

# Física Experimental III

Notas de aula: [www.if.usp.br/suaide](http://www.if.usp.br/suaide)

LabFlex: [www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex](http://www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex)

## Aula 10

Prof. Alexandre Suaide

Ramal: 7072

Ed. Oscar Sala (Pelletron), sala 246

# Relatório da experiência II

- O que é um relatório?
  - Qual a diferença entre um relatório/artigo e um livro didático?
- Como escrever um relatório?
  - Qual o nível de detalhamento que devo escrever?
    - Conhecimento comum e conhecimento específico
  - Referenciamento de texto.
    - Tudo que não é deduzido explicitamente a partir de princípios básicos deve ser referenciado.
      - O que são princípios básicos?
- O que é informação relevante?
  - Quais os objetivos e conclusões do experimento?
  - O que precisamos explicar para dar segurança às conclusões obtidas?
    - Indo das conclusões para a introdução

# Divisão de um relatório

É comum haver pequenas variações quanto ao formato, porém todas muito parecidas com esta.

- Resumo
  - Poucas linhas – 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
- Análise dos dados
  - A análise de dados NÃO é só listagem de resultados. Inclui também a discussão dos mesmos.
- Conclusão
  - Com base nos objetivos, resultados e discussões realizadas, concluir o trabalho realizado.
- Referências
  - Ver site do LabFlex sobre como escrever um relatório.

# 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:

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

Onde  $\rho$  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  $\nabla^2$  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:

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

A equação acima pode ser resolvida numericamente no Excel. Fazemos uma planilha de  $n \times n$  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.

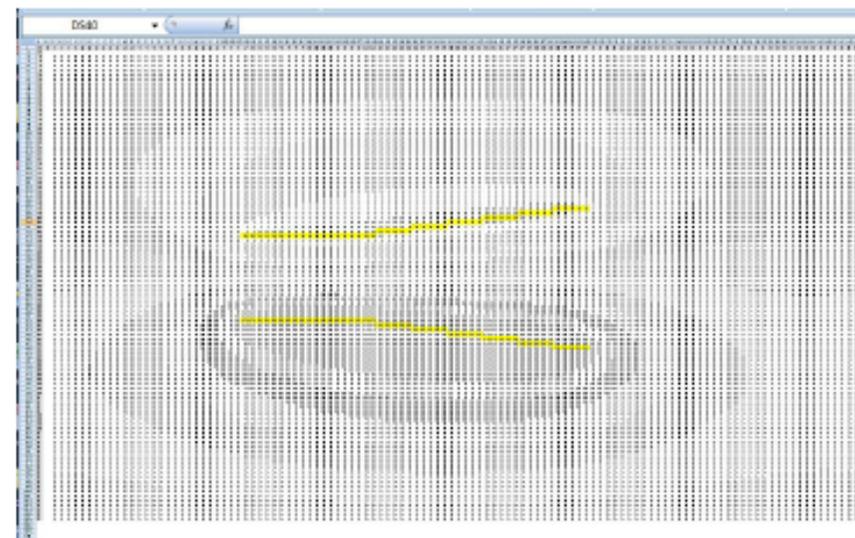


Figura 1 – Planilha usada para simulação do campo elétrico nas placas do TRC

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]:

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

Onde  $\Delta$  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](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

# Algumas referências

- Sobre confecção de relatórios
  - <http://sampa.if.usp.br/~suaide/LabFlex/blog/pivot/entry.php?id=98>
  - <http://sampa.if.usp.br/~suaide/LabFlex/blog/pivot/entry.php?id=61>
- Sobre detalhamento de uma explicação
  - <http://sampa.if.usp.br/~suaide/LabFlex/blog/pivot/entry.php?id=41>

## Objetivos da semana passada

- Verificar se o nosso modelo de campos ideais se aplicam. Neste caso, a partir dos dados das semanas anteriores, obter o valor de  $k$  e checar se:

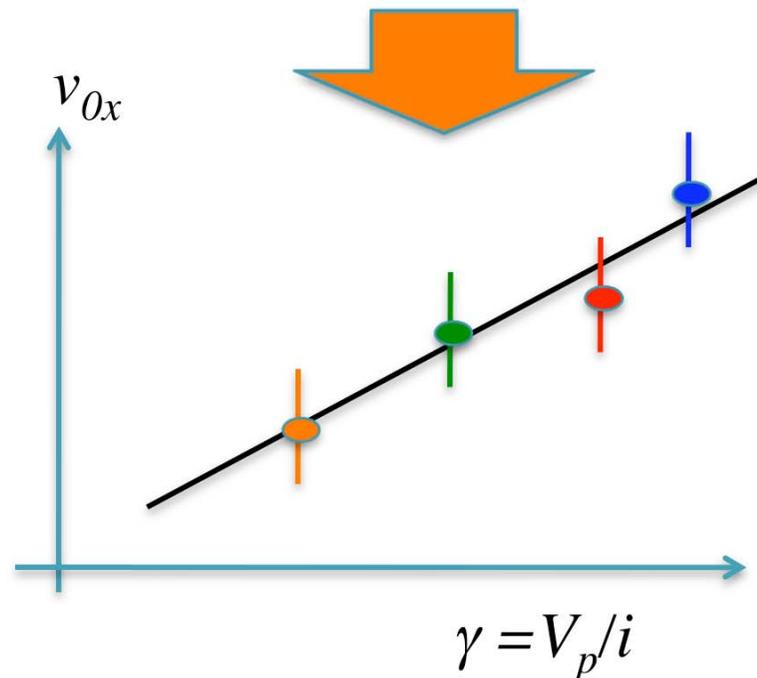
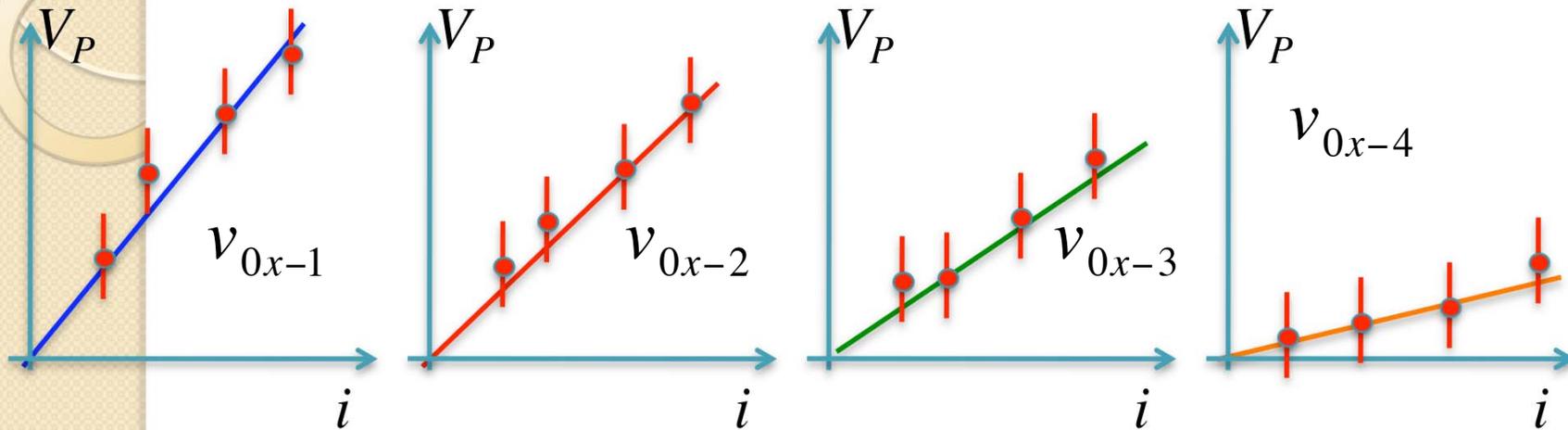
$$k = \frac{2L_P}{L_B L} \left( \frac{L_P}{2} + D_{PS} \right) \sim 1$$

