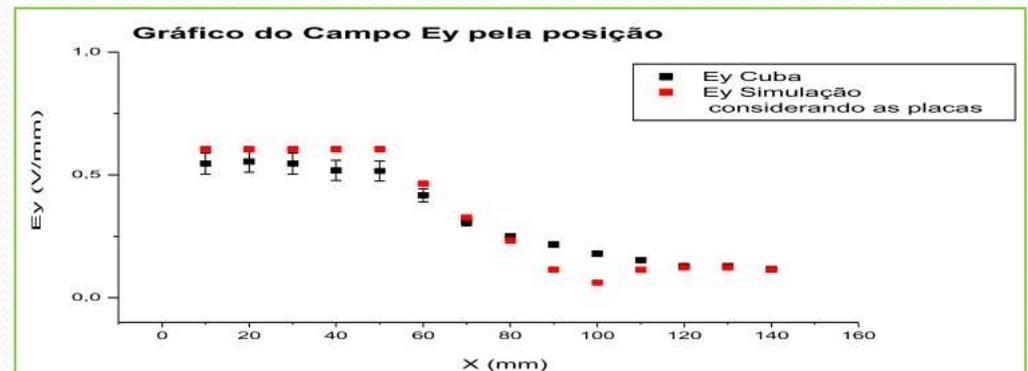
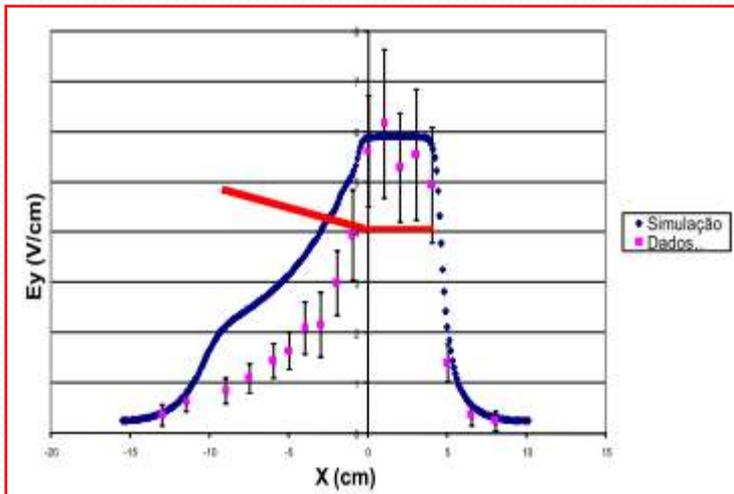
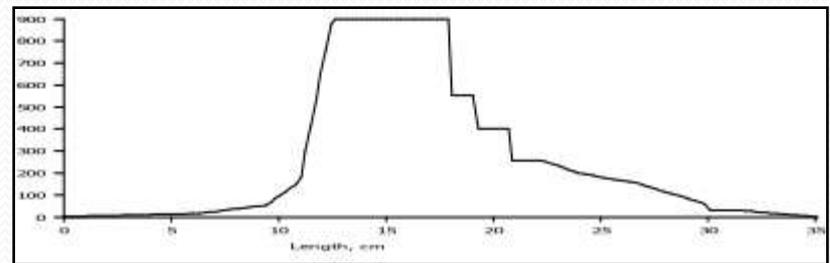
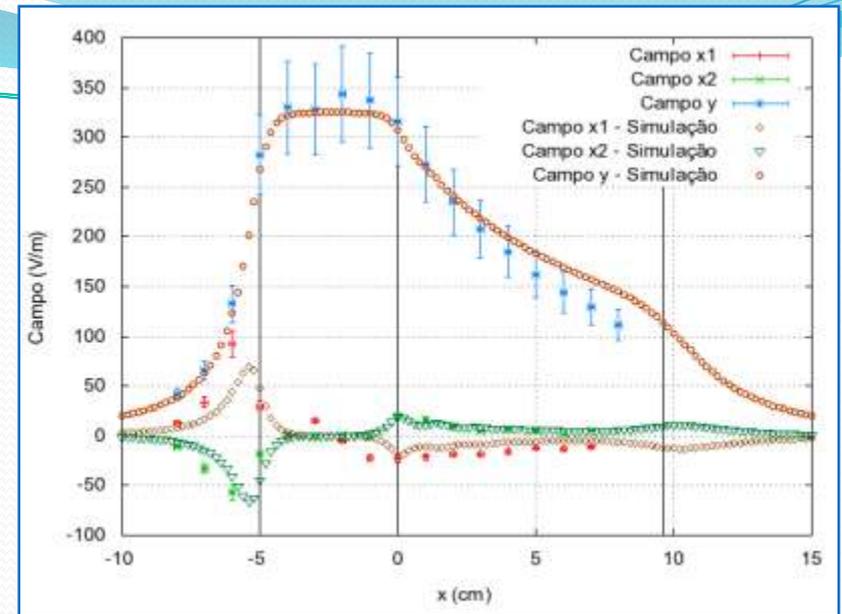
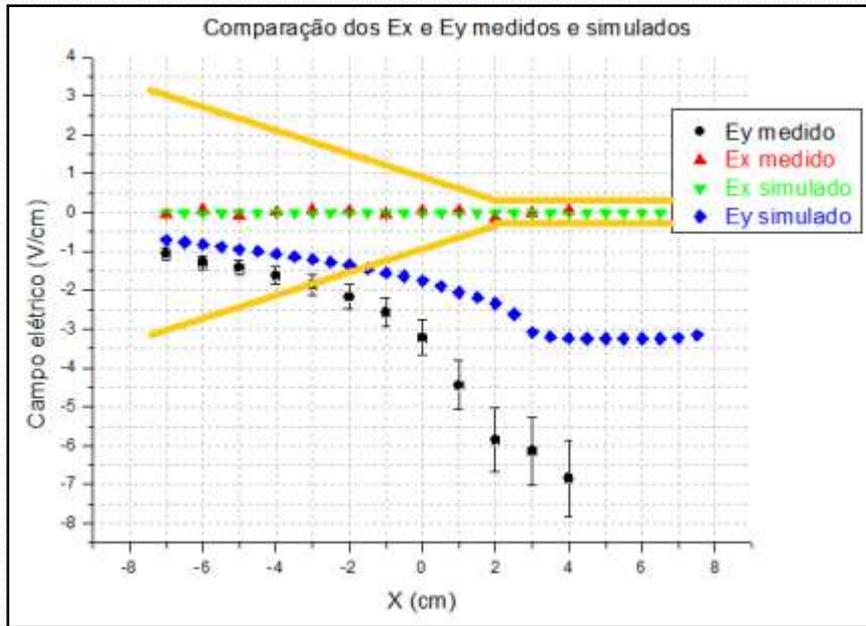
Campo em x



Neste caso o problema foi a resolução da simulação...

- O campo em x devia ser nulo... Então, ao fazer o gráfico apenas de Ex, aparece como um ruído...

Campo em y

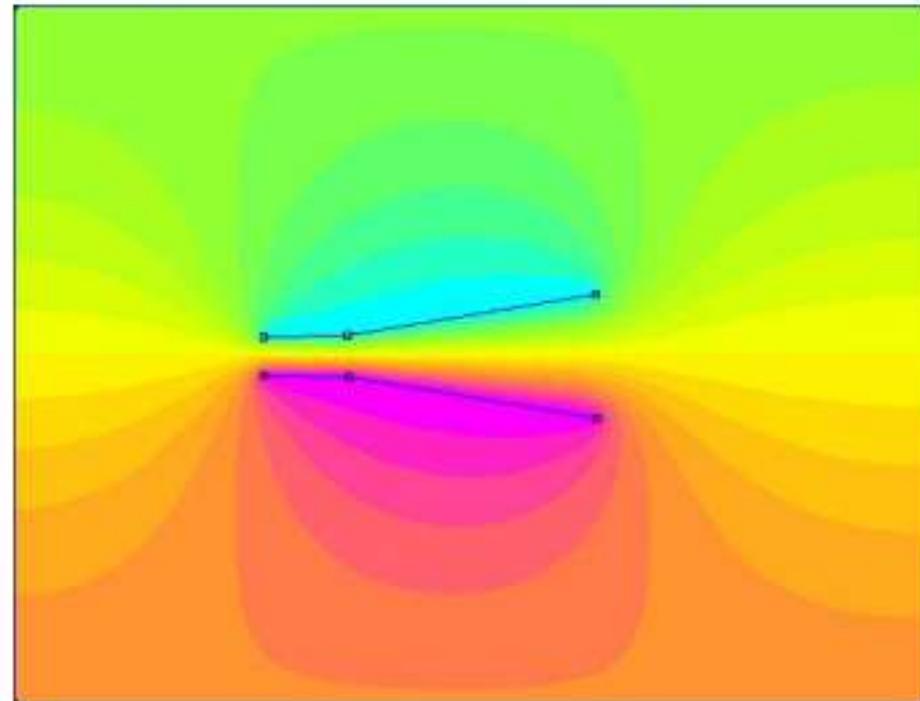
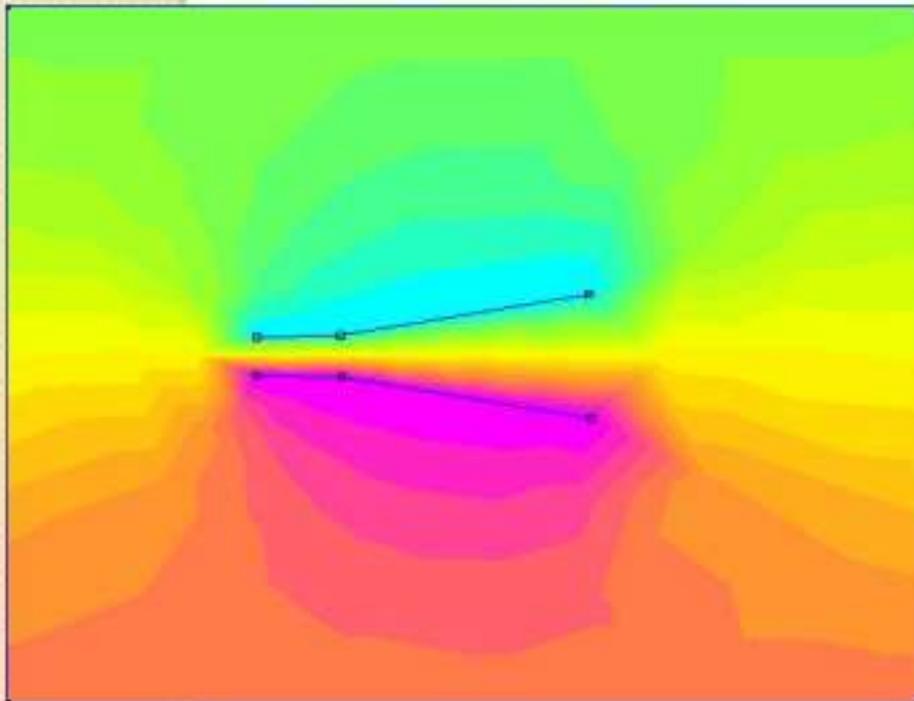
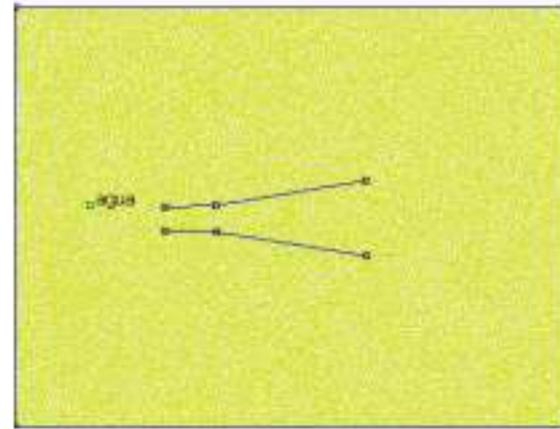
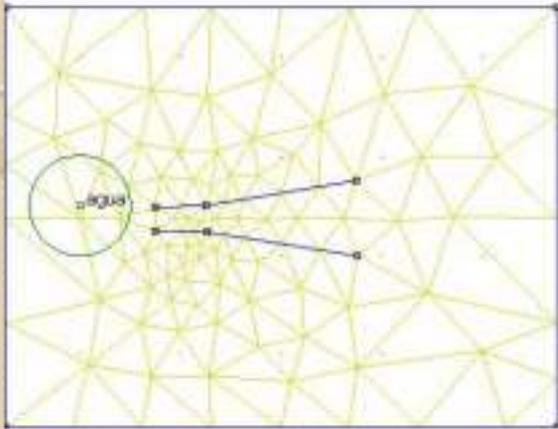


