Seletor de Velocidades

Física Exp. 3
Aula 5, Experiência 2
Espectrômetro de massa

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

TAREFAS SEMANA PASSADA

O Que (e porquê) fizemos até agora? – Resumo do experimento

A1 - Comportamento no Campo Elétrico **E**

A3 - Simulação do Campo Elétrico (FEEM)

$$h_E \frac{q_e L_{Pef} L_C}{m v_{0x}^2} E$$

Seletor de Velocidades !!

*E se temos **E** com **B**? Aulas 5 e 6*

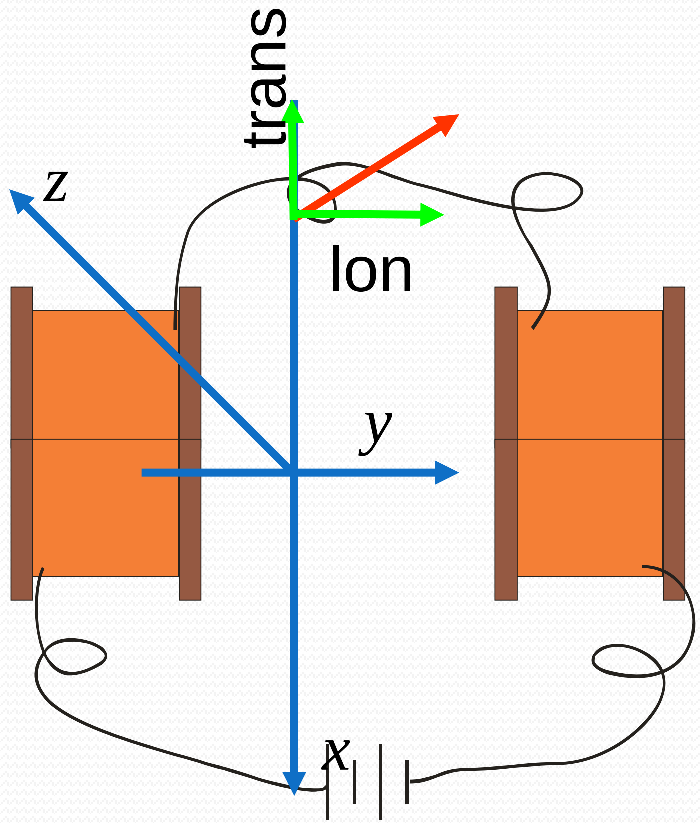
A2 - Coportamento no Campo Magnético **B**

A4 - Mapeamento ~~Simulação~~ do Campo Magnético

$$H_B = \frac{q_e L_{Bef} L_C}{m v_{0x}} B$$

Para entregar semana passada – Parte 1

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



Sendo que a direçao de propagação dos elétrons é: $\hat{i}$

Para entregar – Parte 2

- Comparar o efeito do campo magnético, sobre os elétrons, com a previsão do seu modelo
  - A partir dos dados do deslocamento do elétron no campo magnético (semana 3), verifique se a fórmula teórica é válida
  - Compare o valor dos expoentes e da constante

- Como pode obter $L_B\beta$?
  - Experimente a partir dos dados da semana 4
  - Qual seria o comprimento (L_{Beff})das bobinas ideais?

vai precisar desses cálculos mais adiante

Para entregar – Parte 3

- Calibrar o seletor de velocidades
  - Obter a constante α que relaciona a velocidade de filtro com a tensão entre as placas e a corrente nas bobinas
    - Um único gráfico com os ajustes de V_P em função da corrente, uma curva/ajuste para cada v_{0x}
    - Gráfico ajustado de v_{0x} em função de V_P/i, pontos estes obtidos dos ajustes acima.
  - Uma vez calculado α, use o β estimado na parte 1, obtenha a distância efetiva entre as placas do capacitor ideal (d)
    - Compare com o valor nominal e discuta a luz da simulação de **E** e dos efeitos de borda.

Para entregar – Parte 4 – Ver dicas na aula anterior

- Desenvolver uma simulação numérica do experimento!
  - Objetivo: simular a trajetória do elétron, com velocidade inicial $\mathbf{v_{0x}}$ e sujeito a campos ideais **Ey** e **Bz**, para encontrar a posição de impacto na tela do TRC.
  - Podem usar a linguagem que preferirem!
  - Usem os tamanhos estimados para o capacitor e para o campo magnético ideais.
- Simule a trajetória do elétron e faça um gráfico X-Y para o caso que ele passa sem desvio:
  - v_{0x}=0.05c, E_y=+5000 V/m e Bz= qual valor é necessário?
  - Como é a trajetória na região dos campos? É uma reta?
- Proponha um método, com esta instrumentação e/ou com ajuda da sua simulação, para determinar a massa da partícula.

Exp. 2 – Espectrômetro de massa

PROGRAMAÇÃO - SIMULAÇÃO

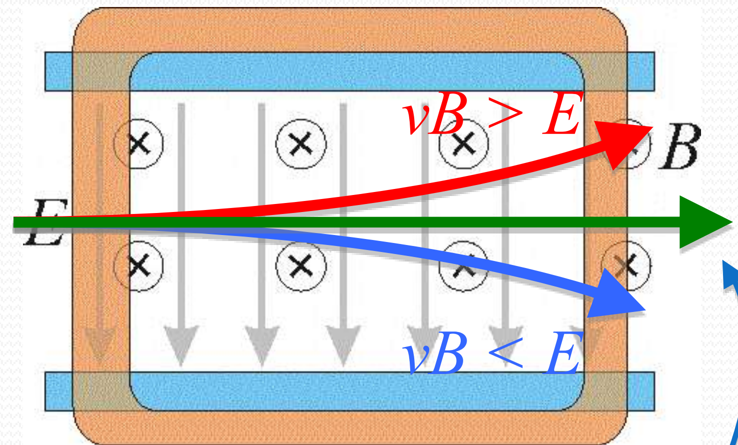
- Semana 1
  - Movimento em campo elétrico
- Semana 2
  - Movimento em campo magnético
- Semana 3
  - Simular o campo elétrico e
- Semana 4
  - mapear o campo magnético
- Semana 5
  - Calibrar o seletor + cálculo das trajetórias
  - Semana 6

  Obter Teoricamente a resolução do seletor de velocidades e calcular suas trajetórias

Seleção de Velocidades

Como funciona o seletor ideal:

- Qual é a condição na qual a partícula não sofre desvio?



$$m\frac{d}{dt}\vec{v} = q\left(v_x B - E\right)\hat{k} - qBv_z\hat{i}$$

- Condição de força resultante nula:

v_z inicial é nula. Se não houver força em ***Z*** isto não muda

$$v_{0x} = \frac{E}{B}$$

$$\vec{F} = q\left(v_x B - E\right)\hat{k} - qBv_z\hat{i} = 0$$

$$v_{0x}B - E = 0 \qquad v_{0x} = \frac{E}{B}$$

Se a velocidade da partícula for igual à razão entre campo elétrico e magnético o desvio sofrido é nulo

E usando o modelos propostos para E e B:

- Mas nós sabemos, pelas equações de movimento, que a velocidade de filtro é:

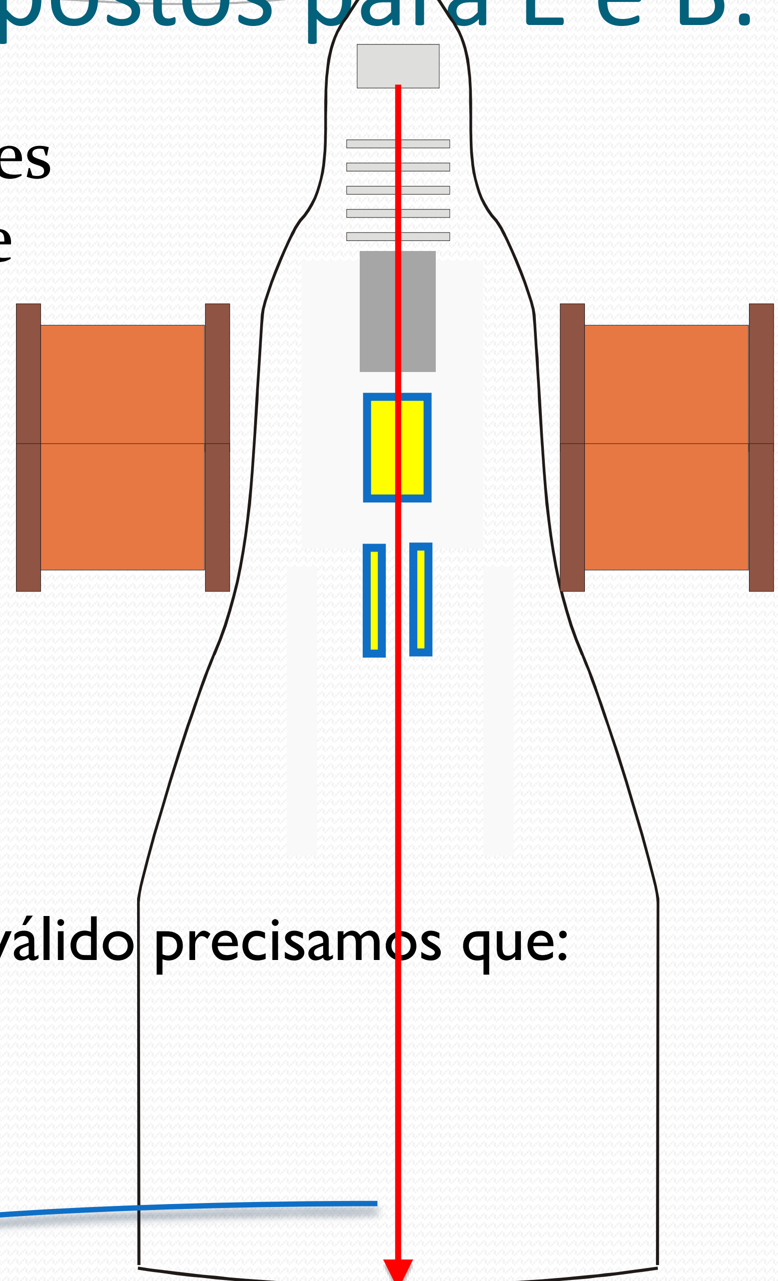
$$v_{0x} = \frac{E}{B} = \frac{1}{\beta d}\frac{V_P}{i}$$

  - Sabendo que:

$$v_{0x} = \frac{L_P}{L_B}\frac{E}{B}$$

  - Para que o nosso modelo seja válido precisamos que:

$$v_{0x} = \frac{L_P}{L_B bd}\frac{V_P}{i}$$



Olhando de perto o nosso seletor

- Na situação que não há desvio da partícula, um movimento compensa o outro e assim:

$$dh = h_E - H_B = 0$$

$$h_E = H_B$$

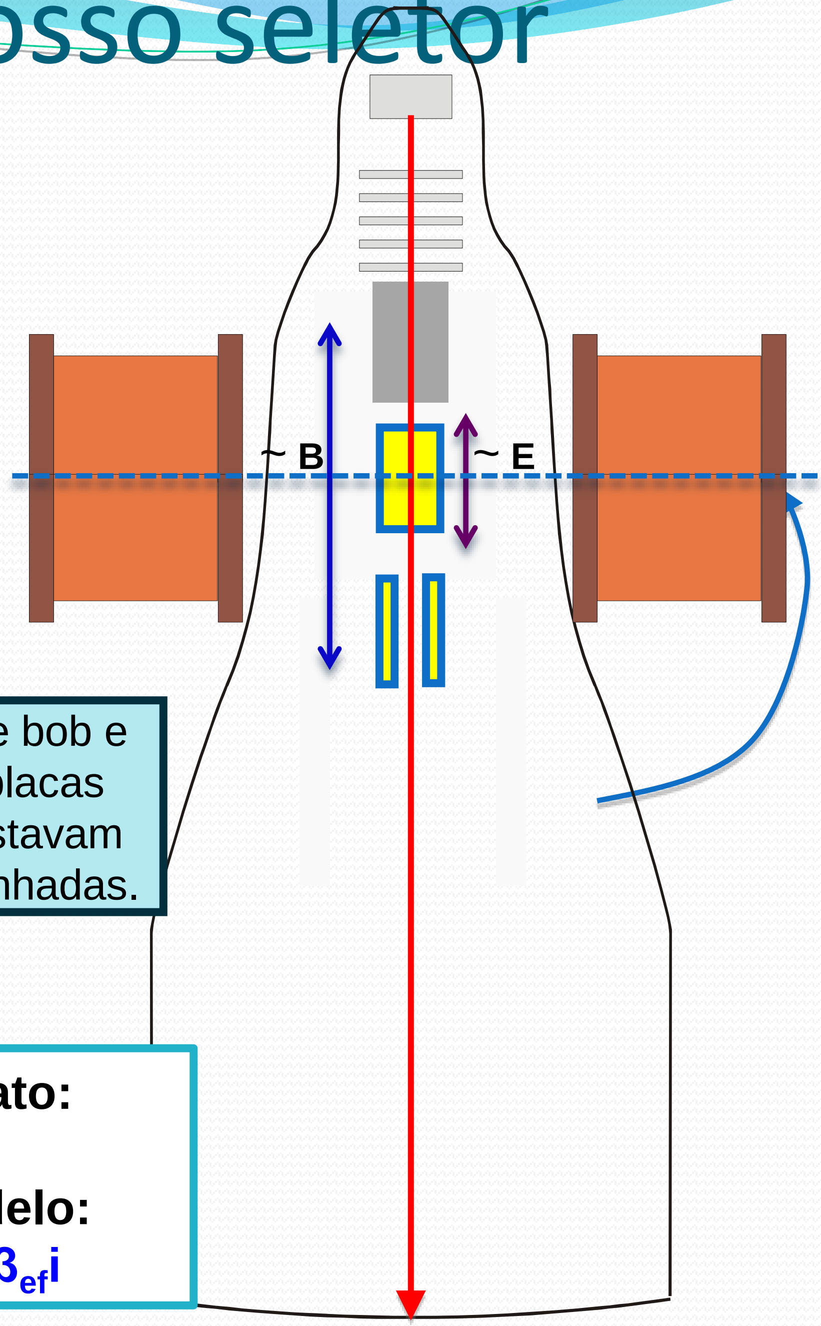
- Para adaptar o modelo às características do TRC as dimensões dos campos são efetivas, ou seja:

$$\frac{q_e L_{Pef} \cancel{L_C}}{m v_{0x}^2} E = \frac{q_e L_{Bef} \cancel{L_C}}{m v_{0x}} B$$

Se bob e placas estavam alinhadas.

- Assim:

$$v_{0x} = \frac{L_P}{L_B} \frac{E}{B}$$



No nosso aparato:

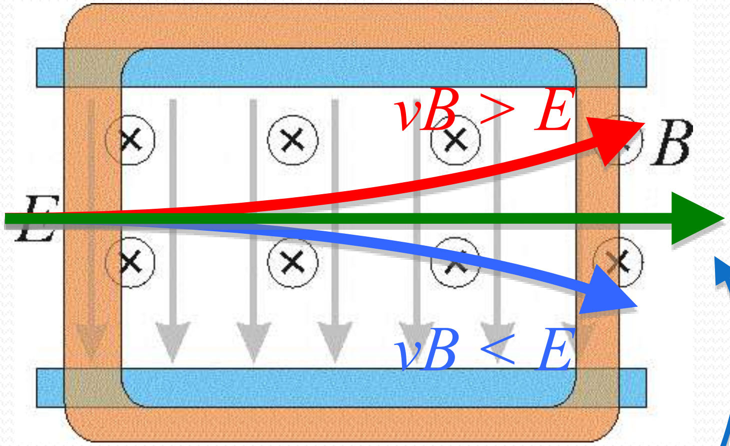
$L_{Bef} > L_{Pef}$

E no nosso modelo:

$E = V_{Pef}/d_{ef}$ e $B = \beta_{ef} i$

Os modelos desenvolvidos para o seletor

- Estudando a ação de cada campo no movimento dos elétrons separadamente:



  - Obtivemos a deflexão devido ao **CAMPO ELÉTRICO** (apenas):

$$h_E = \frac{qL_P E}{mv_{0x}^2} L_C$$

$$v_{0x} = \frac{E}{B}$$

  - E a deflexão devido ao **CAMPO MAGNÉTICO** vale:

$$H_B \approx \frac{qL_B L_C}{mv_{0x}} B$$

$$h_E = H_B$$

A constante de calibração:

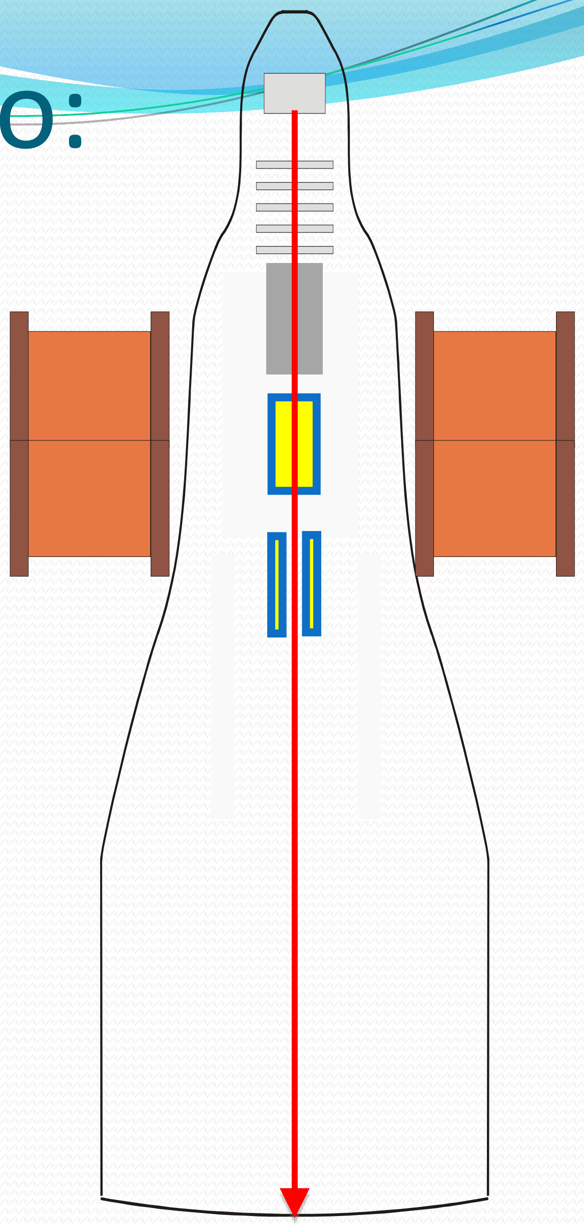
- No final a previsão do modelo:

$$v_{0x} = \boxed{\frac{1}{L_{Bef}\, b_{ef}} \frac{L_{Pef}}{d_{ef}}} \frac{V_P}{i}$$

- Ou seja:

$$v_{0x} = a \frac{V_P}{i}$$

Para adaptar os modelos ao fato dos campos terem geometria e tamanhos diferentes: calculamos valores efetivos para os parâmetros que descrevem os campos de maneira que os campos do nosso modelo são ideais, diferentes dos campos reais, MAS TÊM O MESMO EFEITO SOBRE OS ELÉTRONS!



Olhando de perto o nosso seletor

E se $\delta \neq 0$? $\delta h = h_E - H_B$

$$h_E \frac{q_e L_{Pef} L_C}{m v_{0x}^2} E$$

$$\delta h = \frac{q_e L_C}{m}\left(\frac{L_{Pef}}{v_{0x}^2} E - \frac{L_{Bef}}{v_{0x}} B\right)$$

$$H_B = \frac{q_e L_{Bef} L_C}{m v_{0x}} B$$

$$\delta h = \frac{q_e L_C}{m}\left(\frac{L_{Pef}}{v_{0x}^2 d} V_P - \frac{L_{Bef}\beta}{v_{0x}} i\right)$$

De aulas anteriores sabemos que...

ou seja

$$\delta h \propto \frac{\mathrm{A}}{v_{0x}^2} - \frac{B}{v_{0x}}$$ e

$$\mathrm{A} = \frac{q_e L_C}{m}\frac{L_{Pef}}{d} V_P \text{ e } \mathrm{B} = \frac{q_e L_C L_{Bef} \beta i}{m}$$

Tarefa 1: verificar a Constante de Calibração

- Verifique (**Com os dados obtidos na semana passada ou nessa semana**) se a constante de calibração **α** que mediram concorda com as previsões do modelo:
  - Você pode obter o **α** do modelo independentemente da "escolha"dos comprimentos efetivos, porque você tem as medidas das combinações dessas constantes nas medidas dos deslocamentos.
  - E você pode calcular através dos valores efetivos desses parâmetros que obteve através dos cálculos do impulso.

Resolução do Seletor

Seletor de Velocidades

- Vimos que, conhecendo a constante **α** do seletor, para selecionarmos uma velocidade (partículas dessa velocidade passam sem desvio) precisamos apenas conhecer a razão $\mathbf{V_P/i}$ correspondente:

$$v_x = \alpha \frac{V_P}{i}$$

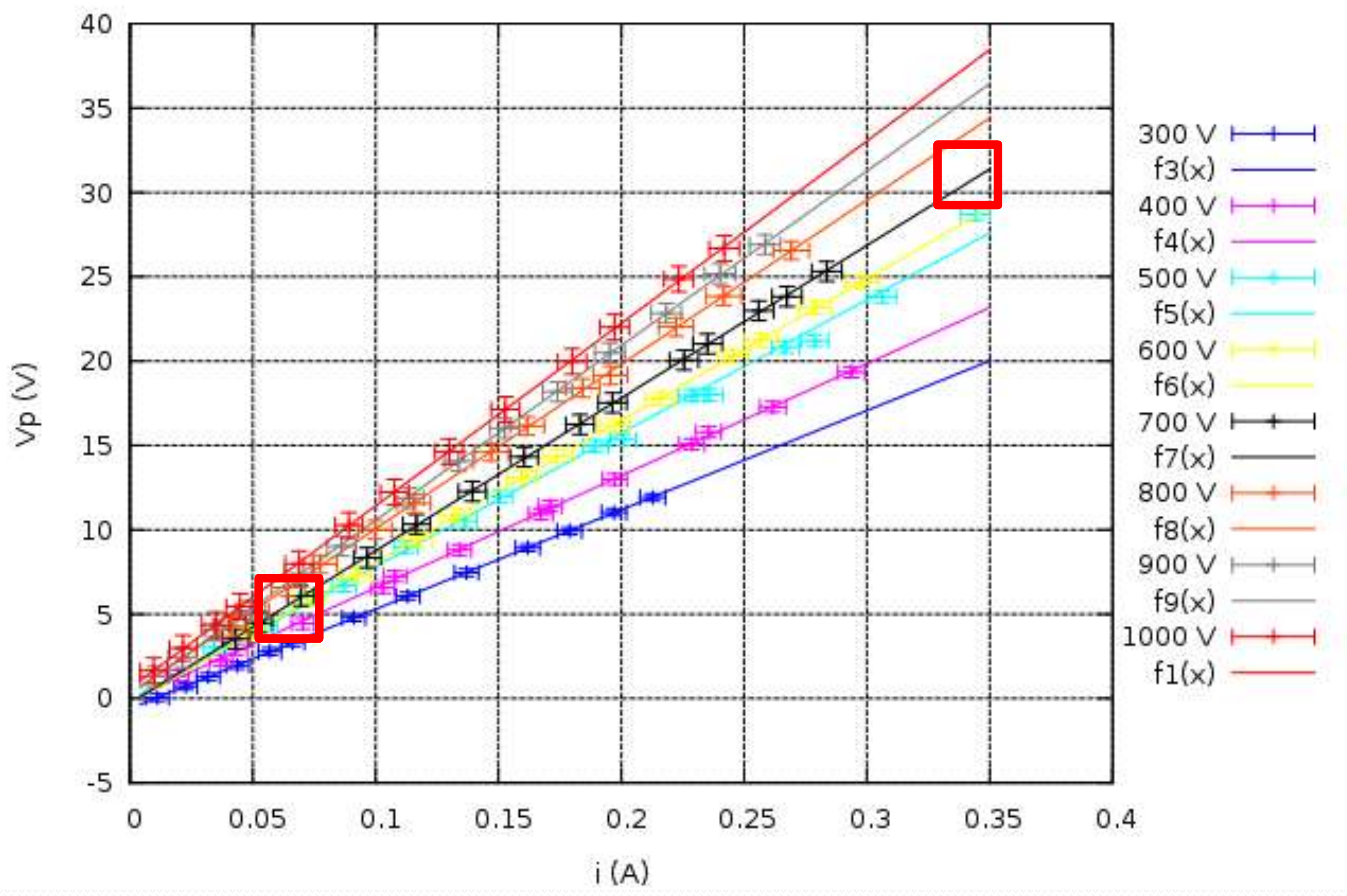
- Porém há um número infinito de valores de $\mathbf{V_P}$ e **i** que dão a mesma razão $\mathbf{V_P/i}$.
- Como escolher?

Seletor de Velocidades

- Para investigar este eventual efeito vamos precisar de outros parâmetros que caracterizem o instrumento

- Uma característica importante é a sensibilidade do aparelho, isto é, se ele foi construído para separar partículas carregadas pela sua velocidade, qual é a menor diferença em velocidade que ele consegue distinguir?

Qual o melhor Vp/i ?



