Física Experimental III

Notas de aula: www.fap.if.usp.br/~hbarbosa

LabFlex: www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex

Experiência 2, Aula 6

Prof. Henrique Barbosa
hbarbosa@if.usp.br
Ramal: 7070
Ed. Basílio Jafet, sala 229

Relatório

- O que é um relatório?
  - Qual a diferença entre um relatório e um livro didático?
- Como escrever um relatório?
  - Qual o nível de detalhamento que devo escrever?
    - Conhecimento comum x específico
  - Referências no texto
    - Tudo que não é deduzido explicitamente a partir de princípios básicos deve ser referenciado
- O que é informação relevante?
  - Quais os objetivos e conclusões do experimento?
  - O que precisamos explicar para dar segurança às conclusões?
  - Indo das conclusões para a introdução

Relatório

- Resumo
  - deve conter objetivos, métodos, principais resultados e conclusões de forma sucinta. No máximo 10-12 linhas
- Introdução
  - Contextualização do trabalho. Objetivos de forma mais detalhada. Fundamentos teóricos que serão explorados.
- Procedimento experimental
    - Campo Elétrico
    - Campo Magnético
    - Campo Eletromagnético
- Análise dos dados e discussão
    - Campo Elétrico
    - Campo Magnético
    - Campo Eletromagnético
- Conclusão
  - Com base nos objetivos, resultados e discussões realizadas, concluir o trabalho realizado

Como escrever um relatório?

- Detalhamento
  - Separar conhecimento comum daquele desenvolvido especificamente para o experimento
    - Exemplo:Simulação do Laplaciano
      - Método I: livro texto
        - Neste método descreve-se em detalhes todos os passos realizados e deduções teóricas
      - Método II: relatório/artigo científico
        - Descreve-se apenas as idéias e referencia-se o detalhamento

Teoricamente o potencial V pode ser obtido resolvendo-se a equação de Poisson:

$$\nabla^2 V = \frac{\rho}{\varepsilon}$$

Onde ρ é a densidade de carga elétrica. Na ausência de cargas livres a equação de Poisson se reduz à equação de Laplace, ou seja:

$$\nabla^2 V = 0$$

Onde ∇^2 é o operador Laplaciano que, em coordenadas cartesianas vale:

$$\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2}$$

Para encontrar a distribuição de potencial, essa equação deve ser resolvida para e obtida uma solução para V que satisfaça às condições de contorno do problema. Uma das condições é que o campo elétrico dentro dos eletrodos metálicos seja nulo ou que o potencial dentro dos eletrodos metálicos seja constante. Contudo, a solução analítica deste problema somente é possível quando existe alguma simetria espacial que permita simplificar a aplicação destas condições de contorno, como, por exemplo, o potencial de um cilindro ou um sistema de placas paralelas ideais, sem efeitos de borda.

No caso do sistema de placas do Tubo de Raios Catódicos utilizado neste experimento, a geometria utilizada não possui nenhuma simetria geométrica que possa ser explorada a contento. Neste caso, devemos utilizar artifícios computacionais para a resolução da equação de Laplace. A única aproximação que podemos realizar é a que o sistema possui simetria no eixo-z e podemos simplificar o problema tridimensional para um problema bidimensional. Neste caso, devemos resolver a equação:

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

Vamos agora calcular o primeiro termo da equação acima. Vamos inicialmente calcular a derivada primeira do potencial. Podemos aproximar esta derivada por:

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

A derivada segunda pode ser escrita como:

$$\frac{d^2}{dx^2}V(x,y) \approx \frac{V(x+\Delta x) - 2V(x) + V(x-\Delta x)}{\Delta x^2}$$

O mesmo pode ser escrito para a derivada na coordenada y. Assim, a equação de Laplace torna-se:

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

Fazendo a simplificação que $\Delta x = \Delta y = \Delta$, podemos escrever que:

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

A equação acima possui solução somente se o numerador for nulo. Neste caso, podemos escrever que:

$$V(x,y) = \frac{1}{4}\left(V(x+\Delta) + V(x-\Delta) + V(y+\Delta) + V(y-\Delta)\right)$$

A equação acima pode ser resolvida numericamente no Excel. Fazemos uma planilha de n x n células onde o conteúdo de cada célula é obtido através dos valores das células vizinhas. Definimos algumas células como sendo as condições de potencial nas placas do TRC, conforme mostra a figura 1. Existe, contudo, o problema das condições de contorno nas bordas. Devido à planilha não ser infinita, devemos satisfazer condições de contorno cíclicas, ou seja, o valor na borda da planilha deve ser calculado considerando como valor vizinho a célula no outro extremo da planilha.

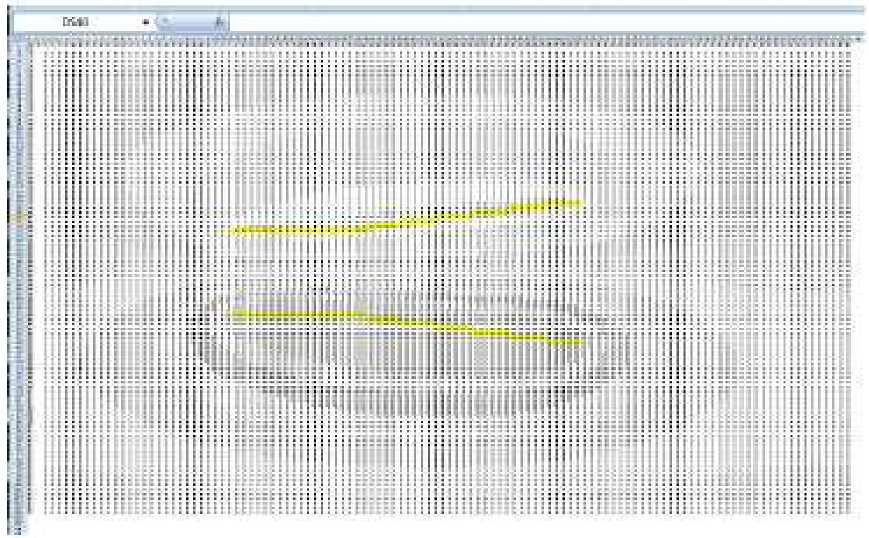


Figura 1 – Planilha usada para simulação do campo elétrico nas placas do TRC

Método II – Relatório

Teoricamente, na ausência de cargas livres, o potencial V pode ser obtido resolvendo-se a equação de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0$$

No caso das placas do Tubo de Raios Catódicos, não há simetrias espaciais que permitam a solução analítica da equação acima. Fazendo aproximação por elementos finitos para o cálculo do Laplaciano podemos escrever que o potencial em um ponto (x,y) é dado por [1]:

$$V(x,y) = \frac{1}{4}\left(V(x+\Delta)+V(x-\Delta)+V(y+\Delta)+V(y-\Delta)\right)$$

Onde Δ é o tamanho de cada célula. A equação acima pode ser resolvida numericamente no Excel. Devido à planilha não ser infinita, utilizamos condições de contorno cíclicas, conforme descrito na Ref [1].