Porque a simulação não deu muito bem?

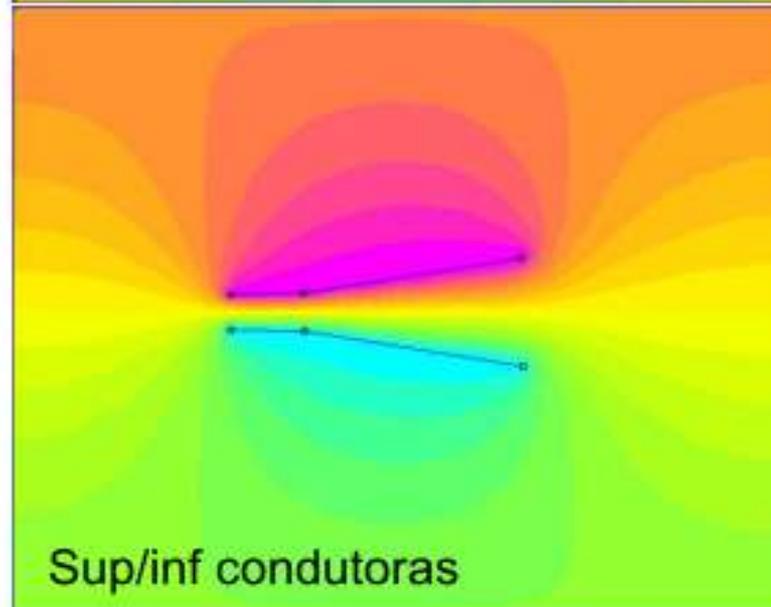
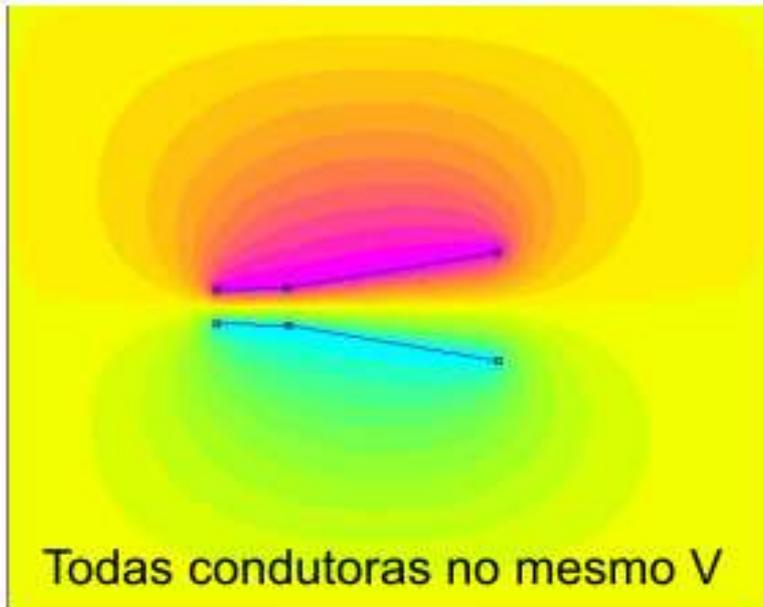
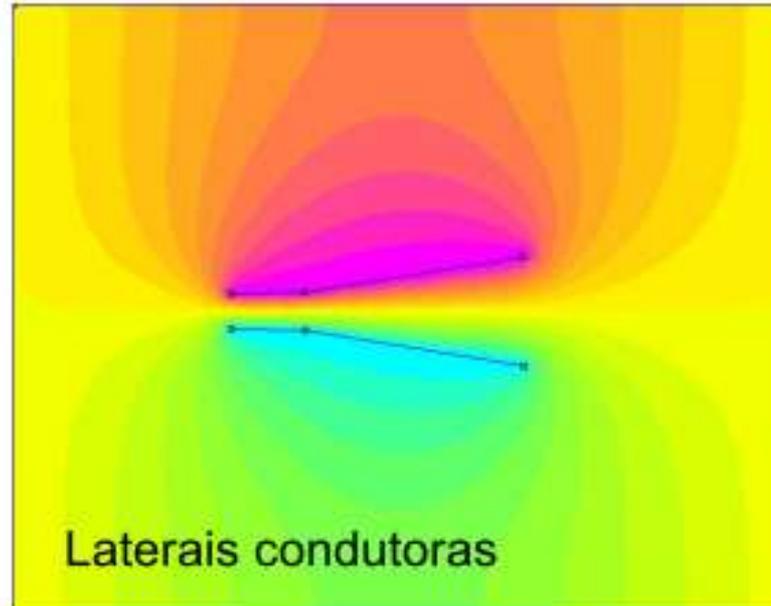
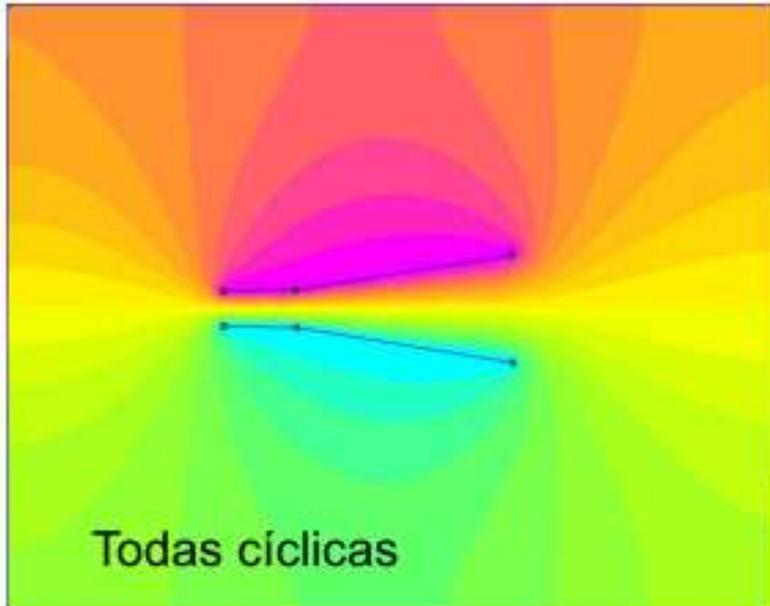
Alguns pontos relevantes.

- Geometria do problema.
 - Tamanho e posição das placas.
 - Tamanho da cuba.
- Qual a tensão entre as placas?
 - Resistor de proteção provoca queda de tensão.
- Quais as condições de contorno nas bordas da cuba?
 - Dois condutores + dois isolantes.
- Qual a precisão da simulação?
 - Resolução espacial pode alterar o resultado!

