



Efeito Fotoelétrico

Física Experimental C

Tiago Fernandes
Maria Fernanda Rezende

Janeiro 2018

Contexto histórico

(obituário)

Portrayal of the History of the Photoelectric Effect in Laboratory Instructions - May 2012 – DOI: 10.1007/s11191-011-9360-5



Heinrich Hertz,

The photoelectric effect was discovered accidentally in 1887 by Hertz



Philipp Lenard,

established, in 1902, that the number of electrons given off, but not their energy, was affected by the intensity of the light illuminating a metal plate.

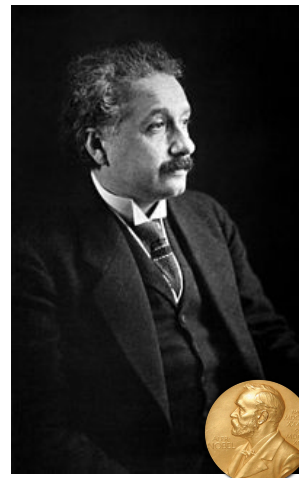
Lenard also found, to his surprise, that the energy of the electrons depended on the wavelength of the light and that shorter wavelength light tended to yield faster electrons; however, Lenard was unable to develop adequate experimental conditions to determine precisely how this effect varied. It is important to note that "... Lenard did not ... demonstrate that photoresponse varies with light frequency

1905 – raios catódicos



Wilhelm Hallwachs

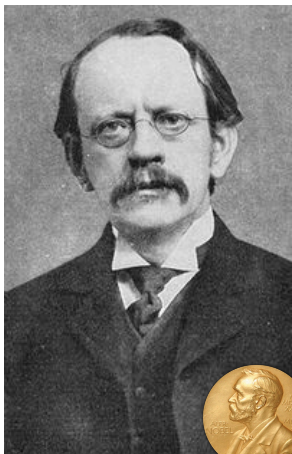
That task was first taken up in 1888 by Hertz's student, Wilhelm Hallwachs, who established that a negatively charged zinc plate discharged rapidly when exposed to ultraviolet light, but showed no response to the light when it was charged positively and, moreover, no effect was produced when a charged plate was illuminated by visible light.



Albert Einstein

It was not until 1905 that Einstein published his revolutionary explanation of the photoelectric effect, based on his "light quantum" hypothesis. His theory explained the photoelectric effect fully, but it was controversial. Einstein proposed that light behaves as though it consists of a stream of independent, localized units of energy that he called light quanta

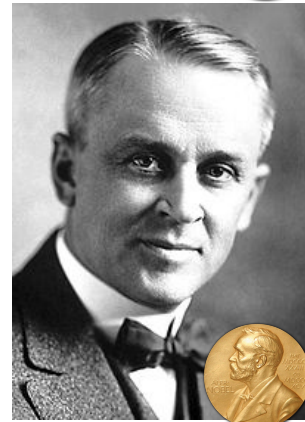
1921 - Efeito Fotoelétrico
"por suas contribuições à física teórica"



J. J. Thomson

A study of the negative electricity emitted in the photoelectric effect was taken up by J. J. Thomson in 1899

1906 – Descoberta do Elétron



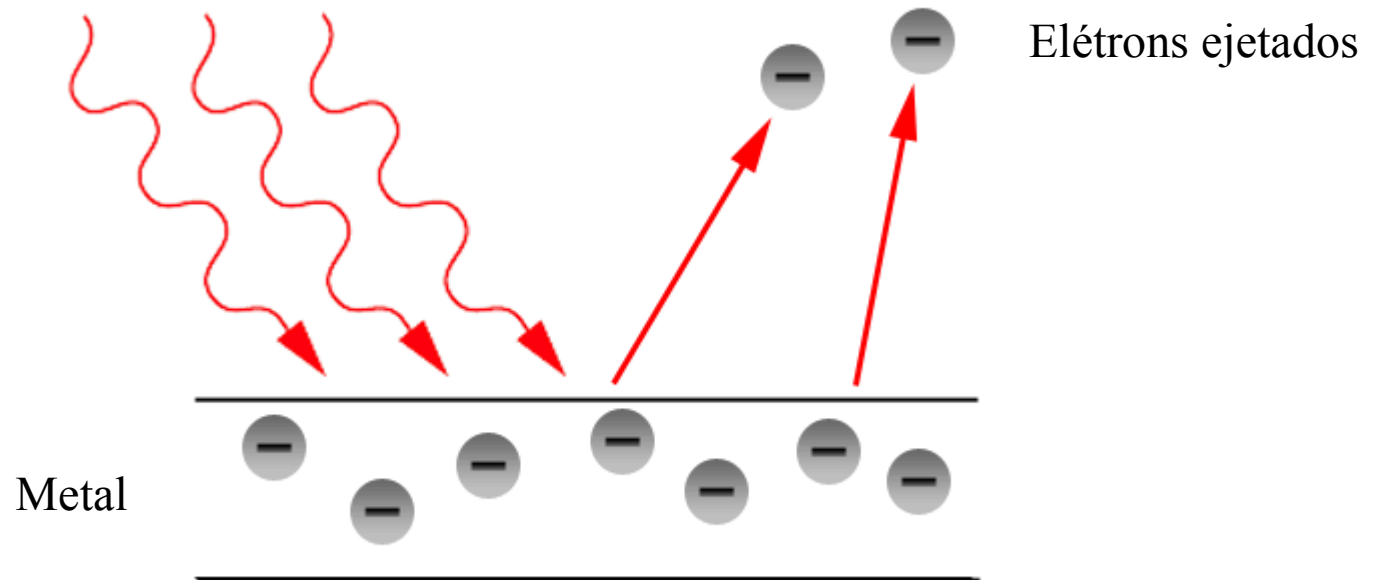
Robert Millikan

who was a strong believer in the wave theory of light. From 1912 to 1915, Millikan put all his efforts into measuring the photoelectric effect, hoping to disprove Einstein's hypothesis. By 1915, it had become clear to Millikan that he had verified Einstein's equation exactly.

1923 – Quantização da Carga elétrica e Efeito Fotoelétrico

O que é o Efeito Fotoelétrico

Radiação eletromagnética



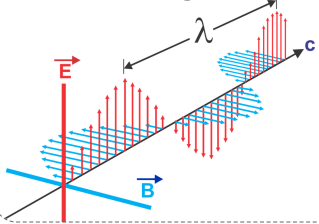
Descrição teórica

$$\langle f(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

Classicamente:

- A intensidade da radiação é proporcional a amplitude do campo elétrico ao quadrado
- Como a força sobre um elétron é proporcional à amplitude do campo, a energia cinética dos mesmos deveria aumentar com a intensidade da luz.

Eletromagnetismo



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

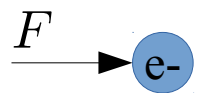
$$E(t, \mathbf{r}) = E_0 \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$$

$$B(t, \mathbf{r}) = B_0 \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$$

$$B_0 = \frac{1}{c} E_0 \quad c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

$$I = \langle S \rangle = \frac{\epsilon_0 c}{2} E_0^2 \rightarrow \text{Intensidade} \propto E^2$$

Mecânica clássica



$$F = ma$$

$$v = v_0 + at$$

$$F_e = eE$$

$$v_0 = 0$$

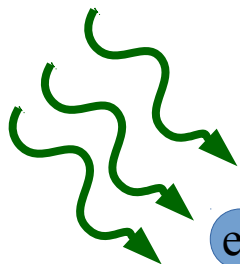
$$F = F_e$$

$$v = \frac{eE}{m} t$$

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

$$E_c = \frac{1}{2} m \left(\frac{eE}{m} t \right)^2$$

Radiação eletromagnética



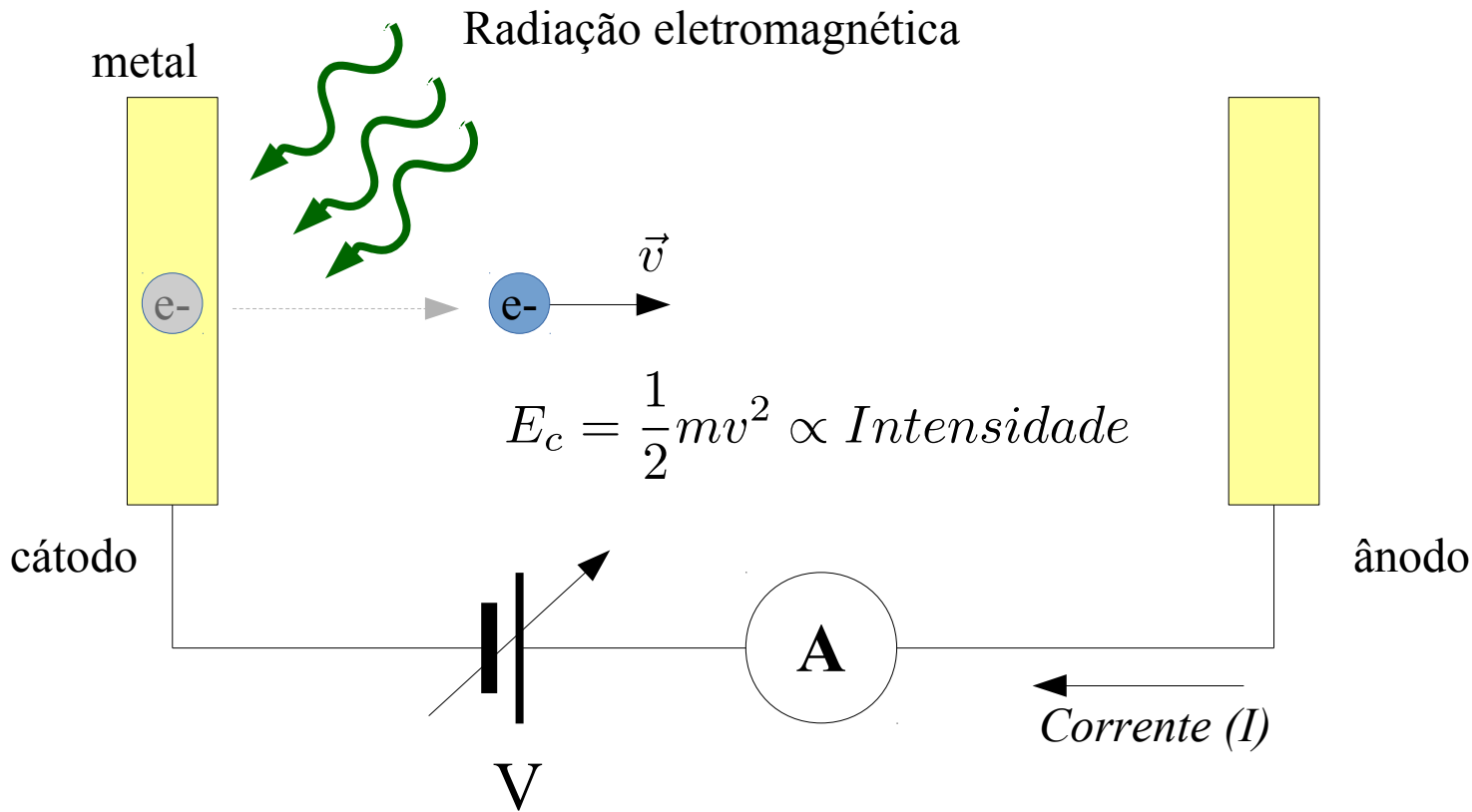
$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \propto \text{Intensidade}$$

$$E_c \propto \text{Intensidade}$$

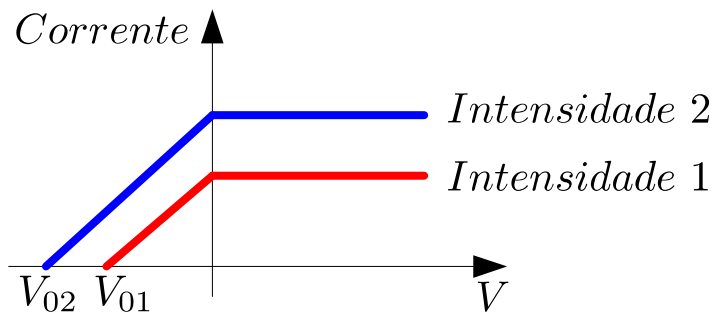
- \vec{E} : Campo elétrico
- \vec{B} : Campo magnético
- \vec{S} : Vetor de Poynting
- E_c : Energia cinética

Este efeito **deveria ocorrer para qualquer frequência de luz**, sendo importante apenas a intensidade da mesma.