[1] http://www.water.tkk.fi/wr/kurssit/Yhd-12.122/www_book/sgh_34.htm

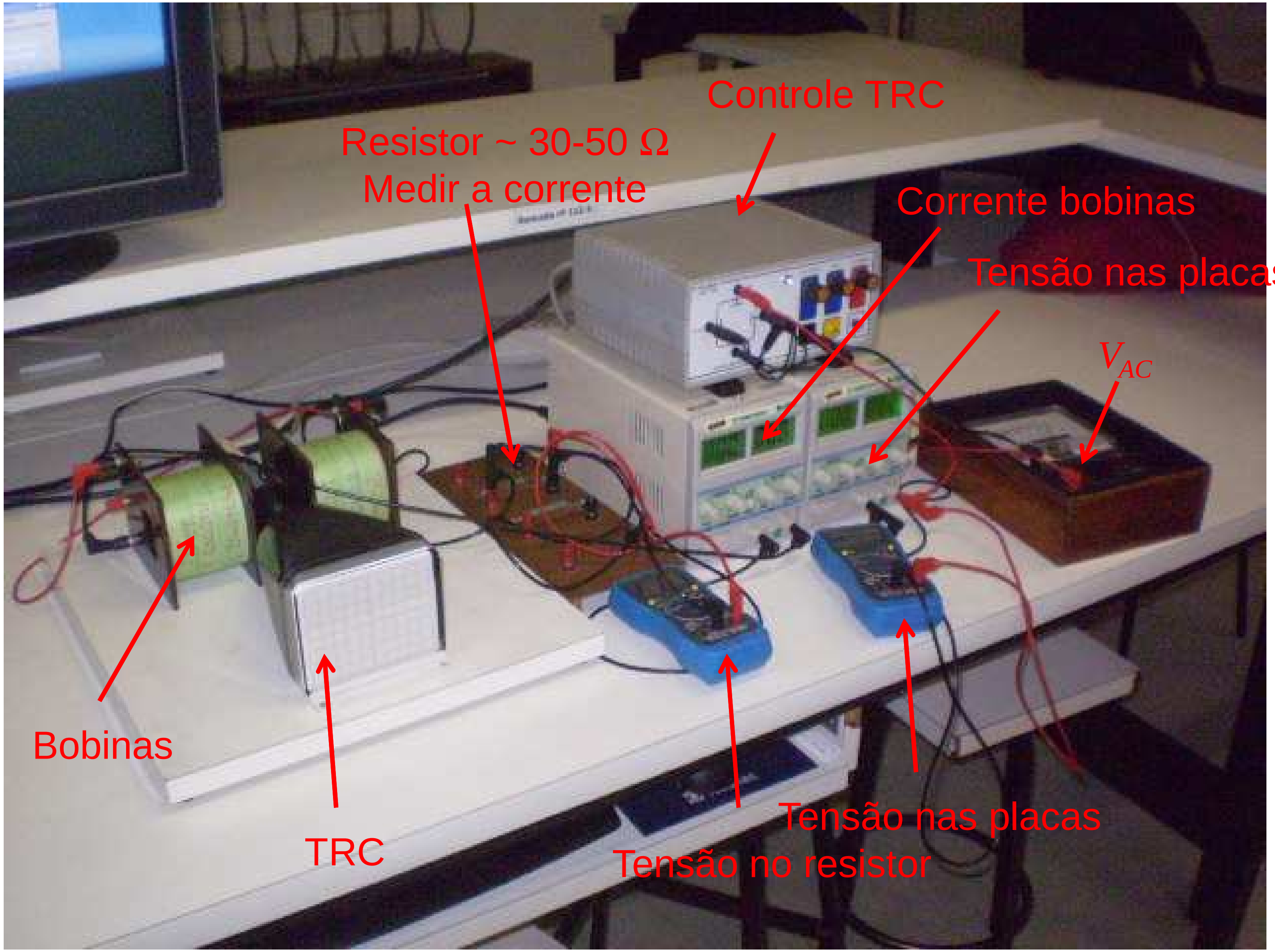
Dicas quanto à forma

- Figuras e tabelas DEVEM ser citadas no texto (numeradas e com legendas)
  - O leitor deve saber qual momento do texto que ele precisa olhar para a figura/tabela para o entendimento do texto.

- Referências DEVEM ser citadas no texto
  - O leitor deve saber qual referência está relacionada a qual assunto e quando ela se encaixa no texto para poder se aprofundar no tema

TAREFAS SEMANA PASSADA

O Seletor de velocidades



Atividades da semana... passada

- Verificar se a aproximação teórica para o seletor se aplica
  - Calcular a constante k e verificar se a ordem de grandeza é próxima de 1. Discutir os resultados.

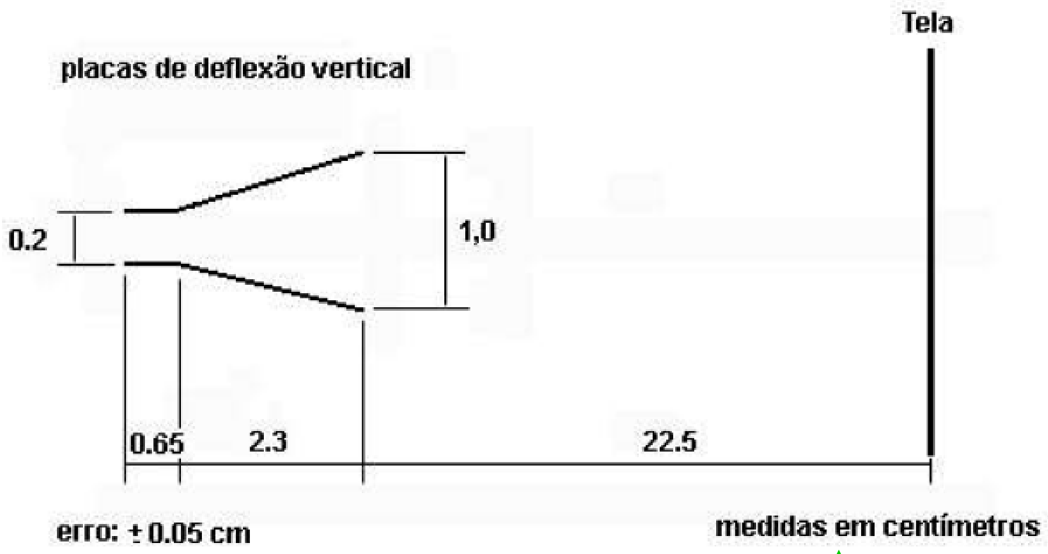
- Calibrar o seletor de velocidades
  - Obter a constante α que relaciona a velocidade de filtro com a tensão entre as placas e a corrente nas bobinas

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

  - Obtenha a distância efetiva entre as placas (d) e compare com valores obtidos anteriormente.

Constante k

	Dps (cm)	Lp (cm)	L (cm)	Lb (cm)	K
	18,1	2,21	25,45	2,96	0,88±0,31
	21,9(1)	3,55(2)	25,5(1)	13(1)	0,5(4)
	22,5	3,047	25,45	11,95	0,48
	22,50(5)	13,5	22,50(5)	16(1)	0,36(2)
	22	3,45	25,45	7,82(13)	0,8227(16)
	20,46 (5)	2,04(5)	22,45(5)	2,32(7)	1,48(6)
	22,5	2,95	13	11,8	0,922