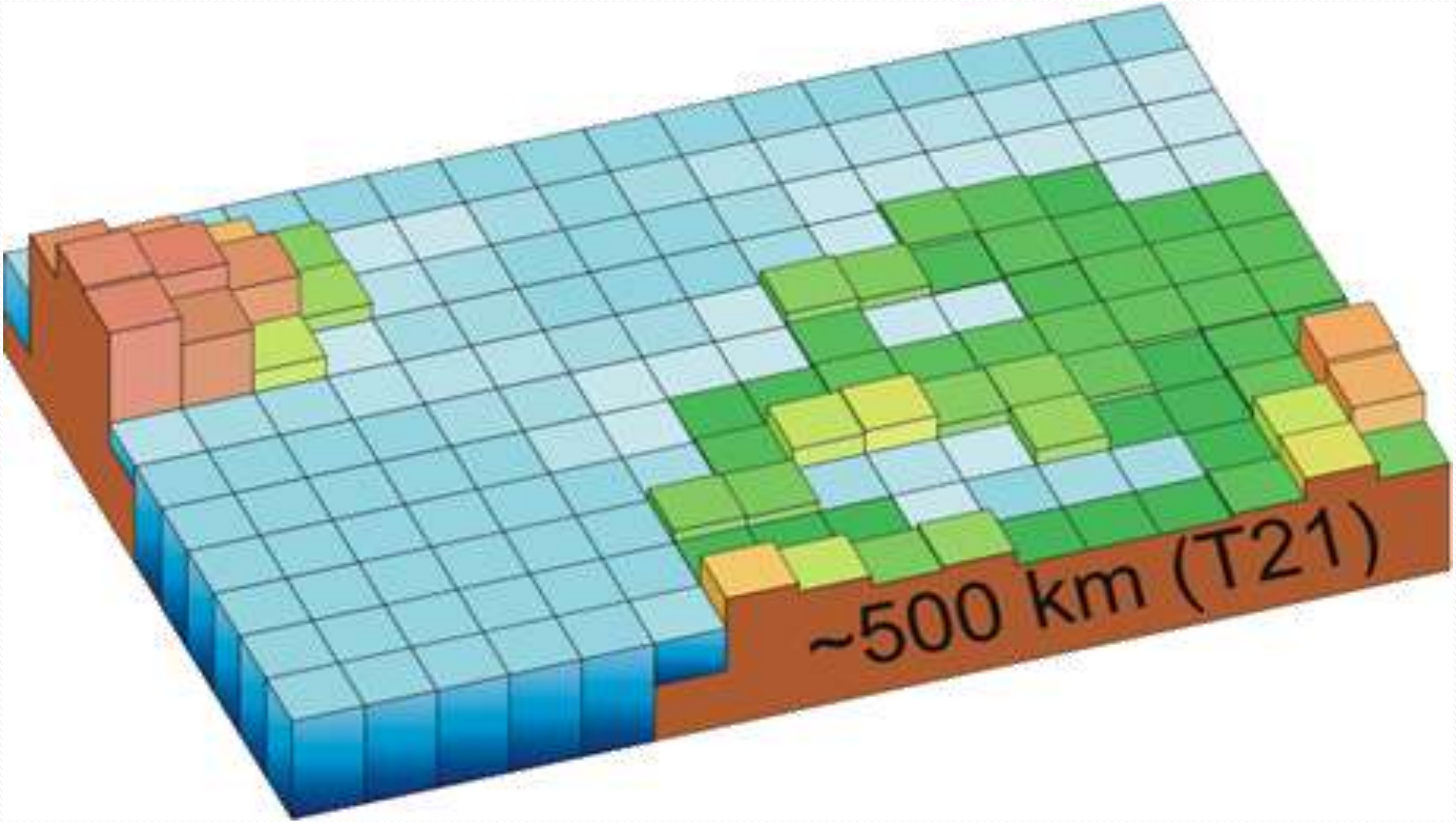
Resolução

- Quando se constrói um aparelho que funcione como um **filtro ou seletor** de qualquer coisa, a primeira pergunta que se faz é:
- **Qual é a sensibilidade desse aparelho**, ou seja, quão bem ele distingue aquilo que ele vai separar?

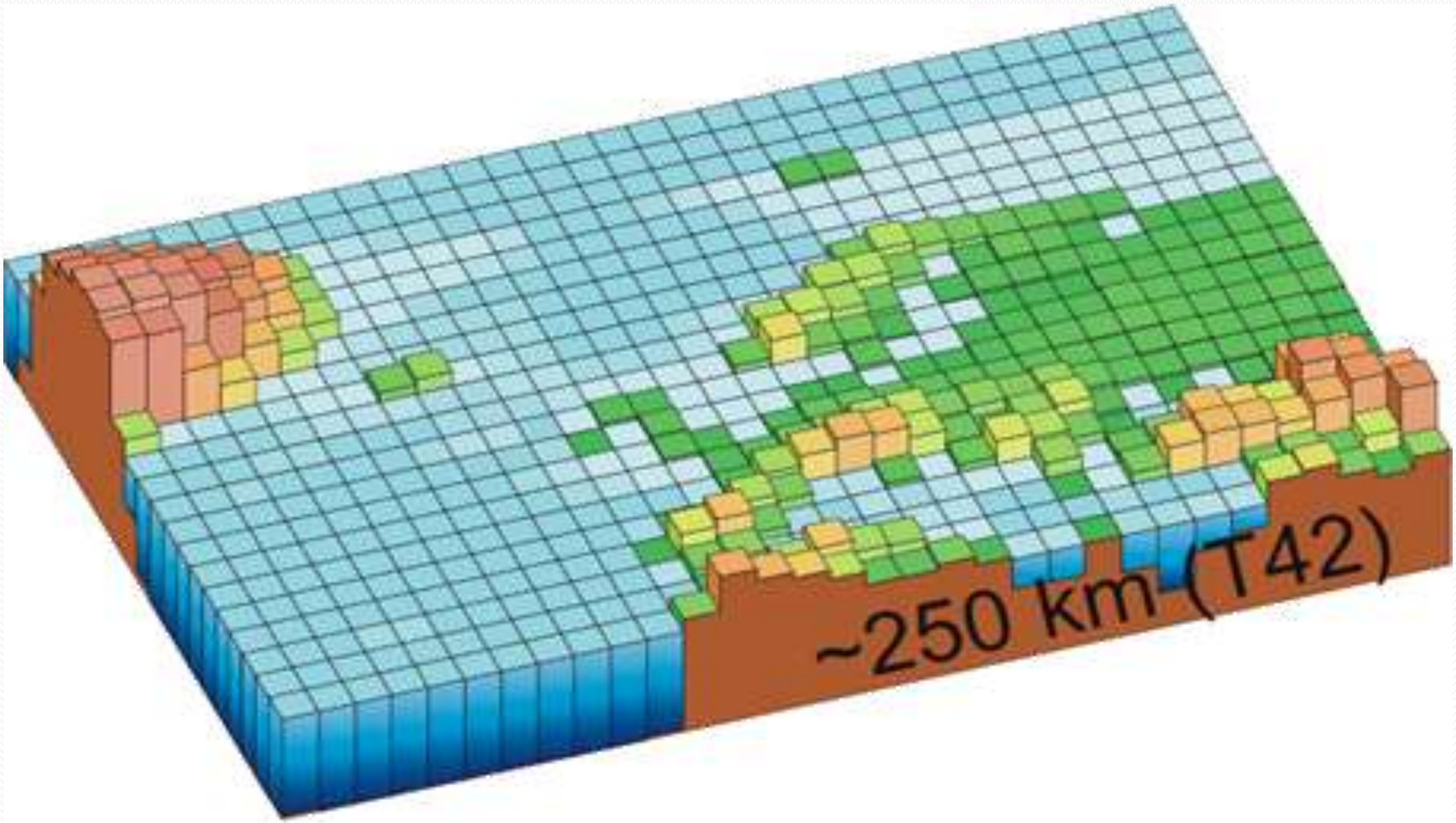
- Isso é medido por um parâmetro chamado resolução:
  - Se está separando massas: $R = \frac{\Delta m}{m}$
  - Se está separando por diâmetro: $R = \frac{\Delta d}{d}$
  - Se está separando por velocidade: $R = \frac{\Delta v}{v}$

O que é mais desejável? R grande ou R pequeno?

