



4310291
Eletromagnetismo
para Geociências

Experiência 1
Força elétrica sobre um feixe de elétrons

1^o semestre de 2010

1. Força elétrica sobre um feixe de elétrons

Objetivos:

- Estudar o movimento de um elétron na presença de um campo elétrico uniforme.
- Estudar o funcionamento de um cinescópio.

1.1 O cinescópio, uma Válvula Termiônica.

Um dos poucos exemplos de válvulas eletrônicas ainda em uso, o cinescópio¹ é o elemento responsável pela imagem em dispositivos que devem apresentar imagens como uma das características de operação.

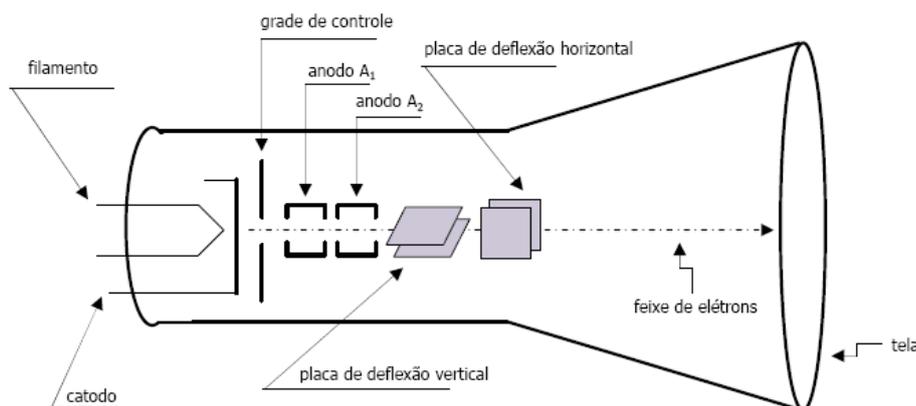


Figura 1.1: Diagrama esquemático de um tubo de raios catódicos, ou cinescópio. Os dispositivos elétricos são contidos dentro de um tubo de vidro com alto vácuo.

Na Figura 1.1), é apresentado um diagrama esquemático de um cinescópio, cujo funcionamento é descrito a seguir. Os dispositivos elétricos são contidos dentro de um tubo de vidro com alto vácuo.

- Um *filamento* incandescente aquece o *catodo* que libera elétrons pelo efeito termiônico.
- A *grade controladora*, mantida a um potencial negativo em relação ao catodo, limita a expansão da nuvem de elétrons, controlando a intensidade do feixe que vai se formar.
- Os elétrons que passam pela grade controladora são atraídos pelos *anodos* A_1 e A_2 , mantidos a potenciais positivos em relação ao catodo. Os anodos aceleram os elétrons e também funcionam como lentes eletrostáticas, colimando o *feixe de elétrons*. Essas lentes eletrostáticas nada mais são do que dois cilindros metálicos ocios coaxiais que só deixam passar elétrons que se movem ao longo de seu eixo. O conjunto de dispositivos entre o filamento e as lentes eletrostáticas é chamado de *canhão de elétrons*.

¹O cinescópio é também denominado *tubo de raios catódicos* ou simplesmente TRC (CRT, em inglês) por razões históricas. O efeito foi descoberto antes que fosse conhecida a natureza granular da matéria. Prefira o termo *cinescópio* a CRT.

- O feixe colimado gerado pelo canhão de elétrons eventualmente colide com a *tela* do cinescópio. A tela é uma parede do tubo de vidro que é revestida internamente com um material luminescente, que emite luz visível no ponto em que é atingido pelos os elétrons do feixe.
- No percurso entre o canhão e a tela, o feixe passa entre dois pares de placas: as *placas de deflexão vertical* e as *placas de deflexão horizontal*. A aplicação combinada de diferenças de potencial nestes pares de placas desvia o feixe de sua direção original e pode levar o ponto luminoso a deslocar-se para qualquer ponto da tela.

