

# Seletor de Velocidades

## Movimento em Campo Magnético

**Aula 3**

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

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

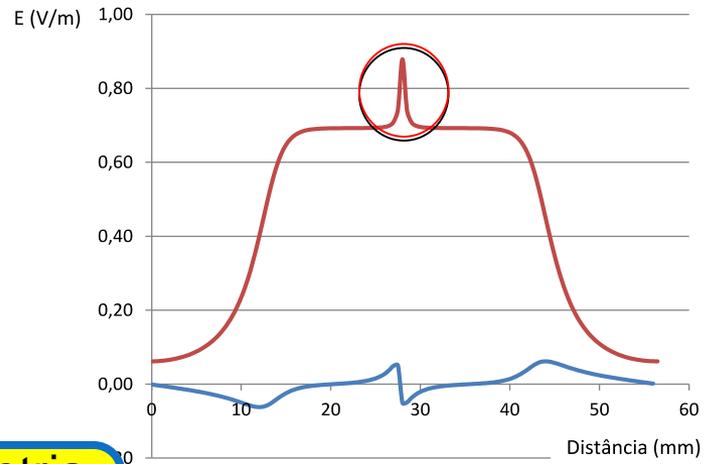
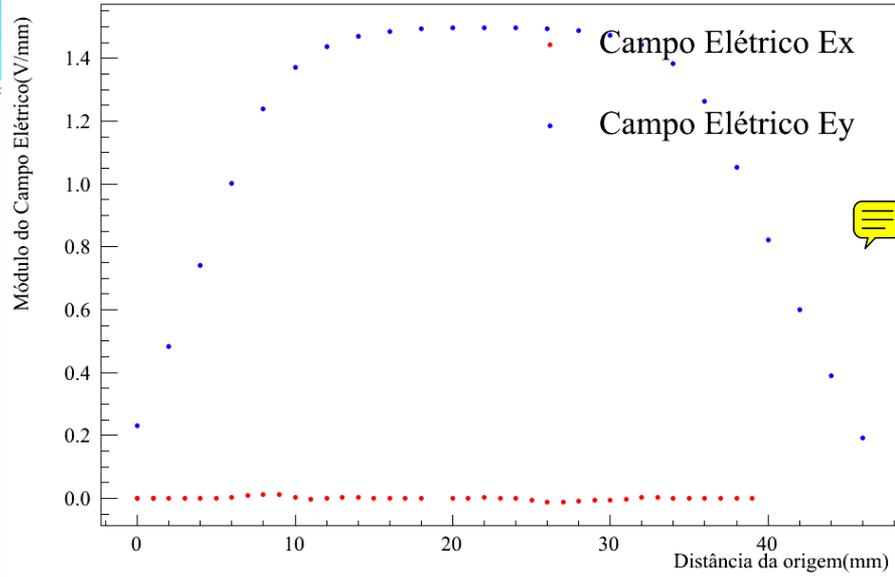
Prof. Paulo Artaxo  
artaxo@if.usp.br  
Ramal: 7016  
Basilio, sala 101

# Lista de Discussão

- Lista geral de todas as turmas, professores e monitores:
  - Deve ser usada para tirar dúvidas, trocar experiências, comparar resultados, etc...
  - Os avisos gerais da disciplinas serão distribuídos por esta lista, por isso, assinem!

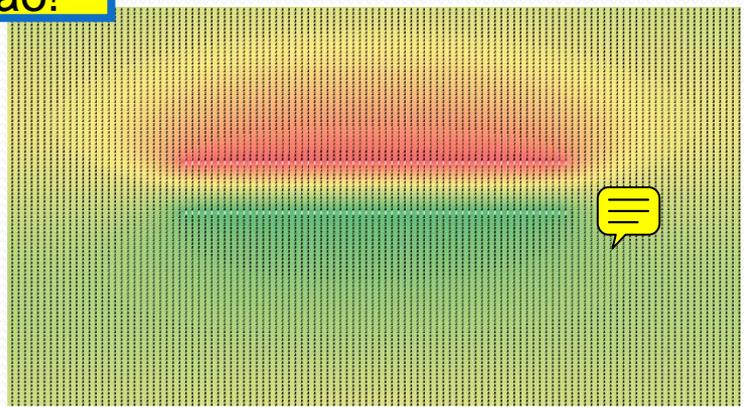
**<http://groups.google.com/group/labflex>**

## Campo Elétrico Excel



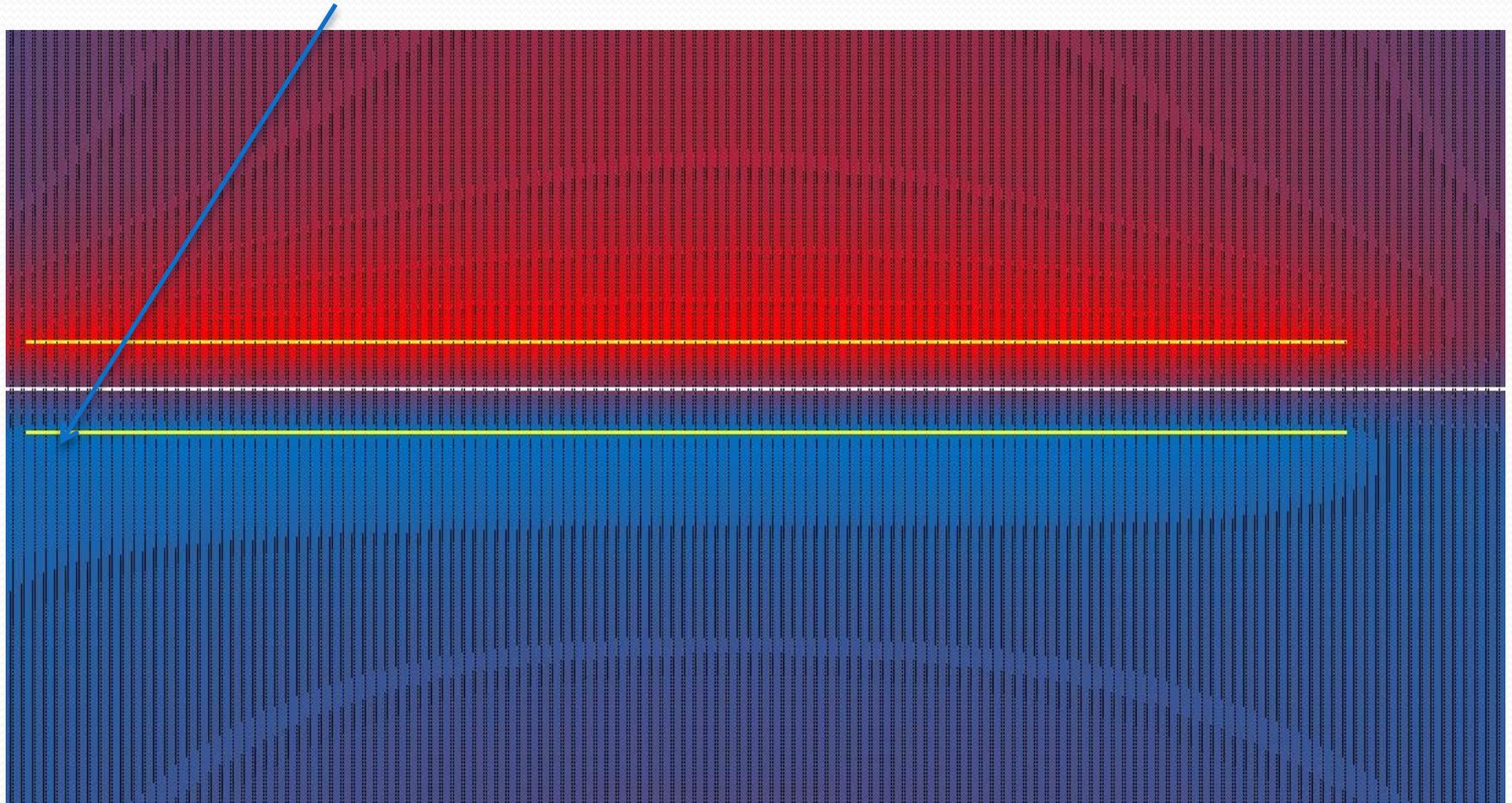
A simetria afeta a solução!

Figura 1: A linha azul representa o  $E_y$  e a linha rosa representa o  $E_x$ .



feito a partir do Excel. O vermelho representa o valor mínimo, o amarelo...

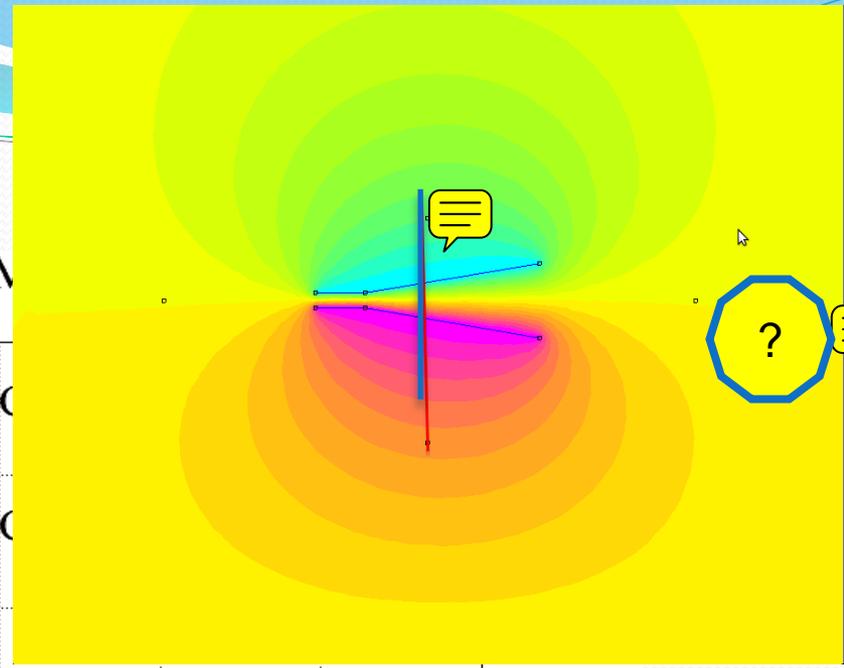
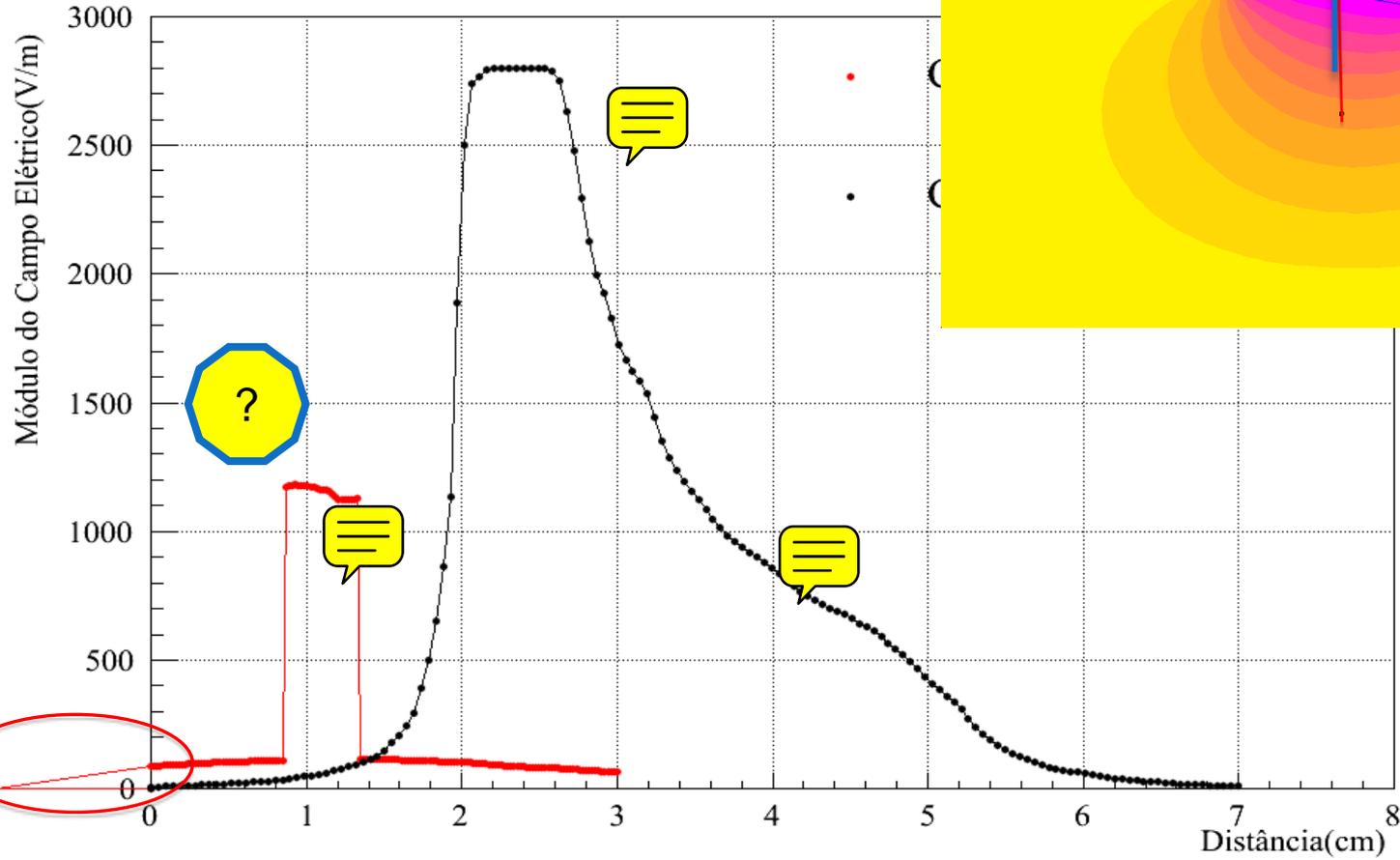
Fazer uma região maior em torno do capacitor, p/ não acontecer essas distorções



simulação do campo elétrico do capacitor feito pela planilha excel , a linha branca representando foram calculadas as componentes do campo, as linhas amarelas representam as placas de sendo a superior de 9V e a inferior de 0V.