- Calibrar o seletor de velocidades. A partir da relação:

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

- Determinar a constante  $\alpha$ . Sabendo que  $\alpha = 1/\beta d$ , obter o valor de  $d$  e comparar com os resultados obtidos há duas semanas

# Calibração do seletor de velocidades



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

# Resultados: cálculo da velocidade

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

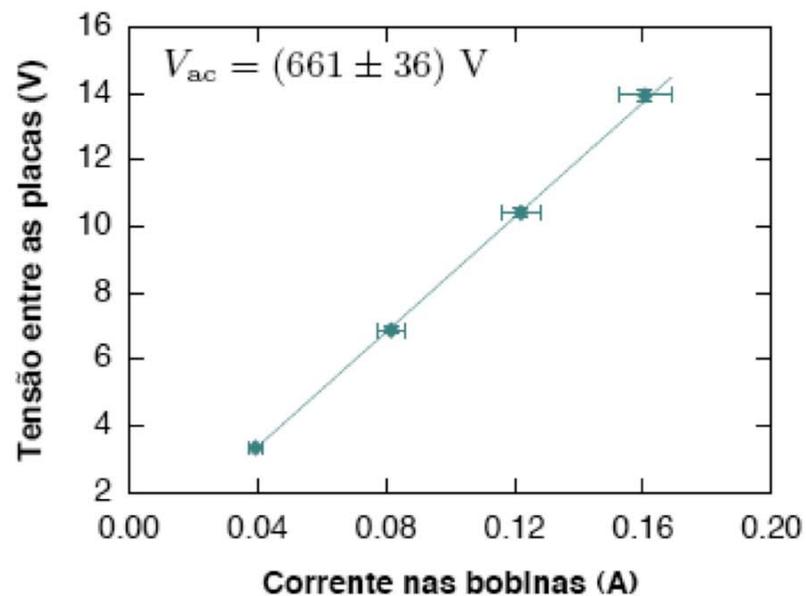
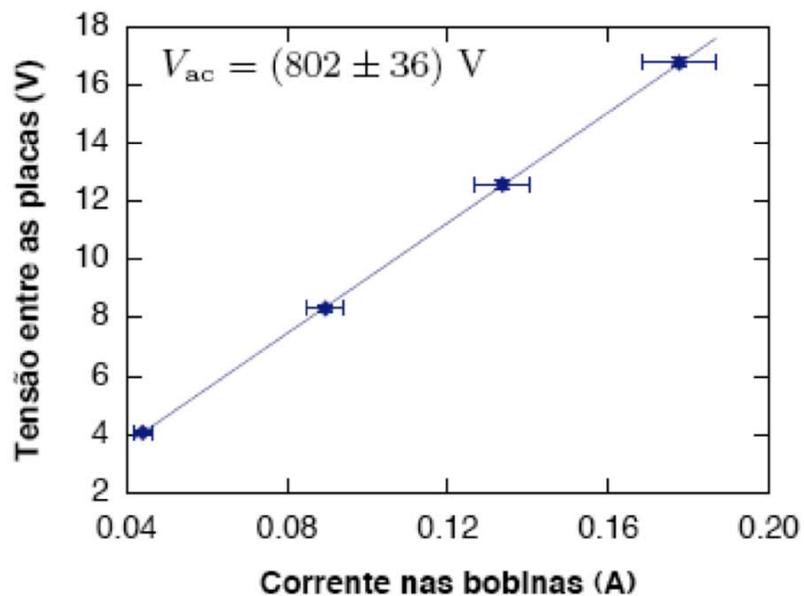
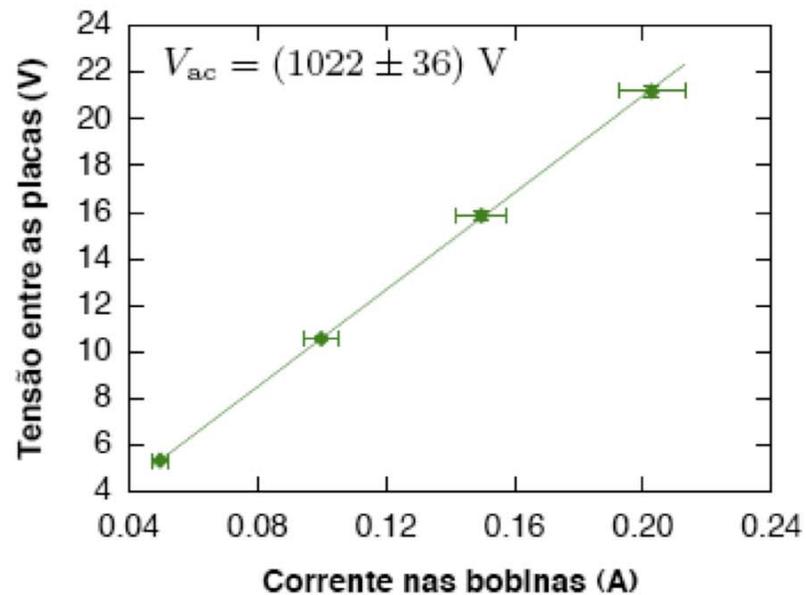
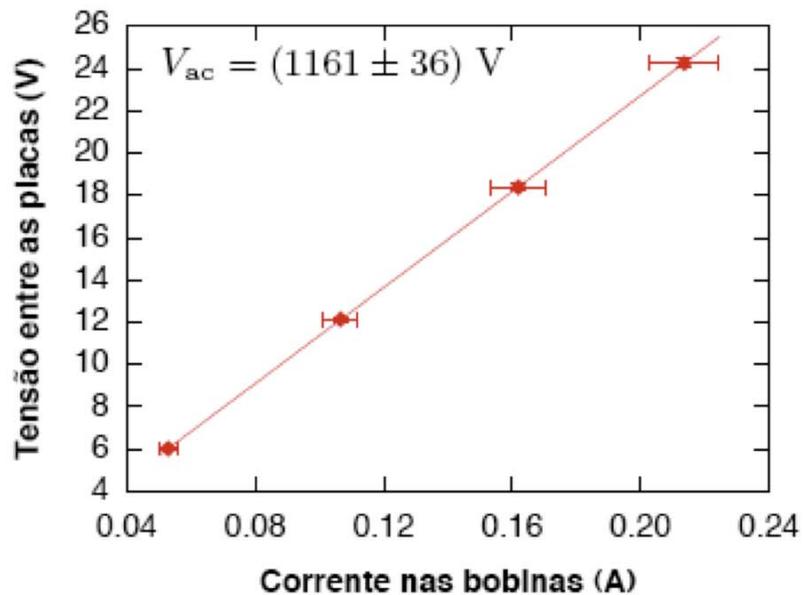
$$v_{0x} \sim 1 - 2 \times 10^7 \text{ m/s}$$

Notamos que as velocidades dos elétrons são da ordem de  $10^7$  m/s. Será que a essas velocidades podemos desprezar efeitos relativísticos? Para respondermos essa pergunta montamos a tabela abaixo.