Os controles disponíveis sobre o feixe nos osciloscópios utilizados nesta experiência são:

Intensidade do feixe: obtido através de um potencial negativo aplicado à grade de controle com o qual se regula o fluxo de elétrons;

Foco: obtido através da aplicação de um potencial positivo no anodo A_1 em relação ao catodo, regulando a largura do feixe;

Tensão de aceleração do feixe: que é aplicada ao segundo anodo A_2 . Trata-se de uma tensão positiva em relação ao catodo, podendo ser variada até aproximadamente 2000 V.

1.2 Movimento de um Elétron no Cinescópio.

1.2.1 No Canhão de Elétrons

O campo elétrico ao longo do trajeto de um elétron desde o catodo, onde ele é liberado, até emergir do anodo A_2 é muito difícil de calcular. Entretanto, a velocidade com que um elétron emerge do canhão de elétrons pode ser determinada facilmente por considerações de energia.

O potencial elétrico num ponto do espaço está diretamente relacionado com a energia potencial de uma carga neste ponto: $U = qV$. A outra parcela da energia mecânica da partícula é a sua energia cinética, $K = \frac{1}{2}mv^2$. Como a energia é constante, para quaisquer dois pontos i e f na trajetória da partícula vale:

$$U_i + K_i = U_f + K_f \Leftrightarrow K_f - K_i = -(U_f - U_i) \Leftrightarrow \Delta K = -\Delta U.$$

Para um elétron, com carga $q = -e$, entre dois pontos quaisquer temos

$$\frac{1}{2}m(v_f^2 - v_i^2) = e(V_f - V_i).$$

No caso do canhão de elétrons, a velocidade com que os elétrons emergem do catodo é praticamente nula $v_i = 0$. O catodo é normalmente aterrado e $V_i = 0$. No final do canhão temos o anodo A_2 , cujo potencial é $V_A > 0$. Chamando a velocidade final de v_0 , obtemos:

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = eV_A \Leftrightarrow v_0 = \sqrt{\frac{2eV_A}{m}}. \quad (1.1)$$

Para $V_A \sim 1$ kV isto resulta em $v_0 \sim 2 \times 10^7$ m/s, aproximadamente 6% da velocidade da luz c . Para uma distância típica de 20 cm entre o canhão e a tela, o tempo de voo é da ordem de 1×10^{-8} s, ou 10 ns.

1.2.2 Nas Placas Defletoras

Depois de emergir com velocidade v_0 do canhão, o elétron passa pelo interior dos pares de placas defletoras antes de atingir a tela. Se não houver nenhum campo elétrico entre as placas (quando cada par de placas se encontra aterrado, por exemplo), ele segue uma trajetória retilínea com velocidade constante v_0 , atingindo o centro da tela.

A Figura 1.2 mostra a trajetória de um elétron do feixe quando se aplica uma diferença de potencial num dos pares de placas defletoras. Na figura estão definidas as dimensões e os parâmetros relevantes para o problema. Cada placa do par tem comprimento ℓ (a sua largura é da