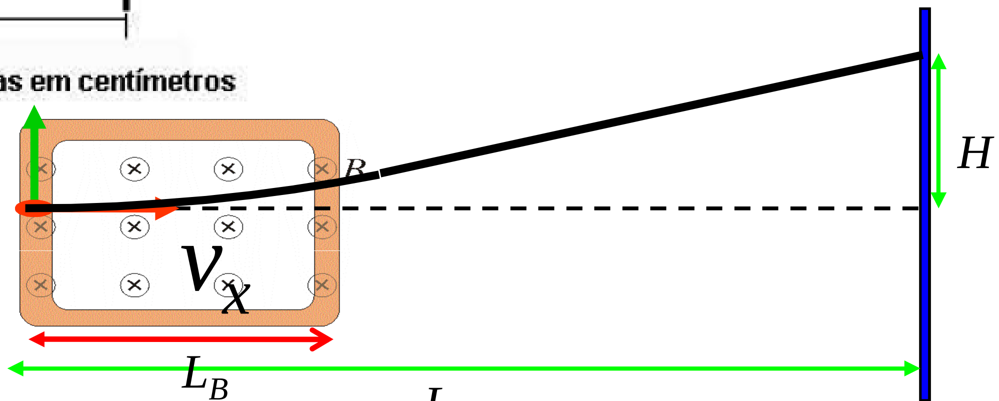


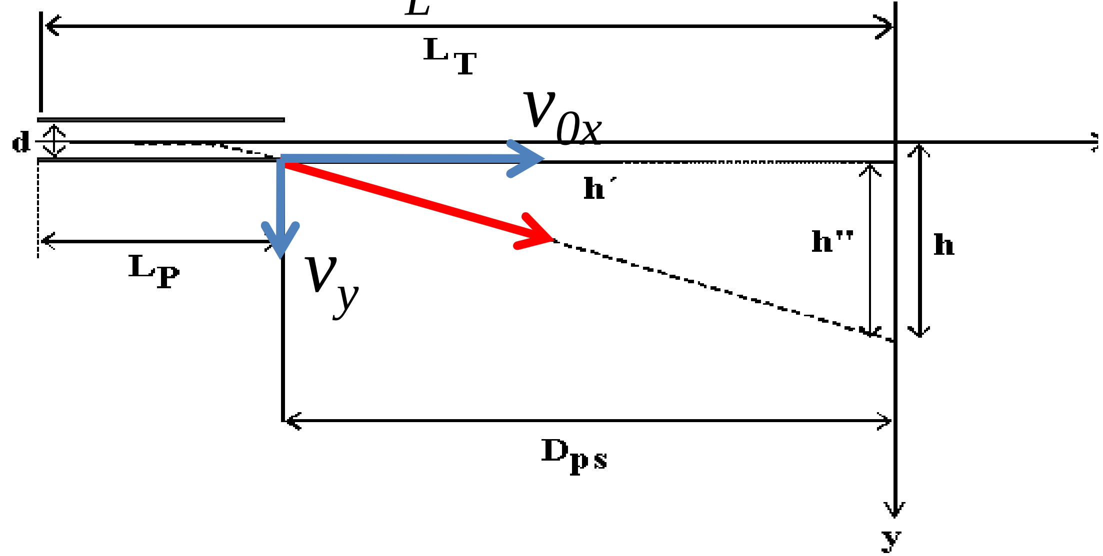
$$H = C\frac{i}{\sqrt{V_{ac}}}$$

$$C = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{q}{2m}}LL_B\beta$$

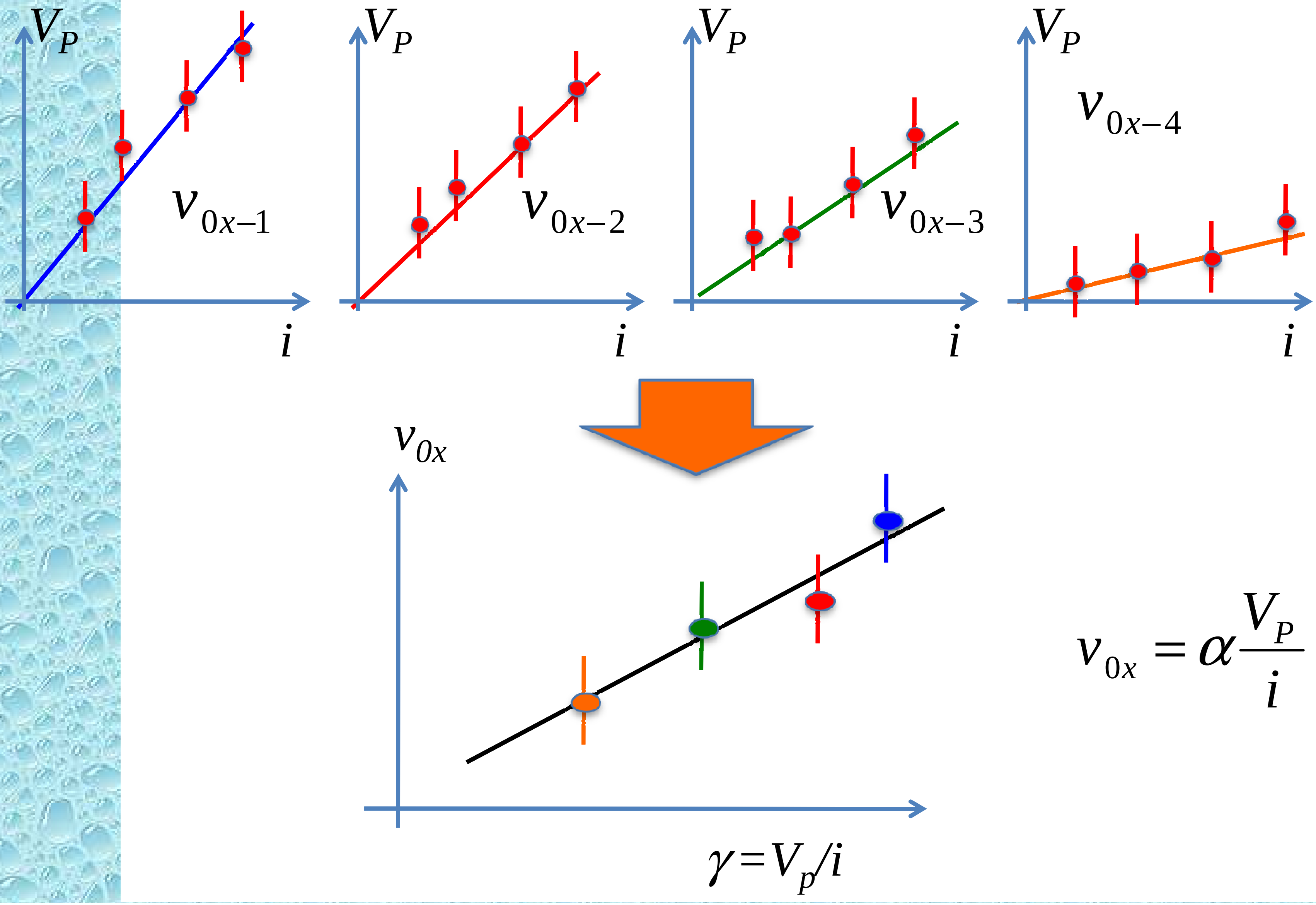
$$h = A'\frac{V_p}{V_{ac}}$$

$$A' = \frac{L_P}{2d}\left(\frac{L_P}{2} + D_{PS}\right)$$



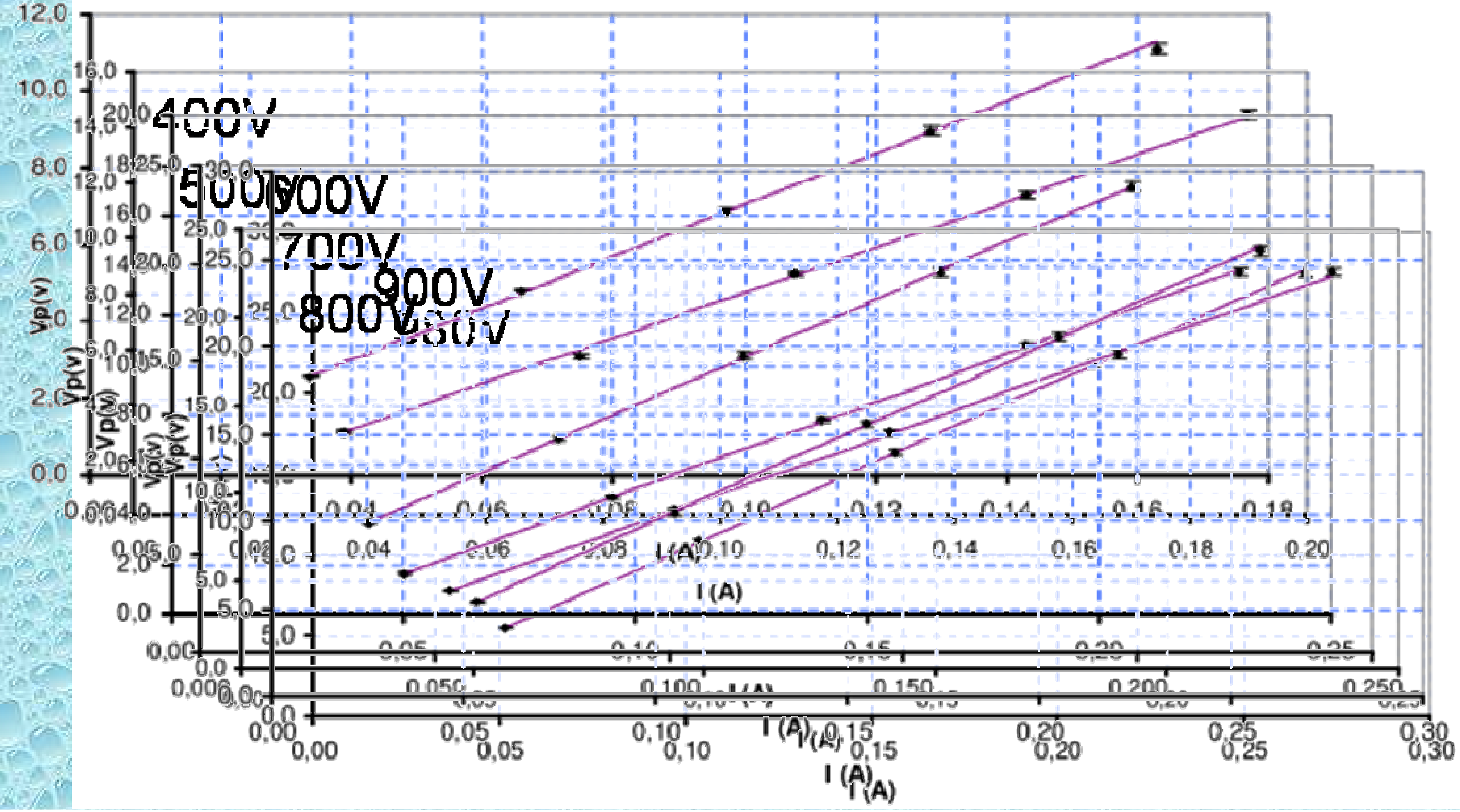


Calibração do seletor de velocidades

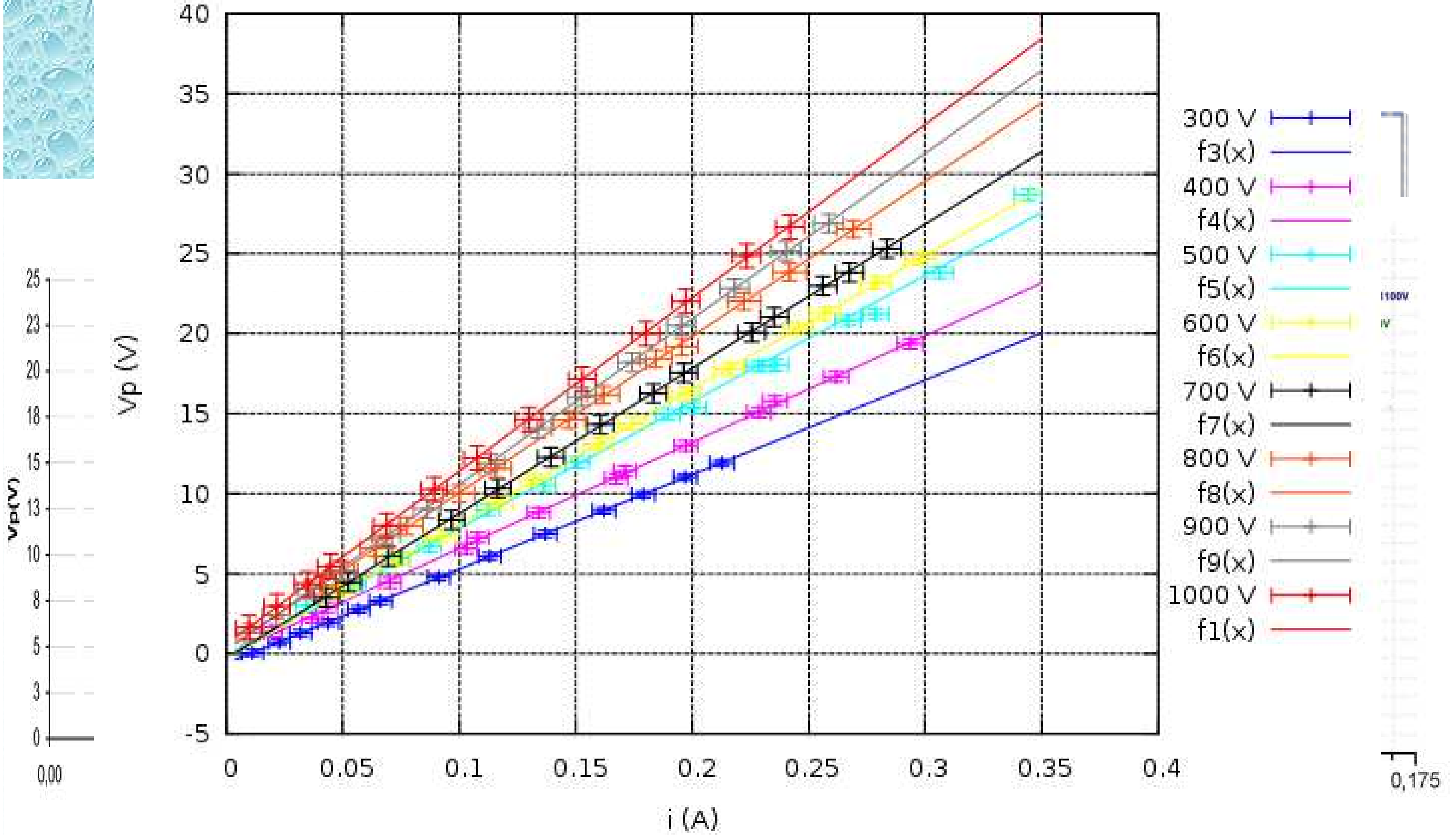


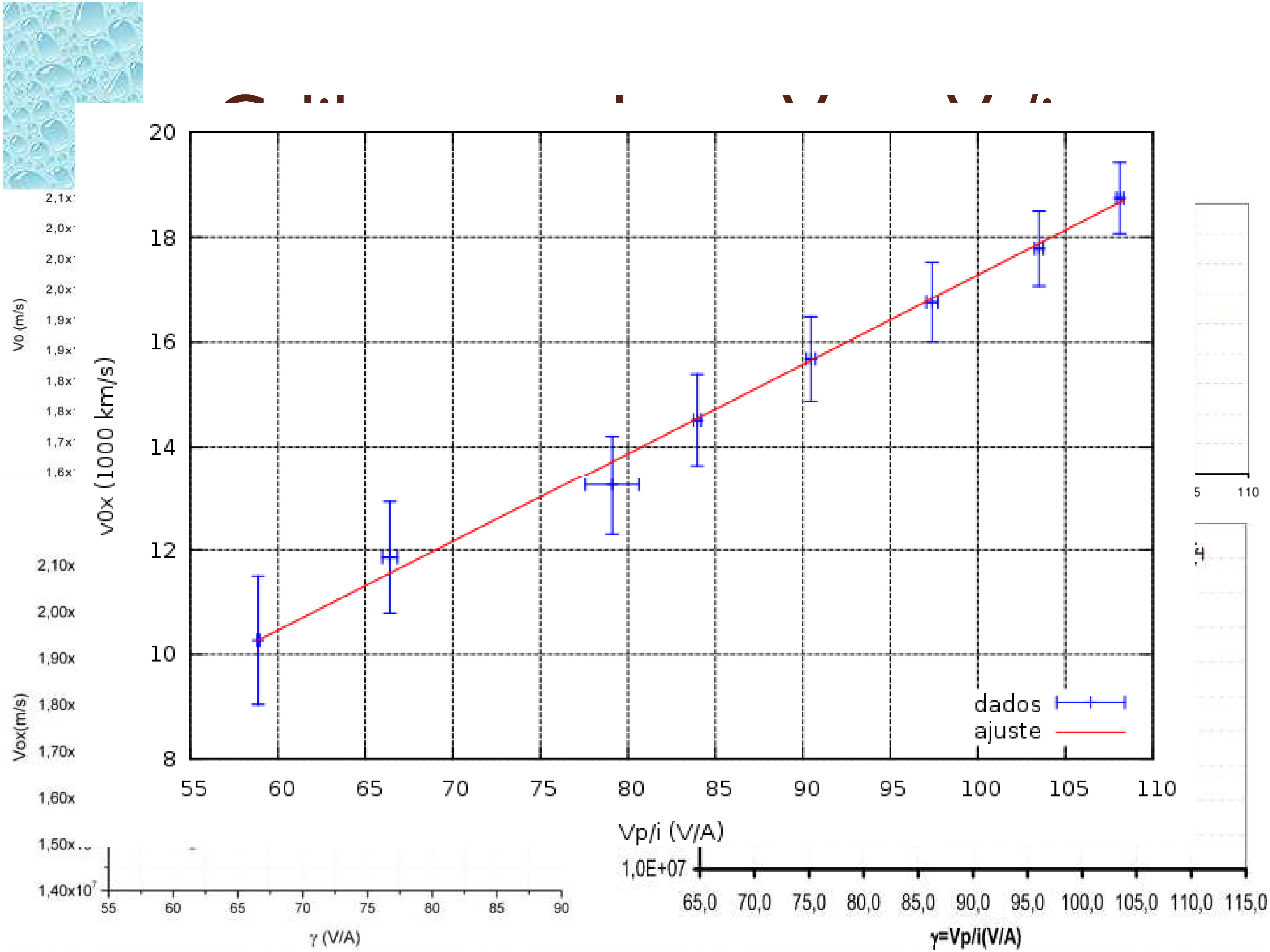
$$v_{0x} = \alpha \frac{V_P}{i}$$

Calibrar o seletor: V_p x i



Calibrar o seletor: V_p x i

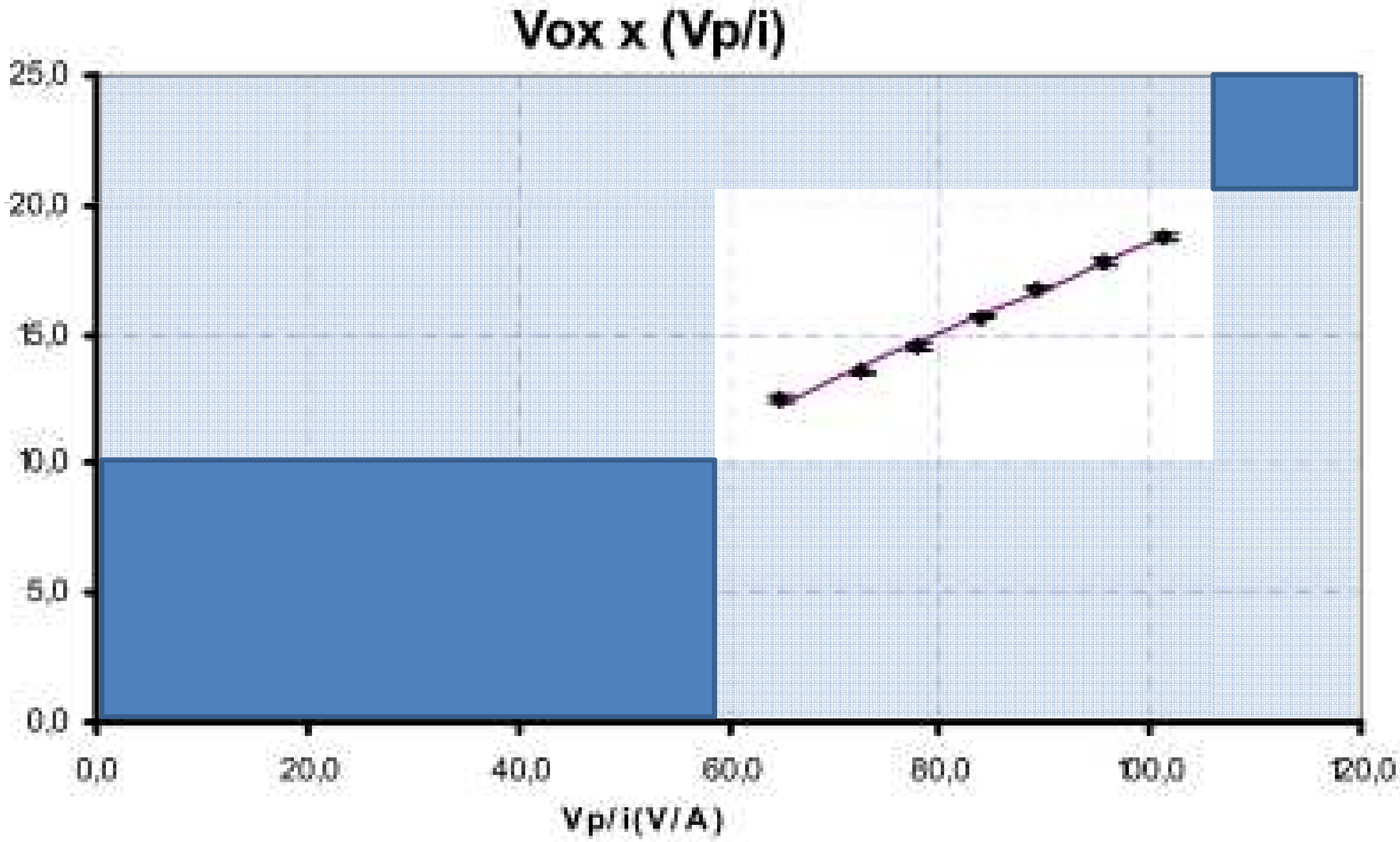




v0x (1000 km/s)
Vp/i (V/A)
dados
ajuste
V0 (m/s)
Vox(m/s)
γ (V/A)
γ=Vp/i(V/A)

Calibrar o seletor: $V_{0x} \times V_p/i$

$\alpha = 19(?)$



Calibrar o seletor: $V_{0x} \times V_p/i$

