

Seletor de Velocidades,

Parte 1 – Funcionamento Geral

Aula 3

Prof. Henrique Barbosa
Edifício Basílio Jafet - Sala 100

Tel. 3091-6647

hbarbosa@if.usp.br

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

TAREFAS SEMANA PASSADA



Para entregar - Resumo

- Tensão da onda senoidal de 2.5V medida com multímetro e osciloscópio
 - figuras e análise
- Figuras das medidas das ondas quadradas e triangulares com o osciloscópio
 - figuras e discussão
- Descreva e discuta o que acontece ao aplicar
 - Uma onda quadrada em um capacitor
 - Uma onda senoidal em um diodo
- Levante a curva característica de um resistor desconhecido usando corrente alternada
 - Gráficos, figuras e análise

Medidas com o multímetro

Considere-se um circuito com dois resistores em série. Sejam V e v as tensões nos resistores, um deles desconhecido e o outro de 47Ω ; R e r suas resistências, respectivamente. Pelos dois resistores passa a mesma corrente I . Assim, pela lei de Ohm (supondo que os resistores são ôhmicos):

$$I = \frac{v}{r} = \frac{V}{R} \Rightarrow V = \frac{R}{r}v$$

Dessa forma, é possível descobrir a resistência desconhecida medindo-se as tensões em ambos os resistores e tomando a razão entre elas. Em um ajuste $V \times v$ deve-se obter uma reta $y = ax + b$ (teoricamente deve ser $b = 0$, então experimentalmente o coeficiente linear deve ser compatível com 0), e através do MMQ pode-se encontrar a resistência procurada com auxílio do coeficiente angular: $R = a \cdot r$.

Para o cálculo da raiz das tensões quadráticas médias (V_{rms}), utilizamos a definição de valor esperado de uma variável contínua e calculamos V_{rms} para ondas de período T :

$$V_{rms}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T dt [V(t)]^2$$

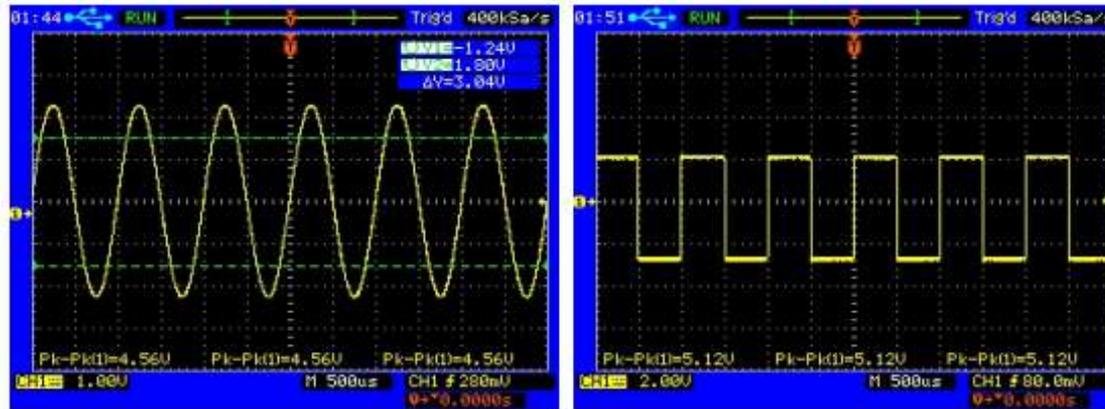
Para ondas senoidal, quadrada e triangular, que são os tipos envolvidos no experimento, obtém-se em particular, sendo V_0 a amplitude e V_{pp} a tensão de pico a pico de cada onda:

$$V_{rms}^{sen} = \frac{1}{\sqrt{2}}V_0 = \frac{\sqrt{2}}{4}V_{pp}$$

$$V_{rms}^{quad} = V_0 = \frac{1}{2}V_{pp}$$

$$V_{rms}^{tri} = \frac{1}{\sqrt{3}}V_0 = \frac{\sqrt{3}}{6}V_{pp}$$

Medidas com o osciloscópio



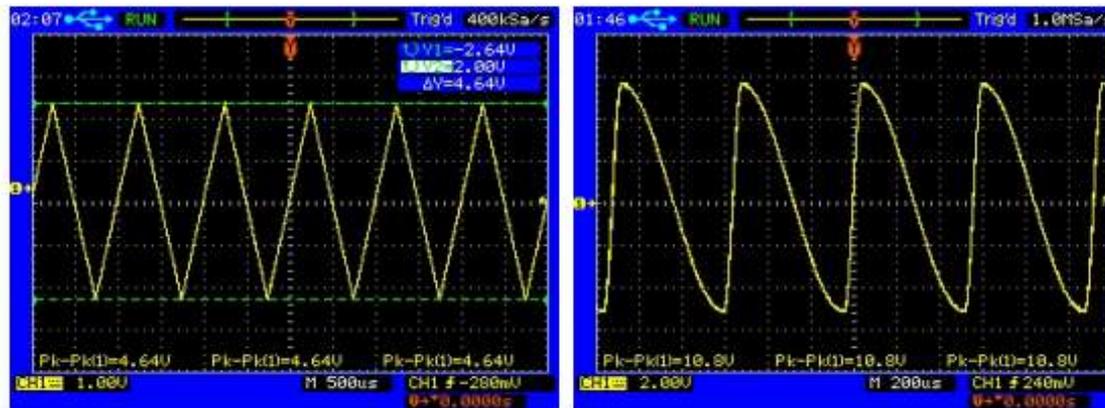
(a) onda senoidal

(b) onda quadrada

$$V_{rms} = \frac{V_{pico}}{\sqrt{2}}$$

(onda senoidal)

Figura 2: Tela do osciloscópio durante as medições de onda senoidal e quadrada.



(a) onda triangular

(b) onda deformada

Figura 3: Tela do osciloscópio durante as medições de onda triangular e senoidal deformada.

Capacitor

- Resolvendo a equação diferencial que descreve o comportamento do circuito, temos:

Comparemos nossos resultados experimentais com a teoria. Como o resistor, o capacitor e a fonte estavam em série:

$$V_{fonte}(t) = \frac{Q}{C} + R \frac{dQ}{dt} \quad (2)$$

A solução da equação diferencial 2 é, quando o capacitor não está carregado e começa a carregar:

$$Q = Q_{max}(1 - e^{-t/RC}) \quad (3)$$

Com $t = 0$ quando $Q = 0$

E quando está carregada e começa a descarregar:

$$Q = Q_{max}(e^{-t/RC}) \quad (4)$$

Com $t = 0$ quando $Q = Q_{max}$.

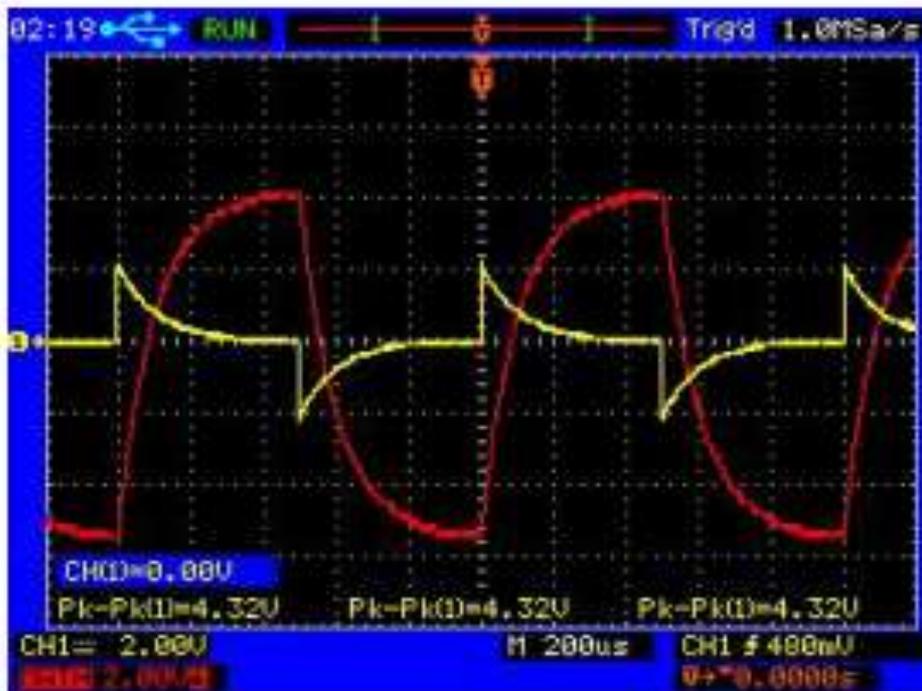


Quando o capacitor está carregado, ...

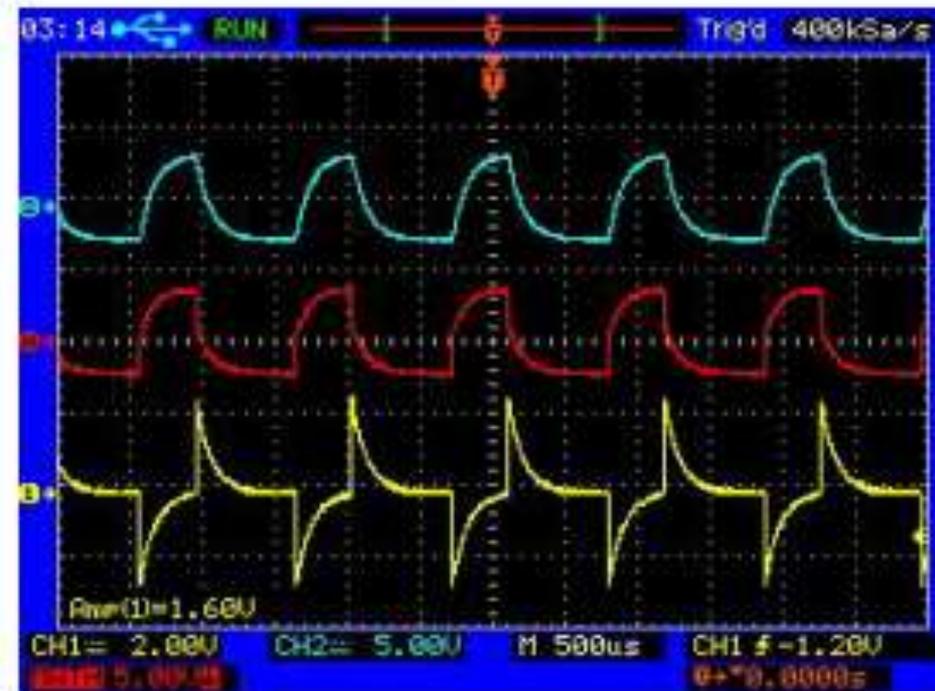
...não passa mais corrente no circuito...

Capacitor – Problemas...

É importante ressaltar que é esperado que a soma da onda de tensão no capacitor com a onda de tensão no resistor resulte na onda quadrada fornecida pelo gerador. No entanto, isso não ocorre, como visto na Figura 6. Embora a análise de dados apresentada não seja capaz de explicá-la, é possível suspeitar que tal ocorrência seja devida à tensão que ocorre na resistência interna do gerador, ou ainda, à leitura do osciloscópio, que pode ter sido afetado por ruídos externos.



(a) respostas do circuito RC



(b) soma das saídas de R e C

Capacitor – Alta frequência

A cada mudança de tensão ocasiona carga ou descarga do capacitor, permitindo desta forma que a corrente flua. A quantidade de "resistência" de um capacitor, sob regime de uma corrente alternada, é conhecida como *reatância capacitiva*, e a mesma varia conforme varia a frequência do sinal. A reatância capacitiva X_c é dada por:

$$X_c = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

Devido a *reatância capacitiva* do capacitor, sob uma alta frequência, por (2), tem-se uma "resistência" no capacitor desprezível. A figura 8 apresenta o circuito sob 100kHz.

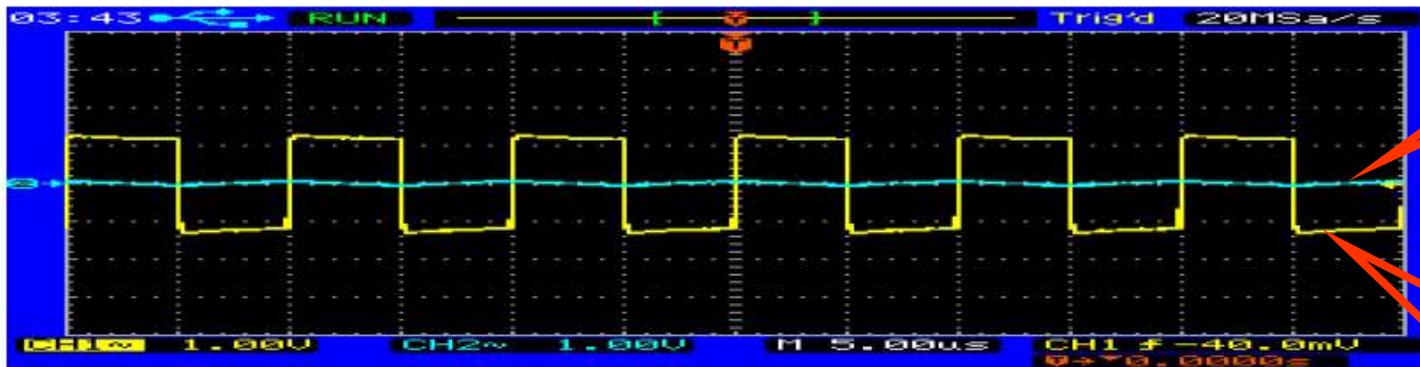


Figura 8: comportamento do circuito anterior sob uma nova frequência de 100kHz.

