



Efeito Fotoelétrico

Física Experimental V

Profa Rosangela Itri

Prof Leandro R S Barbosa

agradecimento: contribuicoes de Tiago Fernandes para a elaloracao do experimento e preparacao de material de apresentacao

Fevereiro 2019

J. J. Thomson

Contexto histórico

Heinrich Hertz,



The photoelectric effect was discovered accidentally in 1887 by Hertz



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



1906 - Descoberta do Elétron

Contexto histórico

Philipp Lenard



1905 - raios catódicos

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

Contexto histórico

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.



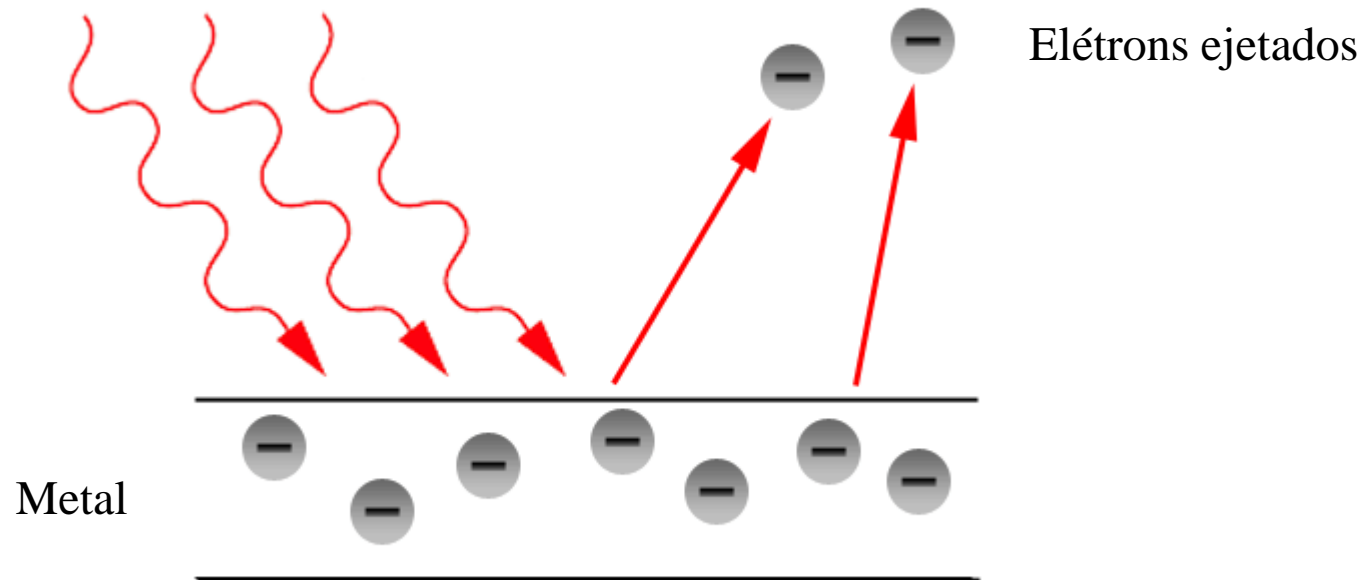
1921 - Efeito Fotoelétrico
"por suas contribuições à
física teórica"

Efeito Fotoelétrico

O Objetivo dessa experiência consiste em determinar a constante de Planck através da medida do efeito fotoelétrico e caracterizar o comportamento dual (onda-partícula) da radiação eletromagnética. Em 1887, Hertz realizava sua famosa experiência, onde eram produzidos e detectados ondas eletromagnéticas em laboratório, confirmando e comprovando as características ondulatórias da radiação eletromagnética e da teoria de Maxwell. Por pura casualidade ele também descobriu o efeito fotoelétrico que corresponde a uma descrição corpuscular da luz. Em 1899, Thomson constatou que partículas negativas (elétrons) eram emitidas quando uma superfície metálica era exposta à luz e em 1902, P. Lenard conseguiu medir a energia desses elétrons.

O que é o Efeito Fotoelétrico

Radiação eletromagnética



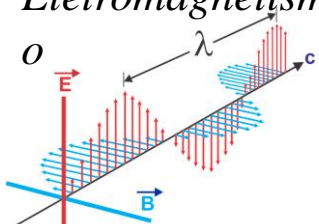
Descrição teórica

$$\langle \vec{S} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \vec{S} dt$$

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.

Eletromagnetism



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


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

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

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

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

Mecânica clássica



$$F = ma$$

$$v = v_0 + at$$

$$F_e = eE$$

$$v_0 = 0$$

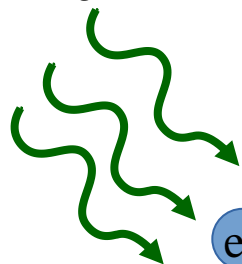
$$F = F_e$$

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

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

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

Radiação eletromagnética



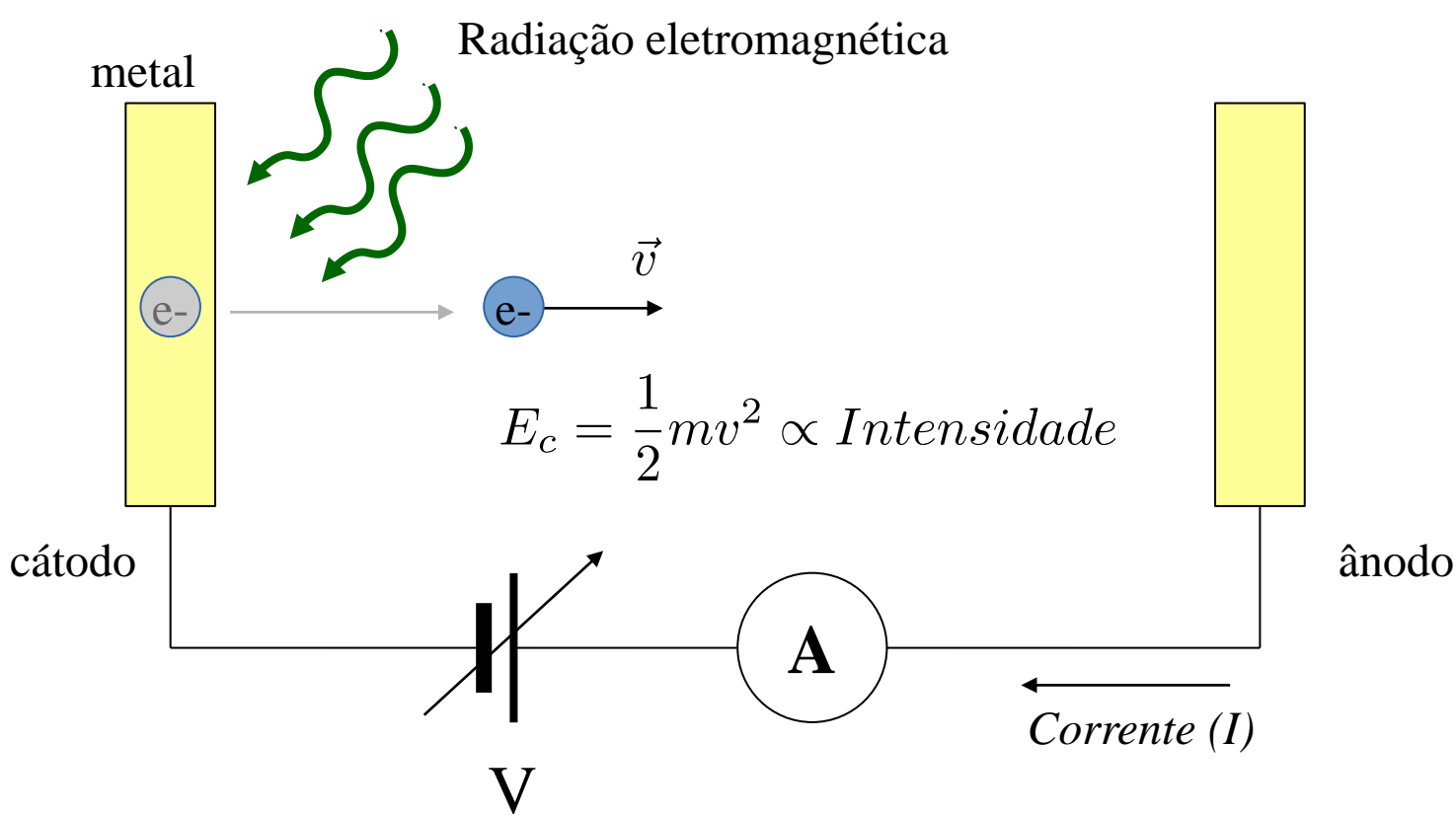
$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \propto \text{Intensidade}$$

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

- \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.

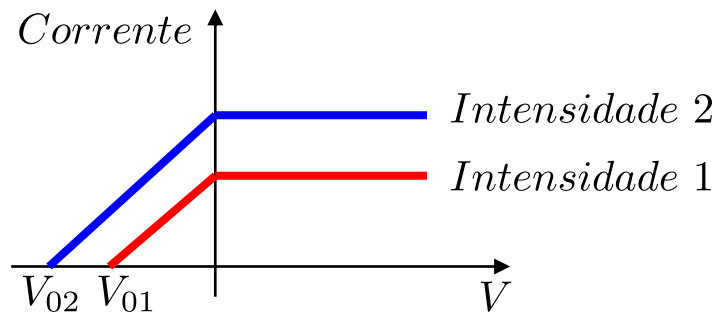
Descrição teórica / Aparato para medir E_c :



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

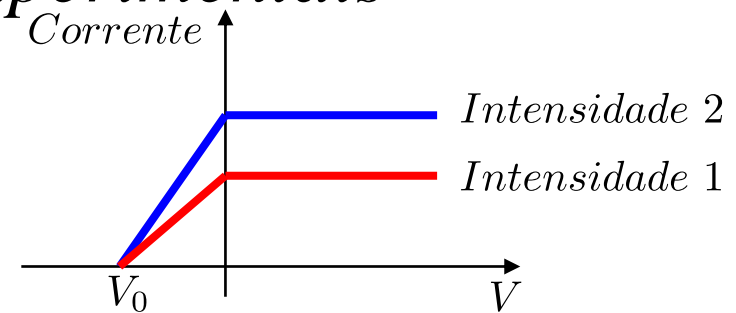
- Tempo que a partícula fica exposta a radiação!
- Mesmo se a radiação não for intensa podemos acumular energia durante um tempo suficiente e ejetar elétrons de qualquer forma!

