

## EXPERIÊNCIA 11

### Deflexão de feixe de elétrons - razão carga massa (e/m)

#### I. OBJETIVOS

- Verificar a dependência da trajetória de um feixe de elétrons quando sujeito a diferentes potenciais de aceleração e intensidades de campo magnético e elétrico.
- Determinar experimentalmente a razão carga-massa do elétron

#### II. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Sabe-se que um elétron de massa  $m$  e carga  $e$  ao mover-se num campo magnético uniforme  $\mathbf{B}$  e num campo elétrico  $\mathbf{E}$ , a uma velocidade  $\mathbf{v}$  terá a sua trajetória defletida, sendo que esta deflexão pode ser determinada a partir da Força de Lorentz,

$$\mathbf{F} = e ( \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} ) \quad (1)$$

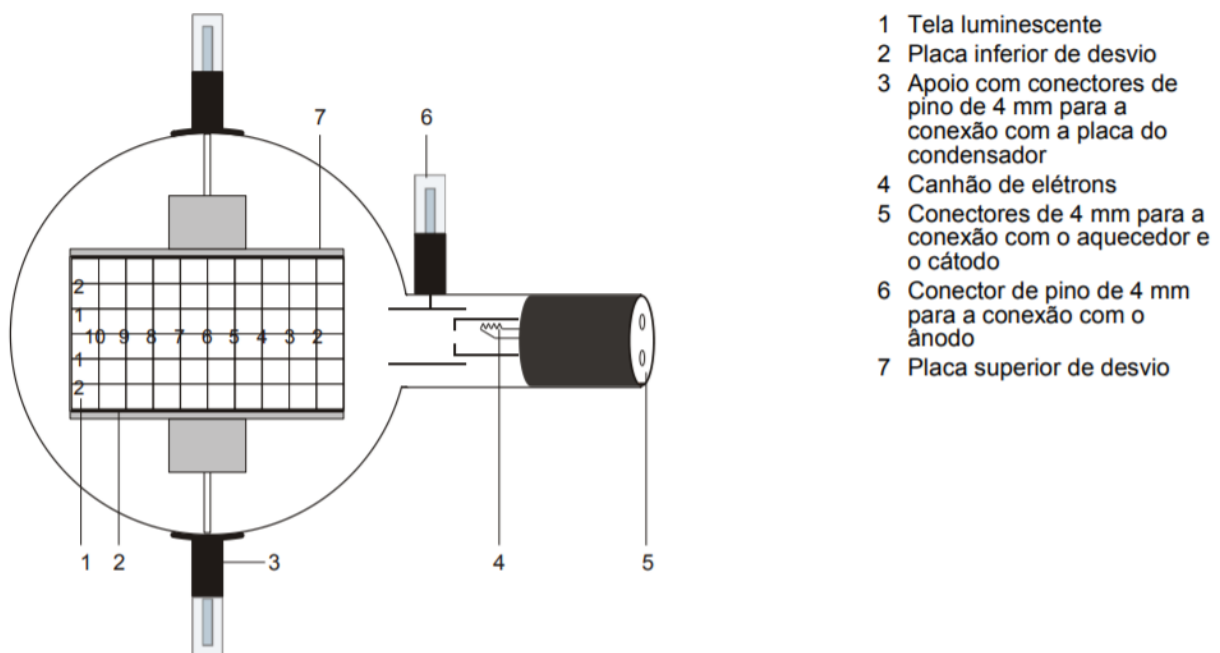
Tal comportamento pode ser observado na prática através do experimento de **deflexão de feixe de elétrons**, que é concebido para a investigação da deflexão de feixe de elétrons sob a ação de campos elétricos e/ou magnéticos. Este tipo de observação pode ser usada também para estimar a relação entre a carga de um elétron e a sua massa (e/m) como também a sua velocidade ( $\mathbf{v}$ ).

O tubo de desvio de feixe de elétrons (Fig. 1) consiste de uma ampola de vidro evacuada que possui em seu interior um canhão de elétrons responsável pela emissão de um feixe estreito e focado de raios catódicos (feixe de elétrons). O canhão de elétrons é formado por um filamento de tungstênio em formato de

“grampo de cabelo” que é aquecido diretamente (catodo) e o anodo em formato de cilindro oco, posiciona à sua frente.

