



Efeito Fotoelétrico

“4323301 – Física Experimental C”

Fernando A. F. Albuquerque
fernandoalbuquerque@usp.br

O que é o Efeito Fotoelétrico?

“Efeito Fotoelétrico – A completa absorção de um fóton por um sólido com a emissão de um elétron”

Handbook of Physics and Chemistry

Contexto Histórico

- Em 1886/87 Heinrich Hertz realizou experiências que comprovaram a existência de ondas Eletromagnéticas e a teoria de Maxwell sobre a propagação da Luz.
- Enquanto isso, Hertz observou que uma descarga elétrica entre dois eletrodos ocorre mais facilmente quando se faz incidir sobre um deles luz ultravioleta.
- Lenard observou que na verdade a luz ultravioleta incidente faz com que elétrons sejam emitidos do catodo, facilitando a descarga

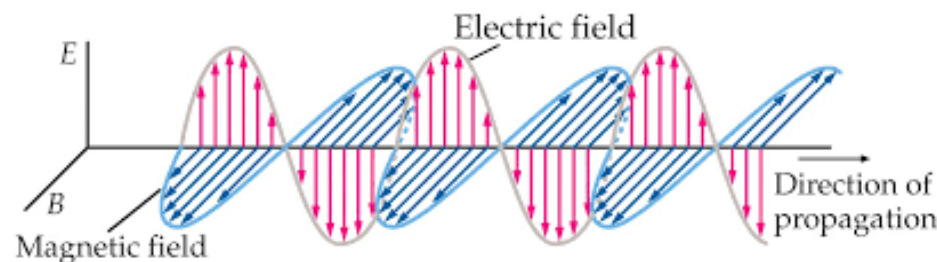


Heinrich Hertz (1857-1894)

Descrição Clássica - Eletromagnetismo

- Em uma onda eletromagnética

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$



- Os campos elétrico e magnético oscilam no tempo. Onde:

Então:

$$B_0 = \frac{1}{c} E_0 \quad c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \rightarrow \vec{S} = c \epsilon_0 E_0^2$$

A intensidade I é dada pelo valor médio do vetor de Poynting.

Logo, a intensidade é proporcional a E_0^2

$$I = \langle \vec{S} \rangle = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2$$

$$I \propto E_0^2$$



Descrição Clássica – Mecânica Clássica

- Partindo da segunda lei de Newton, uma força elétrica age sobre o elétron para removê-lo:

$$F = ma = eE$$

- O elétron parte do repouso, de modo que a velocidade com que escapa é:

$$v = v_0 + at = \frac{eE}{m}t$$

- O elétron em movimento tem energia cinética:

- Logo, a **energia cinética** é proporcional ao quadrado do campo elétrico e, portanto, **proporcional à intensidade** da radiação eletromagnética

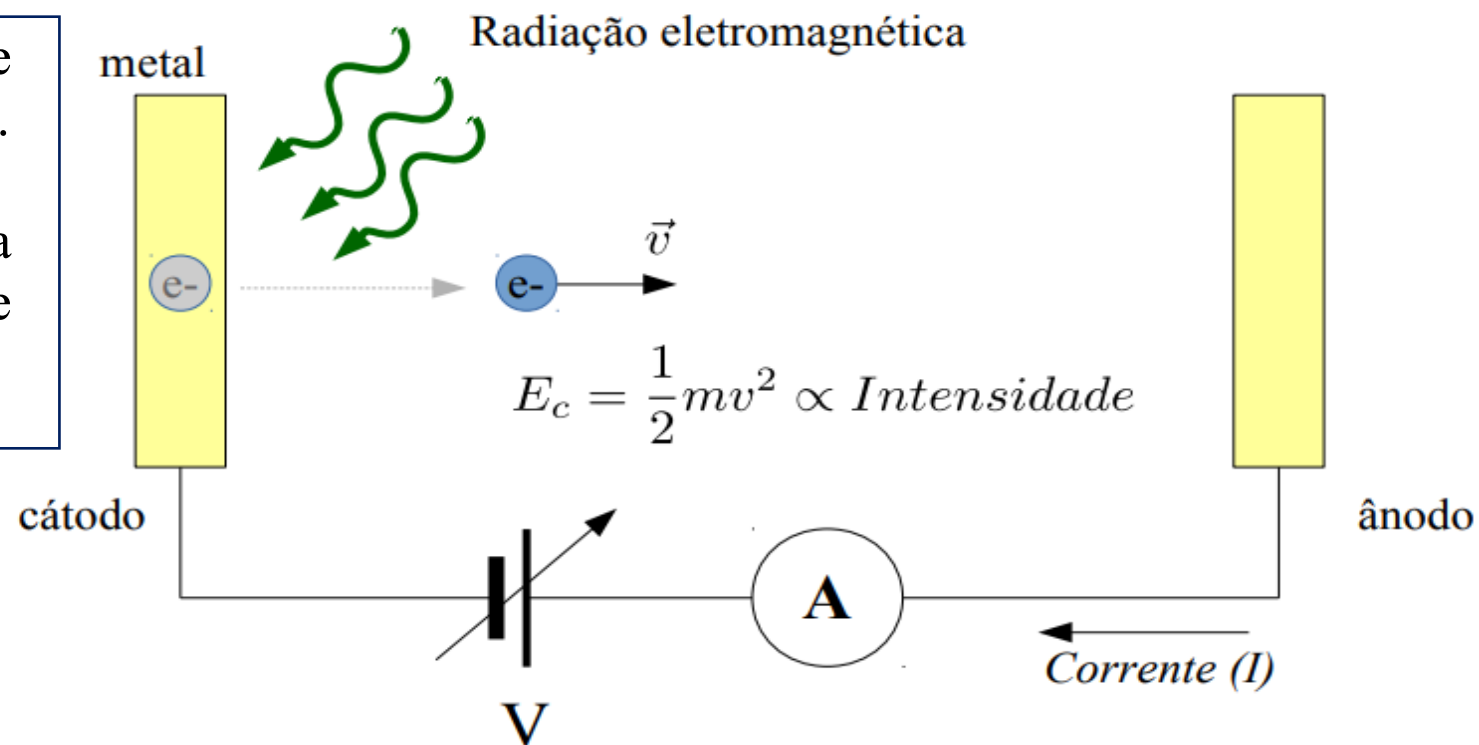
Descrição Clássica – Arranjo Experimental

- Quando uma onda eletromagnética encontra um elétron, o campo elétrico exerce uma força neste elétron, que é arrancado ganhando energia cinética.

Aumentando-se a tensão V , a corrente fotoelétrica aumenta até um ponto de saturação.

Diminuindo-se a tensão, a corrente fotoelétrica diminui linearmente até cessar. O ponto em que cessa é chamado de tensão de corte V_0

Classicamente, a tensão de corte deveria ser proporcional à intensidade da luz!

