



Universidade de São Paulo
Instituto de Física
4323202 Física Experimental B
Guia de trabalho

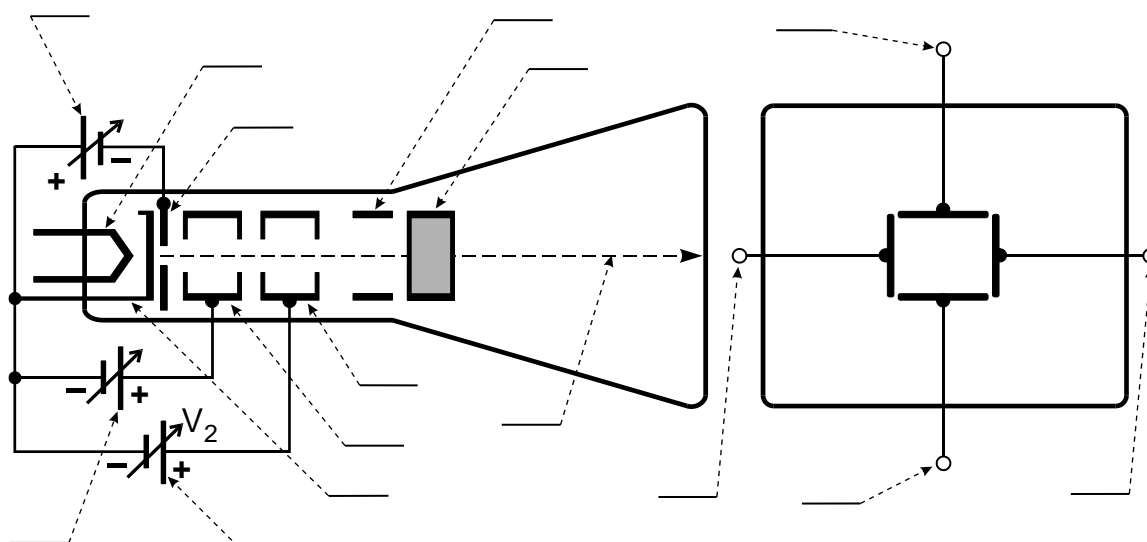
NOTA
PROFESSOR

Equipe

- 1) No. USP Turma:
 2) No. USP Data:
 3) No. USP Mesa nº:

Tubo de Raios Catódicos e medida da razão carga/massa do elétron
Esse guia de trabalho deve ser usado juntamente com o Guia de Estudos

1) ELEMENTOS DO TUBO DE RAIOS CATÓDICOS (TRC)



Identifique, pelas iniciais abaixo, componentes, controles e terminais indicados pelas linhas pontilhadas.

Componentes do TRC		Controle de...	Terminal para...
F filamento	DV placas de deflexão vertical	I intensidade	DV deflexão vertical
K catodo	DH placas de deflexão horizontal	FO foco	DH deflexão horizontal
A1 anodo 1	EL feixe de elétrons	A tensão de aceleração	
A2 anodo 2	GC grade de controle		

O controle de intensidade do feixe é realizado por uma grade metálica muito fina colocada logo após o filamento e o catodo. Esse arranjo visa repelir de forma controlada os elétrons emitidos pelo catodo.

Q1. Qual a polaridade da tensão de grade, relativa ao catodo?

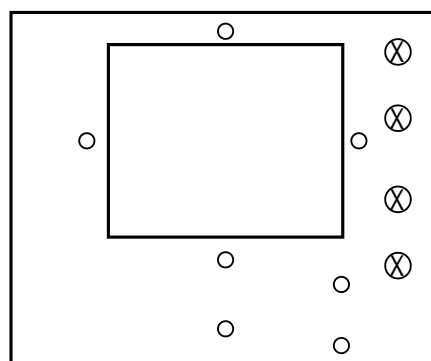
Q2. O anodo gera o campo elétrico que acelera os elétrons em direção à tela. Qual a polaridade do anodo relativo ao catodo?_____

2) PAINEL DO TRC DIDÁTICO

O TRC didático foi criado para você controlar e medir as tensões de aceleração, de deflexão, foco e intensidade.