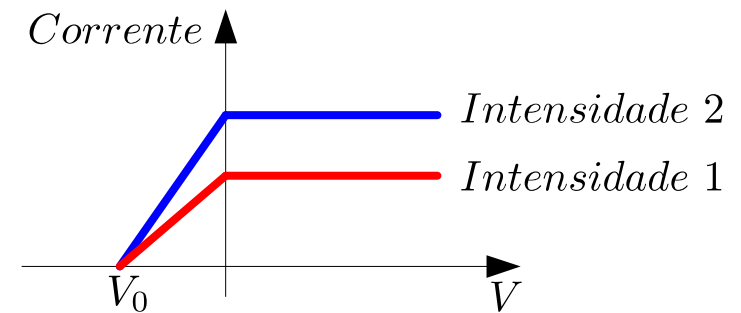
Descrição teórica / Aparato para medir E_c :



Previsão da Teoria Clássica



Medidas Experimentais

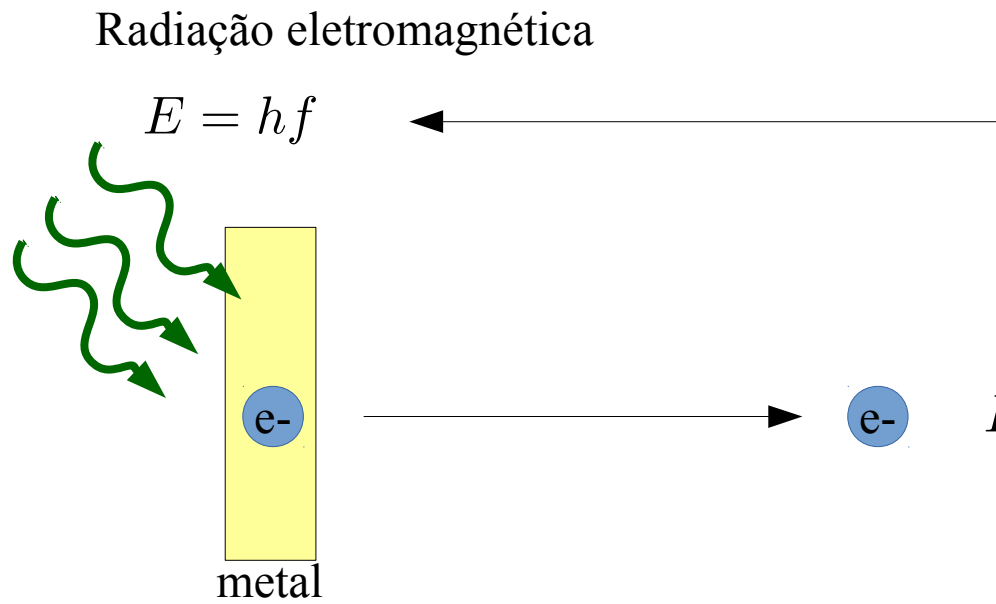
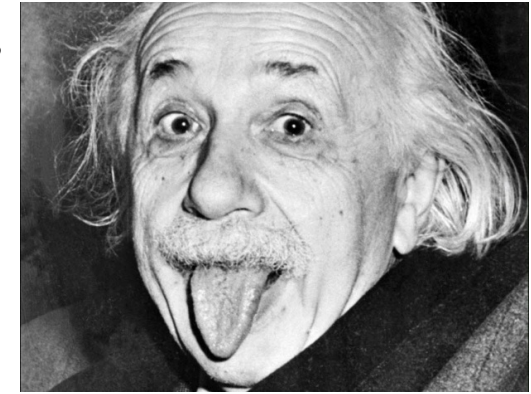


Nova descrição teórica (Albert Einstein)

“... a radiação monocromática de baixa energia se comporta como se ela consistisse de um quanta de energia independente com magnitude $E = hf$ ”

“A situação mais simples é aquela em que o quantum de luz dá toda a sua energia para um único elétron.”

“... devemos assumir que cada elétron que deixa o sólido deve realizar uma quantidade de trabalho $W_0 = e\phi$ (característica daquele sólido)”




f : Frequência da radiação eletromagnética

h : Constante de Planck

ϕ : Função trabalho do material irradiado

e : Carga elementar do elétron

E : Energia do fóton incidente 
(Não confundir)

$$E_c = hf - e\phi$$

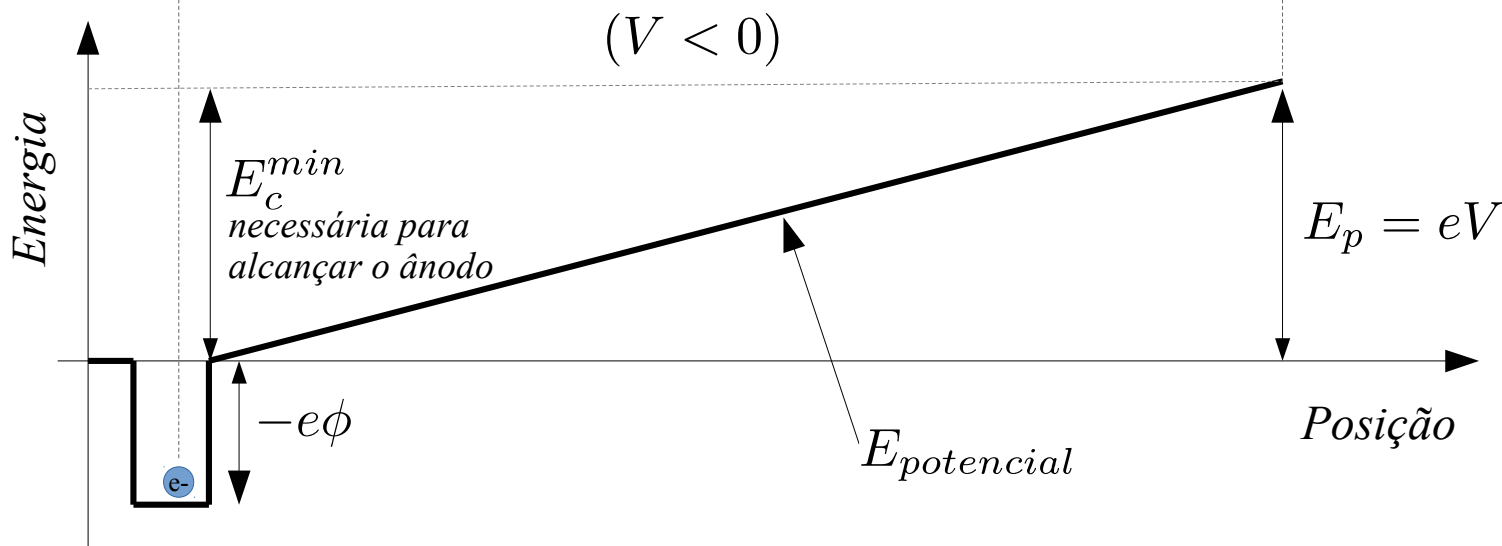
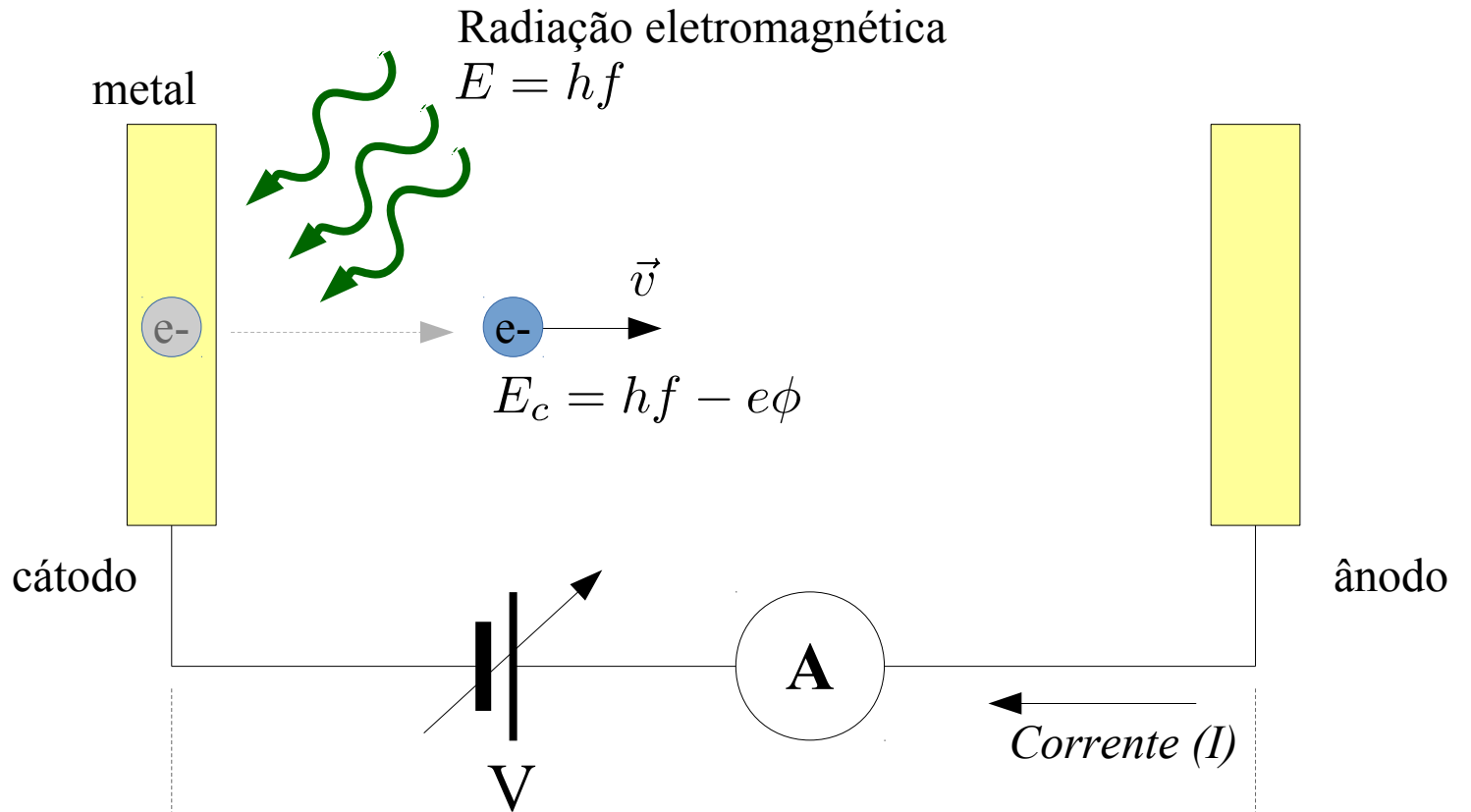
$$h = 4,135\ 667\ 43(35) \times 10^{-15} \text{ [eV} \cdot \text{s]}$$

$$e = -1.6021766208(98) \times 10^{19} \text{ [C]}$$

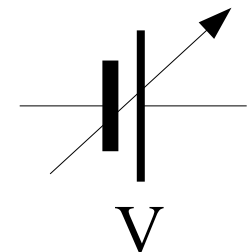
Albert Einstein, Annalen der Physik, 17, p. 132, 1905

https://en.wikisource.org/wiki/On_a_Heuristic_Point_of_View_about_the_Creation_and_Conversion_of_Light.)

Nova descrição teórica / Caracterização Experimental

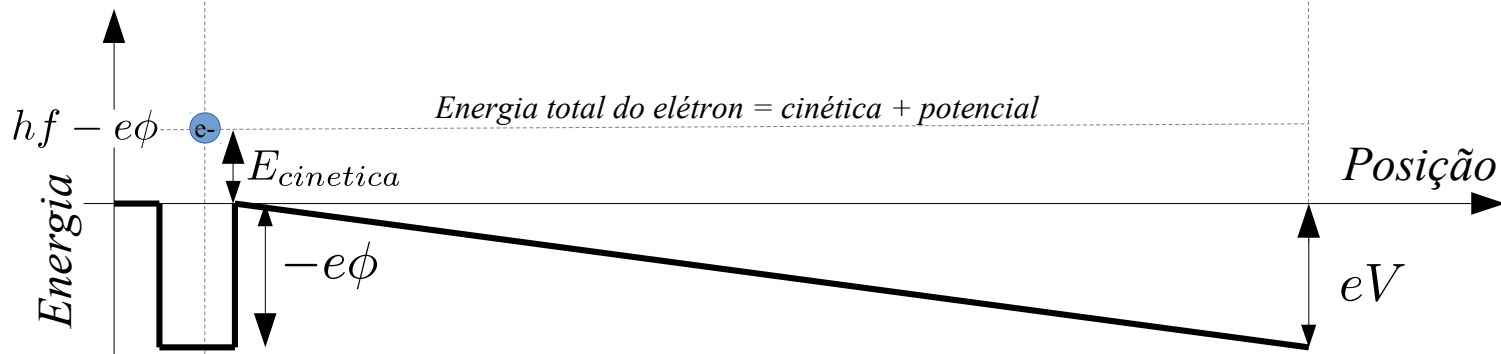
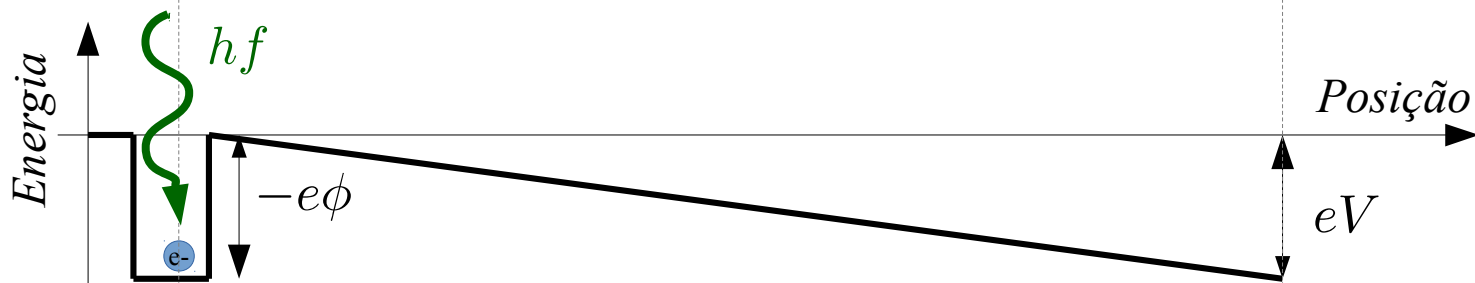
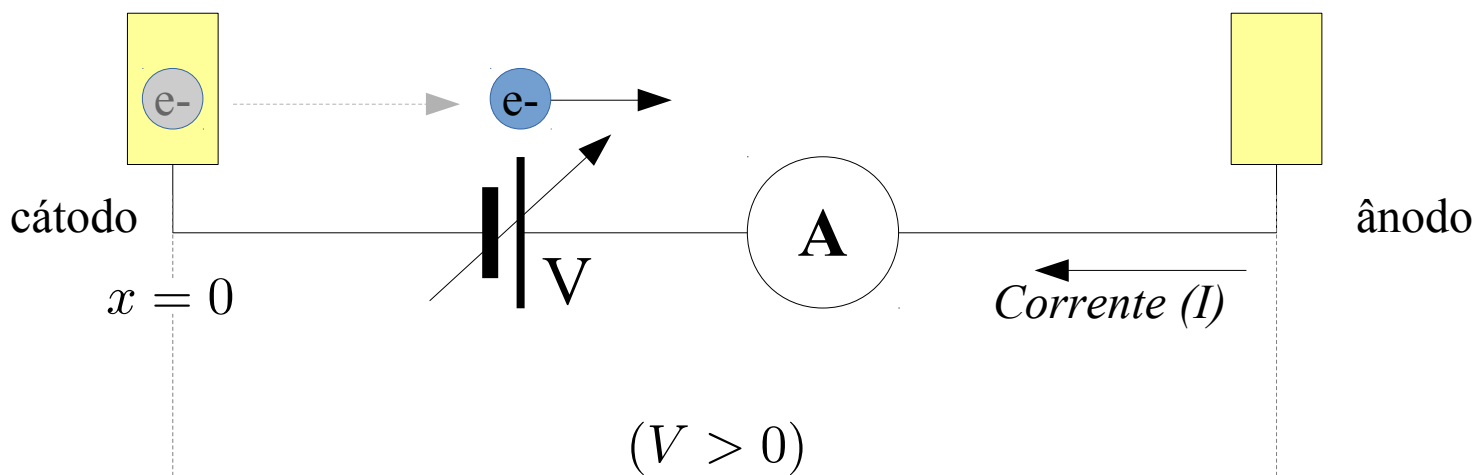


