

# Pós-Prática Franck - Hertz

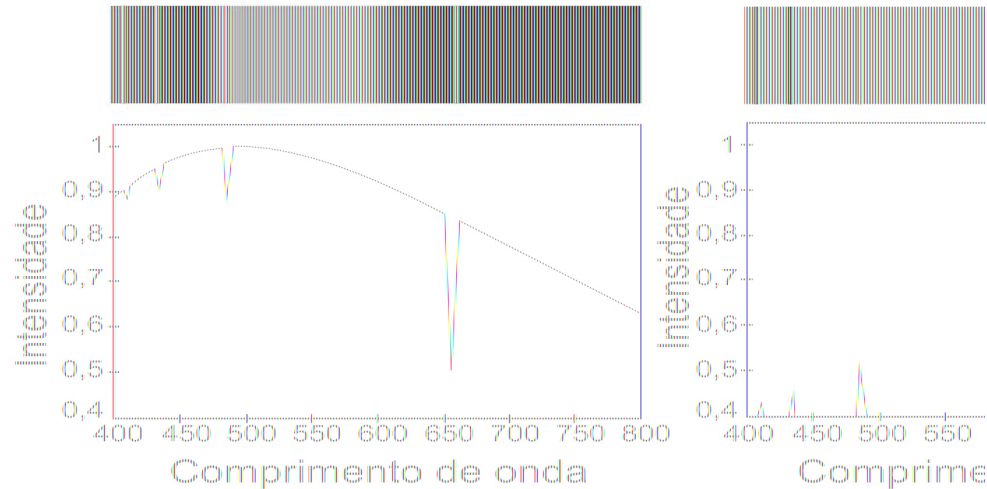
Edmur C. Neto - 12558492  
Rafael F. Gigante - 12610500

Instituto de Física de São Carlos  
Universidade de São Paulo

29/05/2024

# INTRODUÇÃO

## ➤ Espectros Observados Séc. XIX



**Figura 1:** Espectros de absorção e emissão do hidrogênio, na faixa visível.

$$\lambda = B \cdot \left( \frac{m^2}{m^2 - n^2} \right) \quad (a)$$

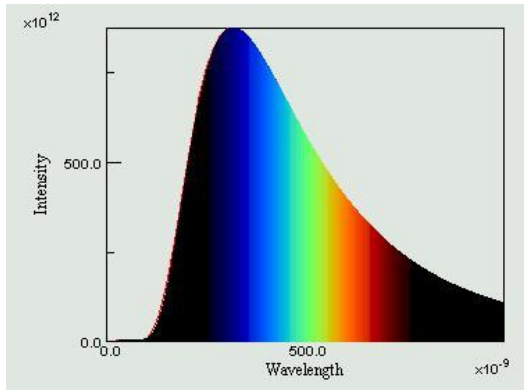
$$\frac{1}{\lambda} = R_h \cdot \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (b)$$

Equações empíricas para descrever o espectro do Hidrogênio: (a) Série de Balmer (1885); (b) Série de Rydberg (1888)

# INTRODUÇÃO

## ➤ Nascimento da Teoria Quântica

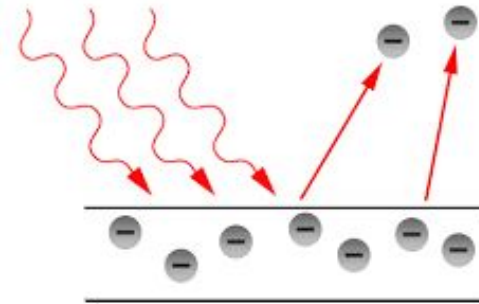
- Estudo de Corpo Negro (Planck 1901)



**Figura 2:** Emissão de corpo negro.

$$\Delta E = nhf$$

- Efeito Fotoelétrico (Einstein 1905)

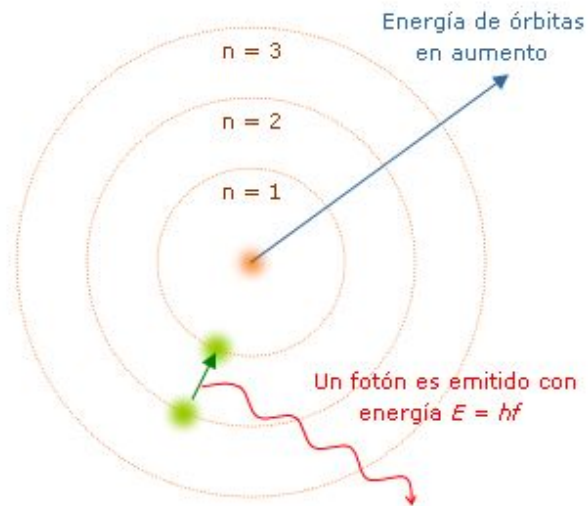


$$E = h\nu$$

**Figura 3:** Ilustração do efeito fotoelétrico.

# INTRODUÇÃO

## ➤ Modelo Atômico de Bohr (1913)



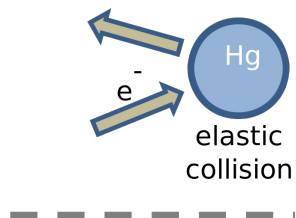
**Figura 4:** Ilustração do modelo atômico de Bohr.

### Hipóteses para o modelo

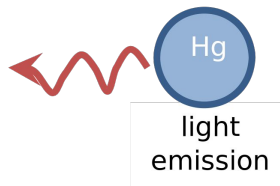
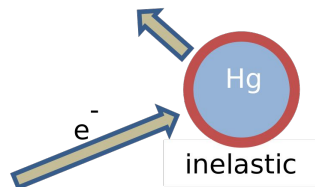
- O elétron pode se mover em determinadas órbitas (estacionárias) sem irradiar, possuindo energias bem definidas.
- O momento angular do elétron é quantizado,  
$$mrv = nh.$$
- Para que o elétron mude de estado estacionário o átomo deve absorver ou emitir radiação. De forma que  
$$E_f - E_i = h\nu.$$

# INTRODUÇÃO

## ➤ Experimento de Franck - Hertz:



**Figura 5:** Colisões elásticas e inelásticas de um elétron com um átomo de mercúrio.



(a)



(b)

**Figura 6:** Criadores do experimento: (a) James Franck; (b) Gustav Hertz.

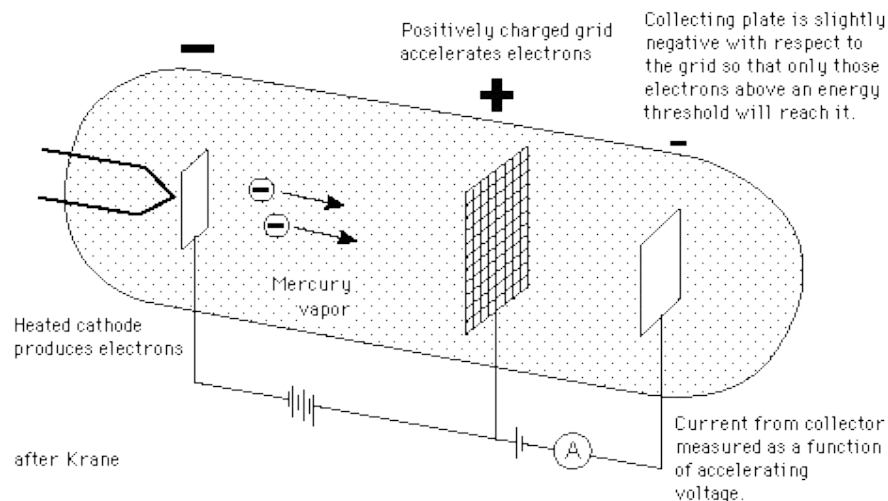


**Prêmio Nobel 1925**

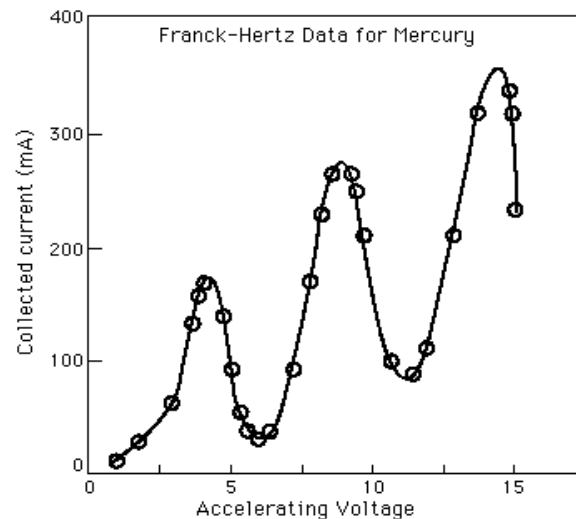
- Estudar a colisão de elétrons com átomos;
- Evidenciou a existência das órbitas estacionárias