Previsão da Teoria Clássica



Medidas

Experimentais

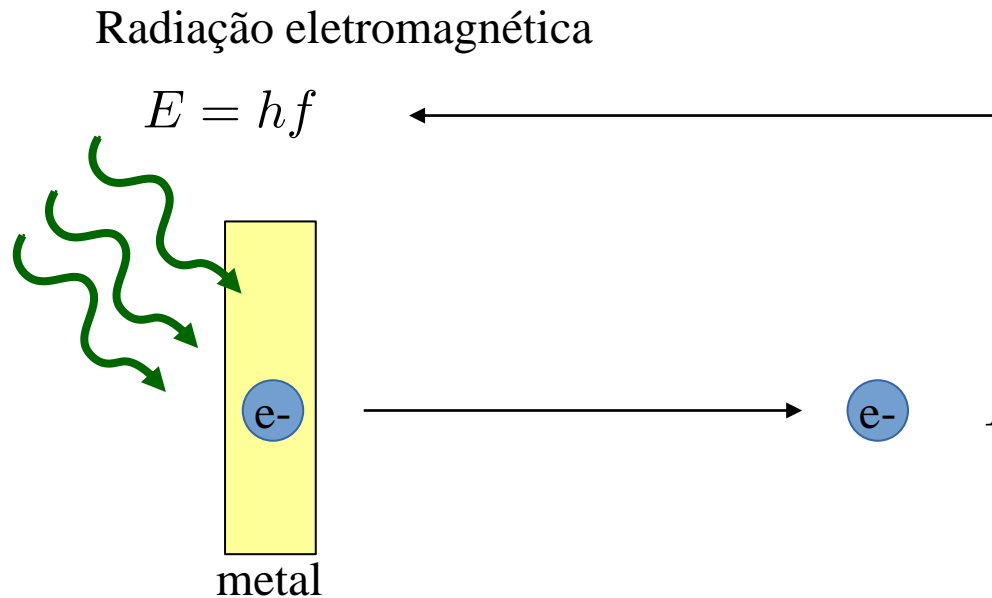
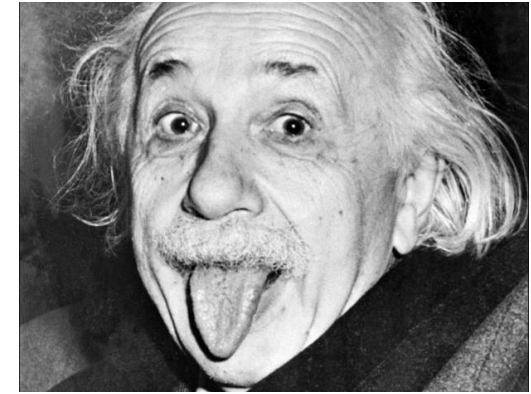


Nova descrição teórica (Albert Einstein)

“... 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)

$$E_c = hf - e\phi$$

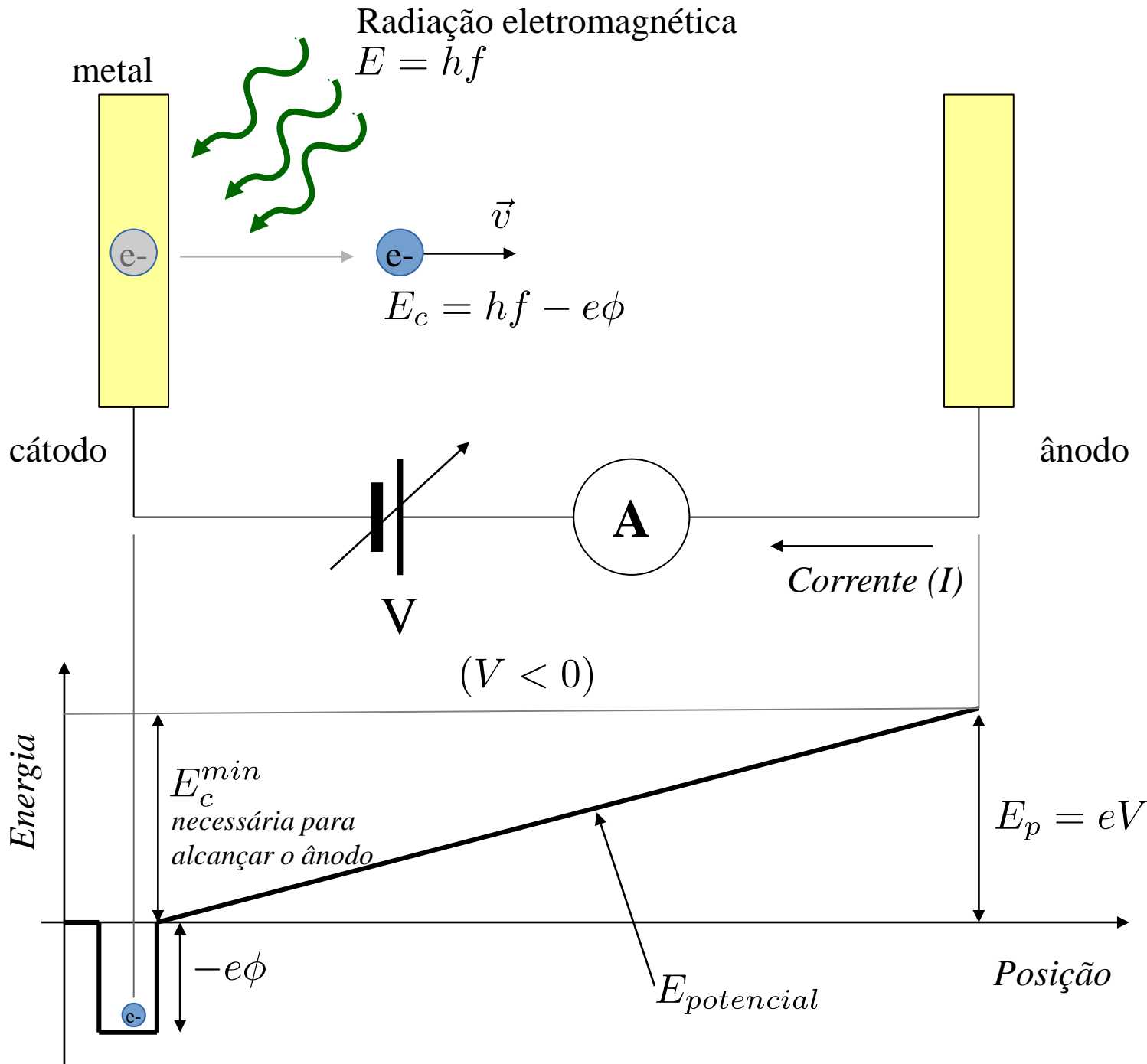
$$h = 4,135\ 667\ 43(35) \times 10^{-15} \text{ [eV} \cdot \text{s]}$$

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

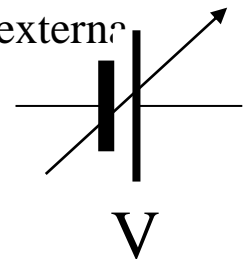
Albert Einstein, Annalen der Physik, 17, p. 132, 1905

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

Nova descrição teórica / Caracterização Experimental

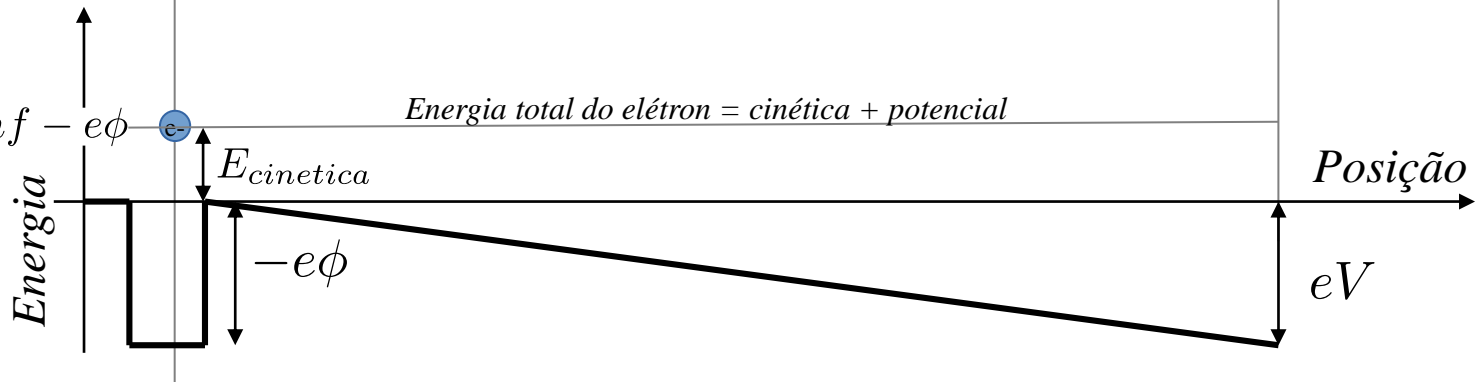
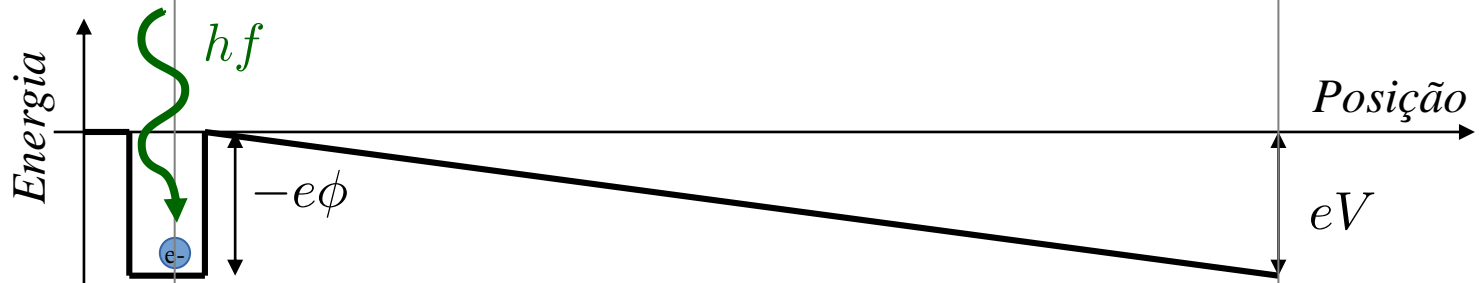
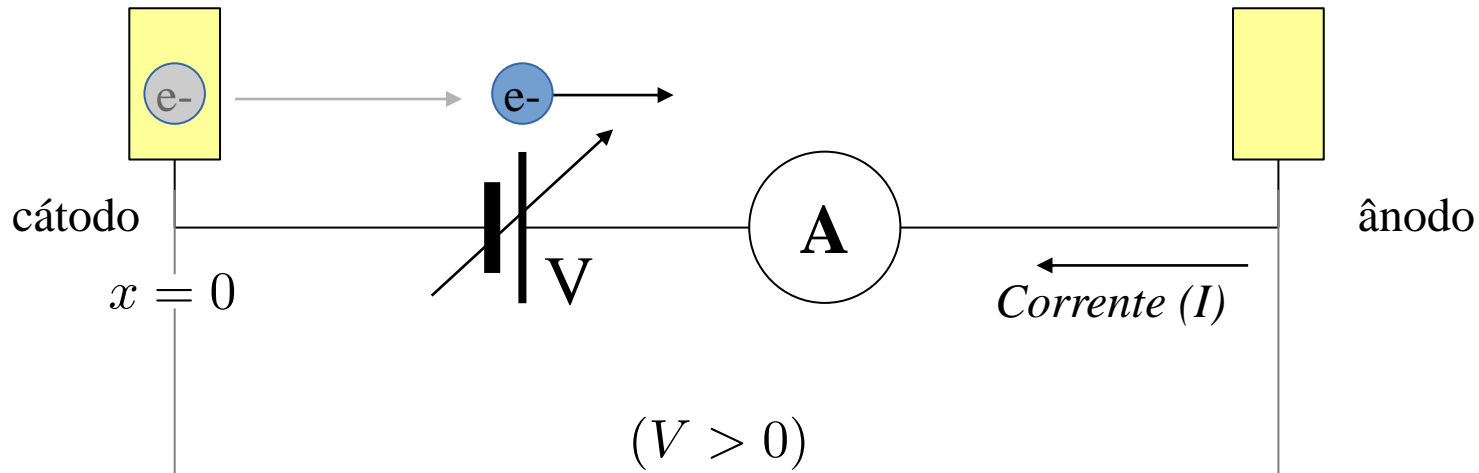


A inclinação do gráfico de energia potencial é ajustado pela fonte de tensão externa

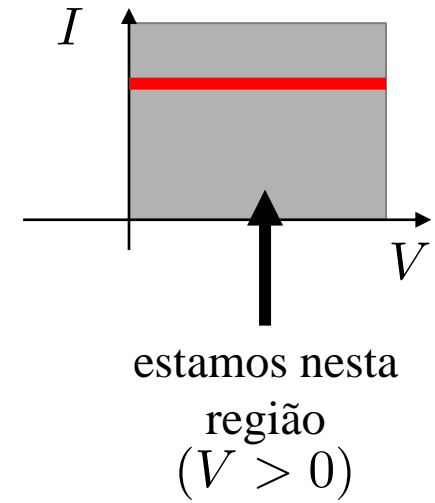


... Variando o potencial V : ($V > 0$)