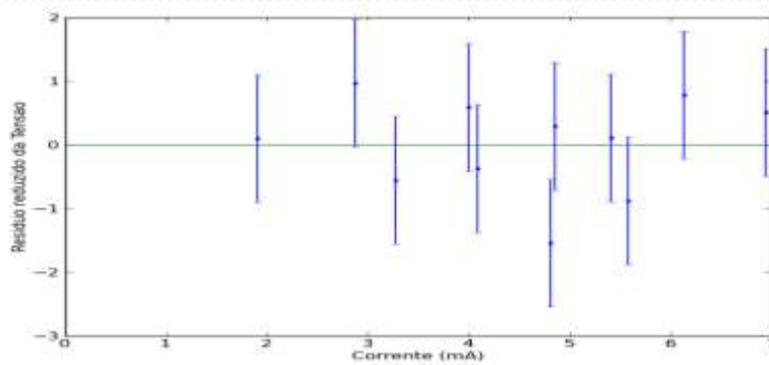
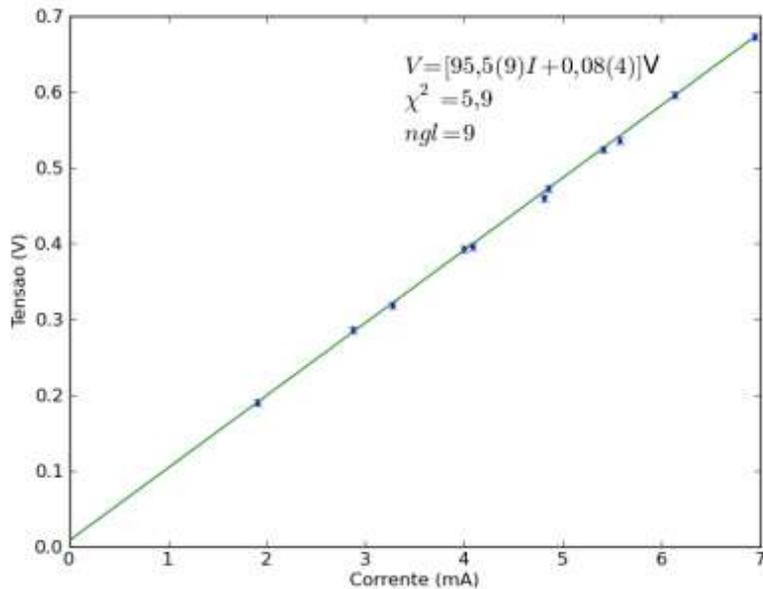
Desta forma, é possível observar a tensão quadrada no resistor como se fosse um circuito composto apenas pela resistência auxiliar.

O capacitor não tem tempo de carregar...

A tensão fica "toda" em cima do resistor

Curva característica

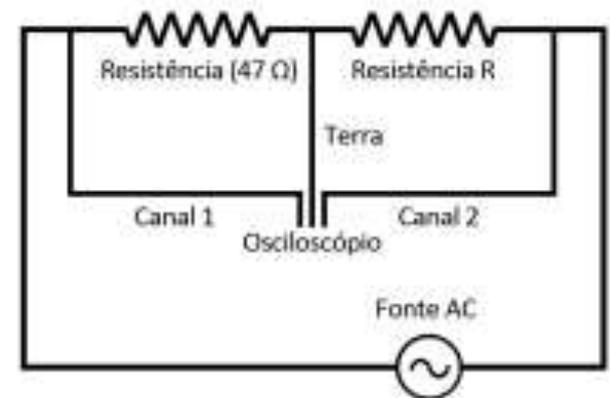
Variando V_p na mão =
muito trabalho e
poucos pontos...



$$V(t) = V_P \sin \omega t$$

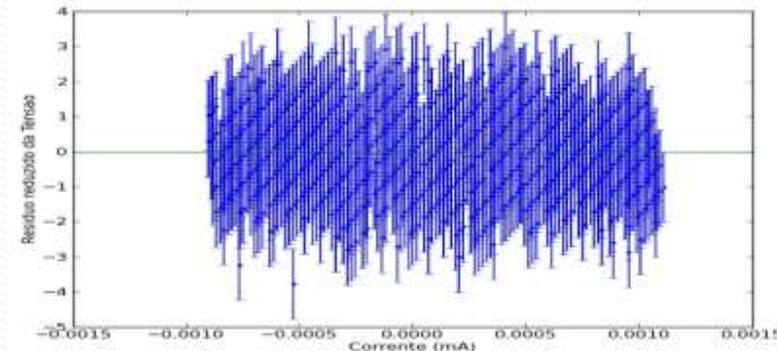
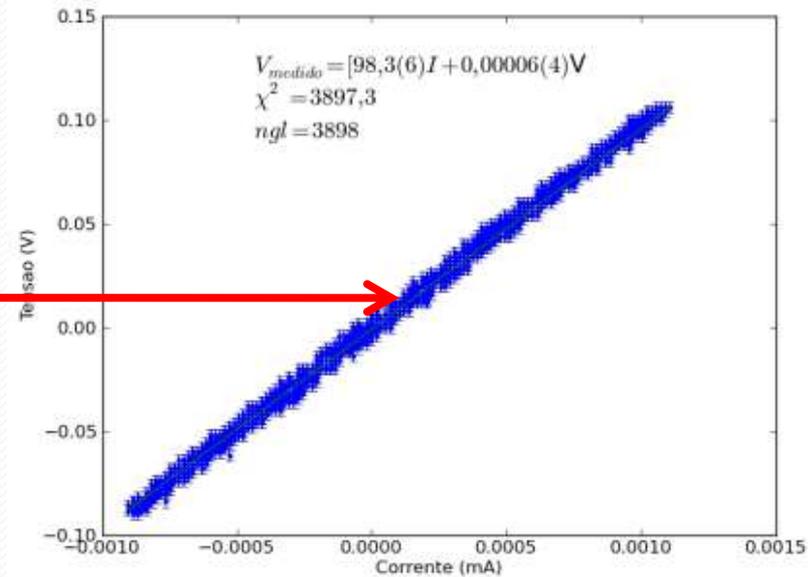
$$V_{47}(t) = 47 \Omega \cdot I_P \sin \omega t$$

$$V_R(t) = R \cdot I_P \sin \omega t$$



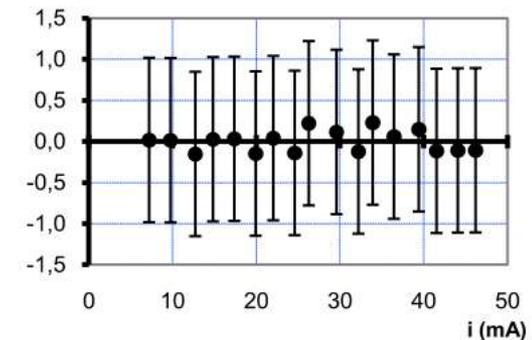
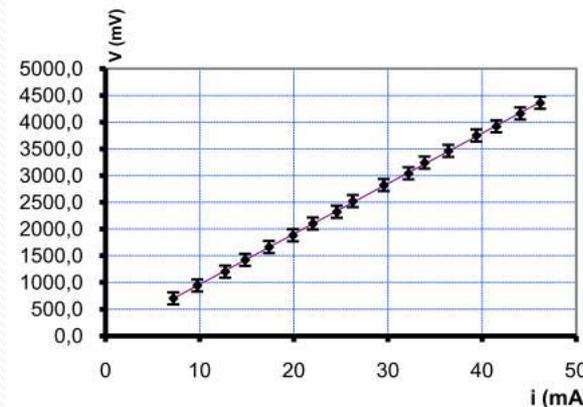
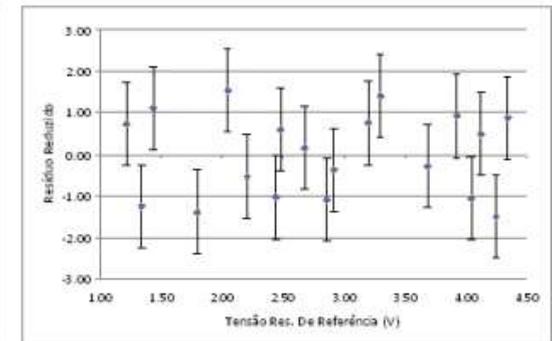
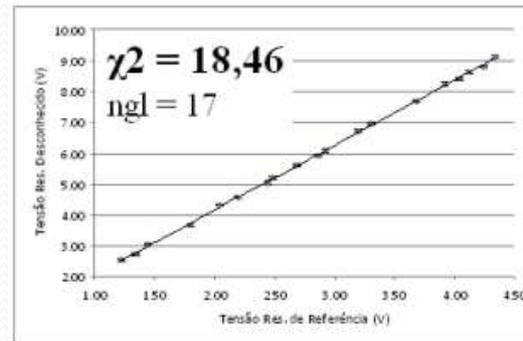
Curva característica

- É um circuito de **corrente alternada** e o osciloscópio está medindo, em função do tempo, a tensão nos dois canais!
- A curva característica era simplesmente o gráfico: canal1 vs canal2



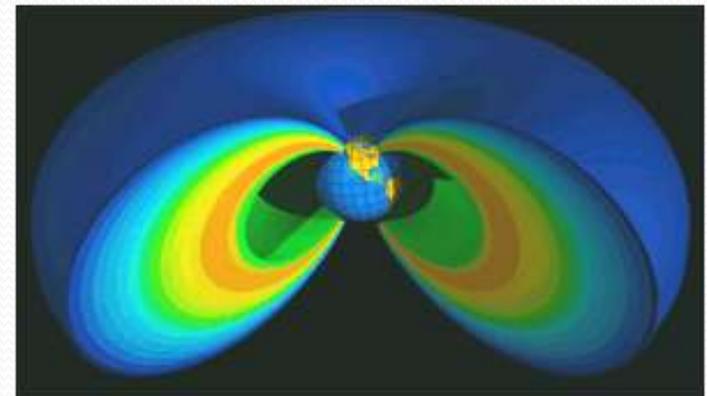
Resistência desconhecida (100Ω)

	R (Ω)
H1	99 (5)
H2	100,5 (21)
H3	95,9 (9)
H4	104 (7)
H5	94,23 (230)
H6	98,3 (6)
H7	102 (8)
H8	98,10 (1877)
H9	

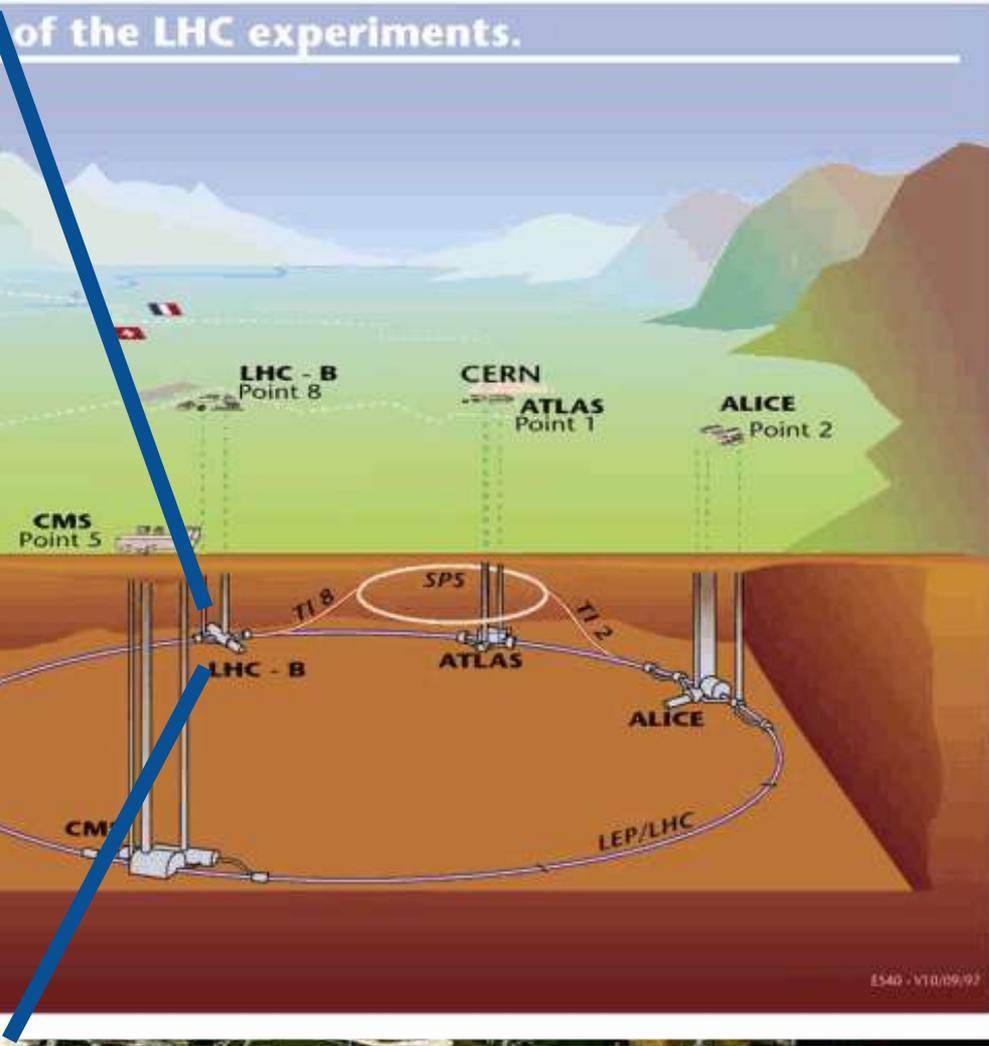
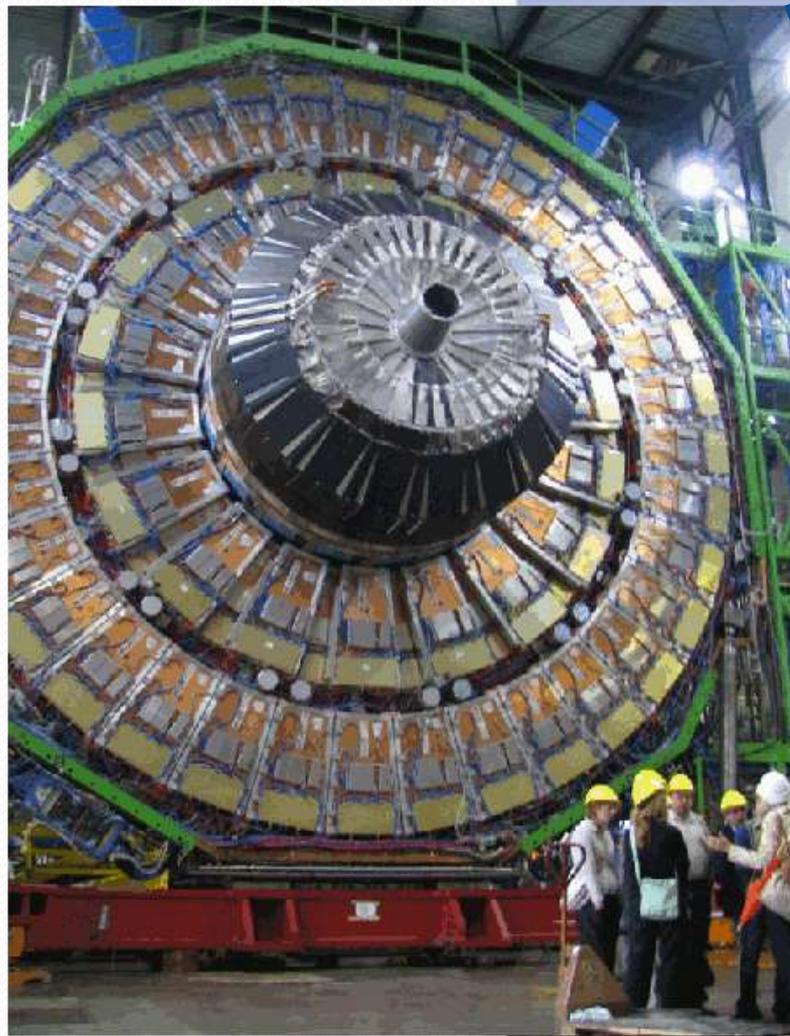


2ª Experiência

- Nesta experiência iremos estudar campos elétricos e magnéticos através da construção de um **acelerador de partículas**.
- Mas o que é um acelerador de partículas?
- Antes disso... Como podemos acelerar uma partícula?