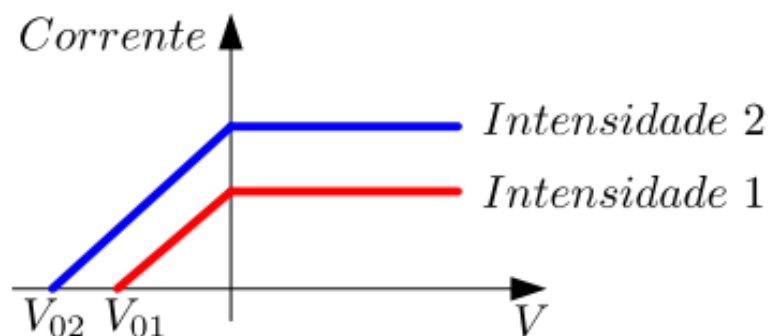


T. Fernandes e M.F. Rezende. 2018

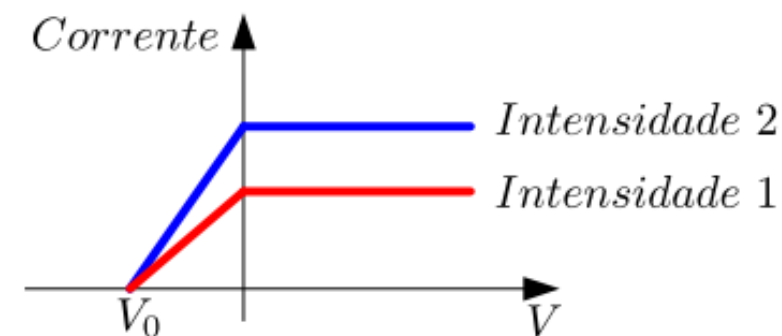


Descrição Clássica – Resultados Observados

Previsão da Teoria Clássica



Medidas Experimentais

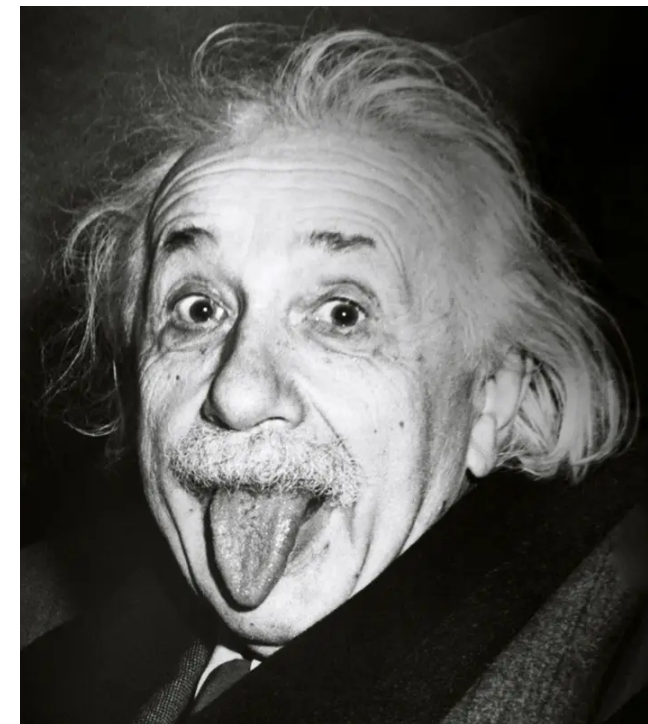


Independente da intensidade, observou-se uma tensão de corte comum

T. Fernandes e M.F. Rezende. 2018

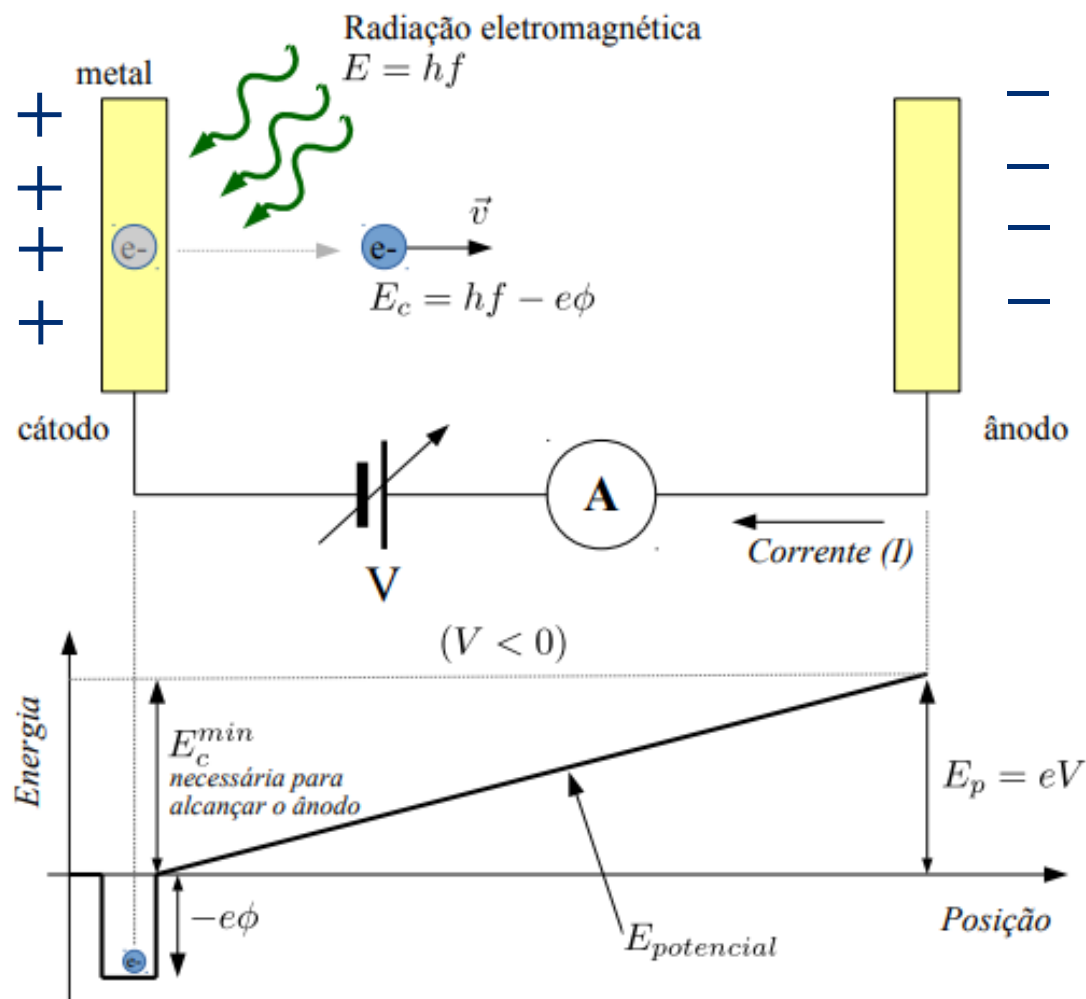
Uma nova descrição – Descrição Moderna

- Albert Einstein introduziu o conceito de “pacotes de energia” para descrever o fenômeno observado.
- A radiação monocromática de baixa energia se comporta como se fosse um quanta (vários pacotes de energia) de energia $E = h\nu$
- Em uma interação, um fóton de energia $E = h\nu$ é absorvido por um elétron que realiza um trabalho $W_0 = e\phi$ para saltar de um poço potencial e ser emitido. Cada material possui sua função trabalho ϕ .



Albert Einstein (1879-1955) 

Descrição Moderna



- O elétron é emitido do cátodo com energia cinética

$$E_c = hf - e\phi$$

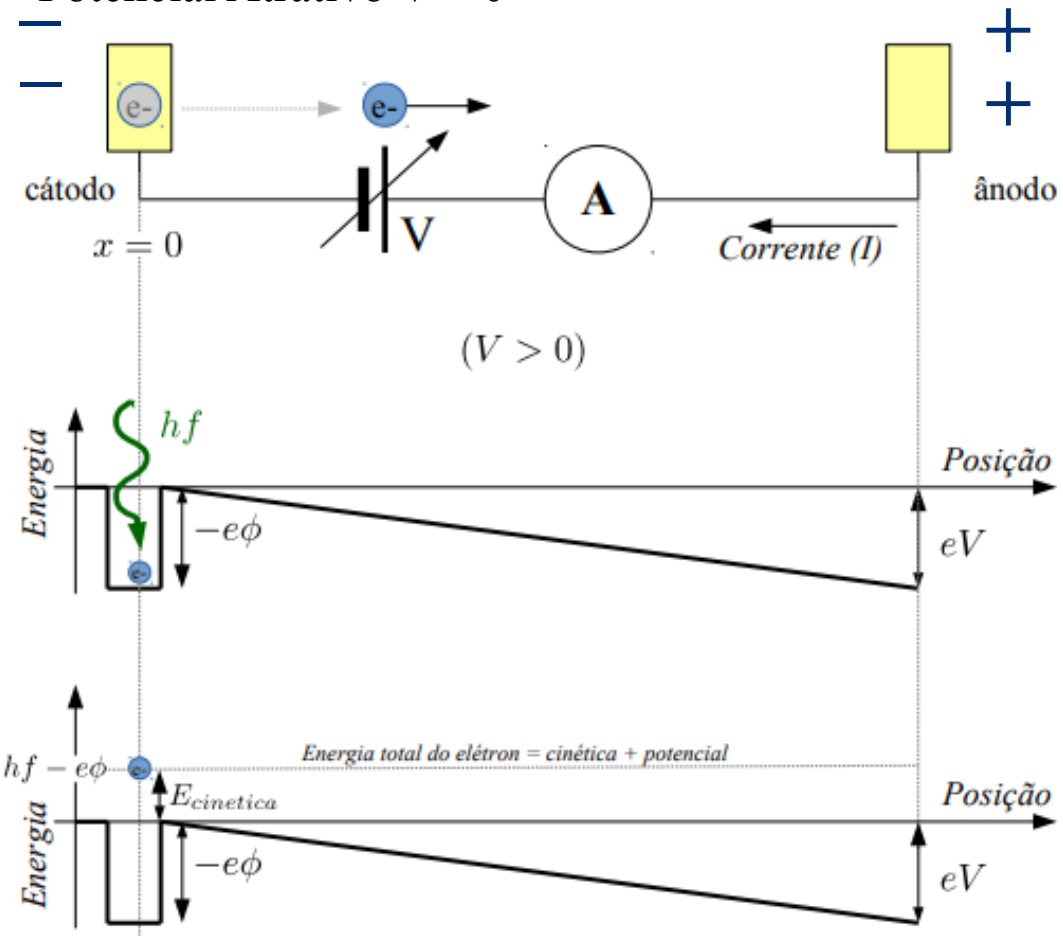
- A fonte de tensão variável no caso $V < 0$ gera um campo elétrico entre o ânodo e o cátodo, de modo a impedir que o elétron emitido pelo cátodo alcance o ânodo.