# INTRODUÇÃO

## ➤ Montagem experimental:



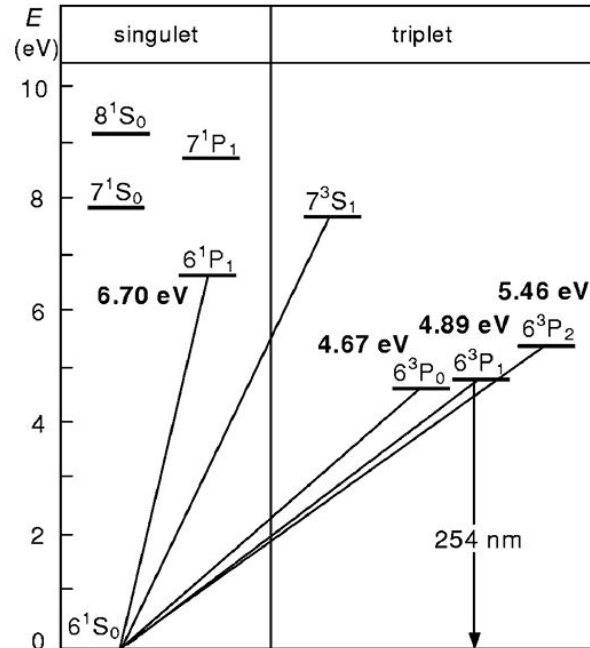
**Figura 7:** Diagrama de uma válvula tetrodo contendo vapor de mercúrio, ilustrando elétrons sendo acelerados.



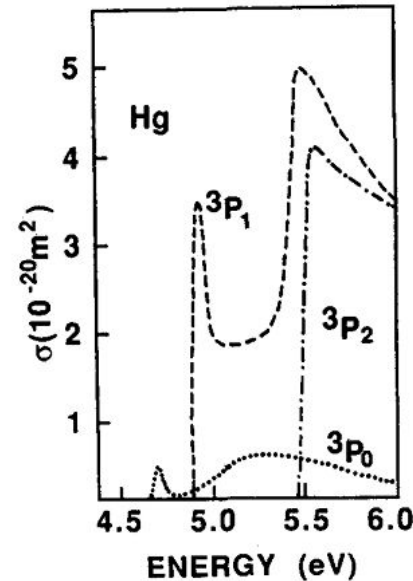
**Figura 8:** Corrente medida no anodo em função da tensão de aceleração dos elétrons.

# INTRODUÇÃO

- Transições dos níveis de energia do mercúrio:



**Figura 9:**  
Esquema simplificado dos níveis de energia dos menores estados do átomo de mercúrio.



**Figura 10:**  
Seções de choque para o impacto de um elétron para alguns estados do mercúrio em função da energia.

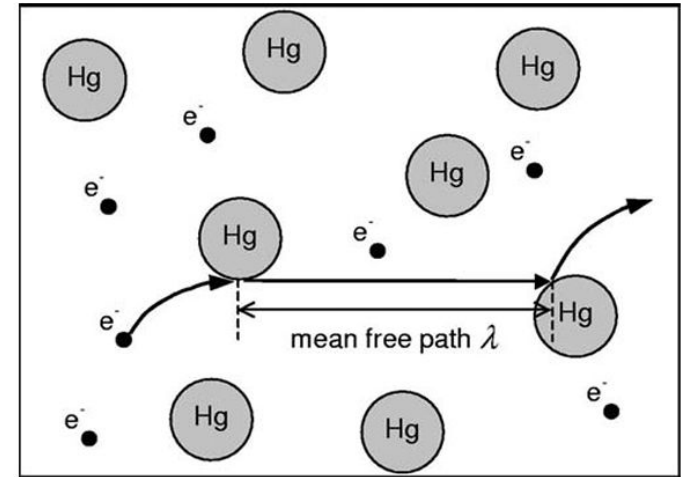
# INTRODUÇÃO

## ➤ Transmissão dos elétrons:

Livre caminho médio: 
$$\lambda = \frac{1}{N\sigma} = \frac{K_B T}{p\sigma} = \frac{K_B T}{p\sqrt{2}\pi d_0^2}$$

Pressão do mercúrio para temperaturas entre 300K e 500K:

$$p = 8.7 \times 10^{(9-(3110/T))}$$

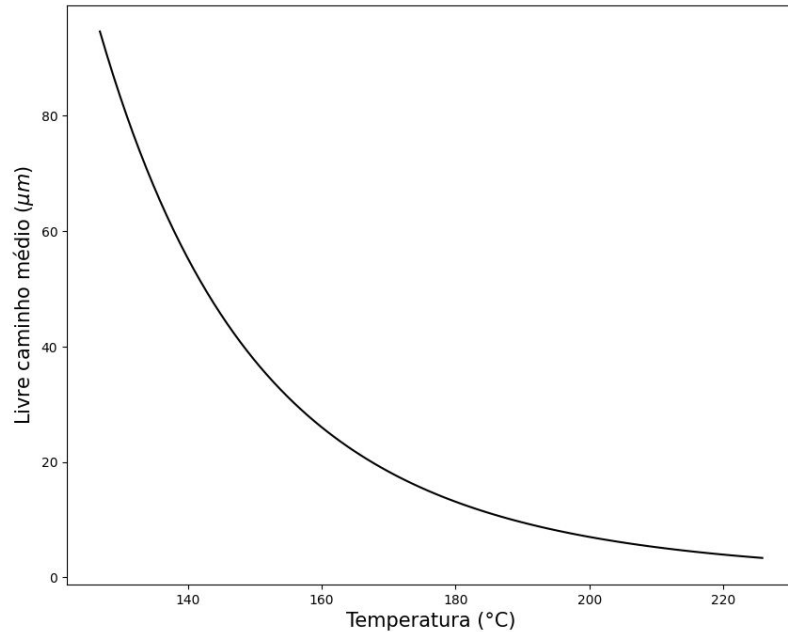


**Figura 11:**

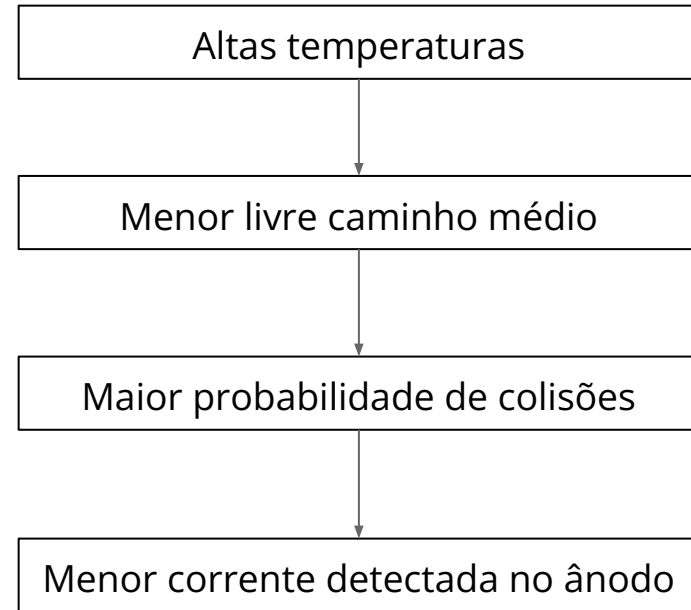
Esquema ilustrando a transferência de energia dos elétrons para os átomos, com o livre caminho médio entre as colisões.