Física de Partículas / Nuclear



Seletor de Velocidades

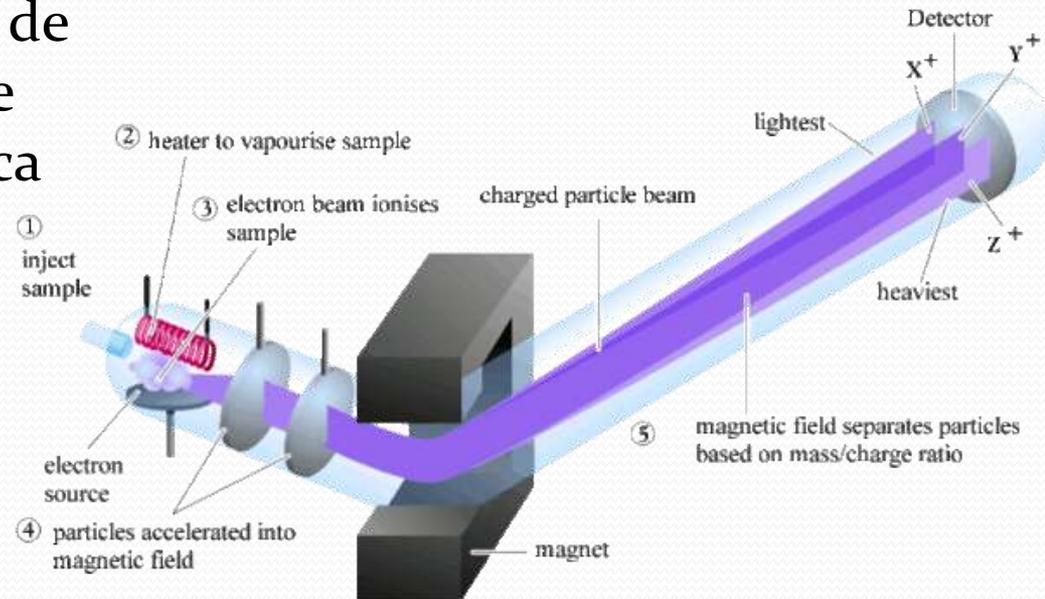
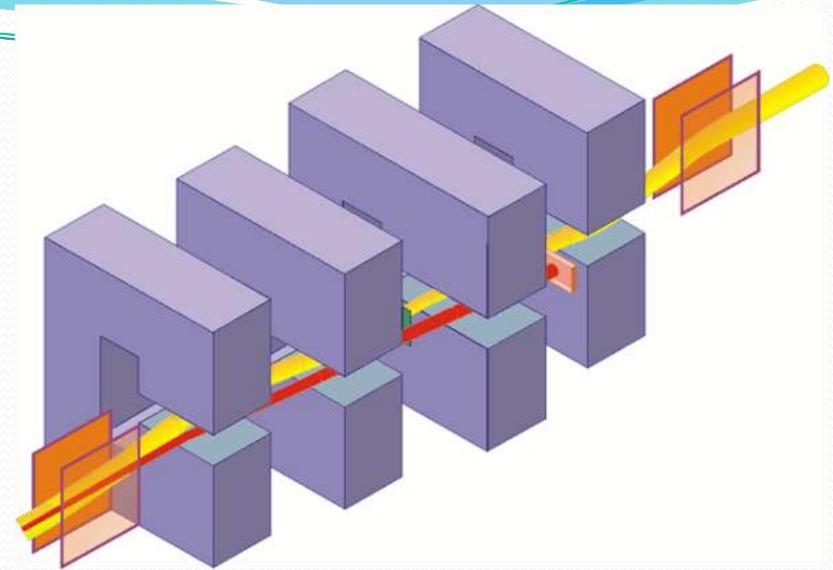
... Um acelerador de partículas “simples”

- 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**:

Todo filtro faz uma seleção dos objetos que o atravessam.

A utilidade

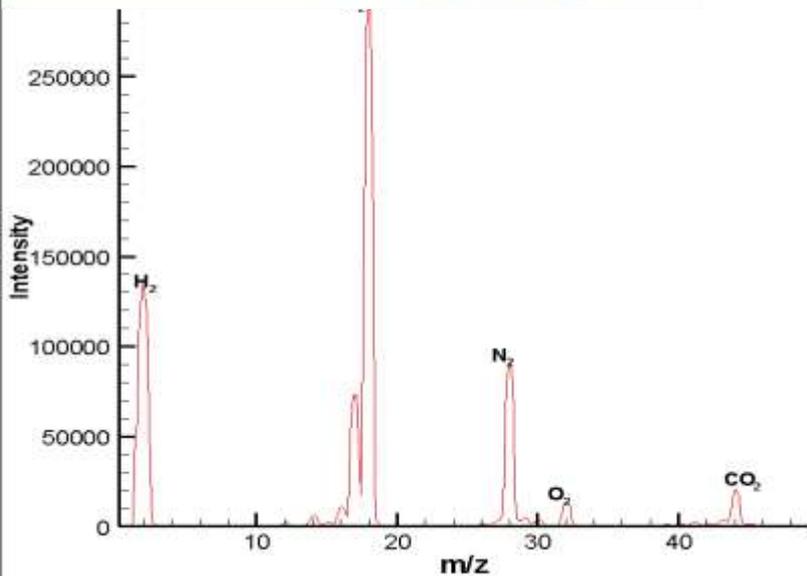
- Um **seletor de velocidades** é um instrumento importante particularmente em física nuclear, tanto de alta como de baixa energia.
- Faz parte dos espectrômetros de massa: determina com grande precisão a composição química pela razão massa-carga dos componentes da amostra.



Espectrômetros de Massa



Accelerator mass spectrometer at Lawrence Livermore National Laboratory

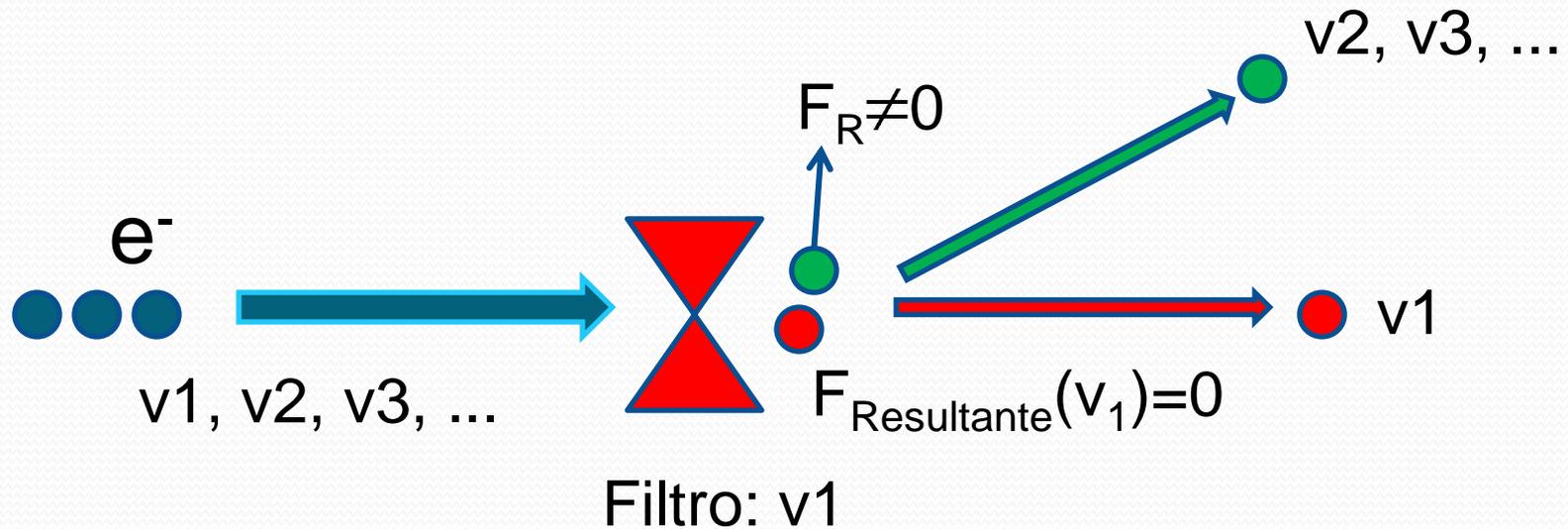


Seletor de velocidades: como funciona

- 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:

Precisa-se aplicar uma força dependente da velocidade!
... e que atua em algumas partículas (ie, velocidades) e em outras não...

Seletor de velocidades: funcionamento

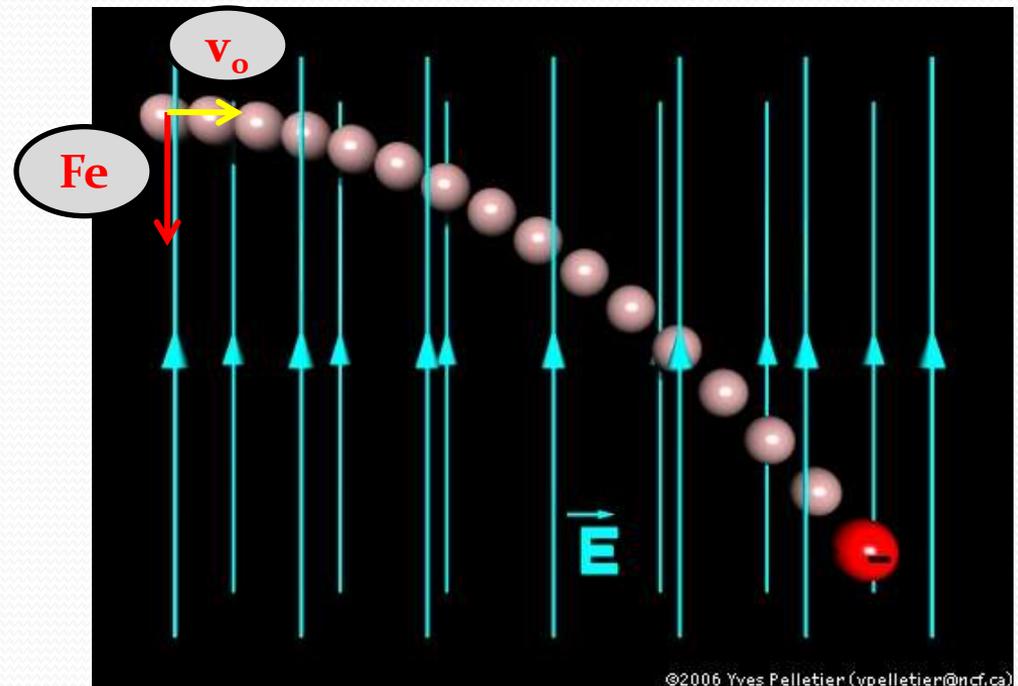


Campo elétrico

- Quando um feixe de partículas carregadas de carga q , atravessa uma região onde existe um campo elétrico, \vec{E} , perpendicular à trajetória das partículas, ele vai sofrer uma força \vec{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



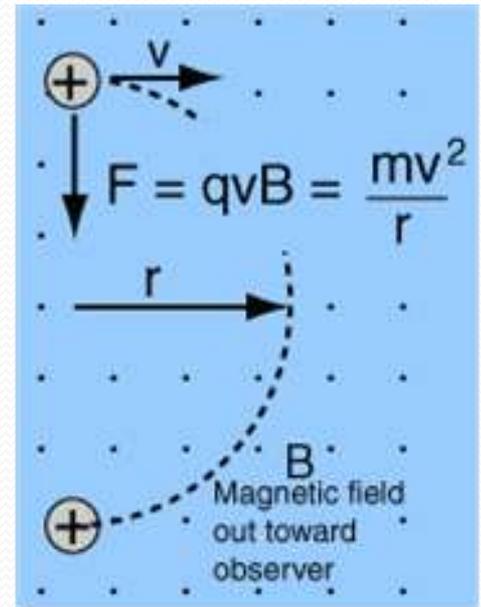
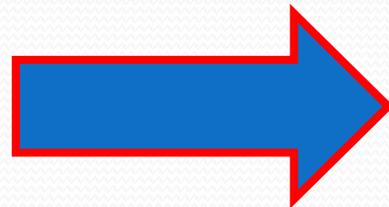
Campo magnético

- 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?