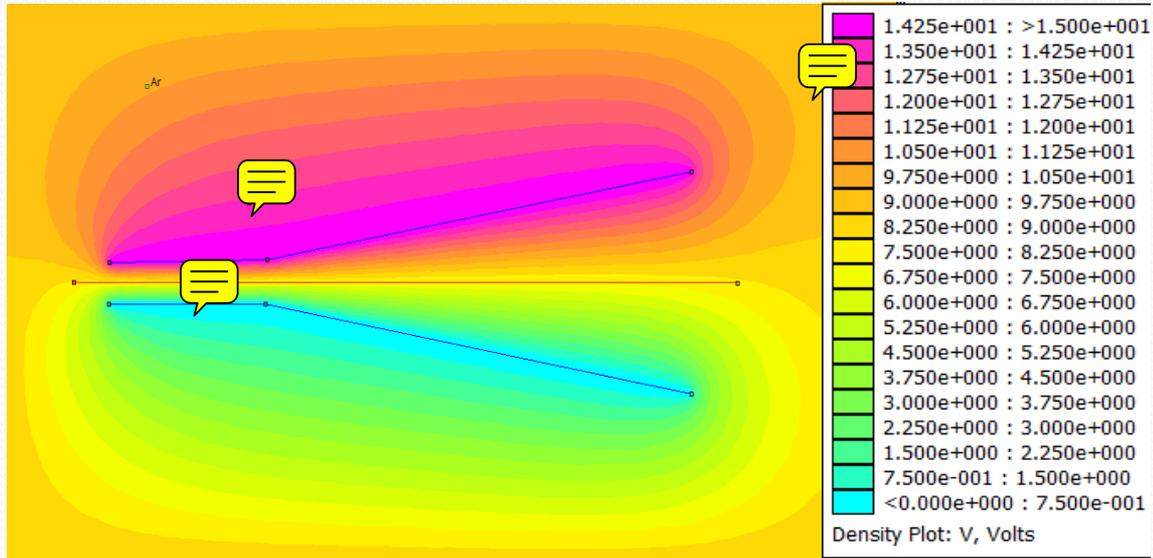
Foi pedido : Ey ao longo de x e  
Ex ao longo de x, porque x é o  
eixo definido pela linha do feixe!

### Campo Elétrico FEM

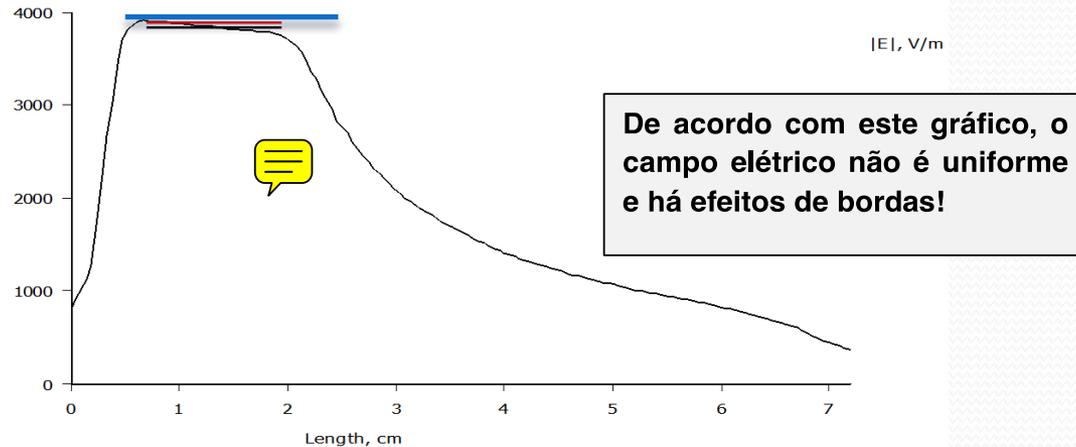


) +& ! \$ " ' , ) % ! \$ ' ! !  
' - ' . ( %  
/ ! 0+1 " !' 2 ! 3+4 ' ! ) # 5\$ ) # 6%





**Figura 2:** Aspecto da simulação do Campo Elétrico utilizando o programa Femm junto à sua legenda, em que as cores indicam a intensidade do campo.



**Figura 3:** Gráfico do Campo Elétrico em função da distância às placas.

Ok, a menos da cond de contorno das bordas.

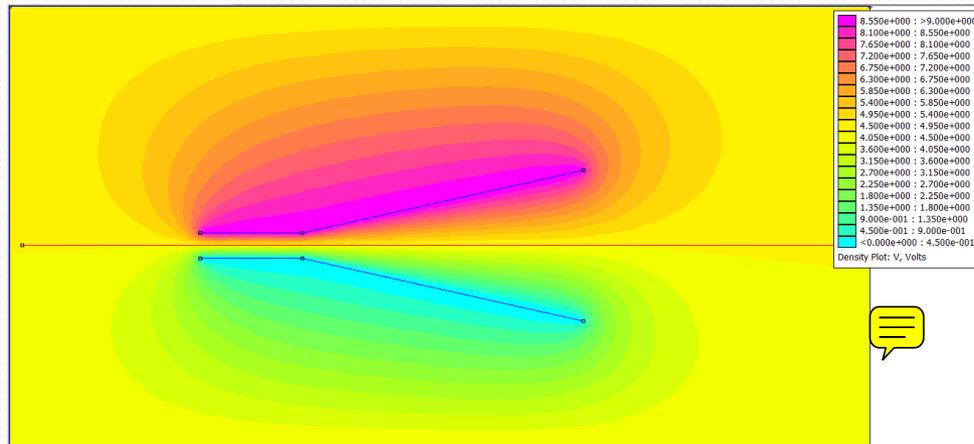


Figura 3: simulação do campo elétrico feito no programa feem , a placa superior tem valor de 9V e a inferior de 0V.

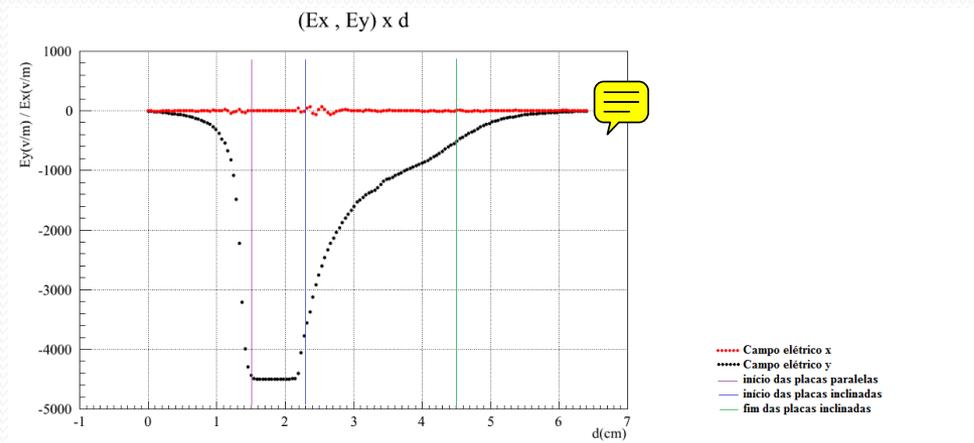
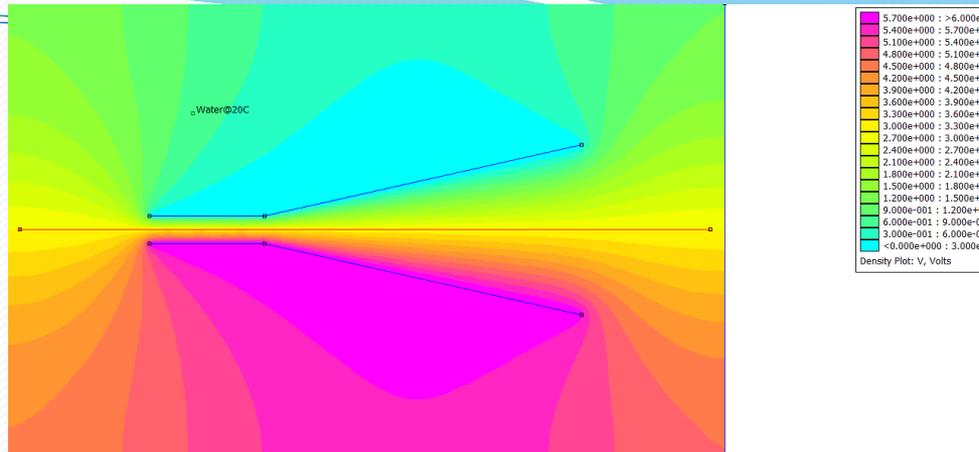
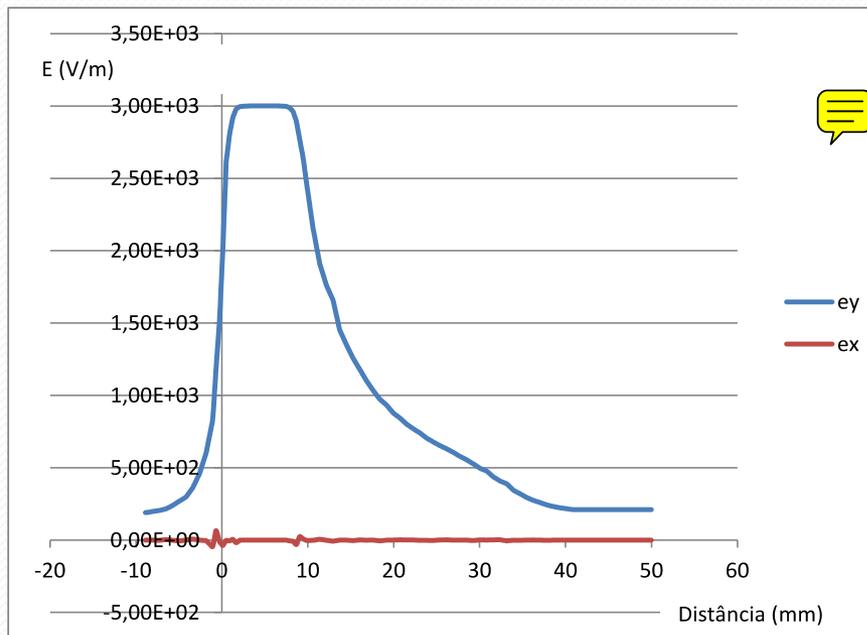


Figura 4: gráfico das componentes do campo elétrico, sendo  $E_y$  a componente do vetor normal a linha de medida( $E_n$ ) e  $E_x$  a componente tangente a esta( $E_t$ ).