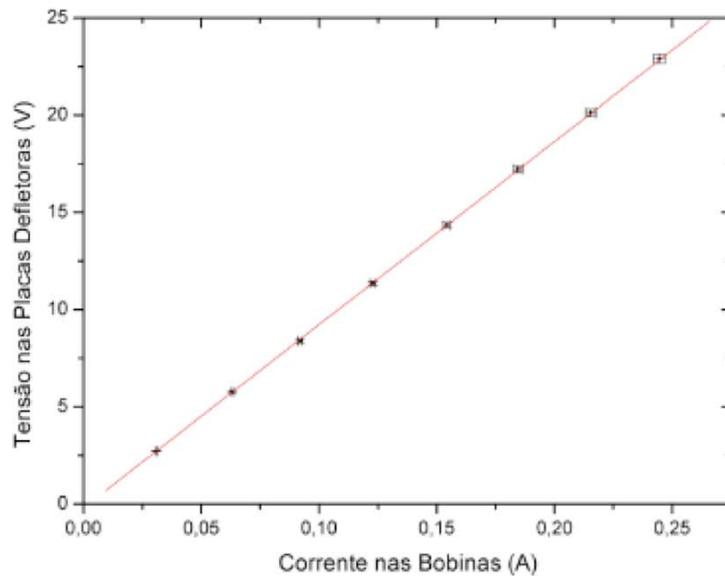
$v_{0x} (10^7 \text{ m/s})$	$v_{0x} (c)$	$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_{0x}^2}{c^2}}}$
$1,85 \pm 0,03$	$0,062 \pm 0,001$	$1,0019 \pm 0,0001$
$1,68 \pm 0,04$	$0,056 \pm 0,001$	$1,0016 \pm 0,0001$
$1,46 \pm 0,04$	$0,048 \pm 0,001$	$1,0012 \pm 0,0001$
$1,19 \pm 0,05$	$0,039 \pm 0,002$	$1,0008 \pm 0,0001$

Veja que o fator  $\gamma$  que aparece nas transformações de Lorentz é muito próximo de 1. Então para as velocidades com que estamos trabalhando podemos desprezar efeitos relativísticos.