(Potencial atrativo)



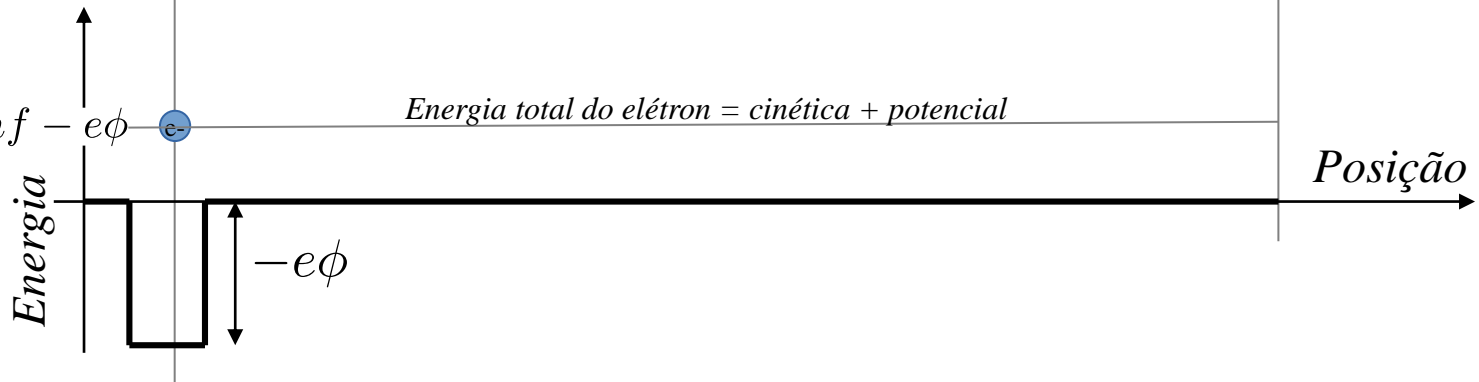
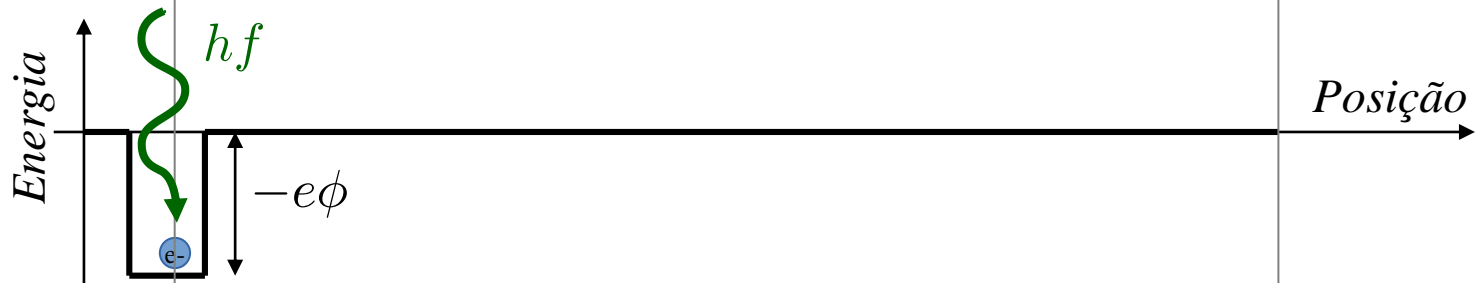
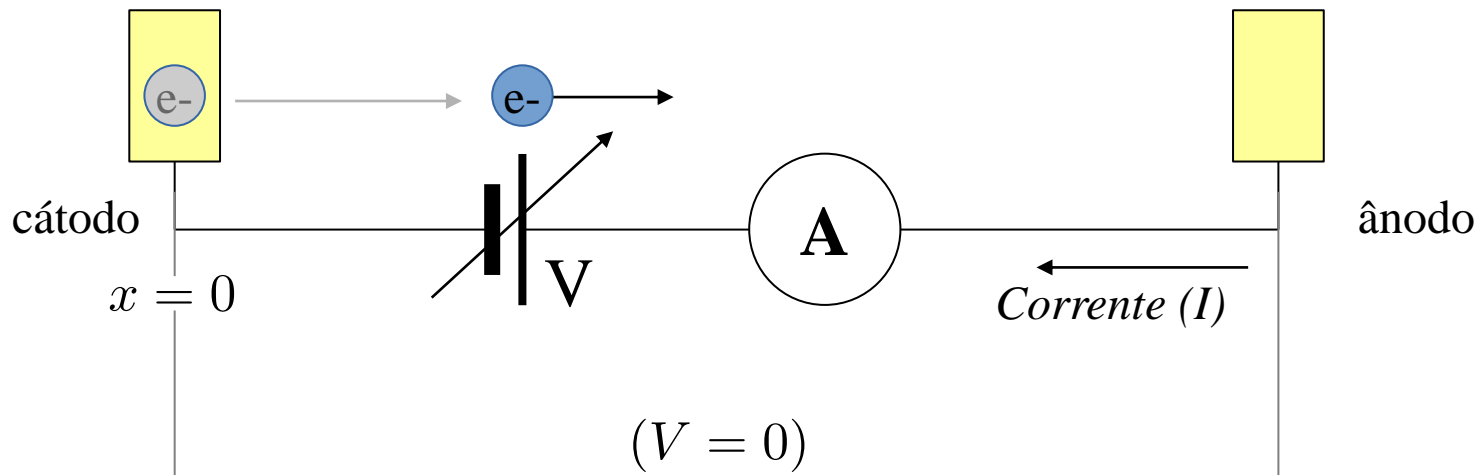
Curva ($I \times V$)



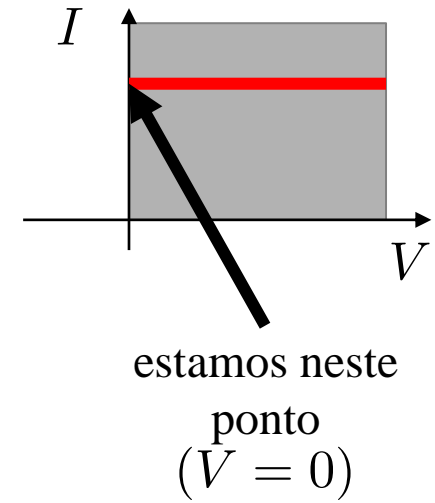
(antes de absorver)

(depois de absorver)

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



Curva ($I \times V$)

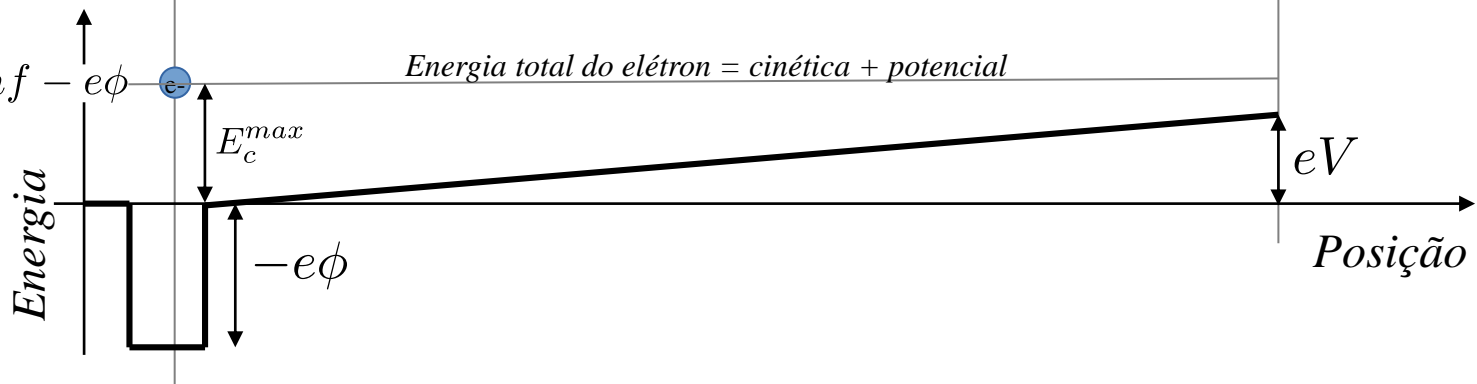
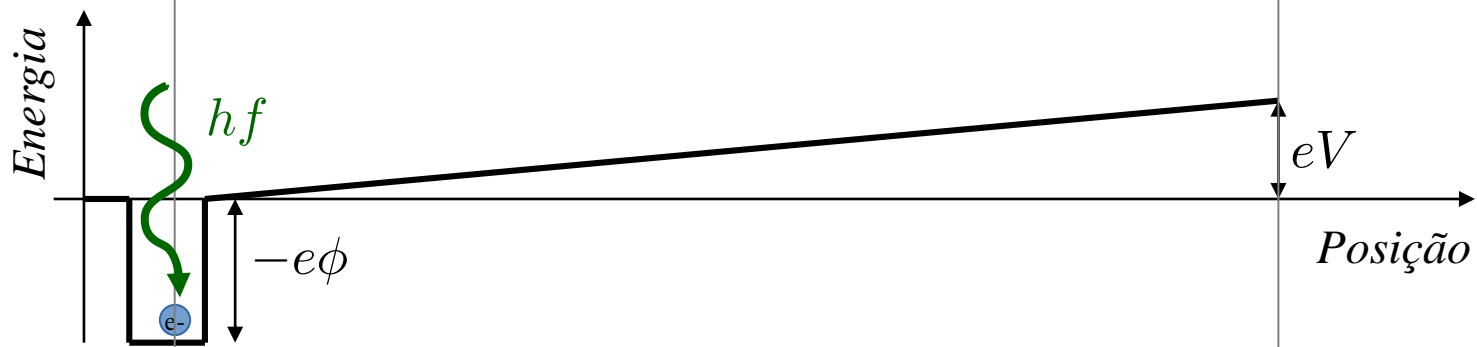
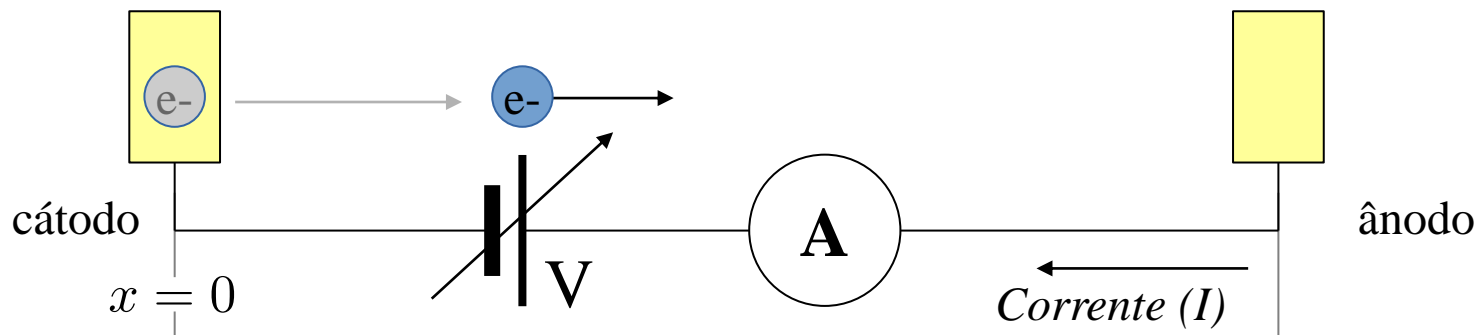


(antes de absorver)