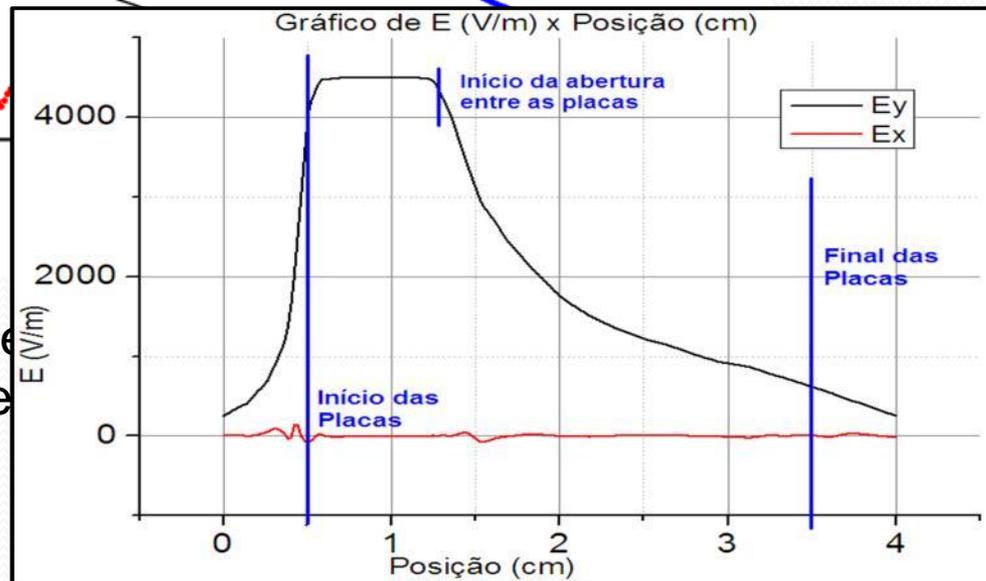
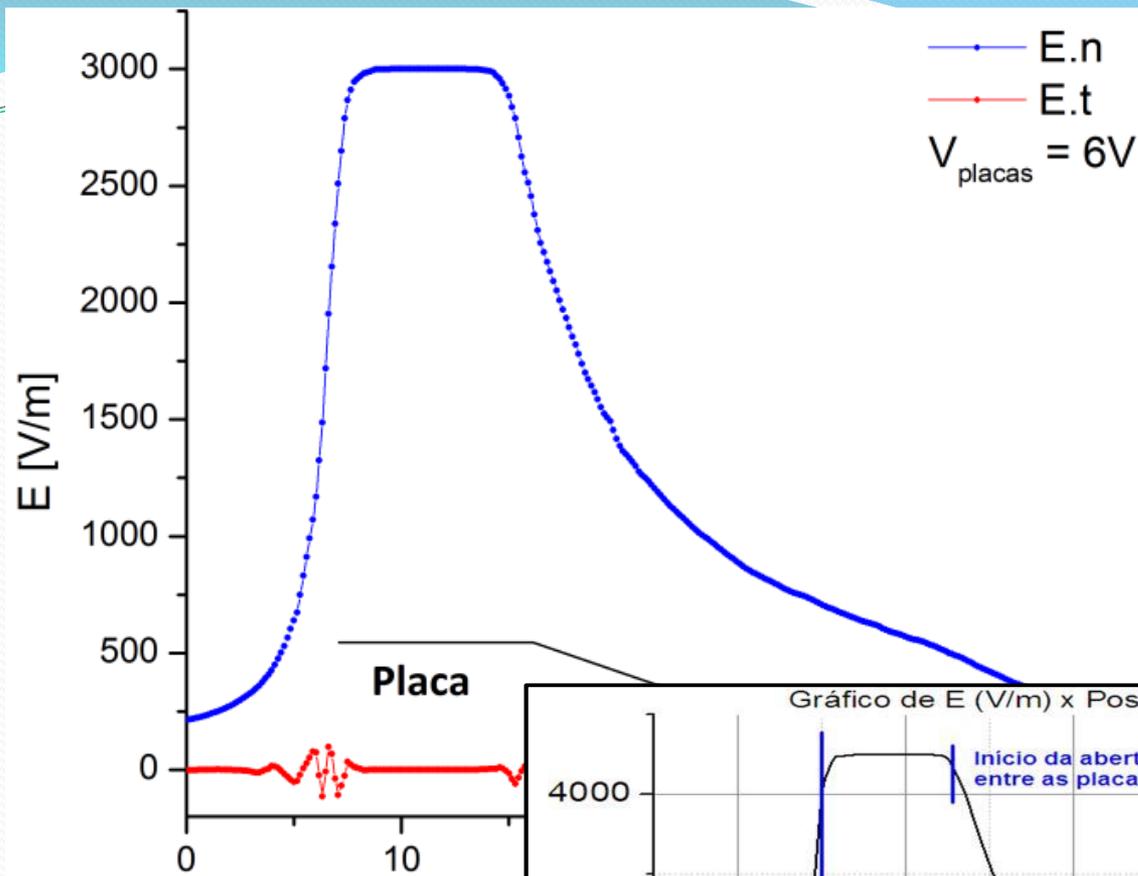


Assim, obtivemos o gráfico com os valores de  $E_x$  e  $E_y$ .



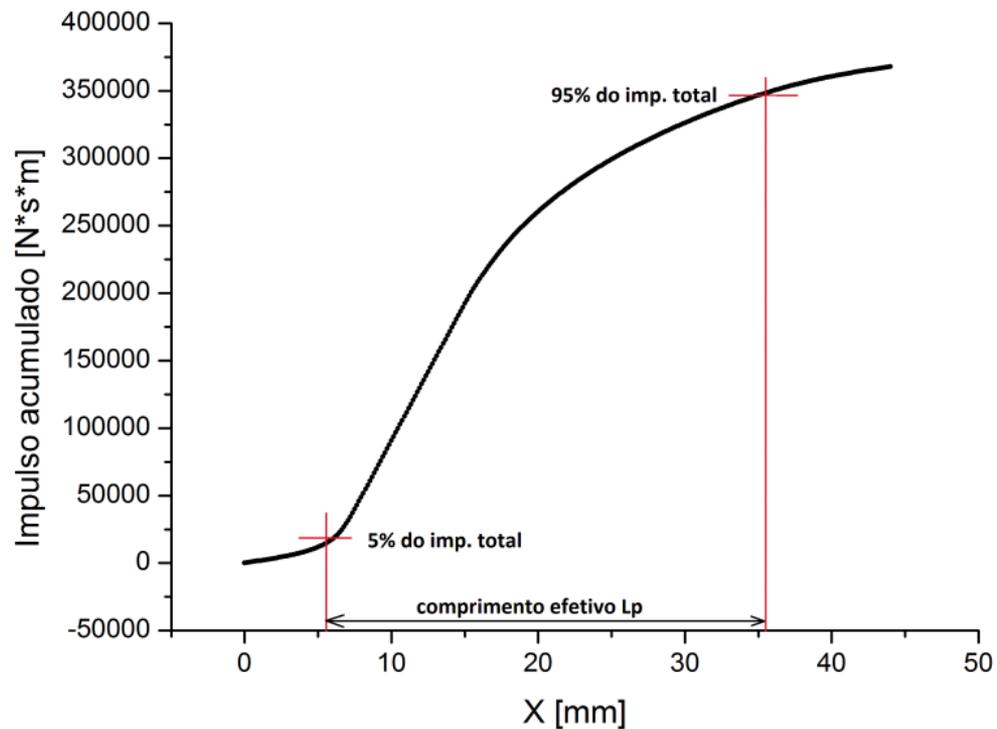
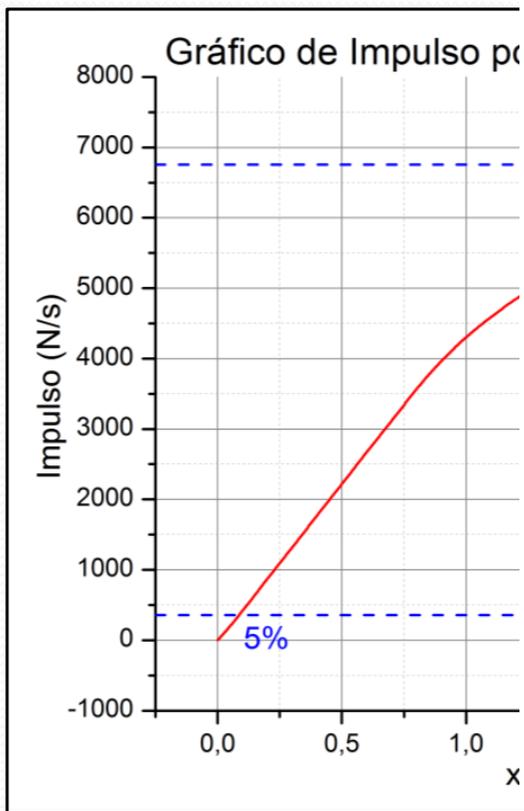
Ok, cond de contorno da borda correta!  
Mas mostre a placa no gráfico!!

A placa encontra-se a 10mm do ponto de origem (-9mm) e termina 8mm depois. Dessa forma, no gráfico, a placa estaria entre 1mm e 9mm.



6 – Gráfico da variação de  $E_n$  (sendo  $E_n$  a componente perpendicular ao campo elétrico).

**Gráfico7.** Gráfico do campo elétrico pela posição. O gráfico foi gerado partindo da simulação acima, considerando como ponto de medida um linha no centro do espaço entre as placas, simulando o caminho que um feixe de elétrons sem sofrer deslocamento faria com o TRC acionado.



**Figura 7** – Gráfico do impulso acumulado em função do comprimento.

**Gráfico1.** Gráfico do impulso calculado por integração do campo elétrico - componente  $E_x$  - do TRC (pelo programa Origin, por área matemática). Os valores de início e fim do  $L_p$ , indicados como linhas (95% e 5%), foram calculados como porcentagem do valor máximo de impulso, resultando em  $L_p=2.4\text{cm}$

# Simulação com FEMM

- Tem vários grupos com a simulação do E com a cond de contorno das bordas errada: no TRC os limites são não condutores.
- E dizer os parâmetros da simulação:
  - qual foi o das bordas .
  - a ddp
  - as dimens das placas.
  - Tem que dizer onde estão as bordas e qual seu potencial.

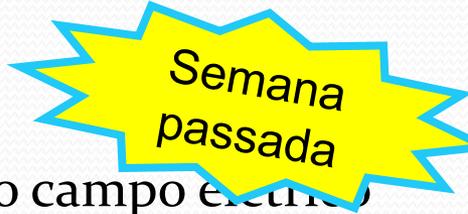
# TAREFAS SEMANA PASSADA



# Exp. 2 – Seletor de Velocidades

## PROGRAMAÇÃO

- Semana 1
  - Movimento em campo elétrico
- Semana 2
  - Desenvolver o modelo para o campo elétrico e simular o campo elétrico com o programa FEMM
- Semana 3
  - Movimento em campo magnético magnético
- Semana 4
  - mapear o campo magnético e desenvolver modelo para o mesmo
- Semana 5
  - Calibração do seletor de velocidades
- Semana 5
  - Resolução do seletor de velocidades



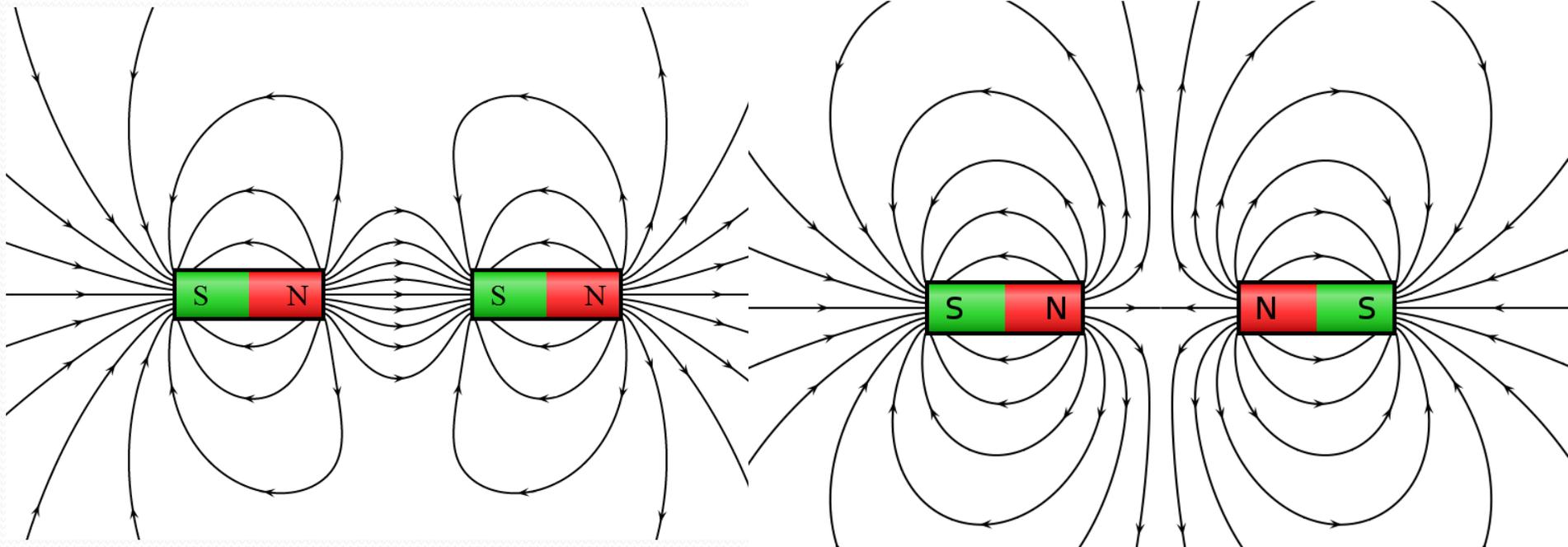
Semana passada

# Tarefa 1: controles do TRC

Já fez  
semana  
passada e  
tem que fazer  
de novo

- Ligue o **TRC** e focalize o feixe na tela
  - Aplique uma tensão aceleradora  **$U_{ac}=700V$**
  - Mexa no controles:
    - Foco
    - Intensidade
    - Tensão aceleradora (não passar de  **$1000V$** )
    - Observe o que acontece com o feixe em cada caso e comente.
- Gire o **TRC** na mesa e observe o que acontece com o feixe
  - Procure fazer com que o feixe esteja focalizado e pelo menos sobre o eixo horizontal
- Nesta condição, aplique  **$U_{ac}=700V$**  e defina a origem neste ponto e deixe o TRC fixo nesta posição da bancada (fotografe a tela do TRC)