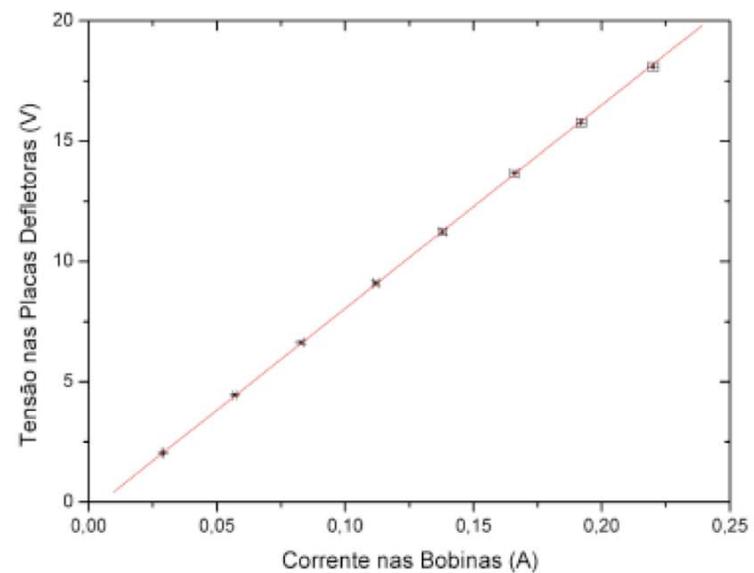
# Resultados



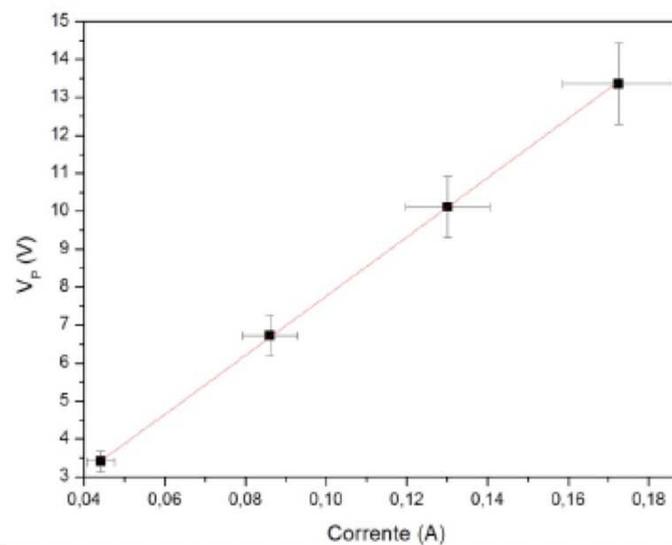
# Resultados



(a)  $V_{ac} = (830 \pm 20)V$



(b)  $V_{ac} = (700 \pm 20)V$



# Resultados

Relação  $V_P \times i$  para diferentes valores de  $V_{AC}$

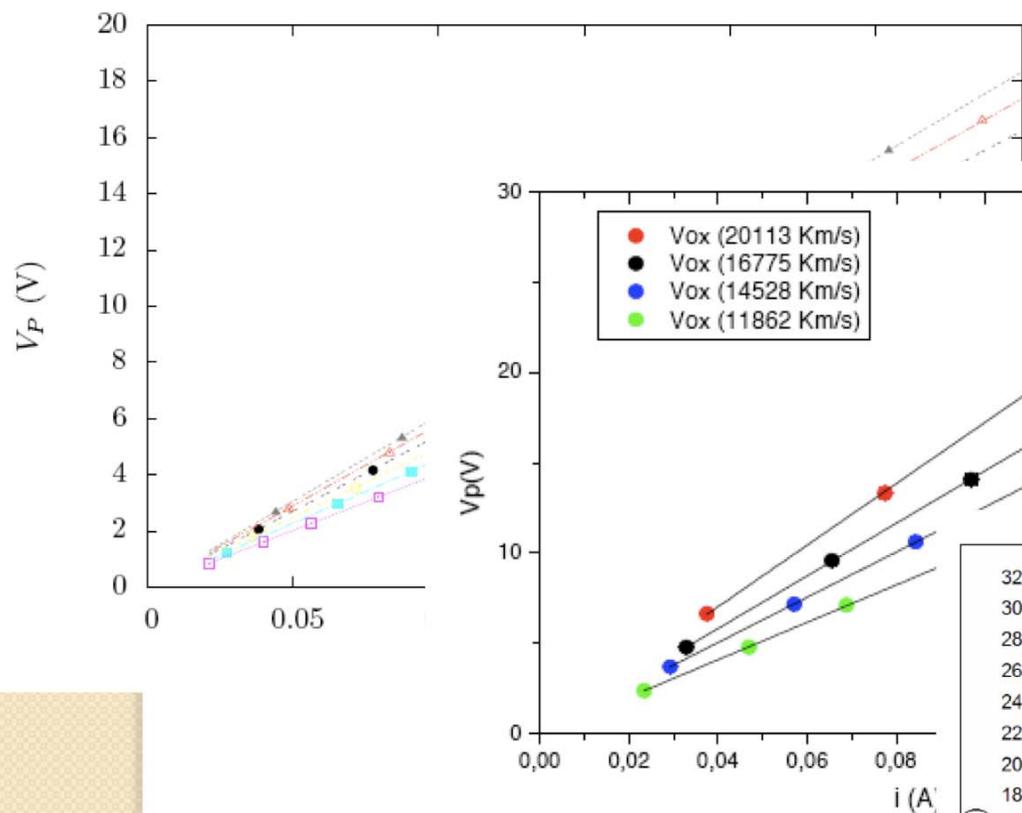
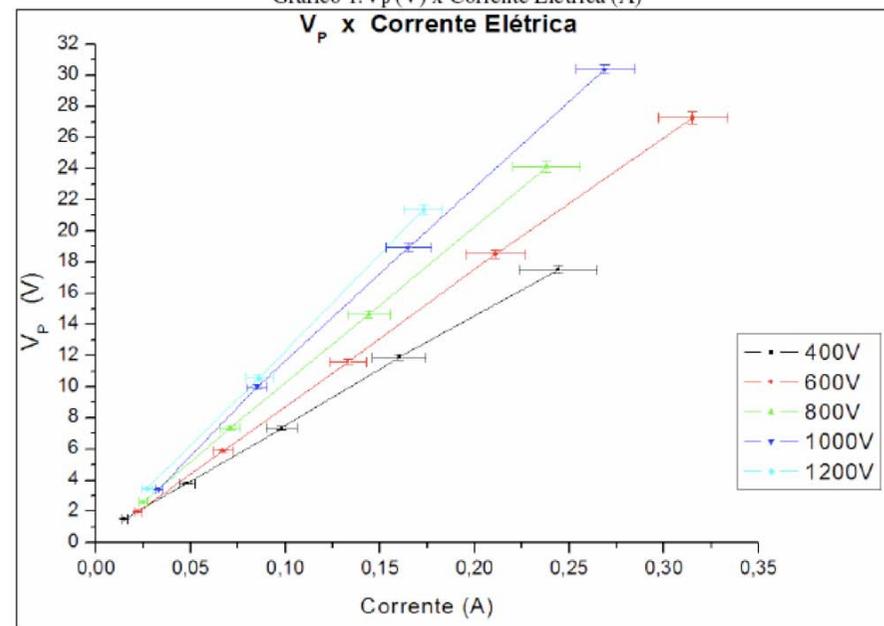


Gráfico 1:  $V_P$  (V) x Corrente Elétrica (A)  
 $V_P$  x Corrente Elétrica



# Resultados

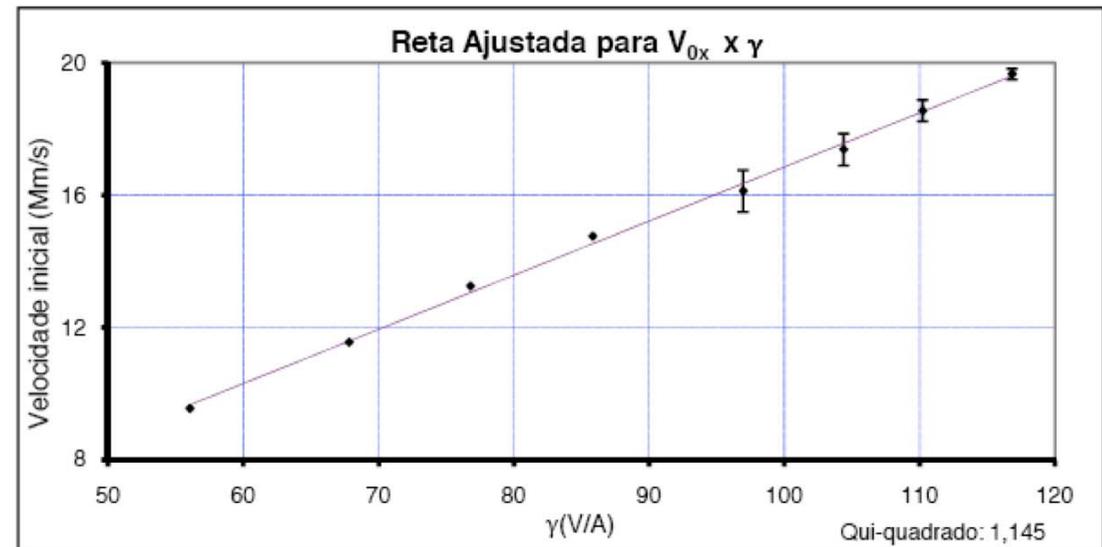
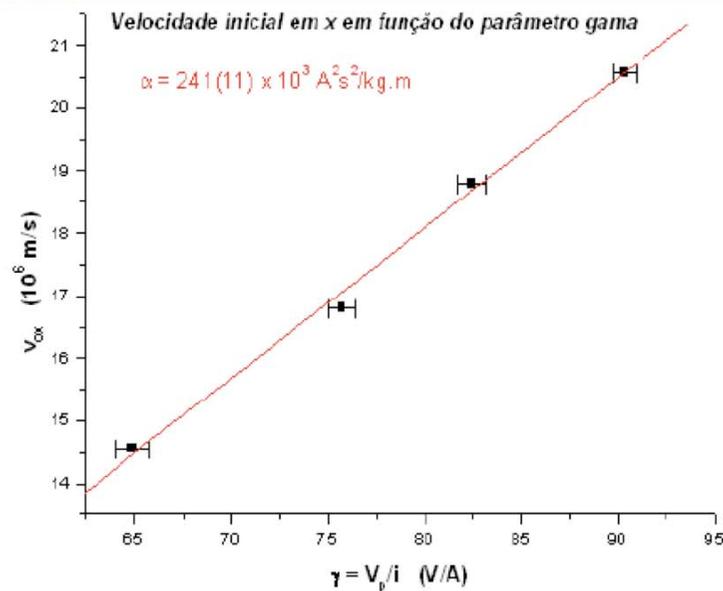
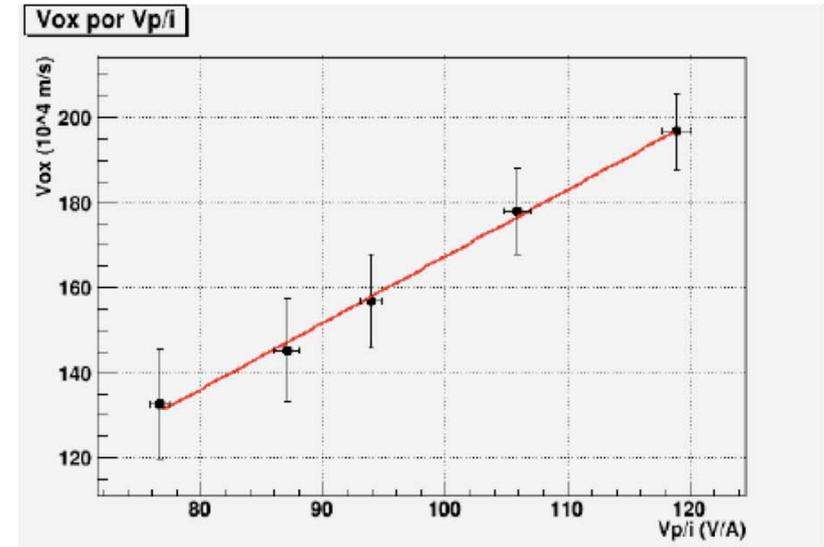
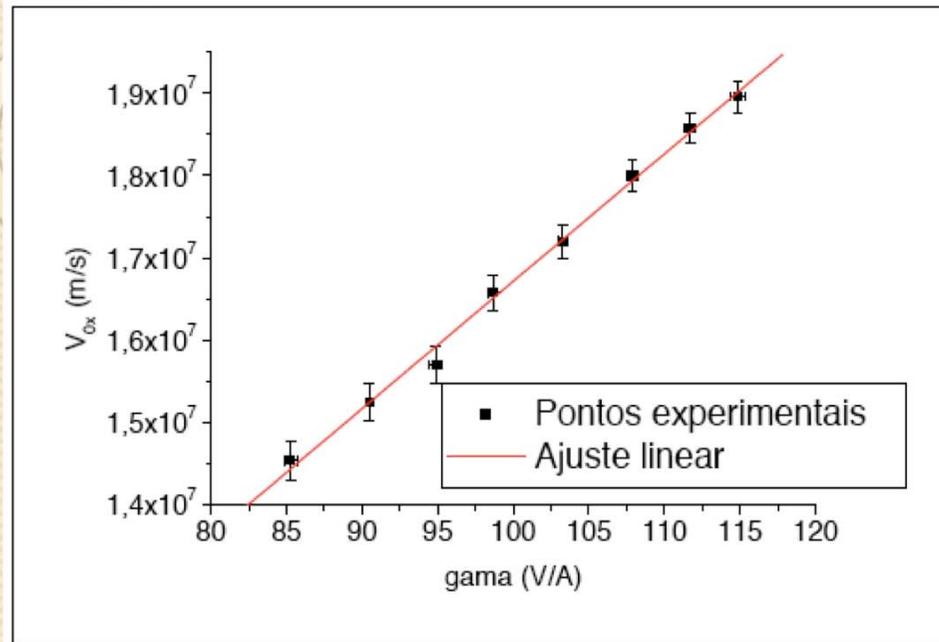