Identifique no painel ao lado pelas iniciais:

Terminal	Controle
DV deflexão vertical	I intensidade
DH deflexão horizontal	FO foco
DC fonte DC	R regulagem da fonte DC
AC fonte AC	A tensão de aceleração
T terra	

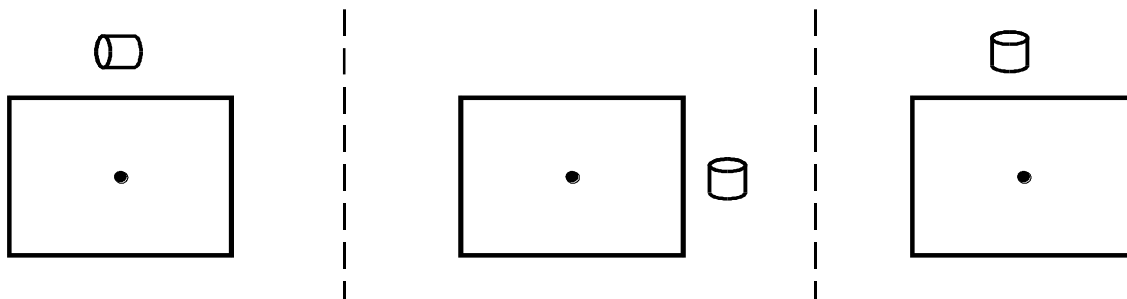


3) OPERANDO O TRC

- Antes de ligar o TRC coloque o potenciômetro da tensão de aceleração no mínimo, totalmente virado no sentido anti-horário.
- Conecte os terminais DV e os terminais DH no terminal terra. Desta forma, todas as placas estarão no mesmo potencial de terra e o feixe eletrônico deverá aparecer no centro da tela, como um ponto luminoso.
- Ligue o TRC e ajuste a tensão de aceleração V_2 para 800 V. Os terminais para medir a tensão de aceleração estão localizados no painel traseiro do aparelho e um voltímetro deve estar já conectado para a leitura da mesma. Para proteger o voltímetro, um divisor de tensão ($\div 10$) foi colocado nos fios de ligação. Assim, a leitura do voltímetro corresponde a 10% da tensão aplicada, ou a tensão medida é 10x a tensão indicada no voltímetro.
- Ajuste a intensidade e o foco do feixe eletrônico de forma a minimizar o ponto luminoso, porém, suficiente para que este ponto seja observado confortavelmente. Um ponto luminoso muito forte poderá queimar o material luminescente da tela, principalmente se ele permanecer imóvel por muito tempo.
- O campo magnético da Terra pode desviar o feixe de elétrons e deslocar o ponto luminoso do centro da tela. Para corrigir esse efeito utilize um ímã para centralizar o feixe na tela, fixando-o no painel traseiro com fita crepe, numa posição que deve ser encontrada por tentativa. Cuidado para não esbarrar no terminal da tensão de aceleração existente neste painel, bem como na sua fiação para não levar choque elétrico.

4) INTERAÇÃO DO FEIXE ELETRÔNICO COM O CAMPO MAGNÉTICO DE UM ÍMÃ

Utilize um ímã numerado e coloque-o conforme indicado nas figuras:



- 4.1. Indique com um X a face colorida do ímã em cada posição
- 4.2. Indique com uma seta (\rightarrow) o sentido de deslocamento do ponto luminoso.
- 4.3. Faça o diagrama vetorial (\vec{F} , \vec{v} , \vec{B}) para cada caso. Lembre-se que $\vec{F}_B = q(\vec{v} \times \vec{B})$

--	--	--

Com o diagrama vetorial e lembrando que por convenção o campo magnético sai do polo Norte e entra no polo Sul do ímã, qual é o polo da face colorida do ímã?

No. do ímã _____ Polaridade do polo colorido: _____

5) MEDIDA DA SENSIBILIDADE DO TRC (DEFLEXÃO VERTICAL)

A deflexão H do ponto luminoso em função da tensão V aplicada numa das placas de deflexão é dada por:

$$H = \left(\frac{L\ell}{2dV_2} \right) V$$

Onde L é a distância da placa à tela (onde ocorre o movimento MU dos elétrons) ℓ é o comprimento da placa defletora, d a distância entre as placas e V_2 a tensão de anodo. O coeficiente H/V é a sensibilidade do TRC.

- 5.1. Desaterre a placa DV superior e ligue-a, através de um cabo, ao terminal da fonte DC (veja item 2). Verifique que o ponto luminoso percorre verticalmente na tela quando o potenciômetro da fonte DC é acionado. Complete a Tabela 1.
- 5.2. Varie o valor da tensão de deflexão VD (use um multímetro extra para medir essa tensão) em função do deslocamento do ponto luminoso H em relação ao centro da tela e complete a tabela 1.