O efeito do tamanho do mesh



Condições de contorno nas bordas



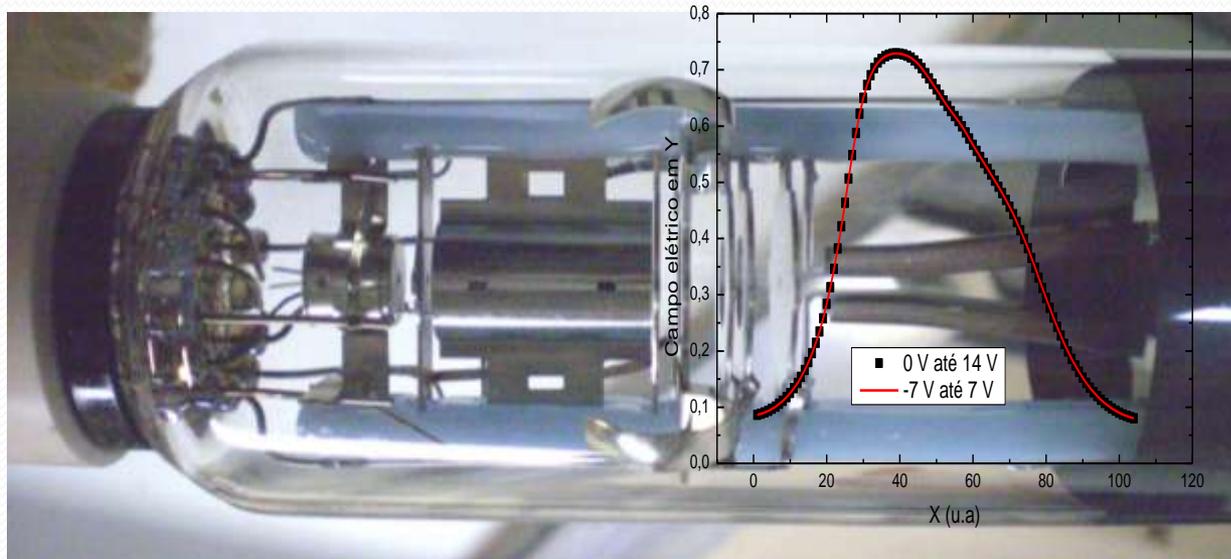
Exp. 2 – Seletor de Velocidades

PROGRAMAÇÃO

- Semana 1
 - Mapear o campo elétrico das placas defletoras
- Semana 2
 - Simular o campo elétrico das placas defletoras
- Semana 3
 - Estudar a deflexão do feixe em função da tensão entre as placas e da tensão de aceleração
- Semana 4
 - Mapear e simular o campo magnético das bobinas
- Semana 5
 - Estudar a deflexão do feixe em função da corrente nas bobinas e da tensão de aceleração
- Semana 6
 - Calibrar e obter a resolução do seletor de velocidades

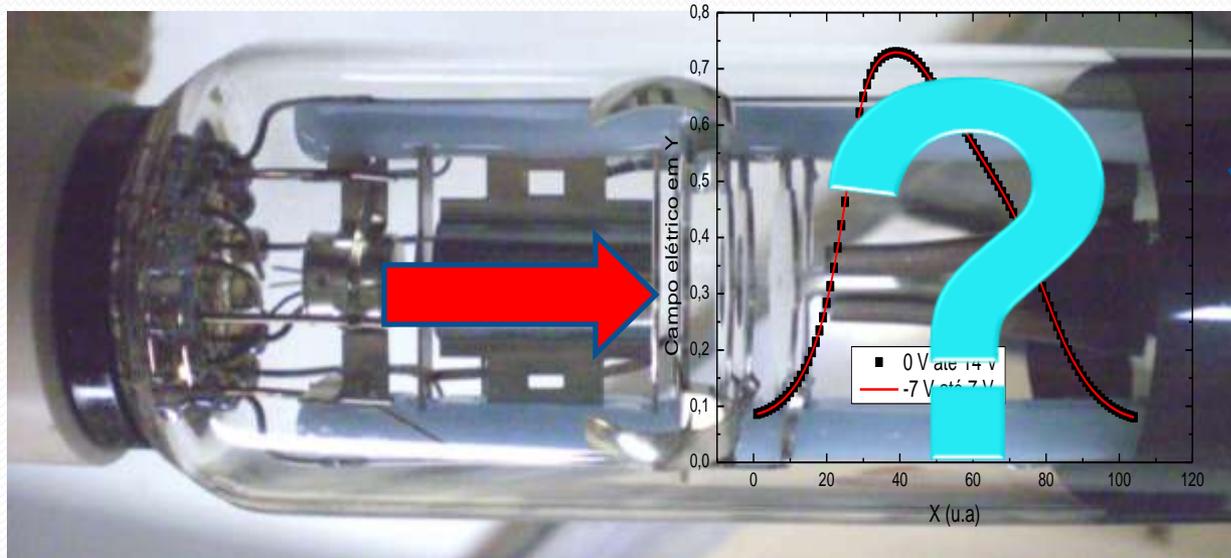
O que nós já sabemos

- Campo elétrico entre as placas
 - Experimental e teórico (!)



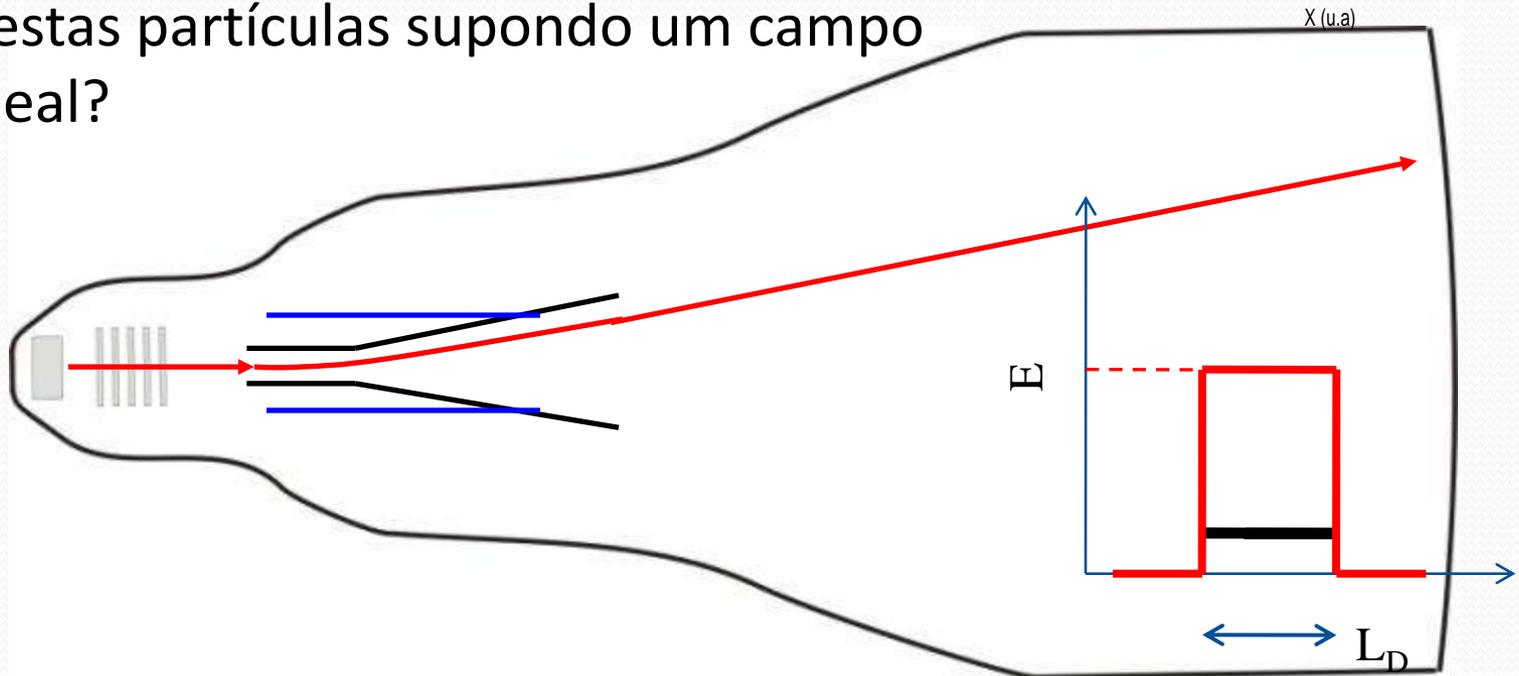
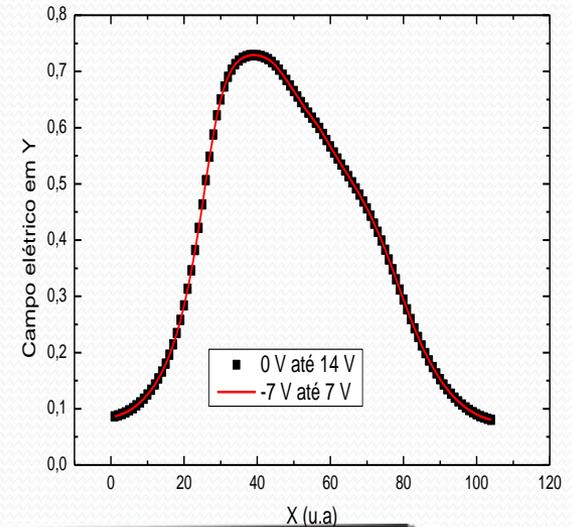
O Próximo passo

- Como acelerar os elétrons
- Estudar o movimento destes elétrons no campo elétrico entre as placas que foi caracterizado na semana passada.