- Se o elétron tiver energia cinética o suficiente (igual à energia potencial da fonte) ele alcança o ânodo.

$$E_c^{min} = E_p = eV$$

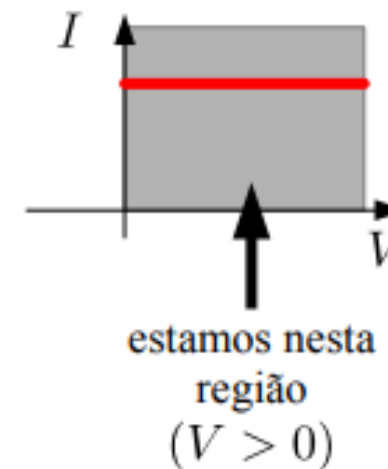
Descrição Moderna

Potencial Atrativo $V > 0$



- No caso de um potencial atrativo $V > 0$, qualquer fotoelétron emitido pelo cátodo alcança o ânodo.
- Portanto, uma vez que o fóton incidente tem energia $h\nu > e\phi$ observamos:

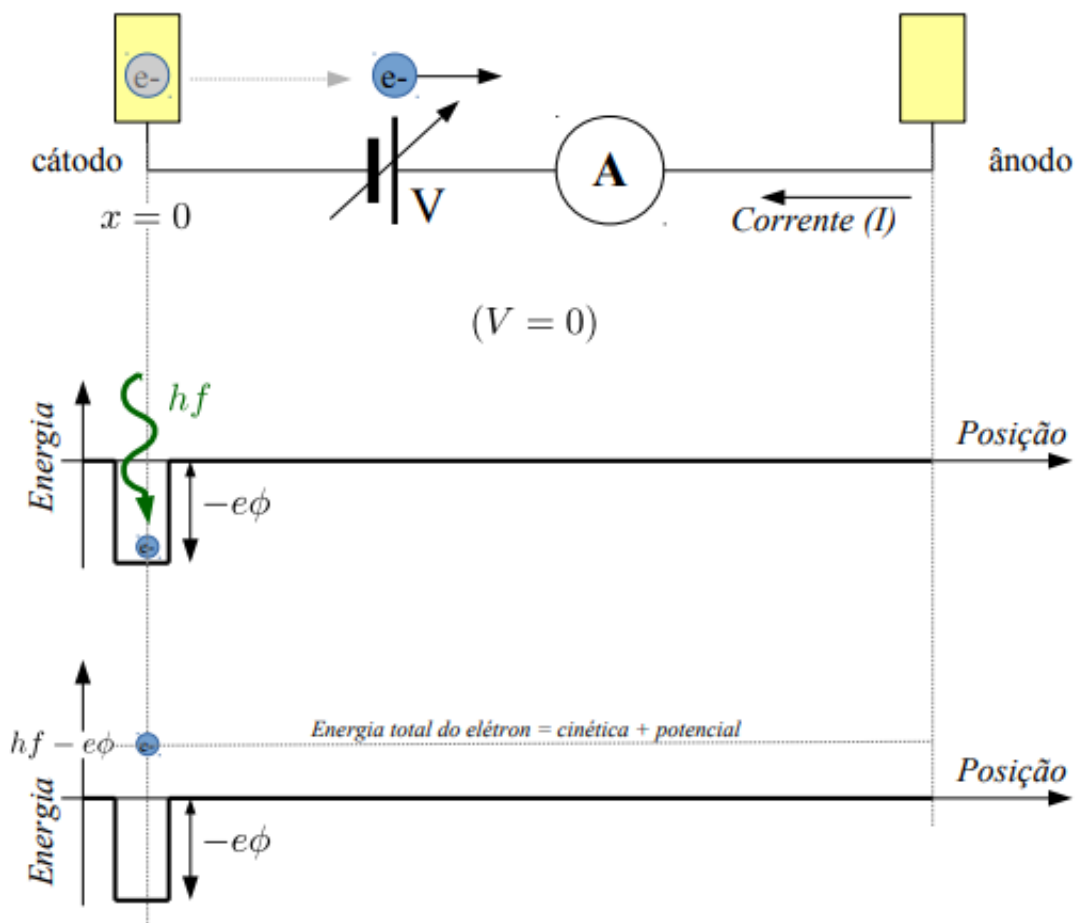
Curva ($I \times V$)



T. Fernandes e M.F. Rezende. 2018

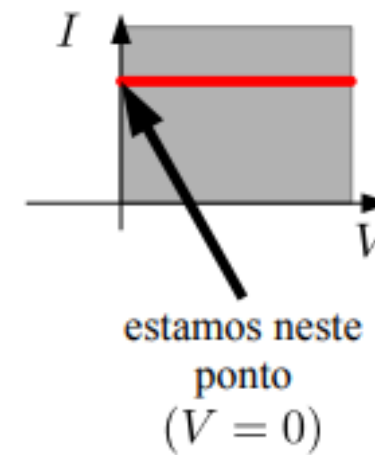
Descrição Moderna

Sem Potencial $V = 0$



- No caso de um potencial nulo $V = 0$, qualquer fotoelétron emitido pelo cátodo alcança o ânodo, semelhantemente ao caso anterior
- Portanto, uma vez que o fóton incidente tem energia $hf > e\phi$ observamos:

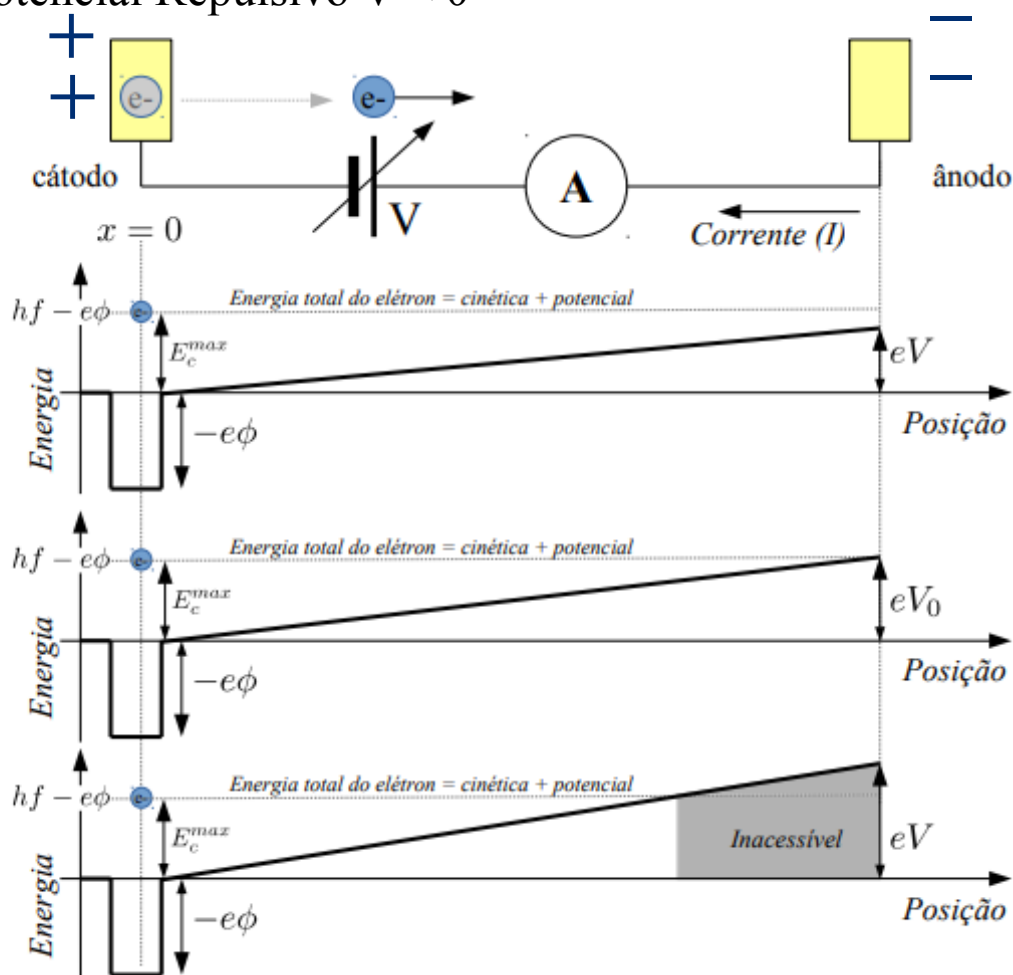
Curva ($I \times V$)



T. Fernandes e M.F. Rezende. 2018

Descrição Moderna

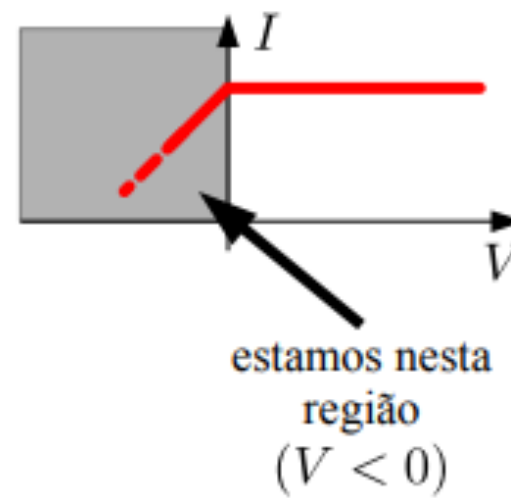
Potencial Repulsivo $V < 0$



- No caso de um potencial repulsivo $V < 0$, o fotoelétron precisa possuir energia cinética igual ou superior ao potencial ao qual está imersa para atingir o ânodo.