A proposta desta semana: estudar o deslocamento do feixe de elétrons do TRC no campo magnético das bobinas



# As medidas para esta semana:

1. Medir a dependência do deslocamento dos elétrons ao atravessar a região do campo magnético criado pelas bobinas na tela, com os parâmetros que definem a velocidade dos elétrons e a intensidade do campo magnético aplicado:
  1. a energia dos elétrons e
  2. a corrente nas bobinas
2. Dicas

# Relembrando: Seletor de Velocidades

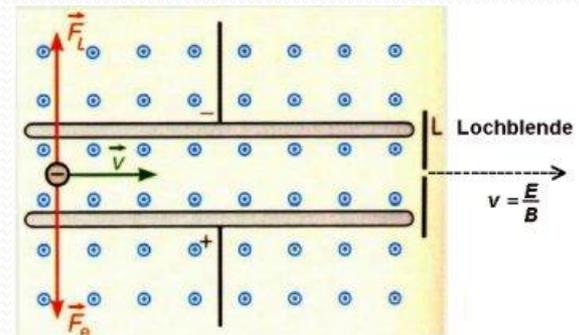
- Um seletor de velocidades é um dispositivo que seleciona as partículas, de um feixe de partículas carregadas, de acordo com sua velocidade.
- Esse dispositivo é também chamado de **filtro de velocidades**, ou **filtro de Wien**
- ... Um acelerador de partículas “simples”

**Todo filtro faz uma seleção dos objetos que o atravessam.**

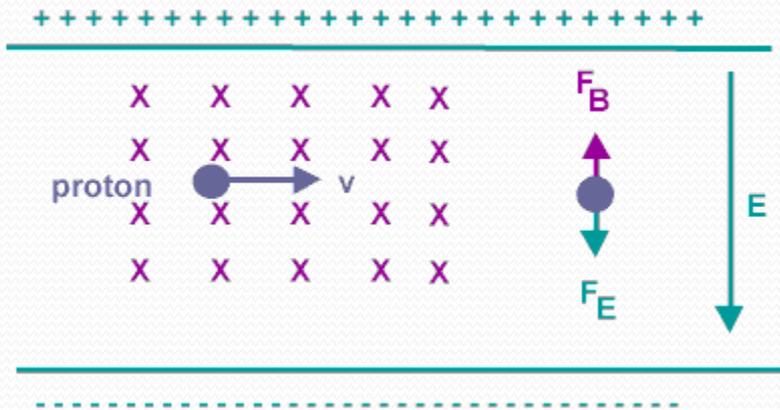
# Seletor de velocidades: como funciona

- O princípio de funcionamento do seletor de velocidades está baseado no fato de que **partículas carregadas** em movimento sofrem a ação de **forças** quando cruzam uma região onde existe um **campo elétrico** ou um **campo magnético**, ou ambos.
- Se queremos separar partículas com velocidades diferentes:

**É necessário aplicar uma força dependente da velocidade!**  
**Que cause efeitos diferentes em partículas carregadas idênticas, mas com velocidades diferentes.**

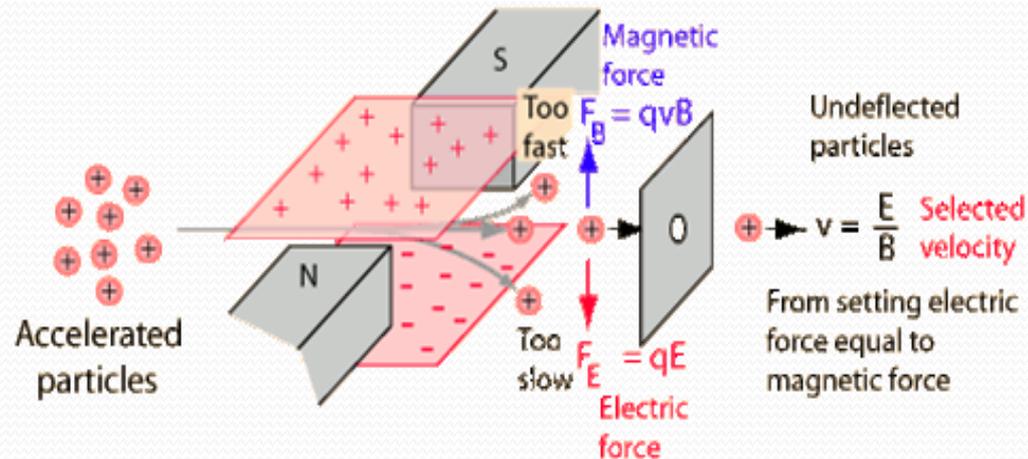


# Funcionamento do Seletor



- Dois campos cruzados e perpendiculares à direção do feixe selecionam velocidades:
  - um é um campo magnético
  - outro é um campo elétrico
- **O segredo:** os campos são orientados de tal forma que  $F_E$  e  $F_B$  são opostas.

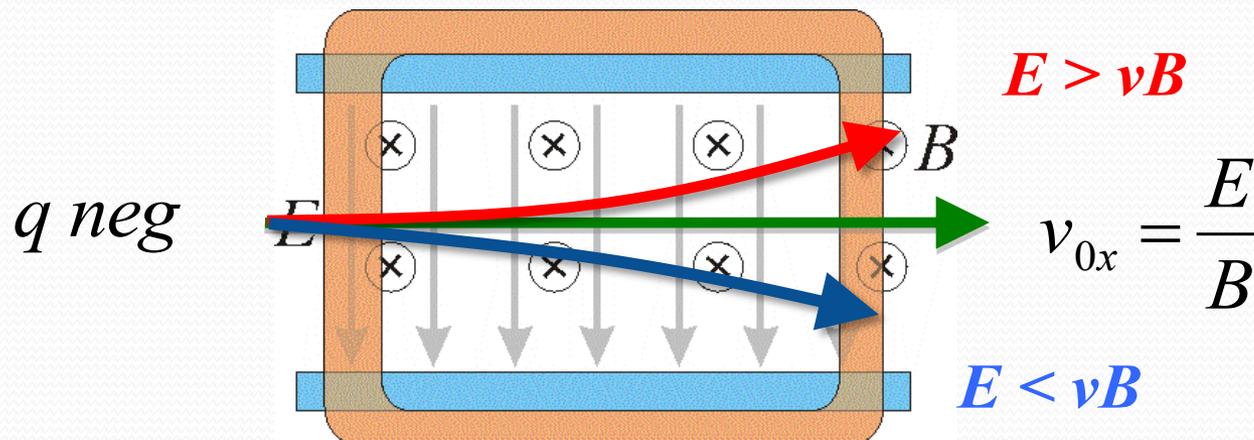
Escolhe-se a intensidade dos campos tal que a partícula da velocidade de interesse passe sem ser desviada:

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


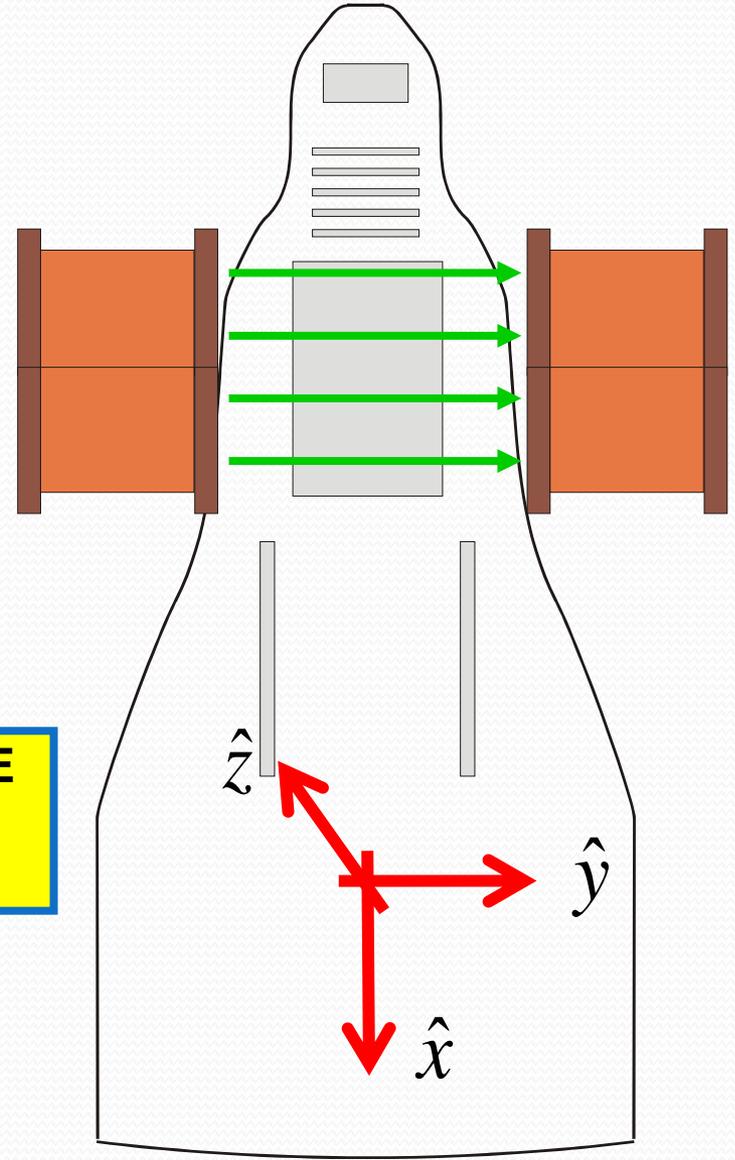
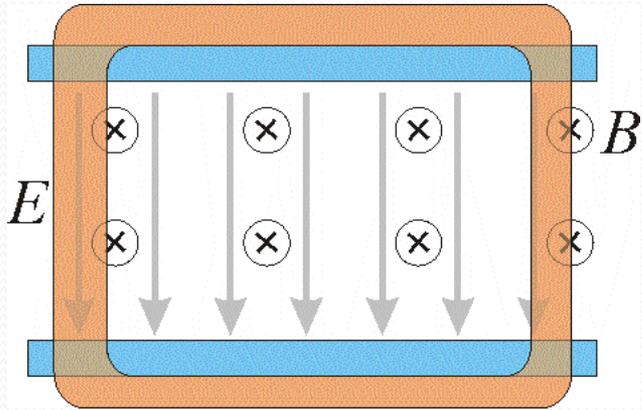
# As forças na partícula dentro do seletor

- Como as forças elétrica e magnética são iguais e opostas no caso da partícula que não sofre deslocamento, ( $\mathbf{H}=\mathbf{0}$ ), isso leva à seguinte expressão para a velocidade dessa partícula:

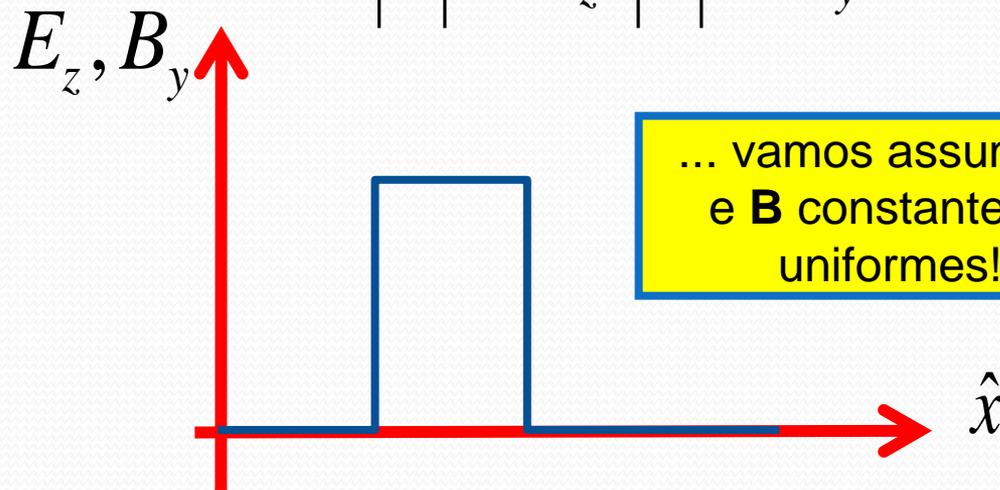
$$|\vec{F}_E| = |\vec{F}_M| \Rightarrow qE = qvB \Rightarrow v = \frac{E}{B} \text{ para } H = 0$$



# Seletor de velocidades - IDEAL



$$|\vec{E}| = E_z, |\vec{B}| = B_y$$



... vamos assumir  $\mathbf{E}$   
e  $\mathbf{B}$  constantes e  
uniformes!