Gráfico 9 – Retra ajustada para a equação 01 com os dados da tabela 02.

# Resultados obtidos

$k$	$\alpha \times 10^3 \text{ (AmV}^{-1}\text{s}^{-1}\text{)}$	$d \text{ (mm)}$
0,52	$154 \pm 4$	$5,1 \pm 0,1$
0,42	$159 \pm 6$	$4,8 \pm 0,4$
0,55	$186 \pm 30$	$4,4 \pm 0,7$
0,62	$188 \pm 9$	$3,6 \pm 0,3$
0,5	$241 \pm 11$	$3,2 \pm 0,1$
0,49	$164 \pm 7$	$5,0 \pm 0,2$
0,60	$264 \pm 28$	$3,1 \pm 0,3$
	$172 \pm 3$	$4,4 \pm 0,1$
0,23	$15,6 \pm 3,2$	$0,6 \pm 0,2$
0,42	$160 \pm 20$	$5,2 \pm 0,2$
0,48	$123 \pm 9$	$3,9 \pm 0,3$
0,75	$284 \pm 3$	$2,9 \pm 0,3$
0,62	$159 \pm 7$	$3,9 \pm 0,4$

Neste experimento, vimos que a aproximação do campo elétrico e do campo magnético para campos uniforme é razoável. Encontramos  $K = 0,494(16)$ , quando esperávamos  $K \sim 1$ , para uma boa aproximação.

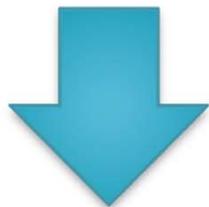
Como consequência dessa pequena diferença entre os valores obtido e esperado de  $K$ , obtivemos uma diferença entre os valores obtidos para a distância das placas.

# Vamos rever alguns resultados

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

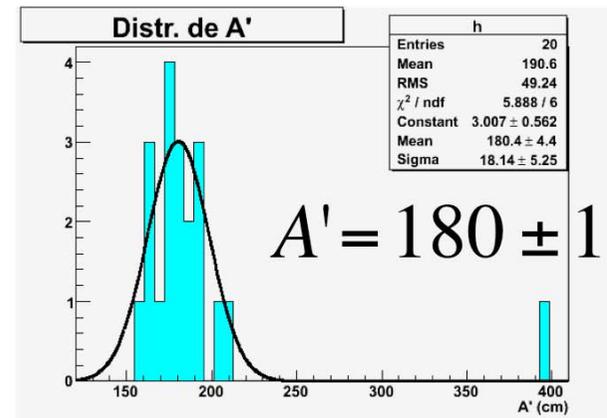


$$k = \frac{2L_P}{L_B L} \left( \frac{L_P}{2} + D_{PS} \right) \sim 1$$



$$\alpha = \frac{1}{\beta d} \text{ se } k \sim 1$$

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



$$A' = 180 \pm 18 \text{ cm}$$

$$H = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{q}{2m}} L_B L \beta \frac{i}{\sqrt{V_{AC}}} = C \frac{i}{\sqrt{V_{AC}}}$$

$$C = 525 \pm 30 \text{ cmV}^{1/2} \text{ A}^{-1}$$

## Vamos rever alguns resultados

$$h = H \quad \Rightarrow \quad A' \frac{V_P}{V_{AC}} = C \frac{i}{\sqrt{V_{AC}}} \quad \Rightarrow \quad \frac{A'}{C} \frac{V_P}{i} = \sqrt{V_{AC}}$$

$$\frac{1}{2} m v_{0x}^2 = q V_{AC} \quad \Rightarrow \quad \sqrt{V_{AC}} = \sqrt{\frac{m}{2q}} v_{0x}$$

$$v_{0x} = \sqrt{\frac{2q}{m} \frac{A'}{C} \frac{V_P}{i}} \quad \Rightarrow \quad \alpha = \sqrt{\frac{2q}{m} \frac{A'}{C}}$$

$$A' = 180 \pm 18 \text{ cm}$$

$$C = 525 \pm 30 \text{ cmV}^{1/2} \text{A}^{-1}$$

$$\Rightarrow \alpha = 203 \pm 23 \text{ AmV}^{-1} \text{s}^{-1}$$

# Resultados obtidos

$k$	$\alpha \times 10^3 (AmV^{-1}s^{-1})$	$d (mm)$
0,52	$154 \pm 4$	$5,1 \pm 0,1$
0,42	$159 \pm 6$	$4,8 \pm 0,4$
0,55	$186 \pm 30$	$4,4 \pm 0,7$
0,62	$188 \pm 9$	$3,6 \pm 0,3$

Para responder esta pergunta no relatório! Dica: Está relacionado com as escolhas que fizemos durante a experiência para definir os comprimentos efetivos. Responder esta questão significa um entendimento amplo do que foi feito até aqui.

