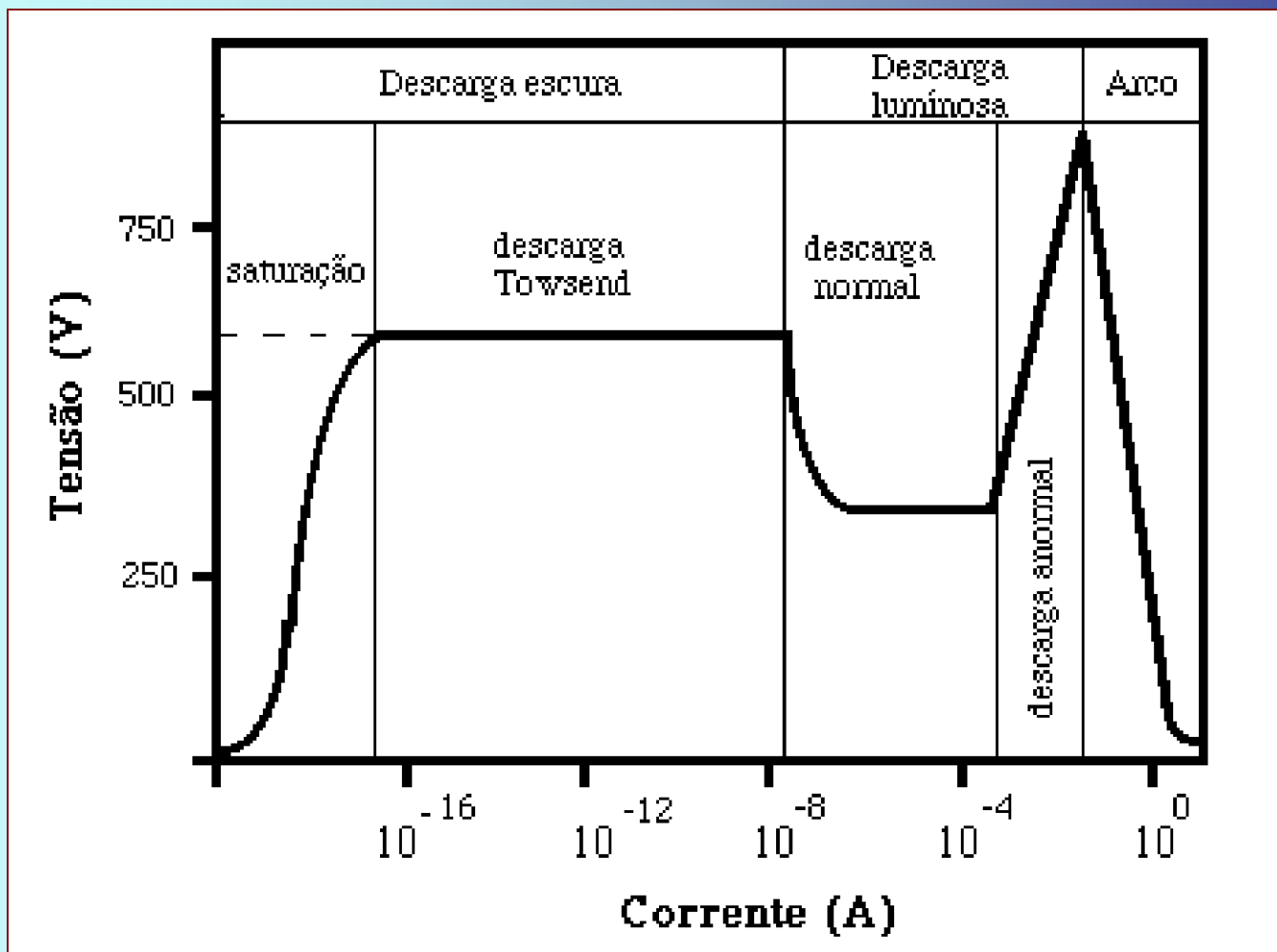


# Fontes e Feixes de Elétrons

# 5<sup>a</sup> aula

# Descarga DC



# Fontes de emissão termoiônicas

# Emissão termoiônica

Existem diversas fontes de elétrons, podem ser citadas:

1. Filamento quente;;
2. Emissão fotoelétrica;
3. Emissão de campo;
4. *Hollow* catodos;
5. Emissão catódica.

# Física da emissão termoiônica

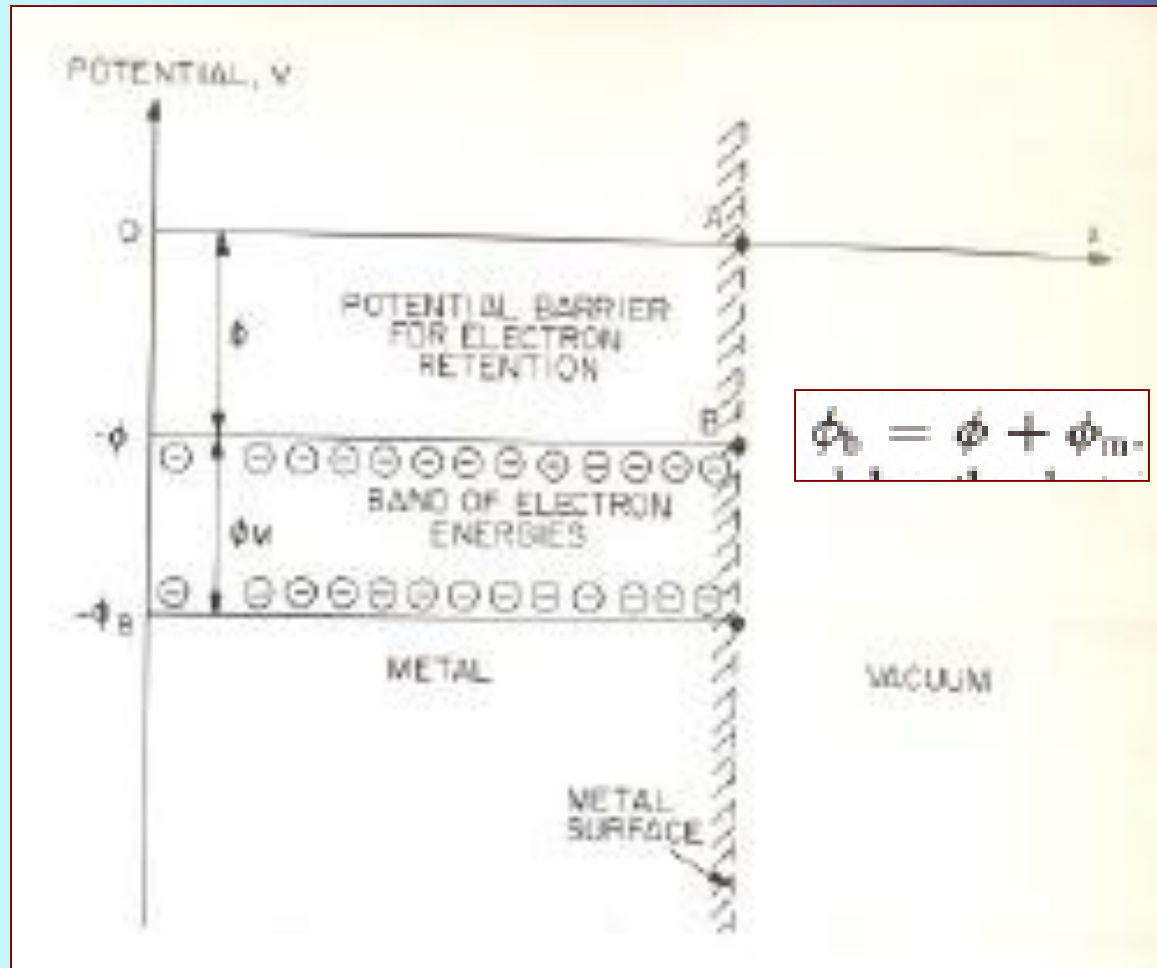
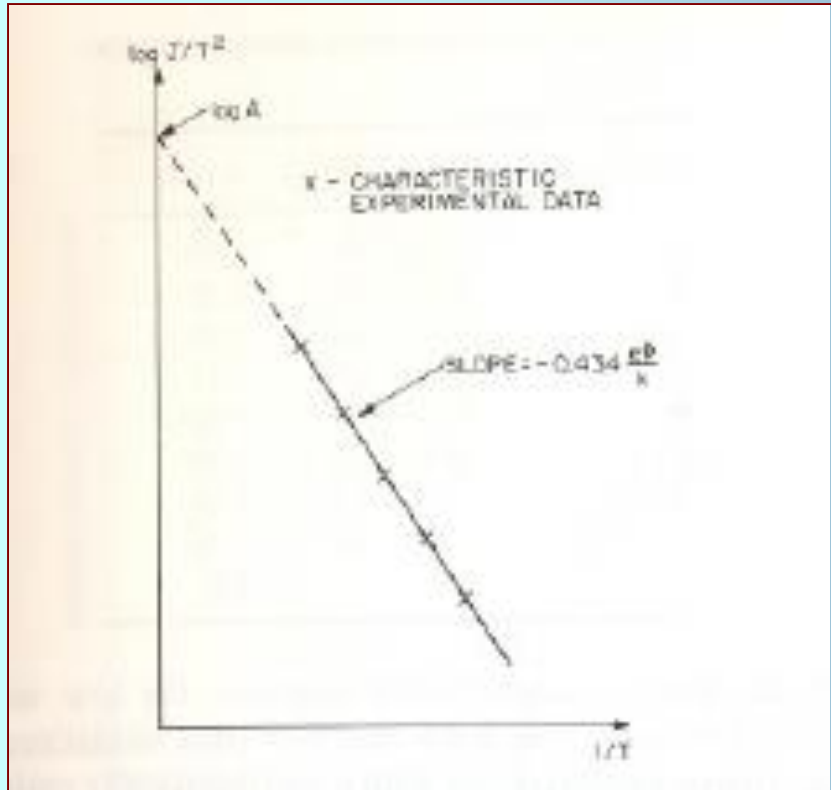


Diagrama de potênciais de um metal

# Equação de Richardson



Representação gráfica  
da equação de  
Richardson

$$J = A T^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) \quad (\text{A/m}^2)$$

Onde  $T$  é a temperatura da superfície do metal,  $A$  é a constante de emissão e  $\phi$  a mínima energia para emissão em elétron volts.

$$A = \frac{4\pi m e k^2}{h^3} = 1.2 \times 10^6 \text{ A/m}^2\text{-K}^2.$$

# Dados de emissão termoiônica de alguns materiais

| Metal   | $A$ ( $A/m^2 \cdot K^2$ ) | $\phi$ (V) |
|---------|---------------------------|------------|
| W       | $70.0 \times 10^4$        | 4.55       |
| Ta      | $55.0 \times 10^4$        | 4.25       |
| Ni      | $30.0 \times 10^4$        | 5.15       |
| Cs      | $160.0 \times 10^4$       | 2.14       |
| Pt      | $32.0 \times 10^4$        | 5.65       |
| Cr      | $48.0 \times 10^4$        | 4.50       |
| Ba on W | $1.5 \times 10^4$         | 1.56       |
| Cs on W | $3.2 \times 10^4$         | 1.36       |
| C       | —                         | 5.0        |