A inclinação do gráfico de energia potencial é ajustado pela fonte de tensão externa

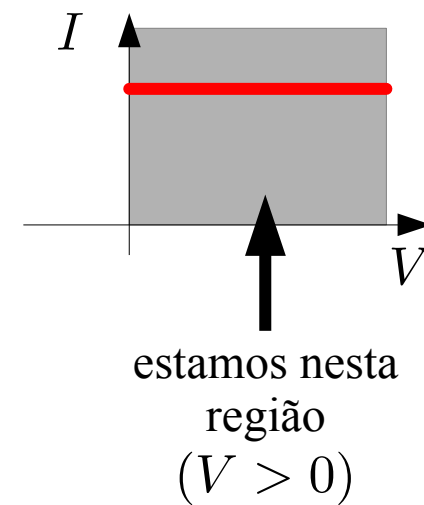


... Variando o potencial V : ($V > 0$)

(Potencial atrativo)



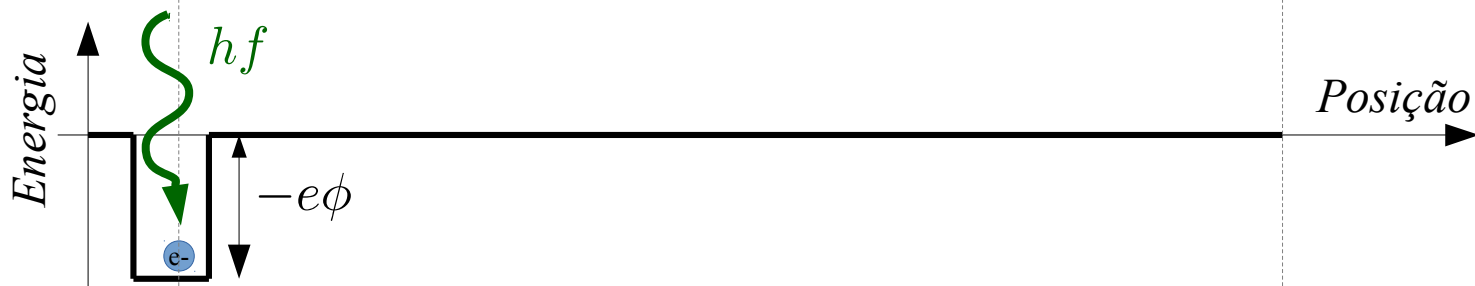
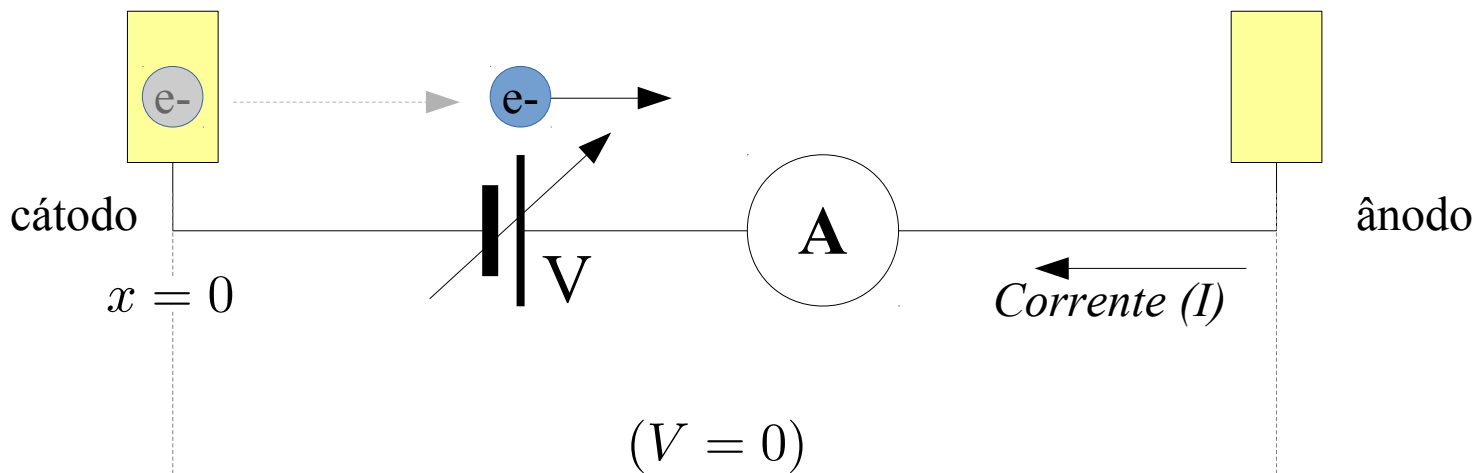
Curva ($I \times V$)



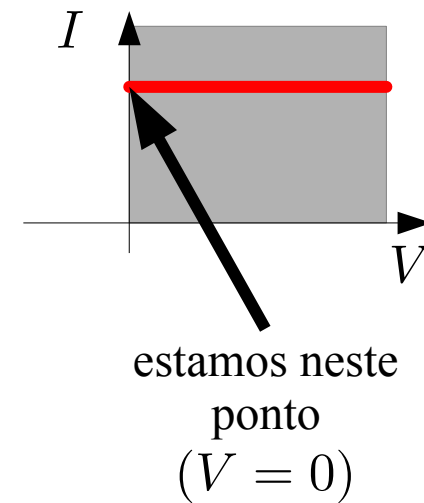
(antes de absorver)

(depois de absorver)

... Variando o potencial V : ($V = 0$)

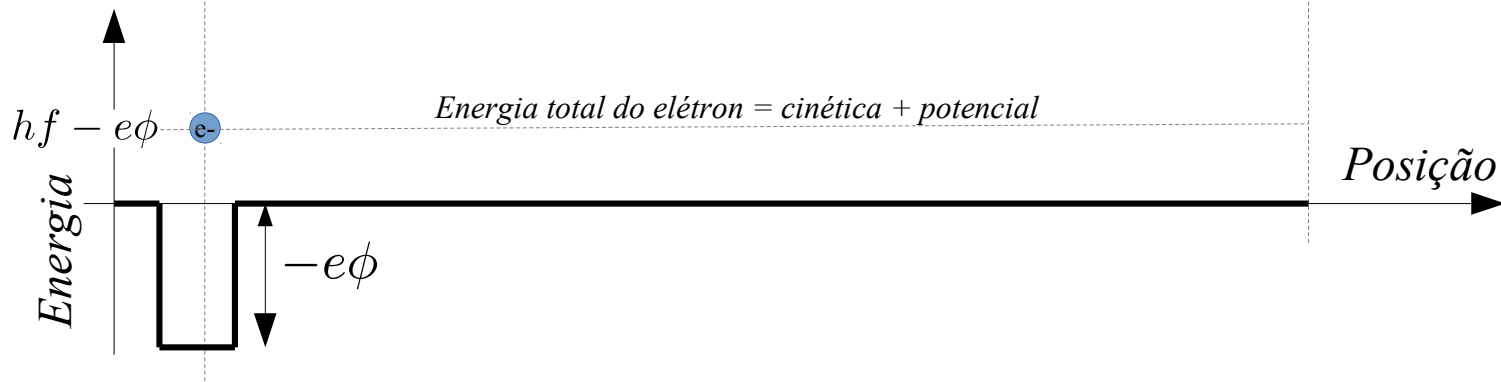


Curva ($I \times V$)



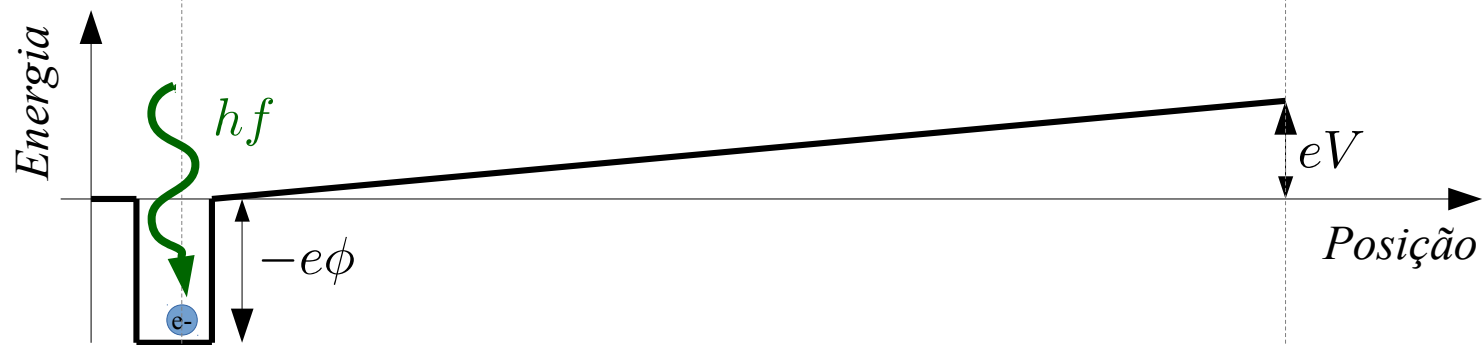
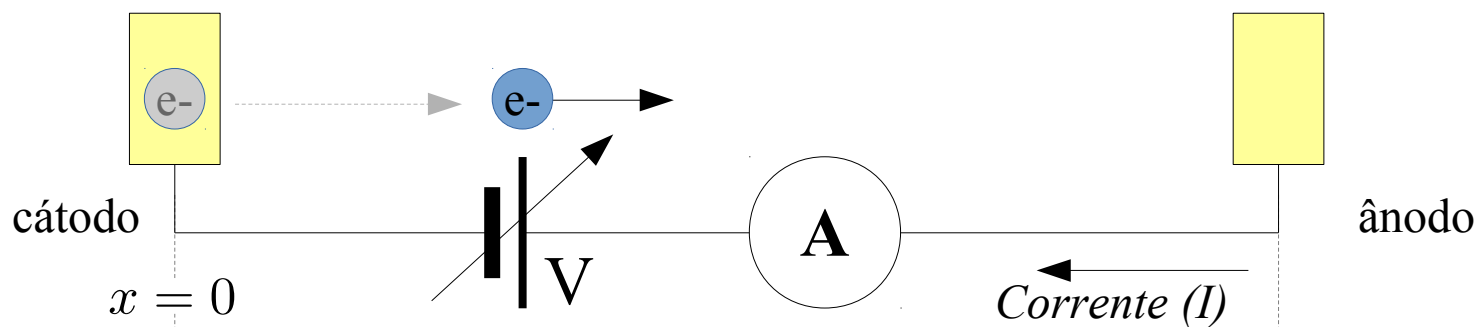
(antes de absorver)

(depois de absorver)

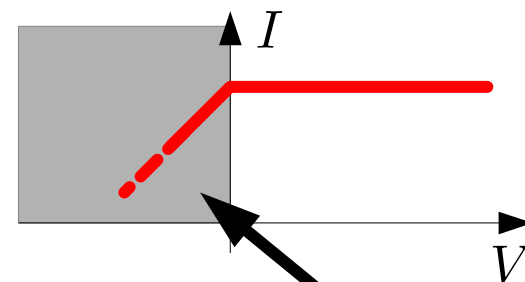


... e para Potencial $V < 0$?