# Como selecionar a partícula com a velocidade desejada?

- Sabemos que velocidade deve ter a partícula para que o feixe passe sem desvio: podemos selecionar a velocidade.
  - Como impor essa condição?
- Quais são os parâmetros que podemos controlar?
  - potencial aplicado às placas
  - potencial de aceleração do feixe
  - corrente nas bobinas
- Como a deflexão do feixe depende deles?

# Parte 3: deslocamento x $V_{\text{placa}}$

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

$$h = A V_P^\alpha$$

- Fazer um gráfico de  $V_p$  em função de  $h$  para  $U_{ac}$  fixo que permita descobrir se a dependência funcional acima é adequada:
  - obter o expoente alfa. Comparar com os valores obtidos por seus colegas e com o valor esperado.
- **Importante:** a grandeza fixa deve ser escolhida de modo a permitir o maior número possível de pontos medidos.

A dependência do deslocamento com campo elétrico ( $V_p$ ) já fizeram na semana passada

# Tarefa 4: deslocamento x $U_{ac}$

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

$$h = BU_{ac}^{\beta}$$

- Fazer um gráfico de  $h$  em função de  $U_{ac}$  para  $V_p$  fixo que permita descobrir se a dependência funcional acima é adequada:
  - obter o expoente beta. 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.

Também tarefa  
da semana  
passada

# Estudar como os elétrons são afetados pelo campo magnético:

- Vamos fazer o mesmo estudo para o caso do campo magnético (sem ligar o campo elétrico):
  - Ver como  $H$  depende da corrente nas bobinas para uma velocidade fixa
  - E como  $H$  depende da velocidade dos elétrons para uma corrente nas bobinas fixa.

# Tarefa 1: deslocamento x $i_{\text{Bob}}$

- Medir  $h$  em função de  $\mathbf{I}_B$  para  $\mathbf{U}_{ac}$  fixo ( $=\mathbf{v}_{0x}$  fixo).
- Qual é a dependência funcional? Comece testando uma possibilidade simples:

$$H = C i_{bob}^g$$

- Fazer um gráfico de  $\mathbf{I}_B$  em função de  $h$  para  $\mathbf{U}_{ac}$  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.

# Tarefa 2: deslocamento x $U_{ac}$

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

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

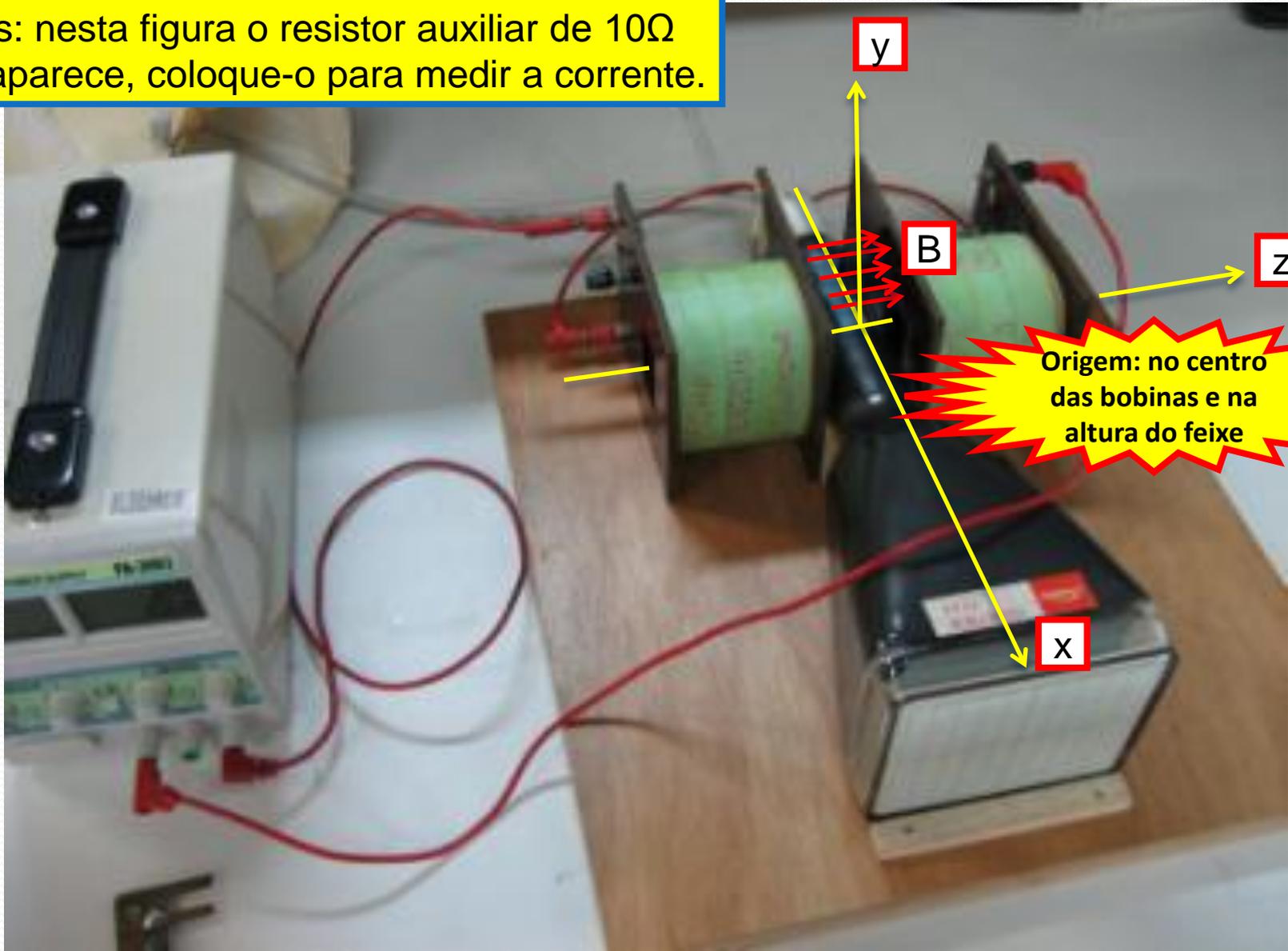
- Fazer um gráfico de  $h$  em função de  $U_{ac}$  para  $i_B$  fixo que permita descobrir se a dependência funcional acima é adequada
  - Se for, obtenha o expoente delta. Compare com os valores obtidos por seus colegas e com o valor esperado.
  - **Importante:** a grandeza fixa deve ser escolhida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

# Funcionamento do TRC com campo magnético

- Ligue o **TRC** e focalize o feixe na tela
  - Aplique uma tensão aceleradora  **$U_{ac}=700V$**
- 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?

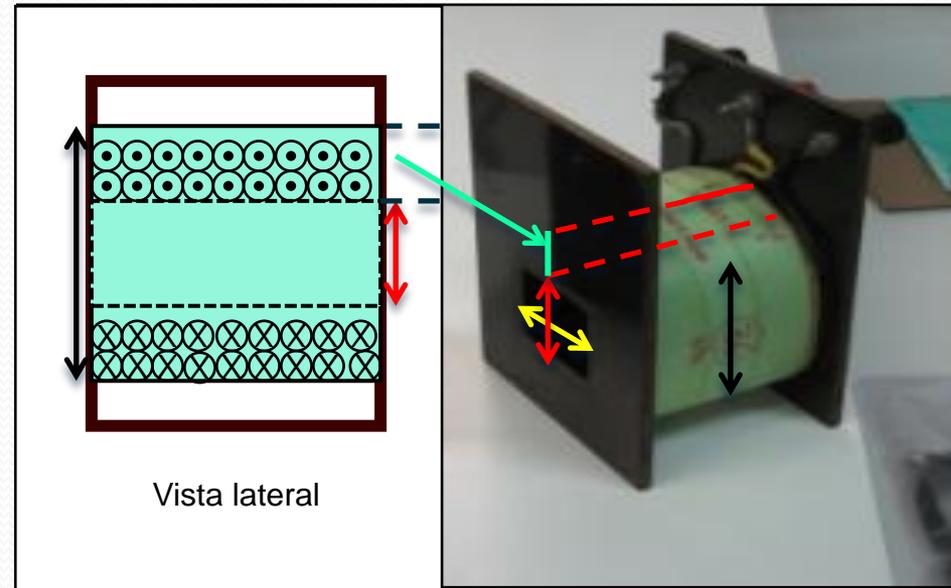
# Montagem das bobinas no TRC:

Obs: nesta figura o resistor auxiliar de  $10\Omega$  não aparece, coloque-o para medir a corrente.



# Os parâmetros das bobinas:

- Use um resistor de proteção de **10Ω** (10W) para medir a corrente pelas bobinas.
- Anote o número e as dimensões da bobina, internas e externas:
  - a espessura e o comprimento do enrolamento e do vão interno
  - com as bobinas retangulares, coloque a maior dimensão na vertical e explique porque isto é necessário.



# O campo magnético

- Aumente e diminua a corrente e verifique o que acontece com o feixe. Explique o que ocorre.
- Veja que a posição depende da corrente aplicada.
- Anote a corrente máxima que permita que o feixe continue visível na tela do **TRC** (com  **$U_{ac}=700V$** ).
  - **CUIDADO**: Não passe de **1,5A** e não mantenha uma corrente alta por muito tempo para não danificar as bobinas e nem o resistor de proteção:
    - já viu que todo resistor real se aquece com a passagem de corrente

### 3. Dicas

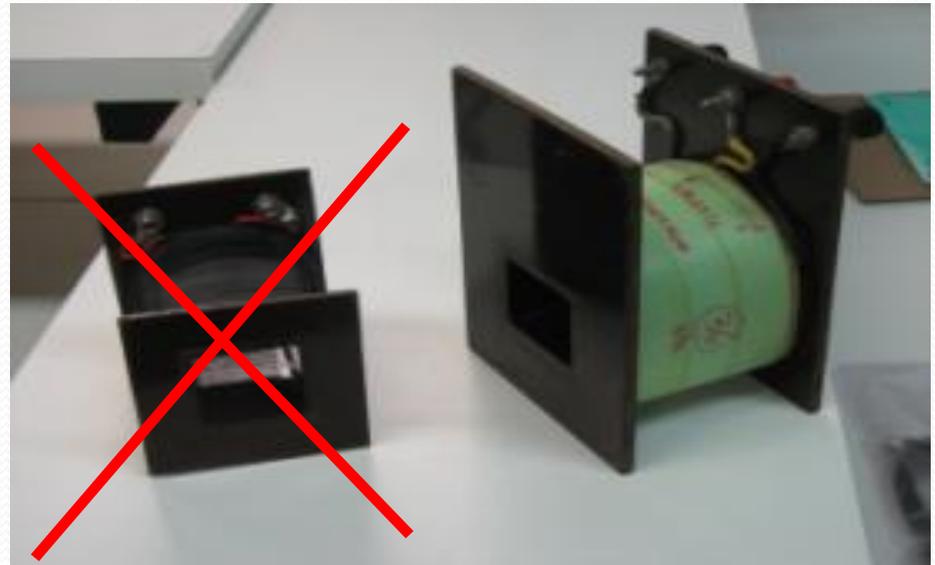


# Para pensar:

- Quantos pontos medir em cada caso?
  - O maior número possível, levando em conta os erros experimentais.
- O zero está no centro?
  - Medir para cima, para baixo ou em ambas as direções em relação à origem? Precisa? Explique.
- Determinação dos erros experimentais:
  - Qual o erro da medida da posição?
  - O tamanho da “mancha” na tela deve ser levado em conta? Se sim, como?
  - E se a mancha duplica? O que faz e porque?
  - Há erro sistemático? Ele pode se “descontado”? Explique.