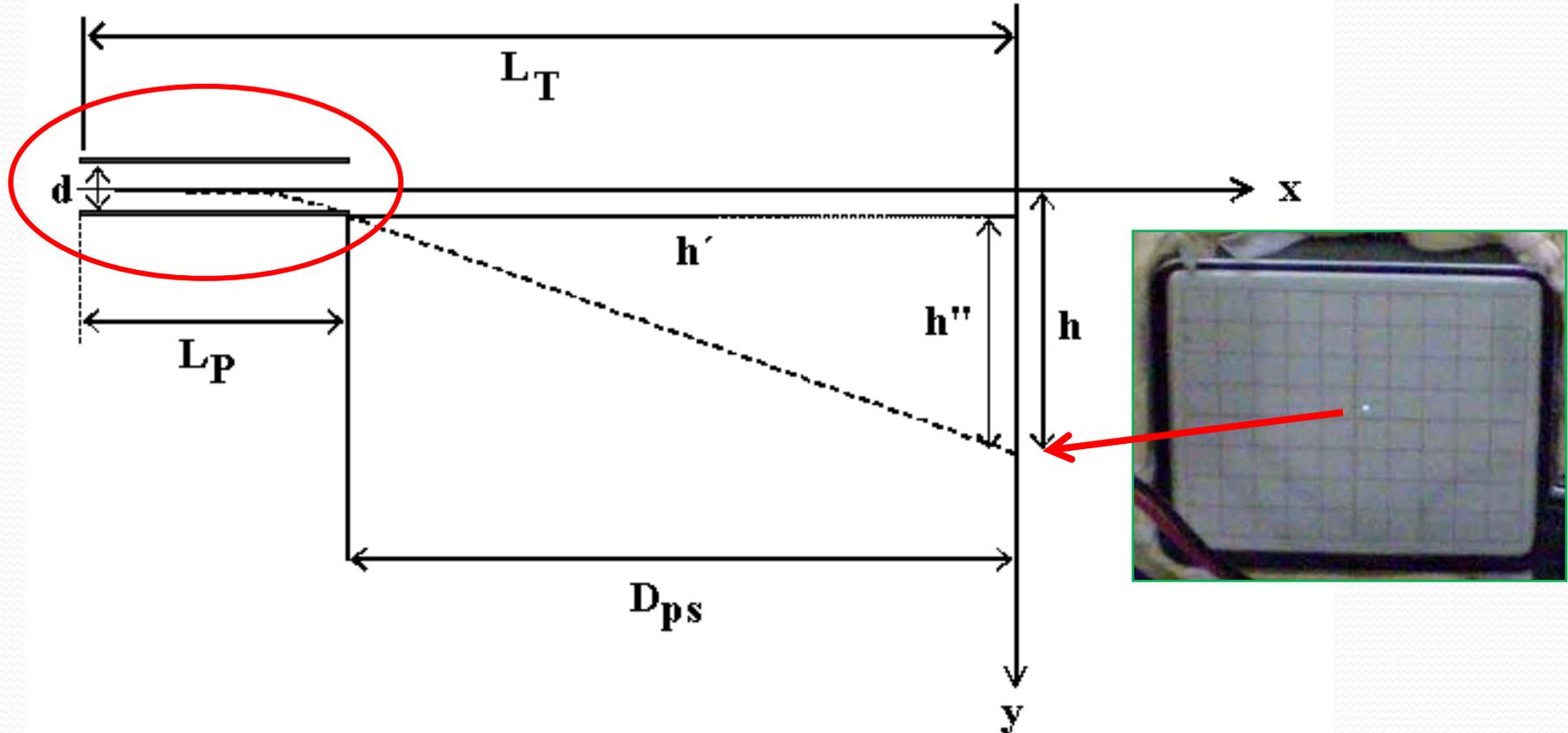
Simplificando o problema

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



Simplificando a geometria...

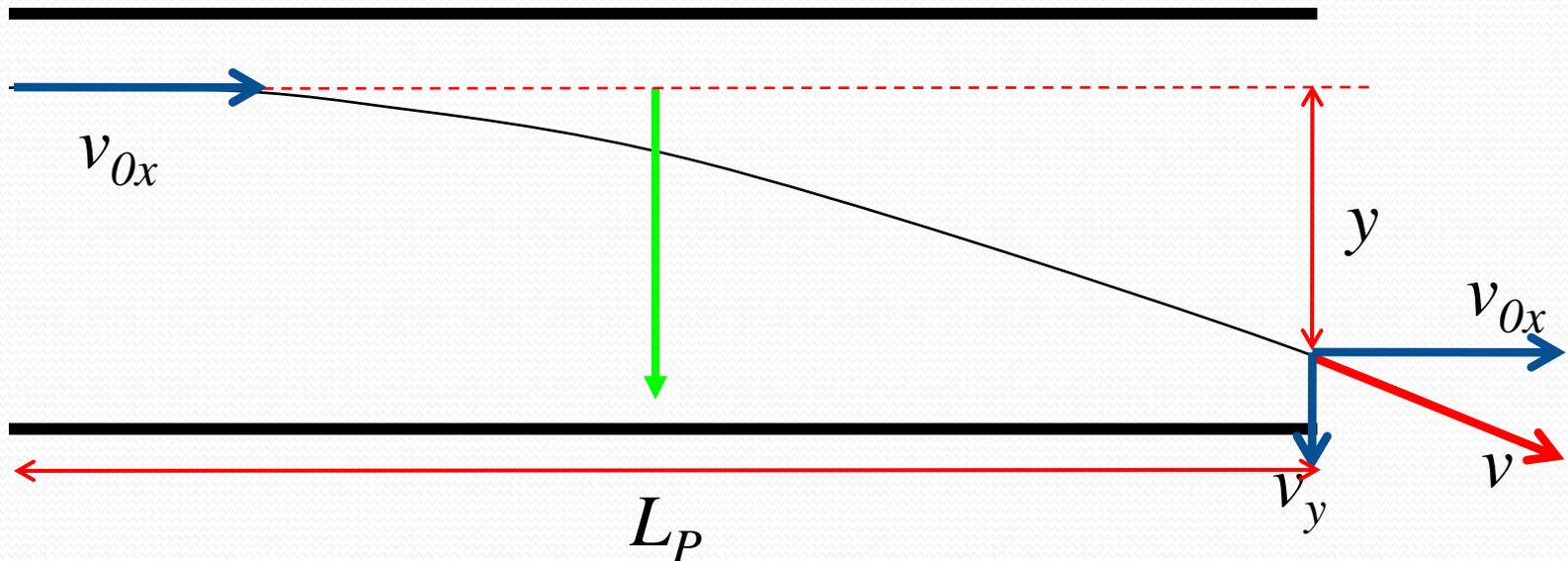
- Sistema de placas paralelas ideais, com um anteparo a uma distância D_{ps} . Qual a deflexão (h) do feixe por estas placas?



Movimento de uma partícula em um campo uniforme

- Movimento uniforme em x

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

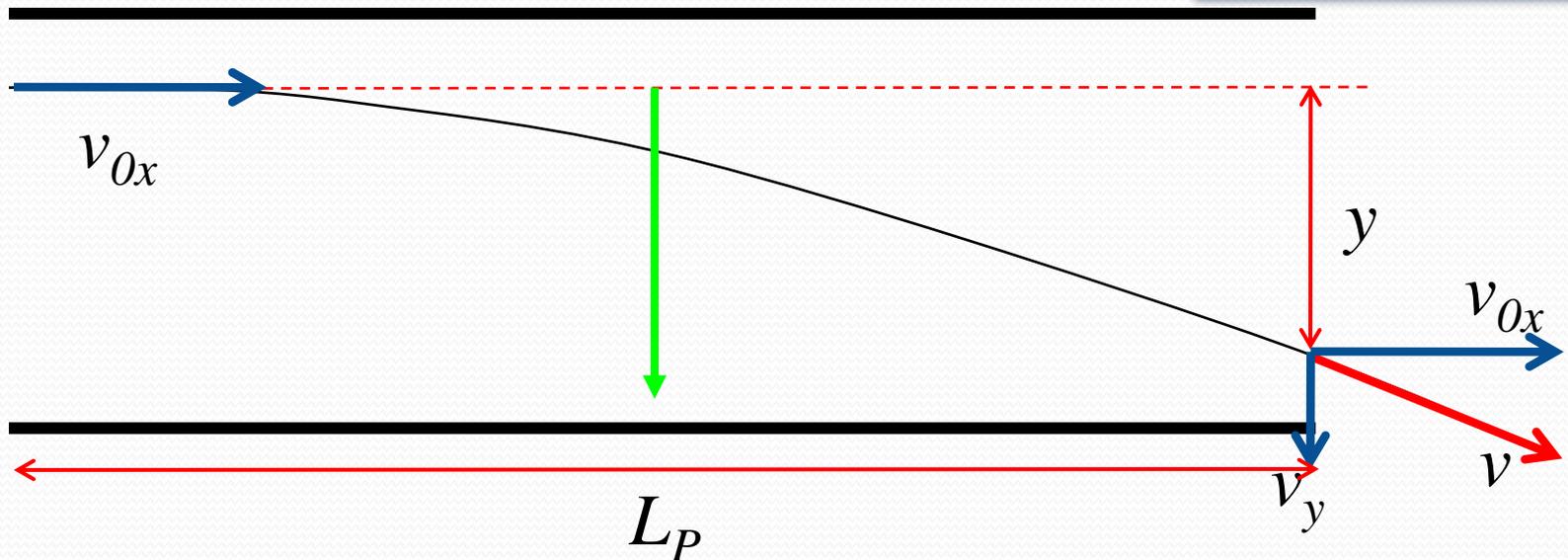


Movimento em um campo uniforme

- Movimento uniformemente variado em y

$$\vec{F} = q\vec{E} \Rightarrow F_y = qE \Rightarrow a_y = \frac{qE}{m}$$

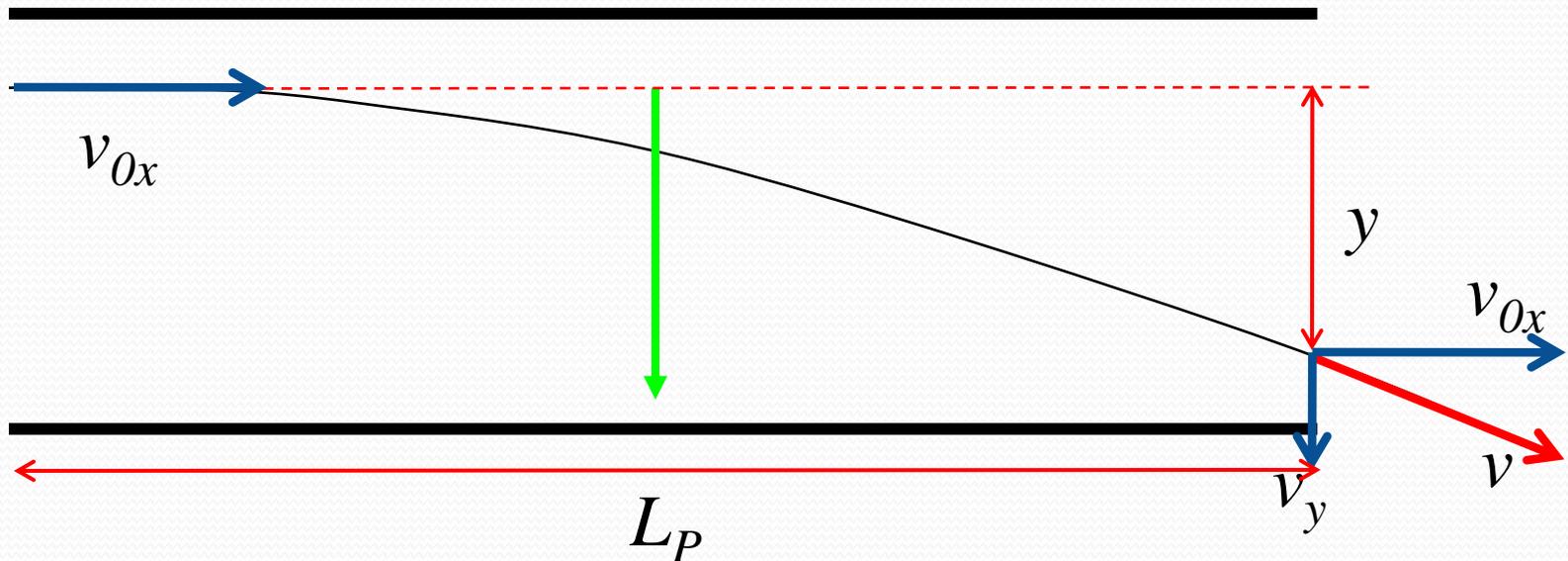
$$v_y = v_{0y} + a_y t \Rightarrow v_y = \frac{qE}{m} t \Rightarrow v_y = \frac{qEL_P}{mv_{0x}}$$