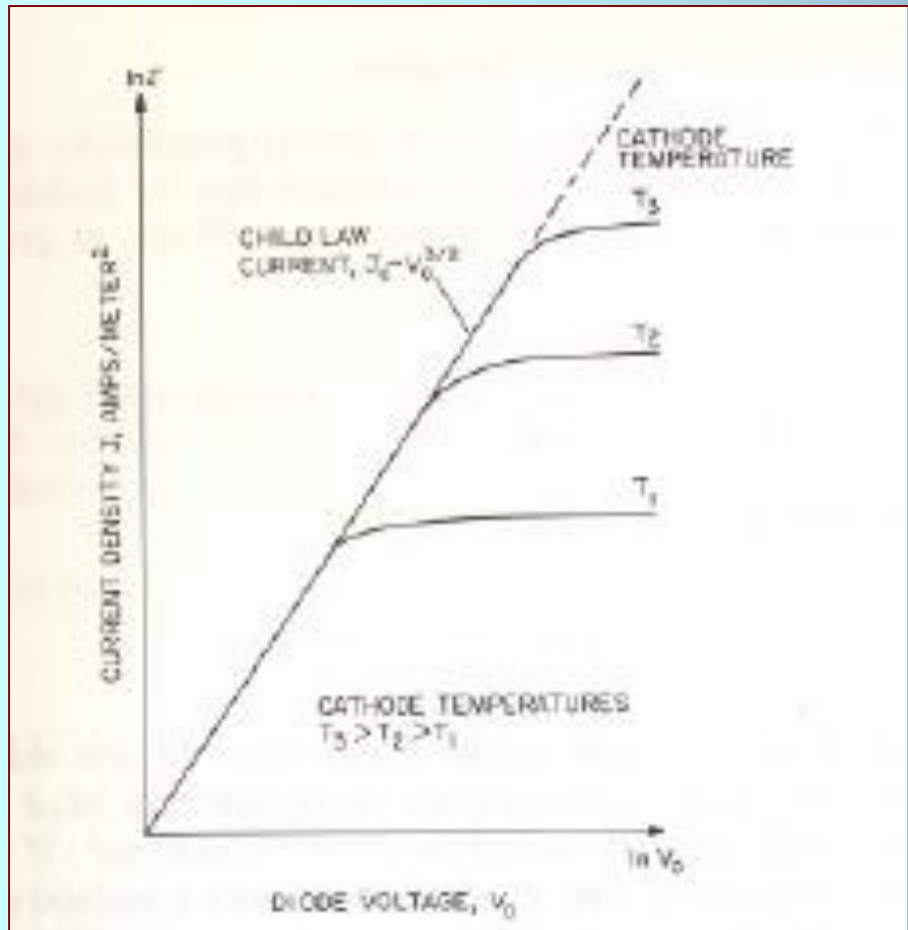
# Emissão fotoelétrica

# Efeito fotoelétrico

Um outro método de emissão de elétrons a partir de sólidos é o efeito fotoelétrico, em que elétrons adquirem energia a partir do choque de fótons provenientes de radiações eletromagnéticas que provocam a emissão de elétrons ao vencer a barreira da função trabalho do material.

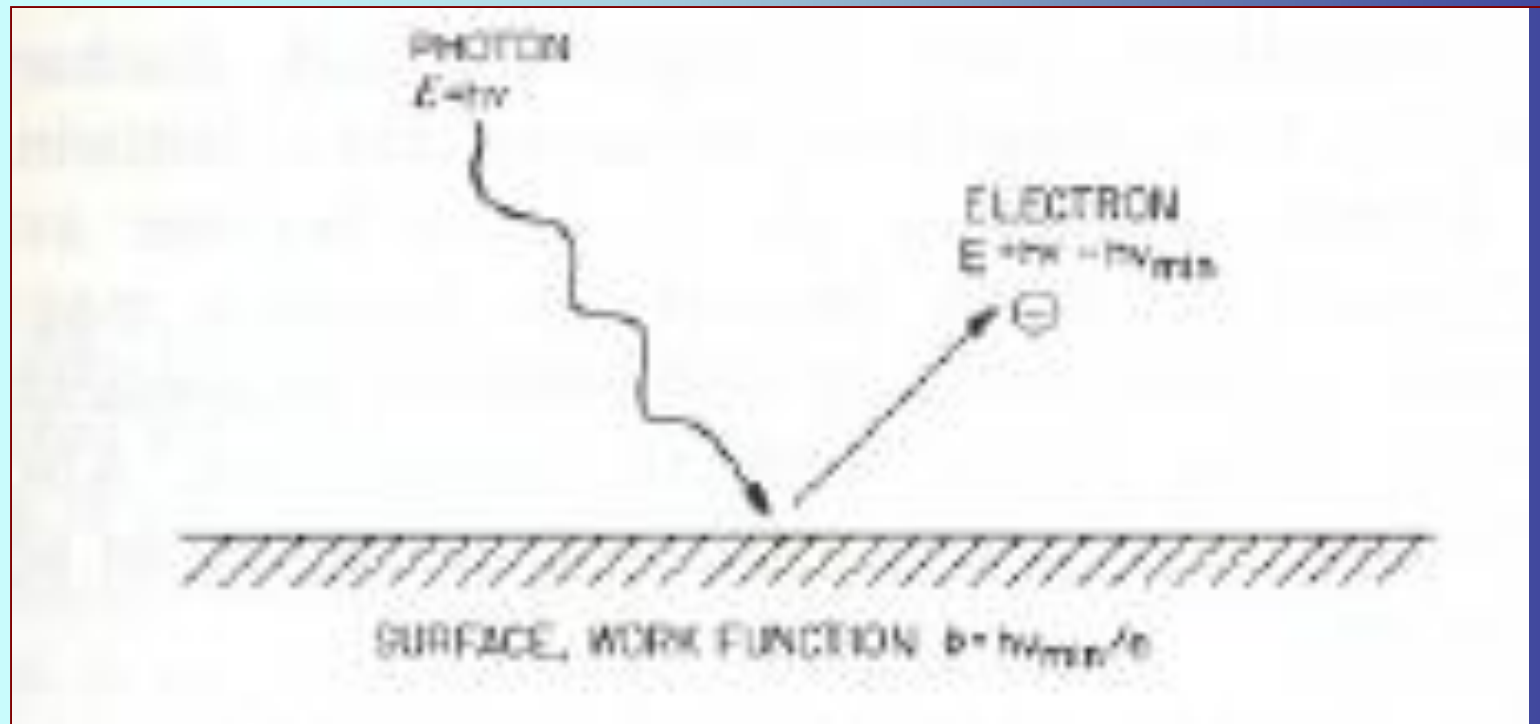
$$\nu_{\min} = e \phi / h \text{ (Hz)}$$

# Efeito fotoelétrico



Densidade de corrente em um reator do tipo diodo com um catodo de emissão termoiônico, em função da tensão aplicada ao sistema com três temperaturas diferentes

# Equação do efeito fotoelétrico de Einstein



$$E = h(\nu - \nu_{\text{min}}) \quad (J).$$

# Densidade de corrente

$$\Gamma_e = \frac{S}{e\mathcal{E}_{\min}^r} = \frac{S}{\hbar\nu_{\min}} = \frac{S}{e\phi} \quad (\text{electrons/m}^2\text{-s}).$$

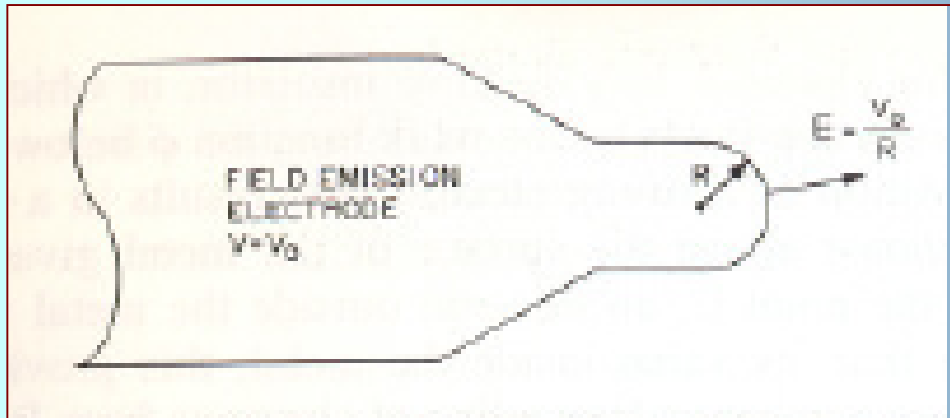
$$J_e = e\Gamma_e = \frac{S}{\phi} \quad (\text{A/m}^2).$$

# Aplicações do efeito fotoelétrico

As limitações de fontes luminosas limitam o uso de emissões por efeito fotoelétrico para estabilizar a descarga escura no regime Townseng em uma descarga DC, estabilizar a descarga luminescente e iniciar a descarga entre os eletrodos. O uso de lasers UV é empregado na geração de plasmas, com a vantagem de ser operado a temperatura ambiente.

# Emissão de campo

# Emissão de campo

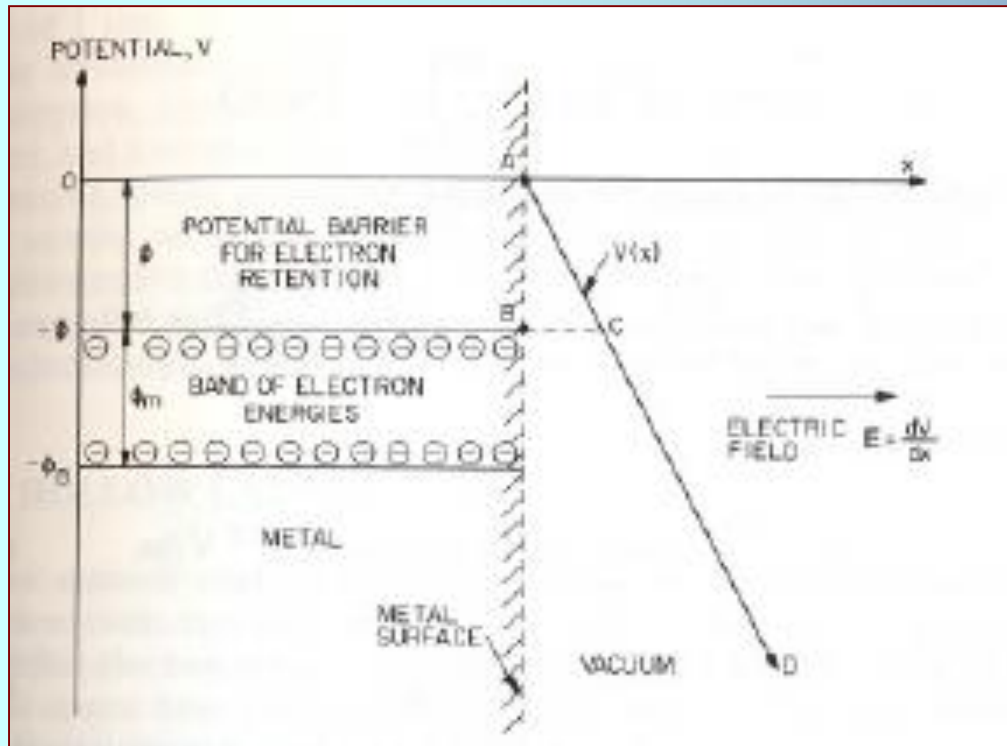


$$E = \frac{V_0}{R} \quad (\text{V/m}).$$

- A emissão de campo ocorre quando um alto potencial elétrico é aplicado a um eletrodo (metálico ou não) de modo que os elétrons são ejetados da superfície por forças eletrostáticas.