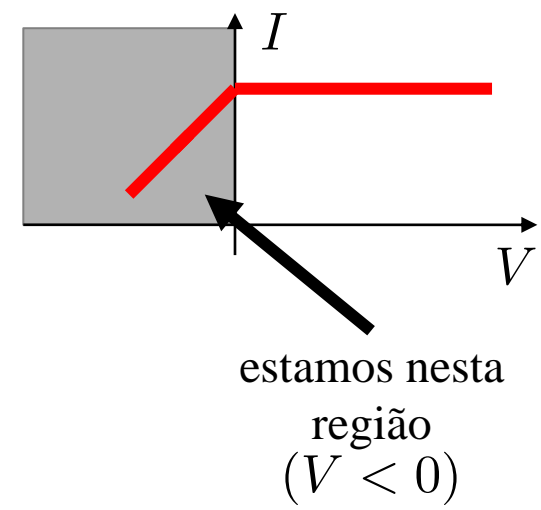
(depois de absorver)

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

(Potencial repulsivo)



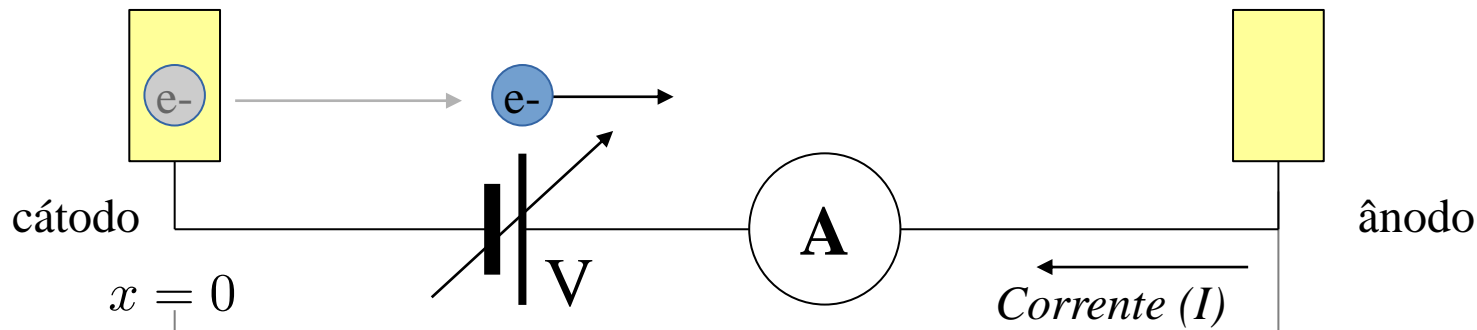
Curva ($I \times V$)



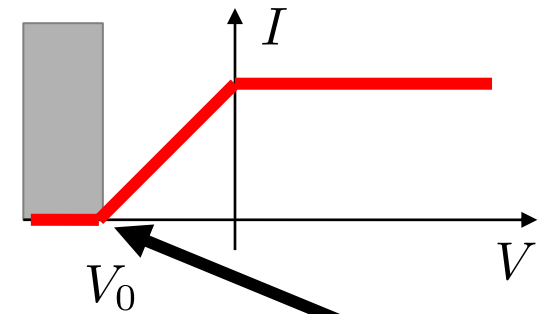
(antes de absorver)

(depois de absorver)

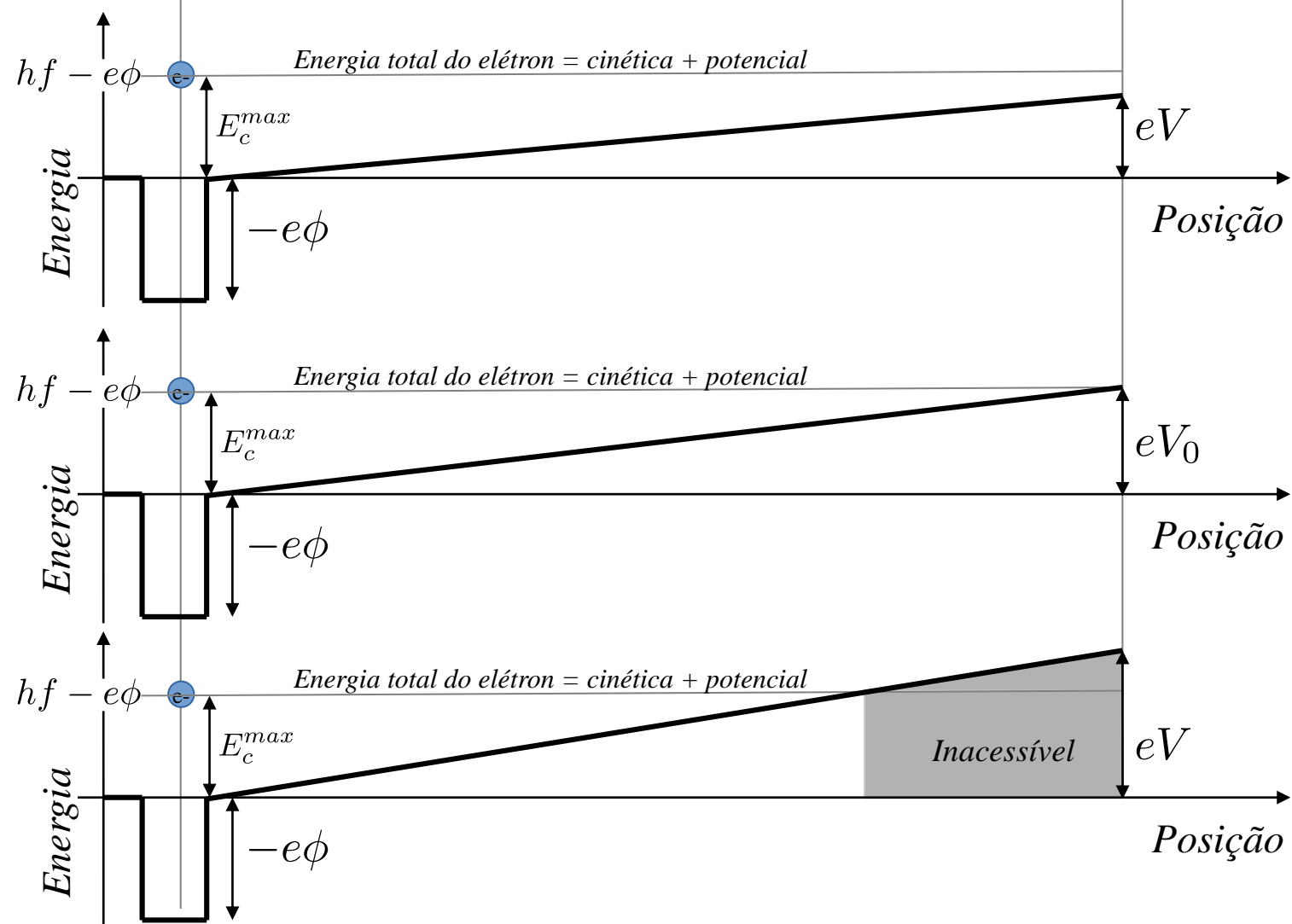
... se fizer V cada vez mais negativo?



Curva ($I \times V$)



estamos nesta região ($V \leq V_0$)



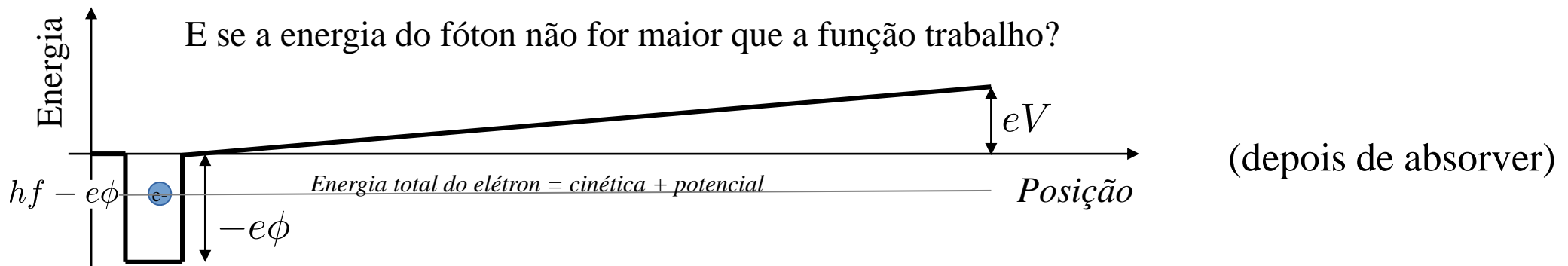
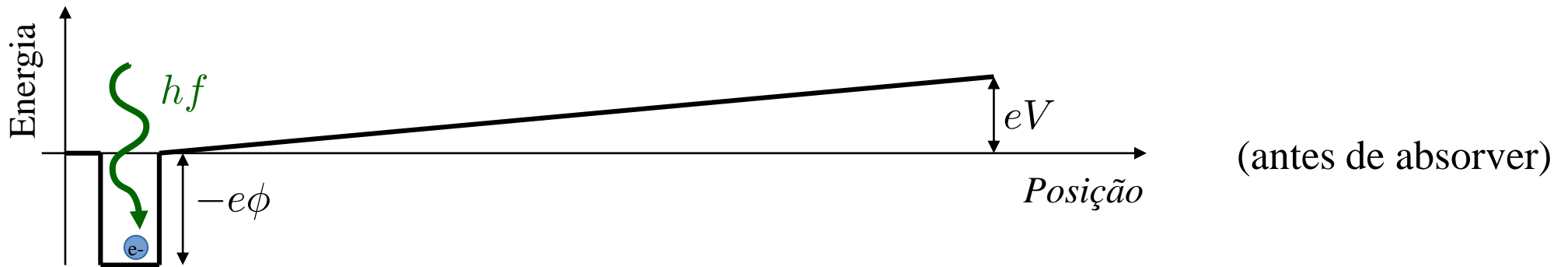
Vai existir um potencial $V = V_0$ no qual o elétron não tem energia para atingir o ânodo.

Corrente \rightarrow ZERO!

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

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

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



Relembrando:

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

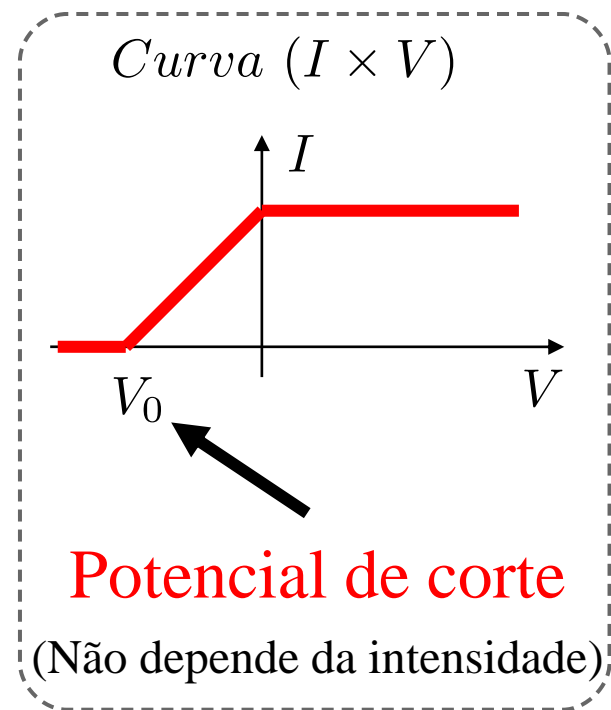
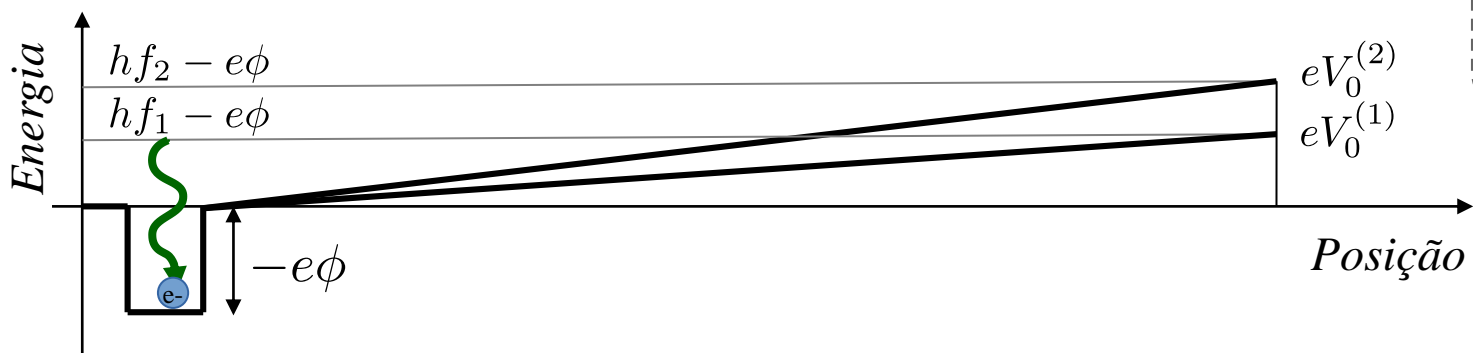
$$E = hf$$