# INTRODUÇÃO



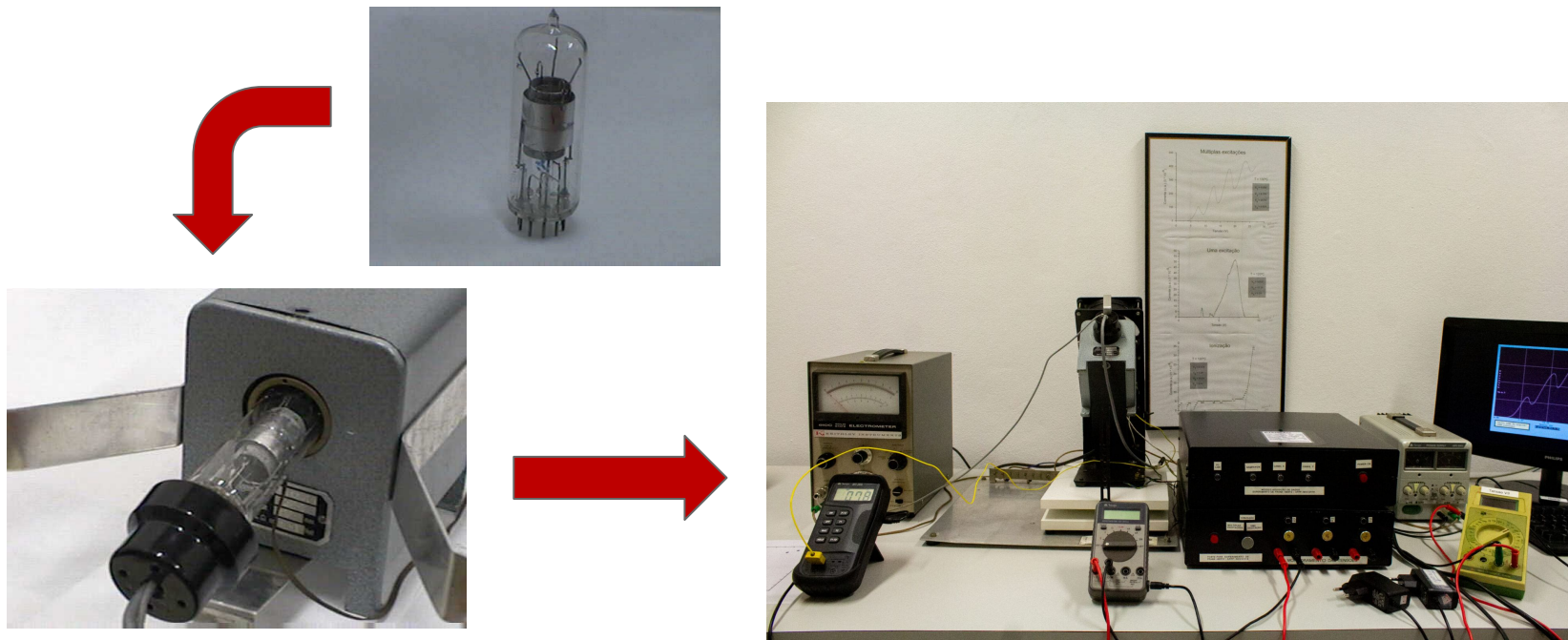
**Figura 12:**  
Dependência do livre caminho médio com a temperatura.



# OBJETIVOS

- Estudar a dinâmica de colisões entre elétrons e átomos, utilizando a curva de corrente por tensão;
  - **Uma excitação:** Analisar a dependência da curva de uma colisão com a variação da temperatura do forno.
  - **Múltiplas colisões:** Analisar o comportamento das múltiplas colisões do elétron para diferentes temperaturas e estudar a curva de corrente por tensão para temperatura fixa. Obter o potencial de contato.
  - **Ionização:** Analisar o surgimento de uma corrente positiva, interpretando para diferentes temperaturas. Determinar a energia de ionização do átomo.

# EXPERIMENTO

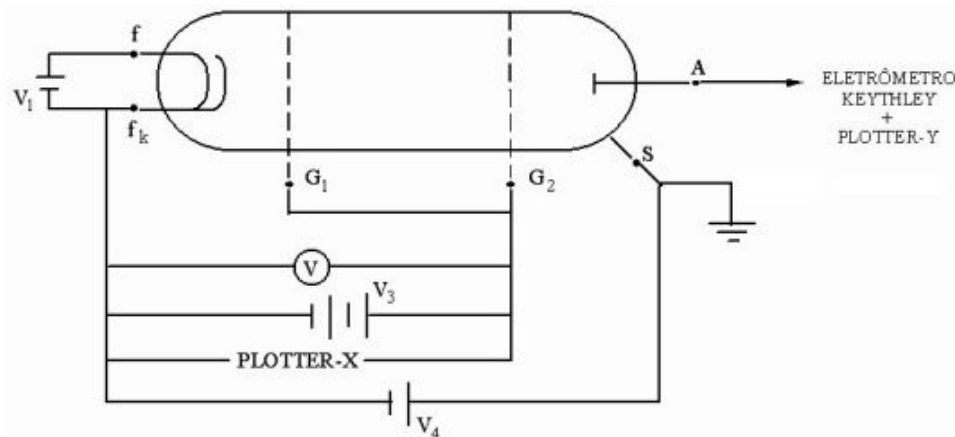


**Figura 13:**  
Imagens do aparato experimental a ser utilizado.

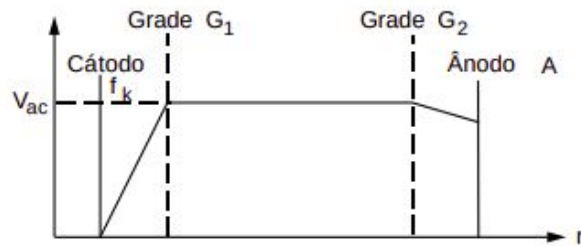
# EXPERIMENTO

## ➤ Uma Excitação:

- As tensões utilizadas serão  $V_4$  por volta de 2V e  $V_3$  em torno de 10 a 15V com  $V_1$  na tensão máxima. Dessa forma, colhemos os dados da curva para diferentes temperaturas (40°C, 60°C, 80°C, 100°C e 130°C);



(a)



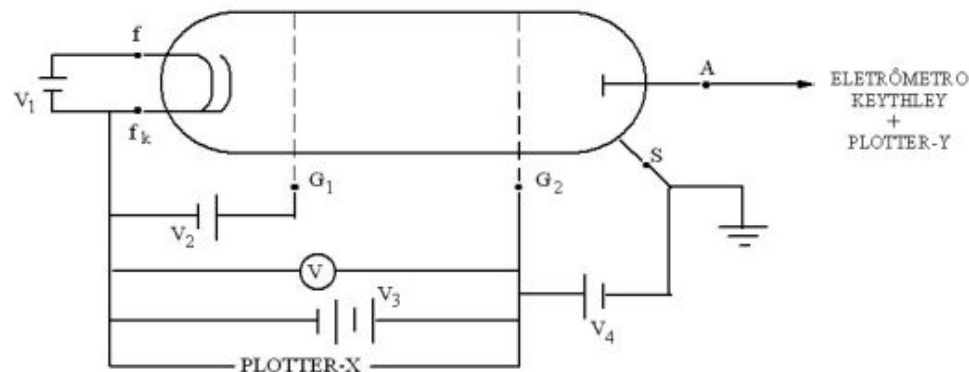
(b)

**Figura 14:** (a) Esquema do experimento de uma excitação, (b) ilustração da tensão sobre o elétron.

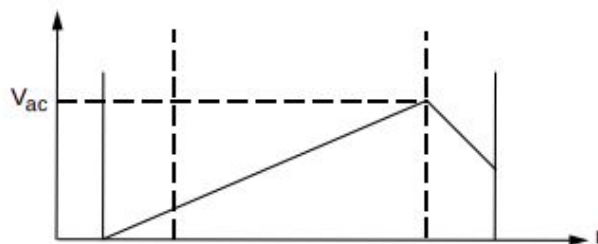
# EXPERIMENTO

## ➤ Múltiplas Excitações:

- Variar a temperatura do forno entre ( $120^{\circ}\text{C}$ ,  $130^{\circ}\text{C}$ ,  $140^{\circ}\text{C}$ ,  $150^{\circ}\text{C}$ ,  $160^{\circ}\text{C}$ ), mantendo  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_4$  por volta de  $0.5\text{V}$  e  $V_3$  em  $50\text{V}$ ;
- Manter o forno a  $160^{\circ}\text{C}$  e variar  $V_4$ , variar logo após a tensão do filamento. Repetir para temperatura fixa de  $170^{\circ}\text{C}$



(a)



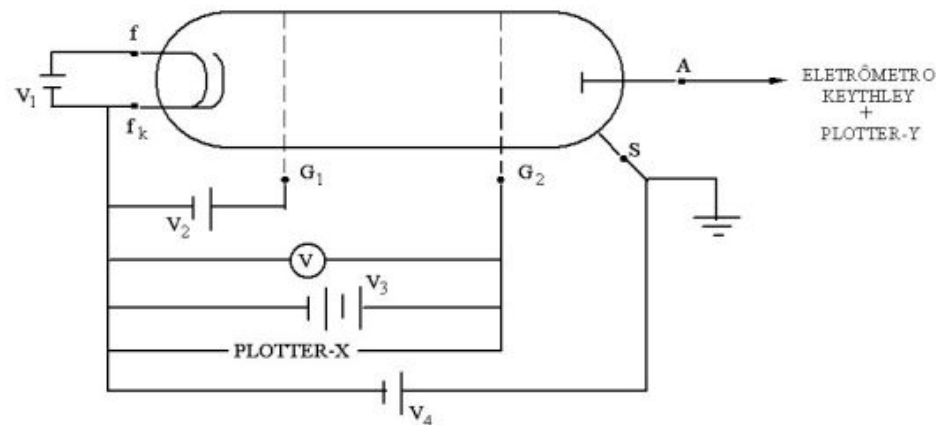
(b)