0,42	$160 \pm 20$	$5,2 \pm 0,2$
0,48	$123 \pm 9$	$3,9 \pm 0,3$
0,75	$284 \pm 3$	$2,9 \pm 0,3$
0,62	$159 \pm 7$	$3,9 \pm 0,4$

$$\alpha_{\text{médio}} = 188 \text{ AmV}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$\alpha = 203 \pm 23 \text{ AmV}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

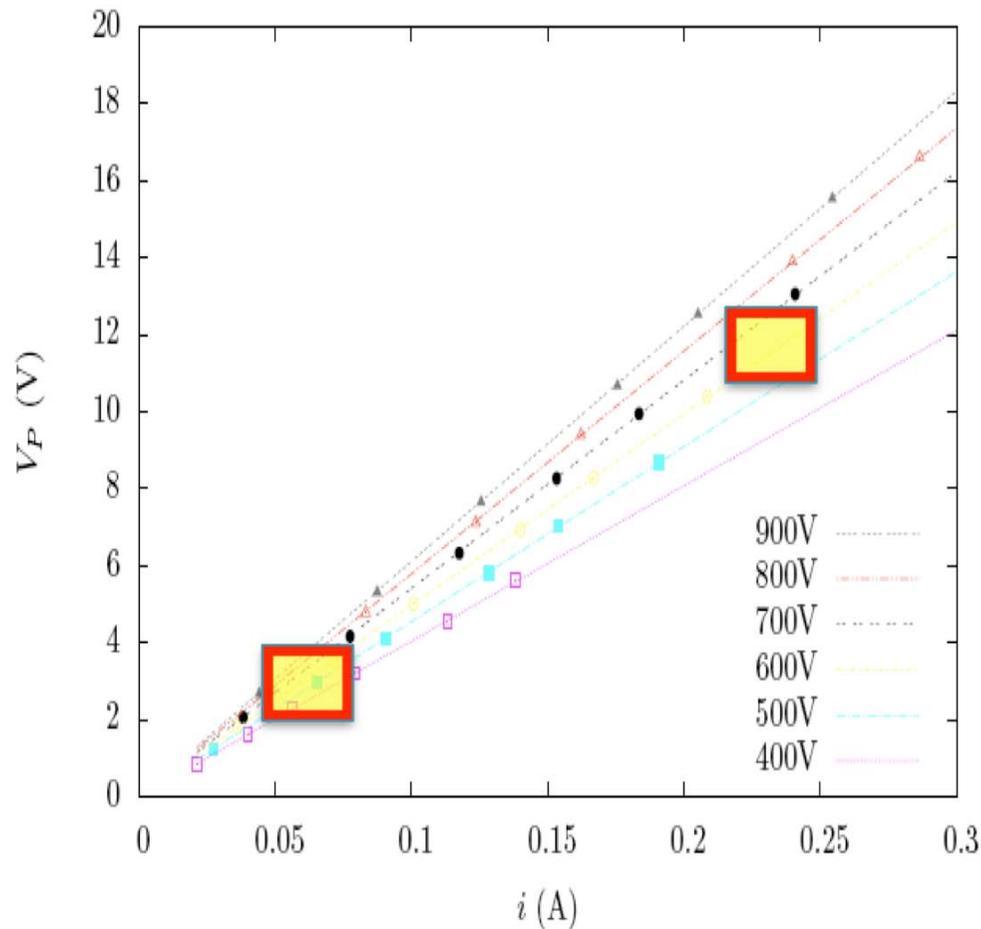
Os resultados são consistentes? Porque  $k$  é sistematicamente  $< 1$ ?

# Metodologia a ser 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 a geração das partículas (elétrons) e como elas se movimentam no campo elétrico estudado na aula anterior? QField
  - **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. Qfield.
  - **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.

# Da aula passada:

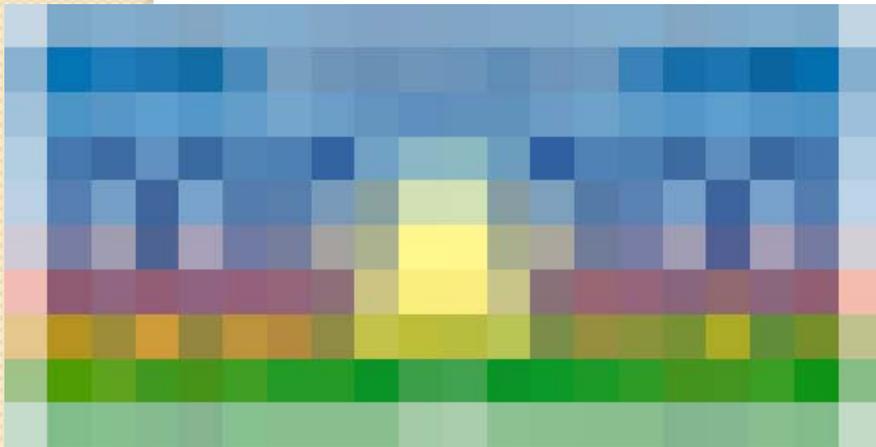
Relação  $V_P \times i$  para diferentes valores de  $V_{AC}$



- Qualquer par  $(i, V_P)$  ao longo de uma daquelas linhas seleciona a mesma velocidade de filtro ( $V_P/i = \text{constante}$ )
- Todos os pares  $(i, V_P)$  para uma mesma velocidade propiciam resultados iguais? Nada muda?
- Para um par  $(i, V_P)$  “pequeno”, as incertezas envolvidas tornam impossível distinguir velocidades muito próximas
- Para um par  $(i, V_P)$  “grande” a precisão na definição da velocidade de filtro é maior.
- Conceito de RESOLUÇÃO de uma medida

# Resolução:

- Resolução de uma grandeza quantifica a capacidade de separar valores muito próximos desta grandeza



- Baixa resolução: a informação contém pouco poder de separação
- Uma das formas de quantificar a resolução é dada pela relação entre o intervalo mínimo possível de ser medido de uma grandeza em relação ao valor da grandeza