Então a energia cinética máxima dos fotoelétrons é dada por:

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

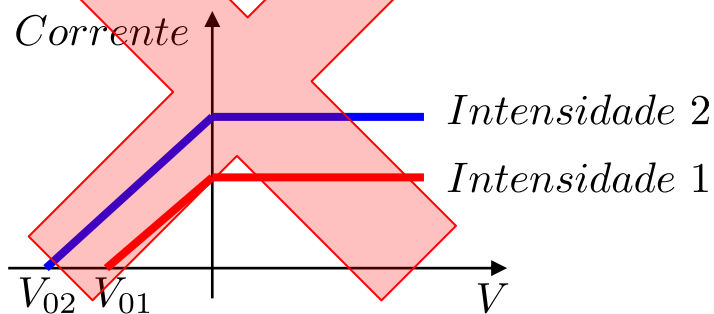
E o gráfico que obtivemos reproduz as medidas experimentais!!!

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



Previsão da Teoria Clássica

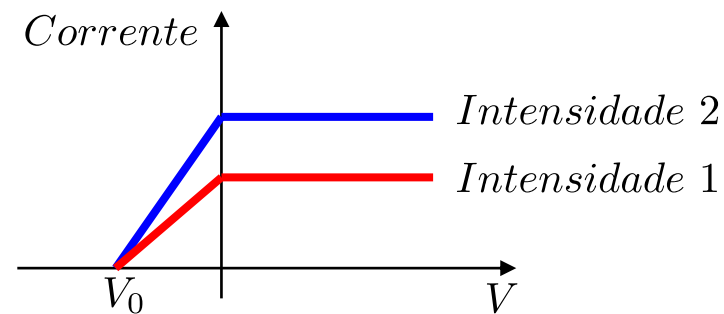
(antes dependia da intensidade)



(e nova teoria)

Medidas Experimentais

(agora depende só da frequência)



Parte Experimental:

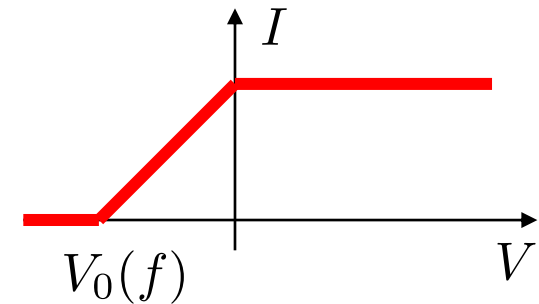
- Verificar as observações de Lenard / Millikan
- Verificar a previsão de Einstein, e determinar o valor da constante de Planck
- Medir a função trabalho da válvula fotoelétrica



O que será feito?

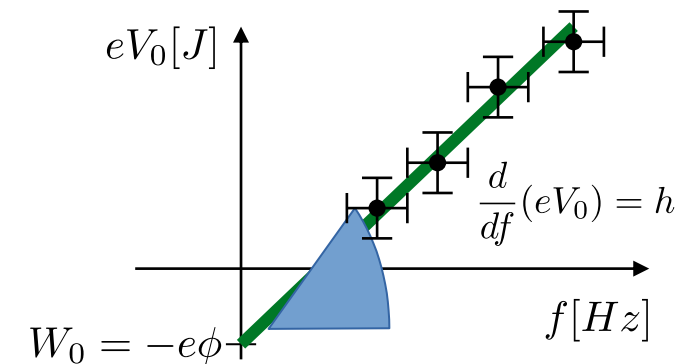
- Para várias radiações de comprimentos de onda e frequência diferentes iremos construir a curva ($I \times V$) de uma válvula fotoelétrica.
- Destas curvas será obtido o potencial de corte V_0 em função de f .
- Ajuste de reta para encontrar a constante de Planck.

Curva ($I \times V$)



$$eV_0 = hf - e\phi$$

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



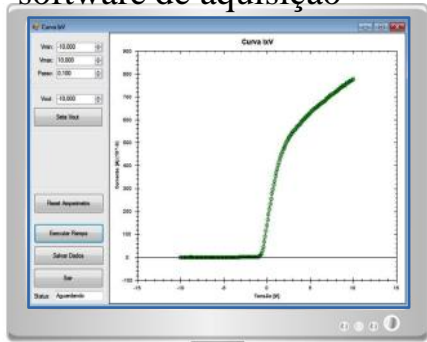
Lembre que: $c = \lambda f$

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

Aparato Experimental Primeira Semana:

- Fonte de luz: 1ª semana -lâmpada de Hg
- Focélula (Centron 1P39)
- Pico amperímetro/fonte de tensão (Keithley 6487)

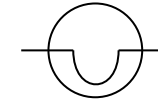
Computador +
software de aquisição



ProKeithley

Filtro de Intensidade

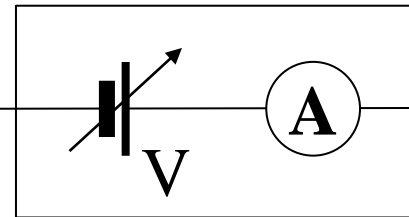
Fonte Luminosa



Rede de Difração



Válvula fotoelétrica

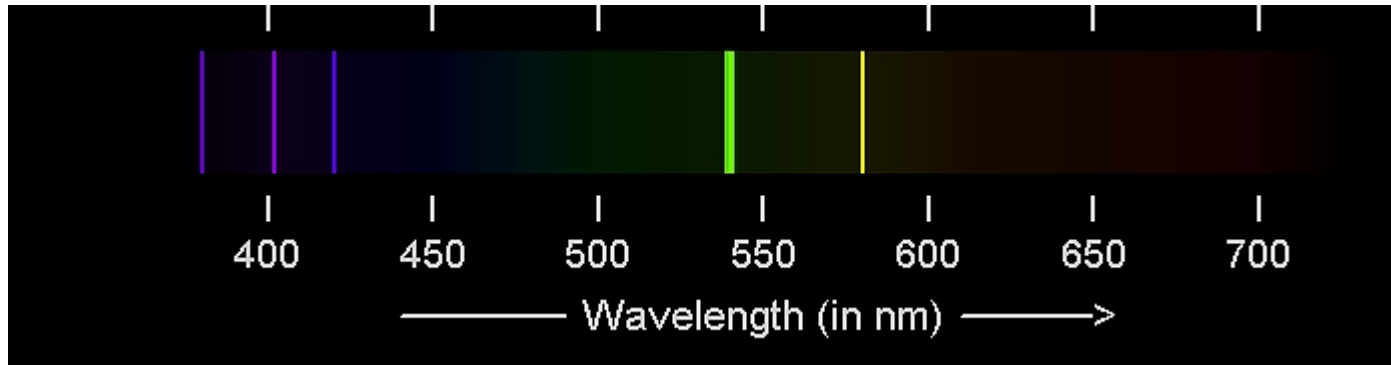


Pico amperímetro +
fonte de
tensão variável

RS232+GPIB

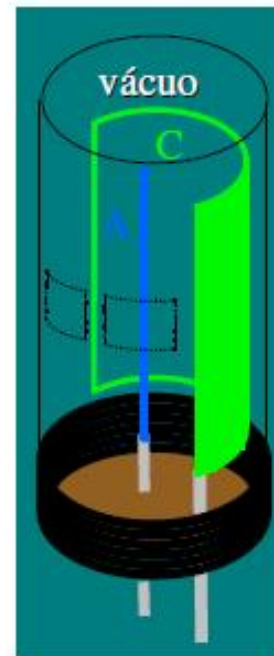


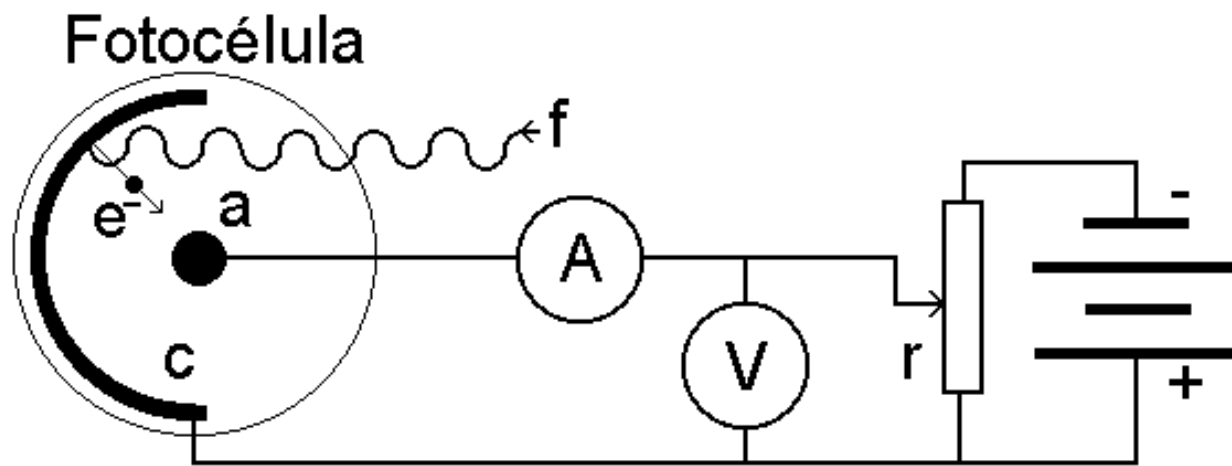
Espectro da Lâmpada de Hg:



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

Fotocélula





a = anodo

c = catodo

Procedimentos (Primeira Aula):

- 1) Ligue todos os equipamentos (pico amperímetro, 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?