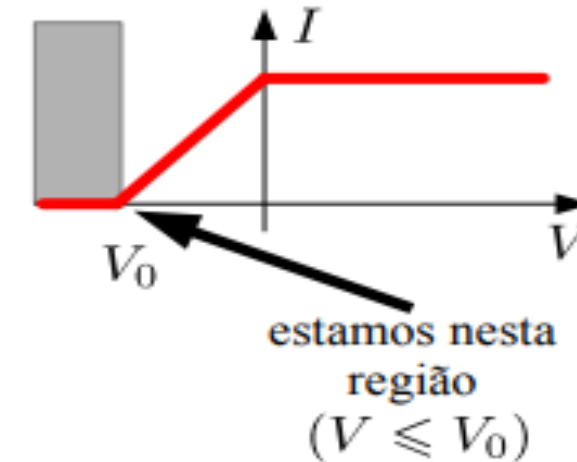
Se $V_0 < V < 0$

Curva ($I \times V$)



Se $V \leq V_0$

Curva ($I \times V$)

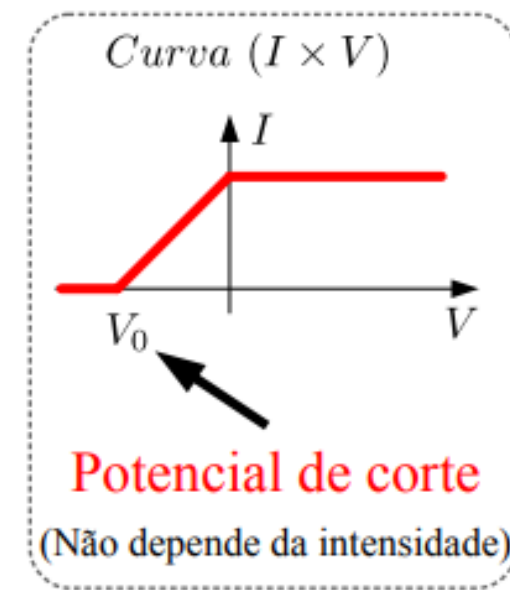
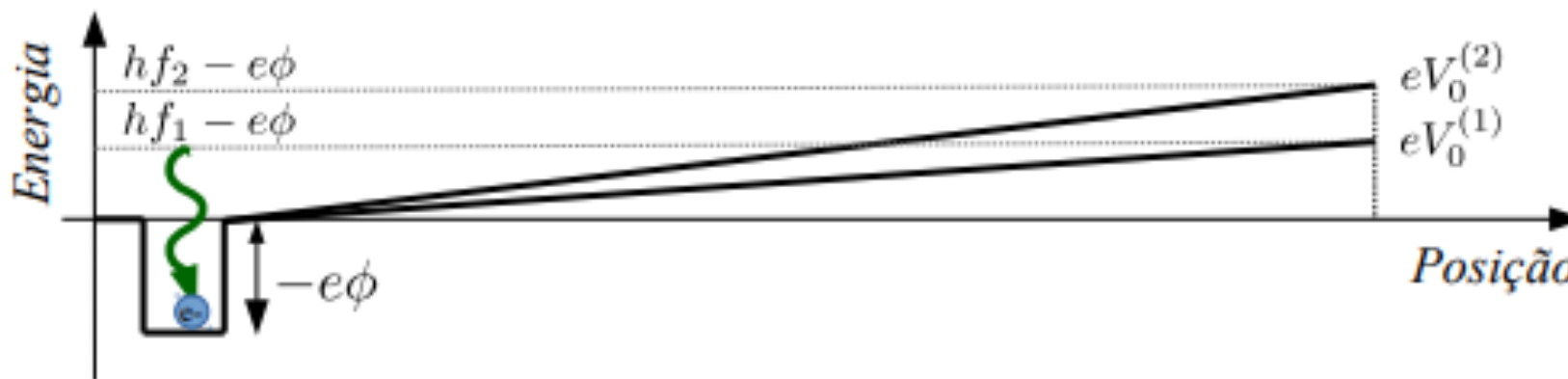


T. Fernandes e M.F. Rezende. 2018

Descrição Moderna

- A energia máxima dos fotoelétrons é dada por:

$$E_c^{max} = h\nu - e\phi \rightarrow eV_0 = h\nu - e\phi$$

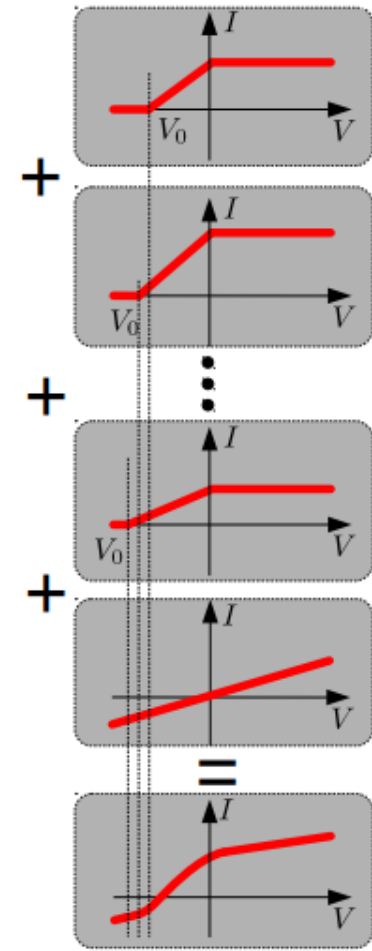
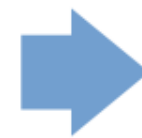
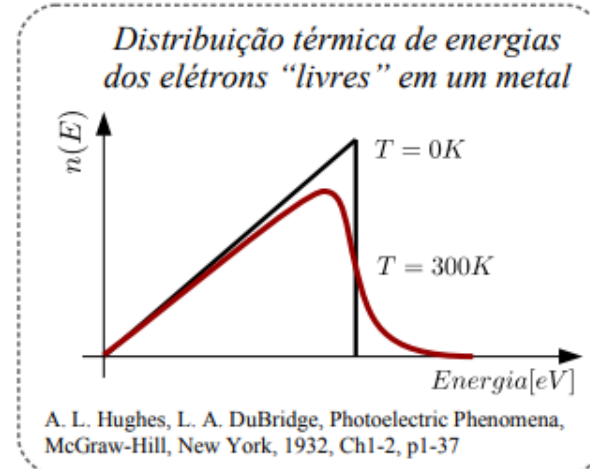
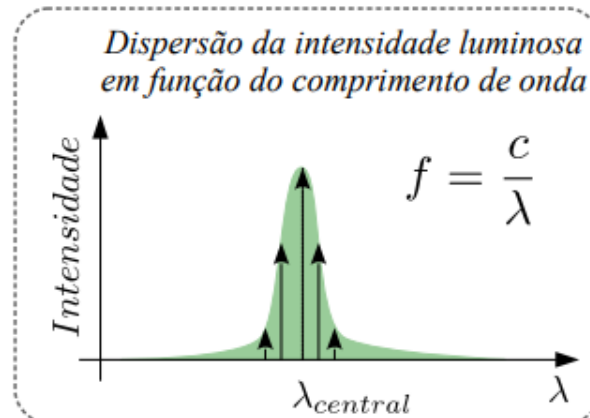


T. Fernandes e M.F. Rezende. 2018

Descrição Moderna

Qual o efeito da largura espectral e da Temperatura?

$$eV_0 = hf - e\phi$$



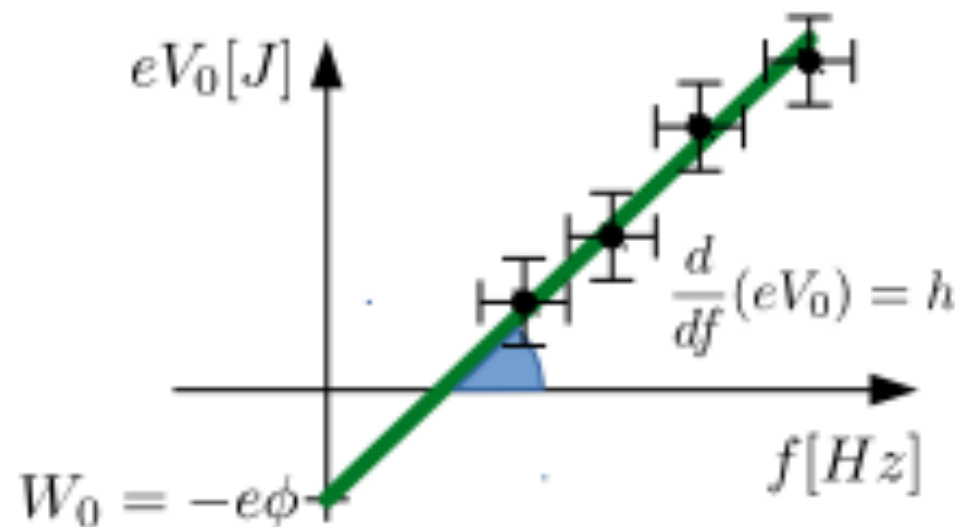
T. Fernandes e M.F. Rezende. 2018

Procedimento Experimental

- É possível obter a constante de Planck h , uma vez que a equação para o efeito fotoelétrico é uma função de primeiro grau.