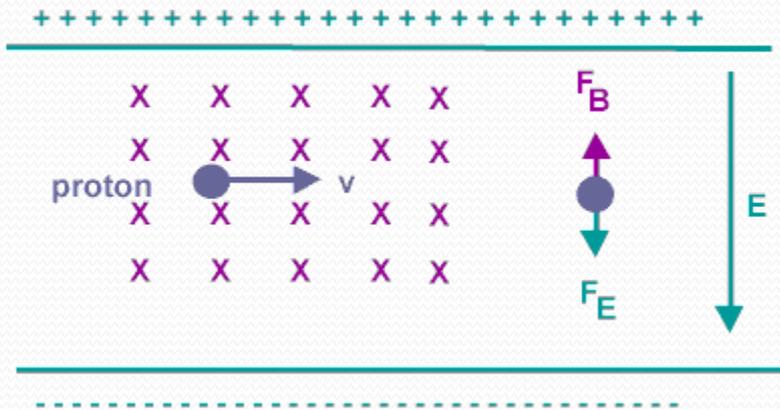
Vai aparecer uma força magnética, \mathbf{F}_m , proporcional à velocidade:

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

Se $B \perp v$

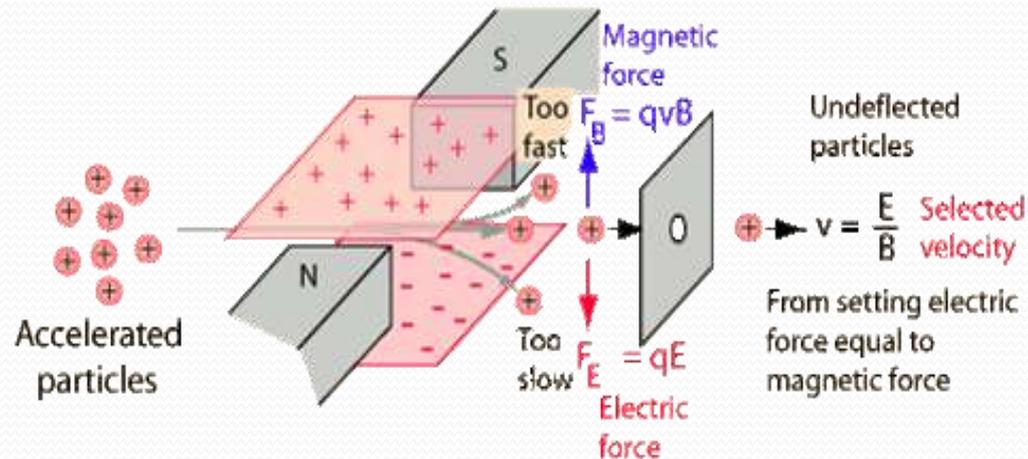


Funcionamento do Seletor



- 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:

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


Seletor de velocidades: o feixe

Na experiência que vamos realizar, o feixe é um feixe de elétrons gerado e acelerado dentro de um tubo de raios catódicos.

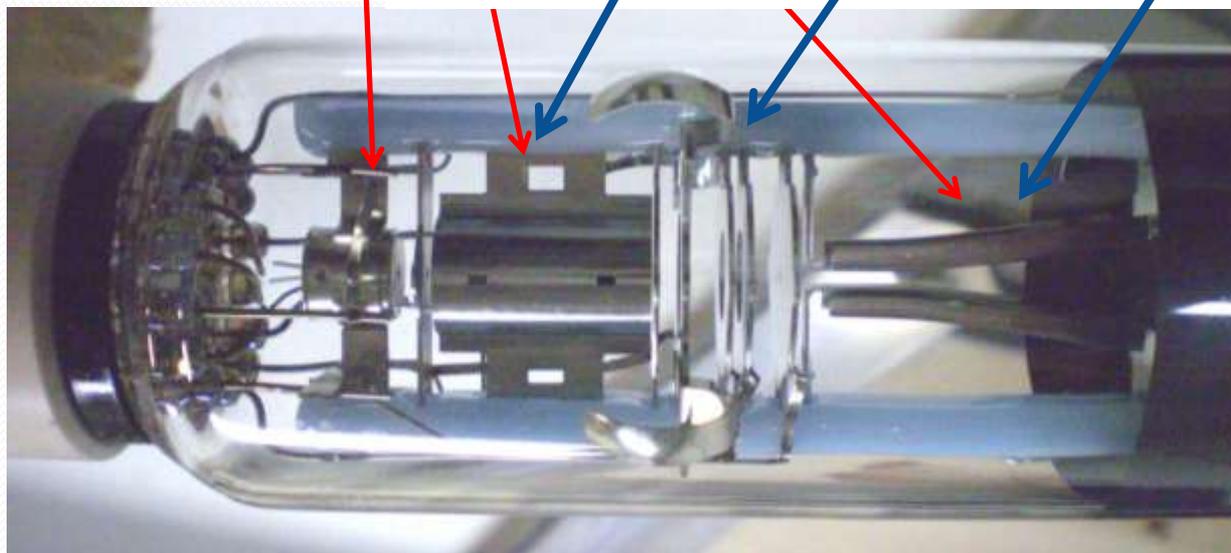
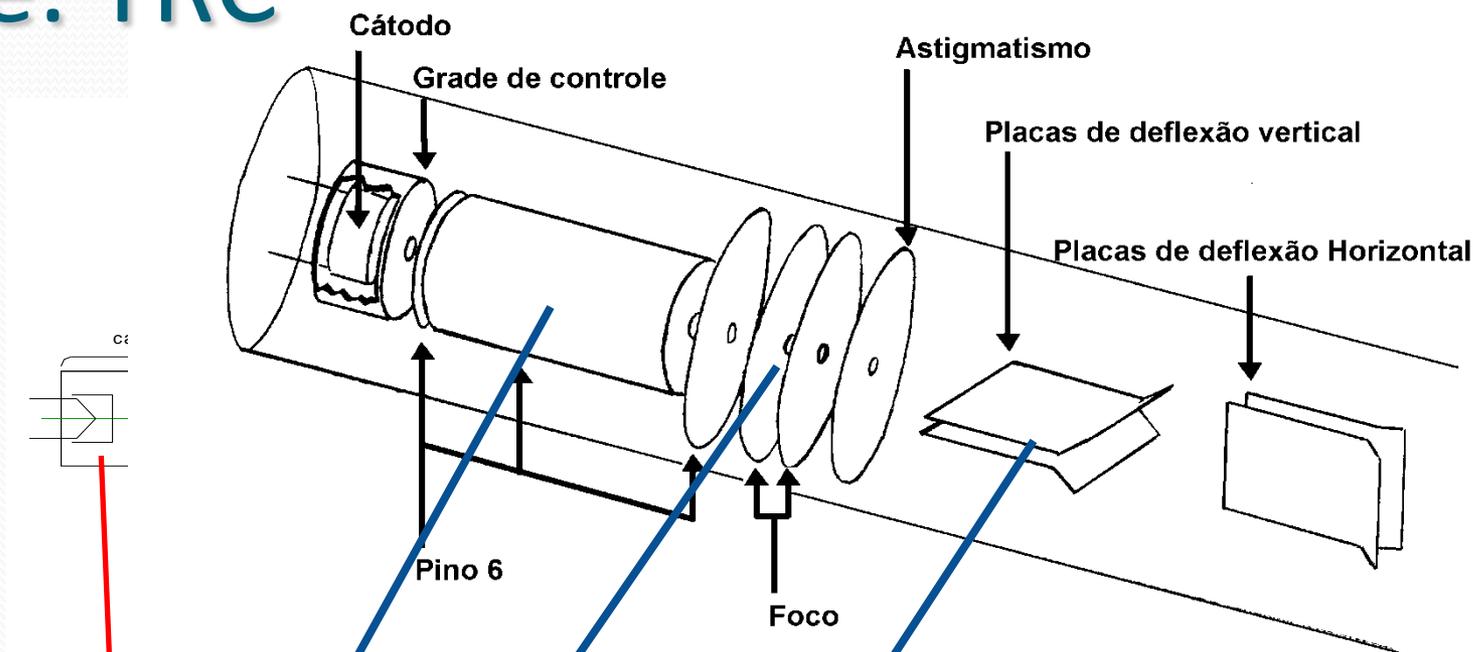
O tubo de raios catódicos (**TRC**) é o nome que se dá ao dispositivo responsável pela produção da imagem nos aparelhos de TV e monitores antigos.



O tubo de raios catódicos

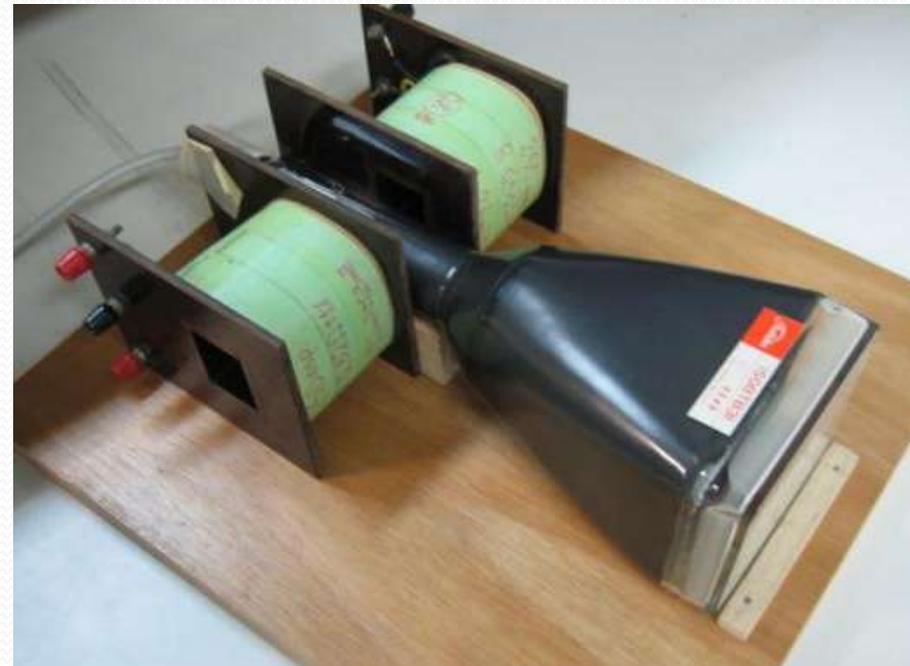
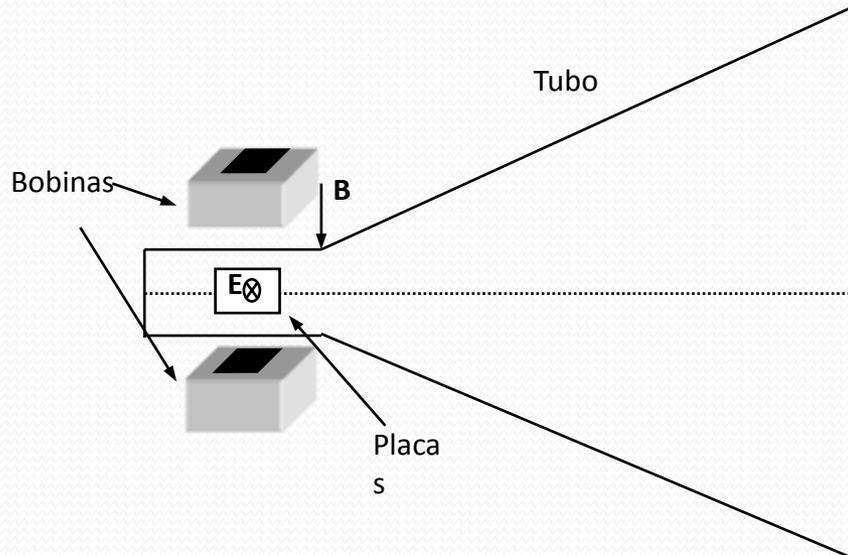
- ❑ **Gerador do feixe:** um filamento que, ao ser aquecido, libera elétrons. O processo que ocorre no filamento é a emissão termiônica.
- ❑ **Acelerador do feixe:** dois dispositivos aceleradores, o **anodo 1** e o **anodo 2**, que aceleram os elétrons em direção a uma tela fosforescente, gerando aí um ponto luminoso. O sistema de geração e aceleração do feixe de elétrons recebe o nome de **canhão de elétrons**. Todo esse sistema encontra-se dentro de um tubo de vidro selado, em baixa pressão.
- ❑ **Desviadores do feixe:** 2 pares (na verdade só vamos utilizar um) de placas que permitem a instalação de campos elétricos perpendiculares à trajetória do feixe. Essas são as placas defletoras.

O feixe: TRC



O TRC como filtro de velocidades

- Um par de placas desviadoras cria o campo elétrico perpendicular ao feixe
- Um par de bobinas externas ao tubo cria campo magnético perpendicular ao feixe



O que se pretende nas próximas 6 semanas:

- Estudar isoladamente o campo elétrico das placas o TRC.
 - Ver como esse campo afeta as trajetórias dos elétrons de várias energias e para várias intensidades de campo
- Depois estudar isoladamente o campo magnético das bobinas que vamos acoplar ao TRC para fazer o filtro e velocidades
 - Estudar o seu efeito na trajetória dos elétrons tanto em função da energia como em função da intensidade do campo
- Por fim juntamos tudo e vamos parametrizar o seletor ou filtro de velocidades

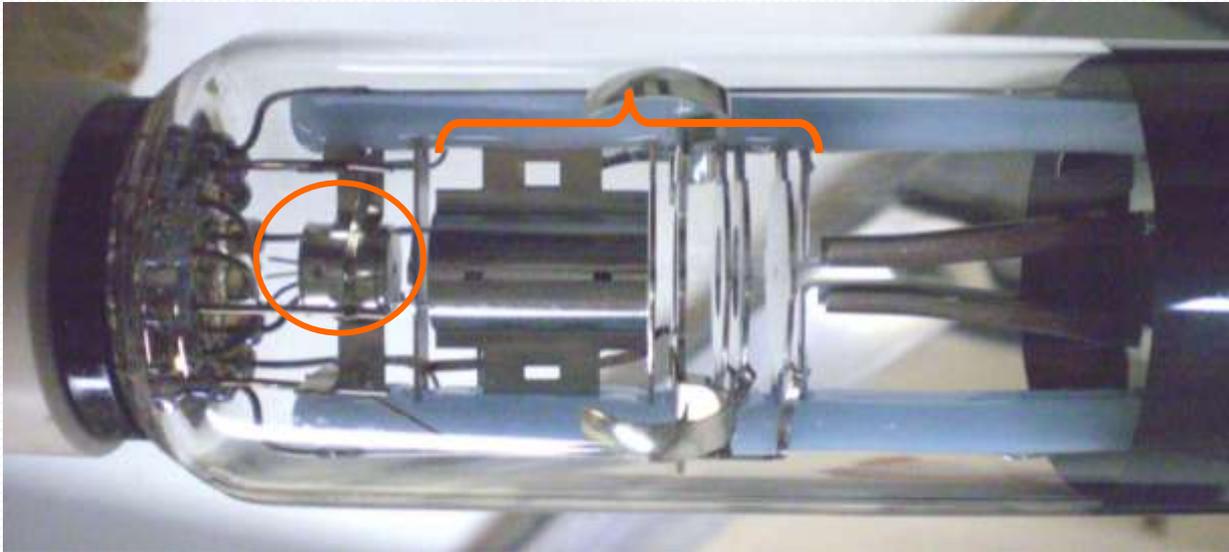
Exp. 2 – Seletor de Velocidades

PROGRAMAÇÃO

- Semana 1
 - Colocar o TRC para funcionar e tentar entender o que acontece
- Semana 2
 - Mapear o campo elétrico das placas defletoras
- Semana 3
 - Simular o campo elétrico das placas defletoras
- Semana 4
 - Estudar a deflexão do feixe em função da tensão entre as placas e da tensão de aceleração
- Semana 5
 - Mapear e simular o campo magnético das bobinas
- Semana 6
 - Estudar a deflexão do feixe em função da corrente nas bobinas e da tensão de aceleração
- Semana 7
 - Calibrar e obter a resolução do seletor de velocidades