	alfa (km A s^{-1} V^{-1})	Beta (G/A)	d (mm)	d-Elet. (mm)
	170±1	0,08(?)	4,9 10^{-2}	1,3(3)
	181,6	12,4	4,4	3±6 3±2
	163,0± 33,0			2,20(3)
	178,7±3,7		4,9(1)	
	257±11		1,917(82)	2,43
	19(?)	129±4(?)	4	
	187,4±4,3	58,2(2)	0,92(2)	
	151,1±3,3	21,453(16)	3,085(67)	

184±34

Faz Sentido o valor de alpha?

$$C = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{q}{2m}} L L_B \beta$$

$$H = C\frac{i}{\sqrt{V_{ac}}}$$

$$h = A'\frac{V_p}{V_{ac}}$$

$$A' = \frac{L_P}{2d}\left(\frac{L_P}{2} + D_{PS}\right)$$

$$H = h$$

$$C\frac{i}{\sqrt{V_{ac}}} = A'\frac{V_p}{V_{ac}}$$

$$\frac{A'}{C}\frac{V_p}{i} = \sqrt{V_{ac}} = \sqrt{\frac{m}{2q}} v_{0x}$$

$$v_{0x} = \frac{A'}{C}\sqrt{\frac{2q}{m}}\frac{V_p}{i}$$

$$\alpha$$

$$C = 554 \pm 79$$

$$A' = 158 \pm 15 \quad \Rightarrow \alpha = (169 \pm 61) km \cdot A \cdot s^{-1} \cdot V^{-1}$$

Esta Semana...