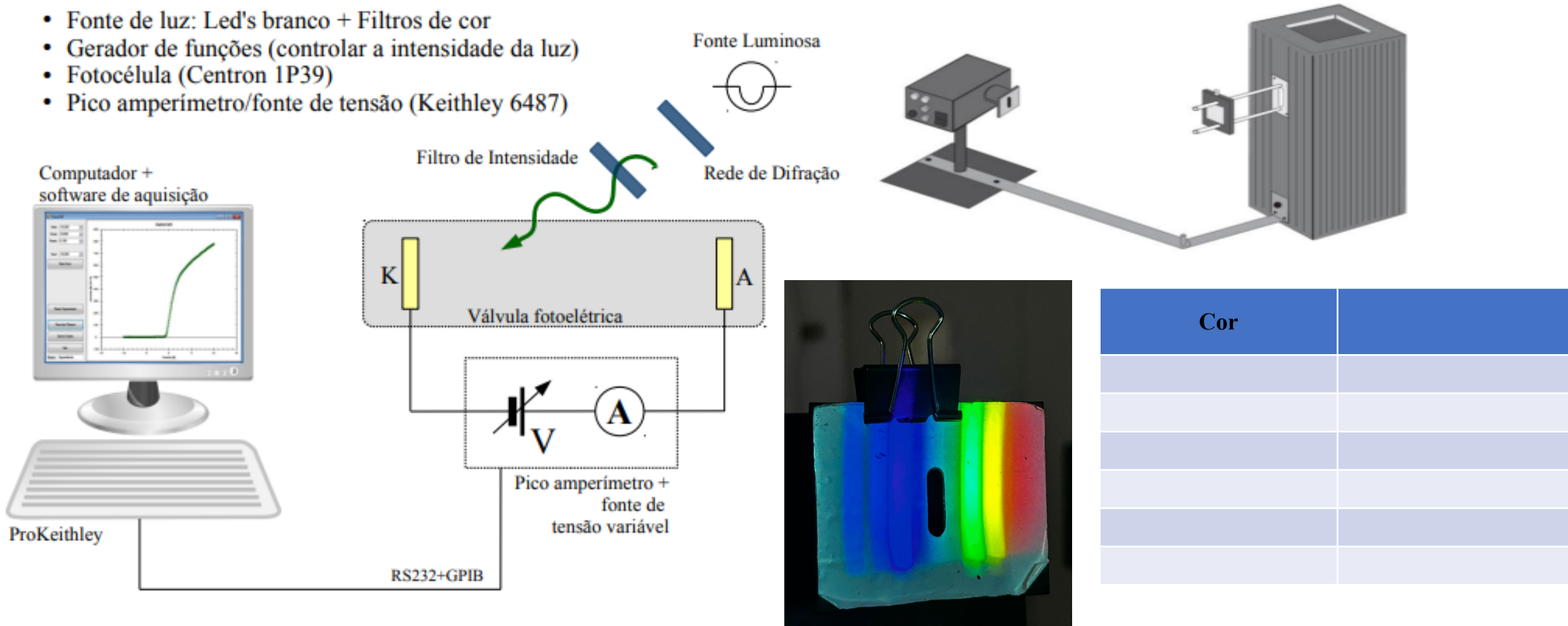
$$eV_0 = h\nu - e\phi$$

$$y = ax + b$$



Procedimento Experimental

- Fonte de luz: Led's branco + Filtros de cor
- Gerador de funções (controlar a intensidade da luz)
- Fotocélula (Centron 1P39)
- Pico amperímetro/fonte de tensão (Keithley 6487)





Procedimento Experimental

1. Ligue todos os equipamentos (pico amperímetro, gerador de funções, computador) e abra o programa de aquisição do pico amperímetro / fonte de tensão (ProKeithley).
2. Resete o pico-amperímetro: com a iluminação desligada, ajuste a tensão $V_{out} = 0$, pressione o botão “Seta Vout” e após isto pressione o botão “Reset Pico-amperímetro”
3. Ajuste a posição da rede de difração e a abertura da fenda de modo a obter as linhas espectrais com mais intensidade e maior nitidez na fenda fotocélula
4. Alinhe a fenda da fotocélula com linha espectral associada ao ultravioleta; levante as curvas $I \times V$ para os filtros de 100%, 80%, 60% e 40%. Utilize a resolução de tensão no programa ProKeithley de 0,1V
5. Repita o procedimento para as demais linhas (violeta, azul, verde e amarelo). Para as cores verde e amarelo, utilize os respectivos filtros.
6. Adquira a curva $I \times V$ com a lâmpada desligado, e outra curva com a fenda da fotocélula totalmente tampada.

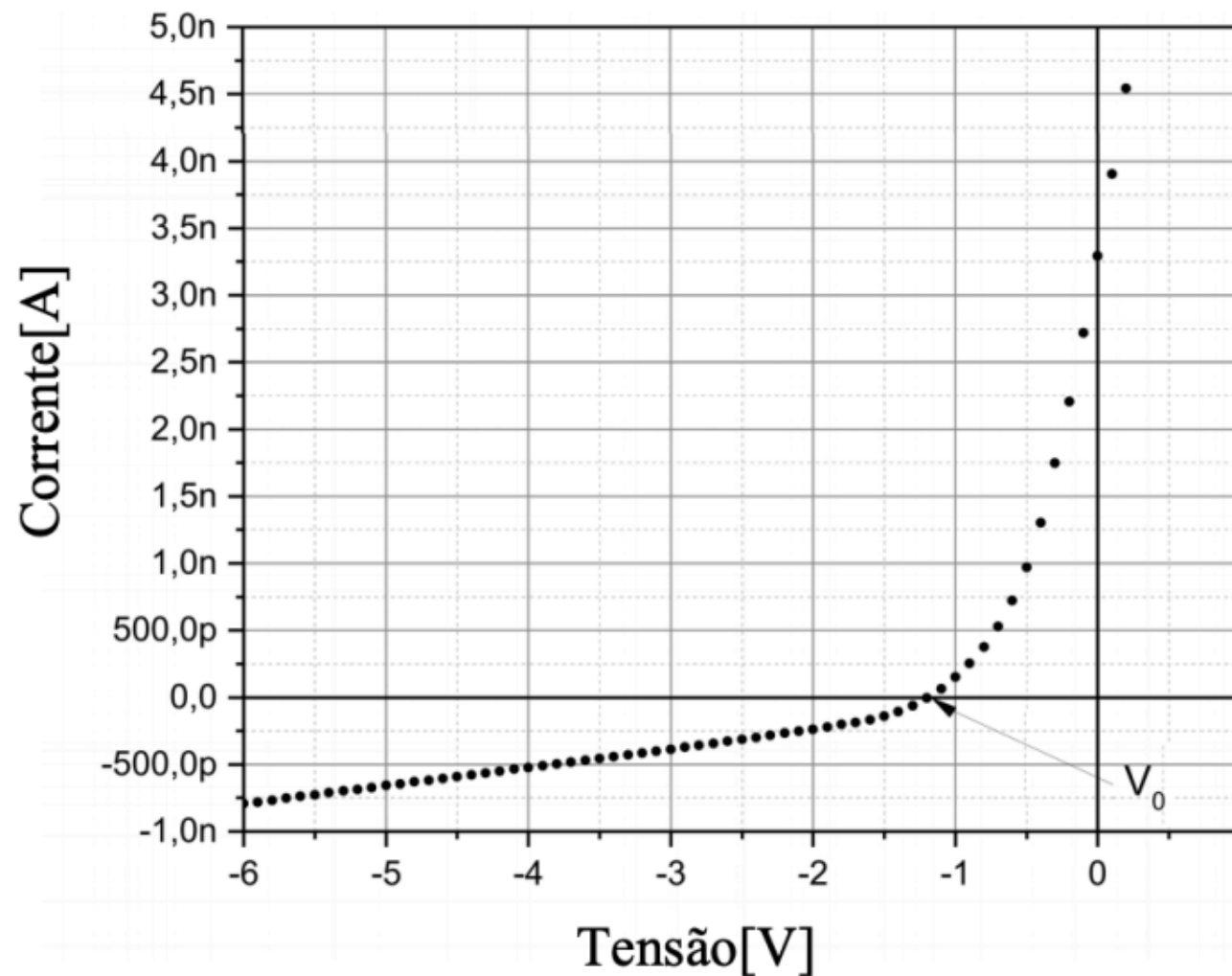


Análise dos Dados

- Temos quatro métodos para análise dos dados.
 - Identificar o V_0
 - Intersecção das retas assintóticas
 - Abscissa da intersecção das curvas de diferentes frequências
 - Análise da segunda derivada da corrente em relação à tensão