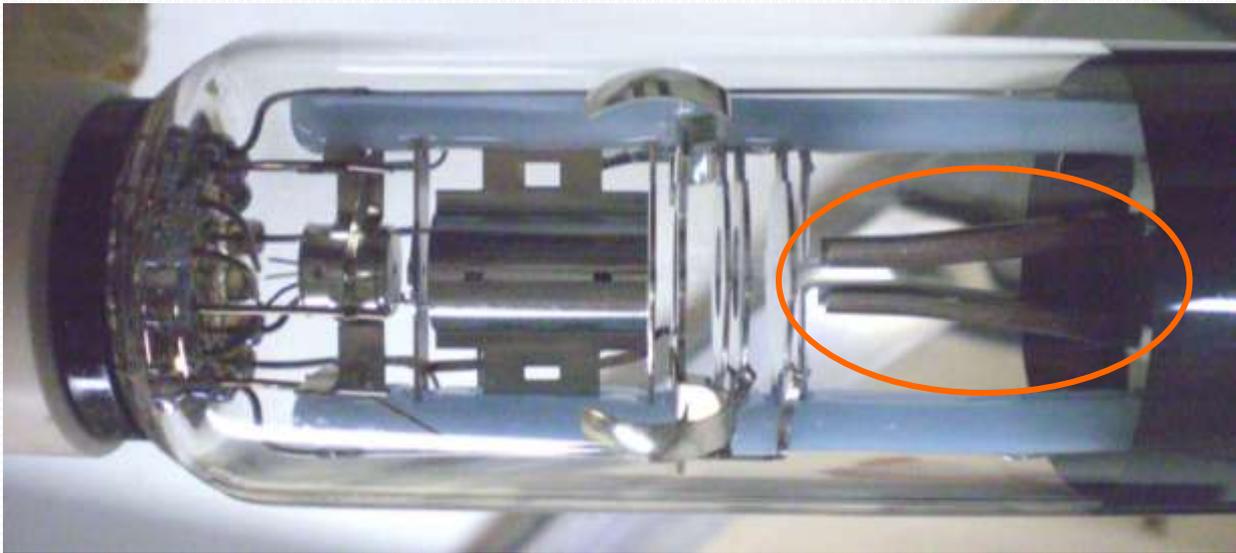
Tubo de Raios Catódicos

- O TRC dispõe de uma fonte que gera os elétrons:
 - Um filamento aquecido pela passagem de corrente elétrica libera elétrons que são extraídos e acelerados com uma diferença de potencial

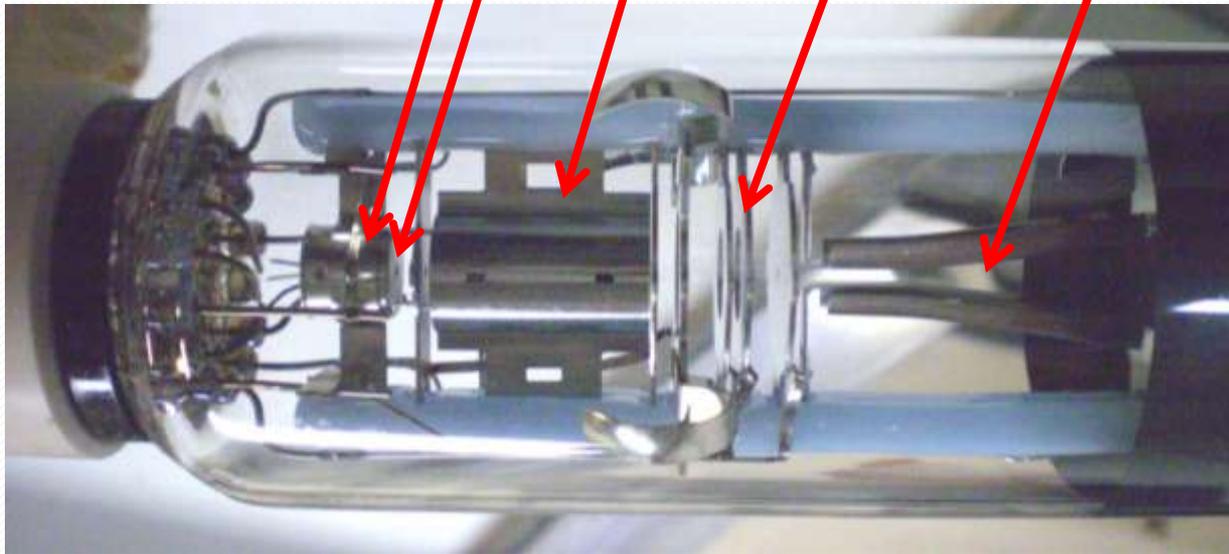
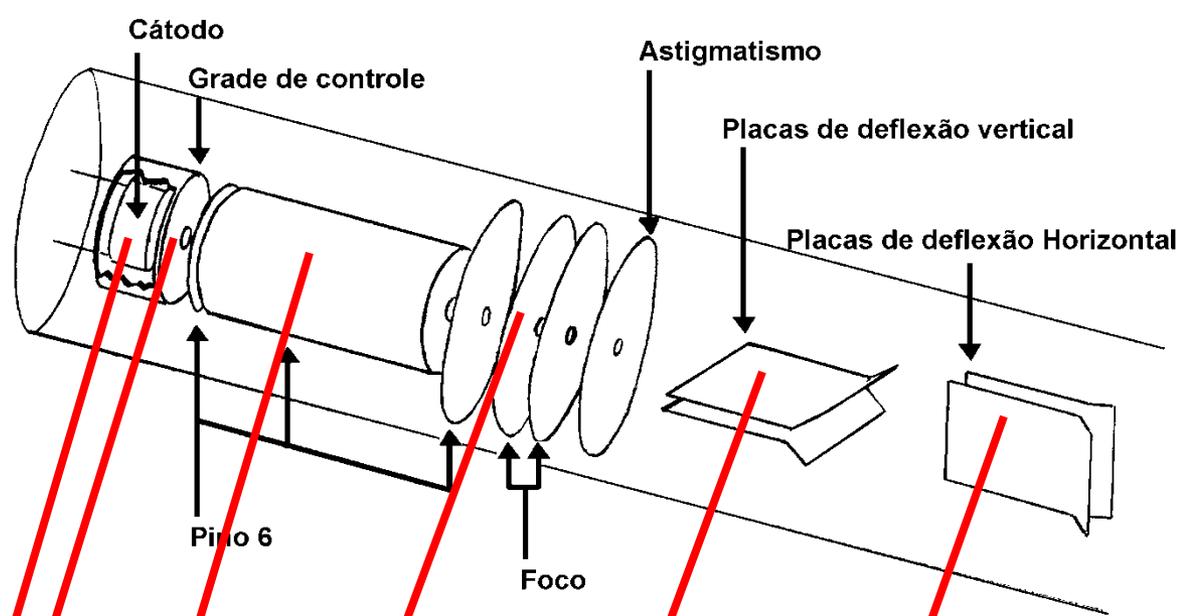


O campo elétrico:

- O campo elétrico é gerado por um capacitor, que vamos chamar de placas defletoras: aplica-se uma ddp entre elas

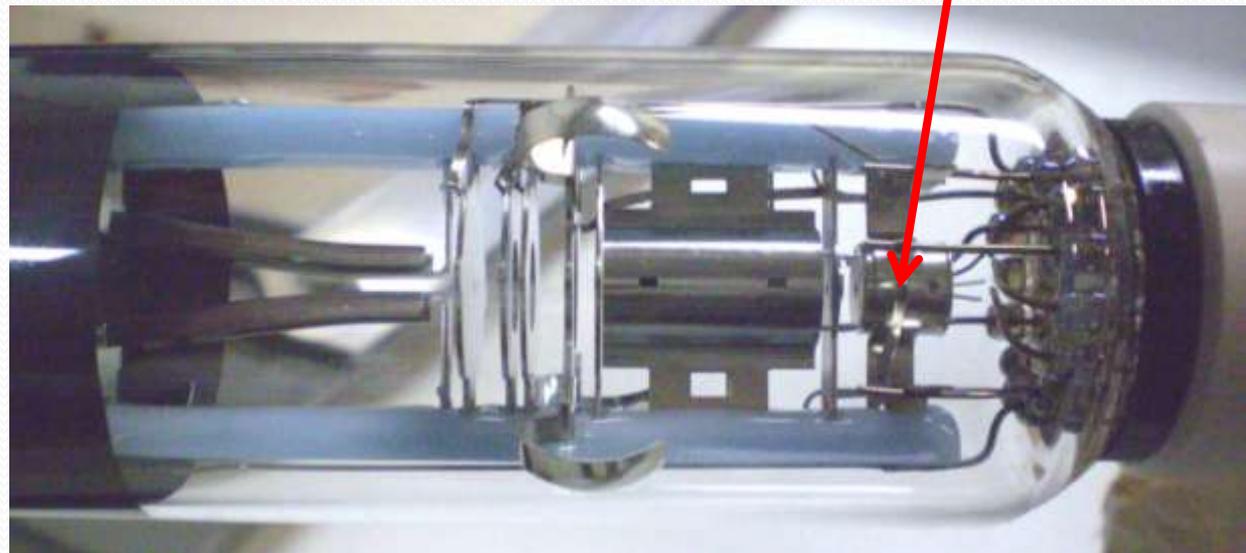
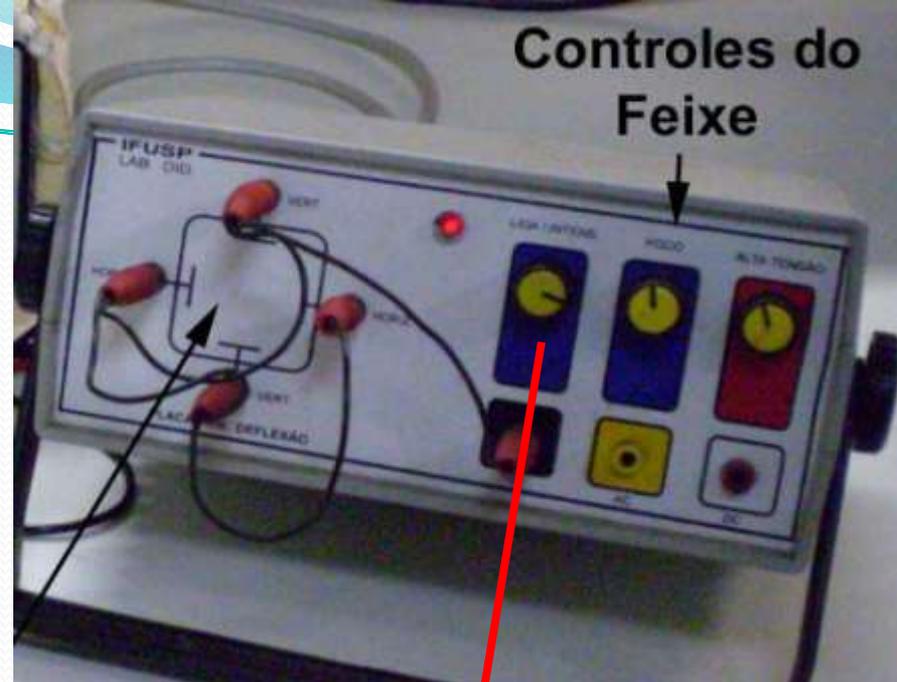


O TRC: esquema



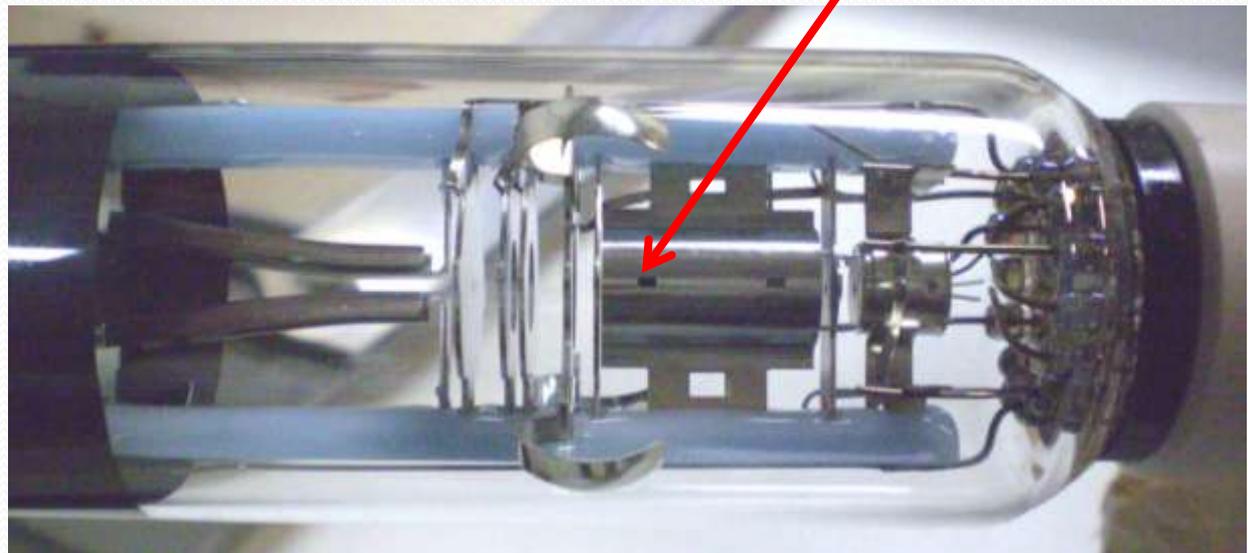
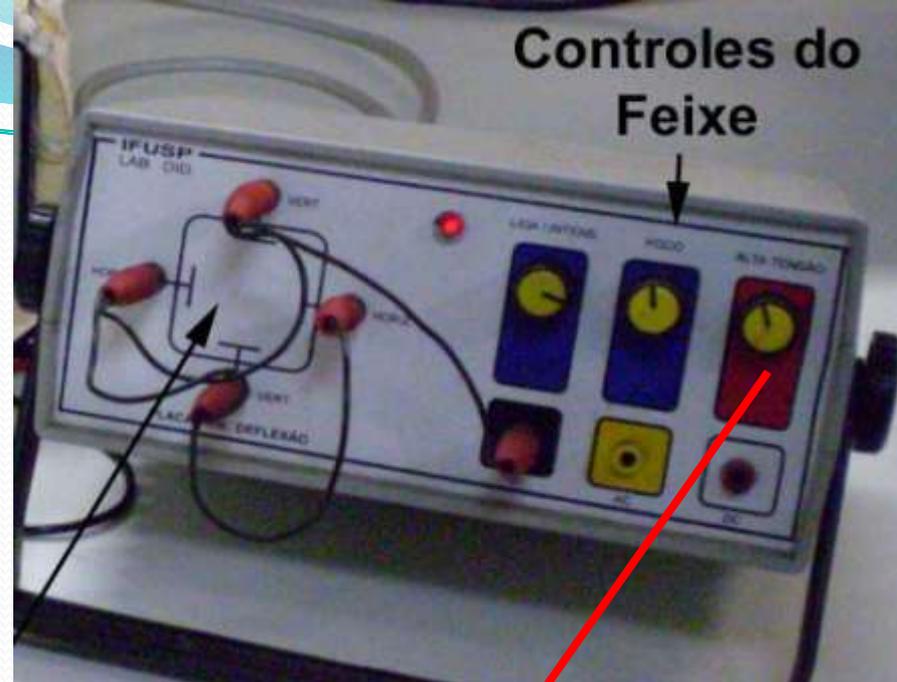
O TRC