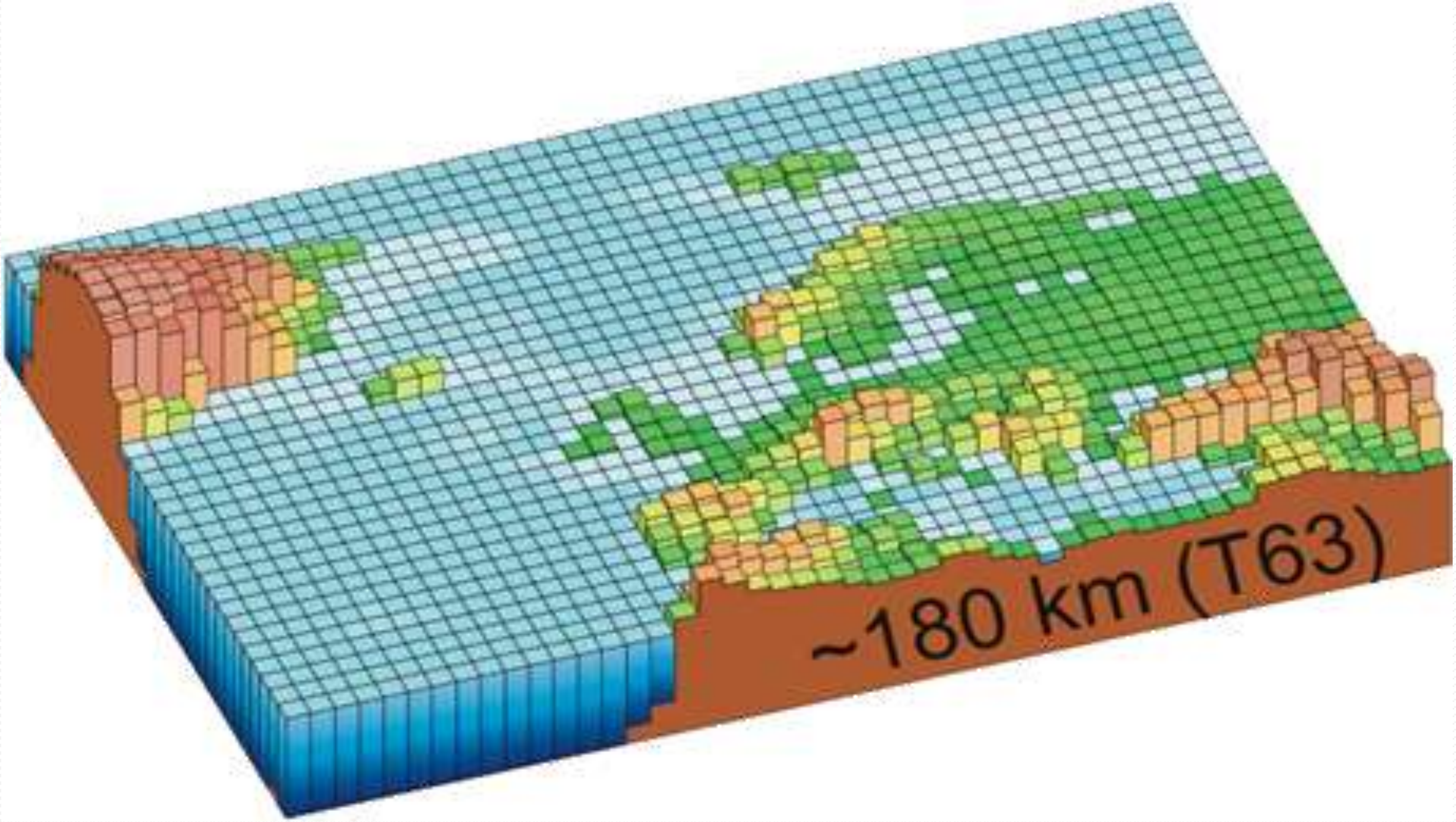
Exemplo:



Exemplo:

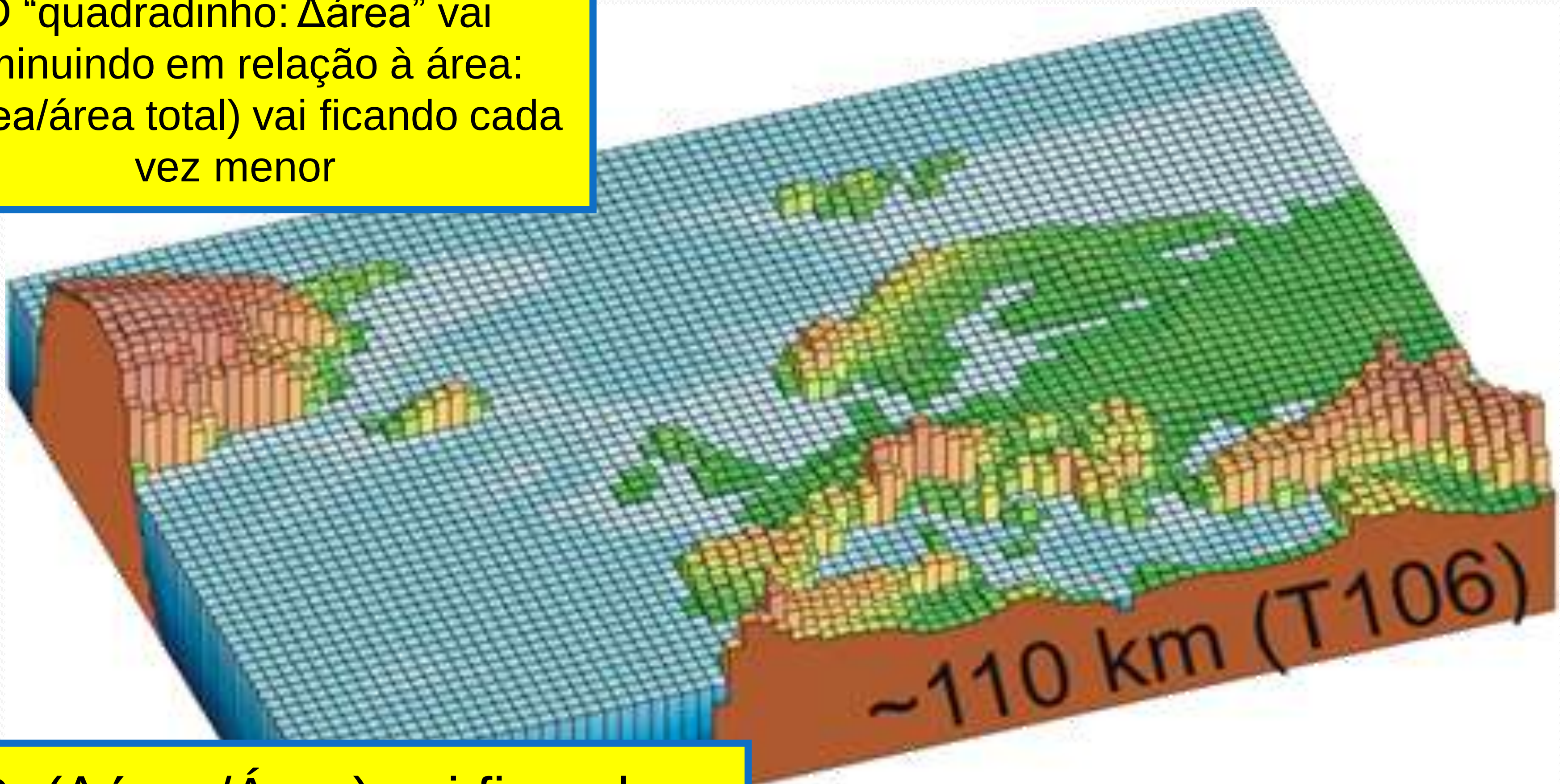


Exemplo:



Exemplo:

O “quadradinho: Δárea” vai diminuindo em relação à área: (Δárea/área total) vai ficando cada vez menor