É a diferença de potencial entre o catodo e o anodo ( $U_A$ ) que fornece a energia cinética necessária para a extração e aceleração dos elétrons da região do filamento, onde foram emitidos pelo processo de emissão termo-iônica. A deflexão do feixe pode ser realizada de forma eletrostática, por meio de um capacitor de placas paralelas (condensador) formado por um par de placas paralelas posicionadas no caminho do feixe (interior da ampola) ou magnética com ajuda de um par de bobinas de Helmholtz, externas à ampola.

Os raios catódicos são interceptados por uma placa fina de Mica coberta com pintura fluorescente de um lado e de outro por uma quadricula em centímetros, possibilitando o traço do caminho dos elétrons. A placa de Mica é mantida a  $15^\circ$  do eixo do tubo pelas das duas placas defletoras.



**Figura 1:** Tubo de desvio de feixe elétrons.

### III. PROCEDIMENTOS DE SEGURANÇA

Os tubos tipo catodo quente (ampola) que são usados neste experimento possuem paredes finas de vidro que retêm a baixíssima pressão em seu interior, necessária à execução deste experimento. Por esta razão manusei com **EXTREMO CUIDADO** a fim de evitar produzir uma implosão do mesmo:

- **Nunca exerça stress mecânico aos mesmos;**
- **Não sujeite os cabos a esforços puxando-os.**

#### a. Material utilizado

- 2 Fontes CC de alta-tensão (0 a 5000 V);
- 1 Fonte CC de baixa tensão (0 a 20 V, 0 a 5 A);
- 1 Par de bobinas de helmholtz;
- 1 Ampola de vidro evacuada;
- Suportes plásticos (Ampola e bobinas);
- Cabos e adaptadores adequados ao uso com alta tensão.

#### b. Parâmetros de funcionamento e de segurança:

- Voltagem filamento:  $\leq 7,5$  V AC/DC
- Tensão anodo: de 1000 V a 5000 V DC
- Corrente anodo: aprox. 0,1 mA a 4000 V
- Tensão capacitor: máximo de 5000 V
- Distância placas do capacitor: aprox. 54 mm
- Tela fluorescente: 90 mm x 60 mm
- Ampola de vidro: aprox. 130 mm  $\varnothing$
- Comprimento total: aprox. 260 mm

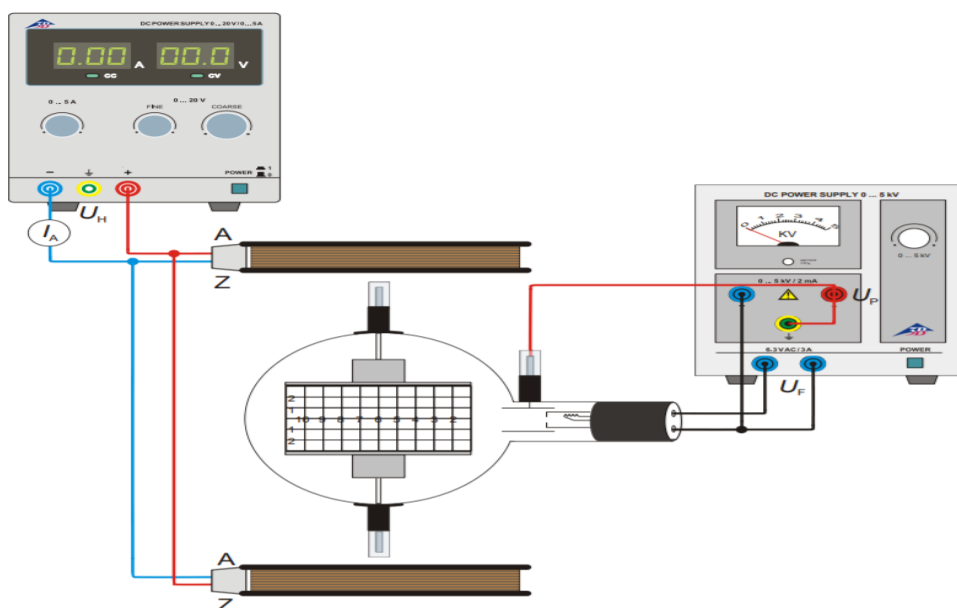
**NESTE EXPERIMENTO, AS CONEXÕES ELÉTRICAS JÁ ESTÃO PRONTAS, SEM A NECESSIDADE DE REALIZA-LAS OU MUDÁ-LAS!!!**

## IV. PARTE EXPERIMENTAL

### IV.1 Deflexão magnética

Nesta etapa você irá determinar a razão carga massa através da deflexão do feixe de elétrons pela aplicação de campo magnético.