- Ligar o **TRC**
- Esse botão controla intensidade do feixe (tensão de grade)



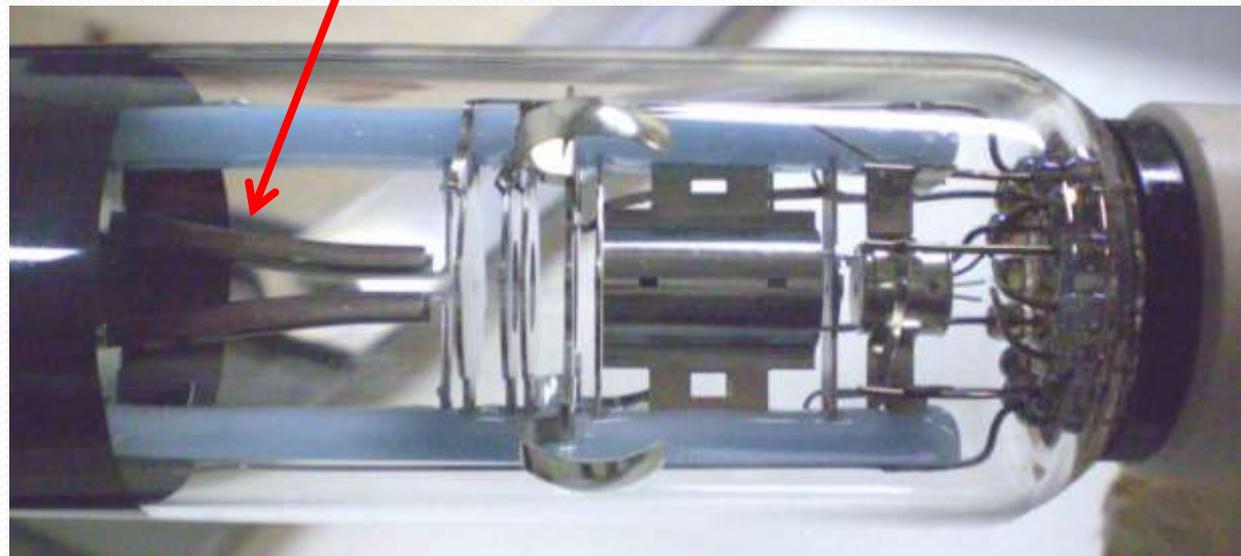
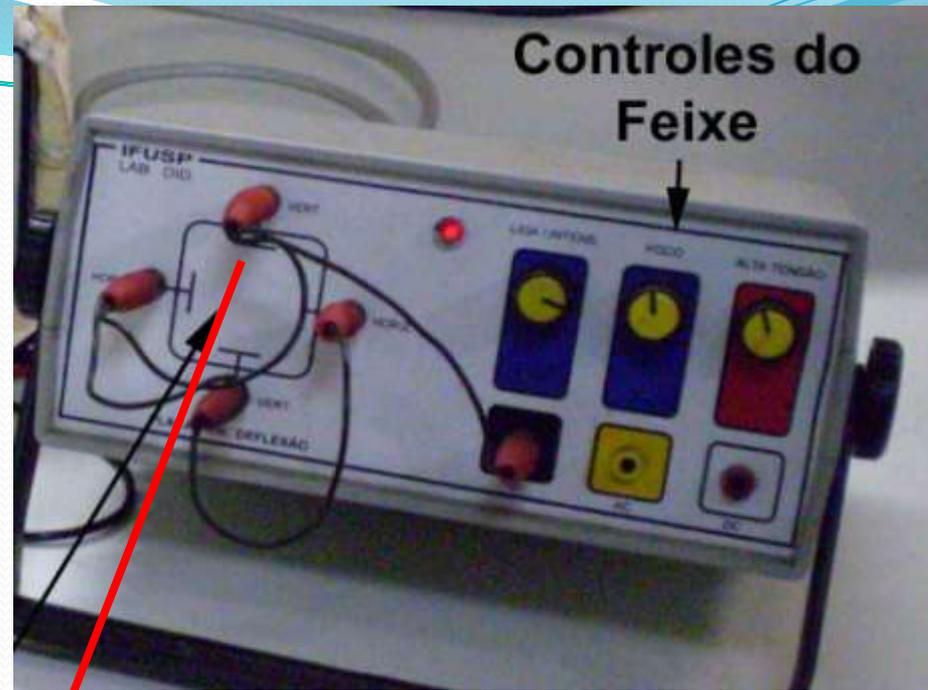
O TRC

- O controle de alta tensão U_{ac} ou tensão aceleradora (até **1200 V**) é responsável pela velocidade v dos elétrons



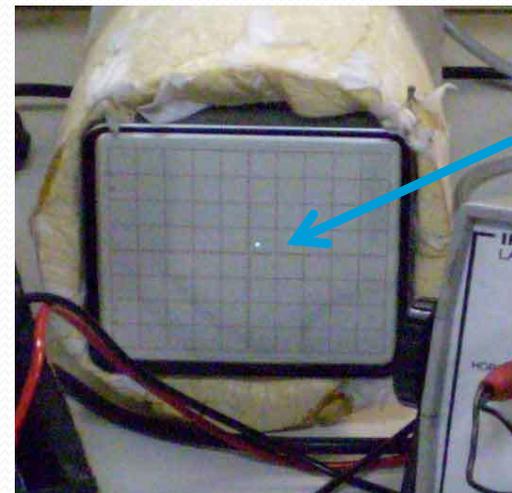
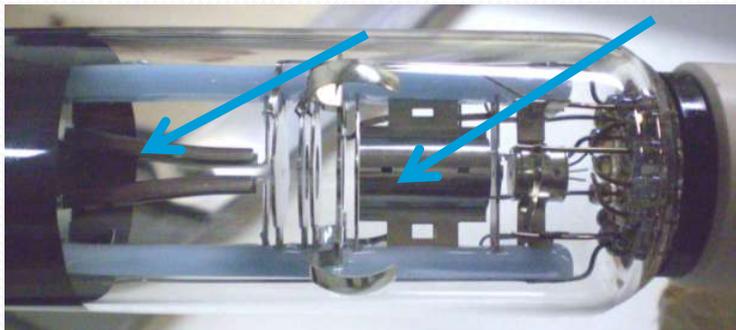
O TRC

- Controle da tensão nas placas V_p
 - Horizontais e verticais
 - Vamos usar somente as verticais
 - Fonte externa **DC** de **30V**



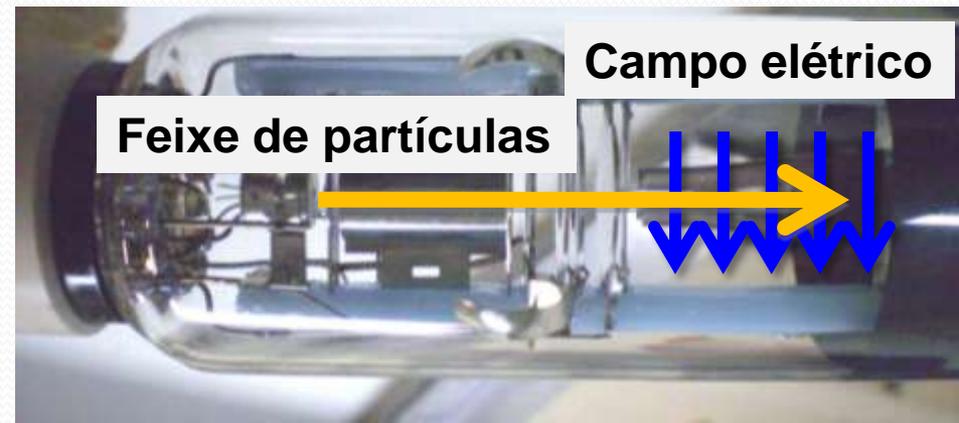
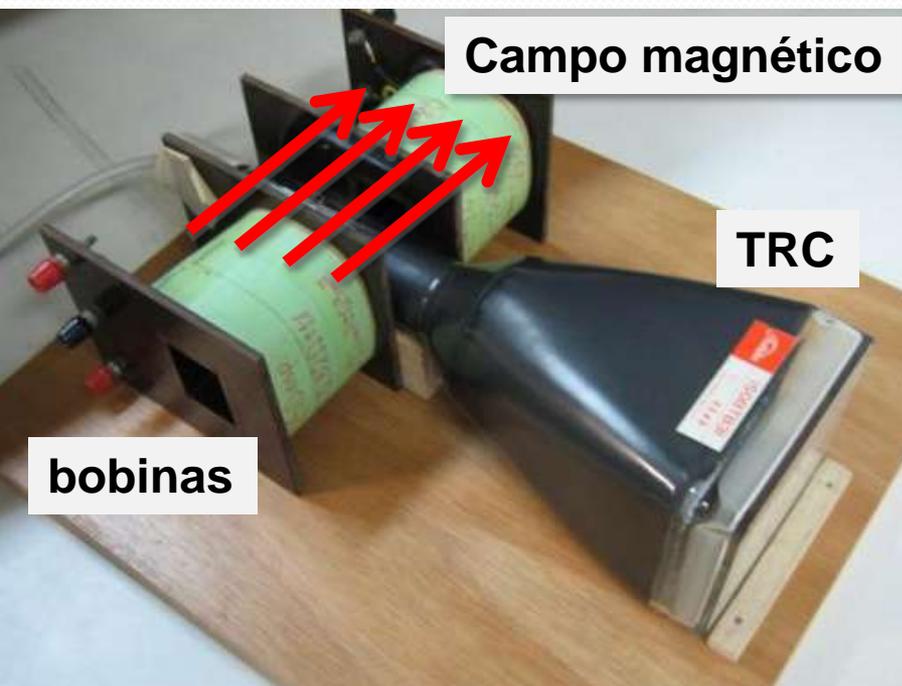
Medida da deflexão H do feixe

- Essa medida vai depender da velocidade dos elétrons (V_{ac}), da tensão nas placas defletoras verticais (V_p), e da corrente nas bobinas (i).
- Grandezas que podem ser medidas:
 - V_{AC} (velocidade),
 - Tensão nas placas (V_p)
 - Corrente nas bobinas (i)
 - Deflexão na tela (H).



A proposta para hoje

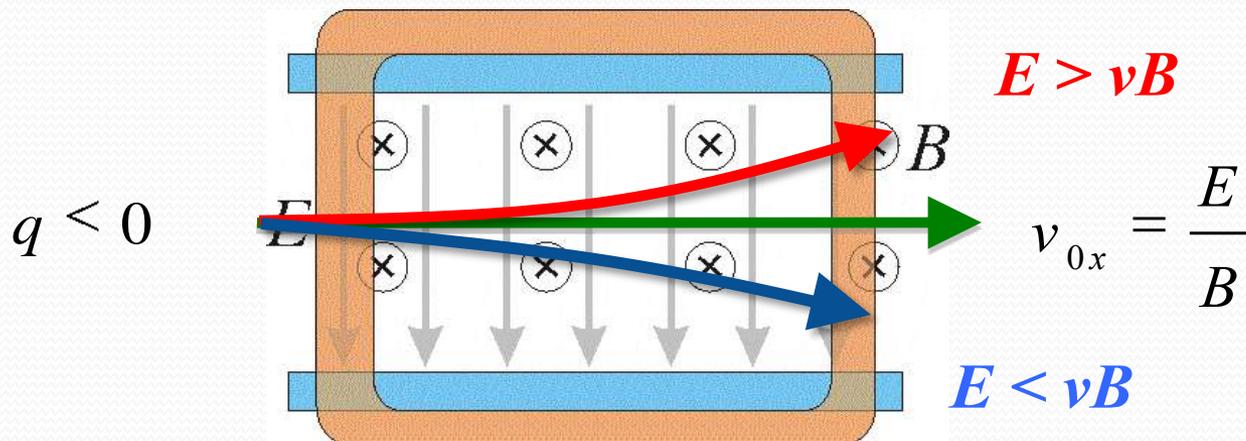
- Brincar com o tubo de raios catódicos:
 - Ver como ele funciona
 - Ver como se aplica os campos elétrico e magnético
 - Ver como ele seleciona velocidades
- E fazer um modelo simples desse funcionamento