**Figura 15:** (a) Esquema do experimento de múltiplas colisões, (b) ilustração da tensão sobre o elétron.

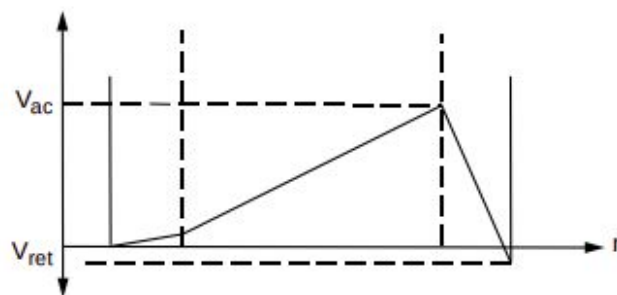
# EXPERIMENTO

## ➤ Ionização:

- As tensões  $V_1$  e  $V_4$  permanecerão máximas com  $V_2$  por volta de 3V e  $V_3$  a 25V. Alterando a temperatura entre 130°C, 115°C e 100°C, assim analisamos a curva em função da temperatura;



(a)

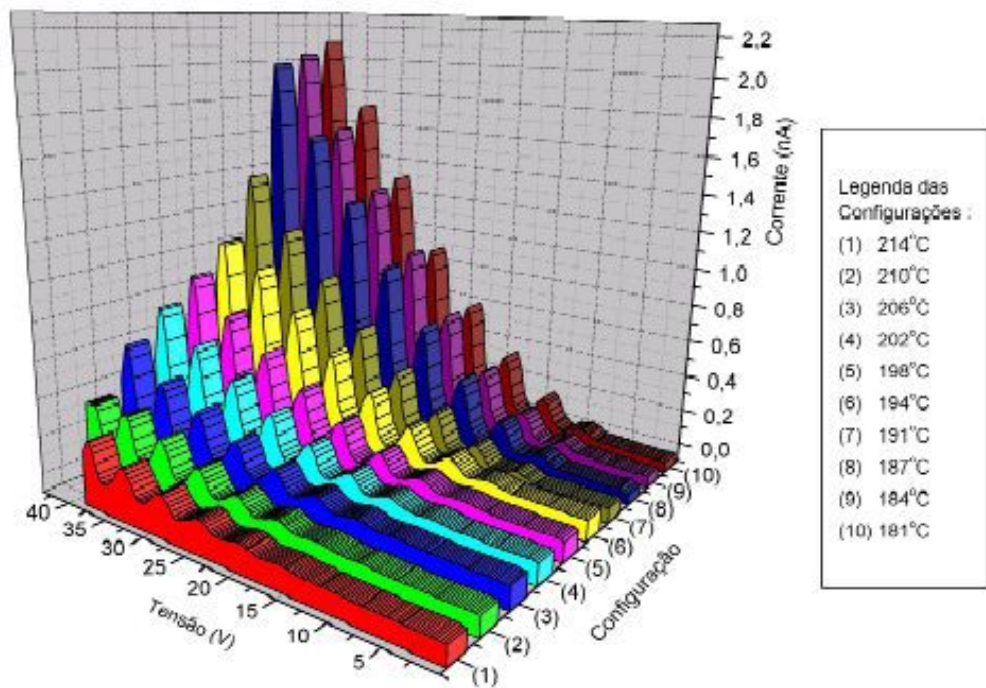


(b)

**Figura 16:** (a) Esquema do experimento de ionização, (b) ilustração da tensão sobre o elétron.

# RESULTADOS ESPERADOS

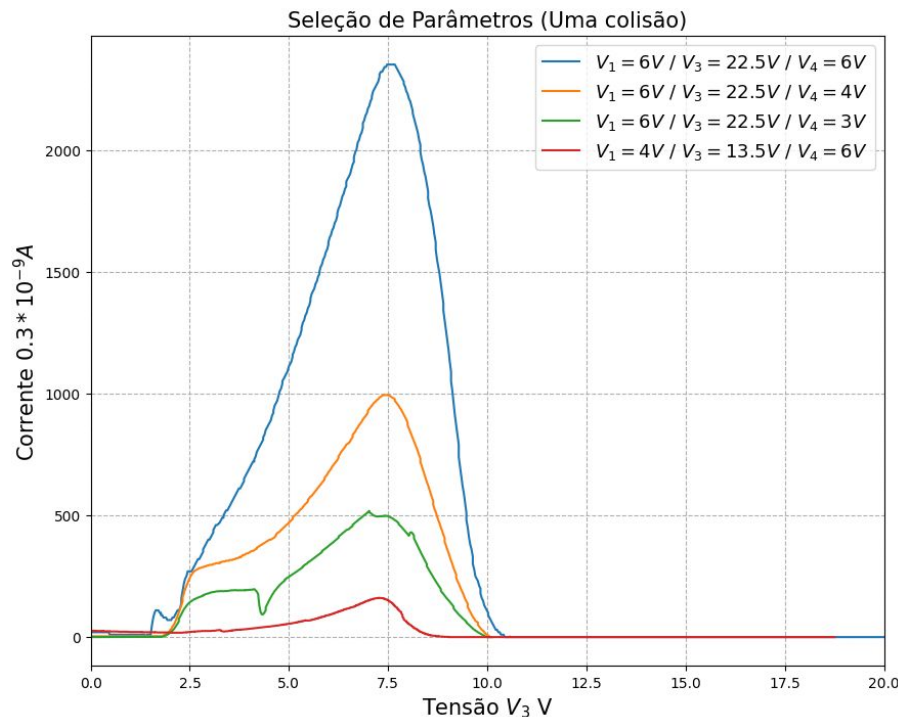
- Espera-se reproduzir os resultados obtidos por Franck-Hertz em 1914.



**Figura 17:** Representação tridimensional das curvas características obtidas no experimento de Franck-Hertz.

# RESULTADOS OBTIDOS

## ➤ Uma excitação:



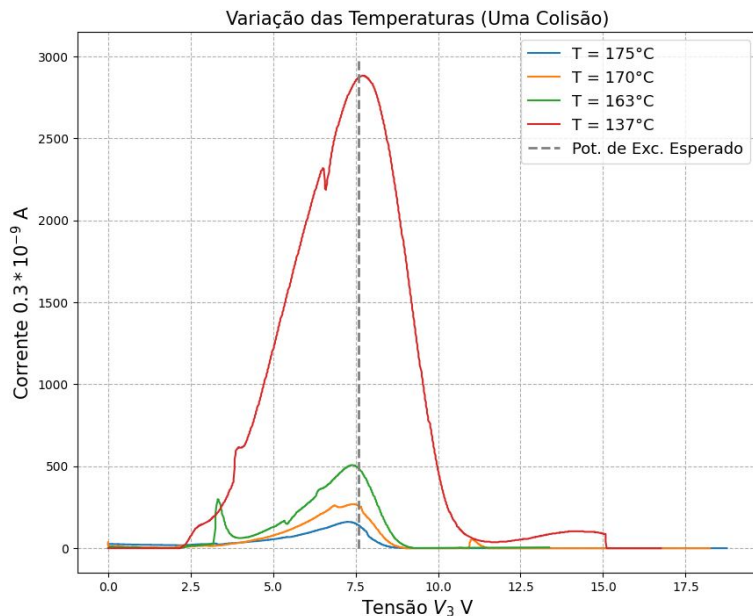
- Variação dos parâmetros para uma temperatura fixa de  $175^\circ \text{C}$ .
- Parâmetros ótimos:  $V_1 = 4 \text{ V}$   
 $V_3 = 13.5 \text{ V}$   
 $V_4 = 6 \text{ V}$