Primeiramente, verifique se o circuito está montado de acordo com a figura 2. Em seguida, limite a fonte de corrente a 2 A (veja esse procedimento no anexo II-b).



**Figura – 2:** Circuito elétrico para deflexão magnética.

**(NÃO ALTERE QUALQUER DAS CONEXÕES).**

Se o movimento dos elétrons se dá perpendicularmente a um campo magnético uniforme apenas, a força será então, proporcional a sua carga, velocidade e ao campo magnético no qual a trajetória é realizada. Outro fato é que a mesma será **circular**, de raio  $r$ , de modo que:

$$F = evB = m \frac{v^2}{r}. \quad (2)$$

O raio pode ser calculado de acordo com o anexo I.

Para a obtenção de elétrons livres por efeito termiônico (canhão de elétrons) é necessário a construção de um circuito elétrico específico para a extração destes elétrons.

➤ **Apresente um esquema, bem discutido, de como o mesmo pode ser construído neste experimento.**

➤ Com diferença de potencial entre o anodo e o catodo constante ( $\sim 3000$  V), varie a corrente das bobinas. **Descreva o que acontece com o feixe e explique detalhadamente o que foi observado à luz da teoria utilizada.**

➤ Com a corrente das bobinas constante (diferente de zero), varie a diferença de potencial entre o anodo e o catodo (tensão canhão -  $U_A$ ). **Descreva o que acontece com o feixe e explique o que foi observado à luz da teoria utilizada.**

➤ **Represente por meio de esquema vetorial a força resultante da ação do campo magnético sobre um elétron de prova qualquer que tem sua trajetória neste campo.**

### Obtendo $e/m$ por deflexão magnética

Tem-se que a velocidade depende da diferença de potencial entre o anodo e o catodo. Sem se levar em conta a função trabalho a mesma pode ser escrita da seguinte forma:

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A} \quad (3)$$

➤ **A partir das equações (2) e (3) obtenha a expressão da razão  $e/m$ :**

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_A}{(Br)^2} \quad (4)$$

Em que  $U_A$ , pode ser medido diretamente,  $B$  e  $r$  podem ser determinados experimentalmente (anexo I).

➤ **Estime a razão e/m. Para tal, utilize  $U_A = 3000$  V e a corrente nas bobinas da ordem de 0,35A. Compare com o valor calculado a partir da carga e da massa do elétron.**

➤ Neste instante, mantendo a tensão de aceleração dos elétrons constantes ( $U_A = 3000$  V), varie a corrente nas bobinas entre 0 e 1,5 A (**pelo menos 5 valores de corrente**). Para as diversas medidas dos raios das trajetórias estime a relação carga massa (utilize um raio para cada valor de corrente).

➤ **Note que a escala horizontal, x, inicia-se em 1,5 e por isso deve-se descontar esta distância inicial do valor observado na quadricula.**

**ATENÇÃO: NÃO EXCEDA OS VALORES MÁXIMOS DE TENSÃO E CORRENTE DE 2A!!!**

## IV.2 Deflexão elétrica

Nesta etapa você irá determinar a razão carga massa através da deflexão do feixe de elétrons pela aplicação de campo elétrico.

Primeiramente, verifique se o circuito esta montado de acordo com a figura 3.

Considerando nesta segunda situação que o movimento dos elétrons inicialmente se dá perpendicularmente a um campo elétrico uniforme apenas (induzido pelas placas paralelas), a força será então, a partir da relação de Lorentz, proporcional a sua carga, e ao campo elétrico no qual a trajetória é realizada. Aqui, a mesma deixará de ser circular para se tornar **parabólica**, de modo que:

$$F = eE = ma, \quad (5)$$

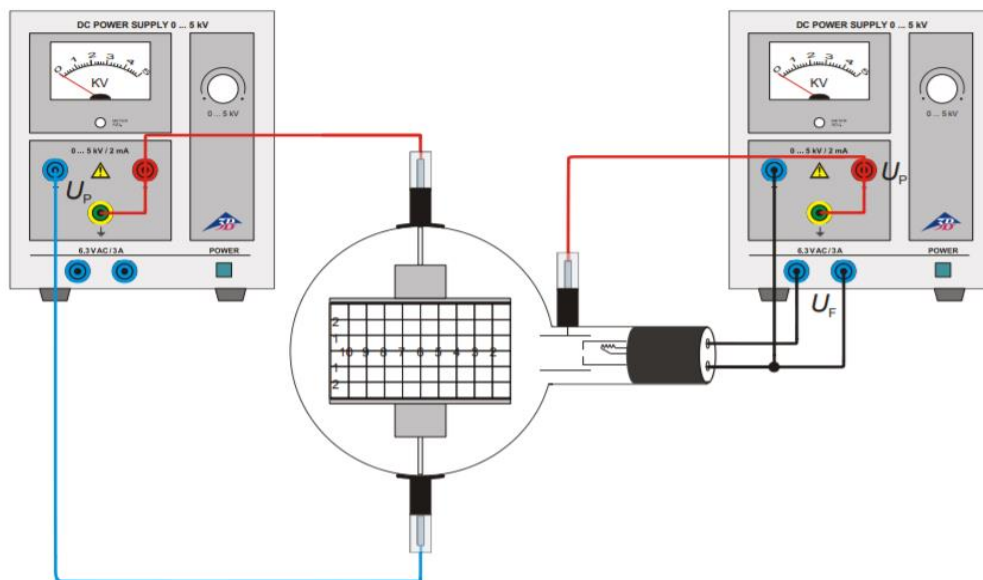
Das expressões do movimento bi-dimensional

$$y = \frac{1}{2}at^2 \quad e \quad v = \frac{x}{t} \quad (6)$$

➤ **Obtenha a expressão para a trajetória:**

$$y = \frac{1}{2} \cdot \frac{e}{m} \cdot \frac{E}{v^2} x^2 \quad (7)$$

onde  $y$  é a deflexão vertical realizada sobre uma distância linear  $x$ .



**Figura – 3:** Circuito elétrico para deflexão elétrica.

**(NÃO ALTERE QUALQUER DAS CONEXÕES).**

➤ Com a diferença de potencial entre o anodo e o catodo constante, varie a diferença de potencial entre as placas paralelas ( $U_P$ ). **Descreva o que acontece com o feixe e Explique o que foi observado.**

➤ Com a diferença de potencial entre as placas paralelas constante, varie a diferença de potencial entre o anodo e o catodo ( $U_A$ ). **Descreva o que acontece com o feixe e explique o que foi observado à luz da teoria utilizada.**

➤ **Represente por meio de esquema vetorial a força resultante da ação do campo elétrico sobre um elétron de prova qualquer em trajetória neste campo (represente as placas, potenciais e polaridades envolvidas)**

### **Obtendo e/m por deflexão elétrica**

➤ **Da relação (7) obtenha a razão e/m:**

$$\frac{e}{m} = \frac{2y}{E} \cdot \left(\frac{v}{x}\right)^2 \quad (8)$$

Em que  $E = U_P / d$ , sendo  $U_P$  e  $d$  a tensão e a distância entre as placas paralelas respectivamente.

➤ **Mantendo a diferença de potencial entre o anodo e o catodo constante ( $U_A = 3000$  V), faça 5 medidas ( $x$ ,  $y$ ) das deflexões das trajetórias para diferentes diferenças de potencial entre as placas paralelas (a cada 500 V). **Estime e/m a partir deste método.****

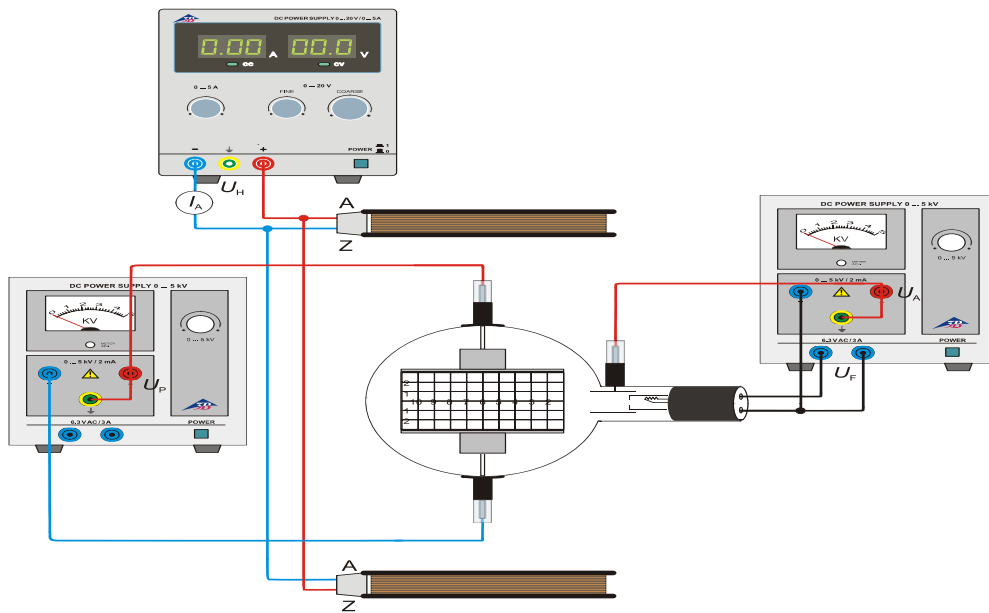
➤ **Note que a escala horizontal,  $x$ , inicia-se em 1,5 e por isso deve-se descontar esta distância inicial do valor observado na quadricula.**