(Potencial repulsivo)

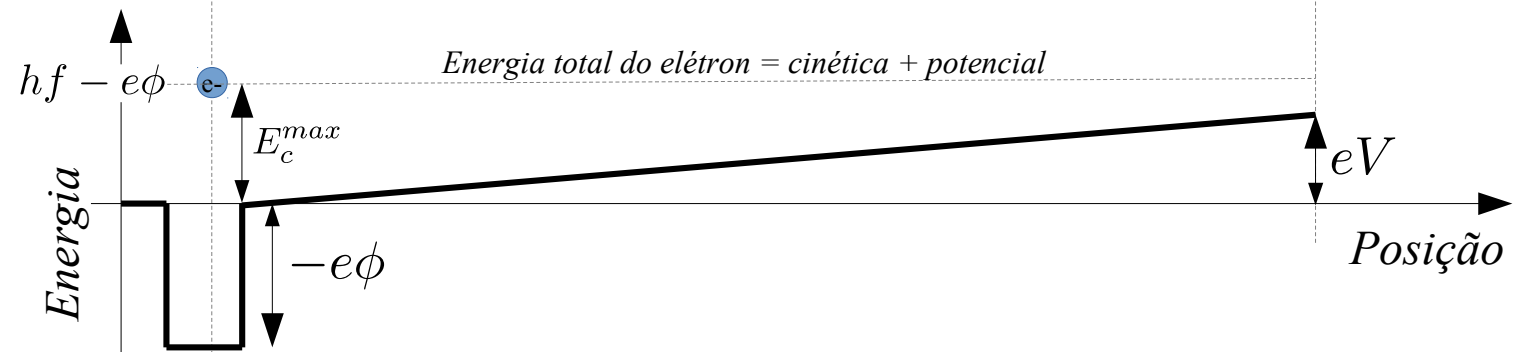


Curva ($I \times V$)



estamos nesta região
($V < 0$)

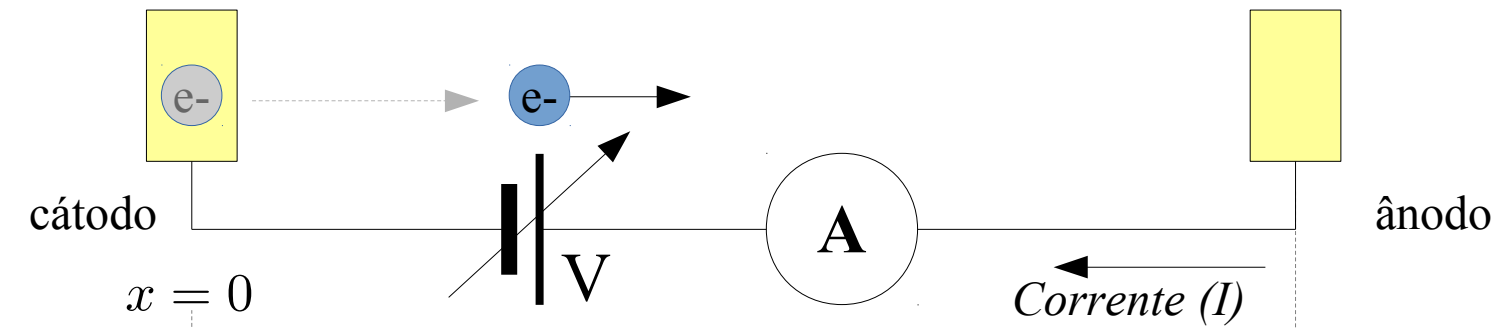
(antes de absorver)



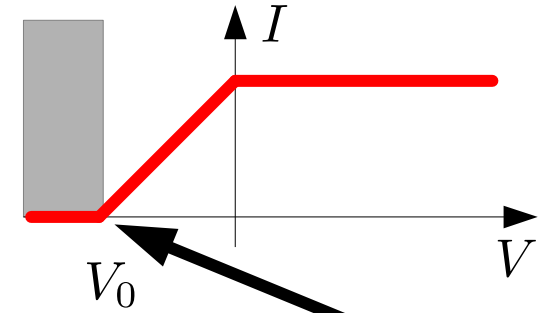
Energia total do elétron = cinética + potencial

(depois de absorver)

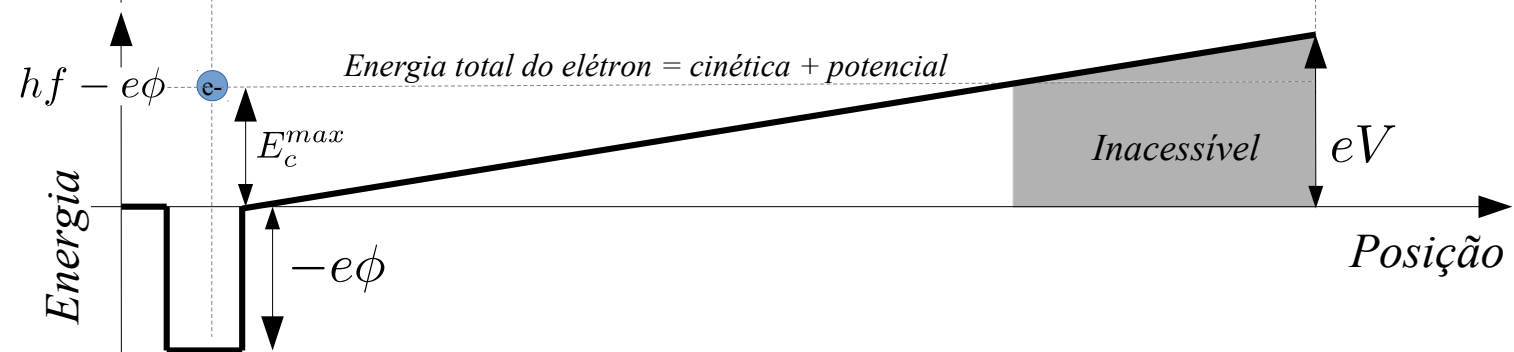
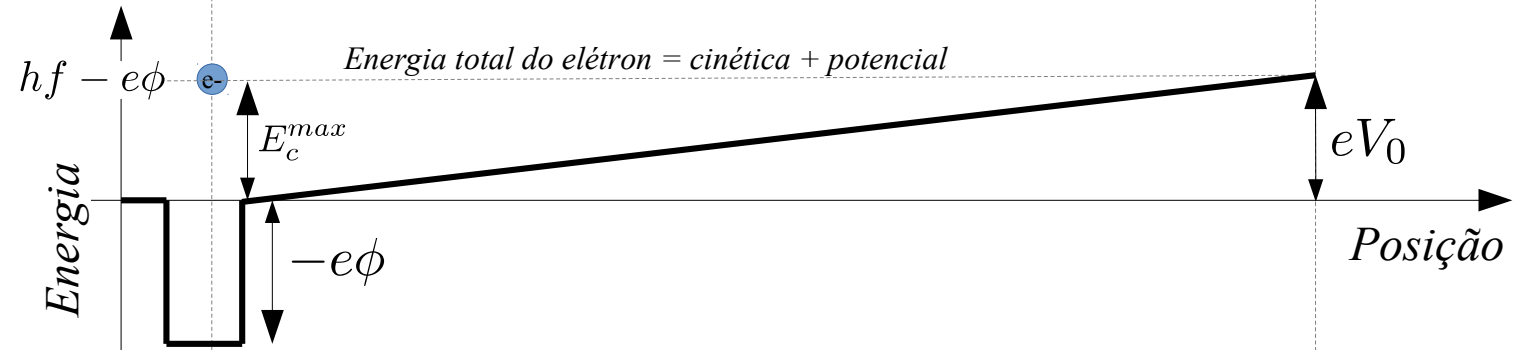
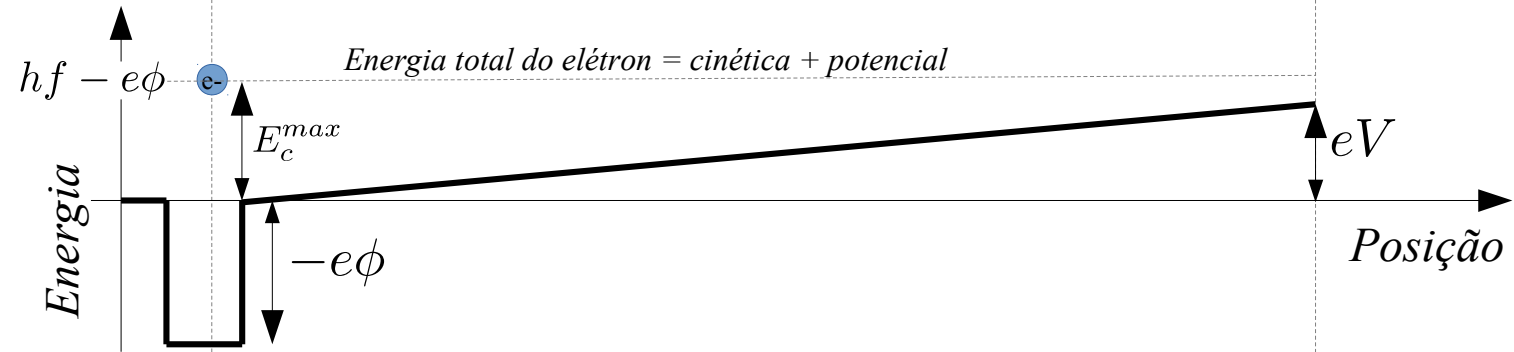
... se fizer V cada vez mais negativo?



Curva ($I \times V$)



estamos nesta região
($V \leq V_0$)



Vai existir um potencial $V = V_0$ no qual o elétron não tem energia para atingir o ânodo.

Corrente → ZERO!

Se tornar V mais negativo ainda → a corrente **permanece nula.**

Relembrando:

Einstein considerou que a energia da radiação eletromagnética é dada por:

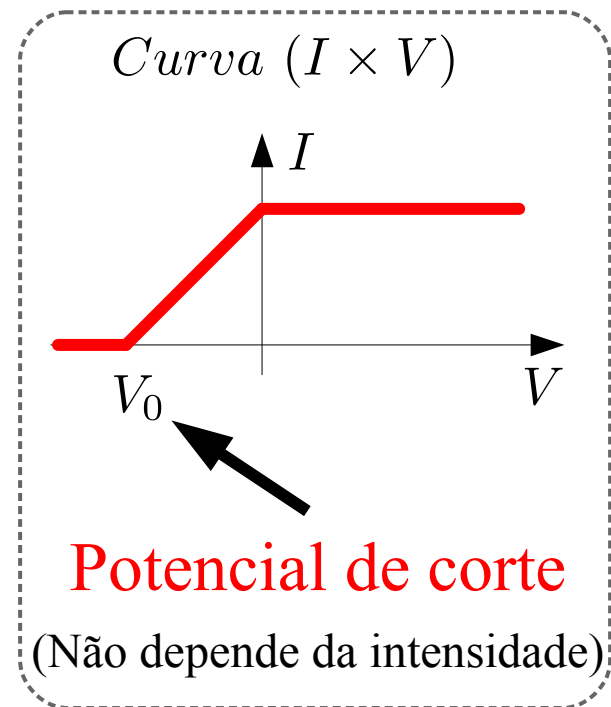
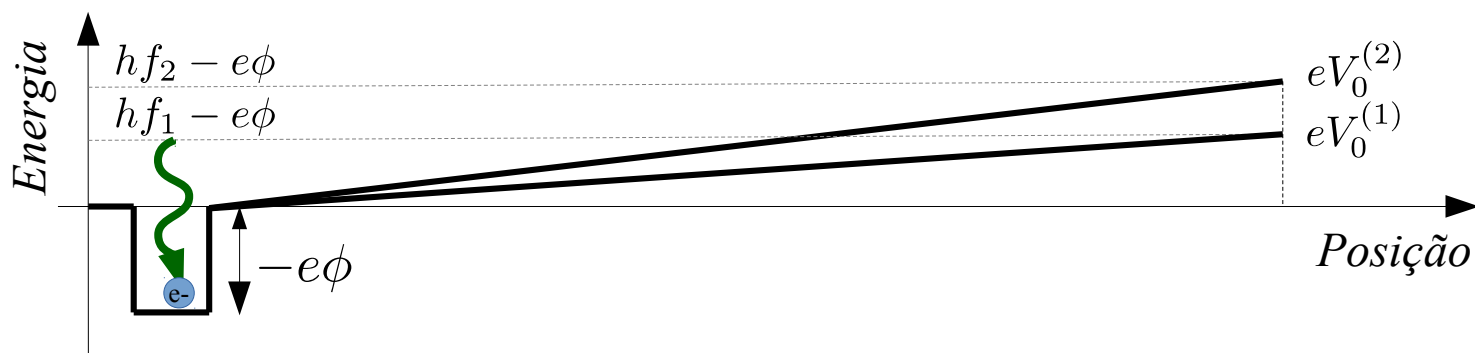
$$E = hf$$

Então a energia cinética máxima dos fotoelétrons é dada por:

$$E_c^{max} = hf - e\phi \longrightarrow eV_0 = hf - e\phi$$

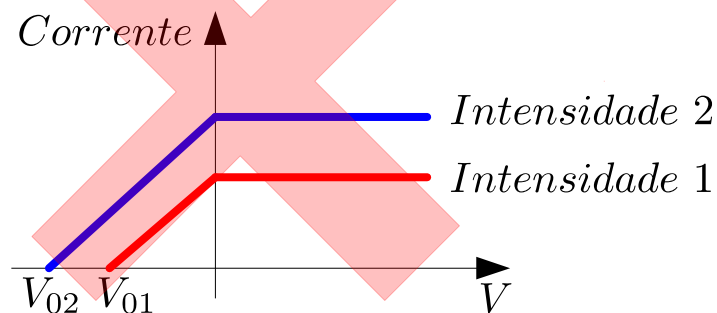
E o gráfico que obtivemos reproduz as medidas experimentais!!!

Note que o valor de V_0 depende da energia da radiação incidente!