Detalhes do Programa de Aquisição:

Ajustes dos limites de tensão da rampa e resolução



Reset do Picoamperímetro



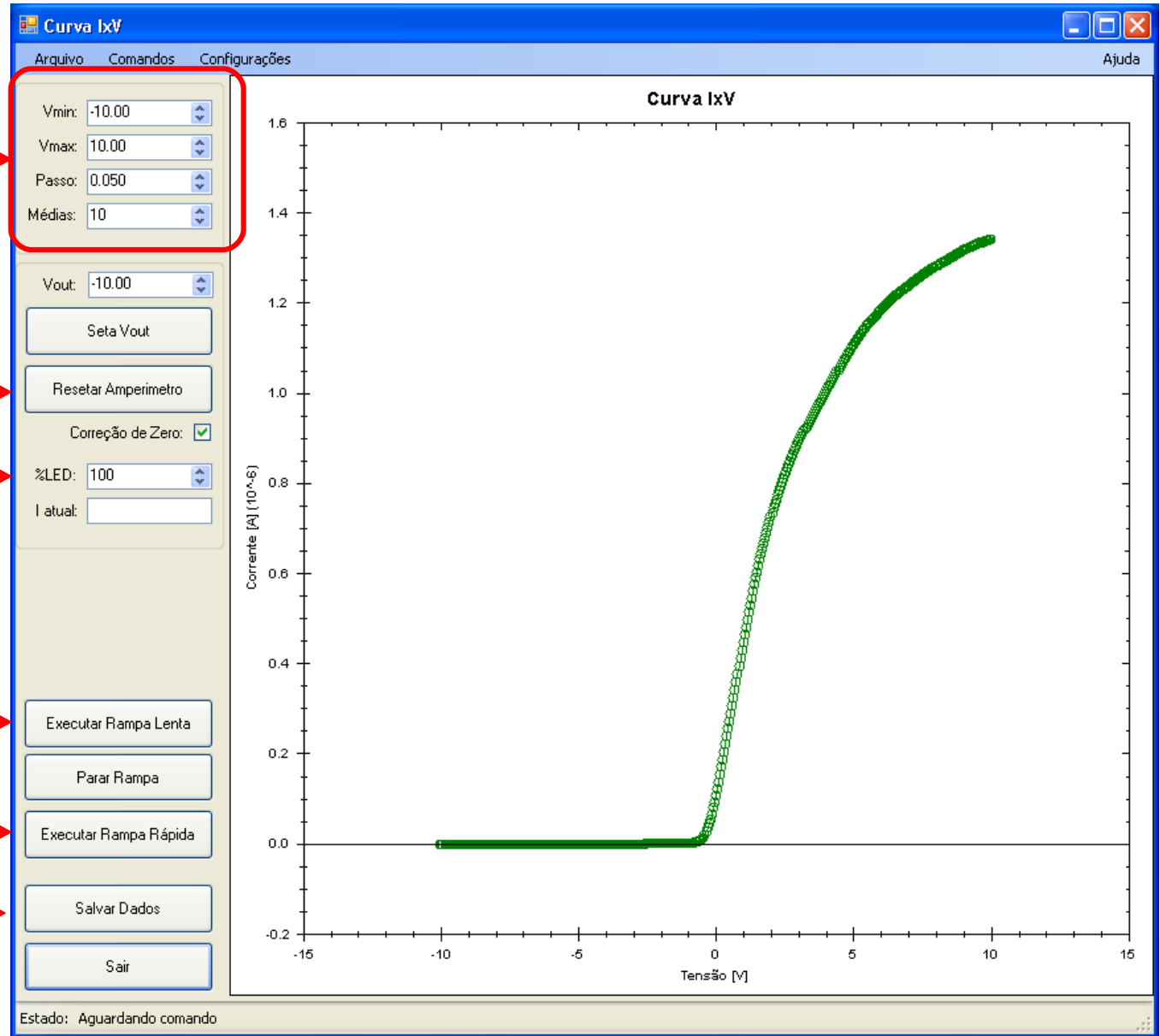
Ajuste de intensidade do LED
(segunda semana)



Rampa Lenta
(faz médias por ponto)

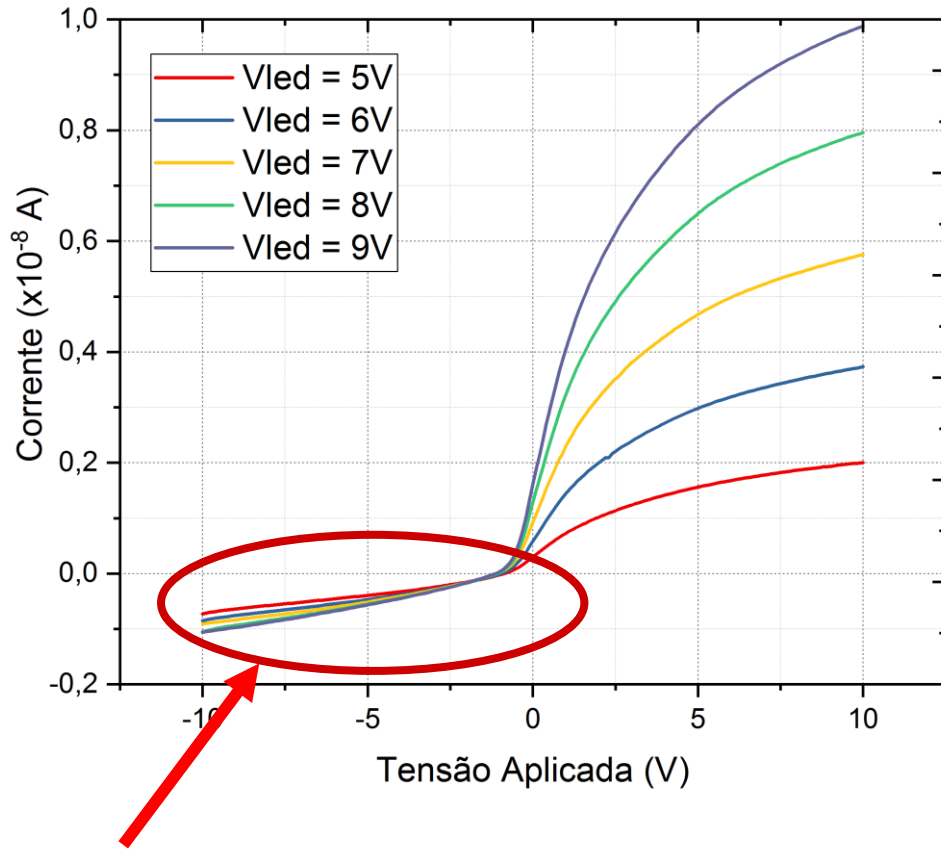


Rampa rápida
(leitura única por ponto)



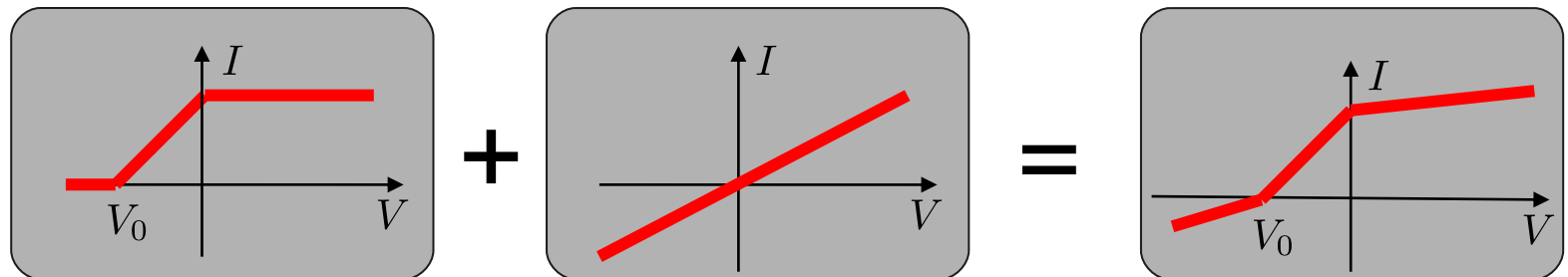
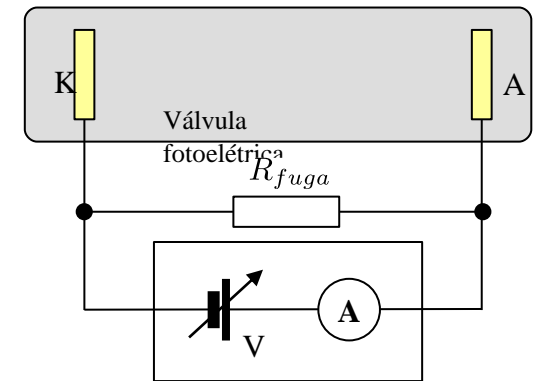
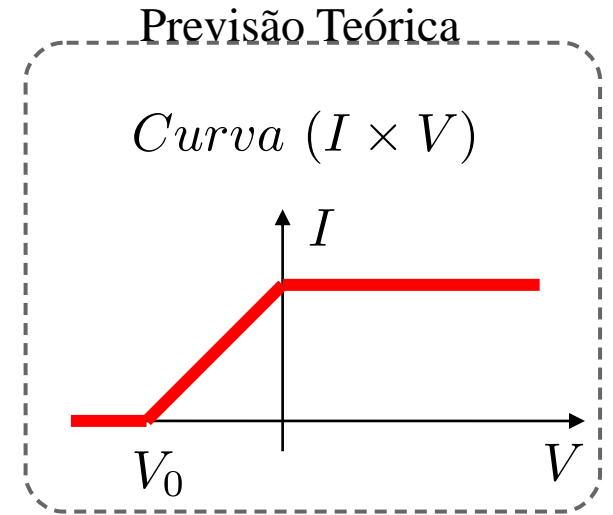
Resete o Pico-amperímetro com a iluminação desligada.

Curvas Experimentais: (Spoiler)



A corrente não vai a Zero!

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

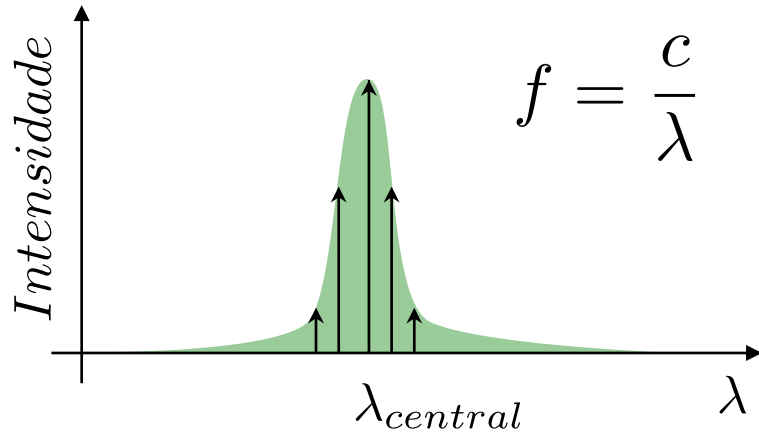


Curvas Experimentais: (Spoiler)

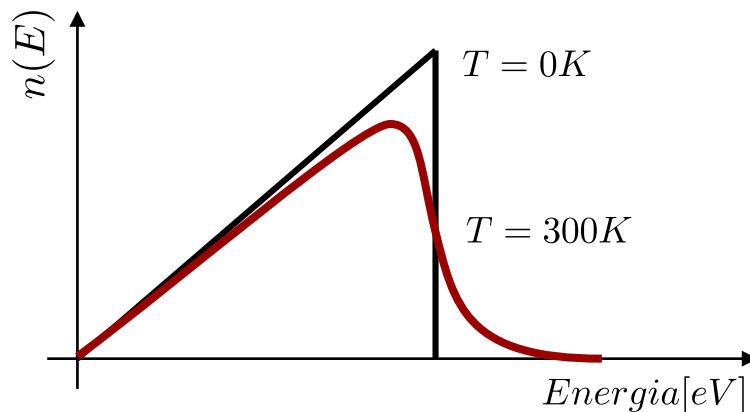
Qual o efeito da largura espectral e da Temperatura?