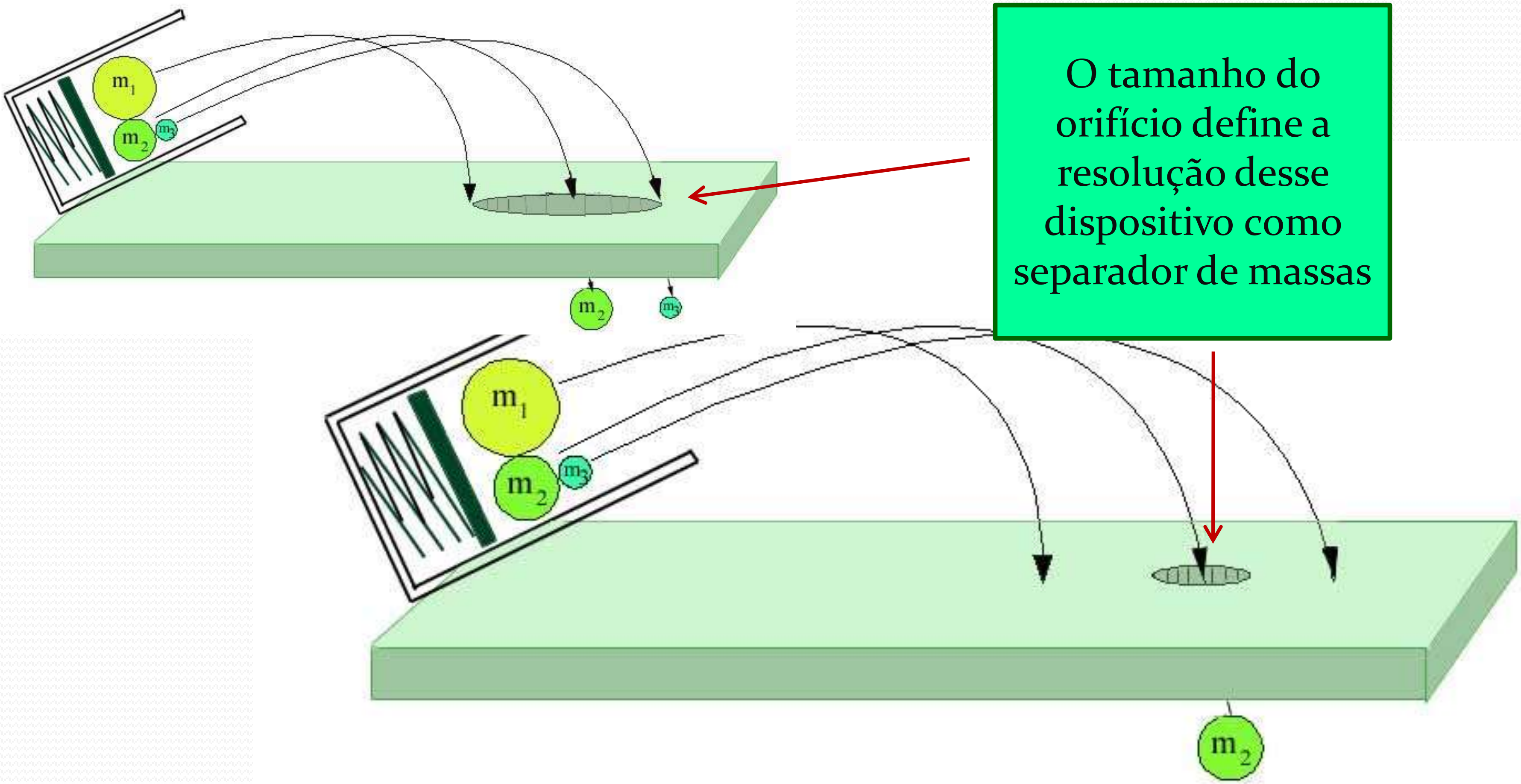
R=(Δárea/Área) vai ficando cada vez menor e se pode ver cada vez mais detalhes: quanto menor a resolução melhor

Resolução em velocidade do Seletor:

- Vamos imaginar que tenhamos um orifício de diâmetro **d** alinhado com o eixo do seletor.
  - Quando se ajusta uma razão V_P/i, deve passar **somente partículas com a velocidade escolhida** pelo orifício
  - Mas existem outras partículas **de velocidades muito próximas** que vão sofrer pequenos deslocamentos

Separação de massas por distâncias

Supor um canhão que atire bolas de massas diferentes seqüencialmente:



O tamanho do orifício define a resolução desse dispositivo como separador de massas

Resolução em velocidade

- Nesse caso, precisamos definir um parâmetro do seletor de velocidade que nos indique em que medida ele é um bom **separador** (**seletor**) **de velocidades**: **a resolução do aparelho** que é definida como:

$$R = \frac{\Delta v_x}{v_x}$$

  - Onde $\mathbf{v_x}$ é a velocidade selecionada e $\mathbf{\Delta v_x}$ é o intervalo de velocidades que passou pelo orifício, ou seja, as velocidades que o instrumento não distingue da velocidade selecionada

- Como se determina $\mathbf{\Delta v_x}$?

Para medir Δv_x:

- Fazer a seguinte simulação:
  - **Selecione uma velocidade**, v_{0x}, através de V_P/i, para passar sem desvio, dentro dos erros experimentais:
  - Deve ser uma das velocidades que o TRC pode produzir
  - Em seguida **varie a velocidade** e calcule o deslocamento do feixe na tela (na direção z)
- Montar a tabela:

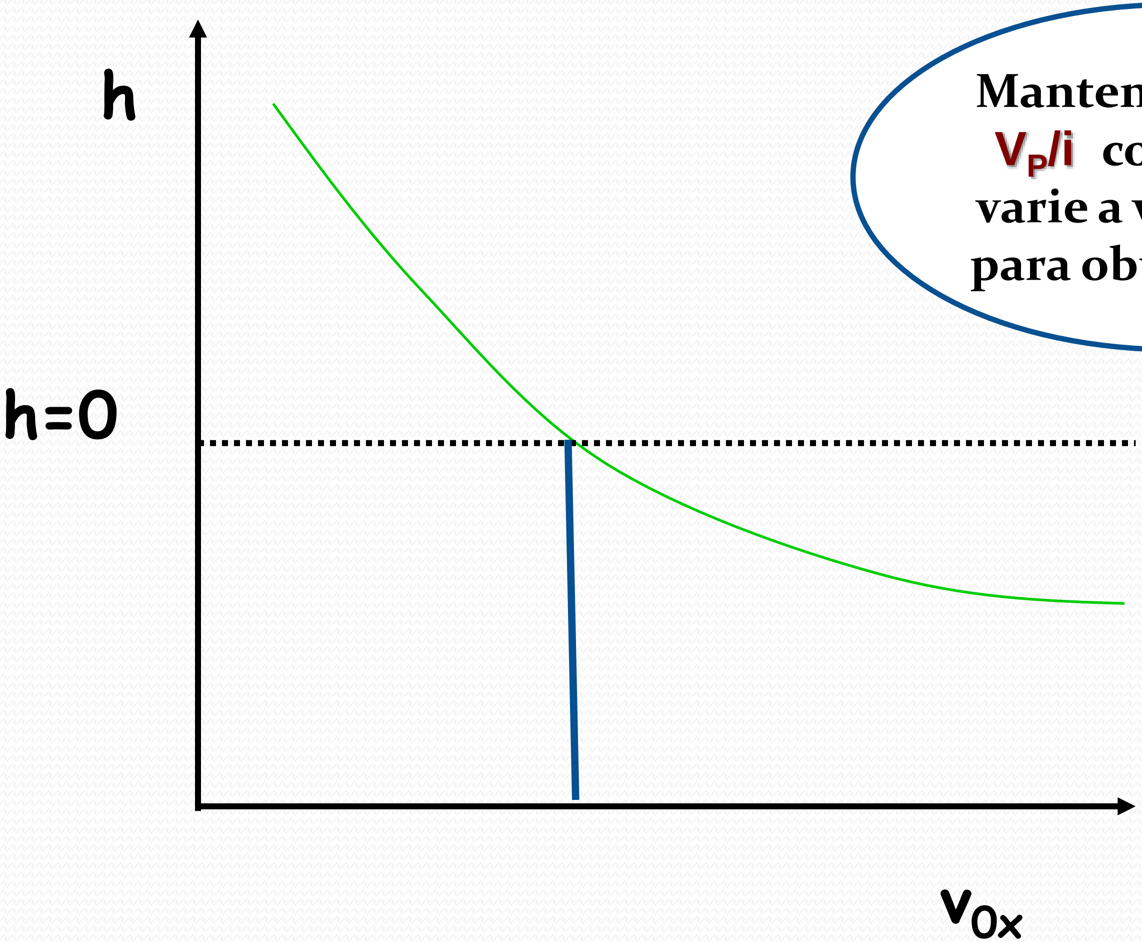
U_{0x}	
h	

Deslocamento na tela: 4cm para cima e 4 cm para baixo

Velocidade (tensão aceleradora) do TRC: de 400V a 1200V

Calculando Δv_x:

- Com essa tabela fazer o gráfico *h* x $\mathbf{v_{0x}}$;