**Figura 18:** Gráfico de otimização dos parâmetros experimentais para uma excitação do mercúrio.

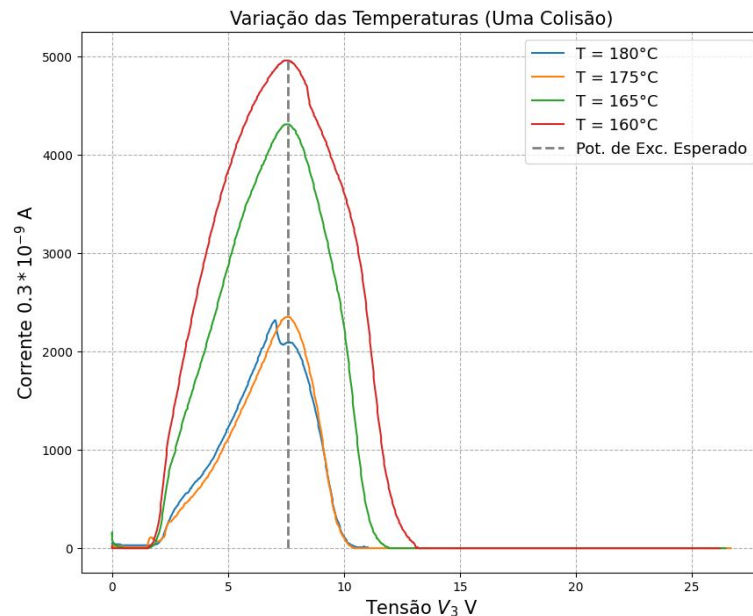


# RESULTADOS OBTIDOS

$V_1 = 4 \text{ V}$ ,  $V_3 = 13.5 \text{ V}$ ,  $V_4 = 6 \text{ V}$



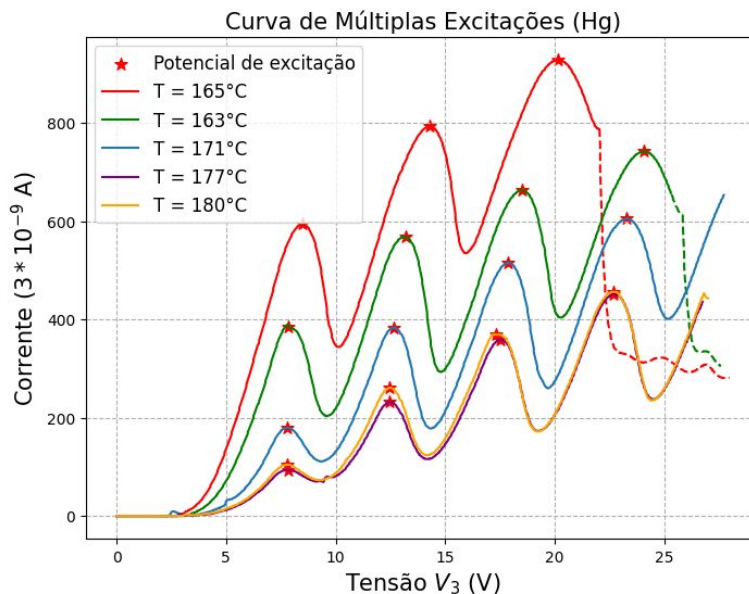
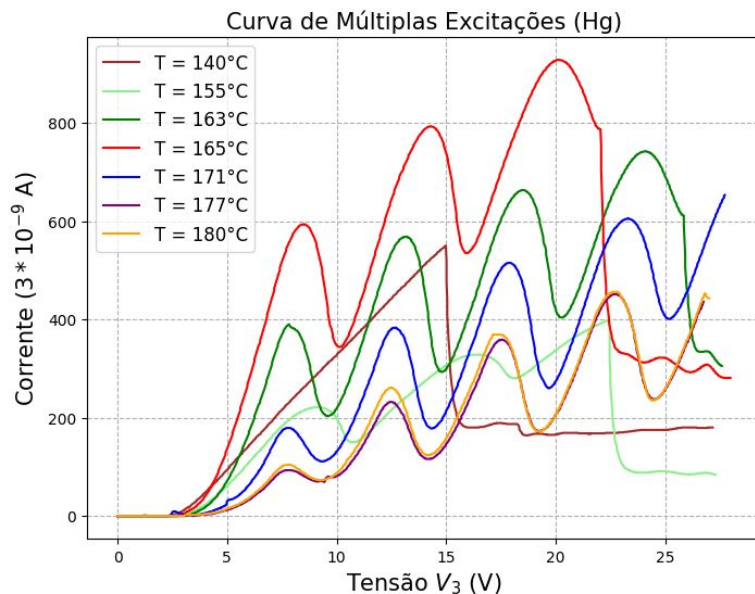
$V_1 = 6 \text{ V}$ ,  $V_3 = 22.5 \text{ V}$ ,  $V_4 = 6 \text{ V}$



**Figura 19:** Gráficos de corrente versus tensão obtidos para uma colisão no mercúrio em duas configurações diferentes.

# RESULTADOS OBTIDOS

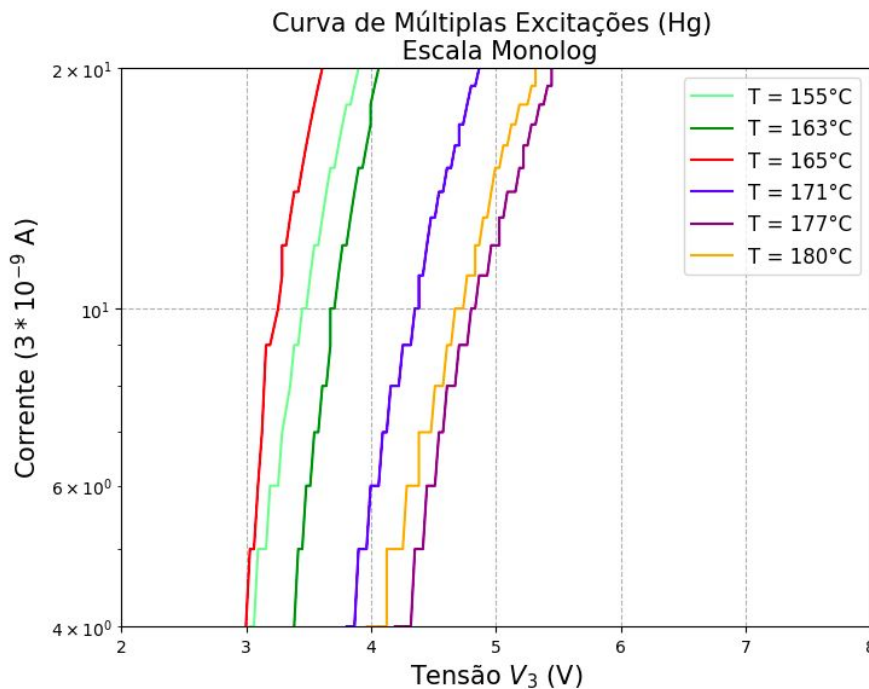
➤ **Múltiplas colisões:**  $V_1 = 5.2 \text{ V}$ ,  $V_2 = 6.23 \text{ V}$ ,  $V_3 = 24.51 \text{ V}$ ,  $V_4 = 0.49 \text{ V}$



**Figura 20:** Gráficos de corrente versus tensão obtidos para uma múltiplas colisões do mercúrio.

# RESULTADOS OBTIDOS

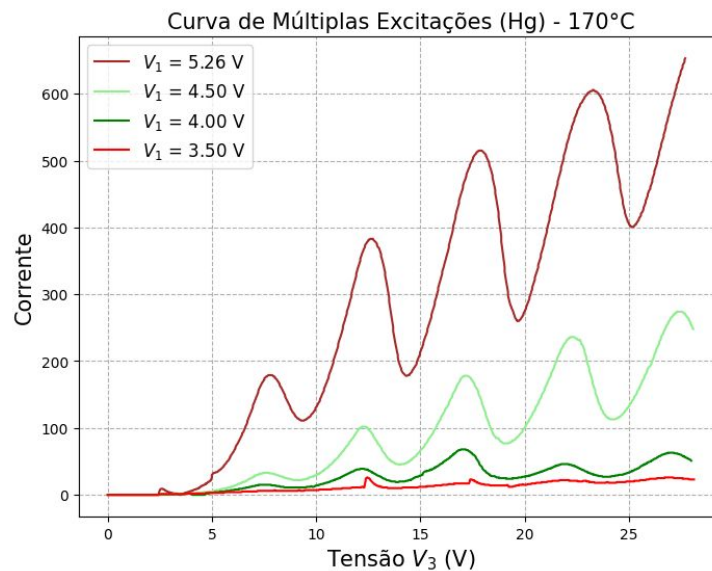
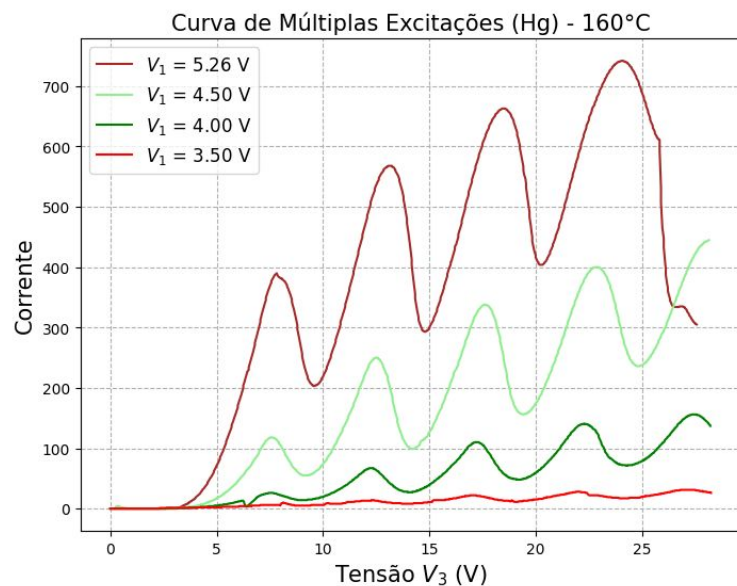
➤ **Múltiplas colisões:**  $V_1 = 5.2 \text{ V}$ ,  $V_2 = 6.23 \text{ V}$ ,  $V_3 = 24.51 \text{ V}$ ,  $V_4 = 0.49 \text{ V}$



**Figura 21:** Gráfico de corrente versus tensão, com y na escala logarítmica, demonstrando os diferentes potenciais para a emissão dos elétrons.