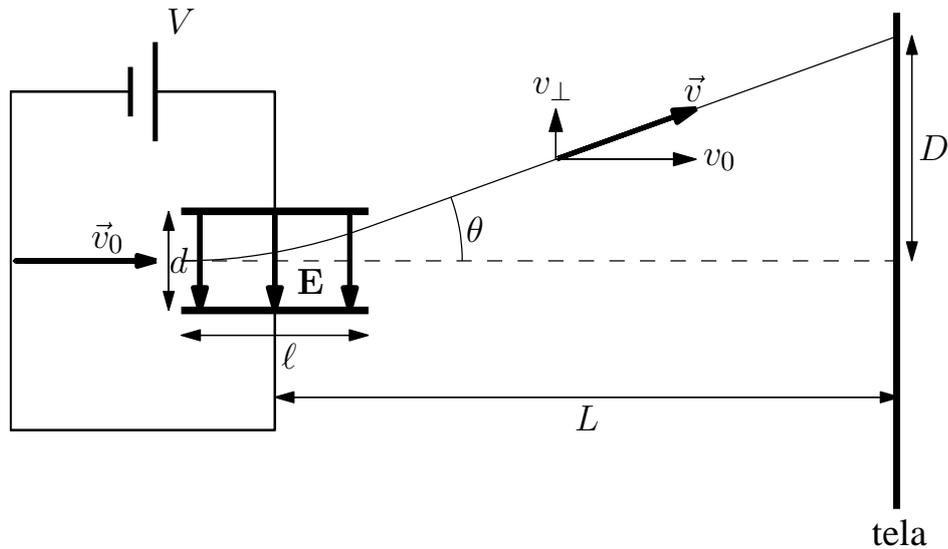


Figura 1.2: Trajetória do feixe de elétrons defletido por uma das placas de deflexão do cinescópio.

mesma ordem de grandeza). O espaçamento entre as duas placas, que estão sob uma diferença de potencial V , é $d \ll \ell$. O campo elétrico entre as placas, que pode ser considerado constante, tem módulo $E = V/d$. A direção deste campo elétrico é perpendicular ao eixo do cinescópio, como mostrado na figura.

Um elétron passando pelo interior dessas placas ficará sujeito a uma força constante, de módulo $F = eE = eV/d$, na direção oposta à do campo elétrico. A aceleração constante devida a esta força faz com que o elétron adquira uma componente de velocidade perpendicular ao eixo do cinescópio, v_{\perp} , percorrendo uma trajetória parabólica. A componente da velocidade do elétron paralela ao eixo, v_0 , não é afetada e permanece constante durante todo o percurso. Este movimento no interior das placas é completamente análogo ao movimento de um projétil lançado horizontalmente na presença da gravidade. Ao deixar a região de campo elétrico, o elétron segue em movimento retilíneo uniforme, numa trajetória inclinada de um ângulo θ em relação ao eixo do cinescópio, até atingir a tela, a uma distância L do centro das placas, num ponto deslocado de D em relação ao eixo do cinescópio.

Da análise da trajetória esboçada na figura vemos que $\tan \theta = D/L = v_{\perp}/v_0$. A velocidade perpendicular v_{\perp} pode ser obtida de $v_{\perp} = a_{\perp} \Delta t$, onde

- $a_{\perp} = F/m = eV/md$ é a aceleração perpendicular devida ao campo elétrico da placa e
- $\Delta t = \ell/v_0$ é o intervalo de tempo em que o elétron se encontra no interior da placa.

Combinando estas expressões com o resultado (1.1) para v_0 obtemos: $\frac{D}{L} = \frac{eV\ell}{dmv_0^2} = \frac{\ell V}{2dV_A}$.

Vemos que o deslocamento D é proporcional à tensão de deflexão V e pode ser expresso como:

$$D = SV, \quad \text{com} \quad S = \frac{L\ell}{2dV_A}. \quad (1.2)$$

O novo parâmetro definido acima, S , é denominado *sensibilidade* do cinescópio. Note que a sensibilidade varia com o inverso da tensão de aceleração, V_A , e não depende nem da massa nem da carga do elétron. Como a sensibilidade depende das dimensões das placas, as sensibilidades horizontal e vertical podem ser diferentes.

Num osciloscópio de medida, no modo de varredura, a tensão nas placas de deflexão horizontal, V_h , é feita variar numa taxa constante entre $-V_0$ e $+V_0$ fazendo com que o ponto na tela se mova horizontalmente com velocidade constante. A posição horizontal do feixe é, assim, uma escala de tempo. O sinal que se quer medir é conectado às placas de deflexão vertical, V_v . O resultado na tela é uma curva que dá o sinal em função do tempo $V_v(t)$.

FAP0291 Eletromagnetismo para Geociências

RELATÓRIO

11 12 13 14

___/___/2010

Nome: _____ N^o USP:

Companheiros:

Nota

EXPERIÊNCIA 1

Força elétrica sobre um feixe de elétrons

ATENÇÃO!!!