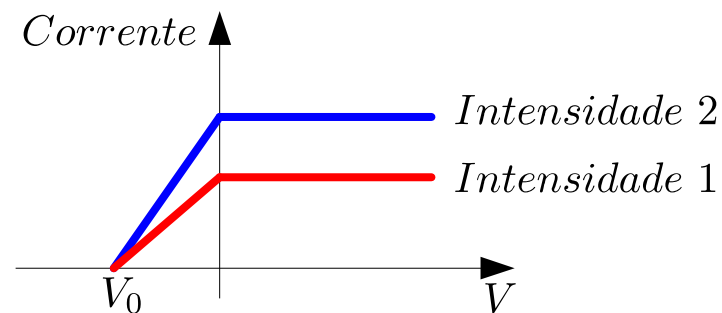
Previsão da Teoria Clássica

(antes dependia da intensidade)



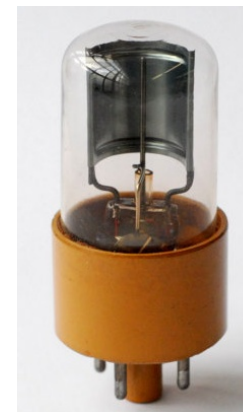
Medidas Experimentais

(agora depende só da frequência)



Parte Experimental:

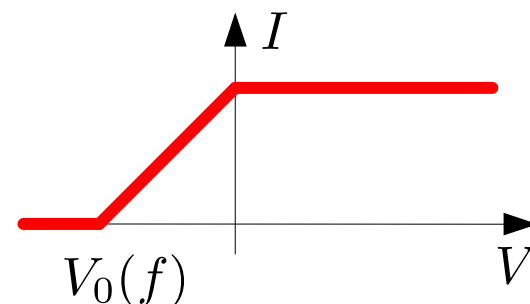
- Verificar as observações de Lenard / Millikan
- Verificar a previsão de Einstein, e determinar o valor da constante de Planck
- Medir a função trabalho da válvula fotoelétrica



O que será feito?

- Para várias radiações de comprimentos de onda e frequência diferentes iremos construir a curva ($I \times V$) de uma válvula fotoelétrica.
- Destas curvas será obtido o potencial de corte V_0 em função de f .
- Ajuste de reta para encontrar a constante de Planck.

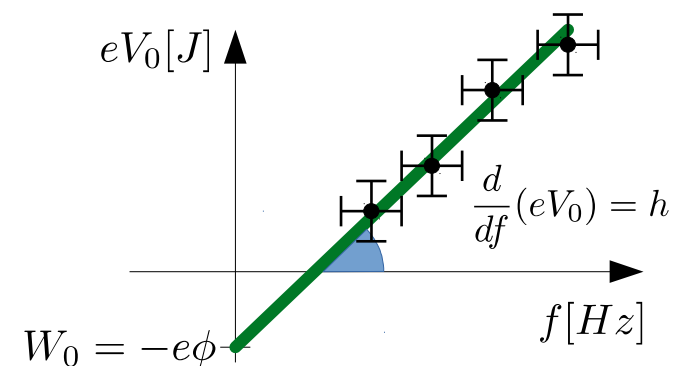
Curva ($I \times V$)



Ajuste de reta \longrightarrow $y = ax + b$

$$eV_0 = hf - e\phi$$

Arrows point from the terms in the equation to the corresponding terms in the linear fit equation: hf to ax , and $-e\phi$ to b .



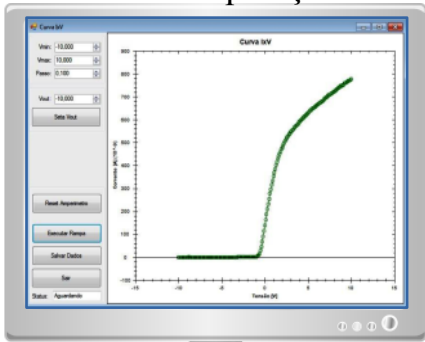
Lembre que: $c = \lambda f$

- f : Frequência da radiação eletromagnética
- λ : Comprimento de onda da radiação
- c : Velocidade da luz no vácuo

Aparato Experimental:

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

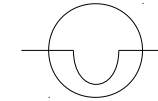
Computador +
software de aquisição



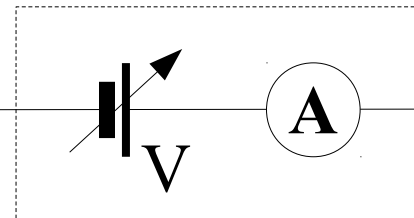
ProKeithley

Filtro de Intensidade

Fonte Luminosa

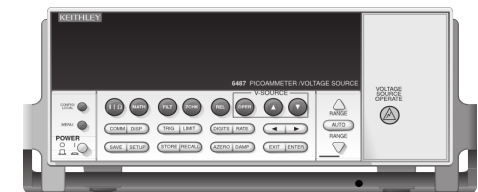


Rede de Difração

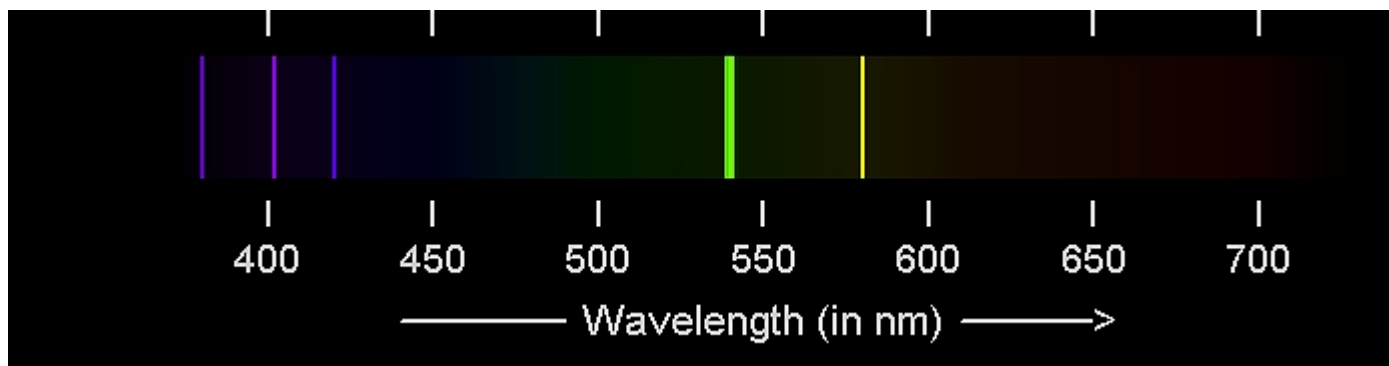


Pico amperímetro +
fonte de
tensão variável

RS232+GPIB



Espectro da Lâmpada de Hg:



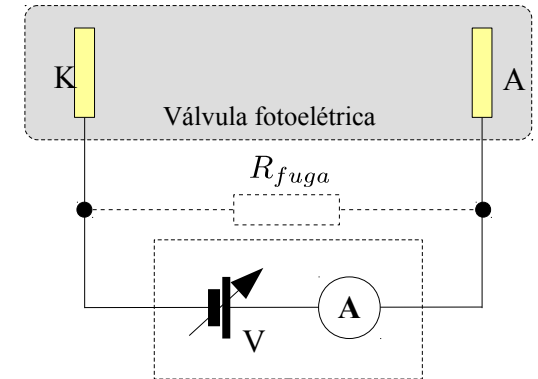
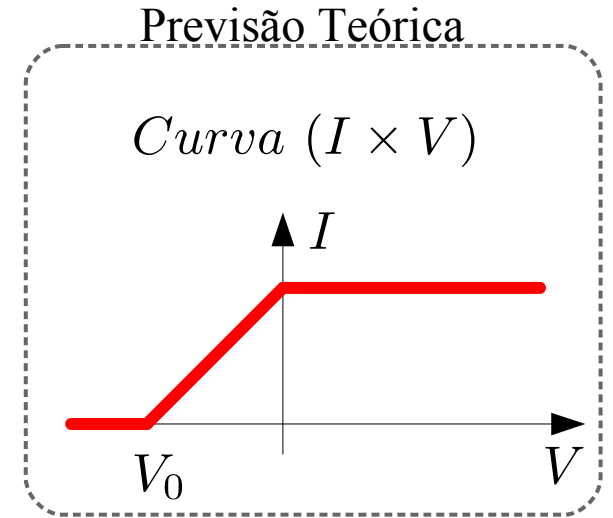
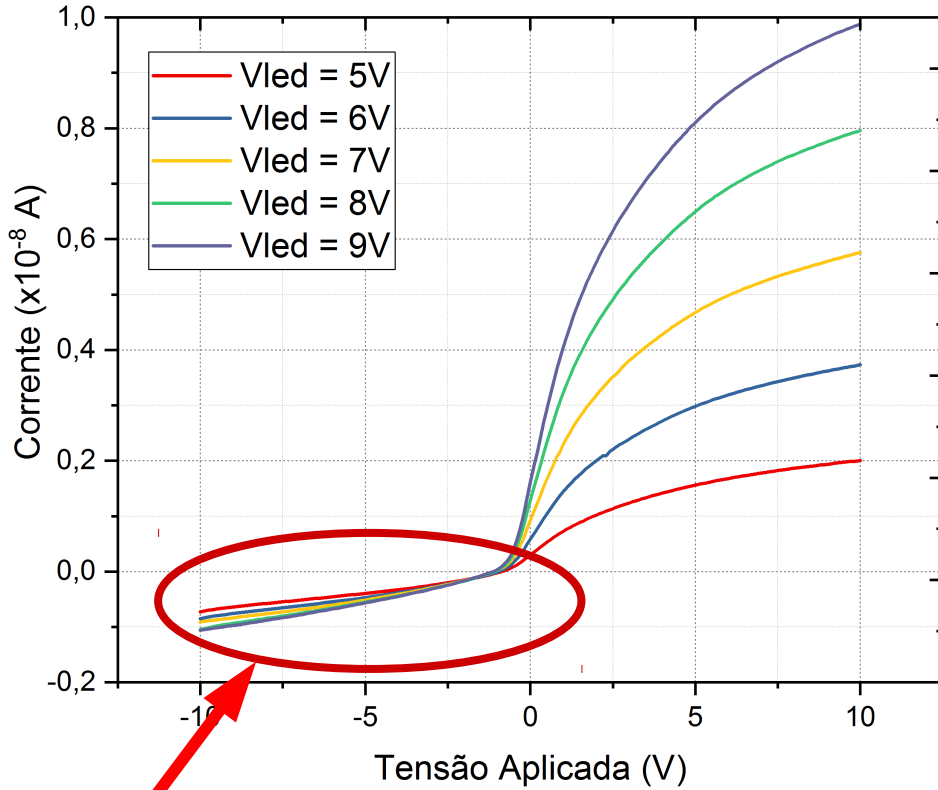
Cor	Comprimento de onda (nm)
U.V.	365,016
Violeta	404,656
Azul	435.835
Verde	546.075
Amarelo	576.9610, 578.969 (dubleto)
Vermelho	614,950

Procedimentos:

- 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%, 40% e 20%. Utilize a resolução de tensão no programa ProKeithley de 0,1V ou 0.05V (aquela que vocês julgarem melhor).
- 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.

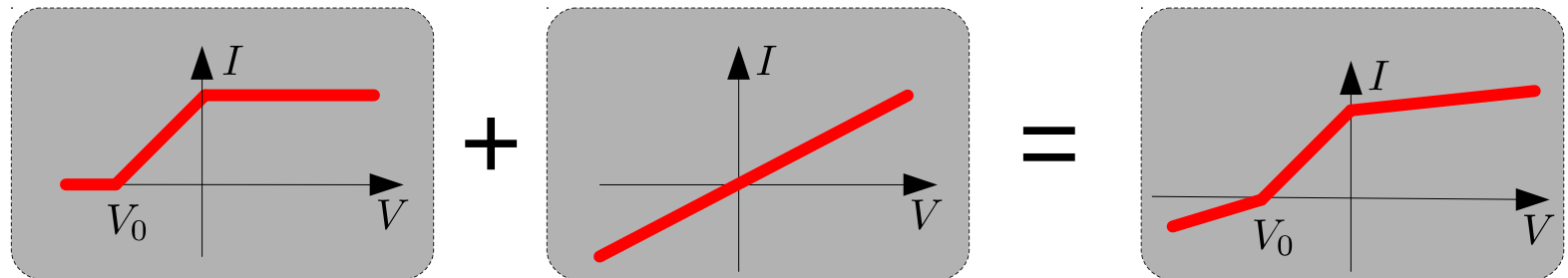
Essa corrente medida é comparável com a corrente de fundo obtida com a lâmpada ligada?

Curvas Experimentais: (Spoiler)



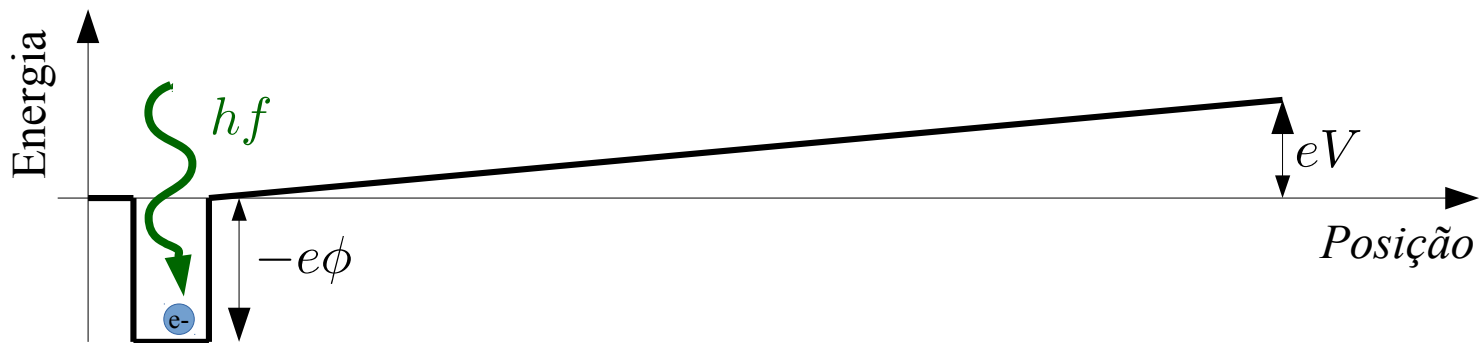
A corrente não vai a Zero!