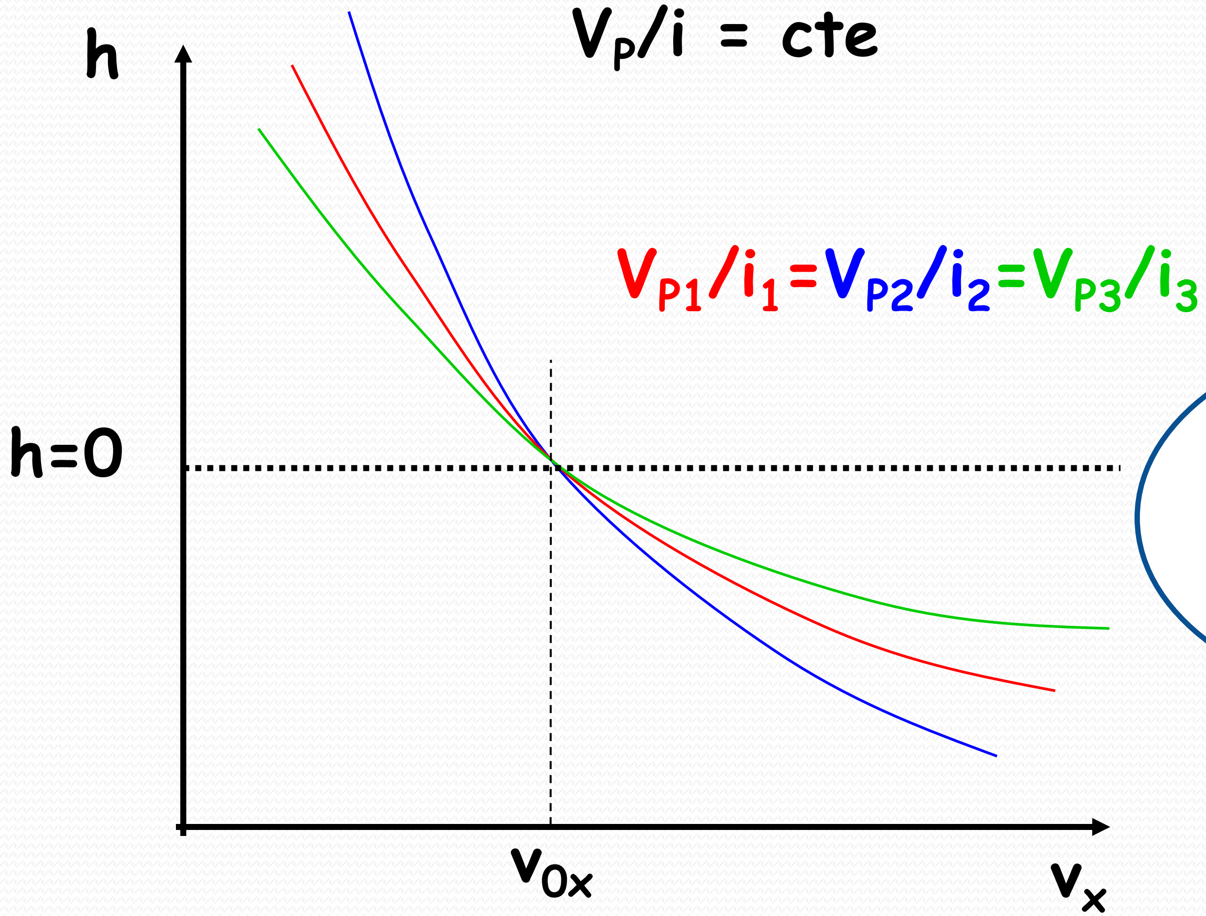


Mantendo a razão V_P/i constante e varie a velocidade para obter a curva

Os pontos acima e abaixo da linha $\delta h=0$ correspondem a situações de desequilíbrio entre F_E e F_m

Continuando Δv_x:

Vamos fazer o mesmo gráfico, para a mesma razão V_P/i , mas calcule 6 curvas para a mesma razão, mas cada uma com valores diferentes de V_P e i

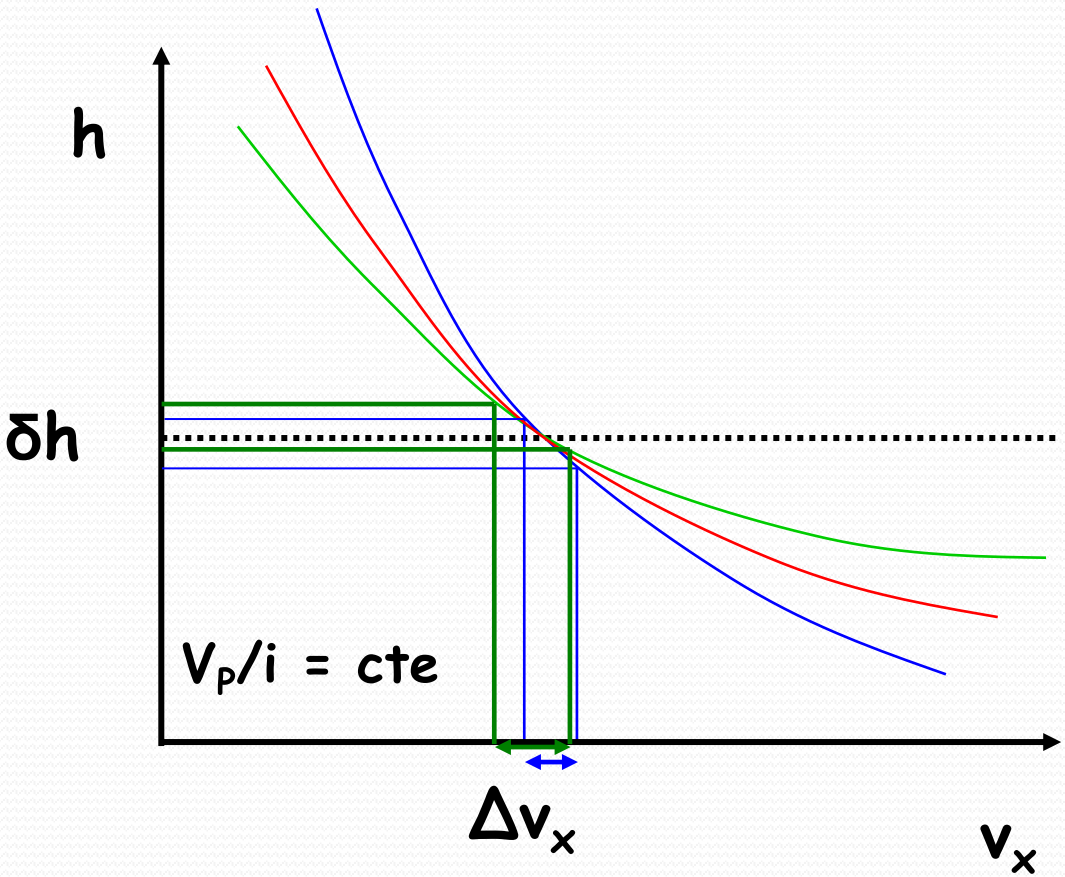


Cada ponto nessas curvas corresponde a um deslocamento na tela em **h**

Somente as partículas cujas velocidades estão nessa linha passam sem desvio, **h=0**

Para avaliar o $\Delta v_x \rightarrow \Delta V_{AC}$

$$Exemplo: \frac{V_P}{i} = \frac{20}{0,24} = \frac{10}{0,12} = \frac{5}{0,06}$$



Quanto maiores forem os valores individuais de V_P e i mais inclinada é a curva

<u>Para a mesma incerteza em h</u> temos diferentes incertezas em U_{AC} e, portanto, na velocidade