Metodologia adotada

- Resumo do experimento
  - Aula 1 - Entender o campo elétrico. Medir o campo elétrico gerado. Quão próximo está o experimento de uma situação de campo ideal (uniforme)
  - Aula 2 – Entender como as partículas (elétrons) se movimentam no campo elétrico estudado na aula anterior. FEMM
  - Aula 3 - Entender a geração do campo magnético. Como medi-lo e como compará-lo com previsões teóricas.
  - Aula 4 - Movimento dos elétrons no campo magnético gerado. FEMM.
  - Aula 5 e 6 - Ligando o campo elétrico e magnético. Estudar o movimento das partículas no campo EM. Determinar comportamentos gerais do filtro de Wien. Caracterização deste filtro. Comparação com simulações.

Seletor de velocidades: resolução espacial

- 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

- Há uma limitação na tensão nas placas: a fonte vai até **30V**
- Há limitação na corrente nas bobinas em torno de **2,0 A** embora por uma questão de segurança a recomendação é que não se passe de **1,0A**.
- Mesmo com essas limitações há vários valores possíveis de $\mathbf{V_P}$ e **i** com a mesma razão $\mathbf{V_P/i}$.

- Posso escolher qualquer uma?

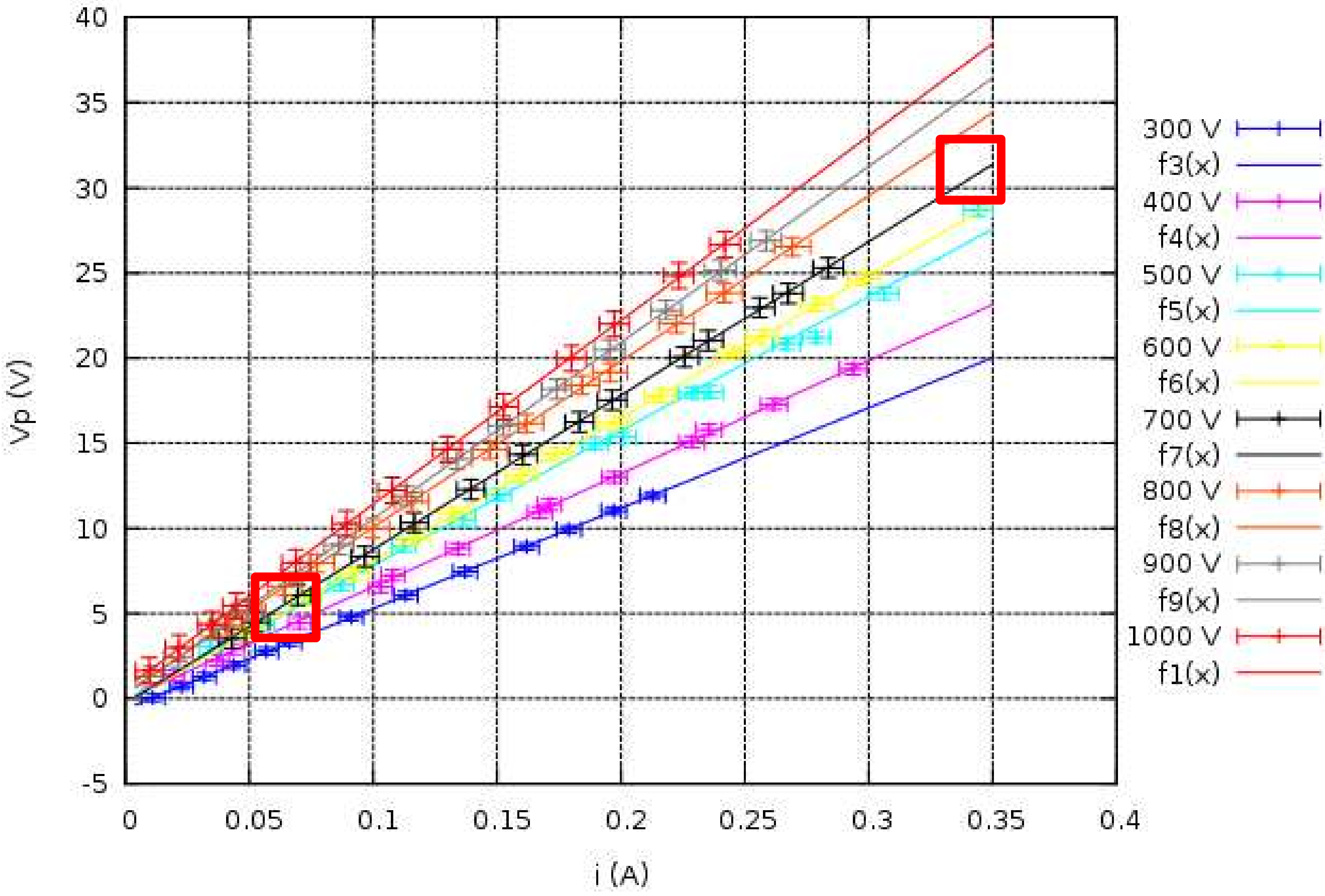
- Há alguma diferença no funcionamento do seletor?

Seletor de velocidades

- Para investigar isso 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 ?

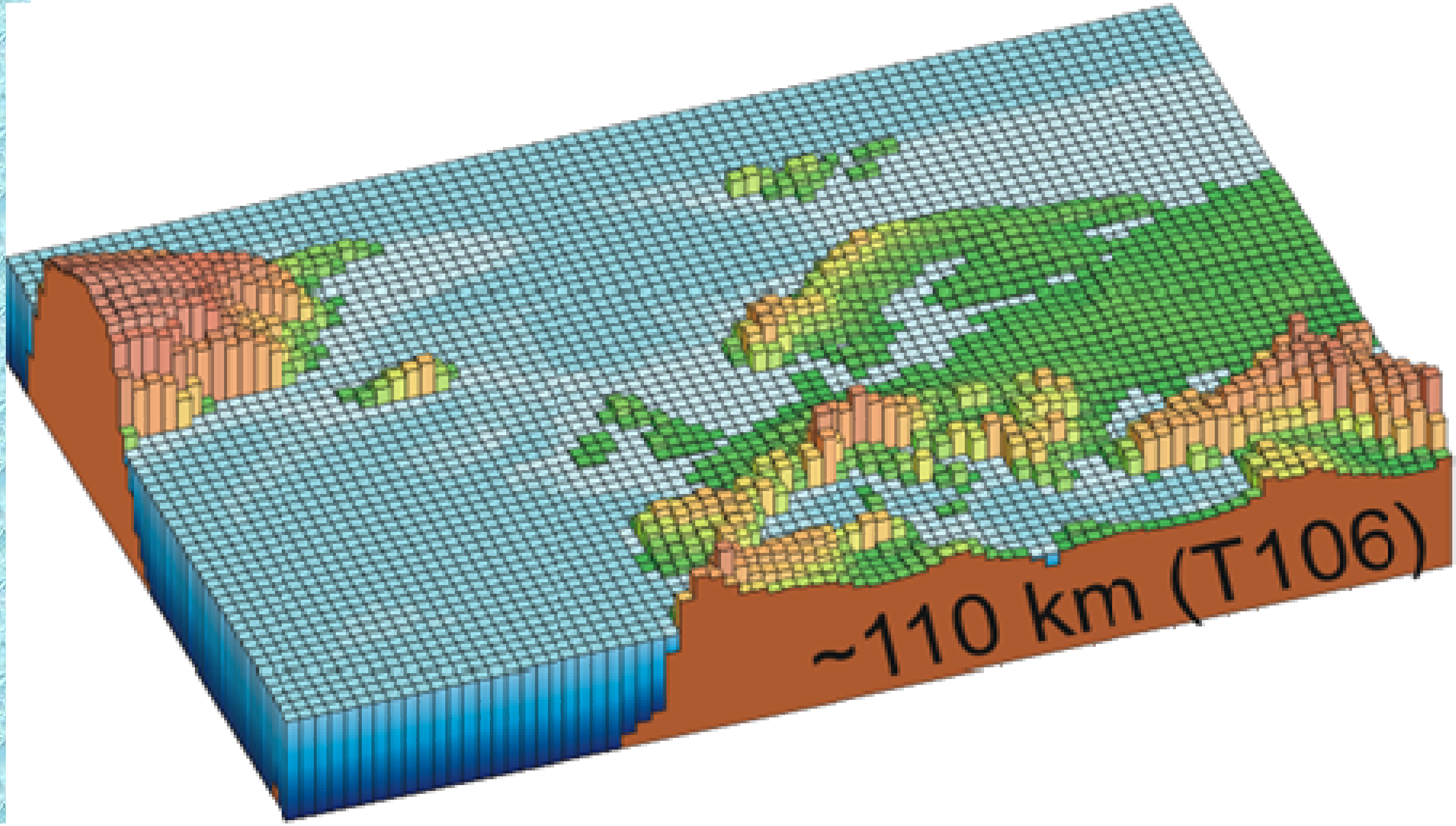


Resolução

- 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: $R = \dfrac{\Delta m}{m}$
  - Se está separando por diâmetro: $R = \dfrac{\Delta d}{d}$
  - Se está separando por velocidade: $R = \dfrac{\Delta v}{v}$