- Alta resolução: conseguimos distinguir detalhes

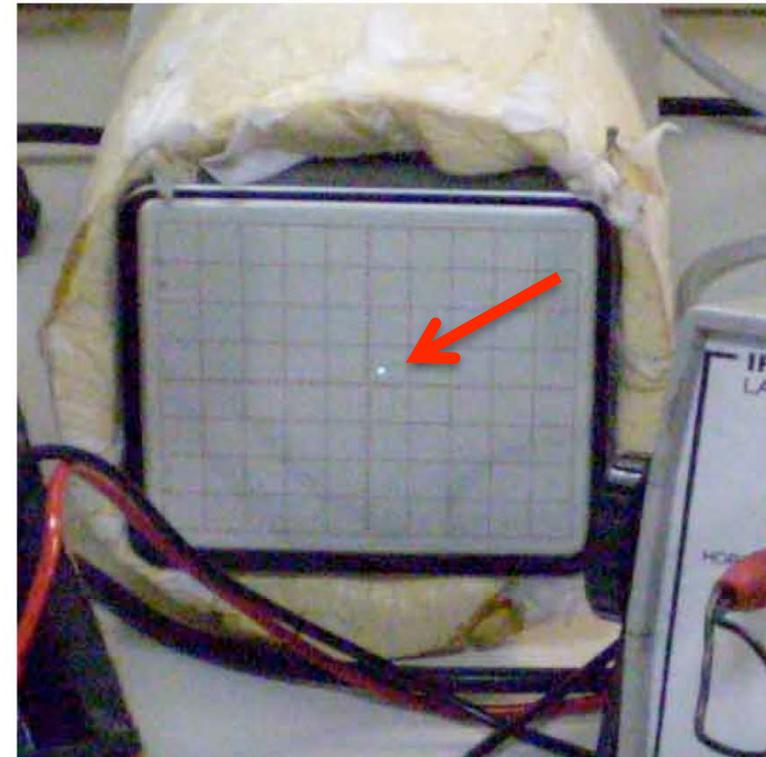
$$R(x) = \frac{\delta x}{x}$$

# Resolução:

- A definição de resolução depende da medida efetuada:
  - Resolução de uma tela de computador é dada pelo número total de pixels em cada dimensão. Ex: resolução 1280 x 1024
  - Resolução de uma máquina fotográfica. Ex: 10 Mpixels
  - Resolução temporal de um relógio é dada pelo menor intervalo de tempo que podemos distinguir. Ex: 0,01 s de resolução
  - Resolução de cor em um computador é dada pelo número de cores possíveis de serem reproduzidas. Ex: 16 bilhões de cores de resolução
  - Resolução de um filme fotográfico analógico. Ex: 1000 linhas/mm
  - Resolução de uma lente fotográfica. Ex:  $R \sim 2.24 \lambda/D$

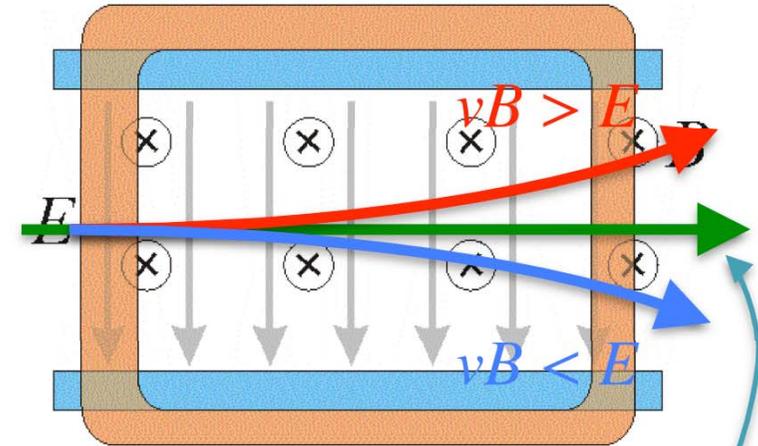
# Resolução:

- No nosso seletor de velocidades temos uma limitação na determinação do ponto na tela do TRC
  - Tamanho do ponto (foco)
  - Leitura da escala e posição do ponto
- Isto afeta a nossa habilidade em separar velocidades muito próximas
  - Quão diferentes duas velocidades podem ser, porém sendo possível distingui-las?
  - Resolução do seletor na velocidade selecionada
- Do que depende esta resolução?
  - Além dos fatores geométricos de construção, será que depende das condições de operação do seletor, como tensão entre as placas e corrente nas bobinas?

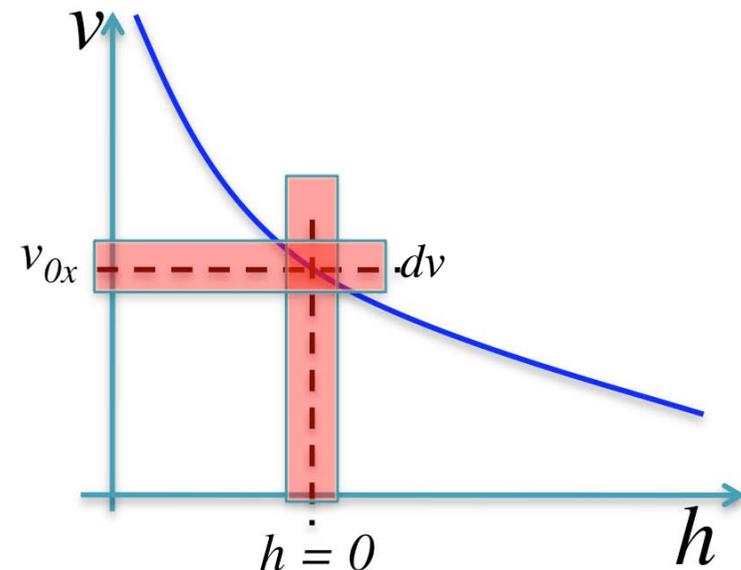


# Resolução:

- Para uma dada razão  $V_p/i$  somente uma velocidade não sofrerá desvio no seletor
  - Velocidade de filtro
- Para velocidades diferentes, ocorrerá desvios, que podem ser positivos ou negativos
- Ajustando o seletor para uma certa velocidade de filtro, ou seja, escolhendo  $V_p/i$ , podemos fazer um estudo do deslocamento em função da velocidade de uma partícula
- Sabendo qual a precisão com que conseguimos determinar  $h = 0$  podemos determinar a precisão ( $dv$ ) na qual conseguimos medir a velocidade de filtro e obter a resolução do seletor para o par  $(i, V_p)$  escolhido
  - $R = dv/v_{0x}$



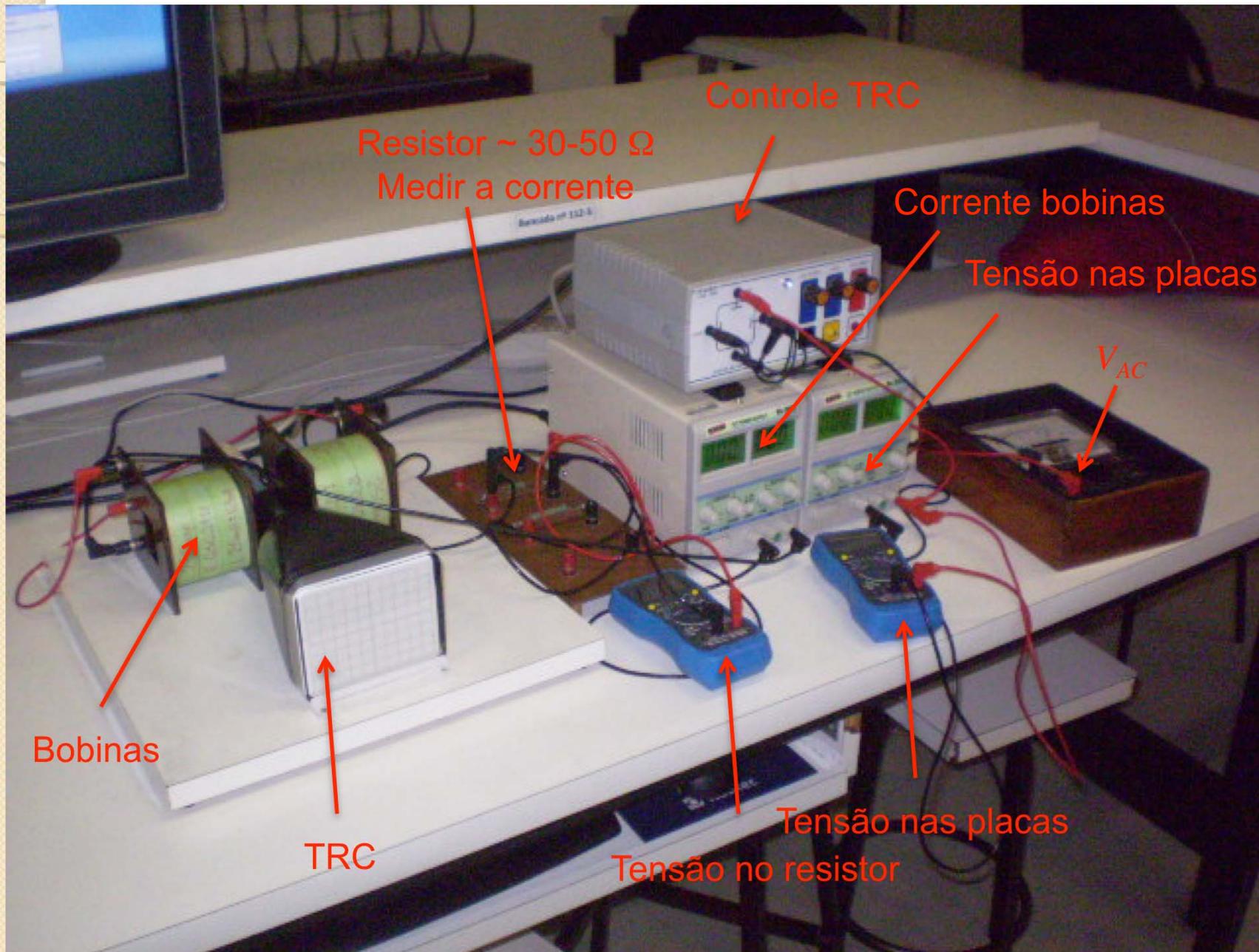
$$v_{0x} = \frac{E}{B} = \alpha \frac{V_p}{i}$$