Tabela 1. Deflexão H em função da tensão de deflexão vertical. Veja com expressar a incerteza das medidas com o multímetro no site da disciplina

medida	VD (V)	(H±0,1) cm
1		-4,0
2		-3,0
3		-2,0
4		-1,0
5		0,0
6		1,0
7		2,0
8		3,0
9		4,0

Q3. Porque o ponto luminoso subiu quando a tensão VD foi positiva e desceu quando a tensão foi negativa? _____

5.3. Comparando a sensibilidade experimental com a sensibilidade nominal.

Complete a Tabela 2. Lembramos que na multiplicação ou divisão propagam-se as incertezas

relativas: $\left(\frac{\sigma_S}{S}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\ell}{\ell}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{V_2}}{V_2}\right)^2$ e podemos desprezar qualquer **fração** cujo valor é menor que 1/3 do maior valor (antes da quadratura).

Tabela 2. Dimensões e tensões no TRC

<http://portal.if.usp.br/labdid/sites/portal.if.usp.br/labdid/files/oscdidatico.pdf>

	grandeza	valor	incerteza	unidade
Tensão de aceleração	$V_2 =$		\pm	V
Comprimento da placa de deflexão	$\ell =$		\pm	
Distância entre as placas de deflexão	$d =$		\pm	
Distância da placa à tela	$L =$		\pm	
Sensibilidade nominal do TRC	$S = \frac{L\ell}{2dV_2}$		\pm	

5.4. Usando o programa Origin, faça um gráfico de $Y=H(\text{cm})$ em função de $X=VD(\text{V})$. Ajuste uma reta e calcule a sensibilidade experimental do TRC, dada pelo coeficiente angular da reta. **Imprima e anexe o gráfico ao relatório.** Complete a Tabela 3.

Tabela 3. Sensibilidade experimental do TRC e comparação com o valor nominal.

Sensibilidade experimental do TRC	S_{exp}	\pm	
Desvio relativo percentual	$\frac{ S_{\text{exp}} - S_{\text{nom}} }{S_{\text{nom}}} \times 100$		

Compare a diferença $|S_{\text{exp}} - S_{\text{nom}}| =$ _____

Com a soma das incertezas $\sqrt{(\sigma_{S_{\text{exp}}})^2 + (\sigma_{S_{\text{nom}}})^2} =$ _____

Q4. A diferença entre a sensibilidade nominal e a experimental pode ser explicada pela incerteza propagada? Justifique: _____

Q5. Se aumentar a tensão de aceleração V_2 , a sensibilidade aumenta ou diminui? Porque?

6) DETERMINAÇÃO DA RAZÃO carga massa (e/m) DO ELÉTRON

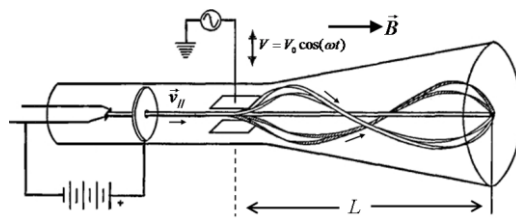
O movimento de cargas elétricas numa região com uma combinação de campos elétricos e magnéticos permite obter a razão carga/massa dessa carga, no nosso caso elétrons. Para uma medida precisa precisamos de uma região que envolva o TRC, um campo magnético homogêneo e cuja determinação seja relativamente fácil. Um solenoide longo que envolva o TRC satisfaz as condições necessárias. Complete a Tabela 4.

Tabela 4. Dimensões e grandezas do solenoide

	grandeza	valor	incerteza	unidade
Número total de espiras do solenoide	$N =$		\pm	
Comprimento do solenoide	$C =$		\pm	
Diâmetro do solenoide	$D =$		\pm	

O campo magnético no interior de um solenoide finito com comprimento C e diâmetro D é dado por $|\vec{B}| = \frac{\mu_0 N I}{\sqrt{C^2 + D^2}}$, onde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} = 1,2566 \times 10^{-6} \text{ NA}^{-2}$.

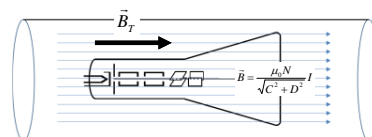
Vimos que alimentando as placas do TRC com uma tensão senoidal, o movimento dos elétrons no TRC inserido no solenoide é helicoidal. O passo da hélice, entre outros parâmetros, depende do campo do solenoide. Quando o passo for igual ao comprimento L entre as placas de deflexão é a tela o traço se reduz a um ponto.