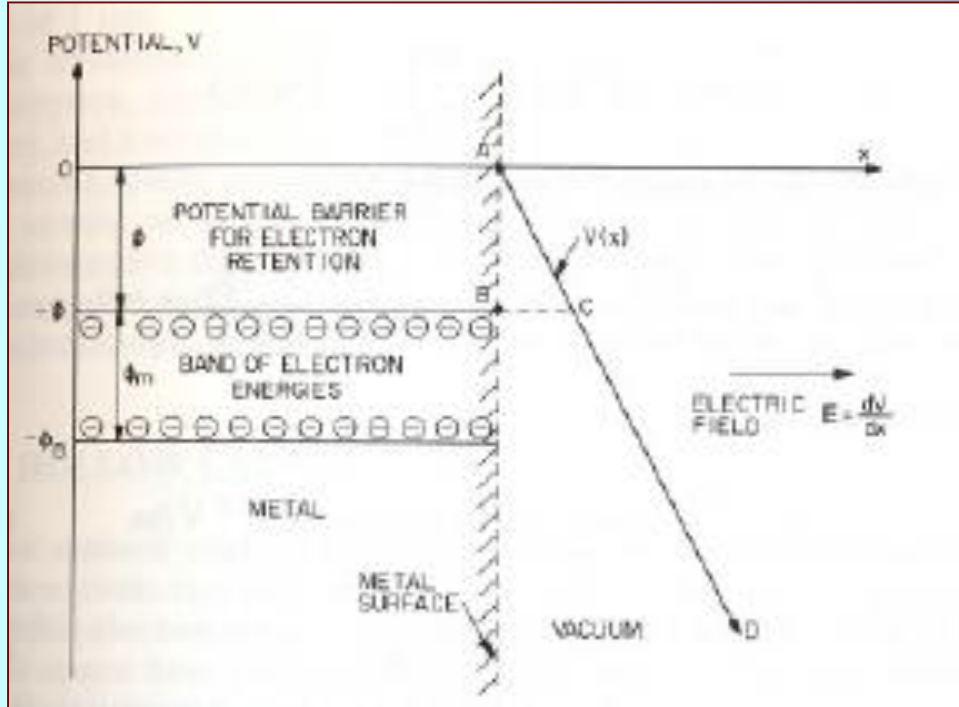
# Emissão de campo



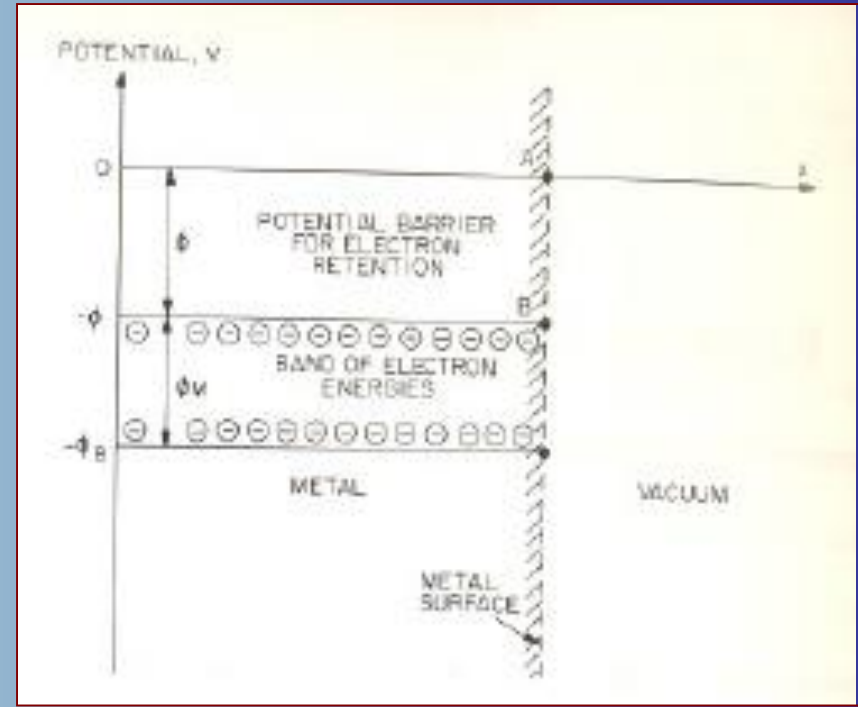
- Diagrama de potenciais de uma superfície de metal com o potencial necessário a emissão de campo

# Emissão de campo

Emissão de campo



Emissão termoiônica



# Física da emissão de campo

$$J_f = C E^2 \exp\left(-\frac{D}{E}\right) \quad (\text{A/m}^2).$$

$$C = \frac{e^2 \phi_m^{1/2}}{2\pi \hbar \phi_0 \phi^{1/2}} = 6.16 \times 10^{-6} \times \frac{1}{\phi_0} \sqrt{\frac{\phi_m}{\phi}} \text{ A/V}^2$$

$$D = \frac{8\pi}{3\hbar} (2me)^{1/2} \phi^{3/2} = 6.83 \times 10^9 \phi^{3/2} \text{ V/m}.$$

$$\phi_0 = \phi + \phi_m$$

$$\phi_m = \frac{\hbar^2}{2me} \left(\frac{3N}{8\pi}\right)^{2/3} = 3.65 \times 10^{-19} N^{2/3} \text{ eV}$$

# Física da emissão de campo

Características da emissão de campo para uma ponta de tungstênio

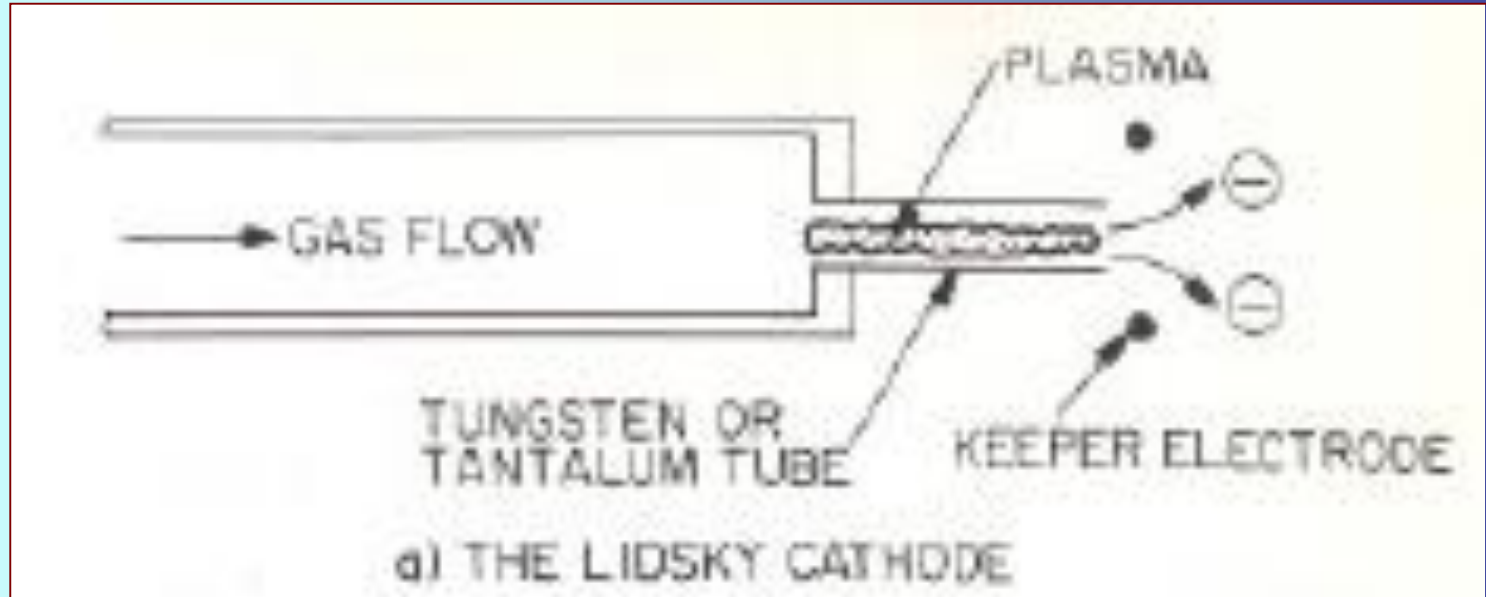
| $E$ (V/m)       | $J_f$ (A/m <sup>2</sup> ) |
|-----------------|---------------------------|
| $10^9$          | $3 \times 10^{-13}$       |
| $5 \times 10^9$ | $3.5 \times 10^7$         |
| $10^{10}$       | $9.5 \times 10^{12}$      |

*Hollow* catodos

# *Hollow* catodos

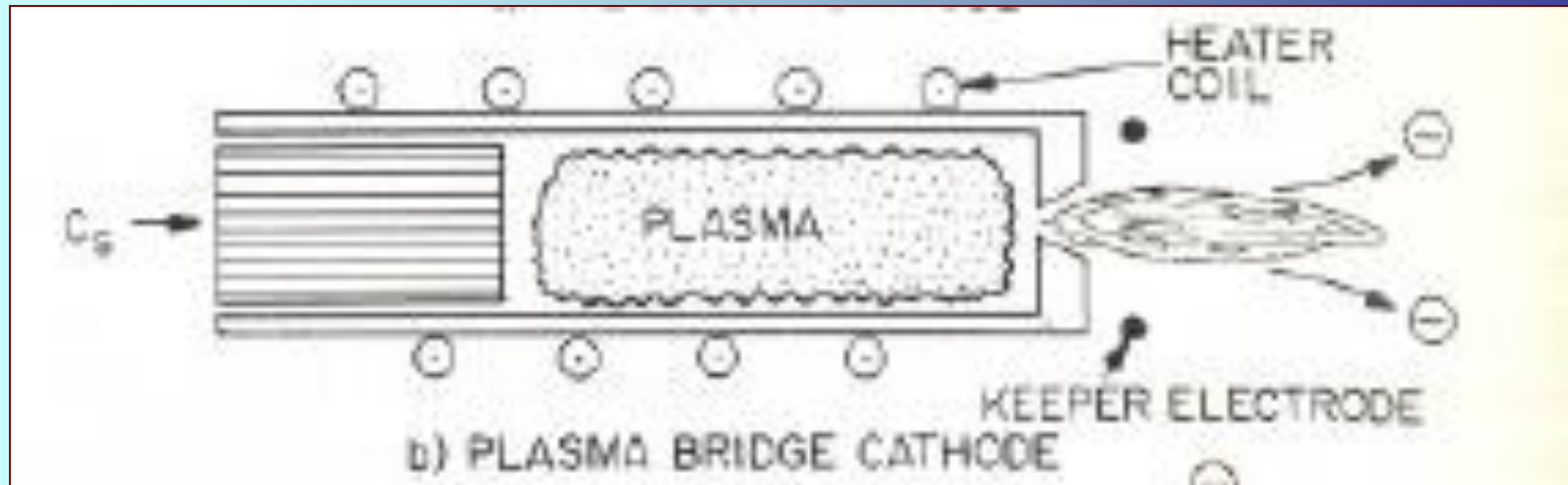
As fontes baseadas em *hollow* catodos foram desenvolvidas após 1965 e tem sido extremamente empregados desde então em substituição as fontes termoiônicas.

# Fonte tipo *Lidsky*



Nesta fonte o plasma é formado em um capilar metálico levado a incandescência, pela alta vazão dos gases ou por uma fonte externa.