➤ **O valor da velocidade em função da tensão do canhão encontra-se no gráfico no anexo II**

### **IV.3 Compensação de Campos**

Nesta última configuração a trajetória do feixe de elétrons será efetuada em uma região que possui campo elétrico e magnético. Esta trajetória é realizada de forma perpendicular aos dois campos, que também estão perpendiculares entre si.





**Figura – 4:** Circuito elétrico para Relação carga massa por compensação de campos

## Obtendo $e/m$ por compensação de campos

Com o sentido adequado da corrente nas bobinas a disposição dos campos elétrico e magnético pode ser tal que a força induzida pelo campo magnético sobre um elétron de prova terá mesma direção mas em sentido contrario à força induzida pelo campo elétrico.

Na situação em que as **forças forem iguais** não haverá deflexão do feixe de elétrons, devido a força resultante ser nula, ou seja,

$$|F_e| = |F_m| \rightarrow e \cdot E = e \cdot v \cdot B \quad (9)$$

De onde a velocidade pode ser determinada

$$v = E / B \quad (10)$$

➤ **Levando a expressão de  $v$  à relação (3), obtenha a razão  $e/m$ :**

$$\frac{e}{m} = \frac{1}{2 \cdot U_A} \cdot \left( \frac{E}{B} \right)^2 \quad (10)$$

Mantendo o potencial entre o anodo e o catodo constante ( $U_A = 4000 \text{ V}$ ), aplique uma tensão entre placas da ordem de  $400 \text{ V}$  em seguida aumente a corrente nas bobinas até que o feixe fique paralelo à direção inicial de propagação.

➤ **Após estes ajustes, estime o valor de  $e/m$  pelo método de compensação de campos.** Repita este procedimento variando a tensão entre placas,  $U_P$ , de  $200$  em  $200\text{V}$  até  $1400\text{V}$ . **Compare com o valor calculado a partir da carga e da massa do elétron.**

➤ **Determine o desvio cometido na medida de  $e/m$ , através do método da compensação, sendo que para tal medida, por simplificação, consideraremos que existem desvios associados às medidas de  $U_P$ ,  $U_A$ , e da corrente das bobinas, somente.**

➤ **Represente por meio de diagrama vetorial de forças a força resultante da ação do campo elétrico e do campo magnético sobre um elétron de prova qualquer numa trajetória realizada nestes campos (represente as placas, potenciais e polaridades envolvidas)**

➤

## V. RELATÓRIO

➤ **Todos itens tratados neste roteiro devem ser tratados neste relatório, não sendo, no entanto, limitativo a estes.**

➤ **Todas as passagens e expressões devem ser estabelecidas neste relatório.**

## Anexo I

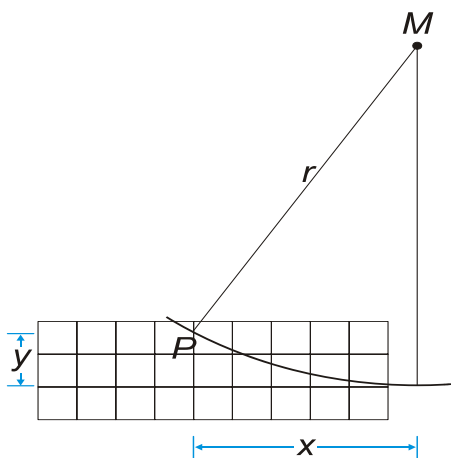
### A.1 Determinando r

O raio da curvatura pode ser obtido geometricamente conforme a figura 5.