# Cuidado experimental 1

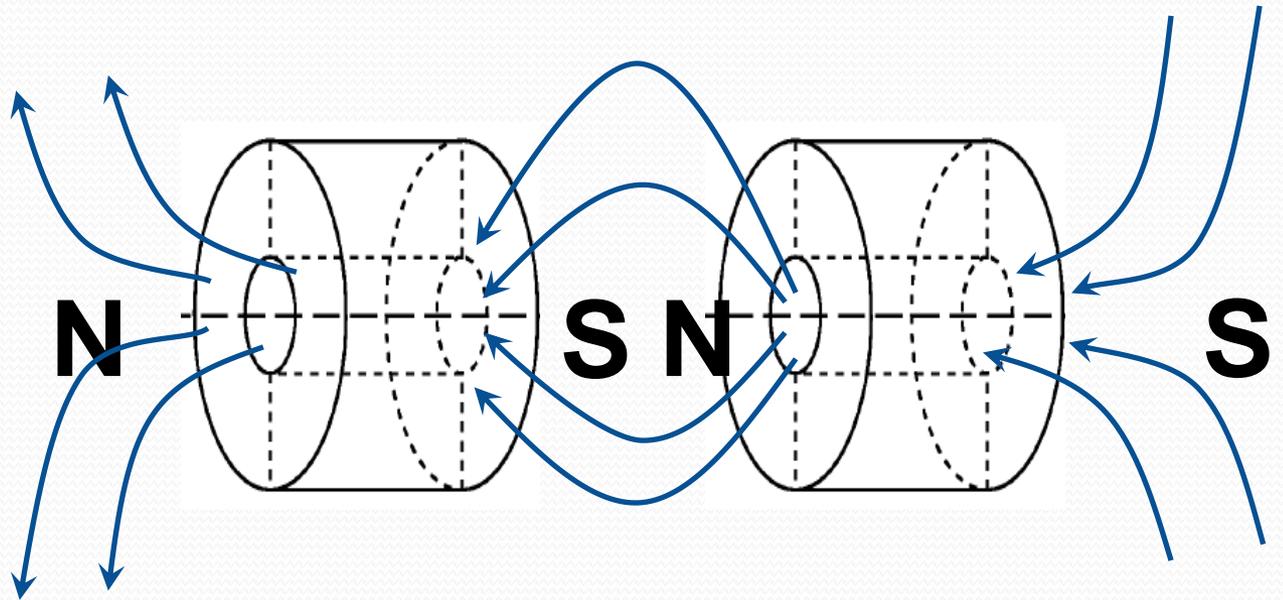
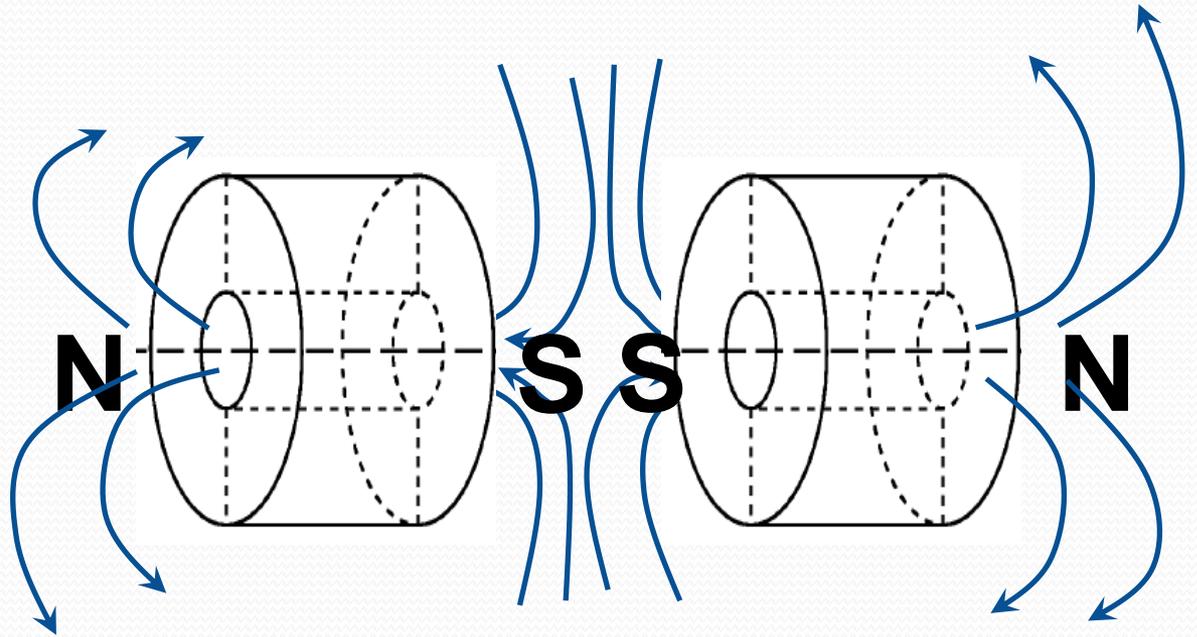
- Parear bobinas
  - Temos 3 tipos de bobinas:
    - de, 250, 500 e 1000 espiras
      - verifique que está usando 2 com o mesmo número (250) de espiras senão o campo não será simétrico.
- Anotar o número das bobinas utilizadas.



# Cuidado experimental 2

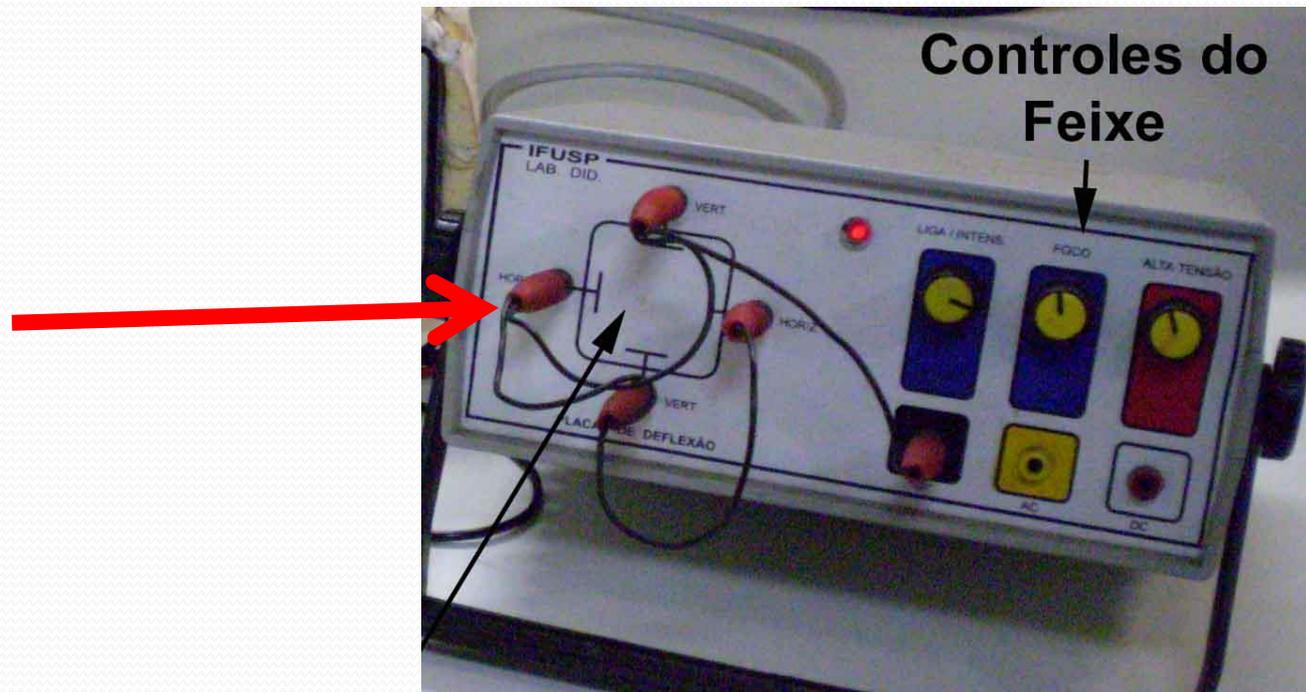
- Não confiem na leitura da corrente ou tensão diretamente na fonte DC!
- Não usem o multímetro como amperímetro!
- Não ultrapassar a potência máxima do resistor de proteção. E não ultrapassar 1.5 A.

# Cuidado 3



# Aterramento

- Nesta semana vocês vão usar apenas as bobinas, ou seja, as placas ficarão desligadas. Portanto, deixem todas aterradas para que todo o desvio do feixe seja devido ao campo magnético das bobinas

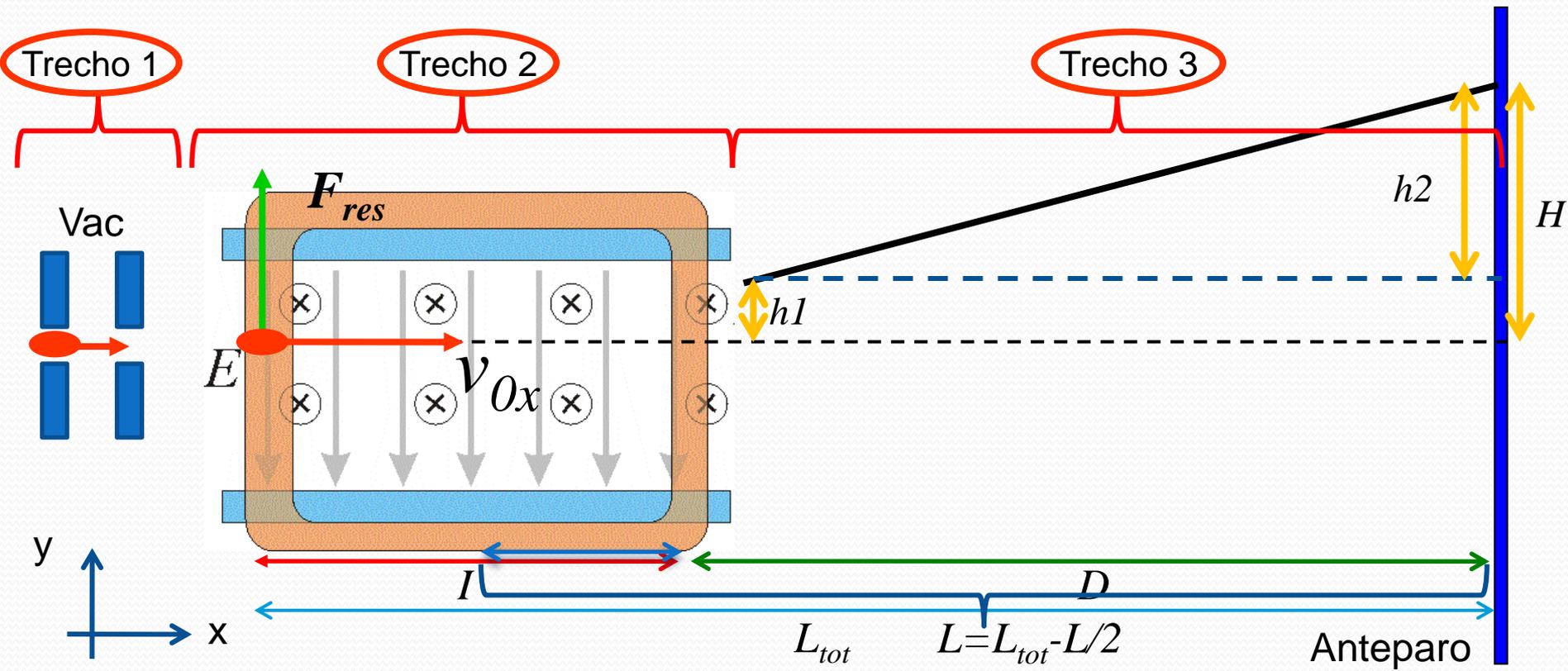


# Tarefa 5: Modelos

- Construir um modelo para o campo magnético supondo bobinas ideais de comprimento  $L_{\text{bob}}$ .
  - O modelo deve depender dos parâmetros mensuráveis do TRC e das bobinas.
- Veja as dicas a seguir se precisar.