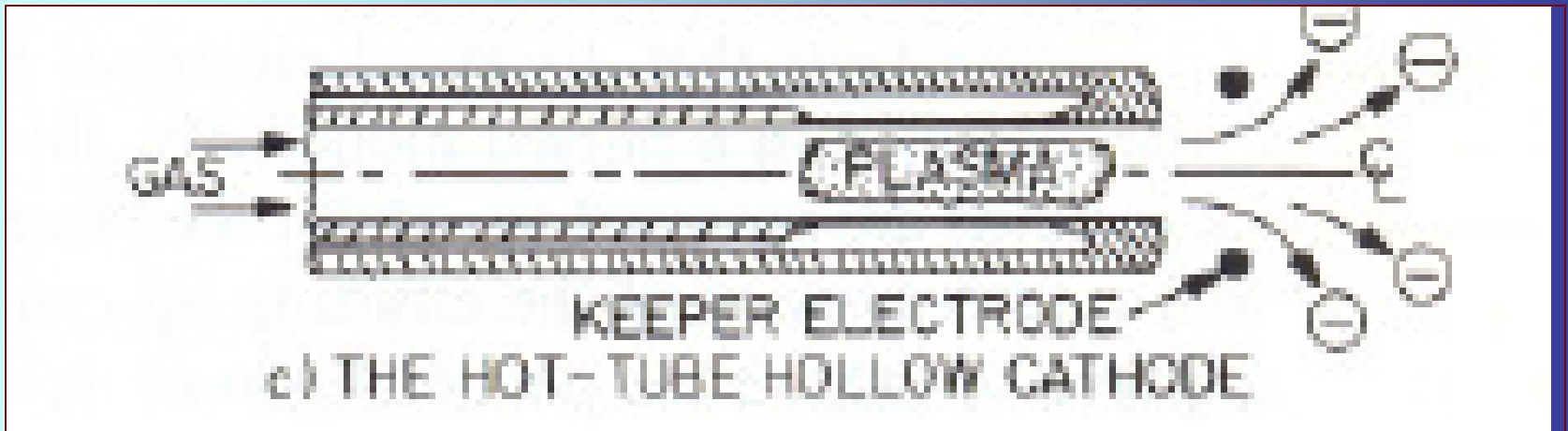
# Fonte do tipo ponte



- Neste tipo de fonte o plasma é gerado por um aquecedor externo ao tubo de plasma e opera principalmente com vapor de metais alcalinos.

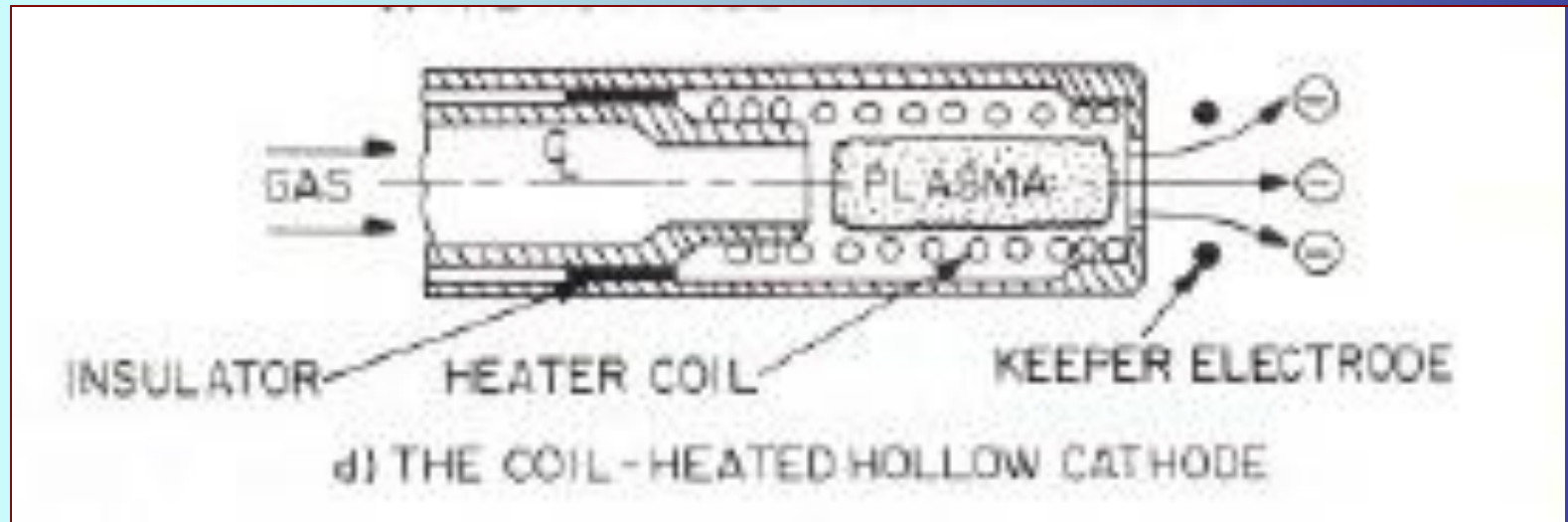


# Fonte do tipo tubo quente



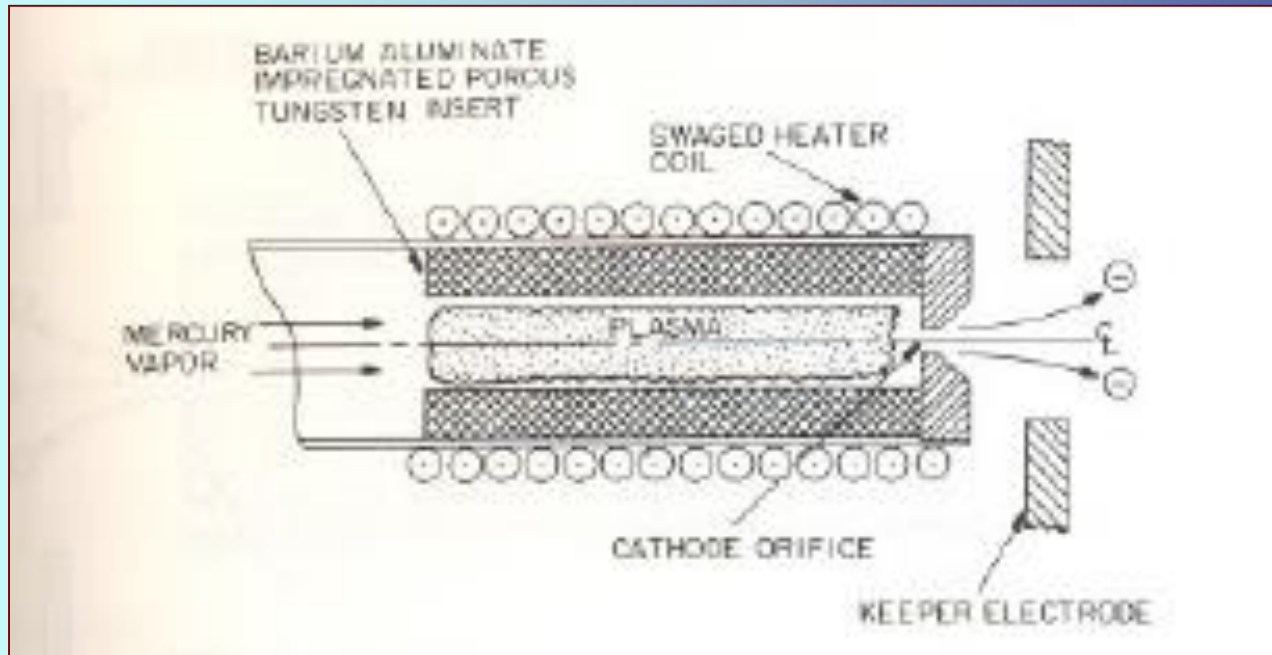
- Nesta fonte, o plasma é gerado pelo aquecimento do tubo levado a incandescência devido a aplicação de potencial elétrico entre os dois cilindros metálicos concêntricos.

# Fonte do tipo filamento quente



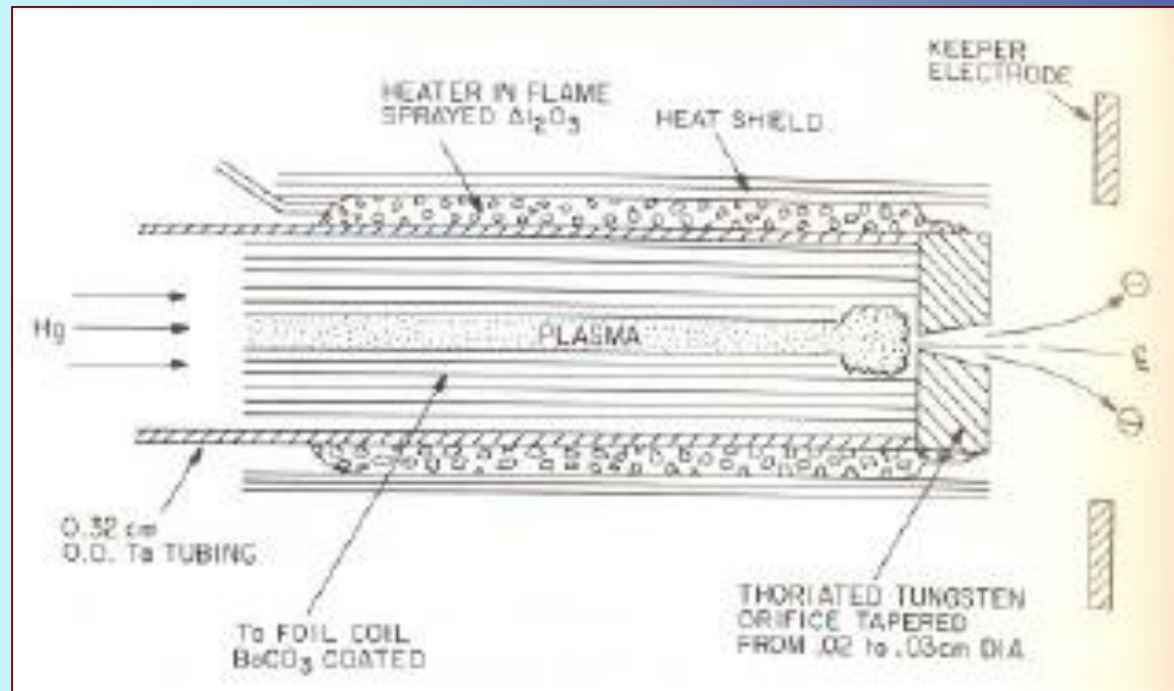
- Esta fonte possui um filamento helicoidal de tungstênio ou tântalo, que aquece o ambiente ionizando o gás e ao mesmo tempo devido a passagem de corrente elétrica confina o plasma

# Fonte baseada em vapor de mercúrio



- Esta fonte é utilizada principalmente em propulsão iônica utilizada em sistemas espaciais, a sua principal vantagem é o mínimo consumo de mercúrio que permite o seu funcionamento por milhares de horas.

# Fonte baseada em vapor de mercúrio



- Esta fonte é a evolução da fonte de mercúrio, também utilizada em propulsão iônica em sistemas espaciais, a sua principal vantagem é o menor consumo de mercúrio que permite o seu funcionamento por até 10000 horas.