Movimento em um campo uniforme

- Movimento uniformemente variado em y

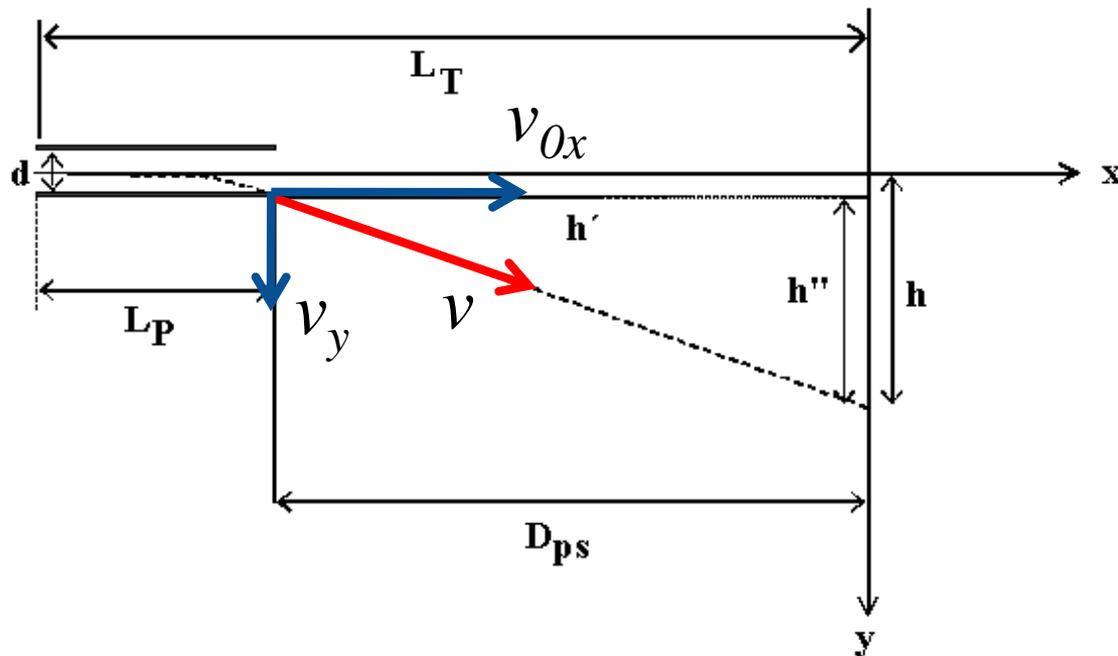
$$y = y_0 + v_{0y}t + \frac{1}{2}a_y t^2 \Rightarrow y = \frac{qE}{2m} \left(\frac{L_P}{v_{0x}} \right)^2$$



Movimento em um campo uniforme

- Após as placas voltamos a ter movimento uniforme (placas paralelas ideais: o campo só existe no interior)

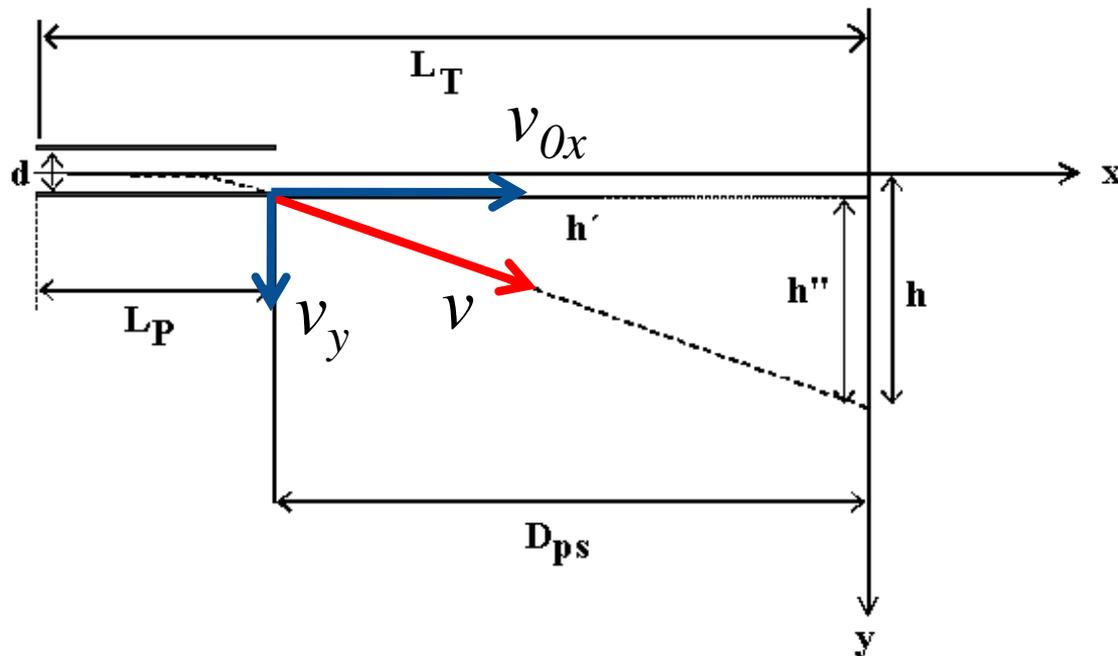
$$t = \frac{D_{PS}}{v_{0x}} \quad h'' = v_y t = \frac{qEL_P}{mv_{0x}} \frac{D_{PS}}{v_{0x}}$$



Movimento em um campo uniforme

- O deslocamento total é a soma dos dois deslocamentos

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



Movimento em um campo uniforme

- O deslocamento total é a soma dos dois deslocamentos

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

- Ou seja:

$$h = A \frac{E}{v_{0x}^2}$$

h é proporcional ao campo elétrico e inversamente proporcional ao quadrado da velocidade

Movimento em um campo uniforme

- Em um capacitor ideal, o campo vale:

$$|E| = VP/d$$

- A velocidade do elétron depende da tensão de aceleração através de:

$$K_{cin} = qV_{AC} \Rightarrow \frac{1}{2}mv_{0x}^2 = qV_{AC}$$

- Ou seja:

$$h = A \frac{E}{v_{0x}^2} = A \frac{V_p / d}{2qV_{AC} / m} = A' \frac{V_P}{V_{AC}}$$

h é proporcional à tensão entre as placas e inversamente proporcional à tensão de aceleração dos elétrons

Movimento em um campo uniforme

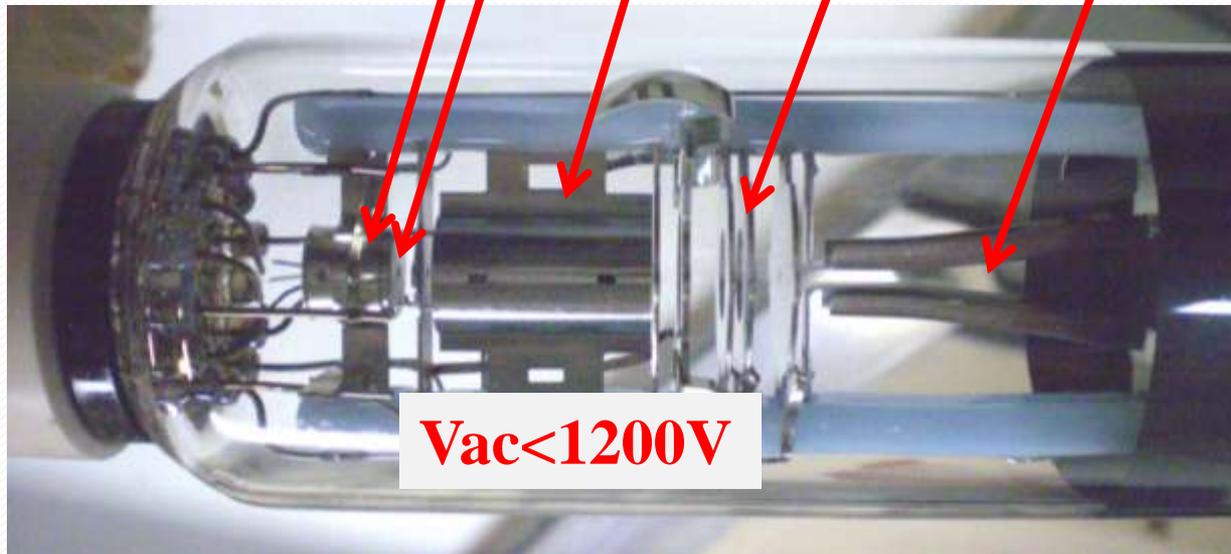
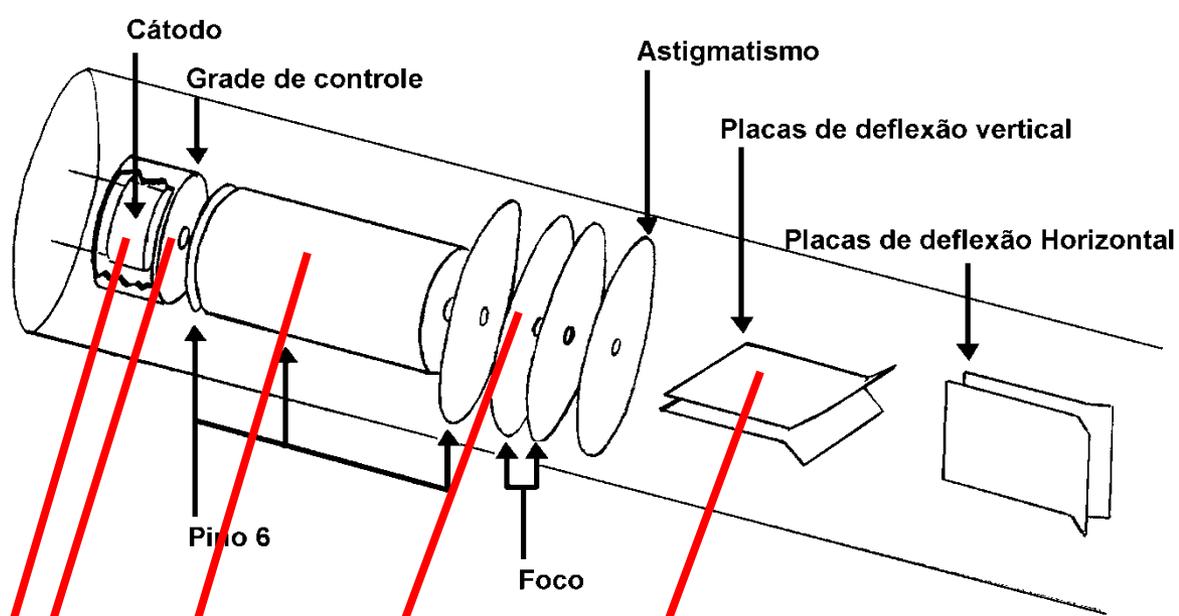
- Em uma situação com um sistema ideal, temos:

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

- 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?

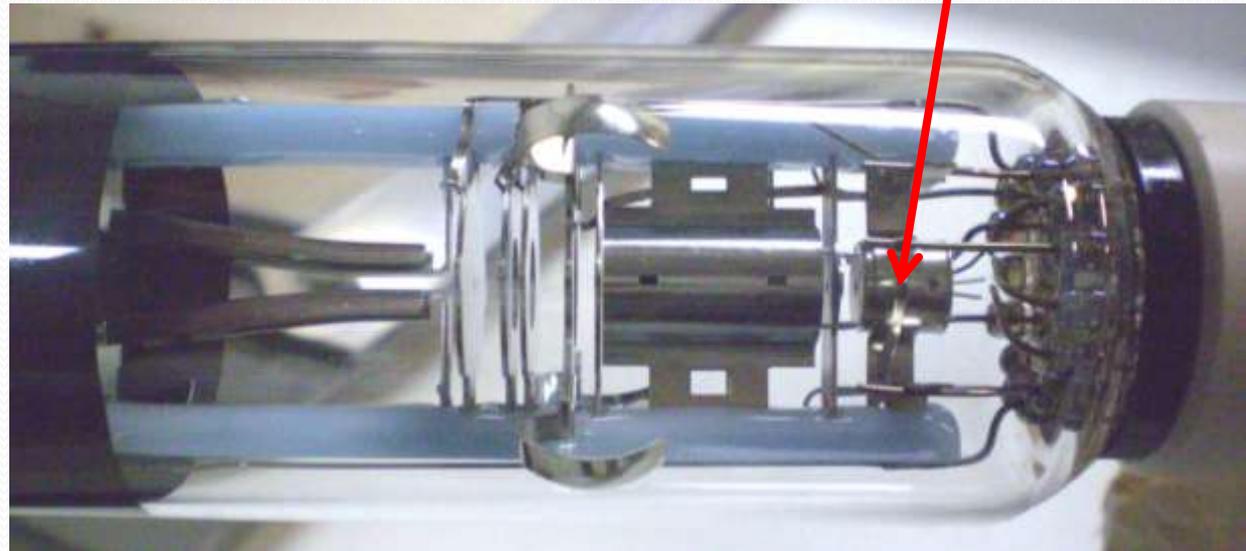
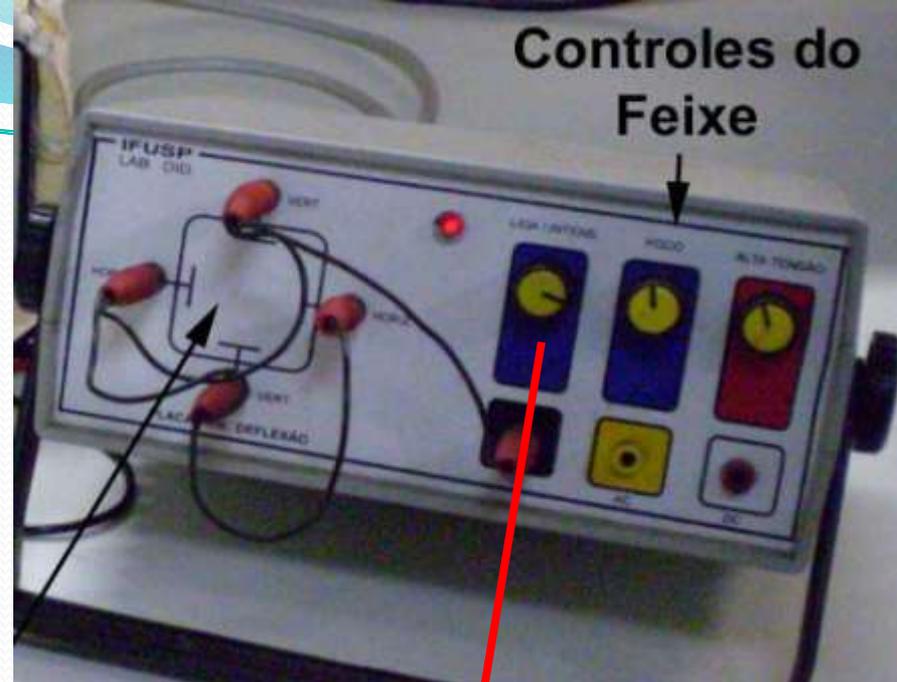
IMPORTANTE!

O TRC



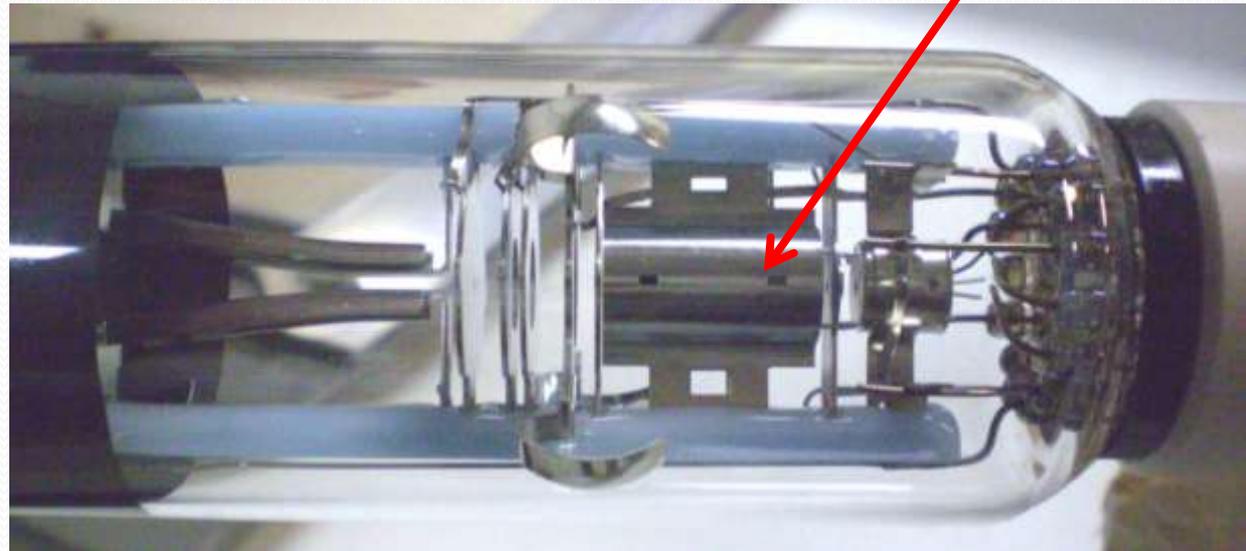
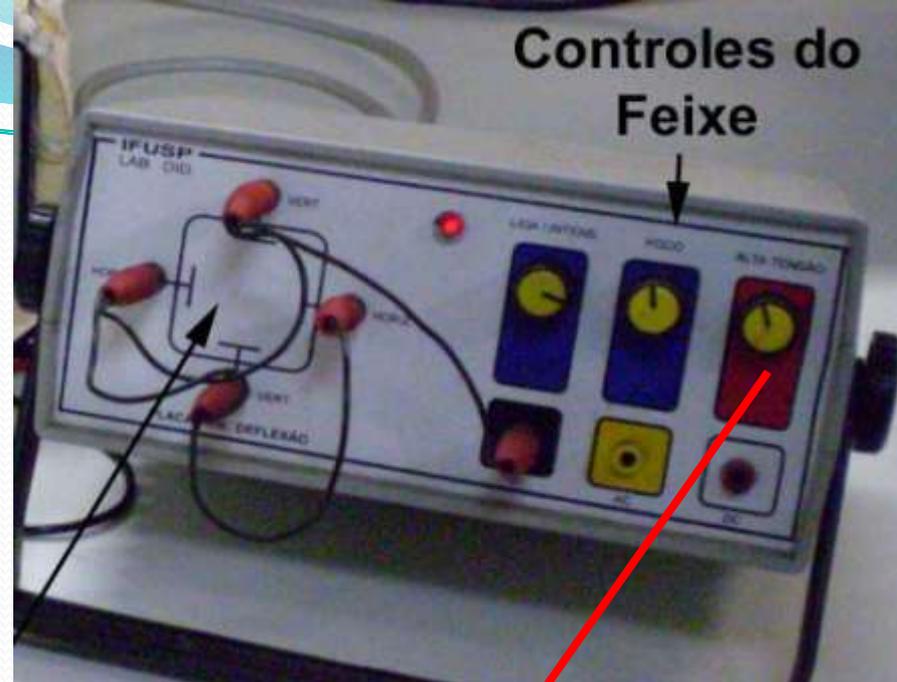
O TRC