# Um modelo simplificado do seletor:

- O movimento é composto de três partes:
  1. Aceleração em  $x$
  2. Aceleração em  $y$
  3. Movimento uniforme

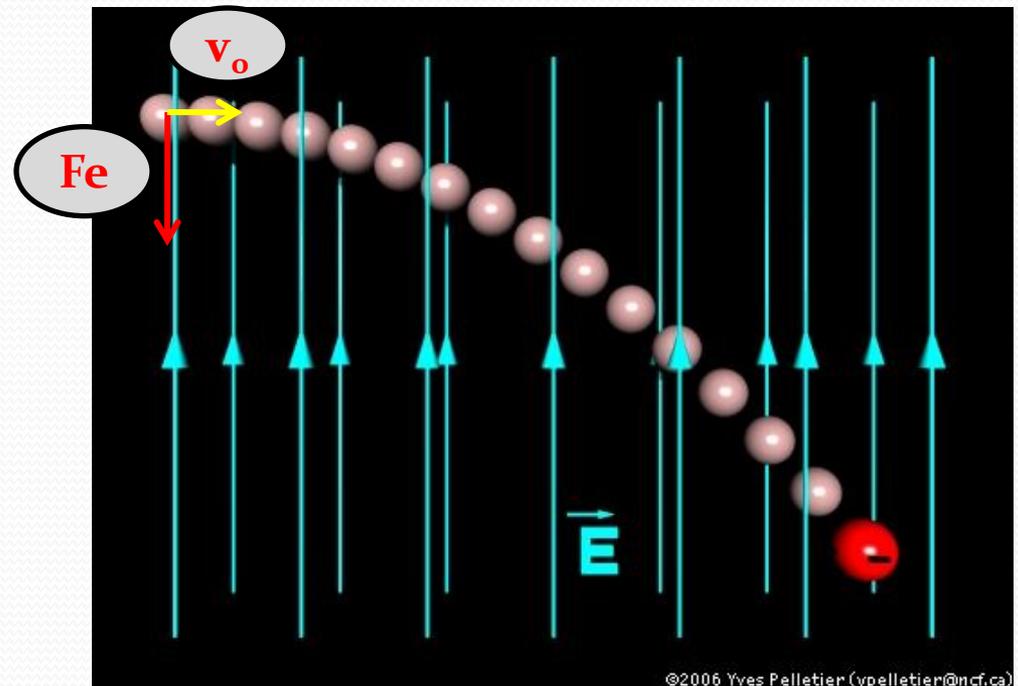


# Campo elétrico: já fizeram o modelo

- Quando um feixe de partículas carregadas de carga  $q$ , atravessa uma região onde existe um campo elétrico,  $\mathbf{E}$ , perpendicular à trajetória das partículas, ele vai sofrer uma força  $\mathbf{F}_e$  igual a:

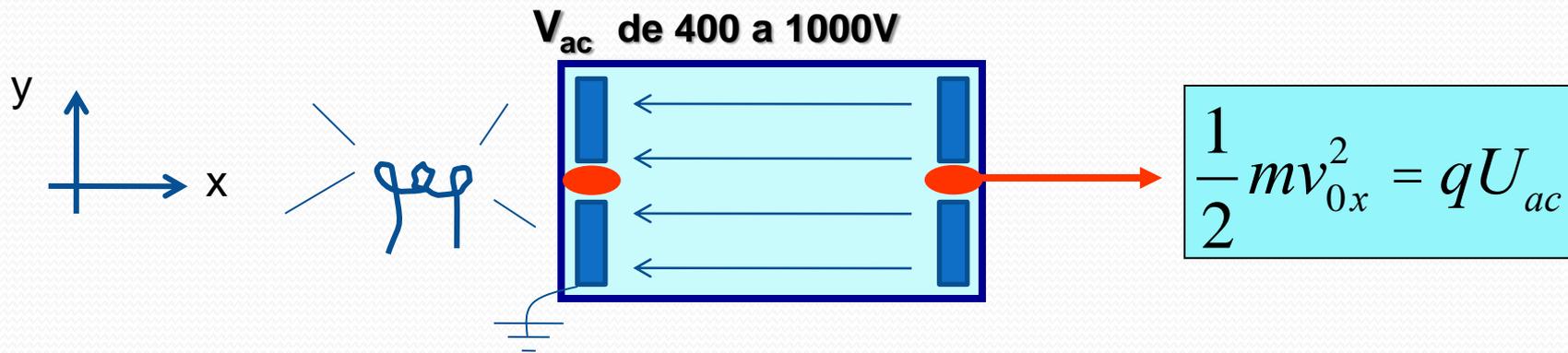
$$\vec{F}_e = q\vec{E}$$

Se a partícula for positiva, o sentido da força é o sentido do campo, se for negativa, o sentido da força é oposto ao sentido do campo



# Pergunta da semana:

- Como o desvio dos elétrons na tela depende da corrente das bobinas,  $i$ , e da energia potencial aceleradora,  $U_{ac}$ ?
- No **primeiro trecho do movimento**, a **partícula (elétron)** é acelerada entre por um sistema de eletrodos (extrator + lente eletrostática) que submete os elétrons a uma tensão elevada:  **$\sim 700V$** .



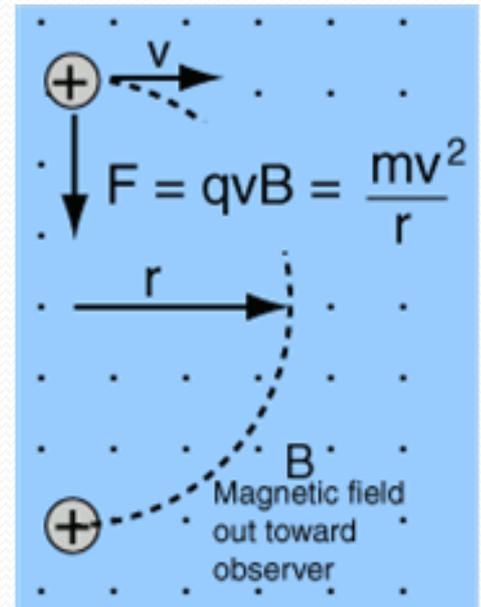
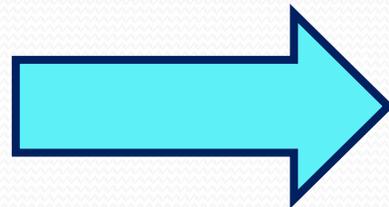
# Segundo trecho: campo magnético

- O que ocorre com o feixe de partículas (de carga  $q$  e velocidade  $\mathbf{v}$ ) que atravessa uma região onde existe um campo magnético constante e perpendicular à sua trajetória?

Vai aparecer uma força magnética,  $\mathbf{F}_m$ , proporcional à velocidade:

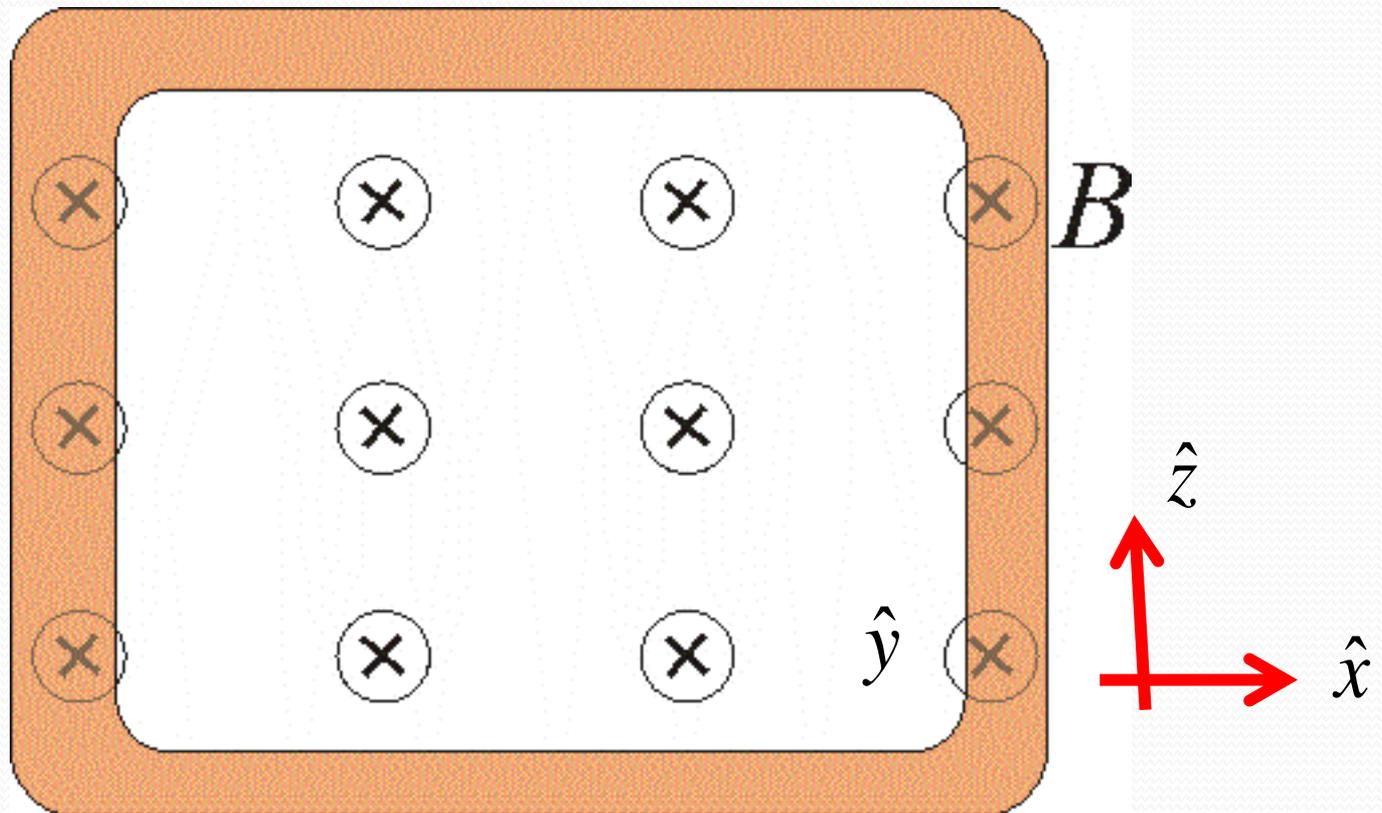
$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Se  $\mathbf{B} \perp \mathbf{v}$



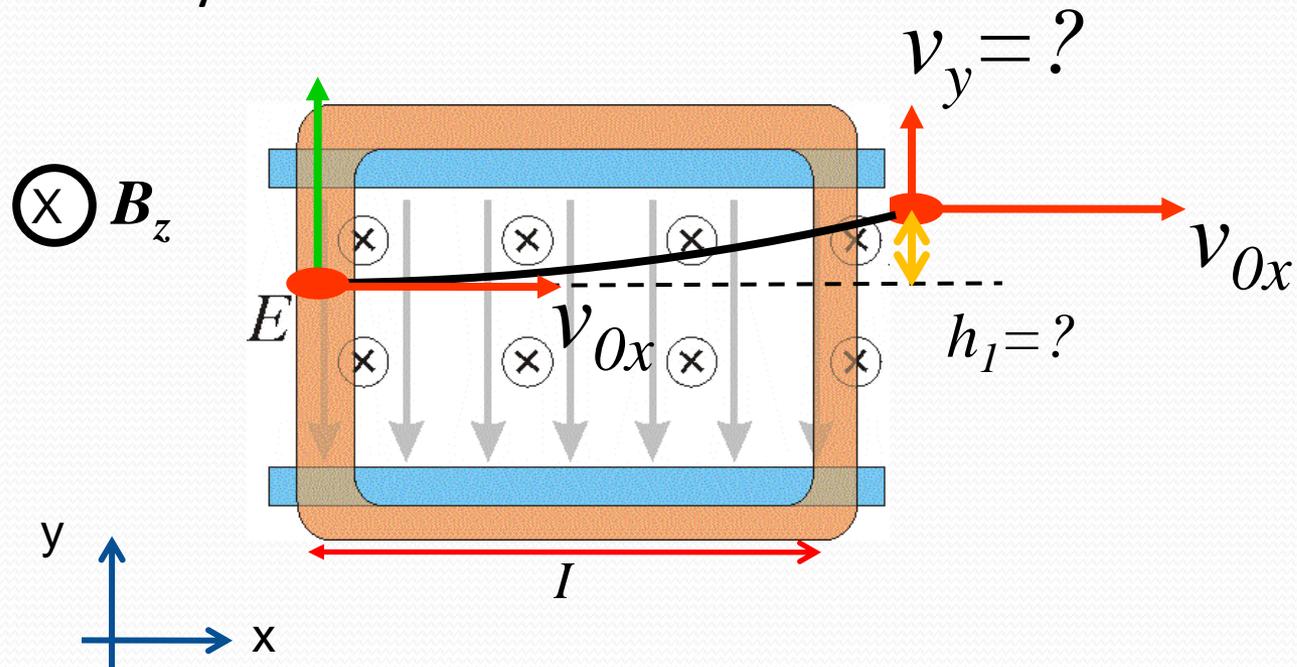
# Vamos supor que o campo magnético é IDEAL:

- Campo uniforme e constante entre as bobinas e nulo fora das bobinas.