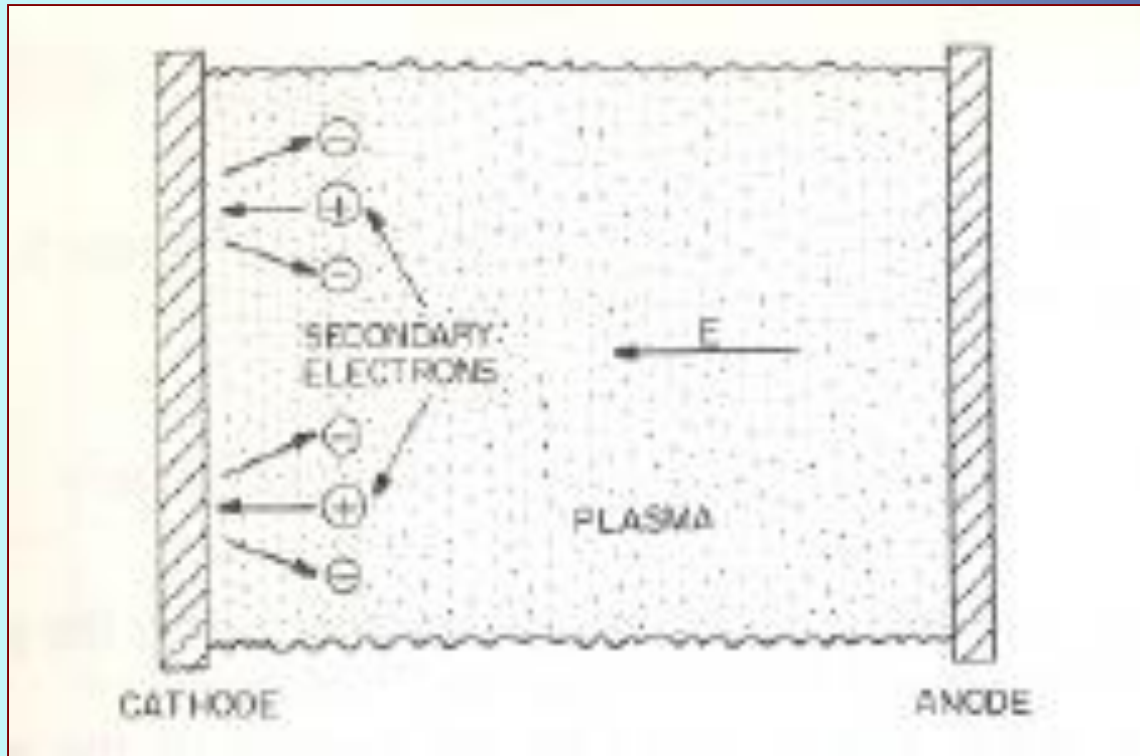
# Emissão catódica

# Emissão catódica

- A emissão catódica é a emissão de elétrons secundários de um cátodo devido ao bombardeamento por elétrons ou por íons. Este é um dos principais mecanismos de manutenção de uma descarga DC e no caso de descargas RF impede o apagamento da descarga nos ciclos negativos.

$$\gamma_e = \frac{\text{\# of electrons emitted}}{\text{\# of ions incident on surface}}$$

# Emissão catódica



# Características de fontes e feixes de elétrons



# Características dos feixes de elétrons

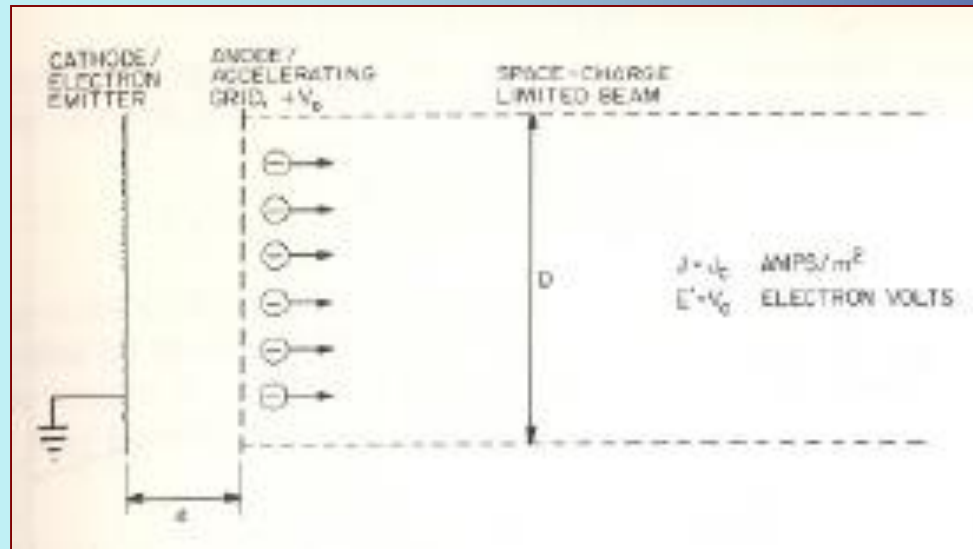
$$v_b = \sqrt{\frac{2eV_0}{m}} \quad (\text{m/s}).$$

$$n_b = n_a = \frac{4\epsilon_0 V_0}{9ed^2} \quad (\text{electrons/m}^3).$$

$$\Gamma_b = \frac{J_e}{e} = v_b n_b = \frac{4\epsilon_0}{9e} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{V_0^{3/2}}{d^2} \quad (\text{electrons/m}^2)$$

$$P_b = J_e V_0 = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{V_0^{5/2}}{d^2} \quad (\text{W/m}^2).$$

# Fontes de elétrons



$$I_b = \frac{\pi D^2}{4} J \quad (\text{A})$$

$$\mathcal{P} \equiv \frac{I_b}{V_0^{3/2}} = \frac{J \pi D^2}{4 V_0^{3/2}} \quad (\text{A}/\text{V}^{3/2})$$

*$\mathcal{P}$  é a perveance*

# Fontes de elétrons

$$P_i = P_d + P_t + P_o = I_b V^* \quad (\text{W})$$

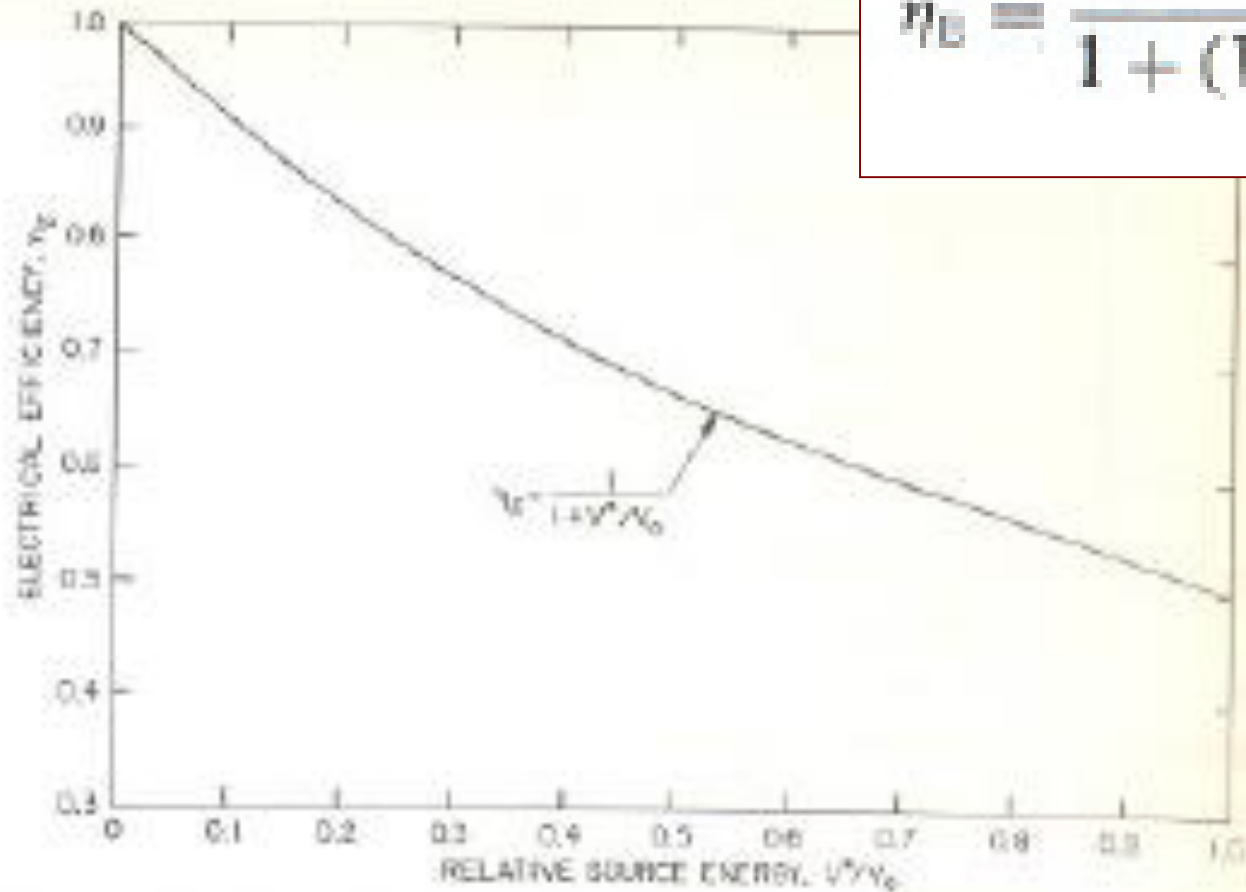
$$P_i = P_b + P_s = I_b(V_0 + V^*) \quad (\text{W}).$$

$$\eta_E = \frac{P_b}{P_i} = \frac{V_0 I_b}{I_b(V_0 + V^*)} = \frac{V_0}{V_0 + V^*}$$

$$\eta_E = \frac{1}{1 + (V^*/V_0)}$$

# Eficiência eletrônica

$$\eta_e = \frac{1}{1 + (V^*/V_0)}$$



# Transporte de partículas

$$\Gamma_b = \frac{4I}{\pi e D^2} \quad (\text{electrons/m}^2\text{-s}).$$

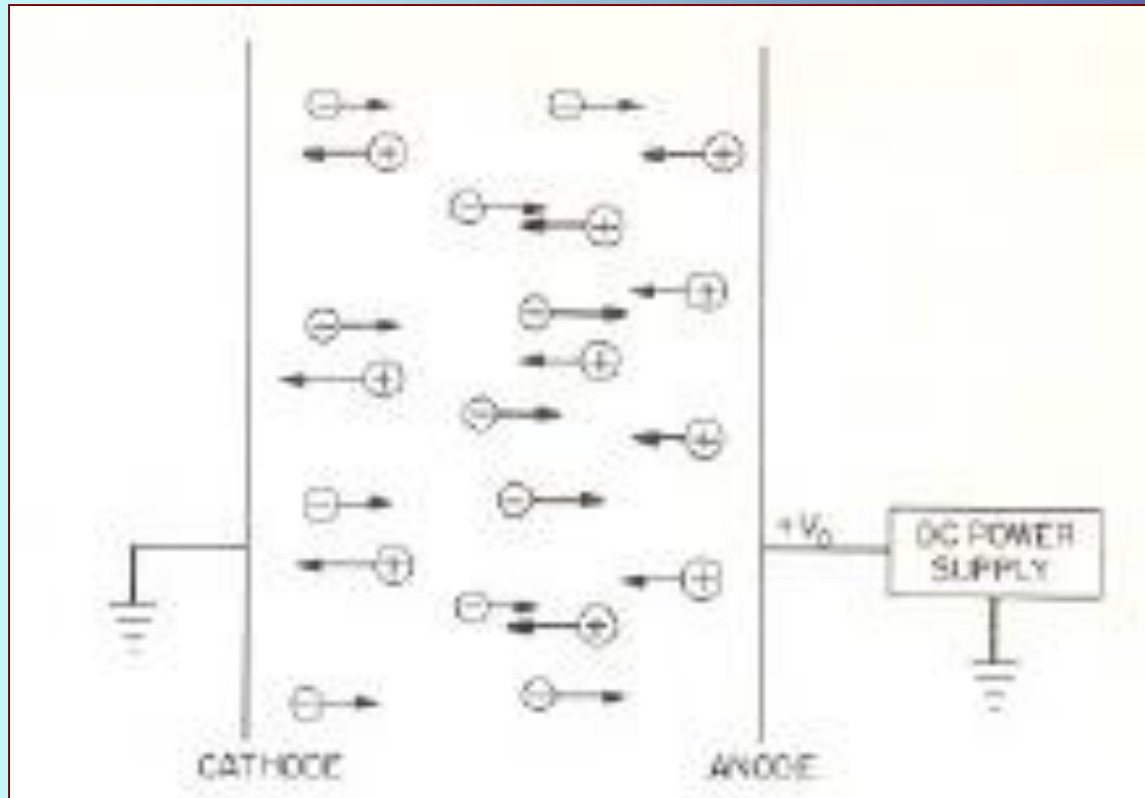
$$\Gamma_b = \frac{J_c}{e} = \frac{\chi V_0^{3/2}}{e d^2} \quad (\text{electrons/m}^2\text{-s})$$

$$J = \frac{I}{A} = \frac{4I}{\pi D^2} = e n_b v_b \quad (\text{A/m}^2)$$

$$n_b = \frac{4I}{\pi e D^2} \sqrt{\frac{m}{2eV_0}} \quad (\text{electrons/m}^3).$$