A tensão de aceleração dos elétrons é da ordem de alguns quilovolts, num cinescópio utilizado em osciloscópios (pode chegar a dezenas de quilovolts, num cinescópio para televisão colorida). Proceda com cautela, portanto, para não provocar acidentes. Você receberá o arranjo experimental com a ligação de alta tensão já montada.

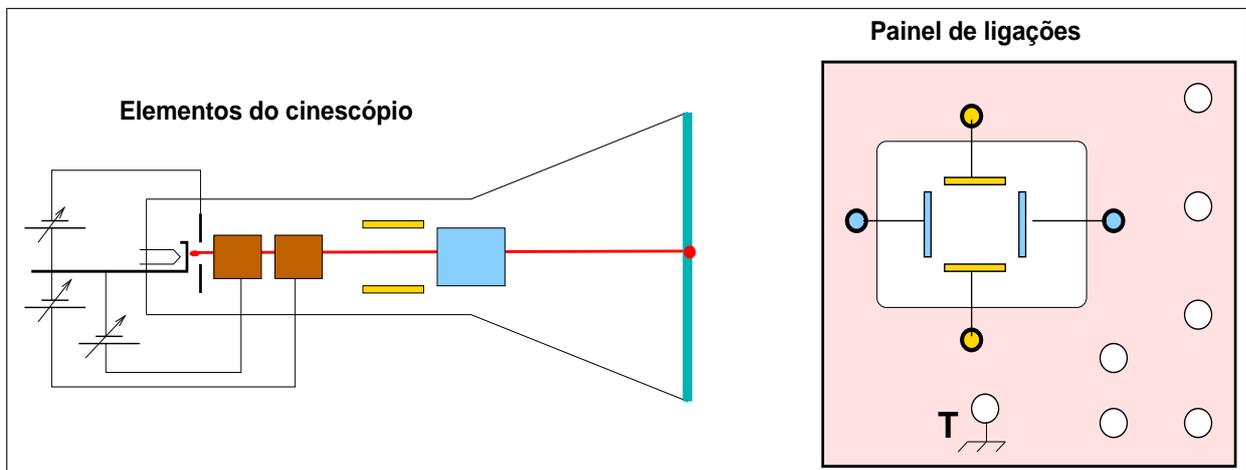


Figura 1: Elementos principais do cinescópio e o painel frontal de conexões do osciloscópio didático do laboratório.

1 _____ Reconhecimento do Osciloscópio Didático _____ ◇

- Seu osciloscópio tem número: _____

Para se familiarizar com o seu cinescópio, identifique os elementos listados nas tabelas a seguir, marcando-os com as letras correspondentes nos esquemas da Figura 1.

- Elementos internos do cinescópio (TRC).

F: Filamento	K: Catodo
A₁: 1º Anodo	A₂: 2º Anodo
DV: Defletores Verticais	DH: Defletores Horizontais
FE: Feixe de Elétrons	GC: Grade de Controle

- Painel de controle frontal do TRC.

Terminais	Controles
DV: Deflexão Vertical	I: Intensidade
DH: Deflexão Horizontal	F: Foco
AC: Fonte AC	R: Regulagem da fonte DC
DC: Fonte DC	AT: Alta tensão

- Tensões de controle do TRC.

V_I : Intensidade
V_F : Foco
V_A : Tensão de aceleração

Responda: Por que a tensão de controle da intensidade do feixe é negativa em relação ao catodo, enquanto a tensão de aceleração é positiva?