# Mov. dos e- dentro do campo magnético: Trecho 2

- Na região com  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{B}$ , temos um movimento acelerado em  $\mathbf{y}$ , que desvia a partícula, e uniforme em  $\mathbf{x}$ 
  - Assumimos que  $\mathbf{v}_x = \text{cte}$
  - Calculamos  $\mathbf{v}_y$  e  $\mathbf{h}_1$  na saída



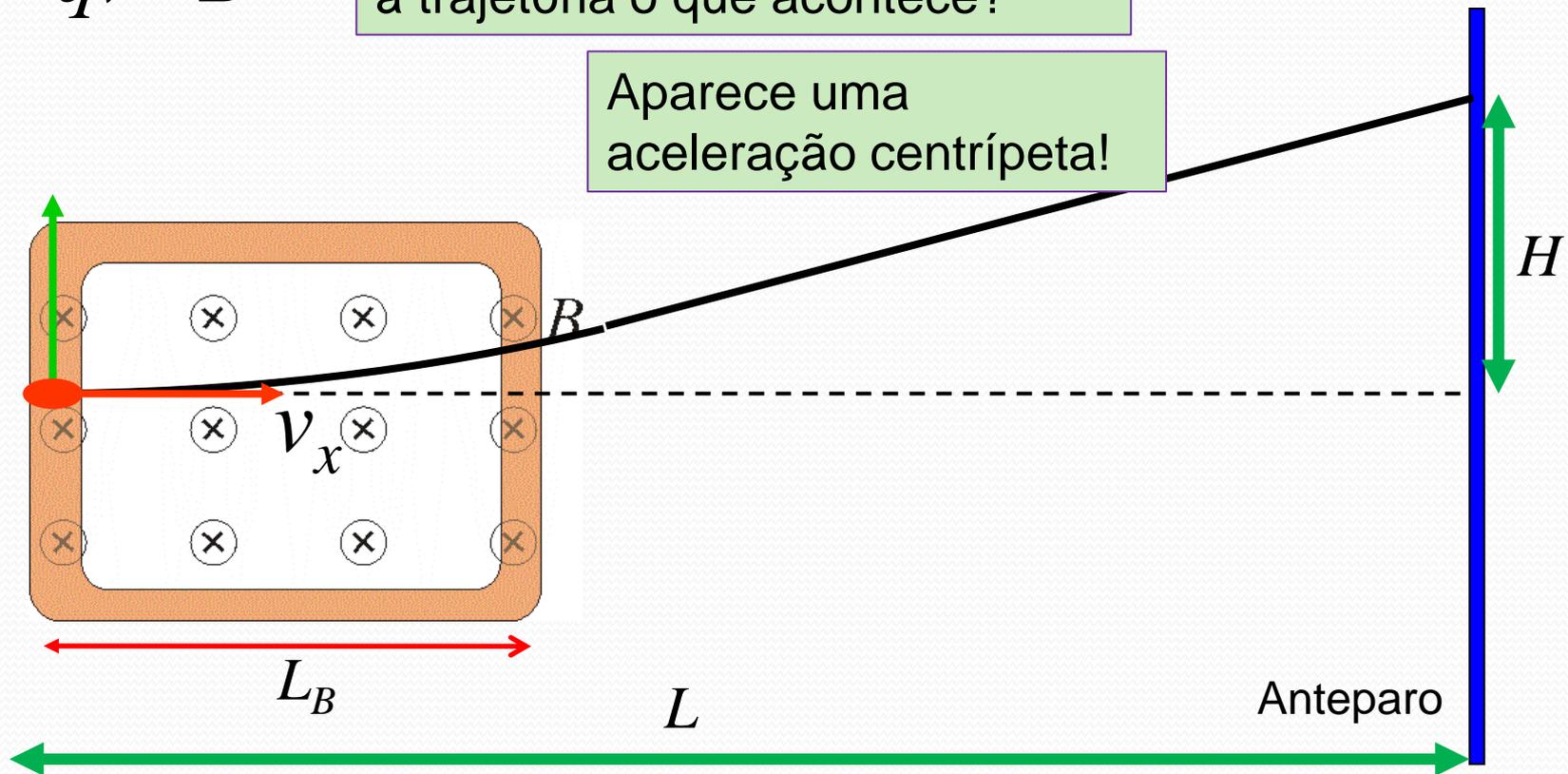
# Movimento em campo idealizado

- Campo uniforme e constante entre as bobinas e nulo fora das bobinas

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Quando a força é perpendicular à trajetória o que acontece?

Aparece uma aceleração centrípeta!



# Deslocamento x Campo B

- Portanto:

$$\vec{F} = e\vec{v}_x \times \vec{B}_z \quad \rightarrow \quad F = \frac{m_e v_x^2}{R}$$

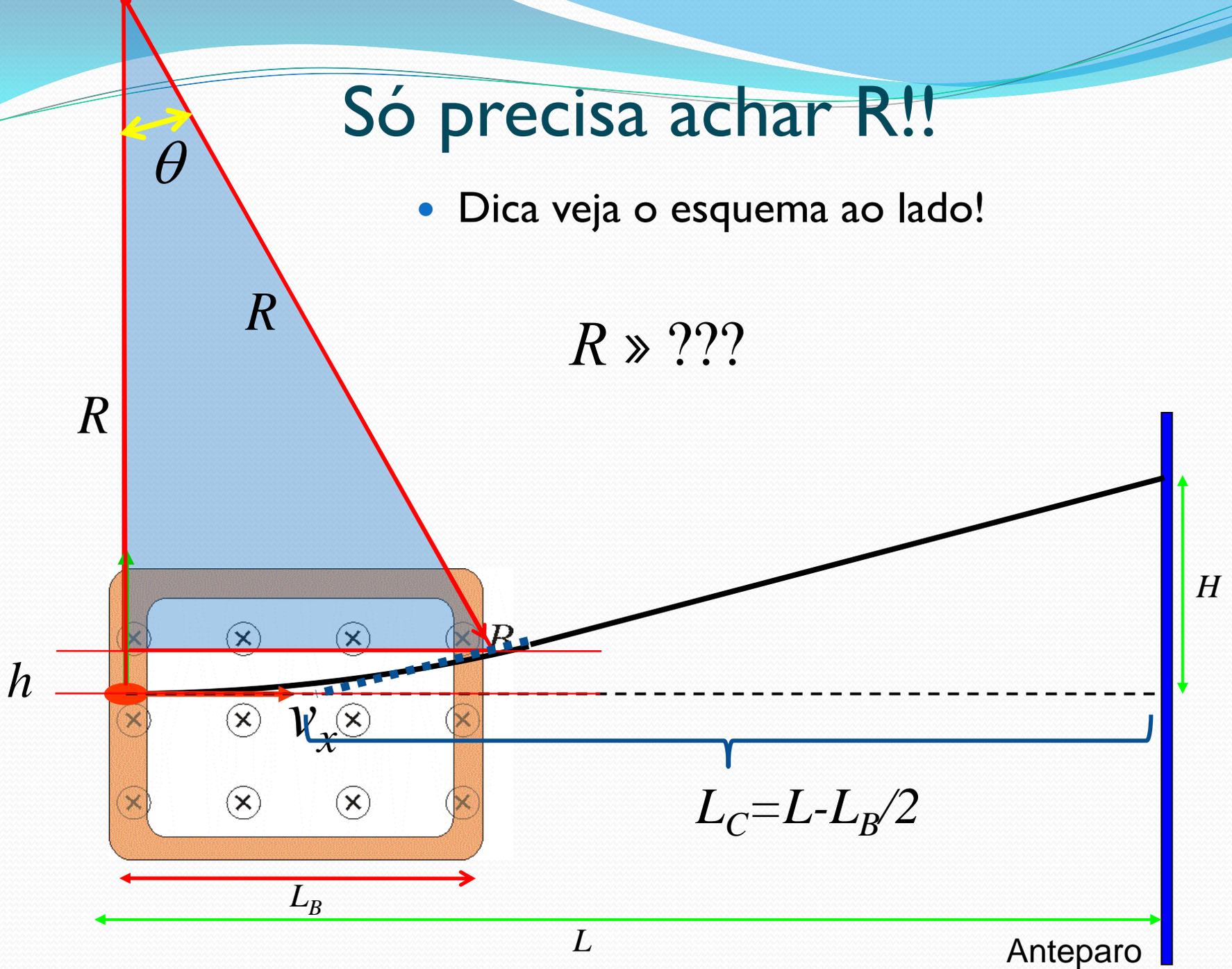
$$B_z = \frac{m_e v_x}{eR}$$

- Tendo B e a velocidade  $v_{0X} = \sqrt{\frac{2eU_{AC}}{m_e}}$
- Com as equações do movimento se encontra o deslocamento.

# Só precisa achar R!!

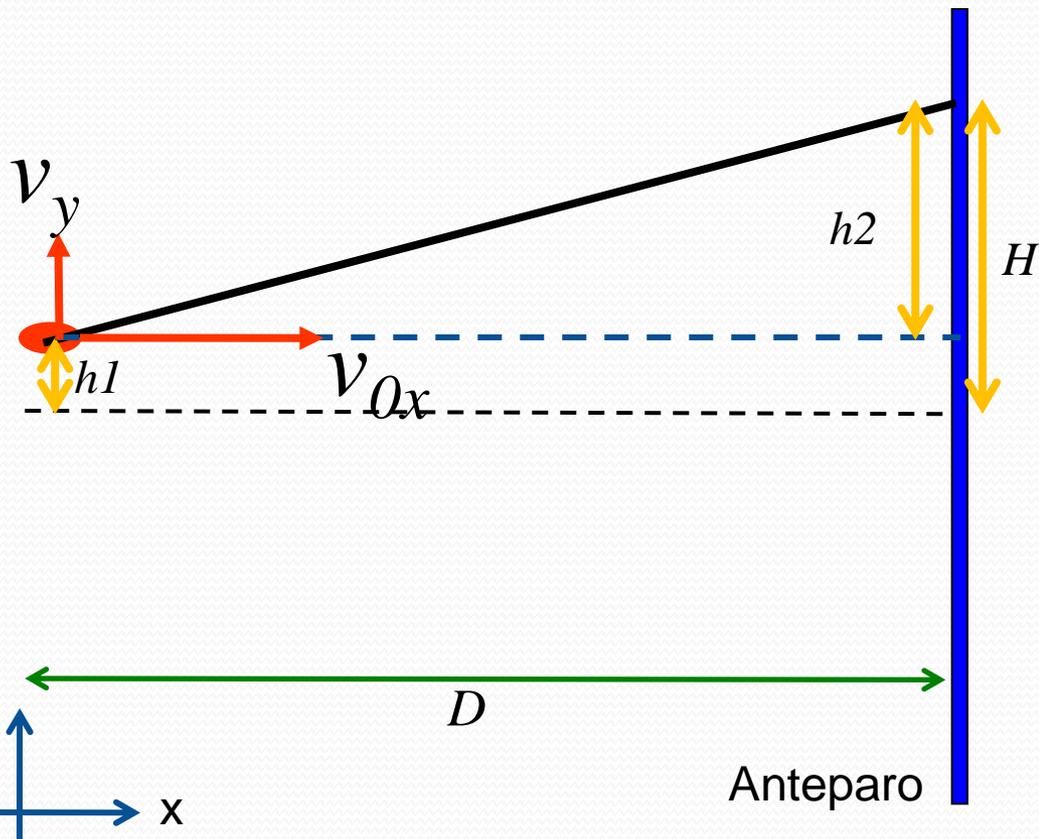
- Dica veja o esquema ao lado!

$$R \gg ???$$



# Modelo Simplificado – Trecho 3

- Na última parte não há forças agindo sobre a partícula, então o movimento é uniforme em  $x$  e  $y$ 
  - Usamos as velocidades  $v_y$  e  $v_{ox}$ , e a posição  $h_1$ , para encontrar  $H$



$$(E - v_{ox}B) \mu v_{0x}^2 H$$

$$E / B = v_{selec}$$

- Quanto vale a constante de proporcionalidade?
- Podemos calcular  $E$  e  $B$  quando a partícula passa direto?

# Boa semana!