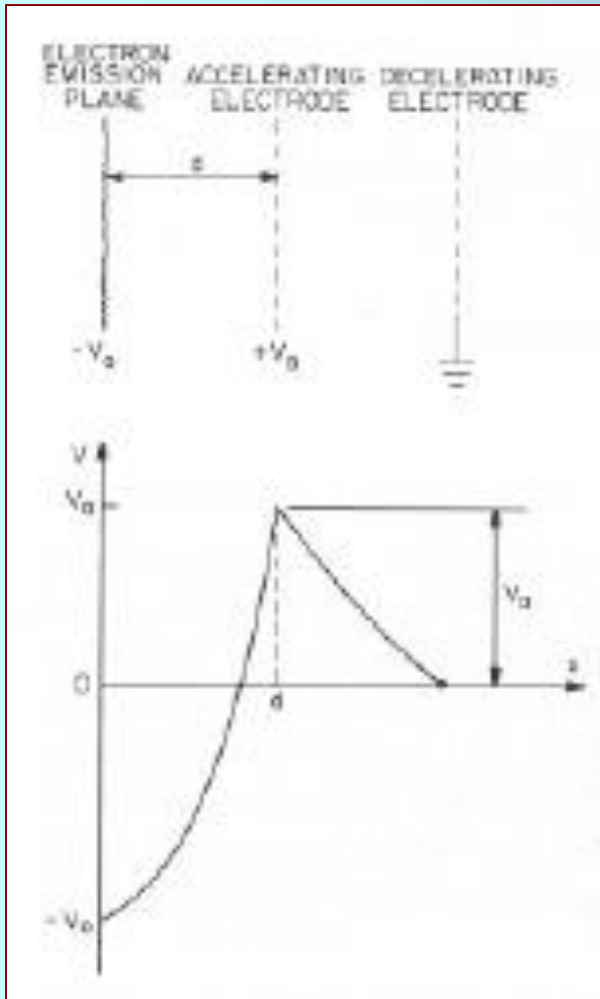
$$n_b = \frac{4\epsilon_0 V_0}{9ed^2} \quad (\text{electrons/m}^3).$$

# Distribuição eletrônica (*Lei de Child*)



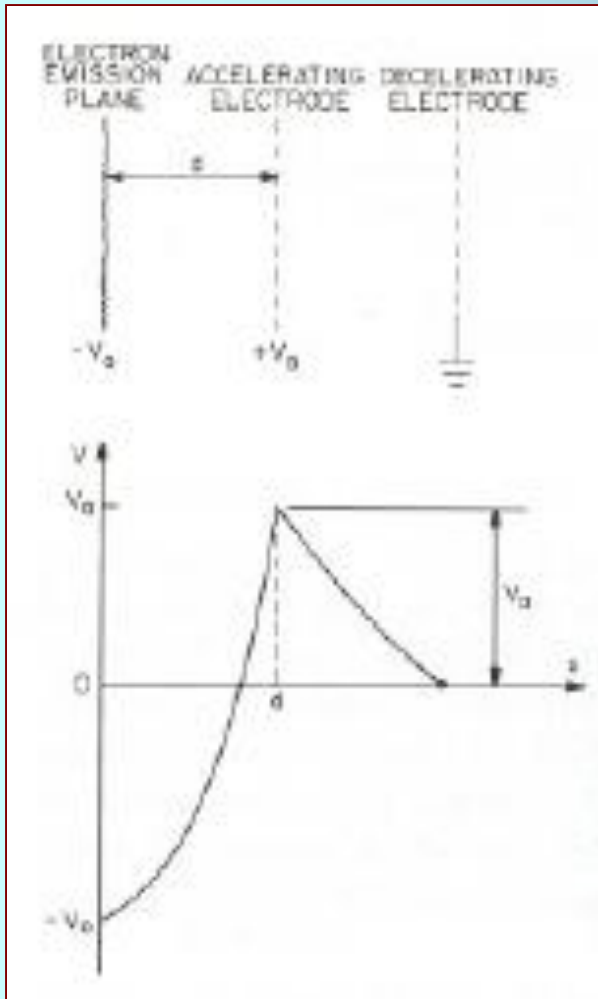
$$J_c = X \frac{V_0^{3/2}}{d^2} \quad (\text{A./m}^2).$$

# Distribuição eletrônica



- Sistema de aceleração e desaceleração. Neste sistema é reduzida a perda de carga por formação de pares, o que ocorre em sistemas convencionais de plasma.

# Distribuição eletrônica

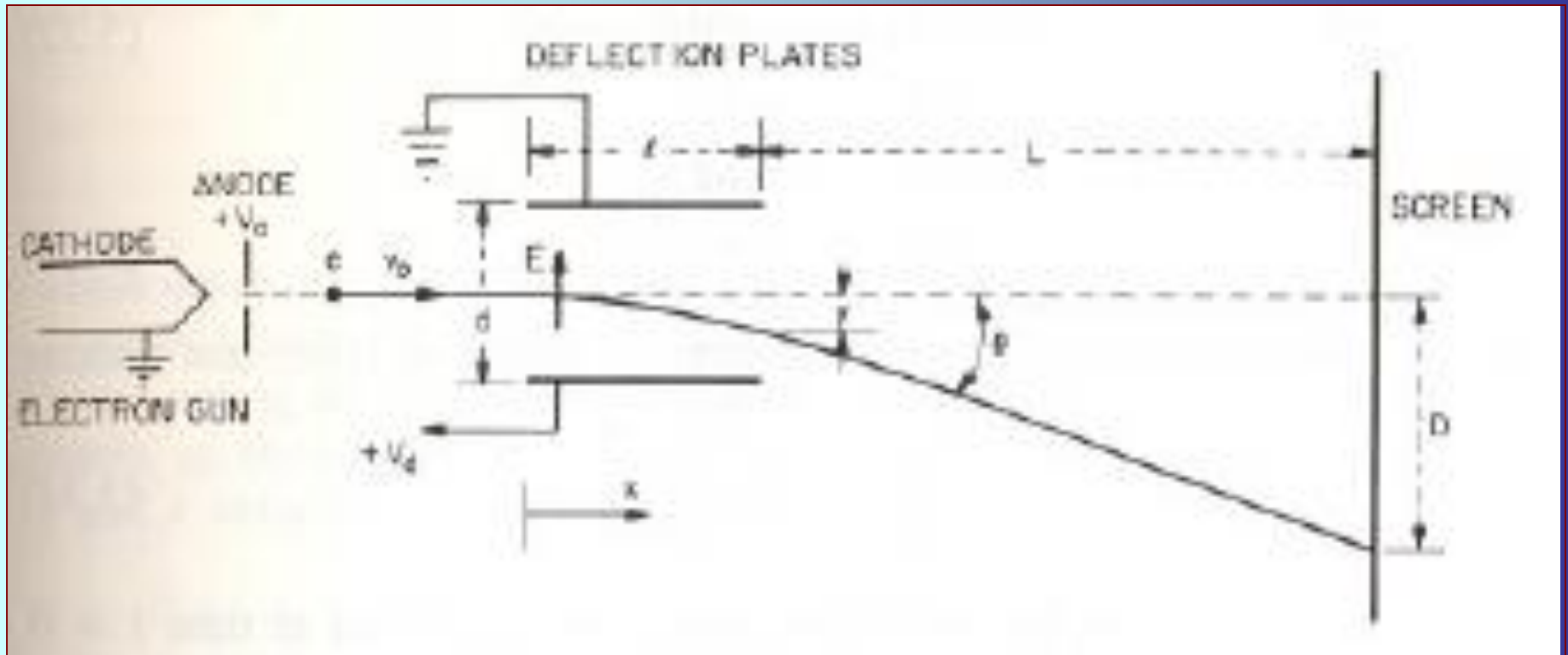


$$J_e = \chi \frac{(V_0 + V_a)^{3/2}}{d^2} \quad (\text{A/m}^2).$$

$$\frac{J_e}{J_c} = \left( \frac{V_0 + V_a}{V_0} \right)^{3/2} = \left( 1 + \frac{V_a}{V_0} \right)^{3/2}.$$