$$eV_0 = hf - e\phi$$

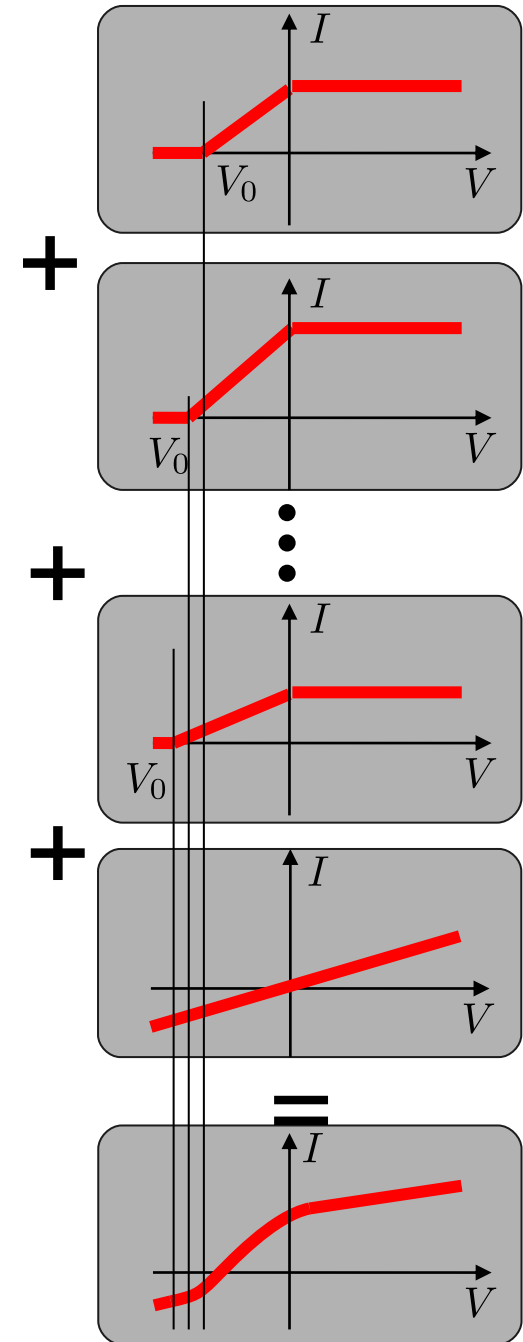
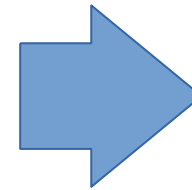
Dispersão da intensidade luminosa em função do comprimento de onda



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

Objetivo: encontrar o potencial de corte para cada uma das frequências da radiação incidente

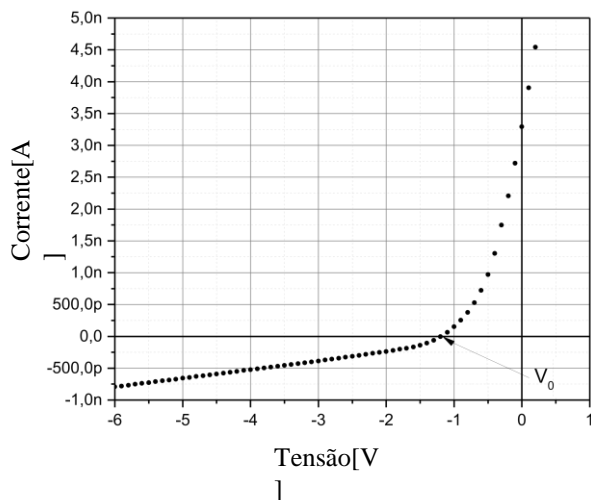
Métodos para determinação de V_0 :

No experimento veremos que

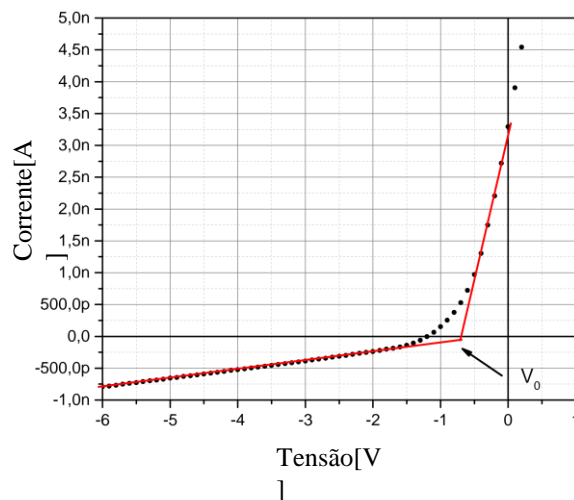
- 1) A corrente não vai a zero para potenciais menores que o potencial de parada. Porquê?
- 2) A corrente medida com a lâmpada desligada é da mesma ordem de grandeza que essa "corrente de fundo"?
- 3) Mesmo que subtrairmos o efeito da corrente de fundo, a corrente da fotocélula não diminui abruptamente.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

(uso de outros métodos: justifique!)

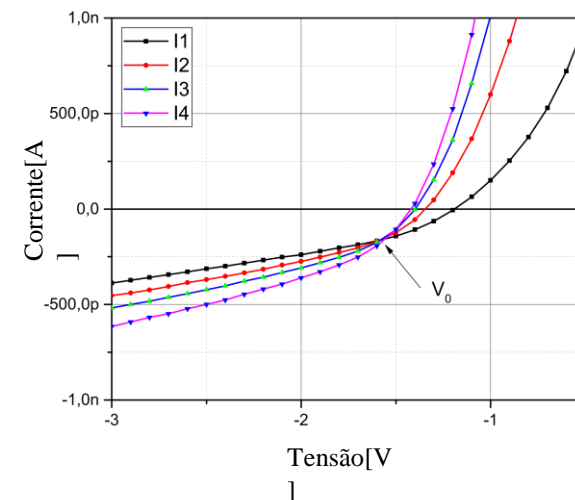
Método 1



Método 2

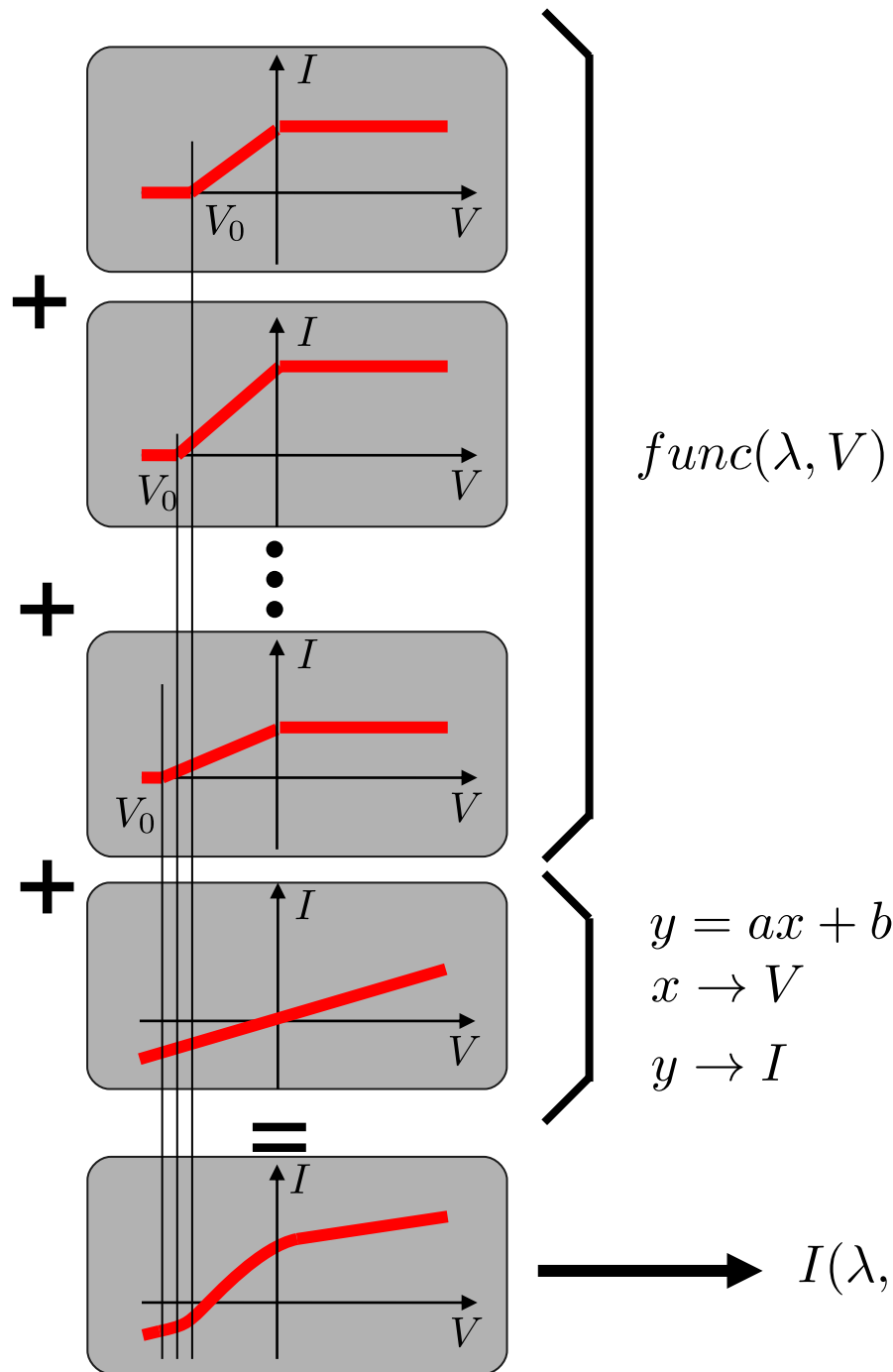


Método 3



**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**

Outro método para determinação de V_0 :



O que fazemos com isso??

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

Outro método para determinação de V_0 :

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

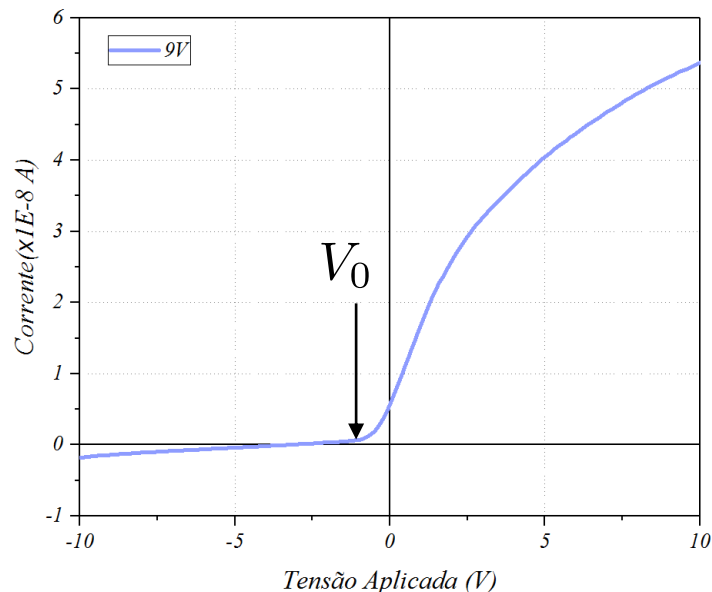
$$\frac{dI(V_{aplicada})}{dV} = \frac{dfunc(\lambda, V)}{dV} + a$$

Corrente de fundo

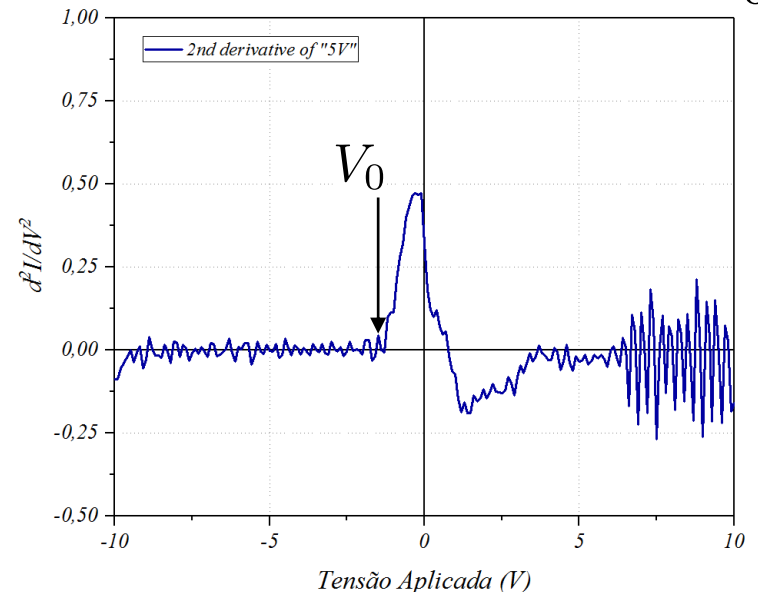
$$\frac{d^2 I(V_{aplicada})}{dV^2} = \frac{d^2 func(\lambda, V)}{dV^2}$$

Eliminamos a parcela da corrente relativa à corrente de fundo.