# RESULTADOS OBTIDOS

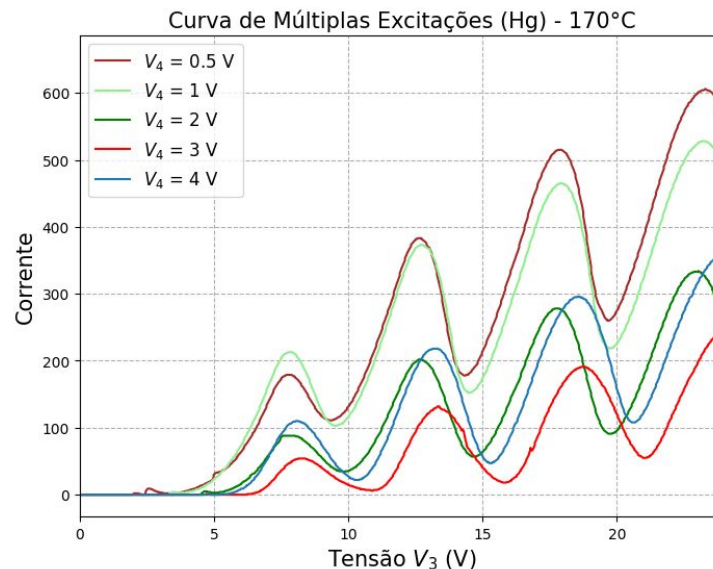
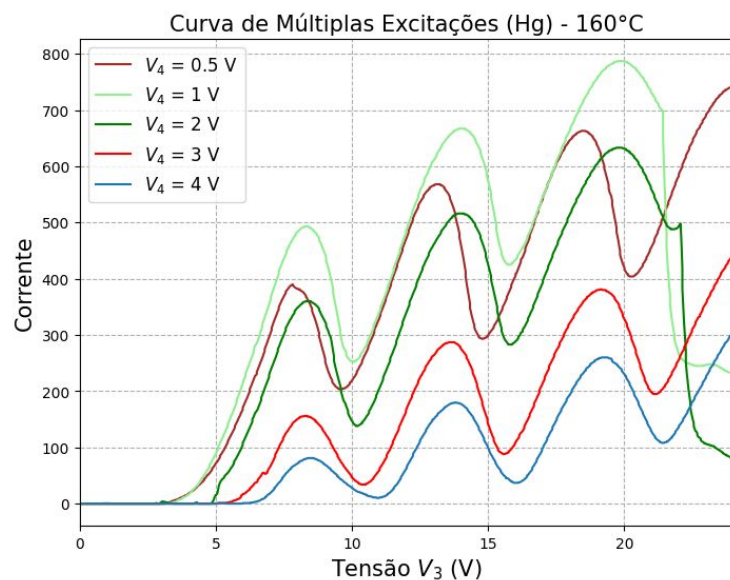
➤ **Variação do  $V_1$ :**  $V_2 = 6.23 \text{ V}$ ,  $V_3 = 24.51 \text{ V}$ ,  $V_4 = 0.49 \text{ V}$



**Figura 22:** Gráficos de corrente versus tensão obtidos para variação da tensão do filamento para temperaturas fixas.

# RESULTADOS OBTIDOS

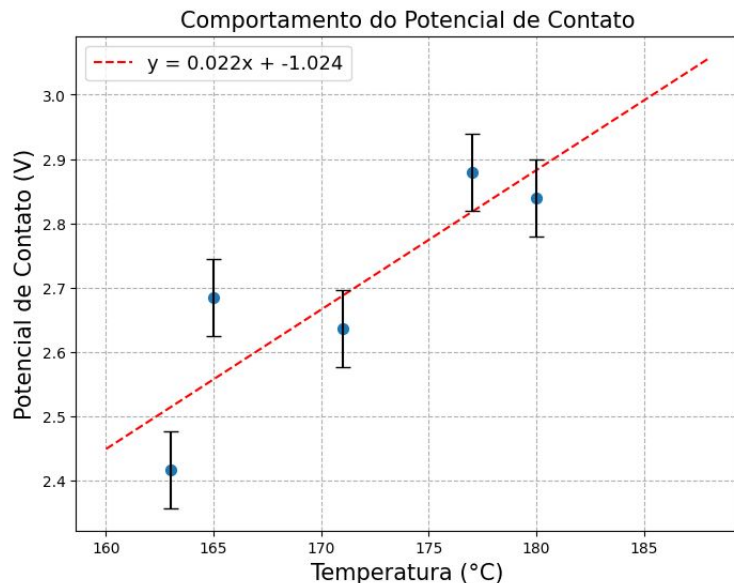
➤ **Variação do  $V_4$ :**  $V_1 = 5.2 \text{ V}$ ,  $V_2 = 6.23 \text{ V}$ ,  $V_3 = 24.51 \text{ V}$



**Figura 23:** Gráficos de corrente versus tensão obtidos para variação do potencial de retardo para temperaturas fixas.

# RESULTADOS OBTIDOS

## ➤ Potencial de contato:

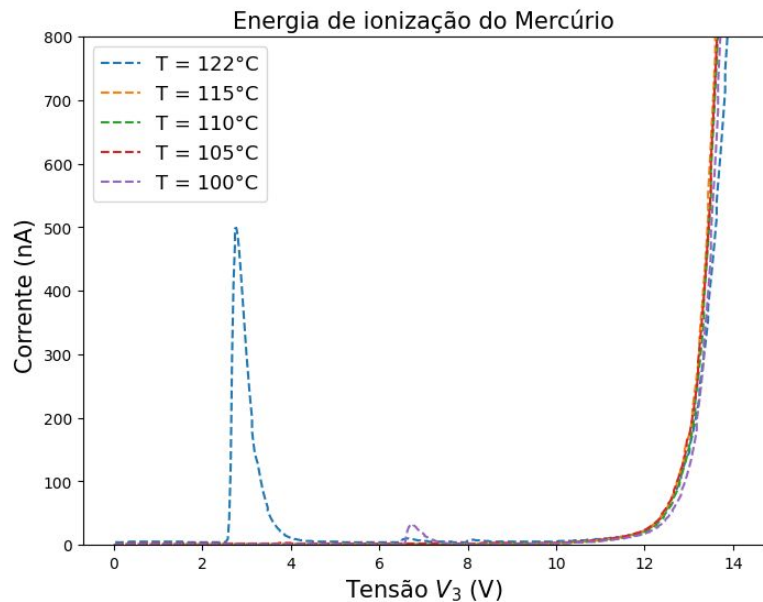


Temperatura (°C)	Pot. Contato (V) ± 0.06	Energia de Exc. Hg (eV) ± 0.09
163	2.42	5.41
165	2.69	5.81
171	2.64	5.16
177	2.88	4.95
180	2.84	4.96
Médias	$\bar{P} = 2.69 \pm 0.06$	$\bar{E} = 5.26 \pm 0.09$

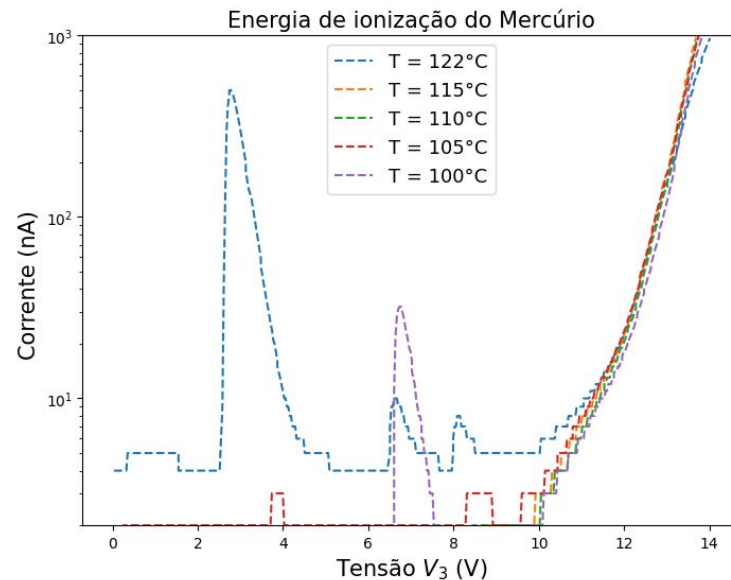
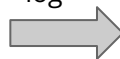
**Figura 24:** Potencial de contato para diferentes temperaturas.