2 _____ Operação do osciloscópio didático _____ ◇

- Antes de ligar o osciloscópio coloque o potenciômetro de alta tensão no **mínimo** (**AT** totalmente virado no sentido anti-horário).
- Verifique se os terminais **DV** e os terminais **DH** estão todos ligados no terminal terra. Desta forma, todas as placas estarão ao mesmo potencial e o feixe eletrônico deverá ser observado como um ponto luminoso próximo do centro da tela.
- Ligue o osciloscópio e ajuste a alta tensão V_A para aproximadamente 800 V. Os terminais para medida dessa tensão estão localizados no painel traseiro do aparelho e um voltímetro já deve estar conectado para a sua leitura. Indique o valor medido com a correspondente incerteza:

$V_A =$

- Ajuste a intensidade e o foco do feixe eletrônico de forma a obter o menor ponto luminoso possível observado confortavelmente. Um ponto luminoso muito forte poderá queimar o material luminescente da tela, principalmente se ele permanecer imóvel por muito tempo.
- Se o ponto luminoso não estiver exatamente no centro da tela, isto se deve à força do campo magnético da terra que desvia o feixe eletrônico. Para corrigir, utilize o ímã sem numeração fornecido para centralizar o feixe na tela. Fixe-o no painel traseiro com fita adesiva numa posição que deve ser encontrada por tentativa.

Cuidado para não esbarrar no terminal de alta tensão existente nesse painel.

3 Determinação da sensibilidade do TRC ◇

A sensibilidade S de um cinescópio é um parâmetro que indica quanto o ponto luminoso se desloca na tela (D), para cada volt aplicado às placas defletoras: $D = SV$. Ela depende das dimensões do tubo, das placas defletoras e da tensão de aceleração V_A .

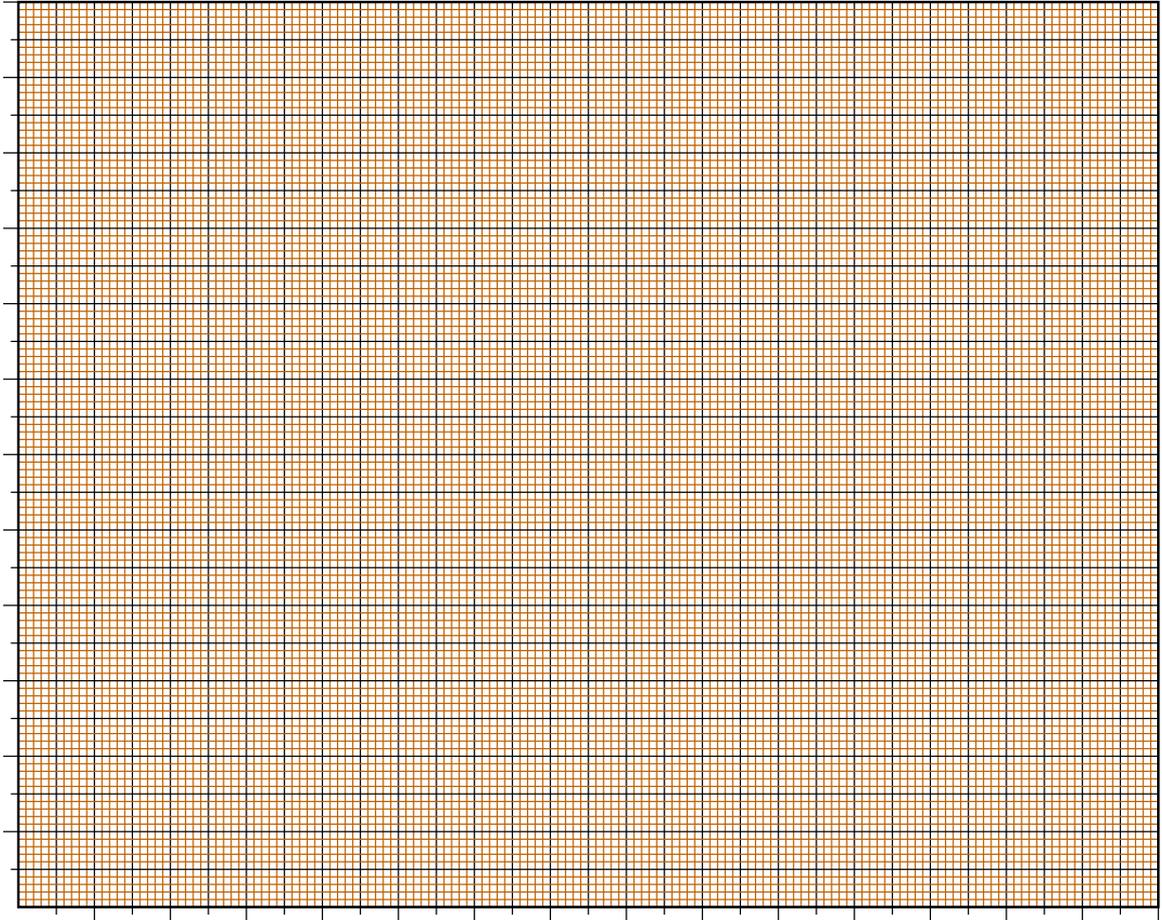
- Neste experimento vamos determinar a sensibilidade da deflexão horizontal do TRC (a deflexão vertical possui sensibilidade diferente). Para tanto, todas as placas de deflexão devem estar aterradas exceto a placa **DH direita**, que deve ser ligada ao terminal da fonte **DC**.
- Ligue um multímetro digital entre os terminais **DH direita** e **Terra** para medir a tensão de deflexão horizontal V .
- Meça a tensão de deflexão V aplicada às placas de deflexão horizontal em função do deslocamento do ponto luminoso D . Faça isso ajustando V de modo a posicionar o ponto luminoso em lugares pré-determinados a cada centímetro ao longo da escala horizontal da tela, preenchendo a tabela 1.1. Cada membro do grupo deve realizar esta série de medidas. A média e o correspondente desvio padrão para cada valor de D devem ser indicados na tabela.