## Objetivos da semana

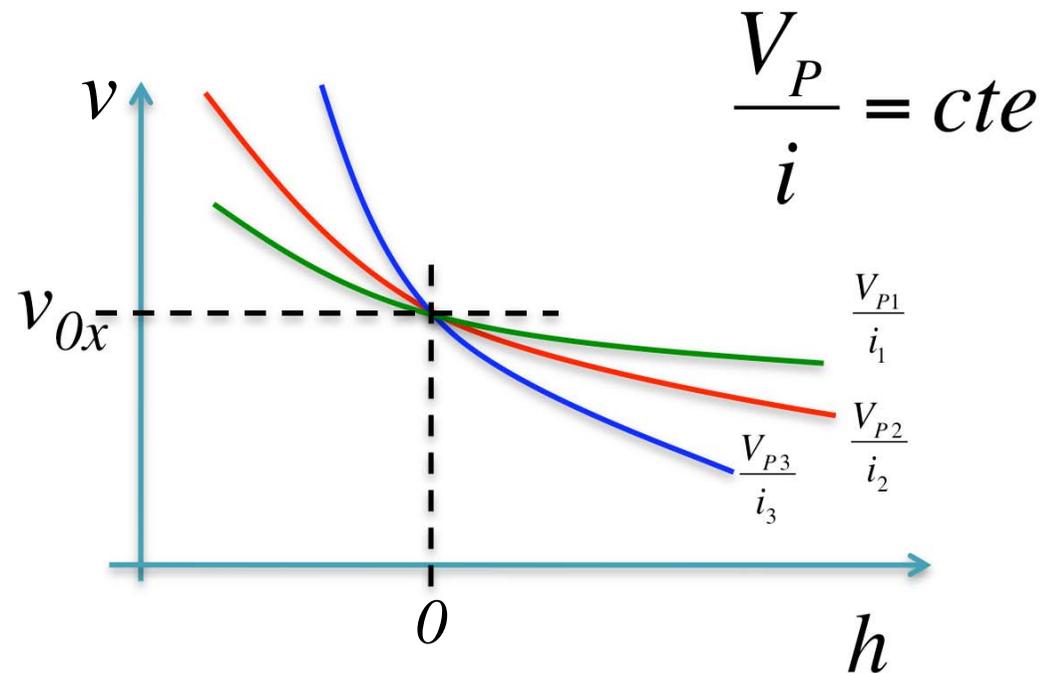
- Estudar o efeito da tensão nas placas e da corrente nas bobinas na capacidade do seletor de separar velocidades muito próximas.
  - Estudar a resolução do seletor
  
- Método:
  - Fazer gráficos de velocidade em função do deslocamento provocado pelo seletor mantendo a velocidade de filtro (aquela que não desvia) constante.
    - Variando apenas a combinação de  $V_p$  e  $i$  mas mantendo a razão entre eles fixa.

# O Seletor de velocidades



# Como obter a resolução do seletor?

- Precisamos fazer o gráfico



- Como obter cada ponto do gráfico de forma precisa?
- Como obter a resolução deste gráfico?

## Procedimento

1. Escolha uma tensão de aceleração ( $V_{AC}$ ) entre 700 e 800 V e obtenha  $v_{0x}$ . Vamos estudar como a resolução depende das condições do seletor para esta velocidade.
2. Obtenha a razão  $V_p/i$  para esta velocidade
  1. Ajuste a corrente ( $i$ ) para que o deslocamento devido ao campo magnético seja  $4\text{ cm}$ . Meça  $i$ .
  2. Ajuste a tensão entre as placas para compensar este deslocamento e voltar a partícula para a origem. Meça  $V_p$ .
  3. Determine  $V_p/i$  para esta velocidade. Compare com a previsão obtida com os dados da semana anterior
3. Escolha pelo menos três combinações de  $V_p$  e  $i$  que dêem a mesma razão  $V_p/i$  obtida anteriormente. Para cada par  $(i, V_p)$  fazer:
  1. O gráfico de deslocamento em função da velocidade (variar a velocidade)
4. Superpor os gráficos obtidos em (3) e calcular a resolução do seletor para cada par  $(i, V_p)$ 
  1.  $R = dv/v$  para a  $v =$  velocidade de filtro (aquela na qual  $h = 0$ )

## Atividades da semana

- Obter o gráfico de velocidade em função do deslocamento para pelo menos três combinações de  $(i, V_P)$  que selecionem a mesma velocidade de filtro.
- Comparar os três gráficos
  - A velocidade de filtro experimental é a mesma para todas as combinações escolhidas?
  - Qual seria a velocidade máxima e mínima possíveis de serem observadas com o seletor para cada combinação?
  - Discuta os resultados
- Obter a resolução em velocidade do seletor para as várias combinações medidas
  - $R = dv/v$  para velocidade de filtro.
    - Como obteve  $dv$  do gráfico?
  - Discuta os resultados obtidos

## Próxima semana

- Não há aula semana que vem.
  - Próxima semana o Laboratório ficará disponível de quarta a sexta-feira para os grupos que precisarem retomar dados, melhorar medidas, etc.
- A síntese desta semana, contudo, continua tendo como prazo a próxima semana.
  - Devolverei por email para que vocês possam trabalhar no relatório ou refazer medidas, se necessário
- Relatório para 10 de novembro
  - Vou discutir os últimos dados e detalhes do relatório na próxima aula (3/11)
  - 5 sínteses A (de um total de 7) tornam o relatório opcional
    - Podem refazer uma síntese para entregar até dia 3/11