- Liga TRC
- Controla intensidade do feixe (temperatura)



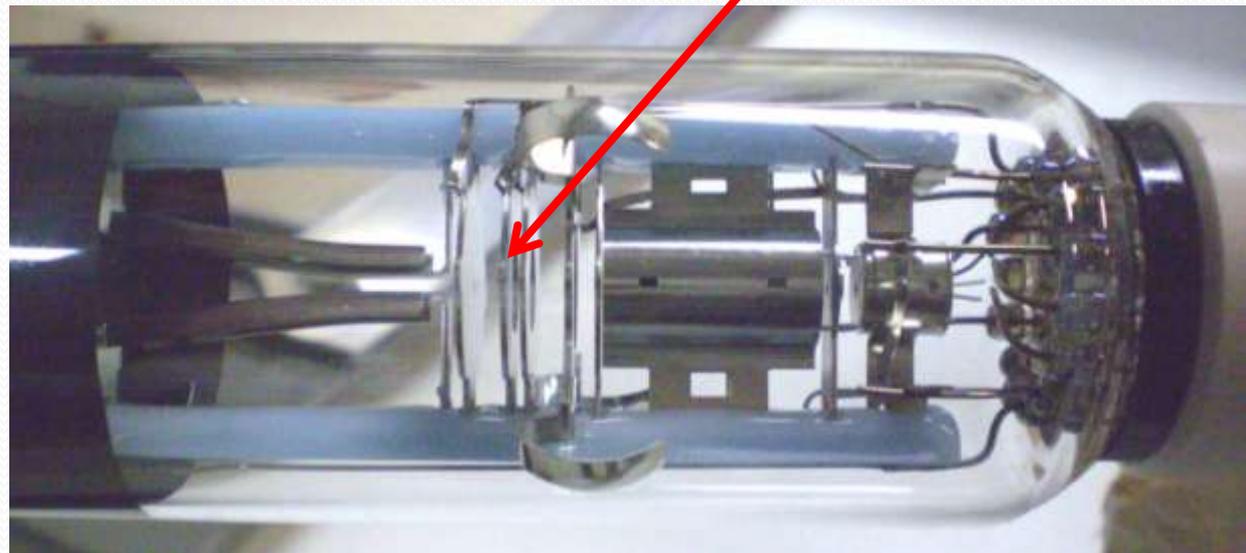
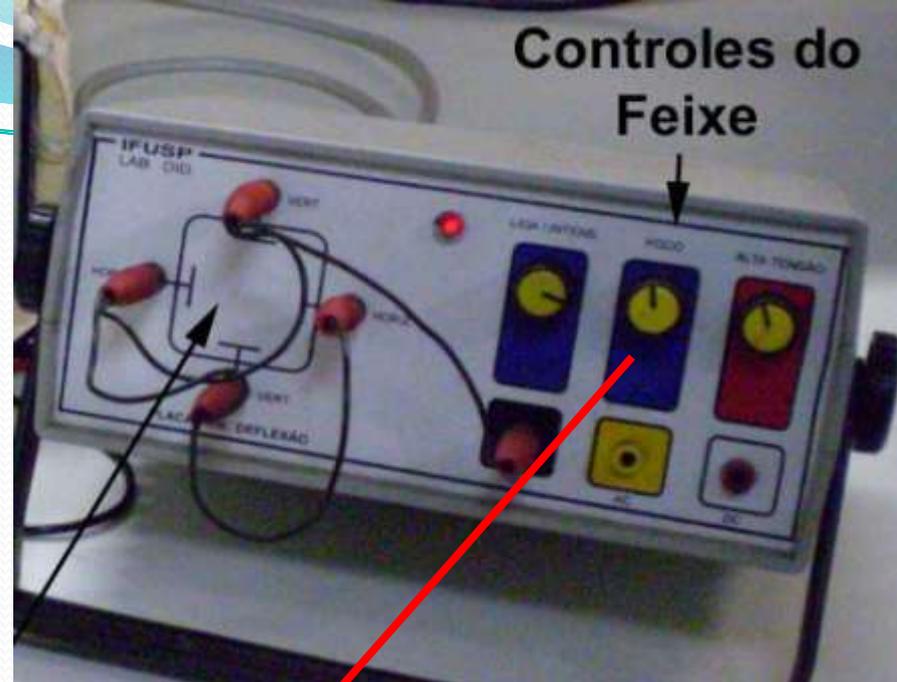
O TRC

- Alta tensão (até 1200 V)
- Acelera feixe
 - $E_{cin} = qV$



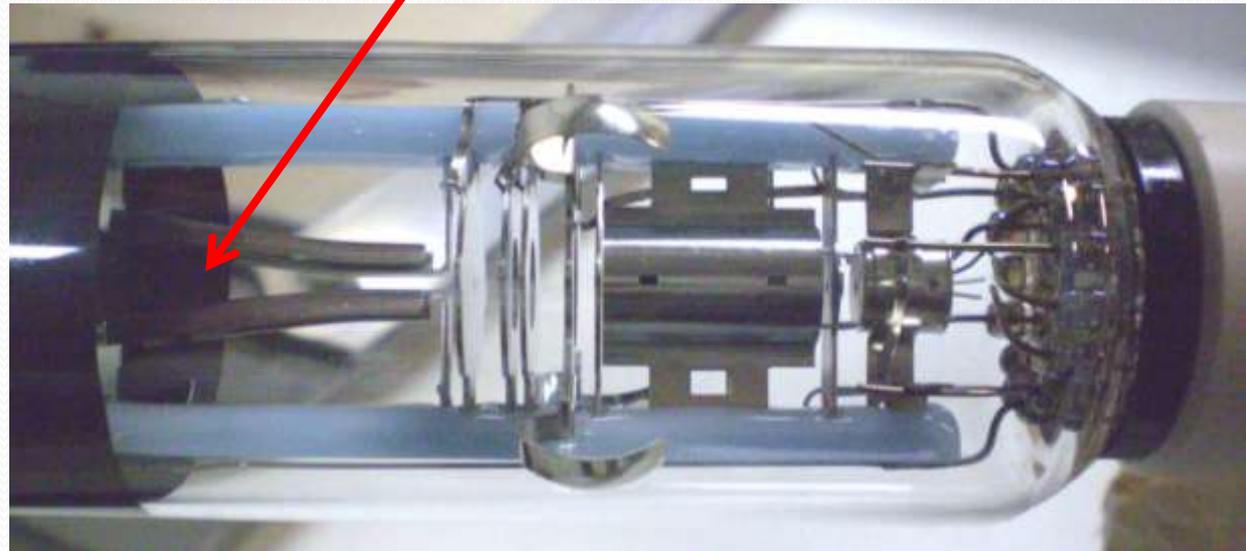
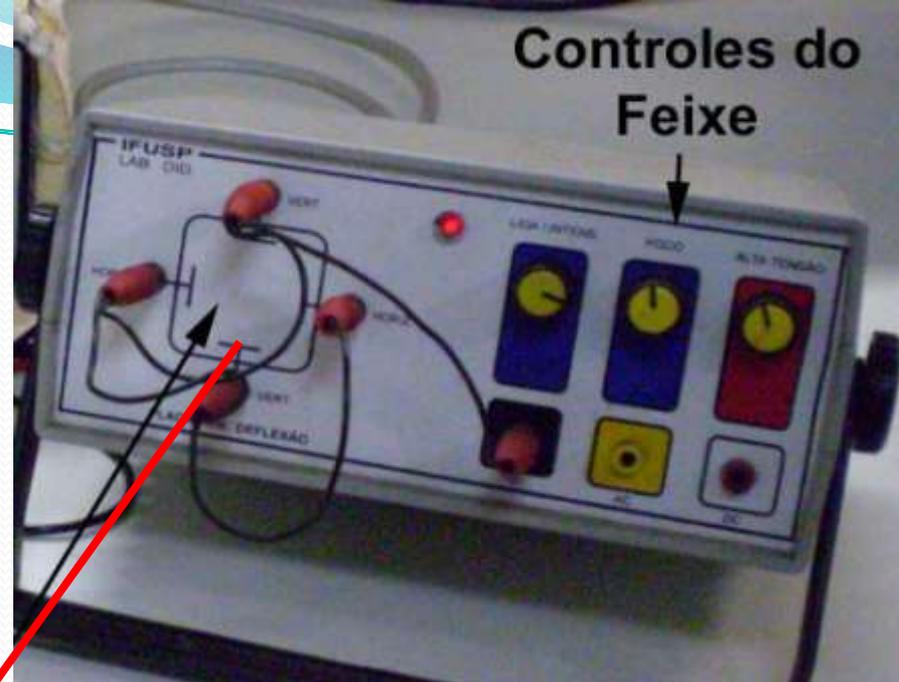
O TRC

- Sistema de focalização
 - *Lentes eletrostáticas*



O TRC

- Controle das tensões nas placas defletoras
 - *Horizontais e verticais*
 - *Fonte externa*