Modelo Simplificado

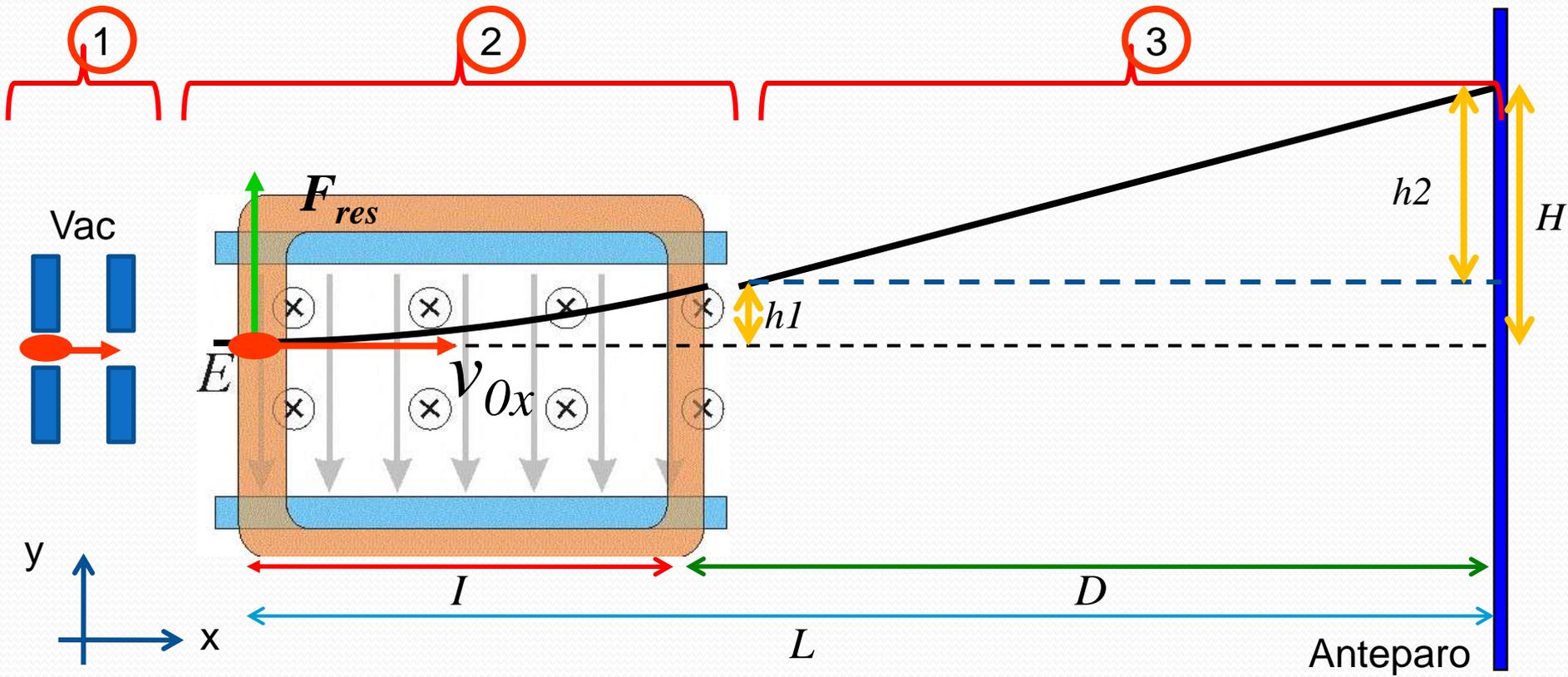
- As forças elétrica e magnética são iguais e opostas no caso da partícula que não sofre deslocamento, ($\mathbf{H}=\mathbf{0}$), isso leva à seguinte expressão para a velocidade dessa partícula:

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



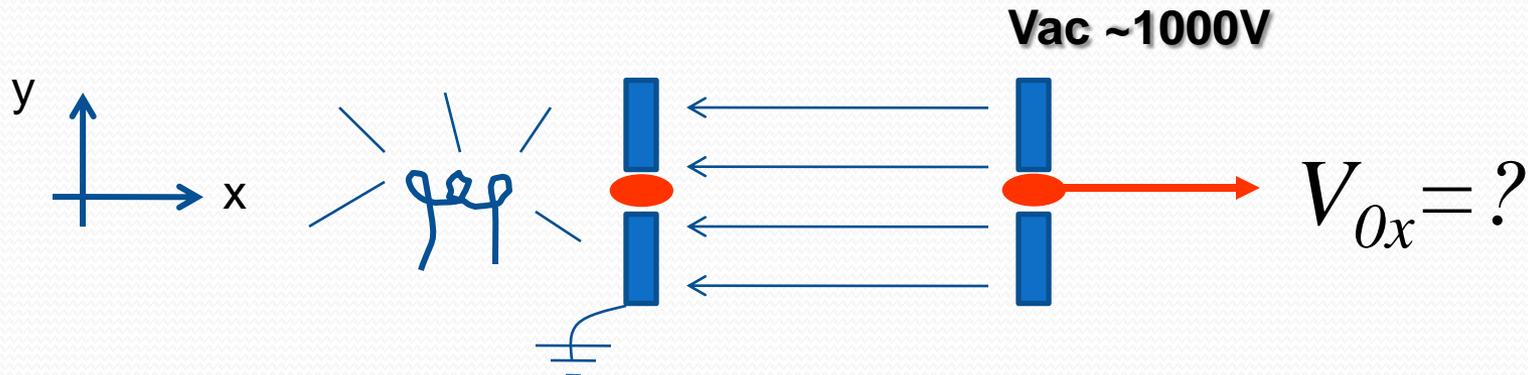
Modelo Simplificado

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



Modelo Simplificado – Traj. 1

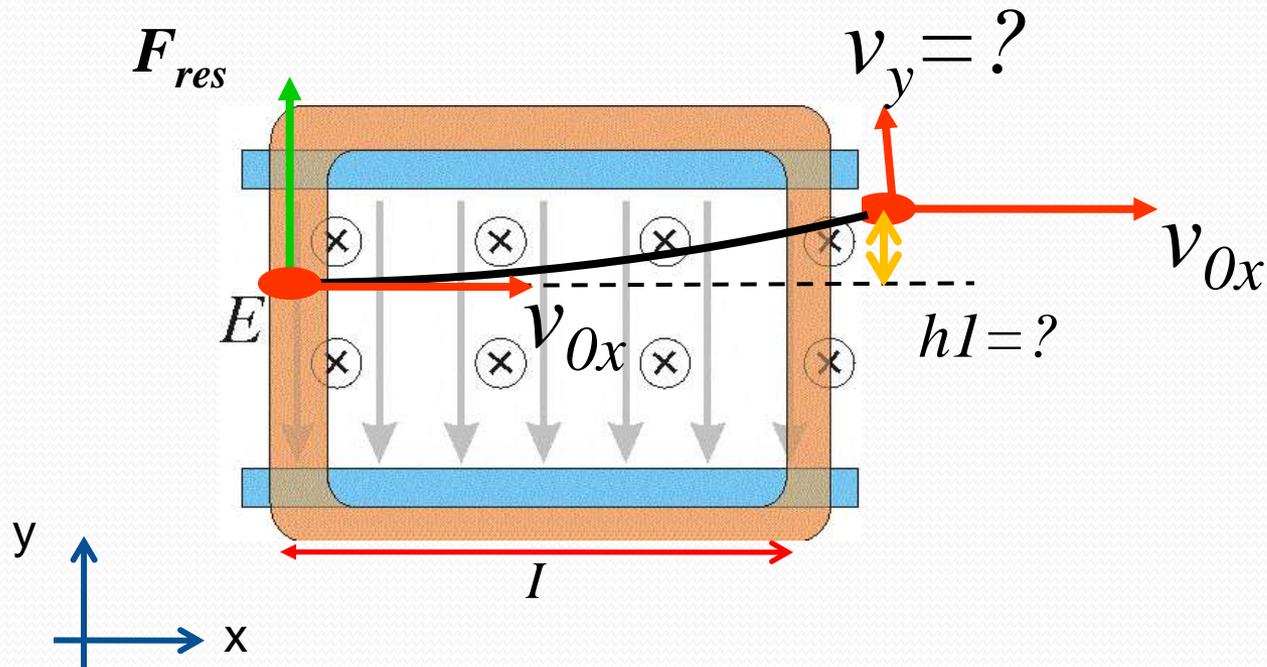
- No primeiro trecho do movimento, a partícula (**um elétron**) é acelerada entre duas placas com alta voltagem (**um capacitor :-**)
- O elétron é emitido, praticamente parado, por um filamento aquecido (botão de intensidade do TRC)



- A energia potencial elétrica é convertida em energia cinética, então qual a velocidade de aceleração do elétron?

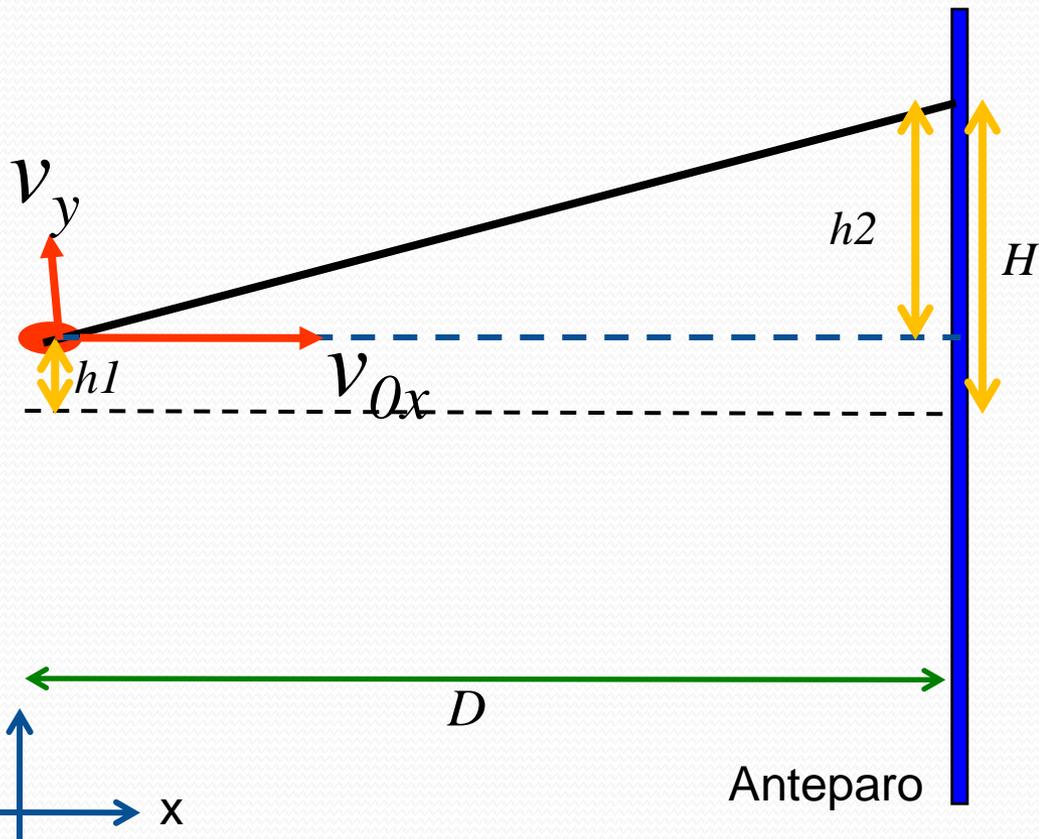
Modelo Simplificado – Traj. 2

- Na região com \mathbf{E} e \mathbf{B} , temos um movimento acelerado em y , que desvia a partícula, e uniforme em x
 - Assumimos que $v_x = \text{cte}$
 - Calculamos v_y e h_1 na saída



Modelo Simplificado – Traj. 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_{0x} , e a posição h_1 , para encontrar H



$$E - v_{0x} B = \frac{1}{2} v_{0x}^2 H$$

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

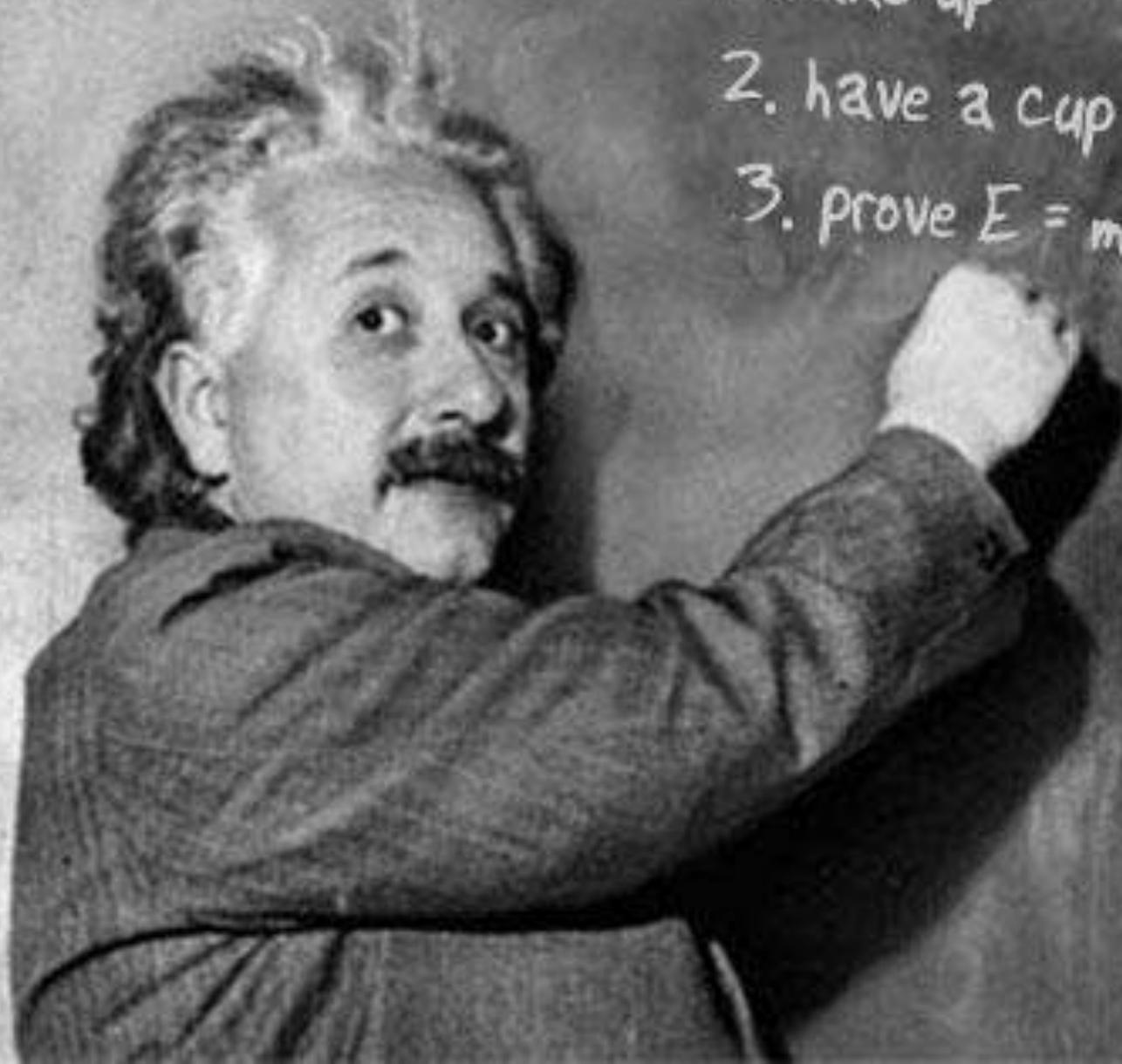
- Quanto vale a constante de proporcionalidade?
- Podemos calcular E e B quando a partícula passa direto?