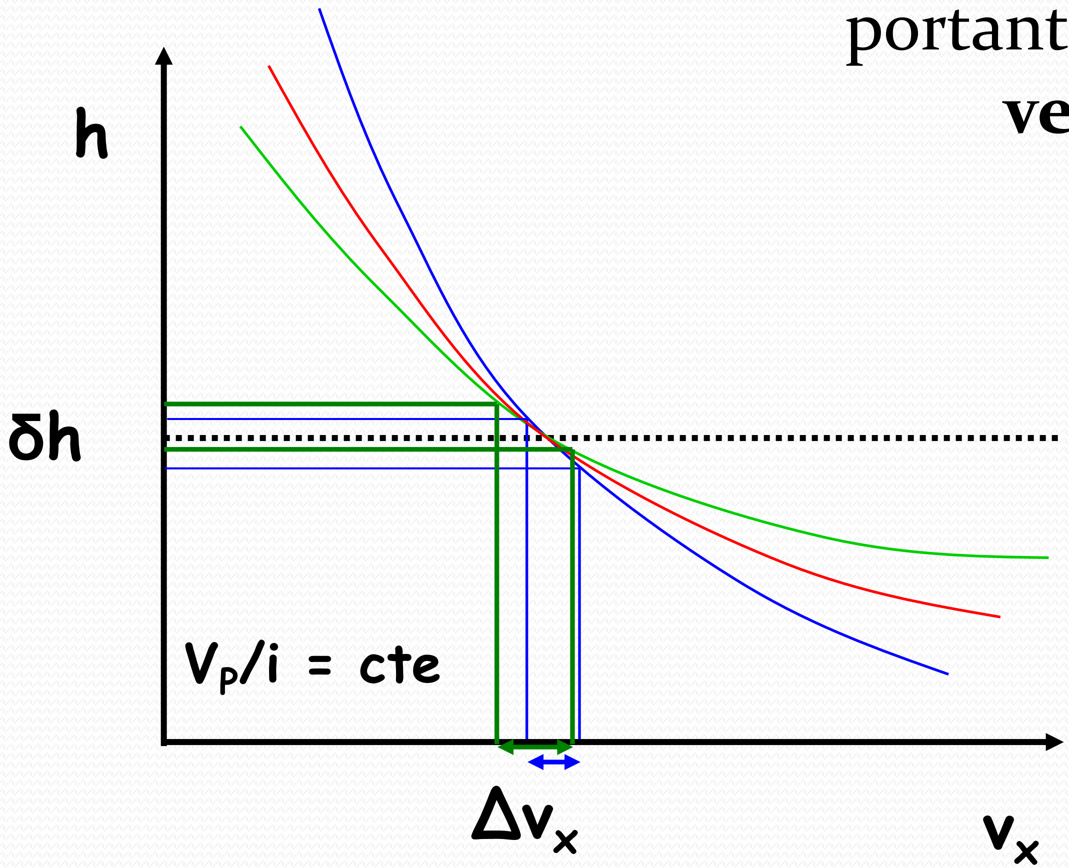
Se quiser fazer essa medida no TRC, Δv_x → ΔV_{AC} (= variação na Tensão de Acel.)

- Usando os valores abaixo, você obtém pontos tanto acima como abaixo do **δh=0**:
  - isso porque a incerteza na posição δ**h=0** determina a incerteza na velocidade, veja no próximo slide:

$$\frac{V_P}{i} = \frac{20}{0,24} = \frac{10}{0,12} = \frac{5}{0,06}$$

E se calcula a resolução da mesma maneira

- Vamos ter um erro no eixo h , δh que é na verdade **o tamanho do ponto na tela**. Calculando o erro $\mathbf{\Delta v_x}$ a partir de **δh**, vemos que ele muda para cada curva e, portanto a resolução **em velocidade** muda:

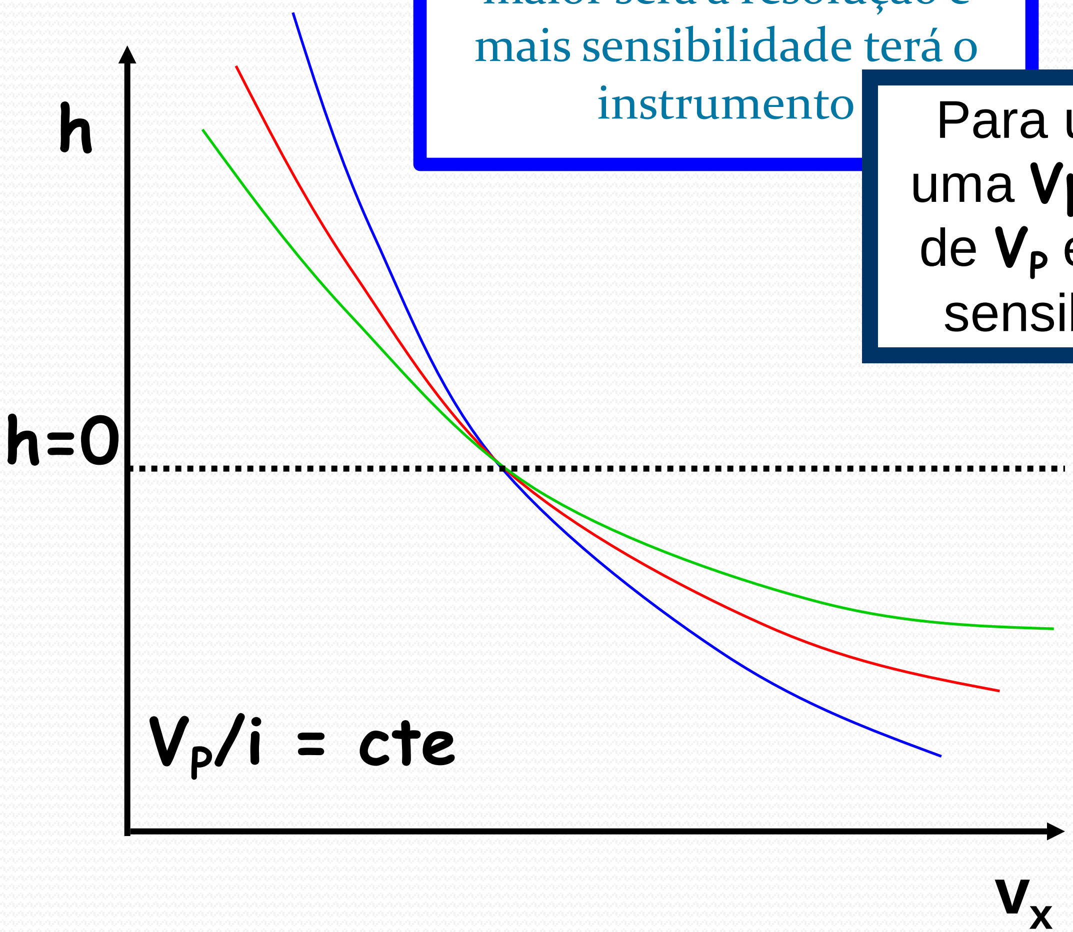


$$R = \frac{\Delta v_x}{v_x}$$

Qual a melhor resolução?

Quanto menor for Δv_x maior será a resolução e mais sensibilidade terá o instrumento

Para um dado **z**, portanto uma **Vp/i** , quais os valores de V_P e **i** que maximiz... sensibilidade d...



Aqueles que tornam a curva mais inclinada:

$$\left.\frac{\partial h(v_x\ ,V_P,i)}{\partial v_x}\right|_h = \max$$

Para Entregar – Parte 2 - Simulação

- 1- Selecione **uma velocidade** $\mathbf{v_x}$ para passar sem desvio → $\mathbf{U_{AC}}$ → uma razão $\mathbf{V_P/i}$.

- 2- Varie $\mathbf{U_{AC}}$, e, portanto $\mathbf{v_x}$, mantendo a razão $\mathbf{V_P/i}$ constante e **levante a curva deslocamento** $\delta\mathbf{h}$ x $\mathbf{v_x}$.

- 3- Varie o valor de $\mathbf{V_P}$ e **i**, **mantendo a razão constante**, levante outra curva $\delta\mathbf{h}$ x $\mathbf{v_x}$.

- Repita esse procedimento para no mínimo **3** valores diferentes de $\mathbf{V_P}$ e **i** sempre mantendo a razão constante

Para Entregar – Parte 2 - Simulação

- 4- A partir da incerteza do deslocamento **h**, no gráfico **h** x **v_x**, calcule a dispersão em **v_x** $\rightarrow$ **Δv_x**, para cada uma das curvas calculadas (Para o erro de δh = diâmetro do feixe).

- 5- Calcule a resolução em velocidade do instrumento para cada uma das curvas:

$$R = \frac{\Delta v_x}{v_x}$$

- 6- Comente suas observações. Você deve criar seu próprio programa, se não conseguir pode utilizar o que disponibilizamos, com uma penalidade na nota... (-2,0pnts)

Sugestões: para quem vai medir no TRC

- Usem uma velocidade média com um **U_{ac}=700V** e **Vp/i** da ordem de **83**:

$$\frac{V_P}{i} = \frac{25}{0{,}3} = \frac{10}{0{,}12} = \frac{5}{0{,}06} \approx 83$$

- Daí tem **3** pontos para cima (800, 900, 1000V) em relação a **h=0** e **3** pontos para baixo (**400, 500, 600V**) para cada curva.
- Ao todo **7** pontos para cada curva
- Se para algum seletor o valor de tensão aceleradora **400 V** for muito baixo, ou seja, não aparece o ponto na tela, subir um pouco até aparecer e manter todas as outras tensões também um pouco mais altas.

Pergunta da semana

Considere que a bobina está corretamente ligada ao voltímetro, na figura abaixo. Neste caso, o que acontece se o ímã posicionado na mão, for aproximado rapidamente da bobina?

Explique.