Efeito do campo Magnético da Terra

O campo magnético da Terra interfere nas medidas e deve ser considerado. Uma das formas de compensar essa interferência é realizar duas medidas, uma com o campo do solenoide alinhado com o campo terrestre e outra contrária. A média dessas medidas elimina a interferência do campo magnético terrestre externo:

Quando o campo do solenoide \vec{B}_s e o da Terra \vec{B}_T estão alinhados, a soma, $B_{s//} + B_T$ é que satisfaz o passo da hélice ser igual ao comprimento L :

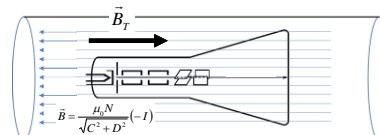


$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 V_2}{(B_{s//} + B_T)^2 L^2} \quad (6.1) = (\text{GE: 4.5})$$

Assim, no caso de campos paralelos:

$$B_{s//} + B_T = \sqrt{\frac{m}{e} \frac{8\pi^2 V_2}{L^2}} \quad (6.2)$$

Invertendo B_T , os campos são opostos e $B_{s\times}$ precisa ser um pouco maior para compensar o campo da Terra.



$$-B_{s\times} + B_T = -\sqrt{\frac{m}{e} \frac{8\pi^2 V_2}{L^2}} \quad (6.3)$$

Somando (6.2) e (6.3) calculamos um campo médio do solenoide e eliminamos o campo da Terra:

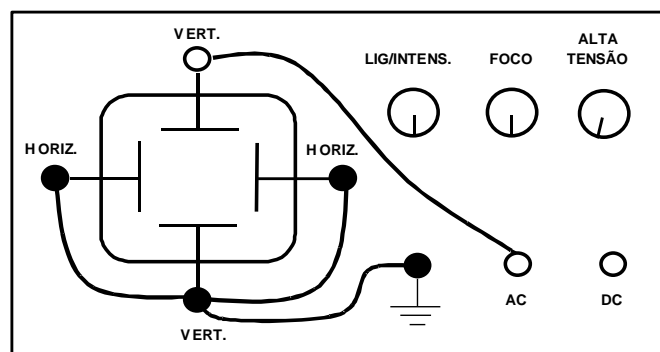
$$\frac{B_{s//} + B_{s\times}}{2} = \langle B \rangle = \sqrt{\frac{m}{e} \frac{8\pi^2 V_2}{L^2}} \quad \text{ou} \quad \frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 V_2}{\langle B \rangle^2 L^2} \quad (6.4).$$

usar a média dos campos equivale usar a média das correntes, pois o campo no solenoide e a corrente são diretamente proporcionais:

$$\langle B \rangle = \frac{(B_{s//} + B_{s\times})}{2} = \frac{\mu_0 N}{\sqrt{C^2 + D^2}} \frac{(I_{//} + I_{\times})}{2} \quad (6.5).$$

O TRC inserido no solenoide é igual ao TRC usado anteriormente. A única diferença é que a eletrônica de controle está numa montagem separada.

- 6.1. Alinhe o solenoide com o campo magnético da Terra. Coloque o TRC no centro do solenoide onde o campo magnético é mais uniforme.



- 6.2. Conecte a placa VERT superior na fonte AC como na figura acima. Isso deverá alimentar a placa de deflexão vertical com um sinal senoidal em 60Hz e formar uma traço vertical na tela do TRC.

- 6.3. Ligue a fonte do TRC. Ajuste a tensão de aceleração V_2 abaixo de 1000 V. Ajuste o foco e a intensidade que permitam visualizar com clareza um segmento de reta na tela. Anote o valor de V_2 . Lembre que o voltímetro mede $V_2/10$

$V_2 = \text{_____} \pm \text{_____} \text{ V}$

A corrente para o solenoide será fornecida por uma fonte DC externa. Ligue a fonte, coloque os controles de tensão em zero (anti-horário) e os controles de corrente no máximo (totalmente no sentido horário). Aumente lentamente a tensão e conseqüentemente a corrente I no solenoide, observando a tela do TRC. O traço deve rodar e diminuir seu comprimento, até que, ao rodar 180° se torne um ponto ou eventualmente um mínimo. Anote a corrente que minimizou o traço na tela. Complete a Tabela 5. *Faça dois conjuntos com 3 medidas: 1) Partindo de zero, meça três vezes a corrente que reduz o traço ao mínimo; 2) Zere a fonte, desligue-a e inverta as ligações, o que criará um campo invertido no solenoide. Repita a medida com o campo invertido e complete a coluna correspondente na Tabela 5. Note que $I_x > I_y$.*

Tabela 5. Correntes que igualam o passo helicoidal à distância placa-tela no TRC. Note que $I_X > I_{//}$.