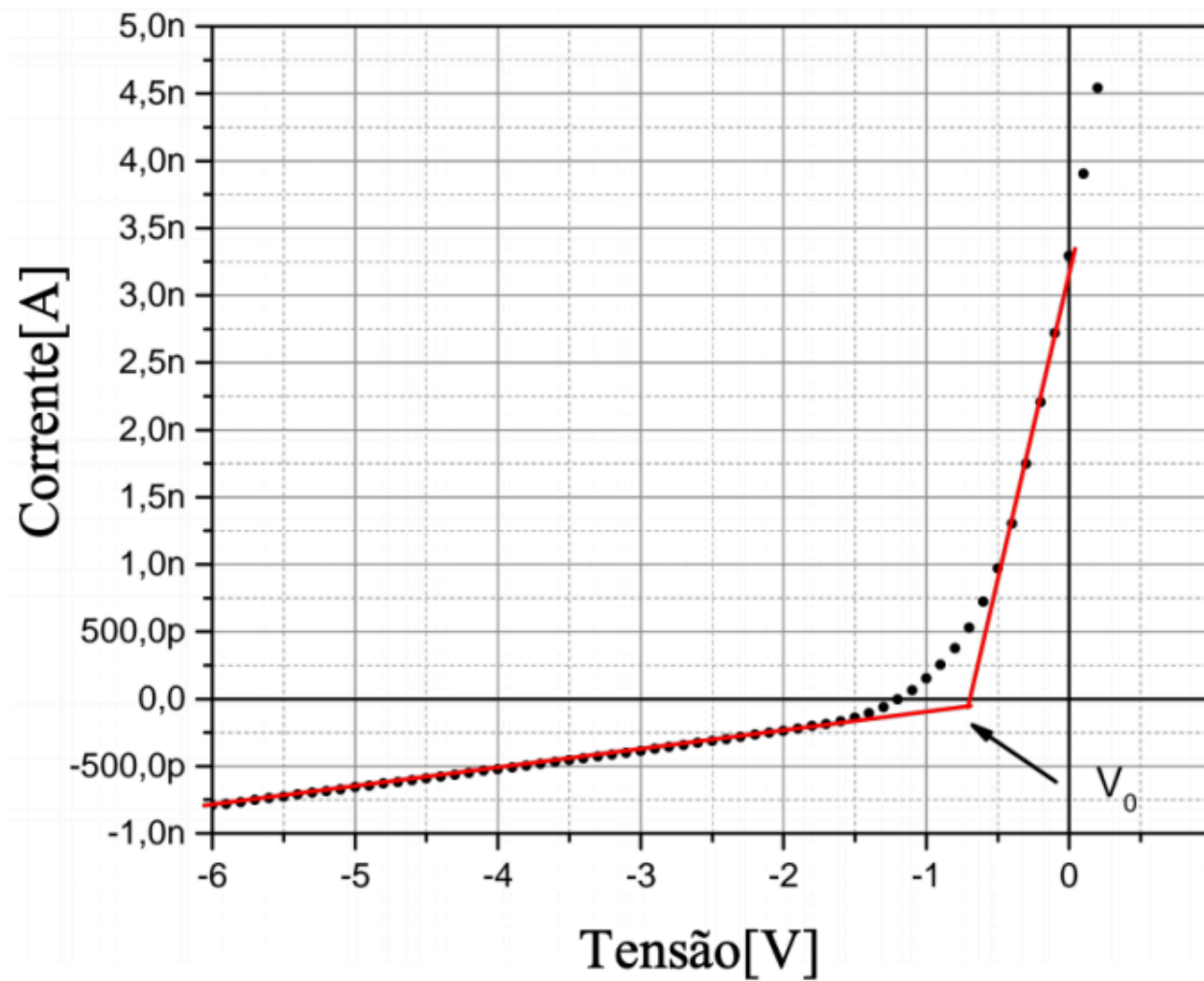


Métodos de Análise



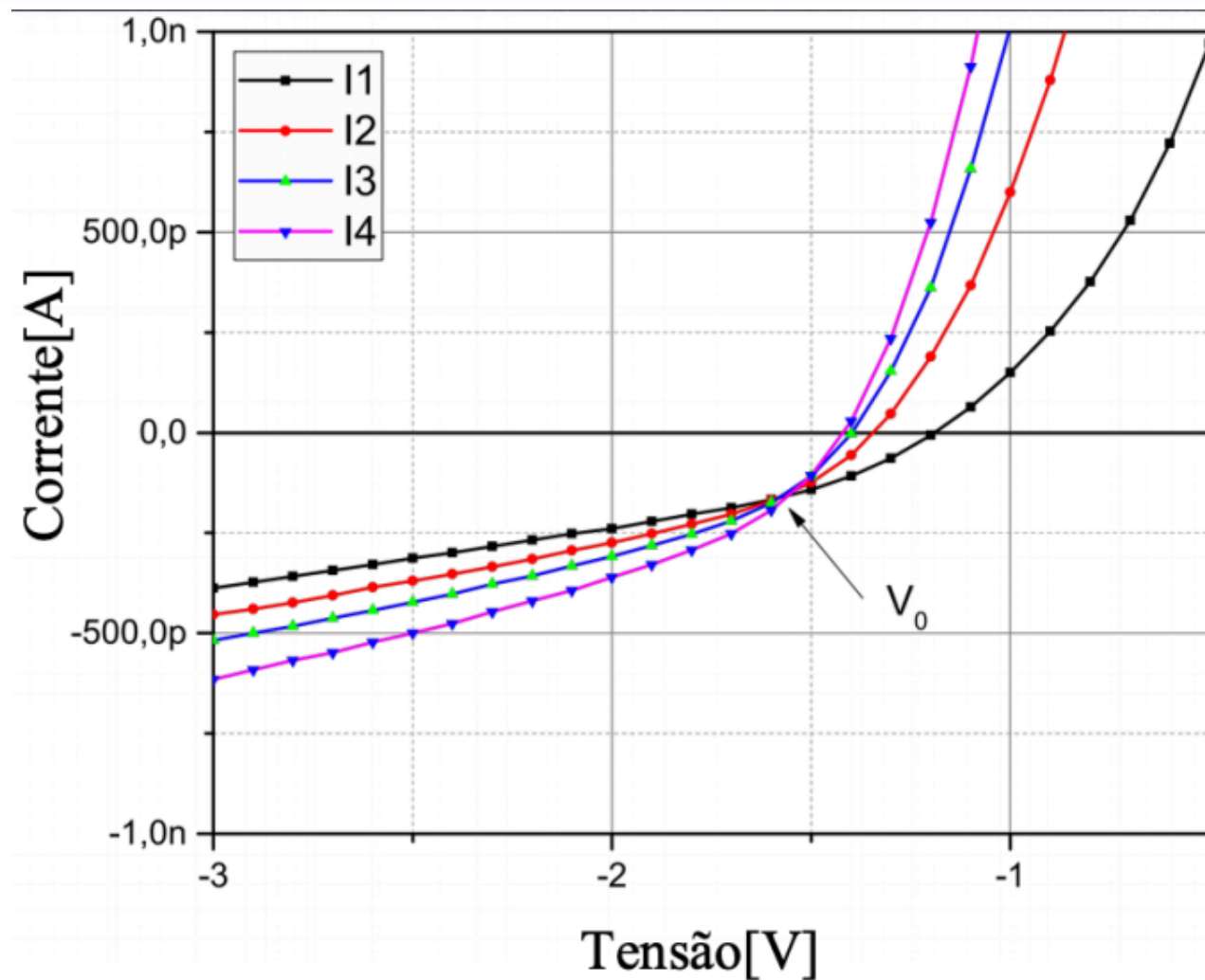


Métodos de Análise

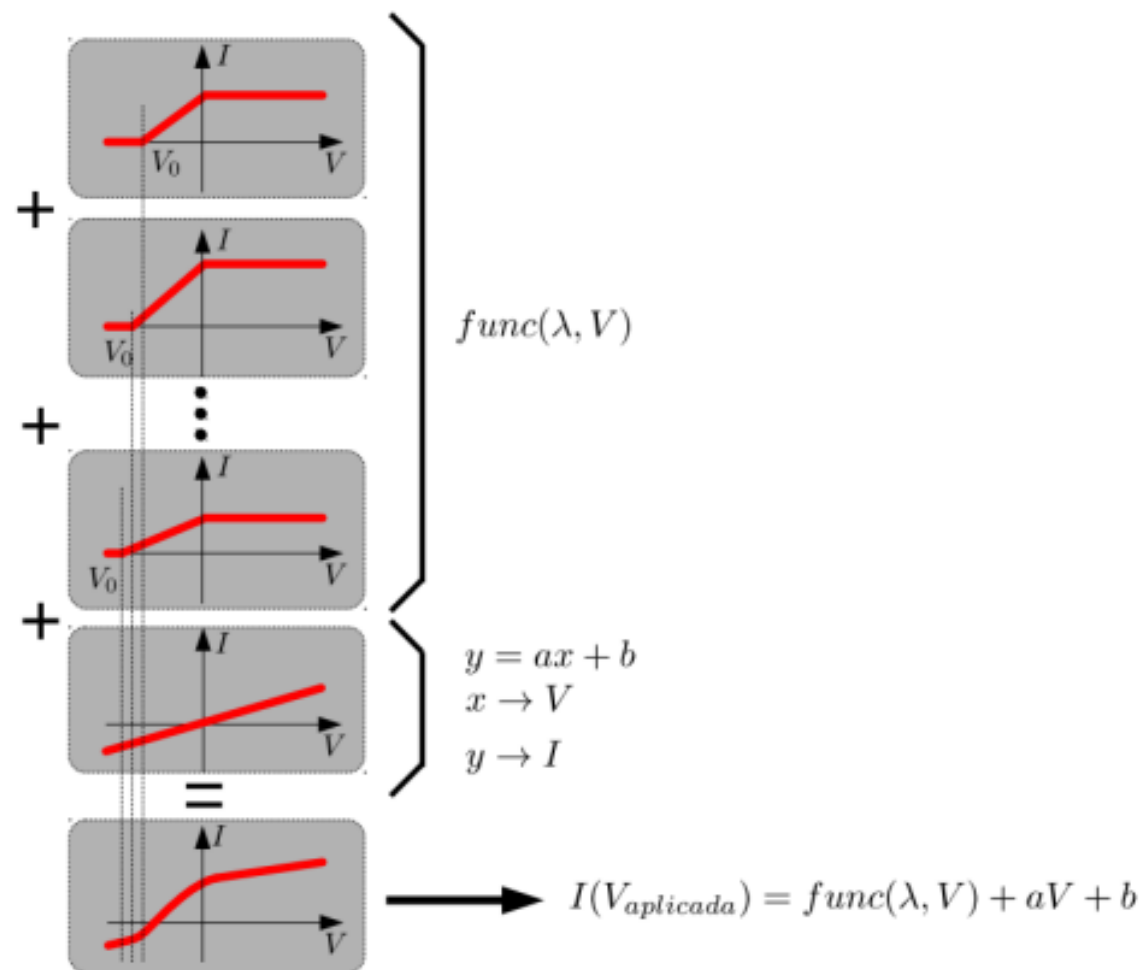