- Iluminação parasita (de outras fontes)
- Correntes de fuga no circuito



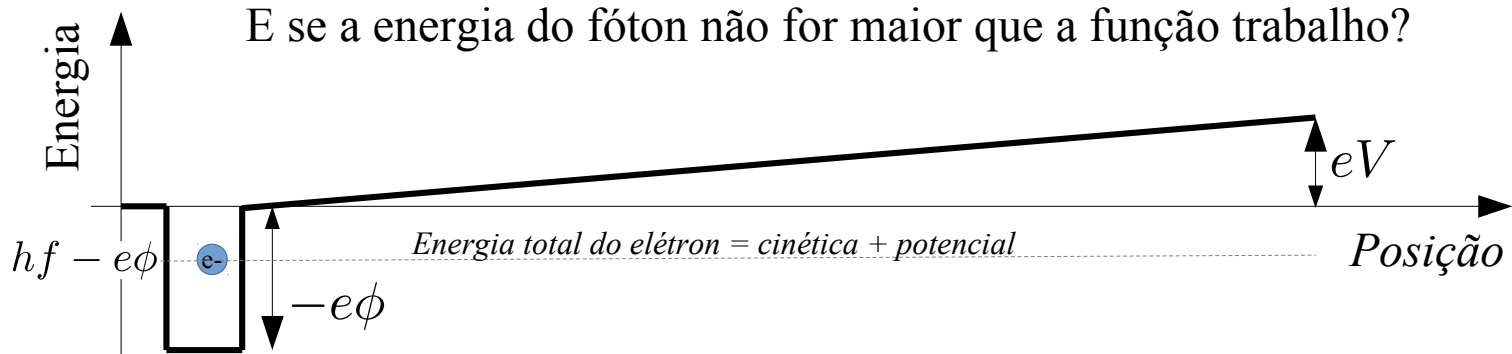
O que acontece quando $hf < e\phi$?

Será possível determinar o potencial de corte para todos os comprimentos de onda?

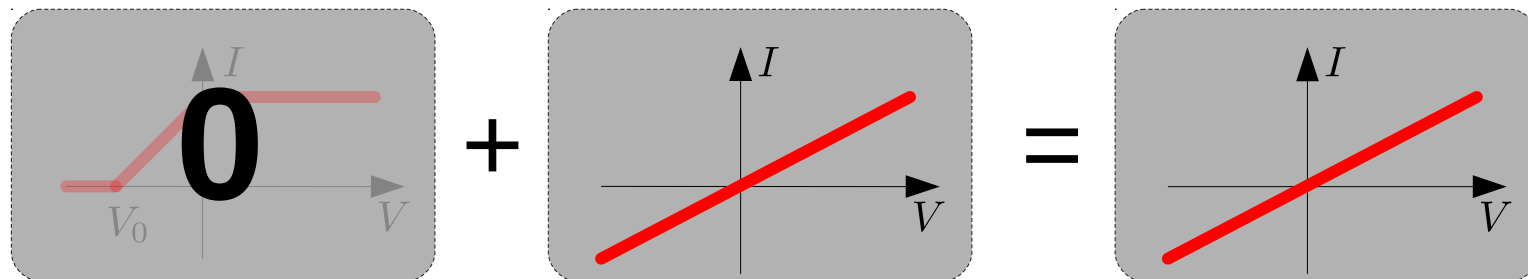


(antes de absorver)

E se a energia do fóton não for maior que a função trabalho?



(depois de absorver)

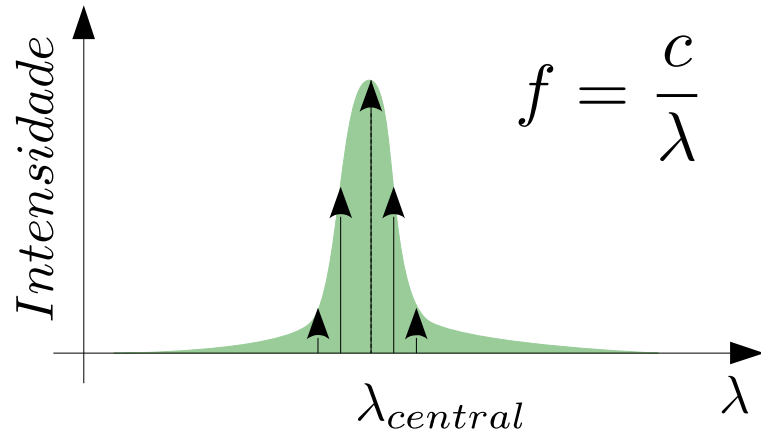


Curvas Experimentais: (Spoiler)

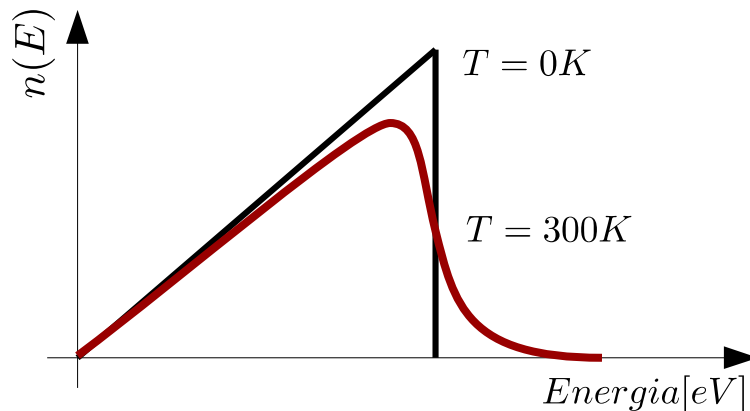
Qual o efeito da largura espectral e da Temperatura?

$$eV_0 = hf - e\phi$$

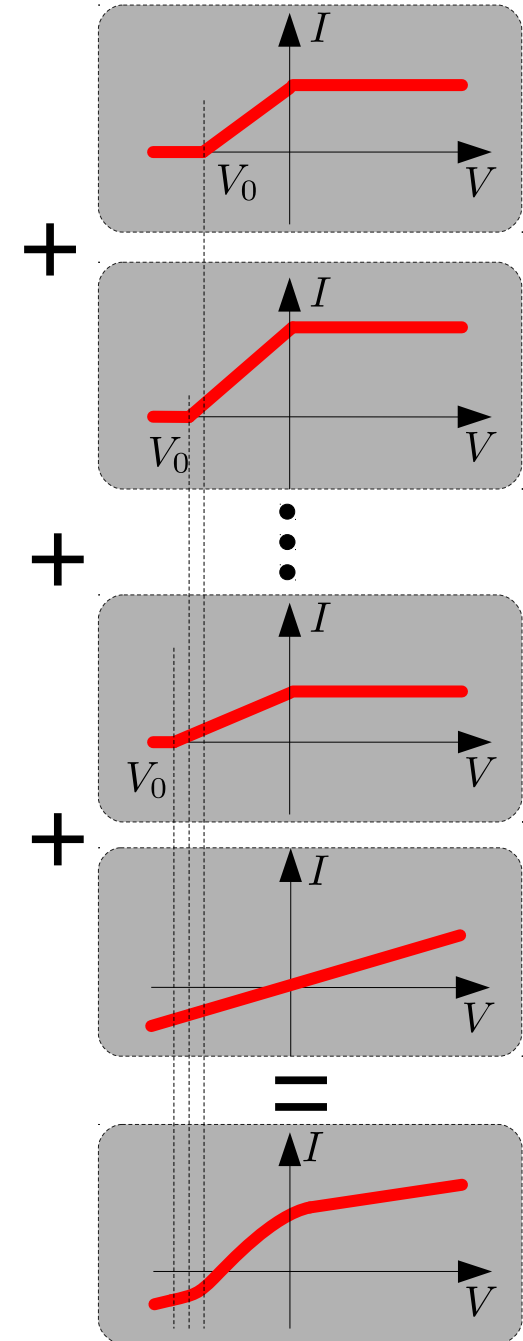
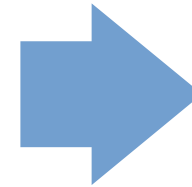
Dispersão da intensidade luminosa em função do comprimento de onda



Distribuição térmica de energias dos elétrons “livres” em um metal



A. L. Hughes, L. A. DuBridge, Photoelectric Phenomena, McGraw-Hill, New York, 1932, Ch1-2, p1-37



Métodos de Análise dos Dados

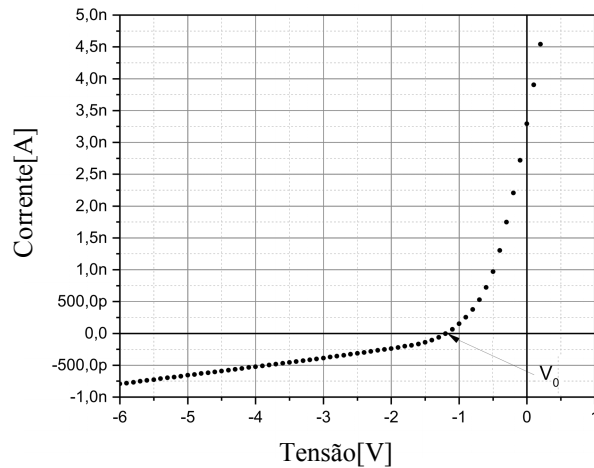
Métodos para determinação de V_0 :

No experimento veremos que

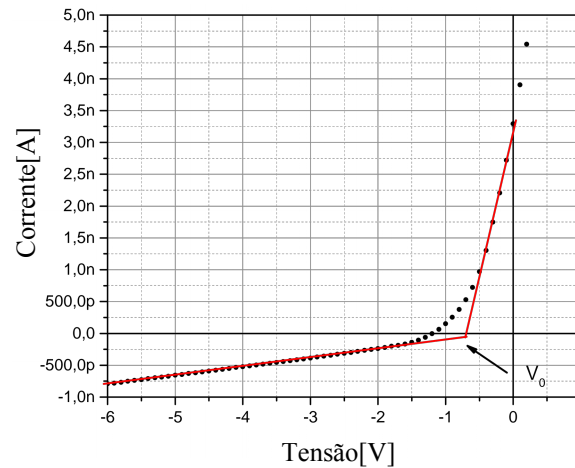
- 1) A corrente não vai a zero para potenciais menores que o potencial de parada. Porquê?
- 2) A corrente medida com a lâmpada desligada é da mesma ordem de grandeza que essa “corrente de fundo”?
- 3) Mesmo que subtraímos o efeito da corrente de fundo, a corrente da fotocélula não diminui abruptamente. Porquê?

(uso de outros métodos: justifique!)