# RESULTADOS OBTIDOS

## ➤ Ionização:



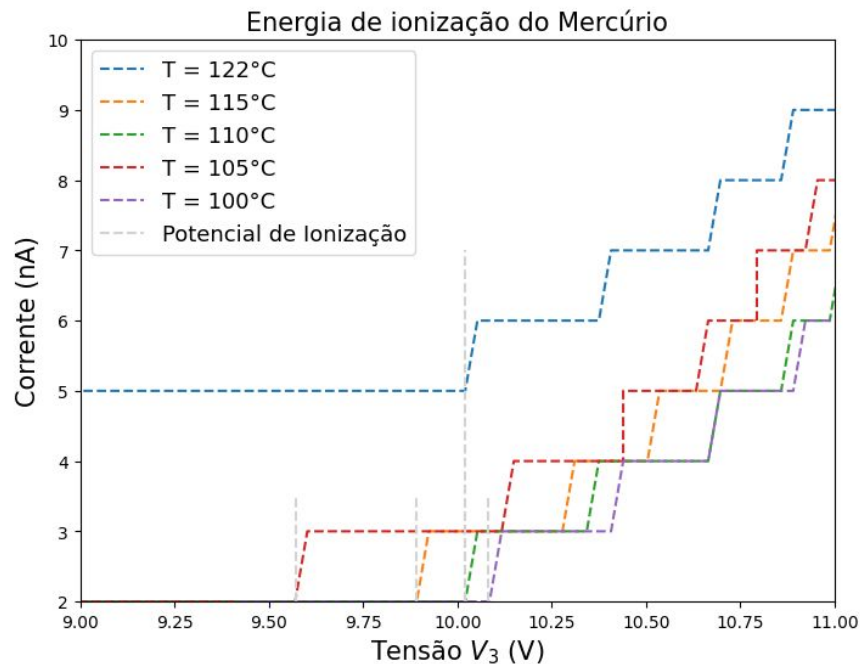
Escala  
log



**Figura 25:** Energia de ionização do mercúrio para diferentes temperaturas.



# RESULTADOS OBTIDOS

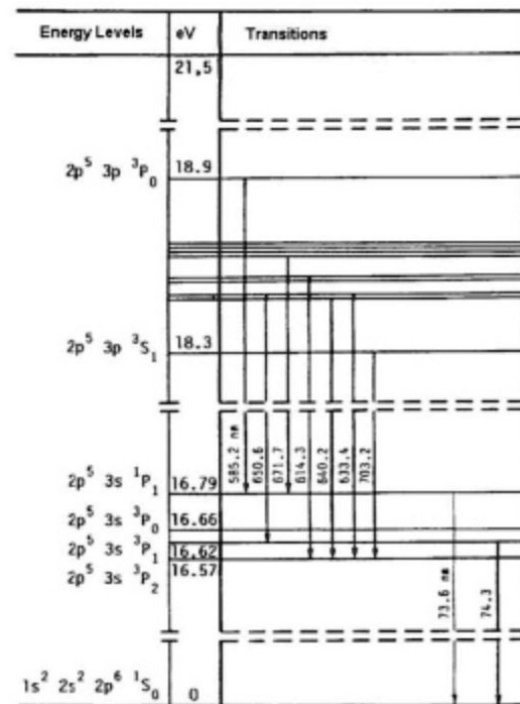
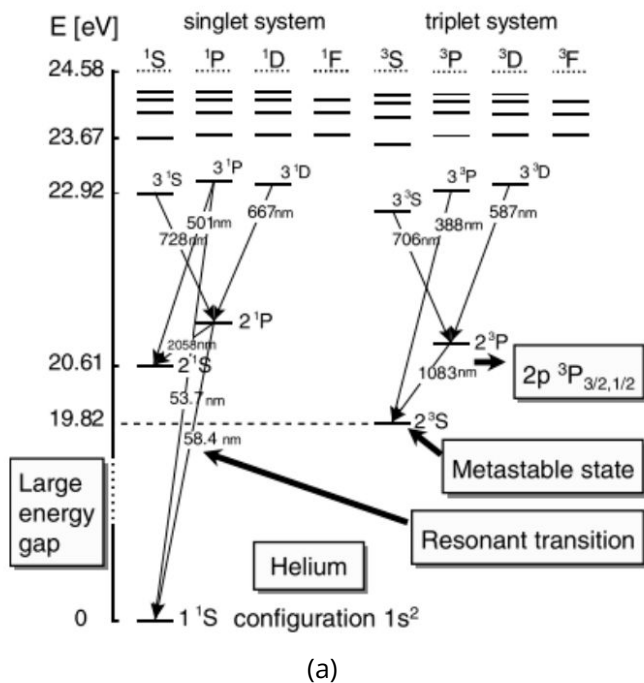


Temperatura ( $^\circ\text{C}$ )	Energia de Ionização (eV) $\pm 0.03$
100	10.08
105	9.57
110	10.02
115	9.89
122	10.02
Experimental	$E = 9.91 \pm 0.03$
Esperado	$E = 10.44$

**Figura 26:** Energia de ionização do mercúrio para diferentes temperaturas.



# RESULTADOS OBTIDOS



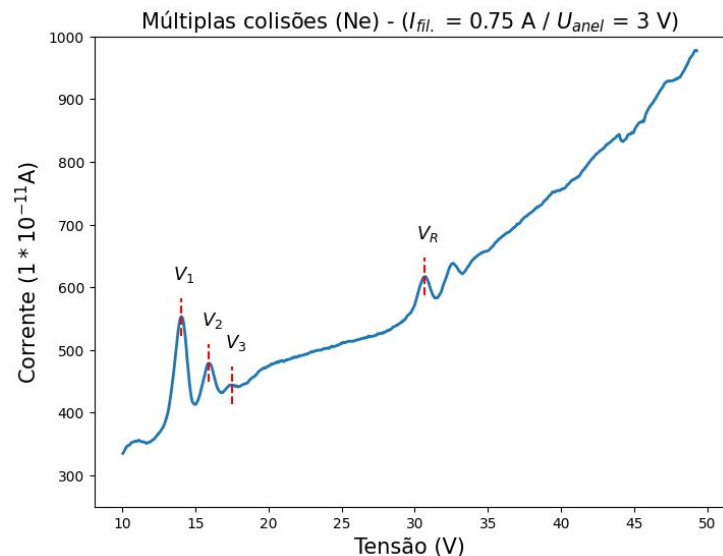
**Figura 27:** Diagramas dos níveis de energia (a) Hélio (b) Neônio