Métodos de Análise



Métodos de Análise – Quarto Método

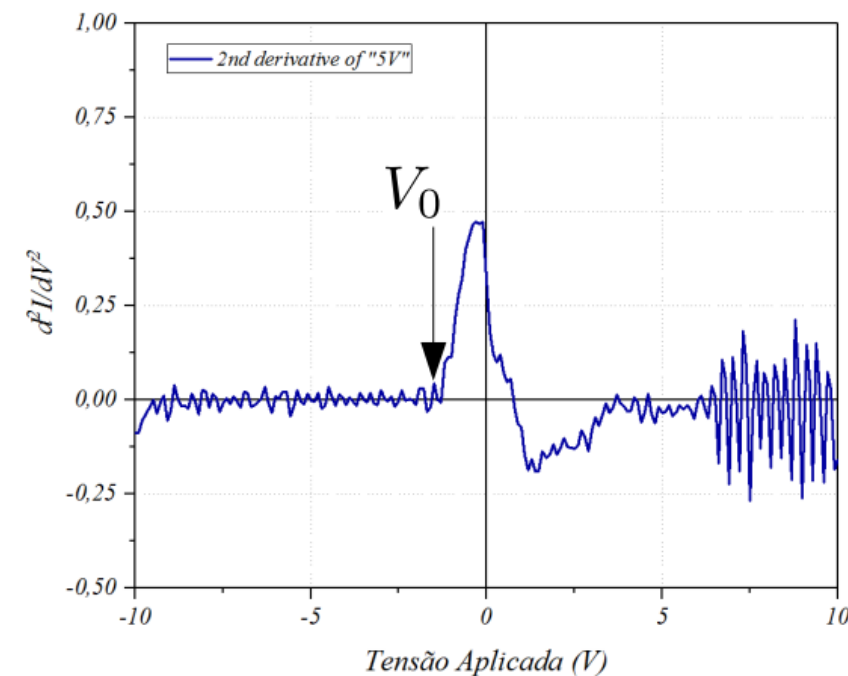
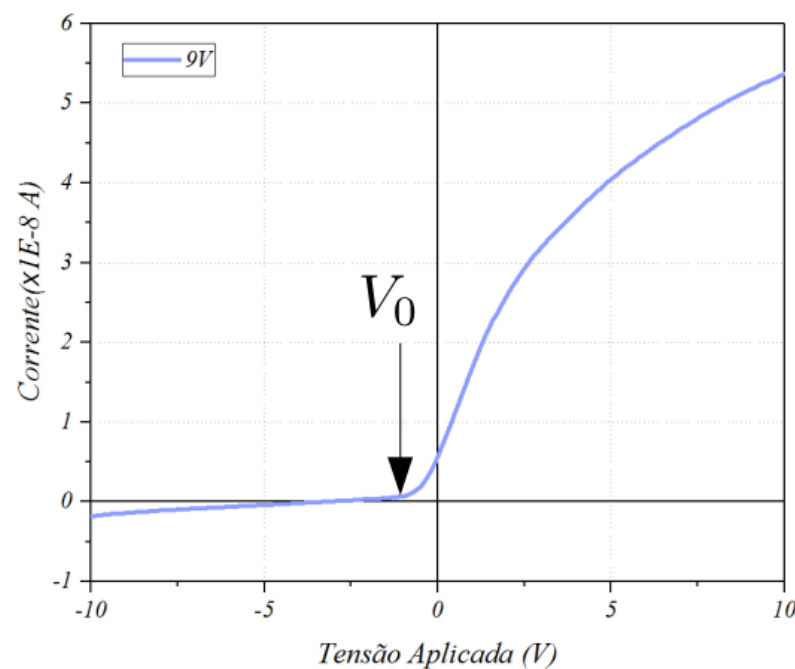