Exemplo



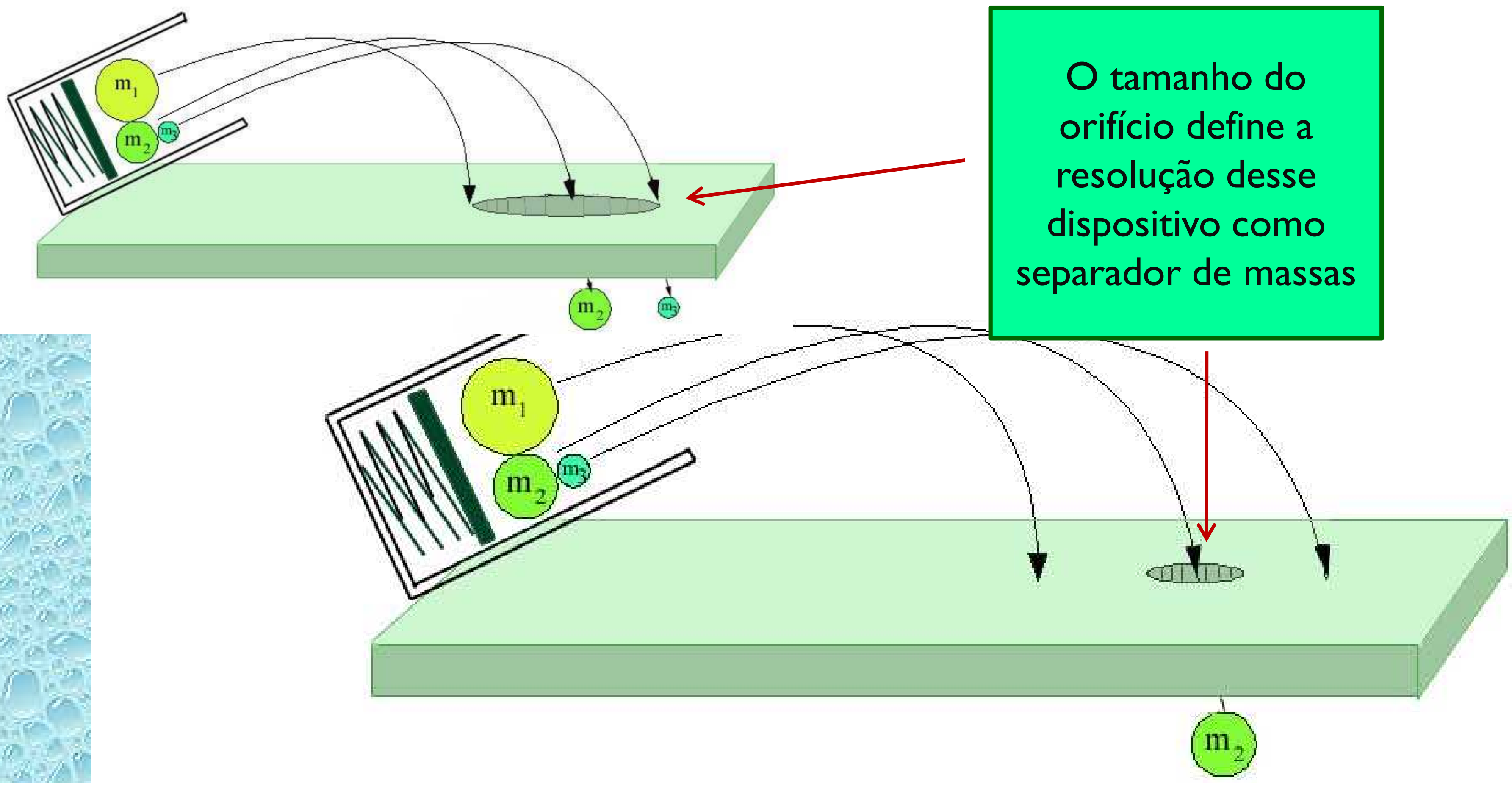
Resolução em velocidade

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

- Se o orifício tem um diâmetro de tamanho suficiente, passarão outras partículas por ele, cujas velocidades não foram selecionadas, mas que são tão próximas da selecionada que o instrumento não consegue distinguir

Separação de massas por distâncias

Supor um canhão que atire bolas de massas diferentes seqüencialmente:



Resolução em velocidade

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

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

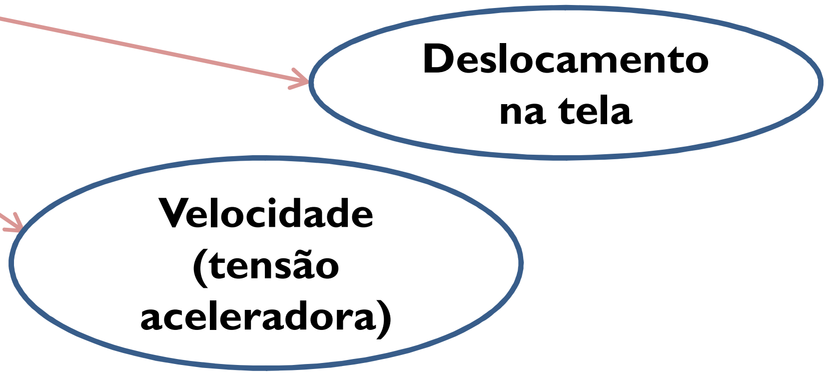
  - Onde $\mathbf{v_x}$ é a velocidade selecionada e $\mathbf{\Delta v_x}$ é o intervalo de velocidades que passou pelo orifício, ou seja, que o instrumento não distingue da velocidade selecionada

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

Para medir Δv_x:

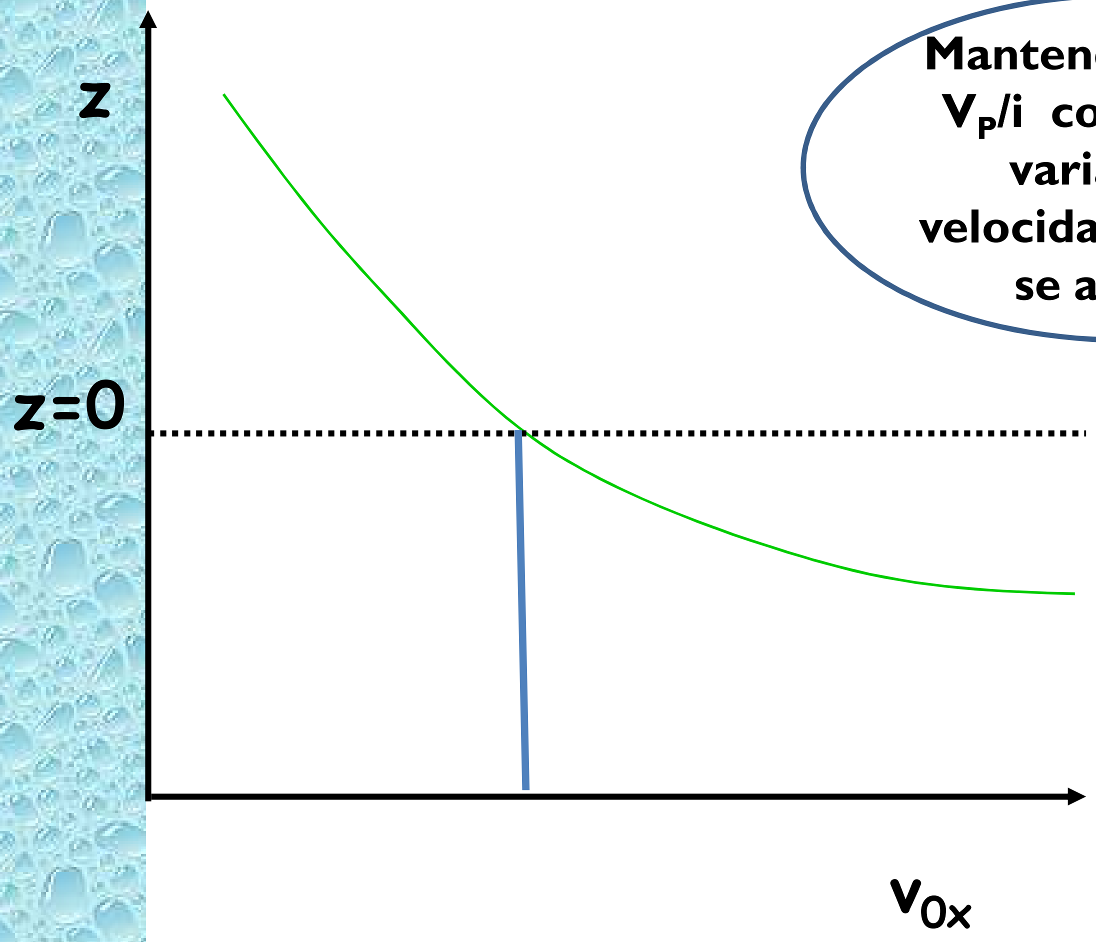
- Vamos fazer a seguinte medida:
  - Ligamos o seletor, selecionamos uma velocidade, v_{0x}, através de $\mathbf{V}_{ac}$, para passar sem desvio
  - Em seguida vamos variar a velocidade e medir o deslocamento do feixe na tela (na direção **z**)
- Montar a tabela:

v_{0x}	z



Para medir Δv_x:

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

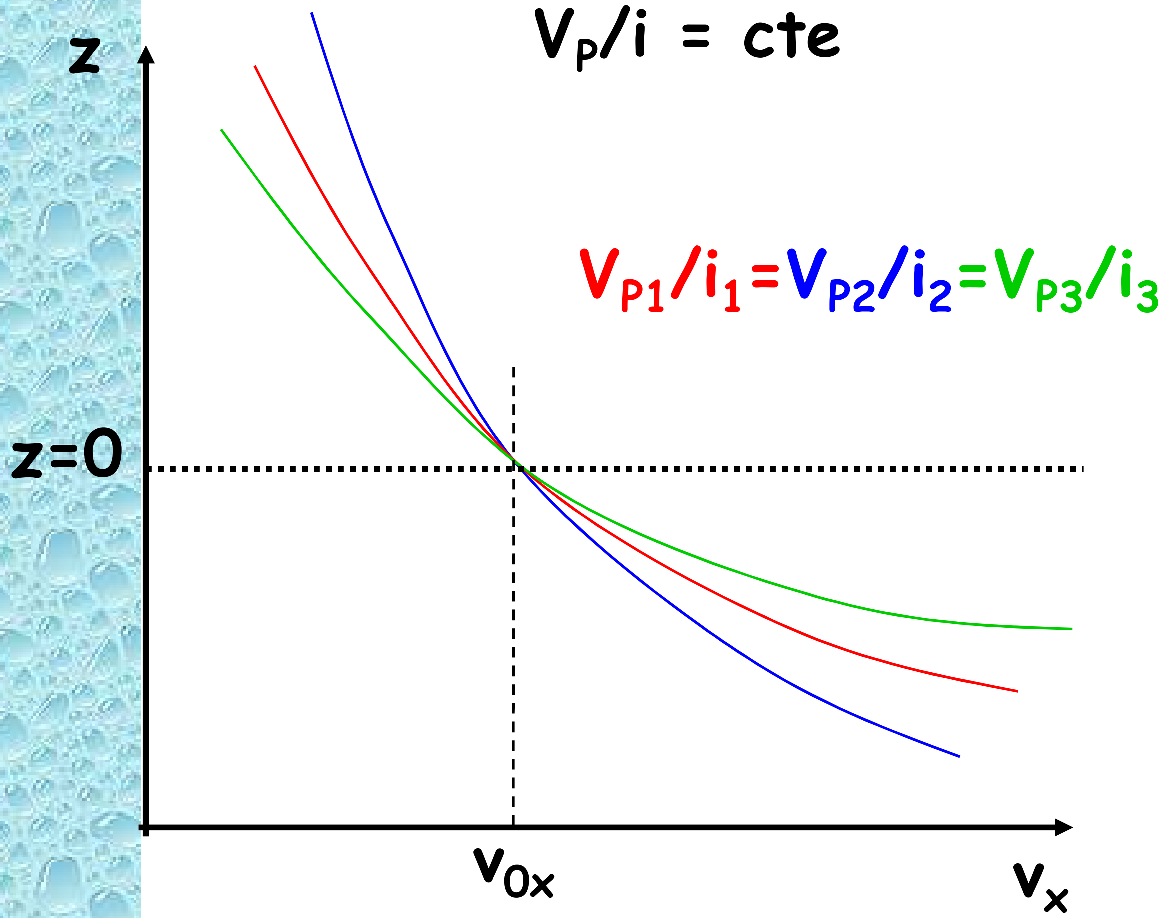


Mantendo a razão V_P/i constante e variando a velocidade obtém-se a curva

Os pontos acima e abaixo da linha z=0 correspondem a situações de desequilíbrio entre F_E e Fm

Medindo Δv_x:

Vamos fazer o mesmo gráfico, para a mesma razão $\mathbf{V_P/i}$ obtidas a partir de valores diferentes de $\mathbf{V_P}$ e **i**



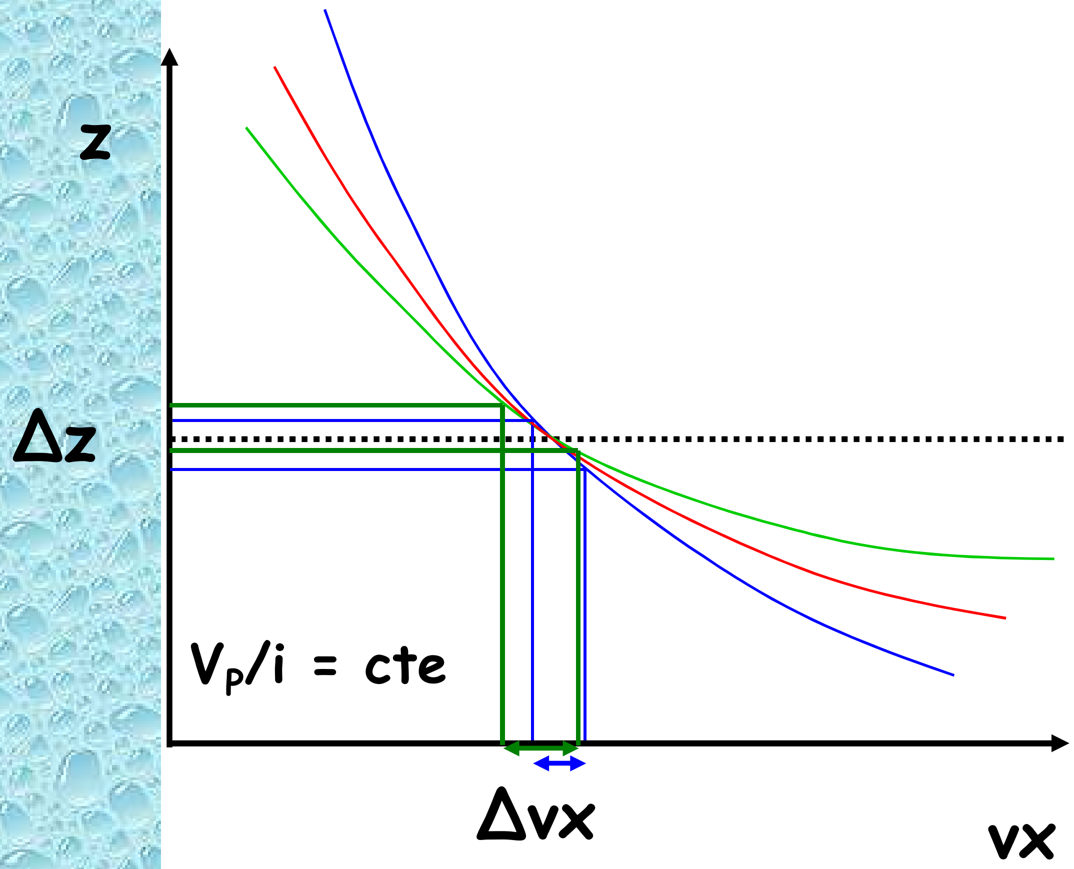
Cada ponto nessas curvas corresponde a um deslocamento na tela no eixo z

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

Medindo $\Delta v_x \rightarrow \Delta V_{AC}$

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

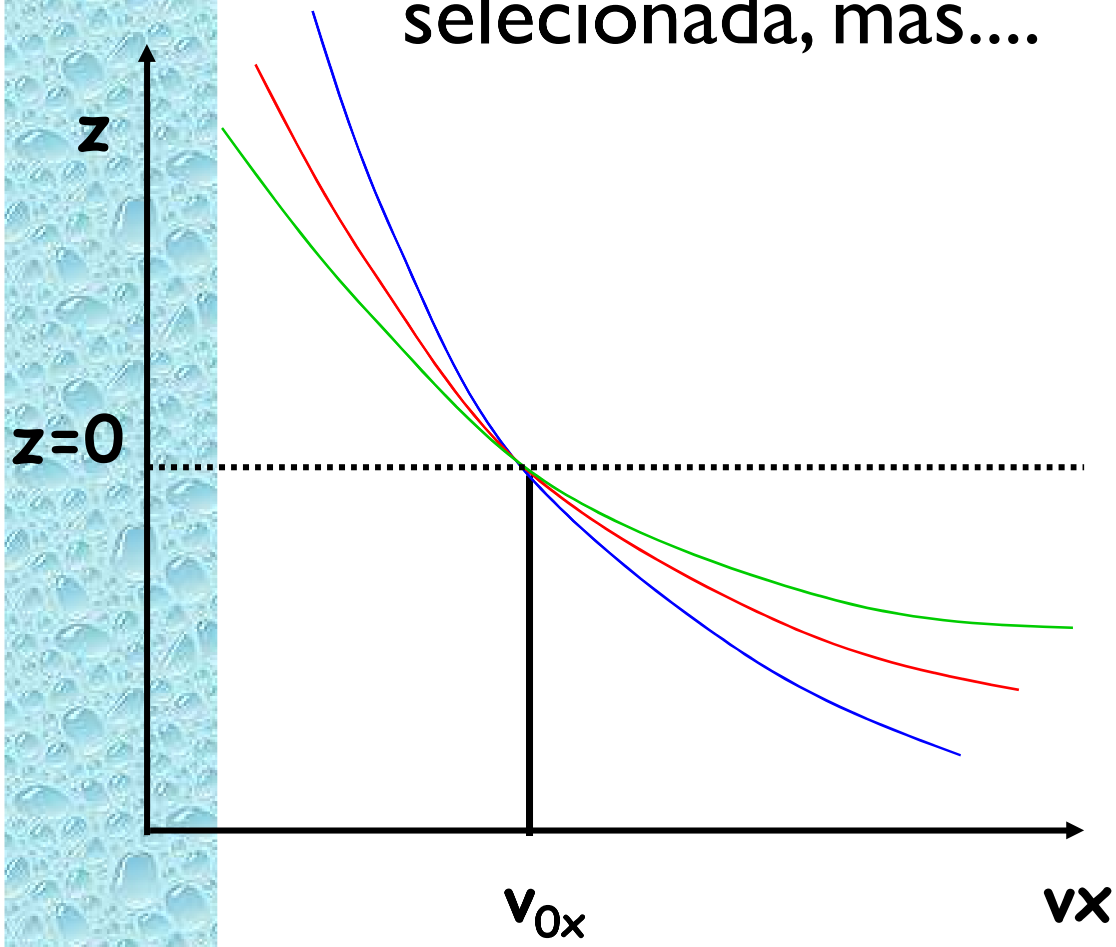
Quanto maiores forem os valores individuais de V_P e i mais inclinada é a curva