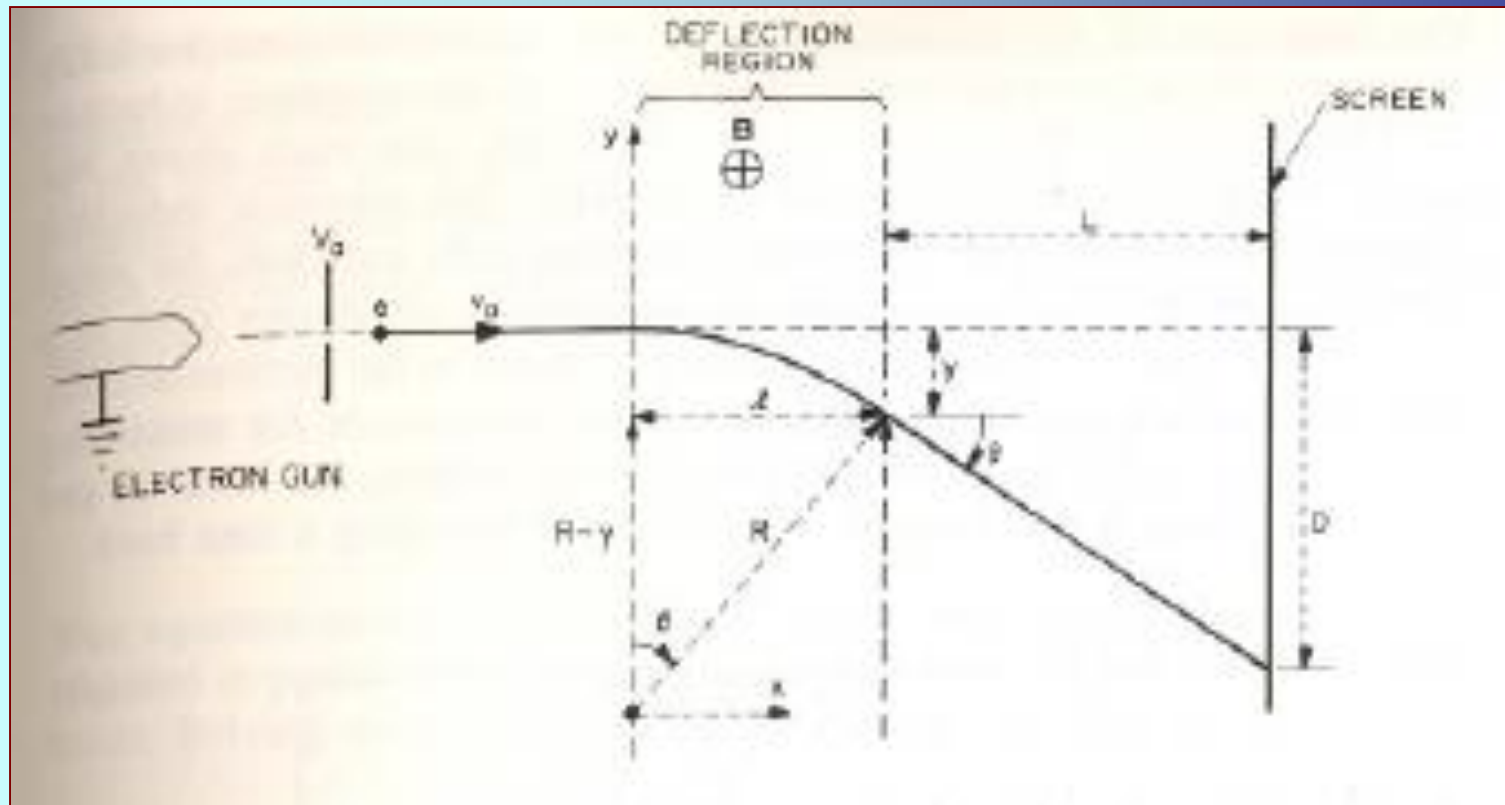


# Deflexão eletrostática



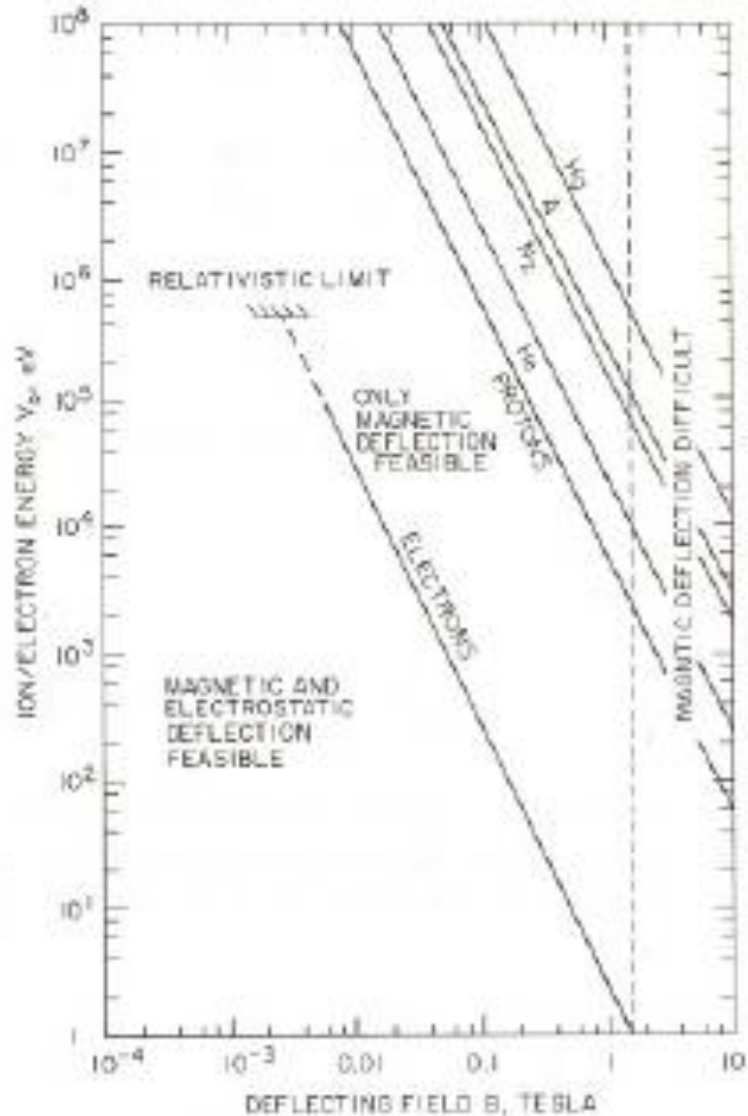
$$D = \left( \frac{\ell^2}{4d} + \frac{\ell L}{2d} \right) \frac{V_d}{V_a} = \frac{\ell}{2dV_a} \left( L + \frac{\ell}{2} \right) V_d$$
$$= \text{constant} \times V_d.$$

# Deflexão eletromagnética



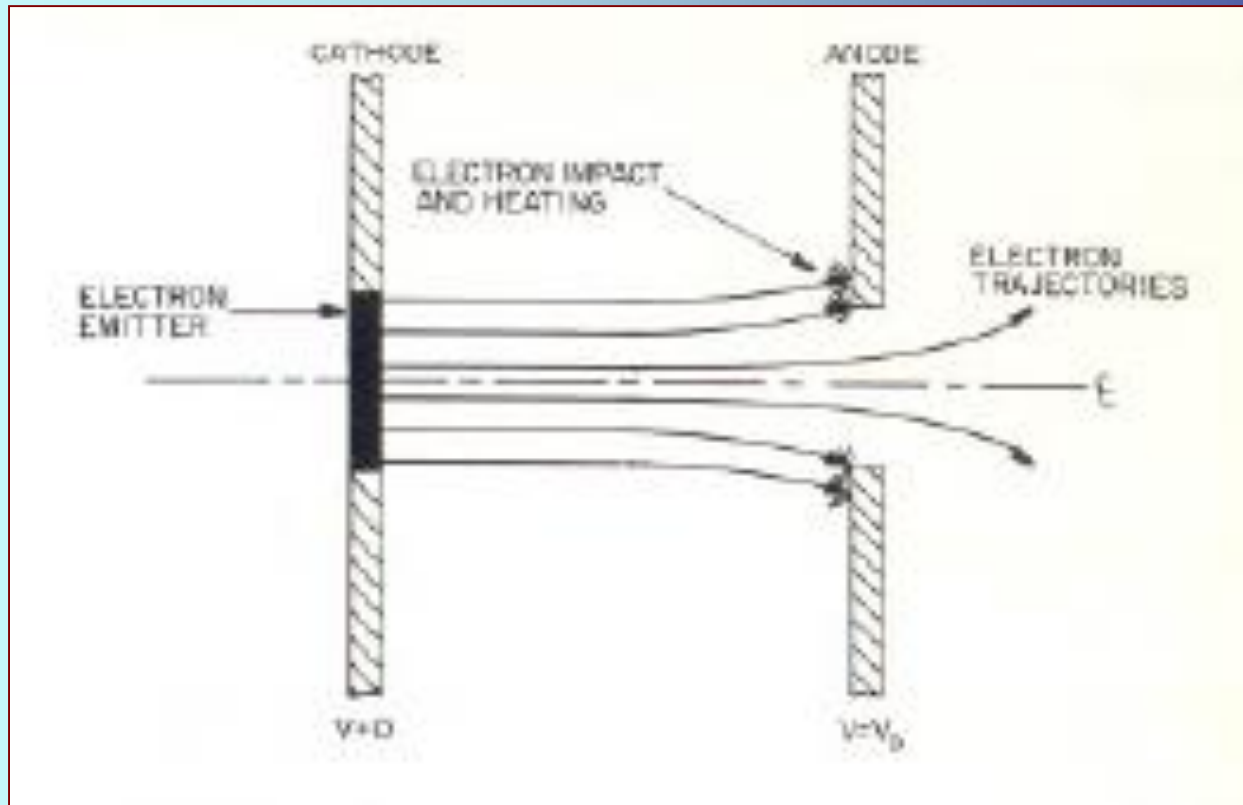
$$D \approx \frac{\ell^2}{2R} + \frac{\ell L}{R} = \frac{\ell}{R} \left( L + \frac{\ell}{2} \right) = \ell \left( L + \frac{\ell}{2} \right) \left( \frac{e}{2m_e V_0} \right)^{1/2} B.$$

# Comparação dos efeitos das deflexões



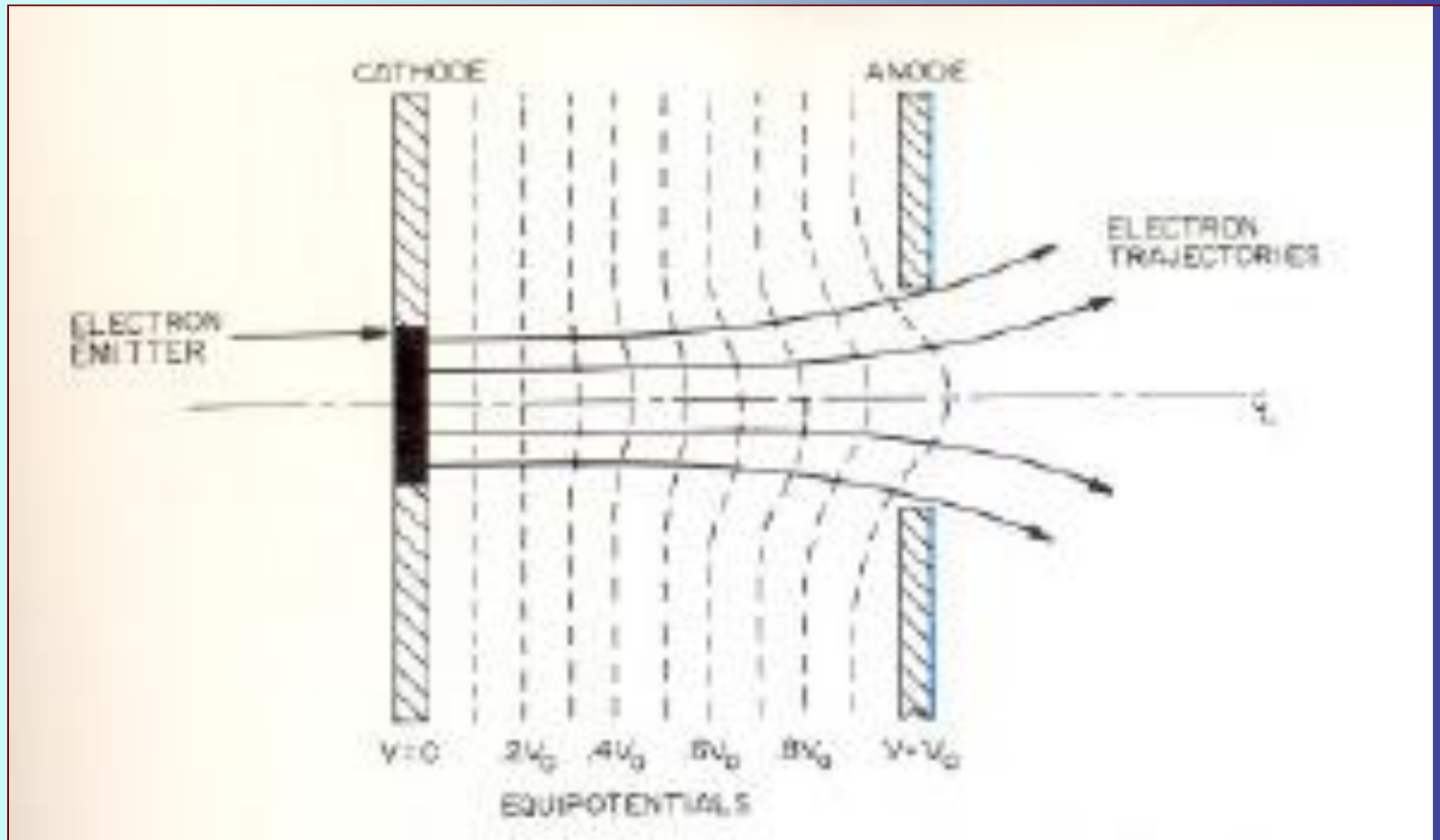
- Comparação dos efeitos das deflexões eletromagnética e eletrostática