TODO LIST

1. wake up

2. have a cup of coffee

3. prove $E = mc^2$



Para entregar, Parte 1

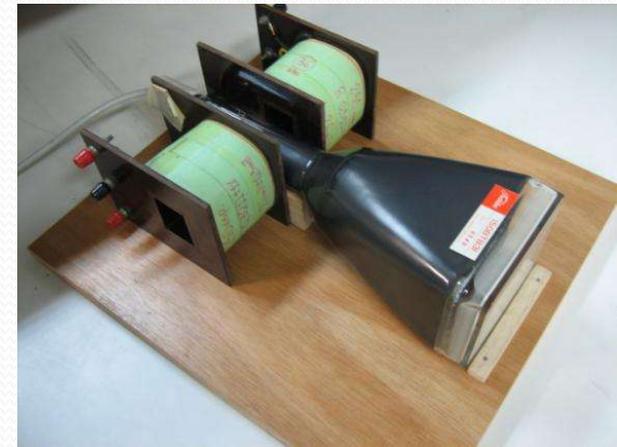
- Ligue o **TRC** e focalize o feixe na tela
 - Aplique uma tensão aceleradora **$V_{ac}=700V$**
 - Mexa no controles:
 - Foco
 - Intensidade
 - Tensão aceleradora (não passar de **$1000V$**)
 - Observe o que acontece com o feixe em cada caso e comente.
- Gire o **TRC** na mesa e observe o que acontece com o feixe
- Nesta condição, **$V_{ac}=700V$** , 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 (fotografe a tela do TRC)

Parte 2, o campo elétrico

- Aplique tensão nas placas defletoras verticais (fonte externa **DC** de **30V**):
 - Mexa na tensão (ie na intensidade do campo elétrico) e verifique o que acontece com o feixe. Comente.
 - Anote a tensão máxima que o feixe ainda continua visível na tela do **TRC**.
- A seguir desligue as placas e observe se o feixe continua focalizado e na origem.

Parte 3, campo magnético

- Desligue o campo elétrico
- Posicione as bobinas de cada lado do tubo do **TRC**.
 - Elas devem estar alinhadas com as placas defletoras verticais e alinhadas entre si (os campo magnéticos devem se somar)
 - Você precisa checar isso, tem bússola à disposição!
- Aumente e diminua a corrente (**outra** fonte DC de 30V) e verifique o que acontece com o feixe. Comente.
- Anote a corrente máxima que permita que o feixe continue visível na tela do **TRC**.
- Desligue as bobinas e observe se o feixe continua focalizado e na origem.



Parte 4, seletor

- Ligue as bobinas E as placas:
 - Como você pode saber que as forças elétricas e magnéticas têm mesma direção e sentidos opostos?
 - Verifique que isso está acontecendo e explique porque.
- Em seguida, zere a corrente nas bobinas e mantenha uma tensão aceleradora de **700V** e uma tensão nas placas verticais de **25V**.
 - Aumente devagar a corrente nas bobinas para trazer o feixe de volta à origem.
 - Qual é a condição que foi satisfeita para isso ocorrer?
- Qual é a velocidade do feixe nessas condições?

Parte 5, modelo simplificado

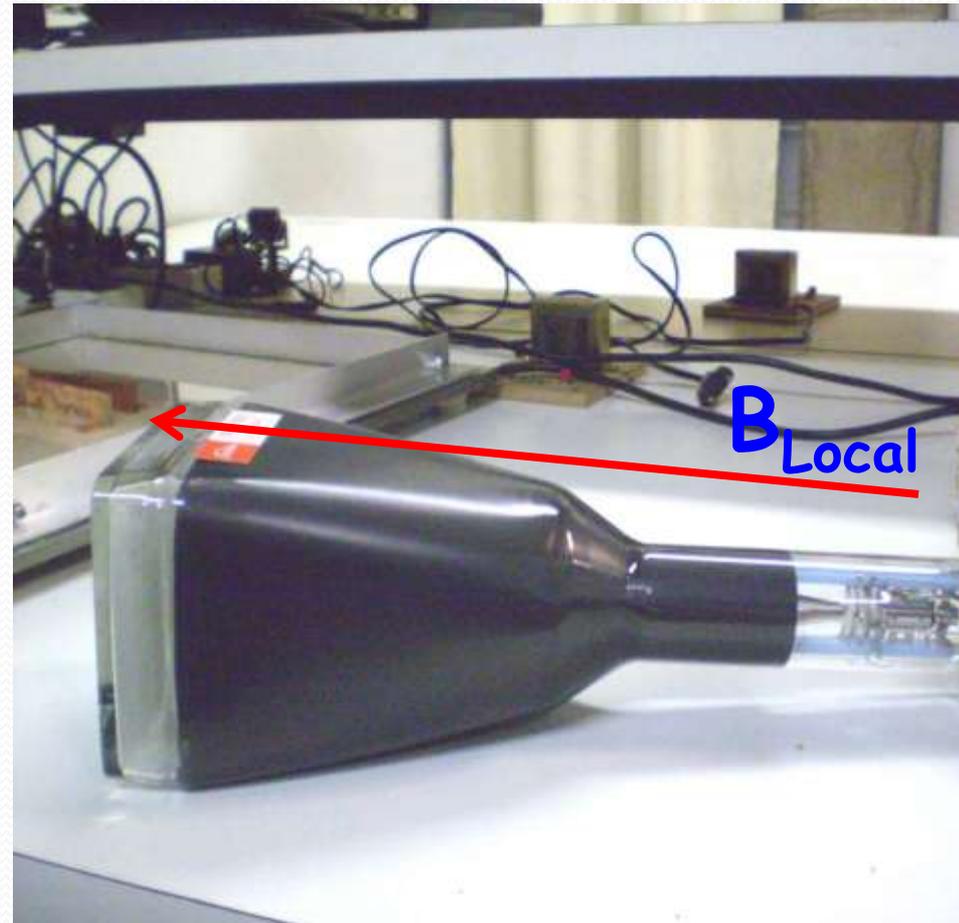
- Agora sem mexer na corrente nas bobinas ou na tensão das placas altere o valor da tensão aceleradora (pode variar entre **500V** e **1000V**) :
 - O que acontece?
 - Como pode explicar o que observou?
 - Você diria que uma determinada velocidade está sendo selecionada? Porque? Explique.
- A partir da teoria apresentada em sala, deduza uma expressão para o deslocamento **H** em função da tensão de aceleração **V_{ac}**.
- Faça o gráfico **V_{ac} x H** e, usando o seu modelo simplificado:
 - Calcule **B** e em seguida **E**
 - Compare seus valores com os valores da classe. Comente.



Helpful
Tips

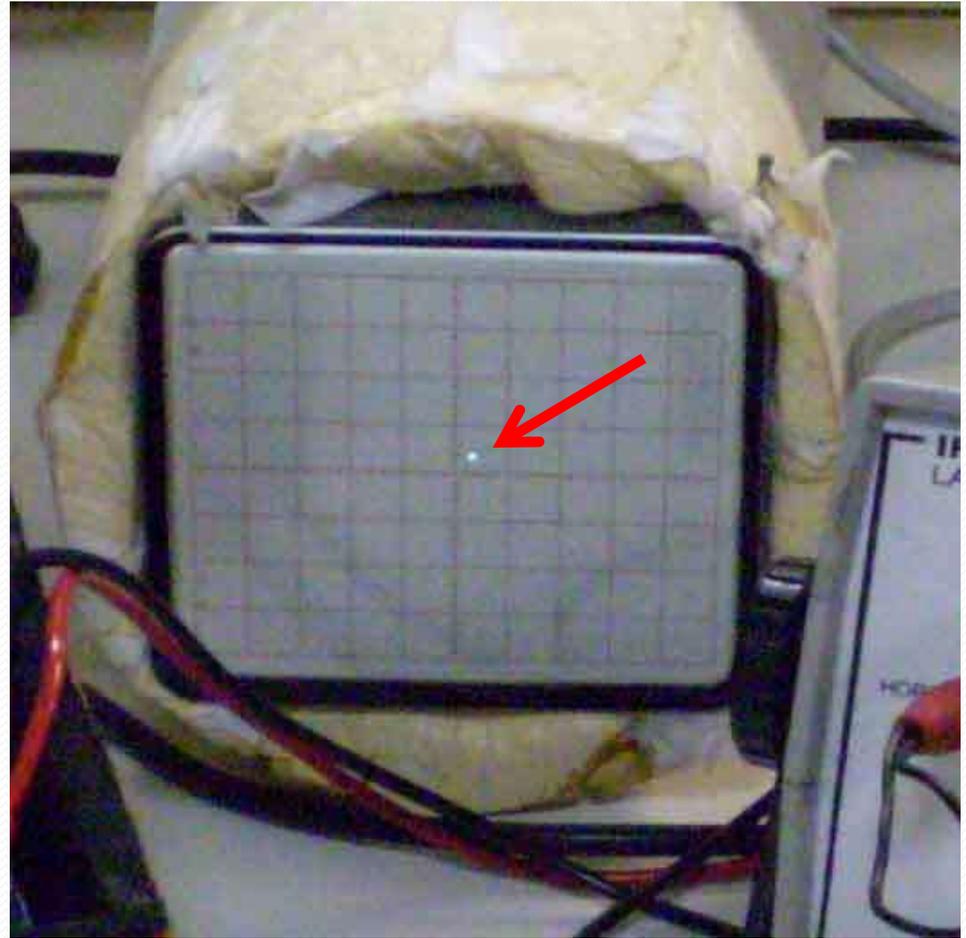
Dicas para o procedimento

- Partículas carregadas sofrem forças quando atravessam uma região de campo magnético.
- A sala está imersa no campo magnético local portanto o feixe pode ser desviado pela força magnética desse campo, concorda?
- O que fazer?

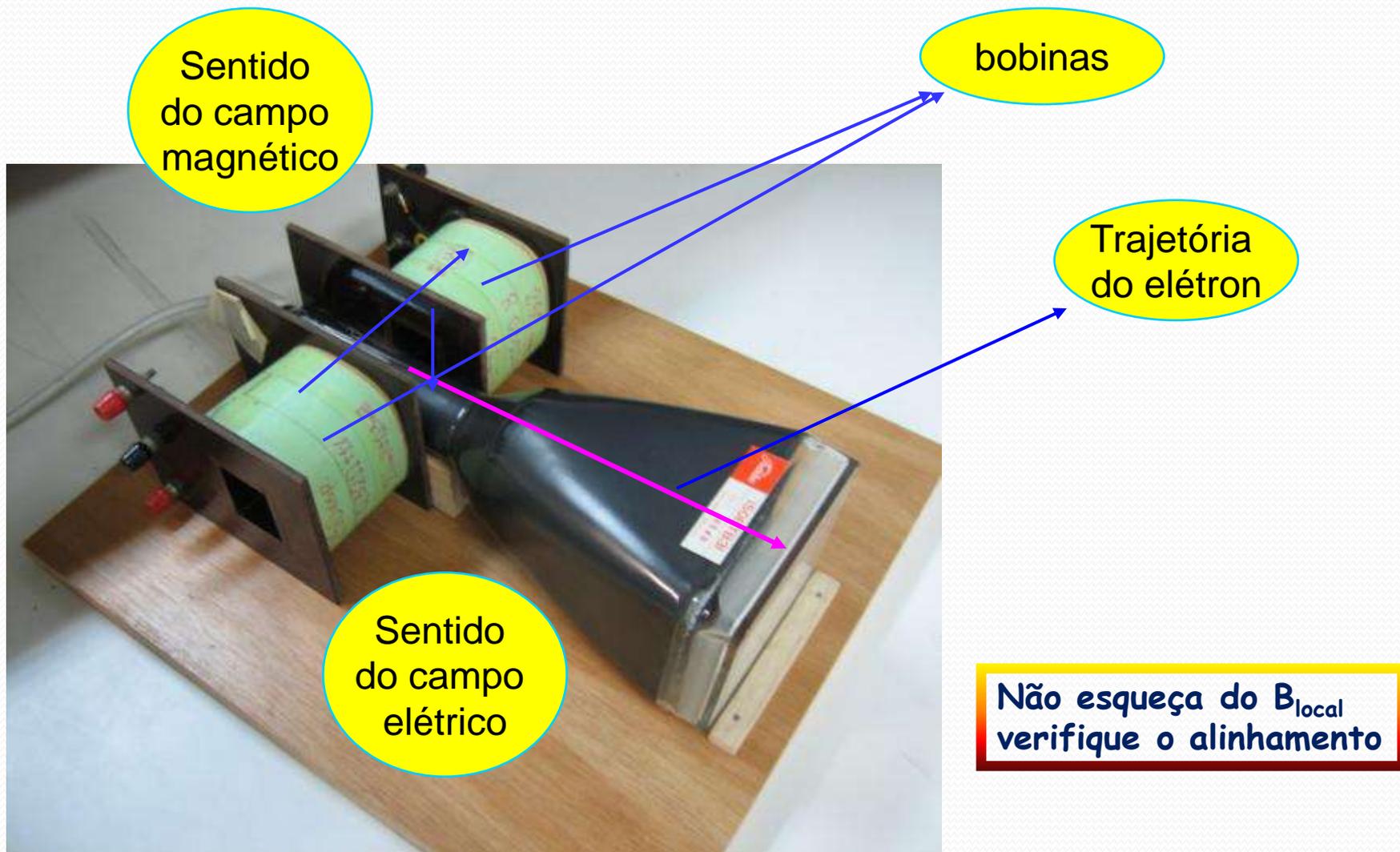


Dicas para o procedimento

- Ligar o **TRC** com **ZERO** volts entre as placas
 - Focalizar bem o feixe para definir a origem
 - é mais fácil medir o deslocamento vertical se essa origem estiver sobre o eixo horizontal.
 - **Todas medidas devem ser feitas em relação a este ponto.**



Seletor de velocidades: o campo magnético



Sentido do campo magnético

bobinas

Trajetória do elétron

Sentido do campo elétrico

Não esqueça do B_{local}
verifique o alinhamento