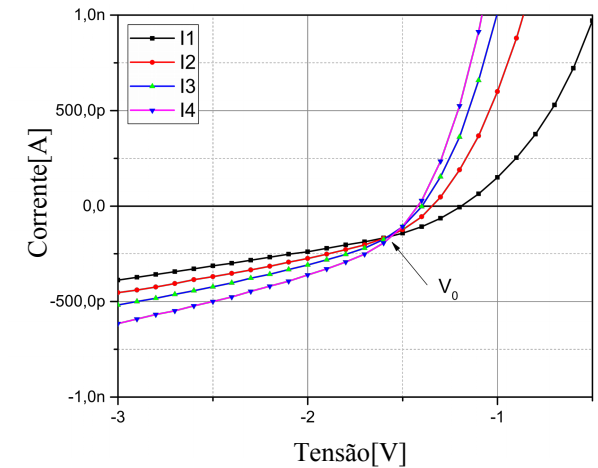
Método 1



Método 2



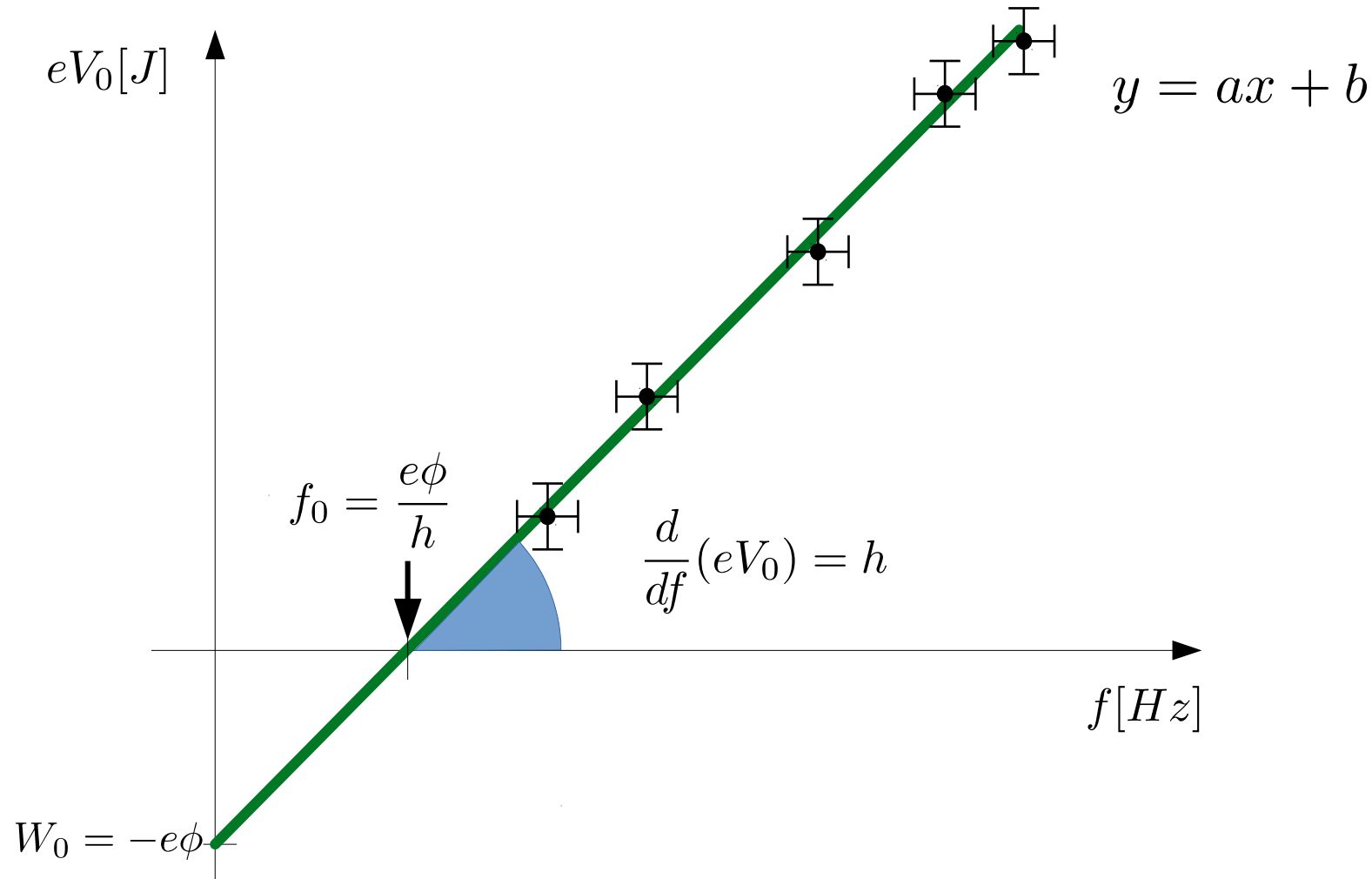
Método 3



**Justificativa para método 3: Potencial de corte independente da intensidade da radiação!
Então o ponto de intersecção das curvas é uma boa estimativa do potencial de corte**

Não esqueçam: propagar as incertezas no ajuste

(Compare os resultados com os 3 métodos + método proposto)

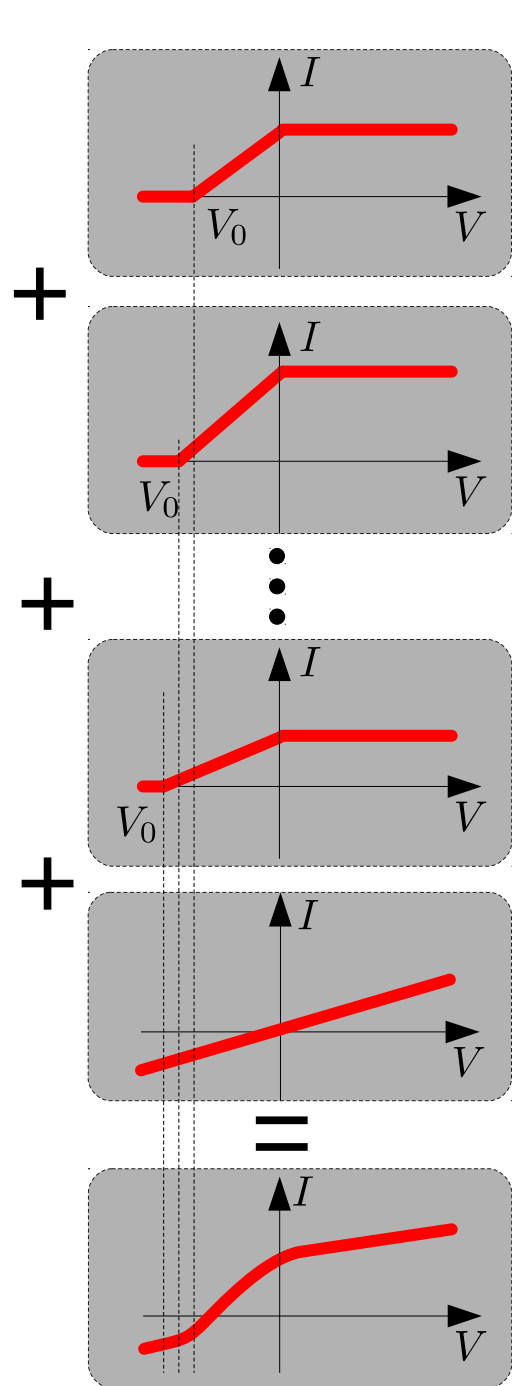


$$h \pm \sigma_h$$

$$\phi \pm \sigma_\phi$$

Quais são as unidades de medida naturais deste experimento?
Os resultados são compatíveis com os valores da literatura?

Outro método para determinação de V_0 :



$func(\lambda, V)$

O que fazemos com isso??

$$y = ax + b$$

$x \rightarrow V$
 $y \rightarrow I$

$$I(V_{aplicada}) = func(\lambda, V) + aV + b$$

Outro método para determinação de V_0 :

$$I(V_{aplicada}) = func(\lambda, V) + aV + b$$

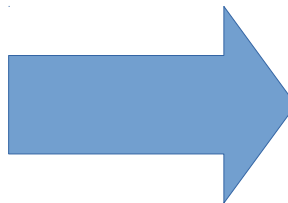
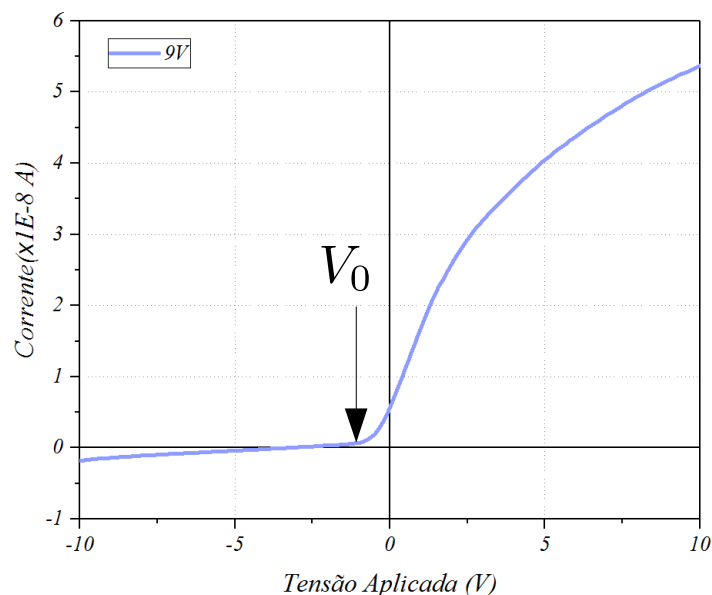
$$\frac{dI(V_{aplicada})}{dV} = \frac{dfunc(\lambda, V)}{dV} + a$$

Corrente de fundo

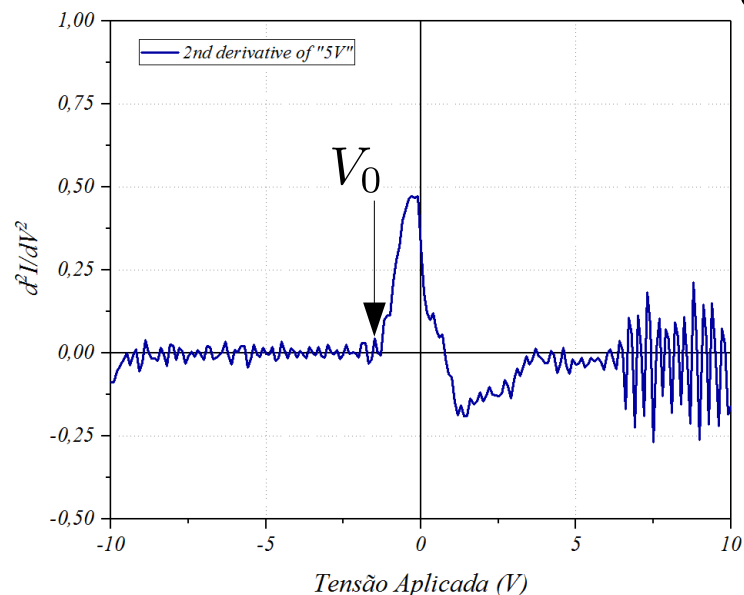
$$\frac{d^2 I(V_{aplicada})}{dV^2} = \frac{d^2 func(\lambda, V)}{dV^2}$$

Eliminamos a parcela da corrente relativa à corrente de fundo.

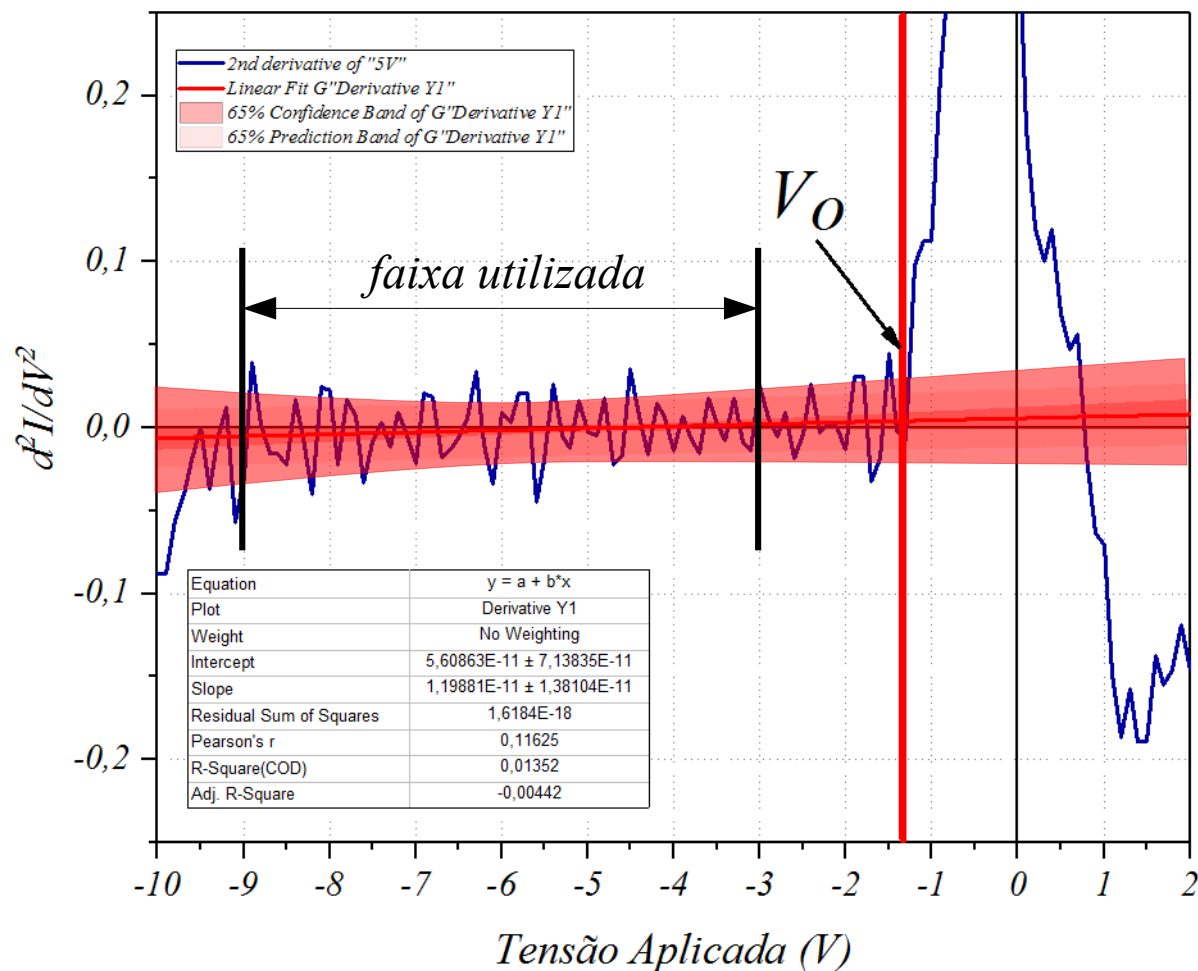
Fazemos isso numericamente, utilizando o Origin:



Qual o critério para escolher o V_0 ??



V_0 é o primeiro ponto fora da reta ajustada:



- 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.