Método de Análise – Quarto Método

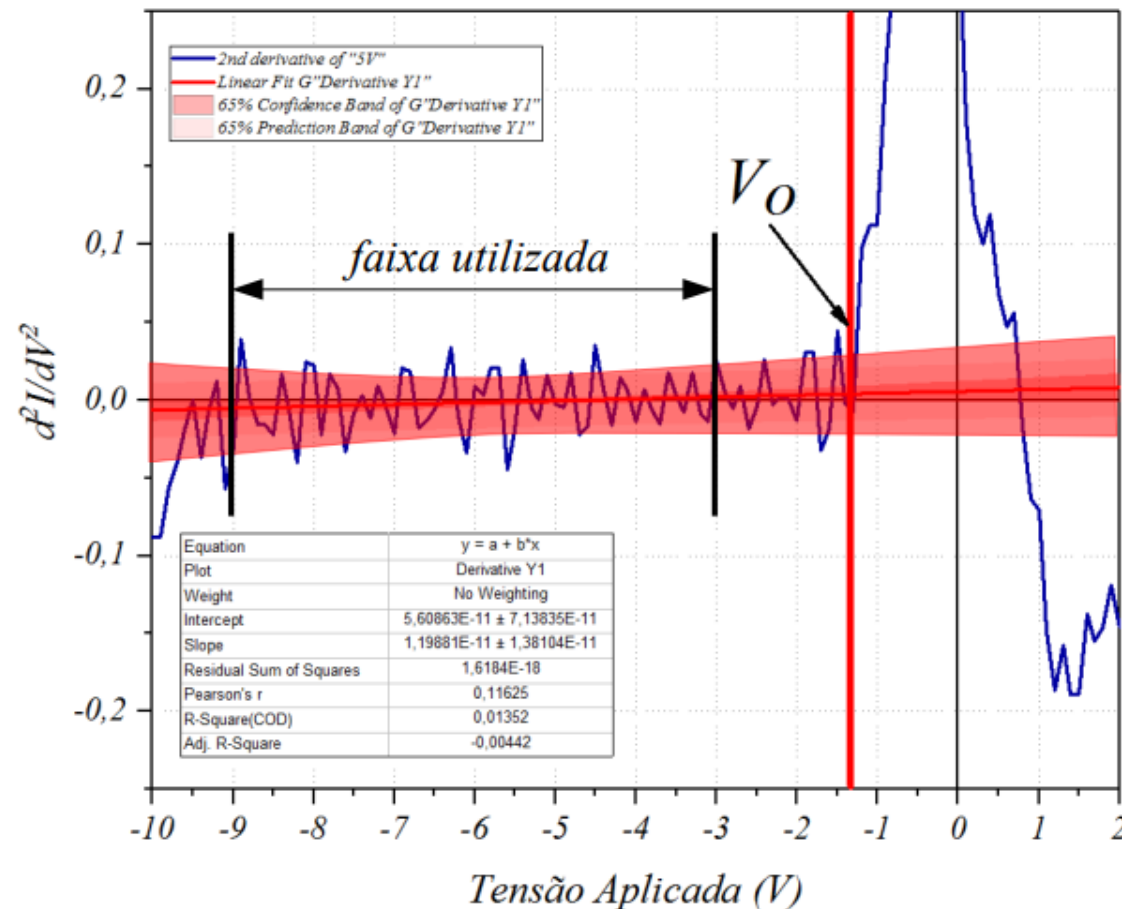
$$i(V) = f(\lambda, V) + aV + b$$

$$\frac{di(V)}{dV} = \frac{df(\lambda, V)}{dV} + a$$

$$\frac{d^2i(V)}{dV^2} = \frac{d^2f(\lambda, V)}{dV^2}$$



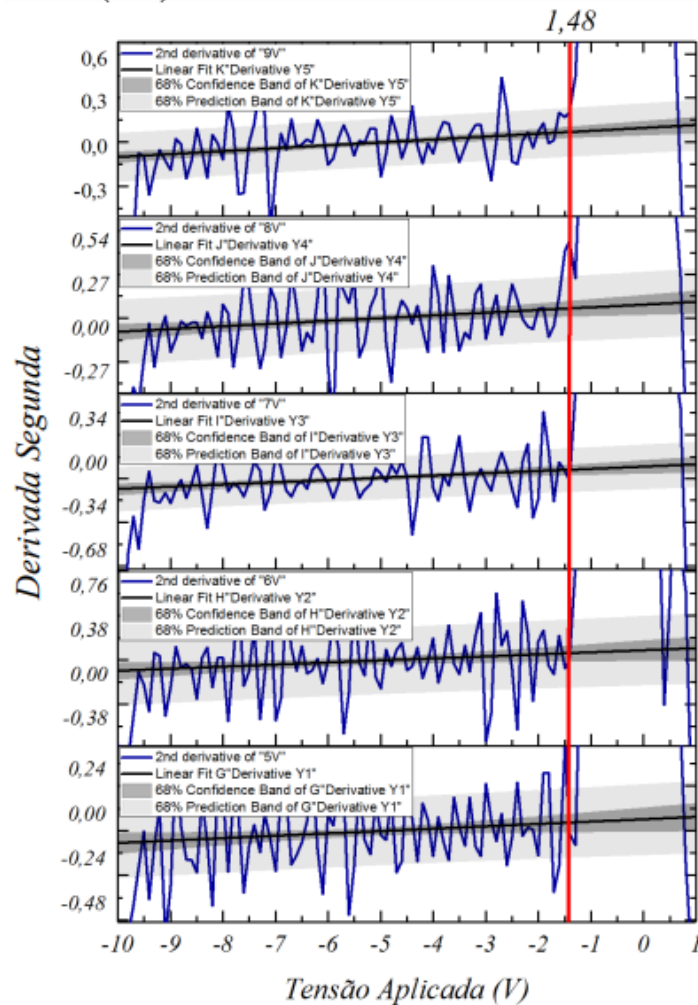
Método de Análise – Quarto Método



- Ajustamos uma reta na região entre -9 e -3 Volts.
- Incluímos no Ajuste o intervalo de confiança de 68%.
- Consideramos o V_0 como o primeiro ponto fora da zona de confiança da reta.

T. Fernandes e M.F. Rezende. 2018

Método de Análise – Quarto Método



O V_0 vai ser a média dos V_0 encontrados para diferentes curvas.

Origin > Stack



Método de Análise - Estatística

- Média

$$\bar{V}_0 = \frac{\sum V_{0i}}{n}$$

- Desvio Padrão

$$\sigma_{V_0} = \sqrt{\frac{\sum (V_{0i} - \bar{V}_0)^2}{n - 1}}$$

- Desvio Padrão Médio

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{V_0}}{\sqrt{n}}$$

- Incerteza da medida

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_{inst}^2}$$



Método de Análise - Estatística

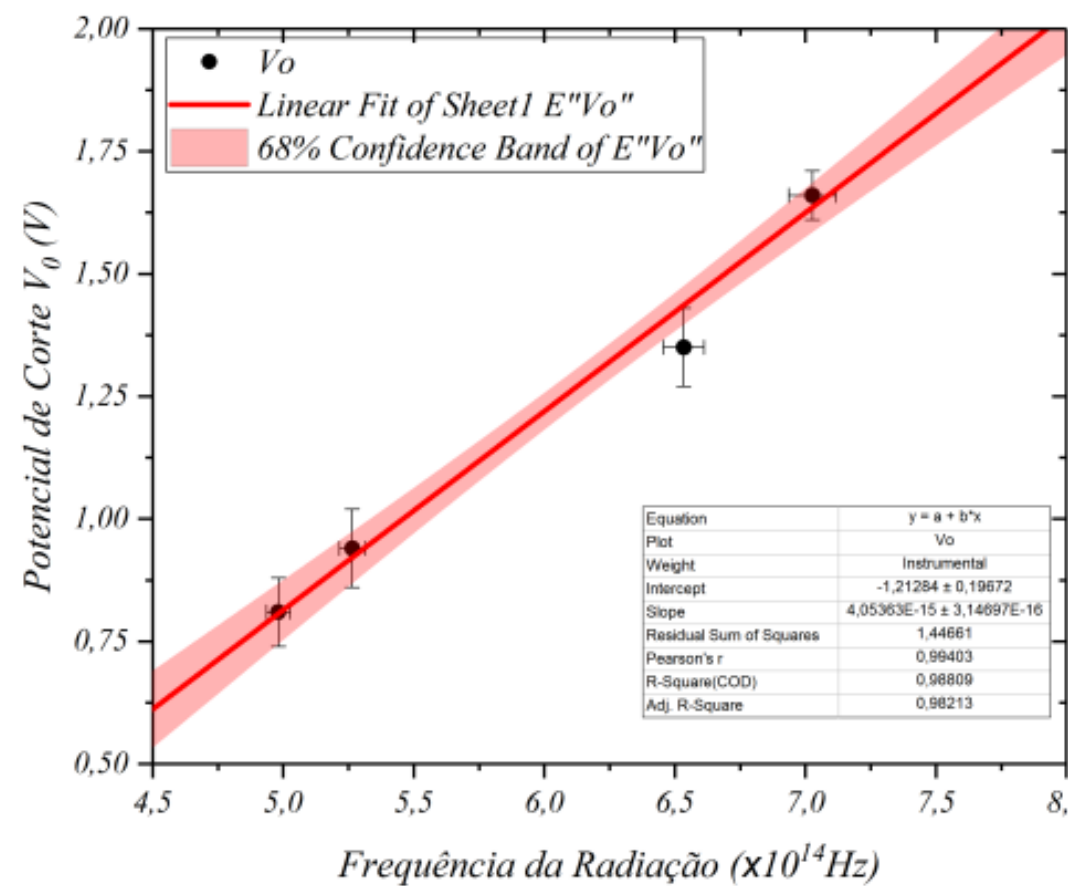
- Propagação de Incerteza

$$\sigma_w = \left| \frac{\partial W}{\partial x} \right| \sigma_x$$

- Incerteza da Frequência

$$\sigma_f = \left(\frac{\partial f}{\partial \lambda} \right) \sigma_\lambda \quad \xrightarrow{f = \frac{c}{\lambda}} \quad \sigma_f = \frac{c}{\lambda^2} \sigma_\lambda$$

Resultados Esperados



$h = (4,05 \pm 0,31) \times 10^{-15} (eV \cdot s)$
 $\phi = (-1,21 \pm 0,19) (eV)$

Valores esperados:
 $h = 4,13 \times 10^{-15} (eV \cdot s)$
 $\phi = -1,36 (eV)$

λ	$freq$	σ_f	V_0	σ_{V_0}
3650	8,22E14	9,1E12	1,66	0,05
4046	7,41E14	7,9E12	1,48	0,08
4358	6,88E14	5,0E12	0,94	0,08
5461	5,49E14	4,5E12	0,81	0,07
5779	5,19E14	3,2E12	0,67	0,05
6149	4,88E14	3,1E12	-----	-----

T. Fernandes e M.F. Rezende. 2018



- Vejam o site da disciplina para materiais complementares.
 - Capítulo 2 do Eisberg
 - Apostila de Teoria de Erros
 - Roteiro da experiência
 - Manual de instalação e vídeo de como utilizar o Origin
 - Apresentações antigas



Mãos à obra