# Efeito de lentes em sistemas de deflexão

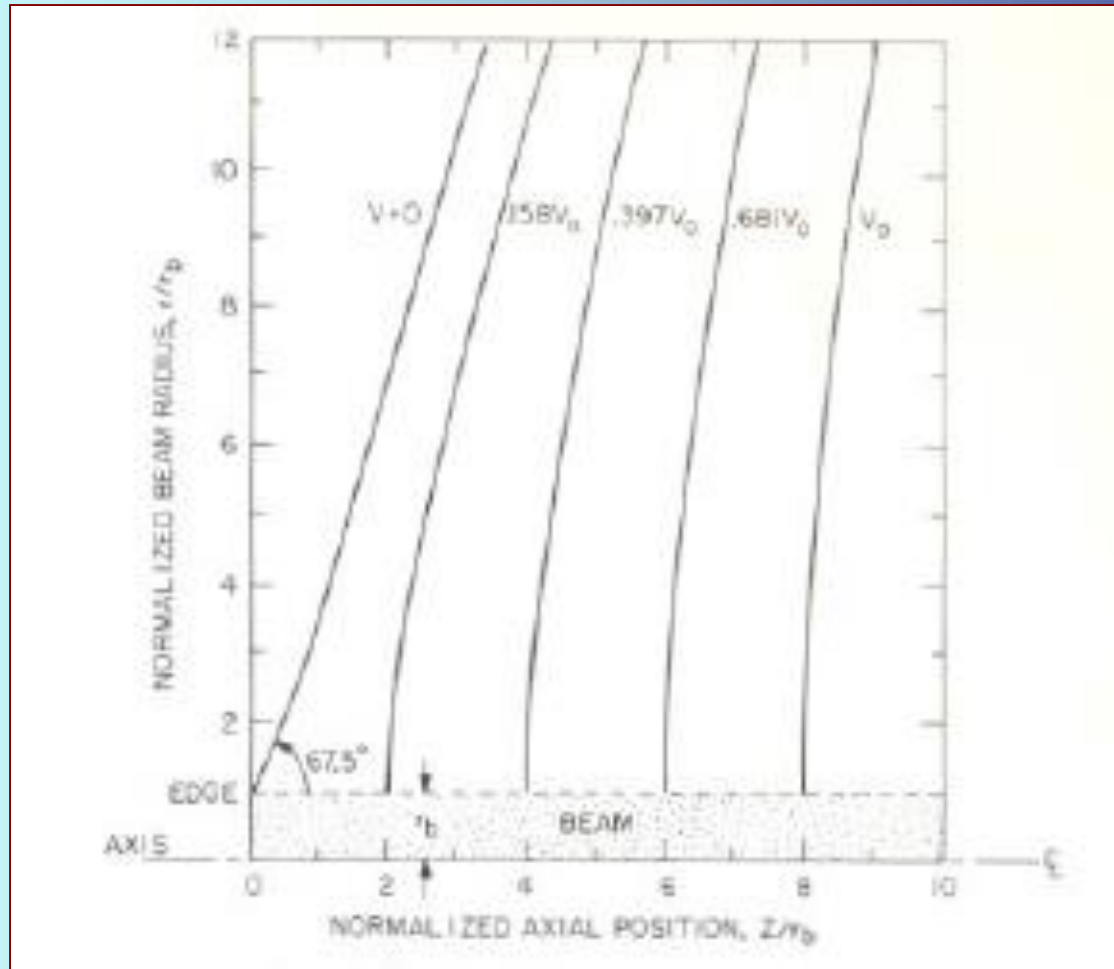


$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} m v_{th}^2 = \frac{m e^2 E^2 \ell^2}{2 m^2 v_0^2} = \frac{e E^2 \ell^2}{4 V_a}$$

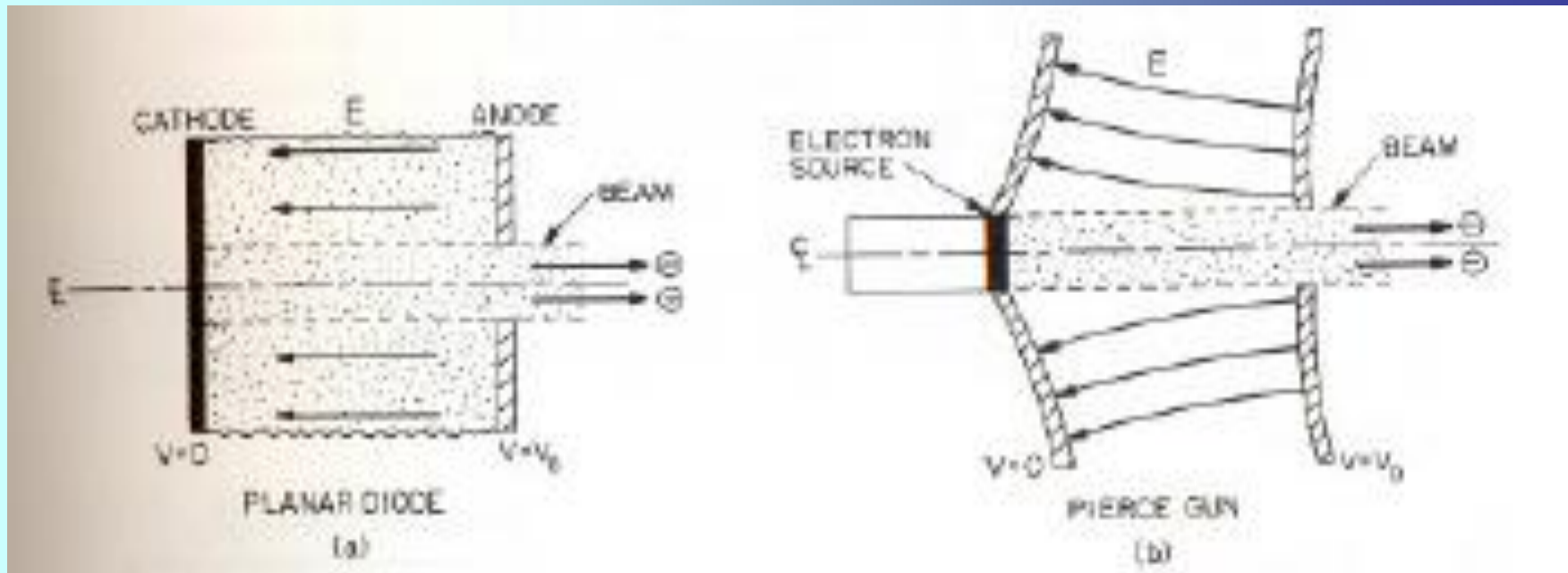
# Sistema de filtragem com equipotenciais



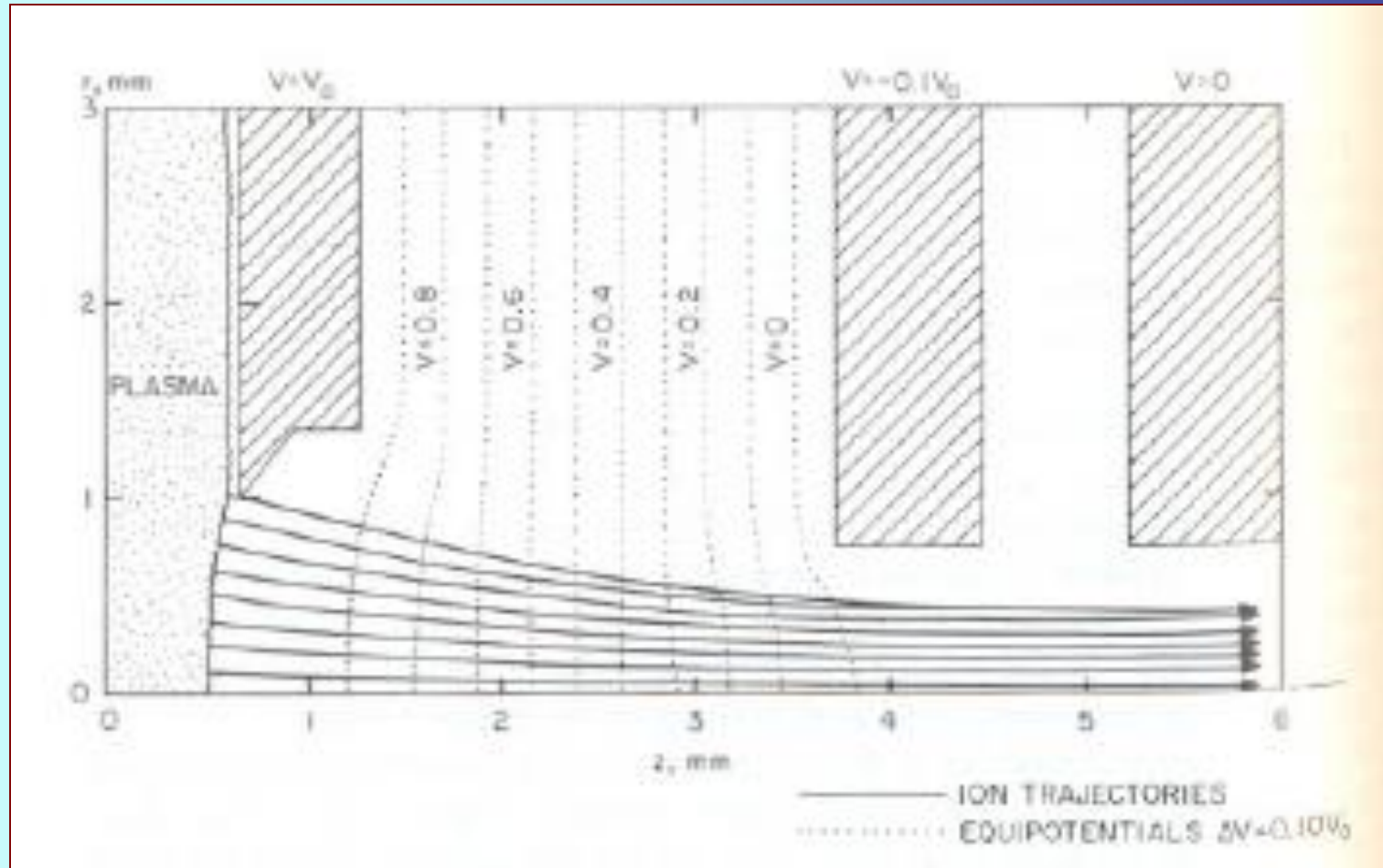
# Sistema de filtragem com equipotenciais



# Sistema de focalização de feixes eletrônicos



# Sistema de focalização com triodo de feixes eletrônicos





# Sistema de focagem por lentes eletrostáticas