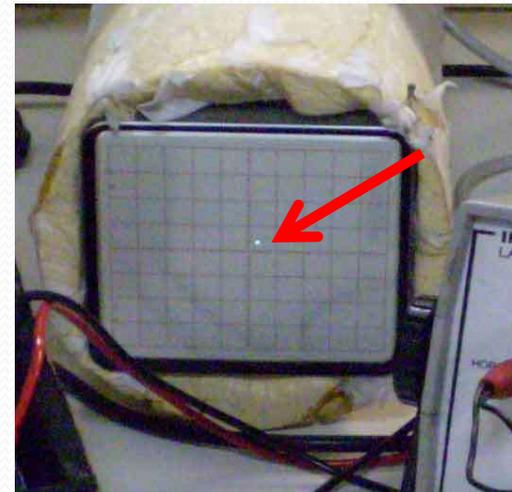
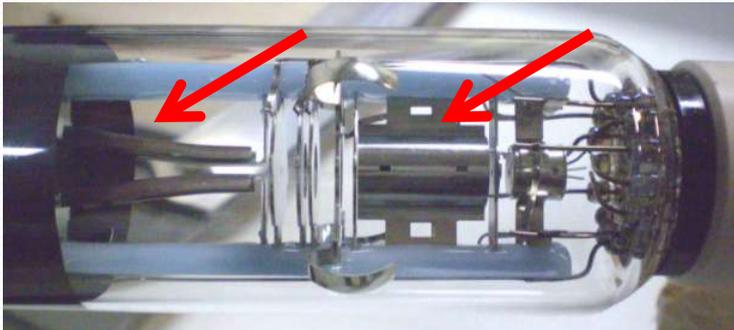
Medidas que podemos efetuar

- Quais as grandezas que temos controle e que podemos medir?
 - Tensão de aceleração dos elétrons
 - Ou velocidade, facilmente calculada
 - Tensão entre as placas
 - Proporcional ao campo elétrico aplicado
- Quais as grandezas que podemos apenas medir?
 - Posição do feixe de elétrons na tela do TRC

Atividades da Semana (parte 1)

IMPORTANTE!

- Estudar como a deflexão (H , deslocamento do feixe) depende da tensão entre as placas (V_P) e da tensão de aceleração (V_{AC})
 - Fazer gráfico de H em função de V_P para V_{AC} fixo
 - Fazer gráfico de H em função de V_{AC} para V_P fixo
 - Tomar cuidado de escolher a variável fixa de modo a poder **aproveitar toda a tela do osciloscópio**

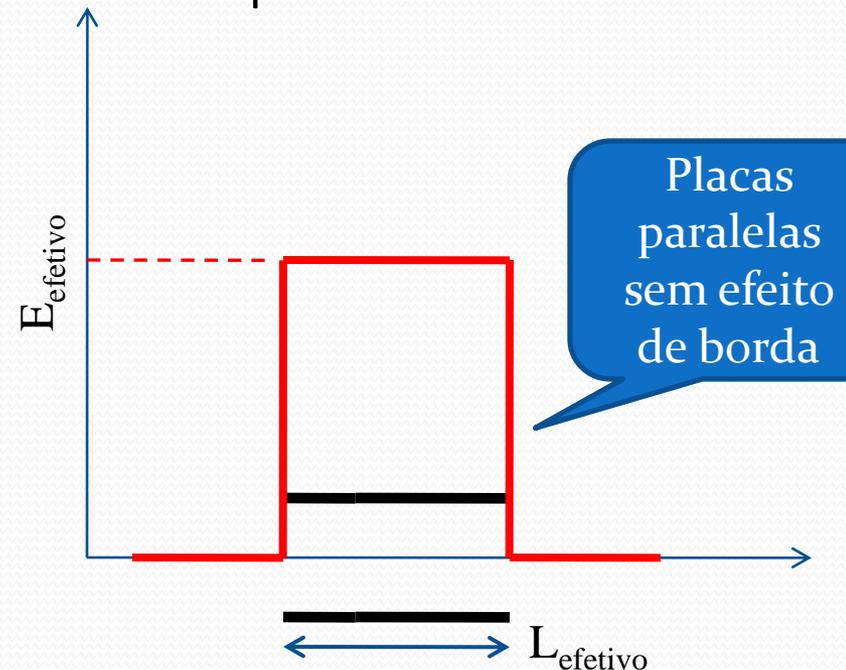
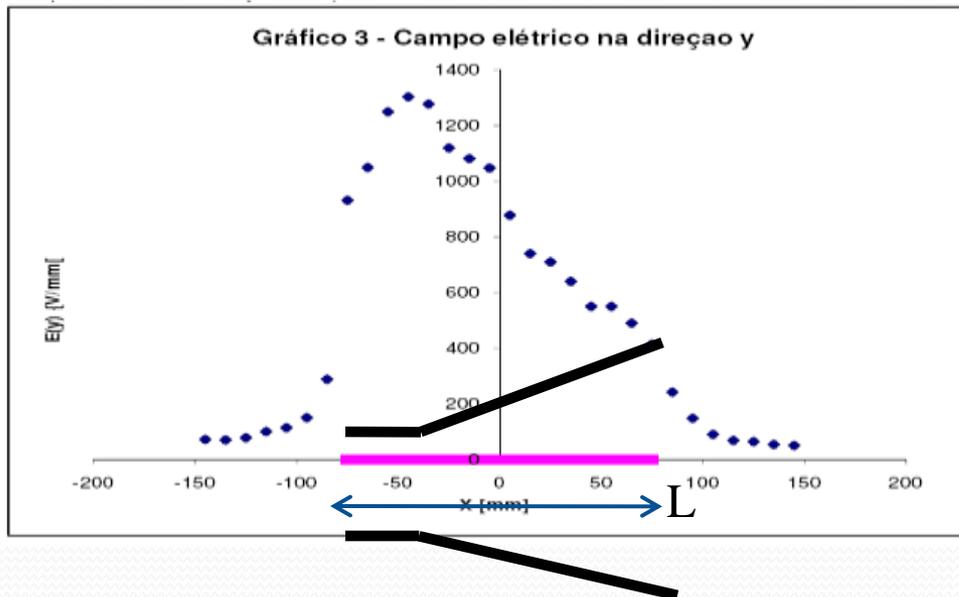


Atividades da Semana (parte 2)

- O nosso modelo ideal é compatível com os dados? Discuta
 - Se for compatível obtenha, experimentalmente, o valor da constante A' .
 - Nesse modelo o tamanho das placas e a distância entre elas são parâmetros geométricos. Obtenha os valores experimentais para essas grandezas. Discuta eventuais ambigüidades e como você as tratou.
- Em baixas tensões de aceleração ($V_{AC} \sim 450V$) e grandes deslocamentos ($H \sim 4 \text{ cm}$) nota-se que o feixe do TRC se divide em 2. Tente observar esse efeito e, se possível, medi-lo.
 - Discuta as possíveis origens desse efeito. Se possível quantifique o fenômeno.

O que gostaríamos de fazer?

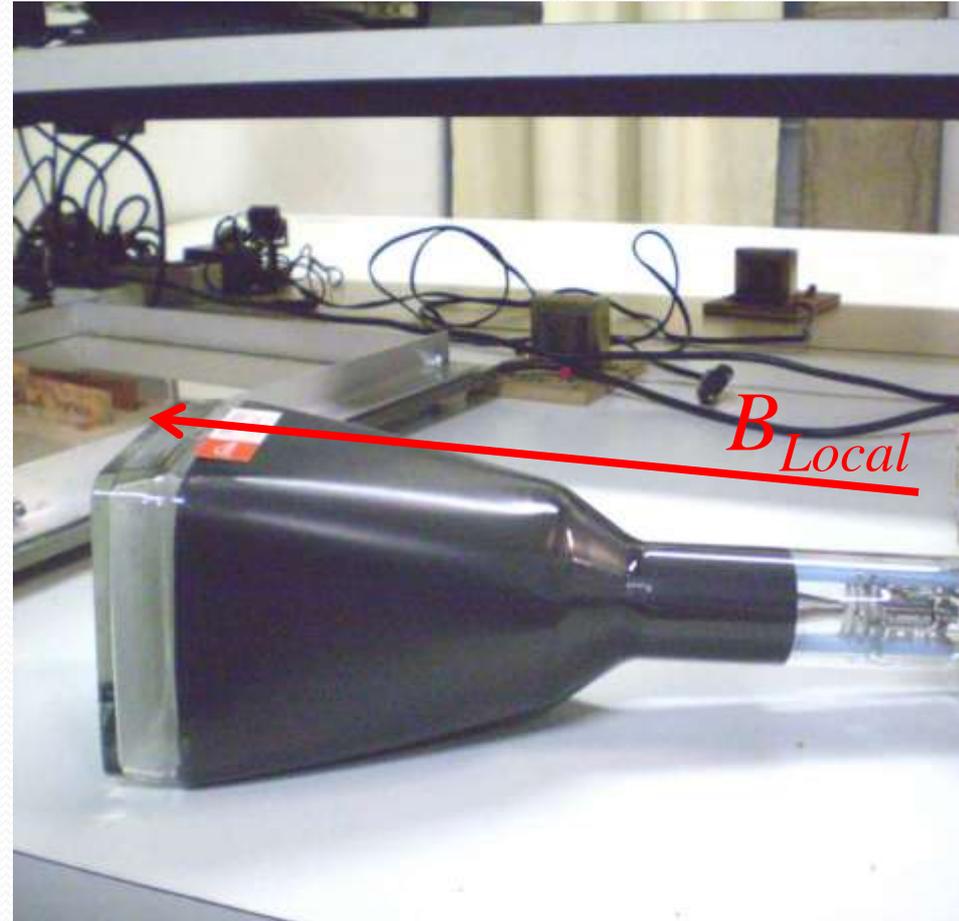
- Simplificar o problema
- Podemos transformar um problema de movimento complicado em algo simples?
 - A análise dos dados desta aula pode responder esta pergunta. Como?
 - Podemos descrever as nossas placas por um capacitor ideal?
 - Qual seria o comprimento das placas e o campo elétrico efetivo? Pensem a respeito...



Um pouco do procedimento

IMPORTANTE!

- Cuidado 1
 - O campo magnético local atua no feixe (Força magnética)
 - Devemos alinhar o TRC com o campo local (usar bússola)



Um pouco do procedimento

IMPORTANTE!

- Cuidado II
 - Ligar o TRC com ZERO volts entre as placas
 - Focalizar bem o feixe e definir a origem
 - Todas medidas em relação a este ponto