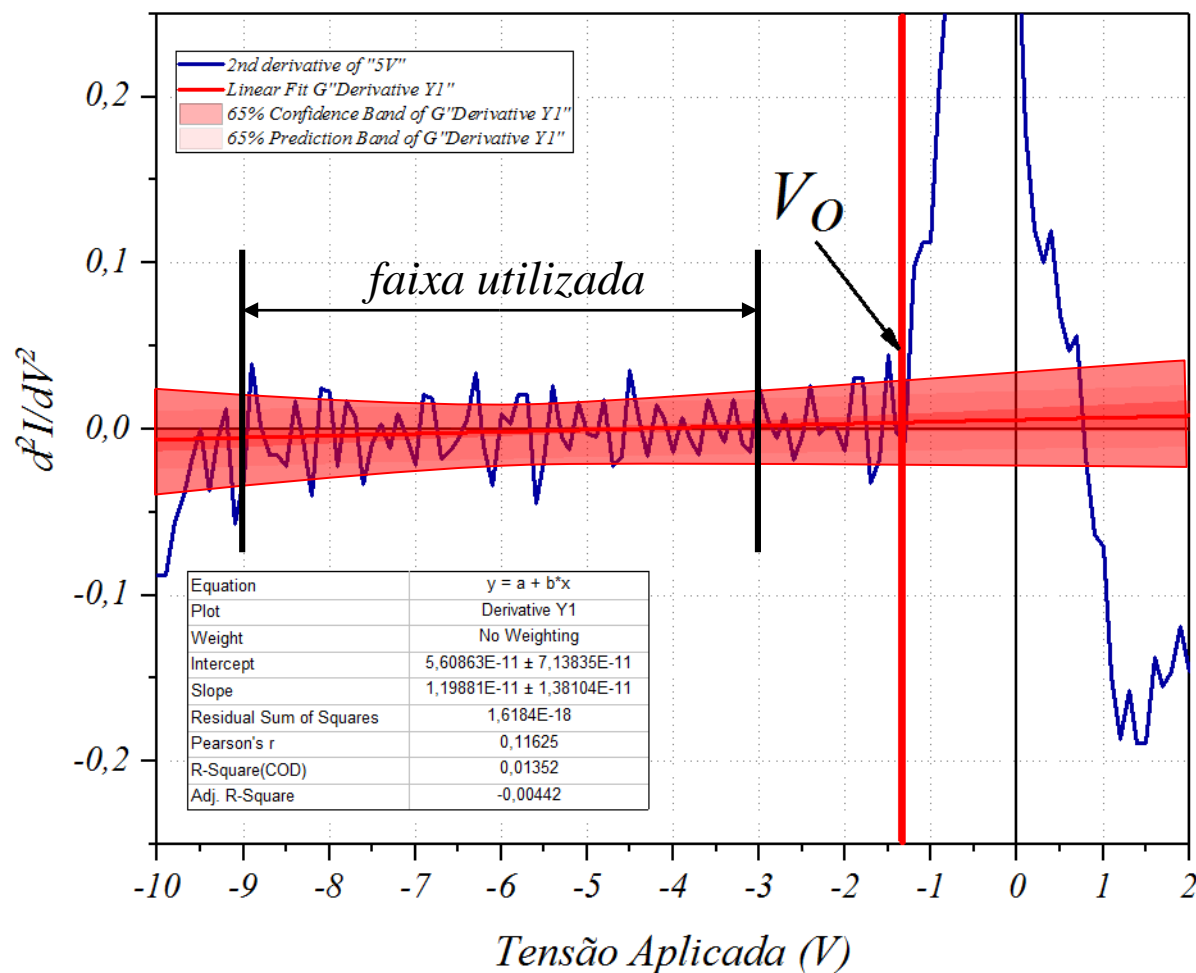
Fazemos isso numericamente, utilizando o Origin:



Qual o critério para escolher o V_0 ??



V_0 é tomado como o primeiro ponto fora da reta ajustada:



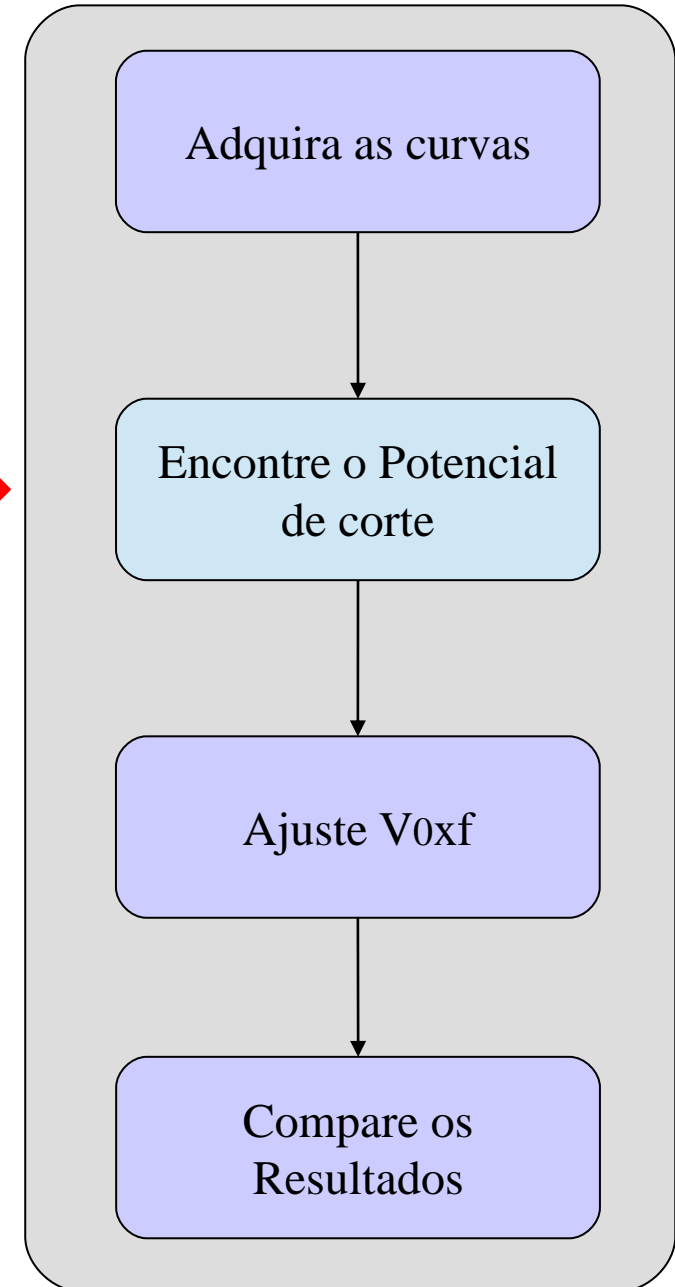
ustamos uma reta na região tre -9 e -3 Volts. cluímos no Ajuste o intervalo confiança de 68%. nsideramos o V_0 como o imeiro ponto fora da zona de nfiança da reta.

Usando o Origin podemos fazer o procedimento de forma simples

Problema: Muito sensível a ruídos. Tomar dados várias vezes para cada cor e fazer estatística.

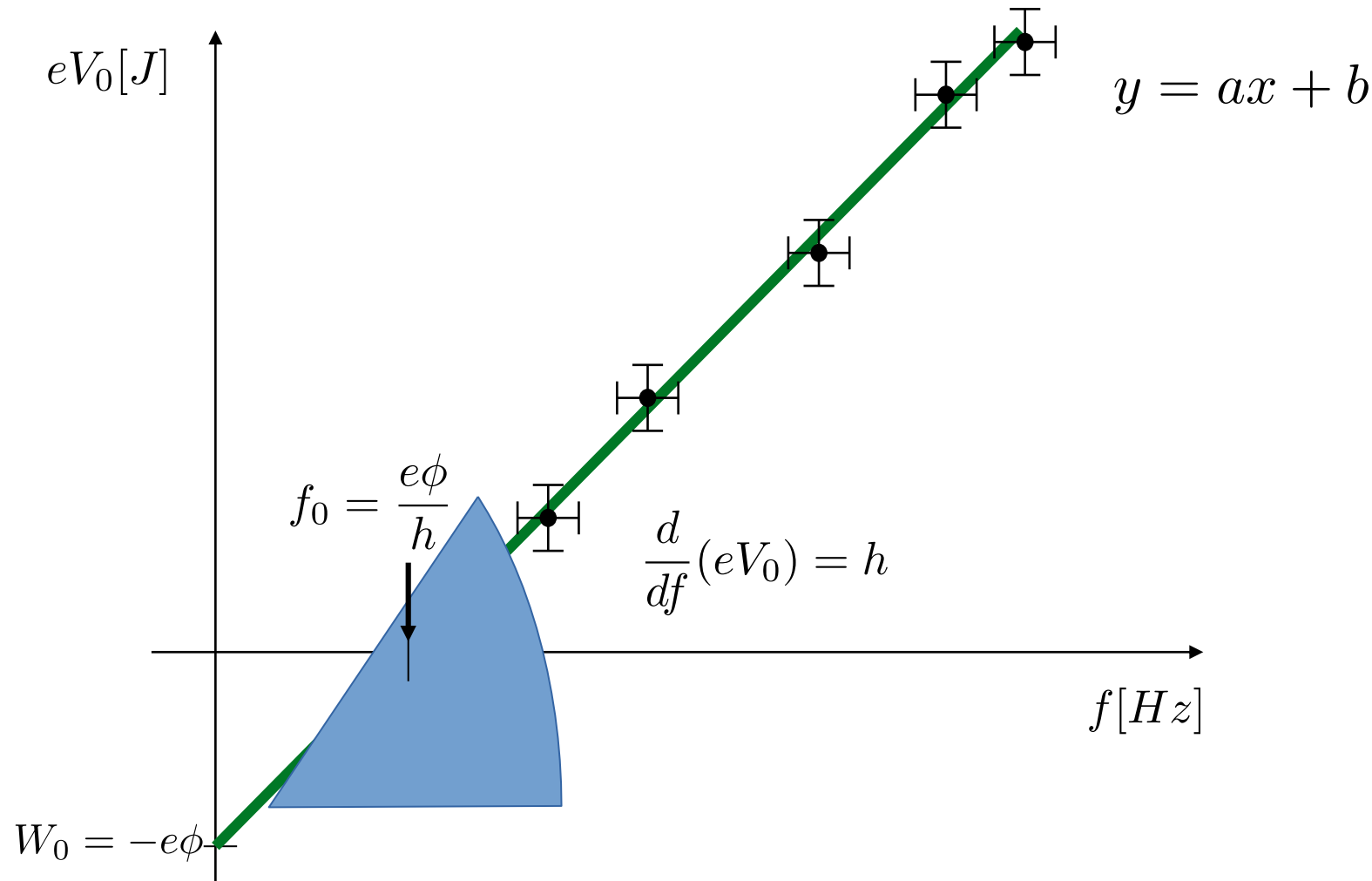
Originalidade / Outros métodos:

Novas ideias são incentivadas!
Tente outras formas.
Explique em detalhes.
Compare.



Não esqueçam: propagar as incertezas no ajuste

(Compare os resultados com os 4 métodos)



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

Sínteses:

Curvas Experimentais

Gráficos das análises pelos 4 métodos

Tabela com os resultados

➡ Discussão sobre a performance de cada método e em caso de falha, porque falham

Gráficos dos ajustes $V_0 \times f$

➡ Constante de Planck e função trabalho
Comparação com a literatura

Dicas:

- Evite utilizar material antigo! O experimento tem mudado sutilmente de semestre à semestre.
- Se usar: Referências e Citações

Boa Sorte! Bom Trabalho!