Usando o Origin podemos fazer o procedimento de forma simples

Exemplo de V_0 para $\lambda = 4046(\text{\AA})$

- O V_0 considerado vai ser a média dos V_0 encontrados para as curvas obtidas com intensidades diferentes.

$$\sigma_f^2 = \left(\frac{df}{d\lambda} \right)^2 \sigma_\lambda^2 \longrightarrow \sigma_f = \frac{c}{\lambda^2} \sigma_\lambda$$

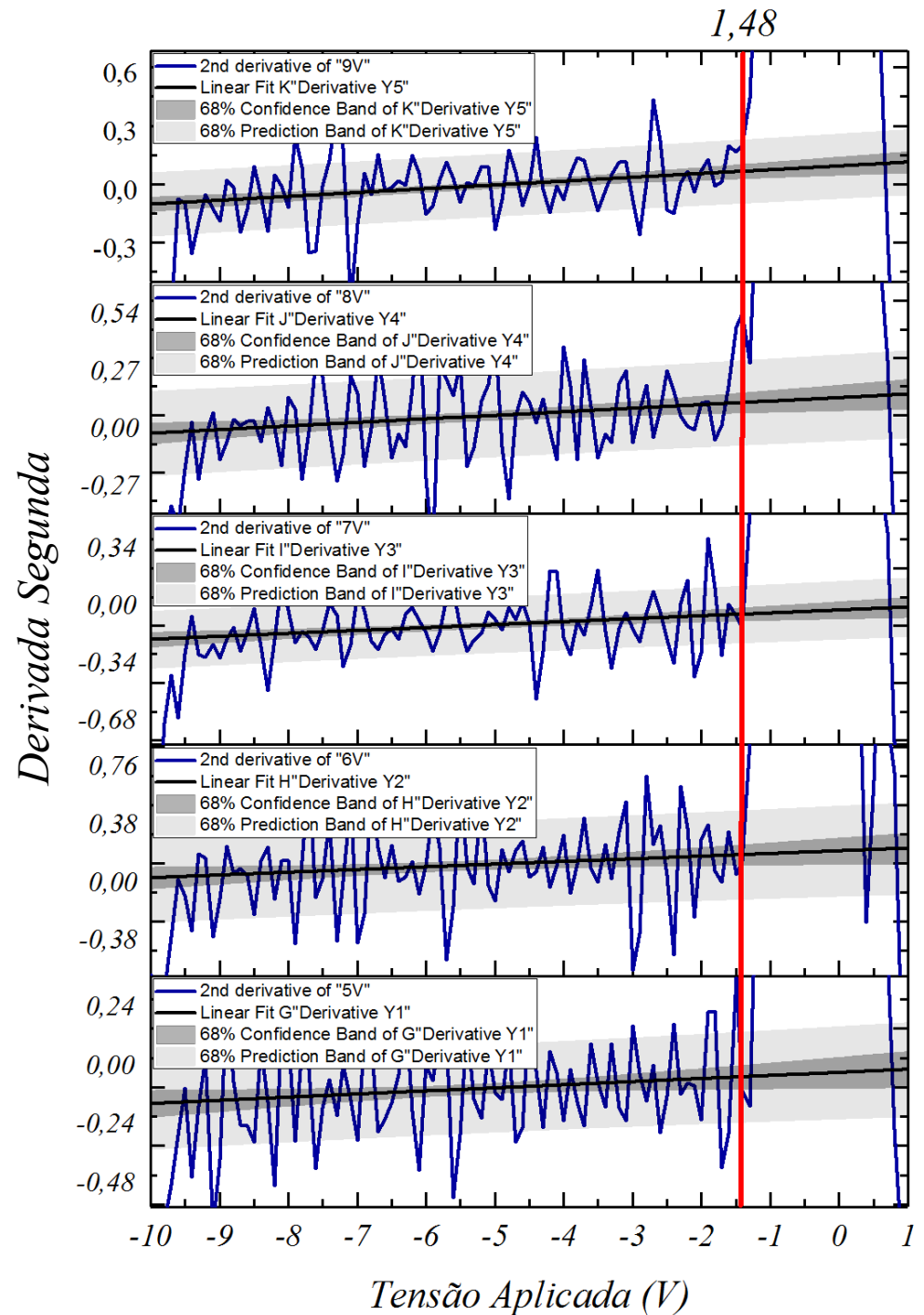
$$\sigma_{V_0}^2 = \sigma_{estat}^2 + \sigma_{instr}^2$$

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Valores de referência



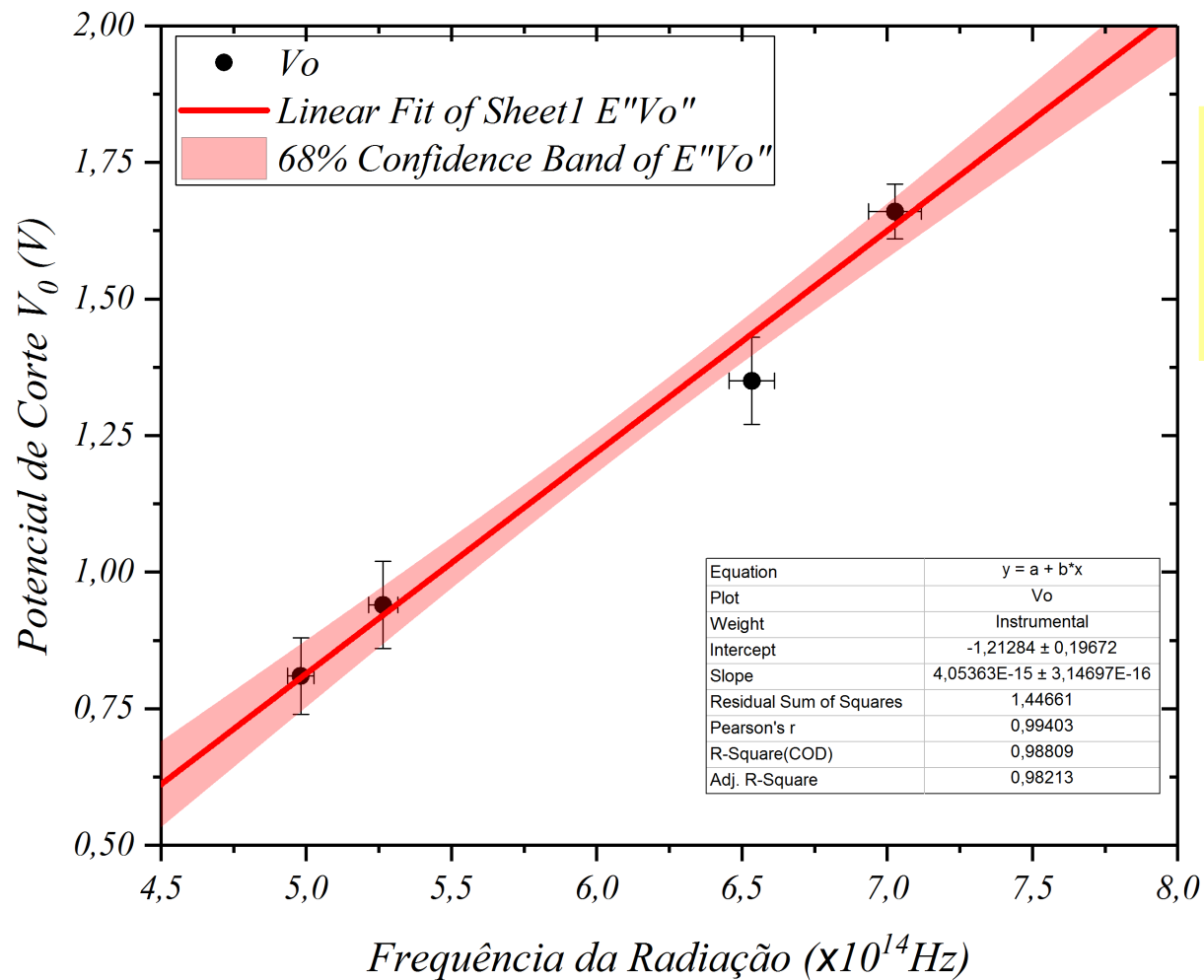
λ	$freq$	σ_f	V_0	σ_{V_0}
3650	8,22E14	9,1E12	1,66	0,05
4046	7,41E14	7,9E12	1,48	0,08
4358	6,88E14	5,0E12	0,94	0,08
5461	5,49E14	4,5E12	0,81	0,07
5779	5,19E14	3,2E12	0,67	0,05
6149	4,88E14	3,1E12	-----	-----



Pausa para fazer em sala

- 1) Agrupe seus dados de todas as intensidades para cada comprimento de onda em worksheet separados (um workbook para cada comprimento de onda).
- 2) Utilize a ferramenta : Analysis → Mathematics → Differentiate (Order 2).
- 3) Plote gráficos do tipo Stack para todas as derivadas.
- 4) Ajuste as escalas horizontal (-10V, +1V) e vertical (analise o seu caso).
- 5) Ajuste uma reta no intervalo: -9 à -3 volts (incluindo banda de confiança e predição para um nível de confiança de 68% - use Spam to Full Axis).
- 6) Escolha o V_0 como sendo o primeiro ponto que está fora da banda de confiança.
- 7) Repita o procedimento para todos os comprimentos de onda.

Comparando os Resultados:



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

$$\phi = (-1,21 \pm 0,19)(eV)$$

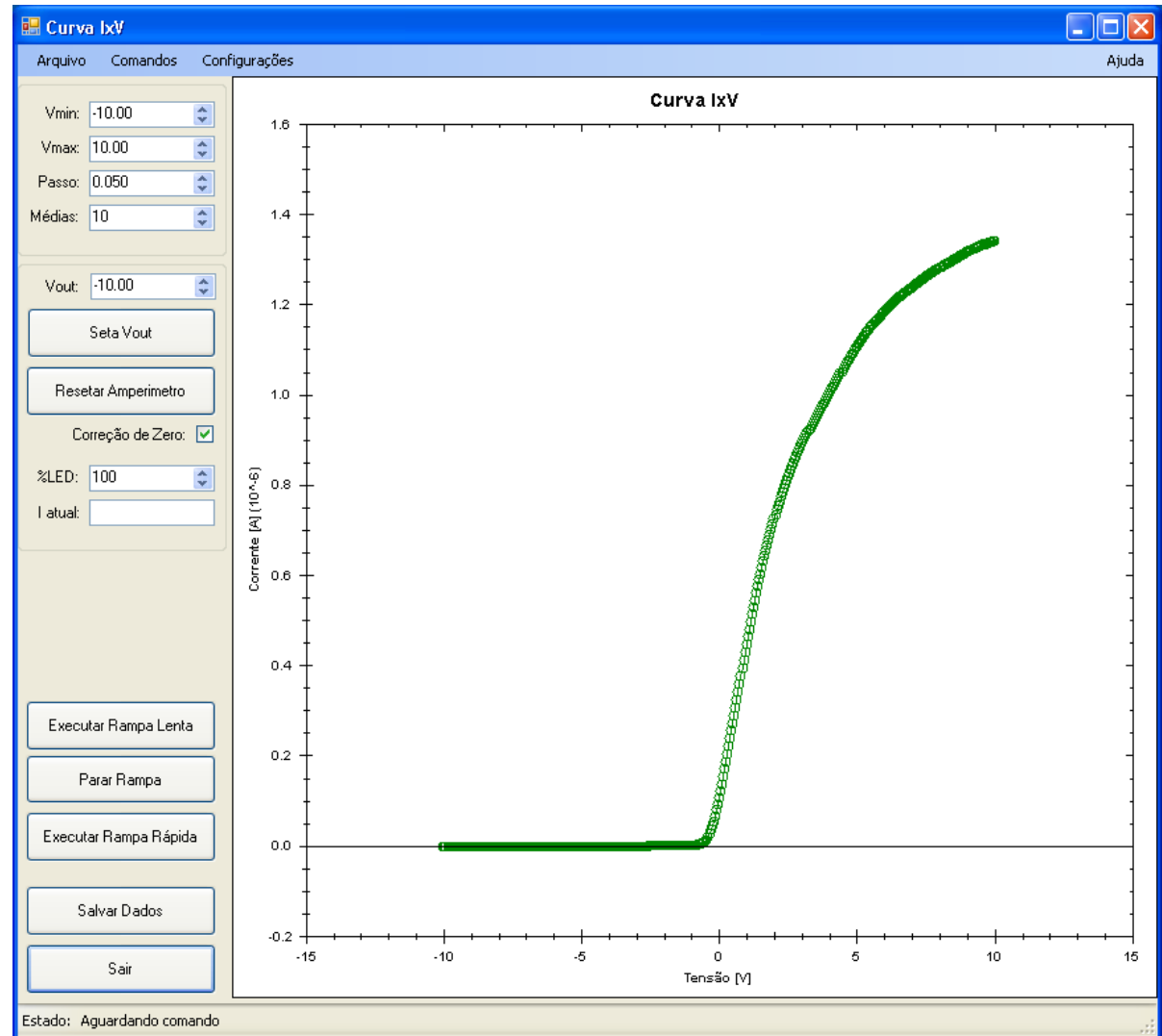
Valores esperados:

$$h = 4,13 \times 10^{-15} (eV \cdot s)$$

$$\phi = -1,36(eV)$$

Detalhes do Programa de Aquisição:

Um detalhe: Confirmam se as “configurações regionais” do Windows está setada para “Inglês dos Estados Unidos”.



Roteiro de Aquisição:

Tabela 1 - Organização da tomada de dados – primeira tomada de dados.

	Cor da radiação incidente					
Filtro de Intensidade	U.V	Violeta	Azul	Verde	Amarelo	Vermelho
100%						
80%						
60%						
40%						
20%						
corrente de escuro						

Sobre o Relatório:

- A avaliação do experimento será feita por meio de um relatório científico a ser entregue em formato pdf no dia do experimento para o endereço de e-mail:

Eng. Química: **tiago2.fernandes@usp.br** com cópia para **tiago.agn@gmail.com**

Eng. Computação: **resende@if.usp.br**

- Os dados experimentais obtidos no laboratório devem ser enviados para os mesmos endereços, **no dia do experimento.**
- O relatório deve seguir o modelo no site da disciplina

Mão na Massa