D (cm)	-4,0	-3,0	-2,0	-1,0	-0,0	+1,0	+2,0	+3,0	+4,0
V_1 (V)									
V_2 (V)									
V_3 (V)									
V_4 (V)									
\bar{V} (V)									
σ_V (V)									

Tabela 1.1: Valores da tensão de deflexão V_i em função do deslocamento do feixe D . Cada índice i indica medidas tomadas por um membro do grupo. \bar{V} é a média das medidas e σ_V o desvio padrão da média correspondente. A incerteza do voltímetro utilizado é $\sigma_c = \underline{\hspace{2cm}}$.

- Compare os valores obtidos para σ_V com a incerteza padrão do voltímetro σ_c e comente o resultado. Qual é a incerteza das medidas de V ?

- **Gráfico:** Faça um gráfico da tensão de deflexão (\bar{V}) em função do deslocamento D na figura abaixo. Determine graficamente a sensibilidade S e sua incerteza σ_S , colocando suas contas e resultados no espaço abaixo da figura.



A introdução teórica dá a expressão para a sensibilidade em termos dos parâmetros geométricos do TRC e da tensão de aceleração. Abaixo reproduzimos a expressão (1.2), denotando a sensibilidade assim determinada por S_g :

$$S_g = \frac{L\ell}{2dV_A}$$

- Anote as dimensões necessárias para o cálculo, e determine S_g e sua incerteza. Use o espaço abaixo da tabela para fazer as contas.

Comprimento da placa defletora horizontal:	$\ell =$ \pm	$\sigma_\ell/\ell =$
Espaçamento entre as placas:	$d =$	$\sigma_d/d =$
Distância placas-tela:	$L =$	$\sigma_L/L =$
Tensão de aceleração do feixe:	$V_A =$	$\sigma_{V_A}/V_A =$
Sensibilidade prevista:	$S_g =$	$\sigma_{S_g}/S_g =$
Sensibilidade medida:	$S =$	$\sigma_S/S =$

- Quais parâmetros são mais importantes na determinação da incerteza em S_g ?

- Compare o valor da sensibilidade do TRC medida (S) com o valor previsto (S_g), levando em conta as incertezas. Comente o resultado.