# RESULTADOS OBTIDOS

## ➤ Neônio:

$$(I) \quad V_{e1} = V_R - V_1 \quad (II) \quad V_{e1} = V_1 + V_0$$

$$V_0 = V_R - 2V_1$$

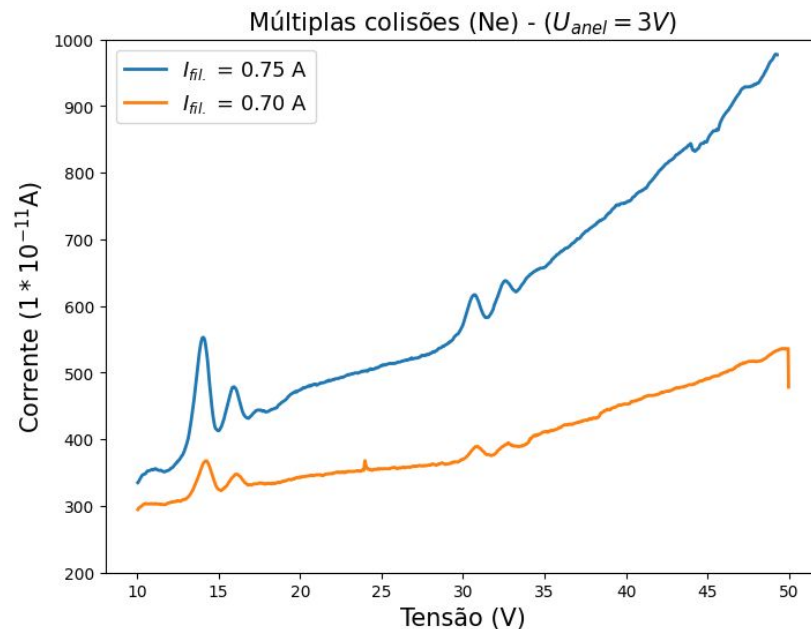
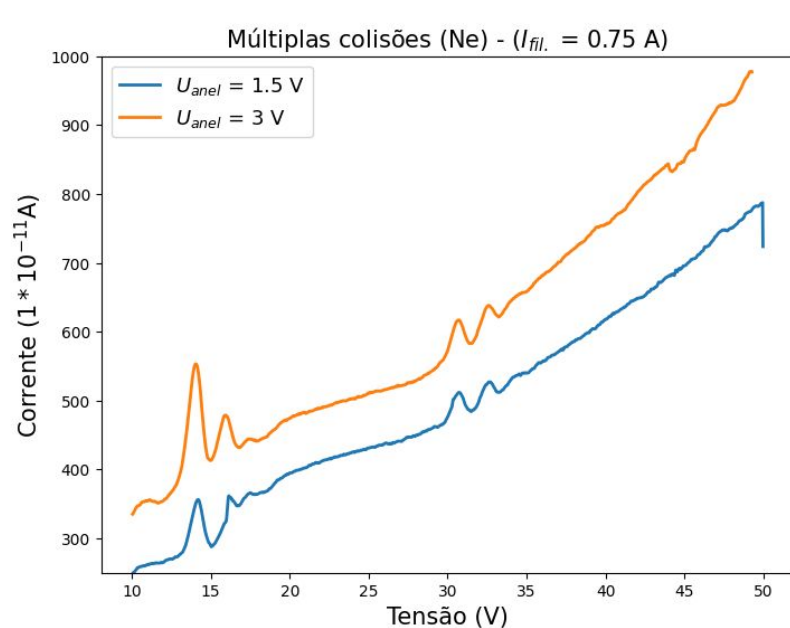


	Potenciais de Excitação (V)		
	$V_1$ 2p 3s $^1P_1$ 2p 3s $^3P_0$ 2p 3s $^3P_1$ 2p 3s $^3P_2$	$V_2$ 2p 3p $^3S_1$	$V_3$
Esperado	16.66	18.3	
Experimental	$16.65 \pm 0.008$	$18.562 \pm 0.008$	$20.11 \pm 0.008$

$$V_0 = 2.633 \pm 0.006$$

**Figura 28:** Gráfico de corrente versus tensão para múltiplas colisões do neônio.

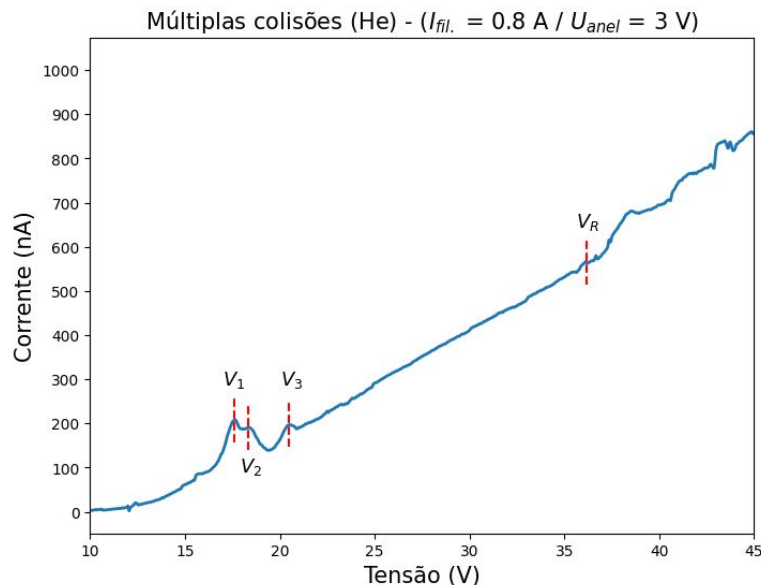
# RESULTADOS OBTIDOS



**Figura 29:** Gráficos de corrente versus tensão para múltiplas colisões do neônio para diferentes configurações.

# RESULTADOS OBTIDOS

## ➤ Hélio:



$$(I) \quad V_{e1} = V_R - V_1 \quad (II) \quad V_{e1} = V_1 + V_0$$

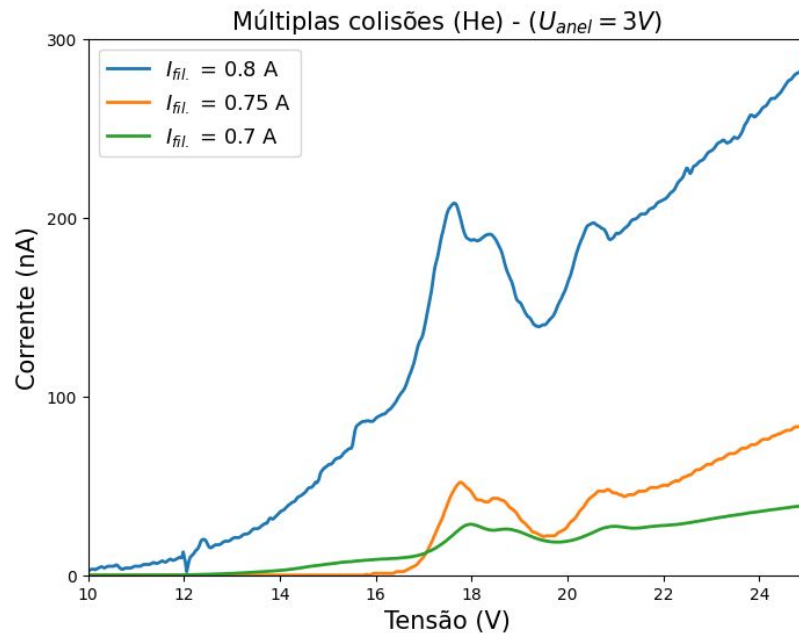
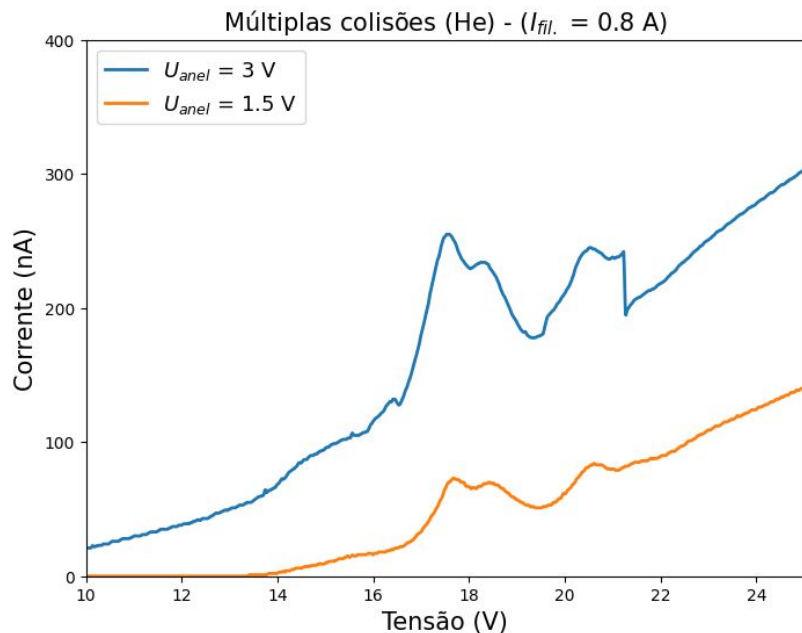
$$V_0 = V_R - 2V_1$$

	Potenciais de Excitação (V)		
	$V_1$ $2^3S$	$V_2$ $2^1S - 2^3P - 2^1P$	$V_3$ $3^3S - 3^1S - 3^3P - 3^1P$
Esperado	19.8	20.9	22.9
Experimental	$18.561 \pm 0.008$	$19.311 \pm 0.008$	$21.462 \pm 0.008$

$$V_0 = 0.962 \pm 0.006$$

**Figura 30:** Gráfico de corrente versus tensão para múltiplas colisões do hélio.

# RESULTADOS OBTIDOS



**Figura 31:** Gráficos de corrente versus tensão para múltiplas colisões do hélio para diferentes configurações.