	Campos paralelos $I_{//}$ (A)	Campos anti-paralelos I_X (A)
1		
2		
3		
Corrente média I_m		
Desvio padrão combinado da média: $s_c = \sqrt{0,01^2 + s_m^2}$		
Para calcular o desvio padrão combinado usamos $\sigma_{instr} = 0,01$ A, e $s_m = s / \sqrt{N} = s / \sqrt{3}$ onde s é o desvio padrão das 3 medidas.		

6.5 Determinação de e/m. Complete a Tabela 6.

Tabela 6. Determinação de e/m do elétron. Recomendamos usar uma planilha para as contas.

	Grandeza (ou formula)	valor	incerteza	unidade
$\frac{(I_{//} + I_{\times})}{2} \pm s$	I		\pm	
Campo magnético médio no solenoide (GE Eq.4-8)	$ B = \frac{\mu_0 NI}{\sqrt{C^2 + D^2}}$		\pm	
Razão carga/massa (GE Eq. 4.5)	$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 V_2}{B^2 L^2}$		\pm	
Valor nominal	e/m	$-1,758820024(11) \times 10^{11}$		C/kg
Desvio relativo percentual	$\left \frac{\left(\frac{e}{m}\right)_{exp} - \left(\frac{e}{m}\right)_{nom}}{\left(\frac{e}{m}\right)_{nom}} \right \times 100$			

6.6. Determinação do campo magnético da Terra.

Subtraindo (6.3a) - (6.2), teremos: $B_{S\times} - B_{S//} - 2B_T = 0$ (6.6).

Inserindo as respectivas correntes elétricas

$$B_T = \frac{B_{S\times} - B_{S//}}{2} = \frac{\mu_0 N}{\sqrt{C^2 + D^2}} \frac{(I_{\times} - I_{//})}{2} \quad (6.7)$$

que permite determinar o campo magnético da Terra. Complete a Tabela 7.

Tabela 7. Determinação do campo magnético da Terra.

	Grandeza (ou formula)	valor	incerteza	unidade
$\frac{(I_{\times} - I_{//})}{2} \pm s$	I_T		\pm	
Campo magnético terrestre local	$B_T = \frac{\mu_0 N}{\sqrt{C^2 + D^2}} \frac{(I_{\times} - I_{//})}{2}$		\pm	
Valor nominal (IAG-USP)	B_T	$(2,35 \pm 0,02) \times 10^{-5}$		T
Desvio relativo percentual	$\frac{ B_{\text{exp}} - B_{\text{nom}} }{B_{\text{nom}}} \times 100$			

Q6. Podemos desprezar o campo magnético da Terra na determinação da razão carga/massa do elétron? Justifique

Q7. Comente sobre a conveniência do método usado para determinar o campo magnético terrestre local.



Progação de incertezas no cálculo do campo magnético de um solenoide real

$$B = \frac{\mu_0 NI}{\sqrt{C^2 + D^2}}^1$$

1) Definindo $X = \sqrt{C^2 + D^2}$ e aplicando a definição² para propagação de incertezas:

$W = W(x \pm \sigma_x, y \pm \sigma_y, z \pm \sigma_z, \dots)$ função qualquer	$\sigma_W^2 = \left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots$
--	--

$(\sigma_X)^2 = \left(\frac{\partial X}{\partial C} \sigma_C\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial D} \sigma_D\right)^2$ temos que

$$(\sigma_X)^2 = \left(\frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{C^2 + D^2}} 2C \sigma_C\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{C^2 + D^2}} 2D \sigma_D\right)^2$$

$$(\sigma_X)^2 = \frac{1}{C^2 + D^2} [(C \sigma_C)^2 + (D \sigma_D)^2] = \frac{(C \sigma_C)^2 + (D \sigma_D)^2}{X^2}. \text{ Reagrupando obtemos}$$

$$(X \sigma_X)^2 = (C \sigma_C)^2 + (D \sigma_D)^2 \text{ que faz sentido dimensional.}$$

2) A equação original se reduz a $B = \frac{\mu_0 NI}{X}$, cuja propagação de incertezas pode ser feita assim:

$W = axy$ multiplicação	$\left(\frac{\sigma_W}{W}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2$
$W = a\left(\frac{y}{x}\right)$ divisão	$\left(\frac{\sigma_W}{W}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2$

$$\left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_X}{X}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2 + \frac{(C \sigma_C)^2 + (D \sigma_D)^2}{X^4}$$

Faça as contas numa planilha. Não esqueça de finalizar $\sigma_B = B \cdot \left(\frac{\sigma_B}{B}\right)$

¹ fma.if.usp.br/~mlima/teaching/4323203_2018/Ape7.pdf

² <https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=2350723>