Para a mesma incerteza em z temos diferentes incertezas em V_{AC} e, portanto, na velocidade

Cálculo da resolução

- É a mesma razão → mesma velocidade selecionada, mas....

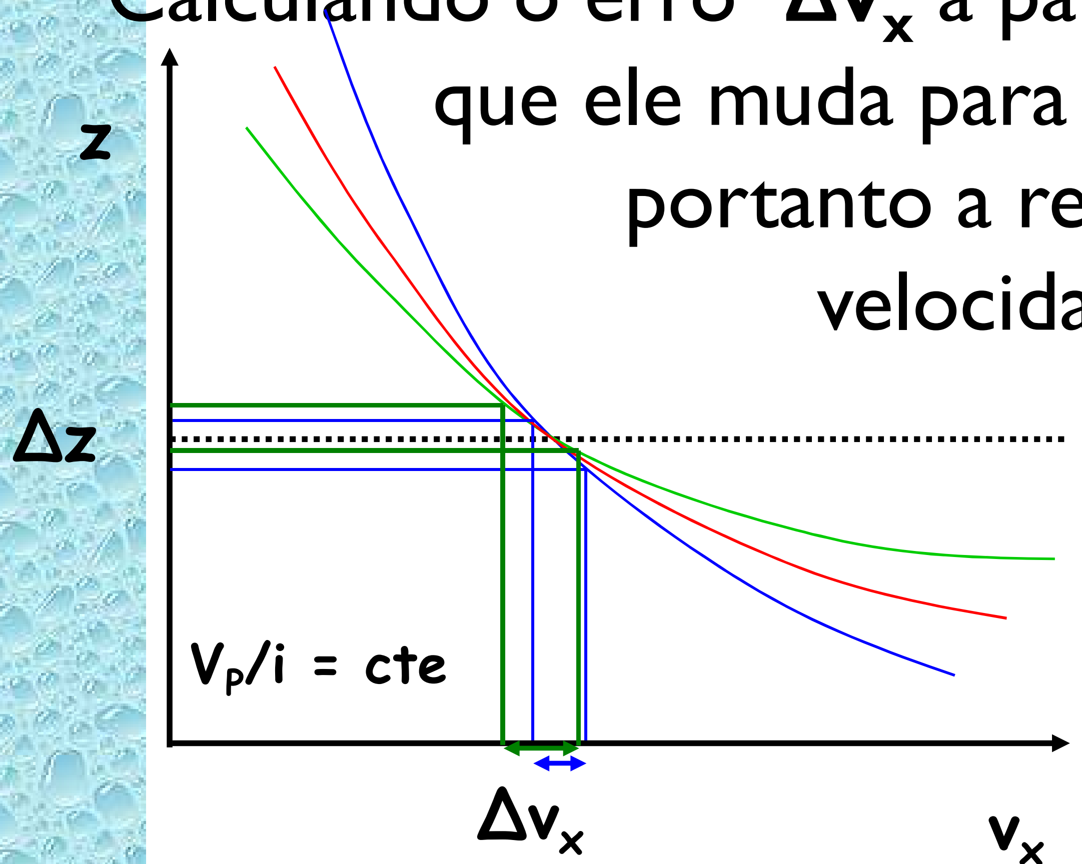


Mas a resolução em velocidade do instrumento não é a mesma

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

Resolução do seletor

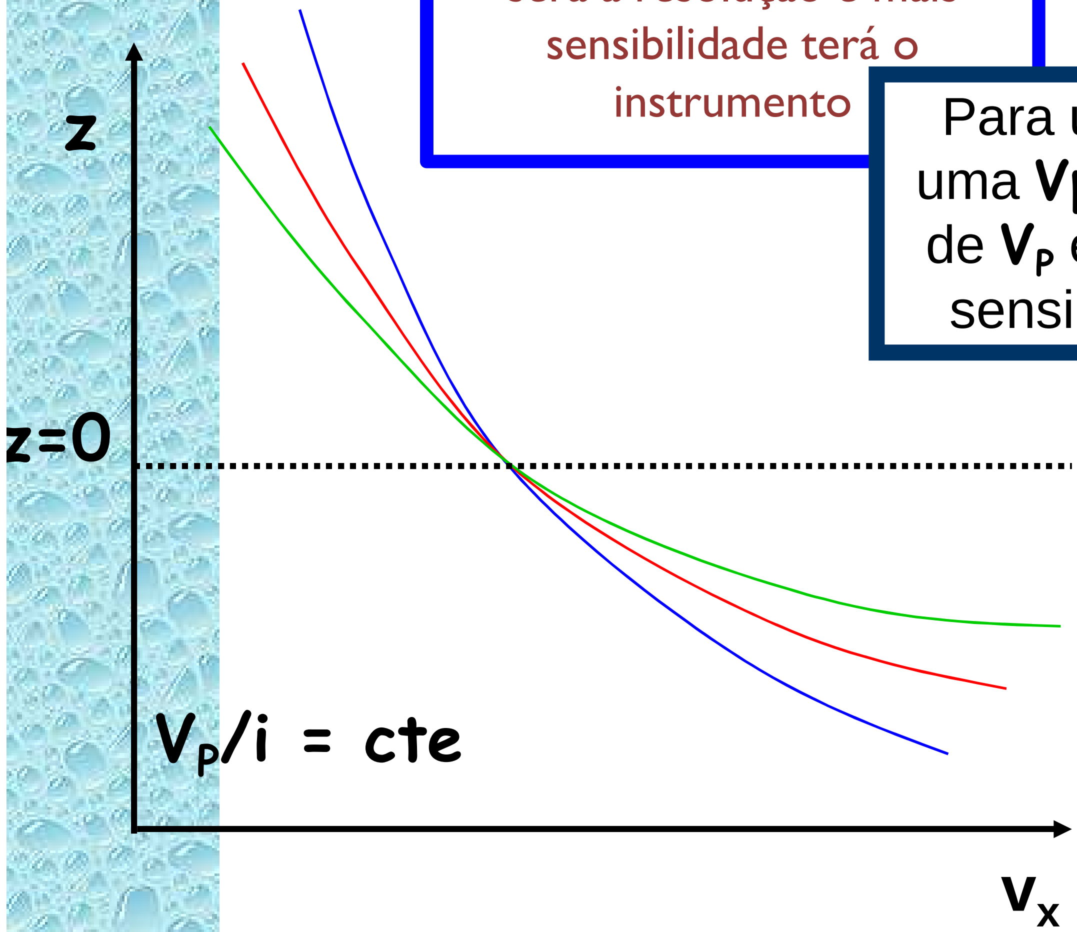
- Vamos ter um erro no eixo **z** , **Δz** que é na verdade o tamanho do ponto na tela. Calculando o erro **Δv_x** a partir de **Δz**, vemos que ele muda para cada curva e, portanto a resolução em velocidade muda.



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

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 $\mathbf{V_P}$ e **i** que maximiz
sensibilidade d

Aqueles que tornam a curva mais inclinada:

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

Tarefas desta semana:

- 1- Selecione uma velocidade $\mathbf{v_x}$ para passar sem desvio → $\mathbf{V_{AC}}$ → uma razão $\mathbf{V_P/i}$.
- 2- Varie $\mathbf{V_{AC}}$, e, portanto $\mathbf{v_x}$, mantendo a razão $\mathbf{V_P/i}$ constante e levante a curva deslocamento **z** x $\mathbf{v_x}$.
- 3- Varie o valor de $\mathbf{V_P}$ e **i**, mantendo a razão constante, levante outra curva **z** x $\mathbf{v_x}$.
- Repita esse procedimento para no mínimo **3** valores diferentes de $\mathbf{V_P}$ e **i** sempre mantendo a razão constante

Tarefas desta semana:

- 4- A partir da incerteza do deslocamento **z**, no gráfico **z** x $\mathbf{v_x}$, calcule a dispersão em $\mathbf{v_x} \rightarrow \mathbf{\Delta v_x}$, para cada uma das curvas medidas.

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

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

- 6- Comente suas observações, discuta o funcionamento do instrumento sob o ponto de vista da resolução.

Dicas

- Usem uma velocidade média com um Vac=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 z=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 400 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.