$$r^2 = x^2 + (r - y)^2 \quad (\text{A-1})$$

assim:

$$r = \frac{x^2 + y^2}{2 \cdot y} \quad (\text{A-2})$$



**Figura – 5:** Trajetória circular

### A.2 Calculando B

O campo magnético gerado por um conjunto de bobinas em configuração de Helmholtz percorridas por uma corrente  $I$ , pode ser obtido a partir da relação do campo magnético induzido por uma bobina, já vista na teoria:

$$B(z) = \frac{\mu_0}{2} \cdot N \cdot I \cdot \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{3/2}} \quad (\text{I-3})$$

Considerando o arranjo de Helmholtz, no qual a distância entre

as duas bobinas é igual ao raio  $R$  das mesmas, tem-se que o campo devido as duas bobinas, no ponto médio entre elas, se torna (**Mostre!**)

$$B\left(\frac{R}{2}\right) = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \cdot \frac{\mu_0 \cdot N}{R} \cdot I \quad (\text{I-5})$$

Onde a constante  $\left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \cdot \frac{\mu_0 \cdot N}{R}$  em boa aproximação é igual a 4,2 mT/A, com  $N = 320$  voltas e  $R = 68$  mm.

**Confira!**

### Referências:

- 1 - Nussenzveig, Herch Moysés, Curso de Física básica – Vol 3, Eletromagnetismo.
- 2 - Material de referência do fabricante 3B Scientific Physics;

**Nota: Procurando evitar possíveis confusões na interpretação de velocidade e a unidade de tensão utiliza-se, neste documento, v (minúscula) para designar a velocidade e V (maiúscula) para a unidade volts.**

## Anexo II-a

**Gráfico da velocidade dos elétrons em função da tensão entre o catodo e o anodo**

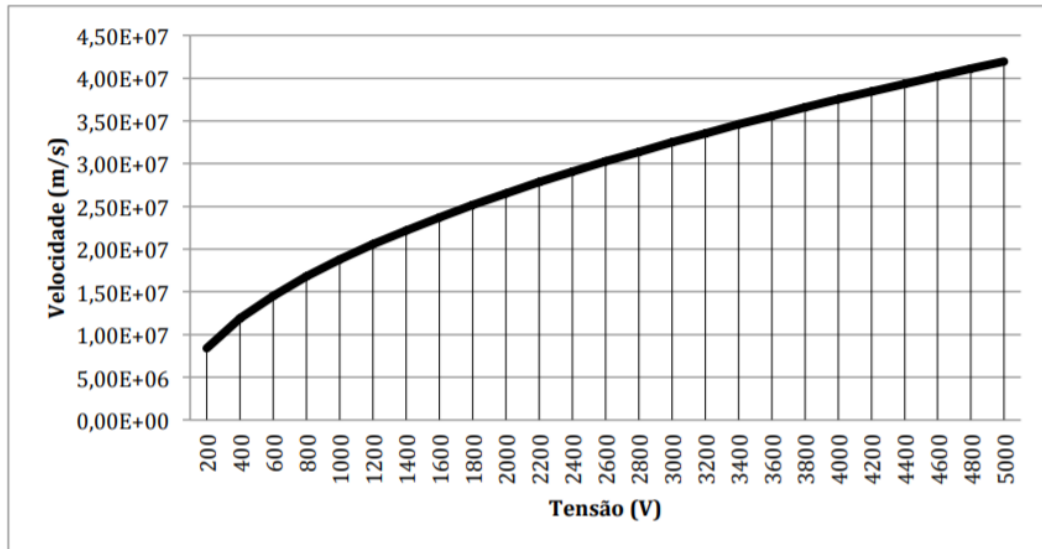


Figura – 6: Gráfico da velocidade dos elétrons em função da tensão entre o catodo e o anodo

**Nota:**A notação E+07 no eixo vertical do gráfico significa  $10^7$ .

### Anexo II-b Limitação da fonte corrente a 2A

- Com os potenciômetros da corrente e tensão ajustados em zero (todo torcido para a esquerda), gire de  $\frac{1}{2}$  volta o segundo potenciômetro da tensão.
- Agora ajuste lentamente o potenciômetro da corrente até que o valor de 2 A seja visto no visor esquerdo da fonte.
- Após isso, não mexa mais neste potenciômetro. Qualquer ajuste de corrente será realizado através dos potenciômetros da tensão.
- Retorne o potenciômetro da tensão para o mínimo. Pronto, a fonte está limitada a 2A.

