



Efeito Fotoelétrico

Profa Rosangela Itri

agradecimento: contribuições de Tiago Fernandes pela atualização do experimento e preparação de parte do material de apresentação

Setembro 2020

Contexto histórico

Heinrich Hertz,



O efeito fotoelétrico foi descoberto acidentalmente em 1887 por Hertz

J. J. Thomson



Um estudo da eletricidade negativa emitida pelo efeito fotoelétrico foi conduzido por J. J. Thomson em 1899



1906 - Descoberta do Elétron

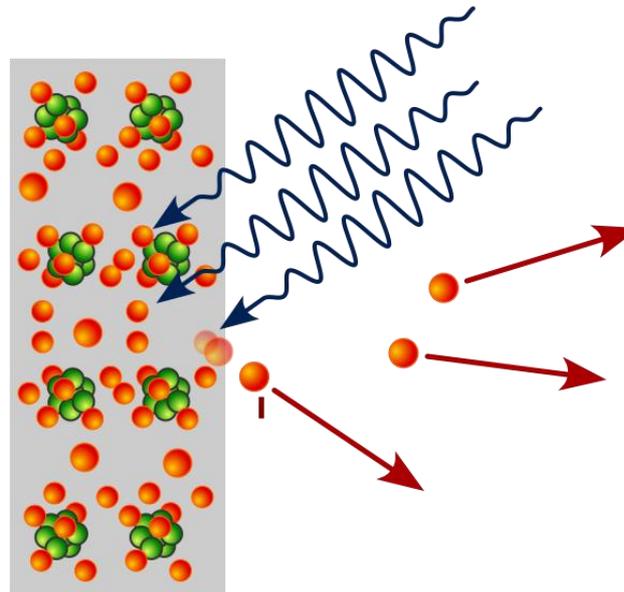
Contexto histórico

Philipp Lenard



1905 - raios
catódicos

- Phillip von Lenard, *Annales de Physique, Leipzig 8*, p. 149, 1902
- Realizou um experimento onde ele faz incidir luz em um eletrodo e mede a corrente gerada entre os eletrodos e a energia cinética dos recém descobertos elétrons quando emitidos pelo efeito da luz no eletrodo



Contexto histórico

Philipp Lenard



1905 - raios catódicos

estabeleceu, in 1902, que o número de elétrons liberados, mas não sua energia, era afetado pela intensidade da luz iluminando uma placa metálica.

Lenard também encontrou, para sua surpresa, que a energia dos elétrons dependia do comprimento de onda da luz e que comprimentos de onda menores tendem a gerar elétrons mais rápidos; contudo, Lenard foi incapaz de desenvolver condições experimentais adequadas para determinar como este efeito variava.

É importante ressaltar que "... Lenard não demonstrou que a foto-resposta varia com a frequência da luz "

Contexto histórico

Albert Einstein



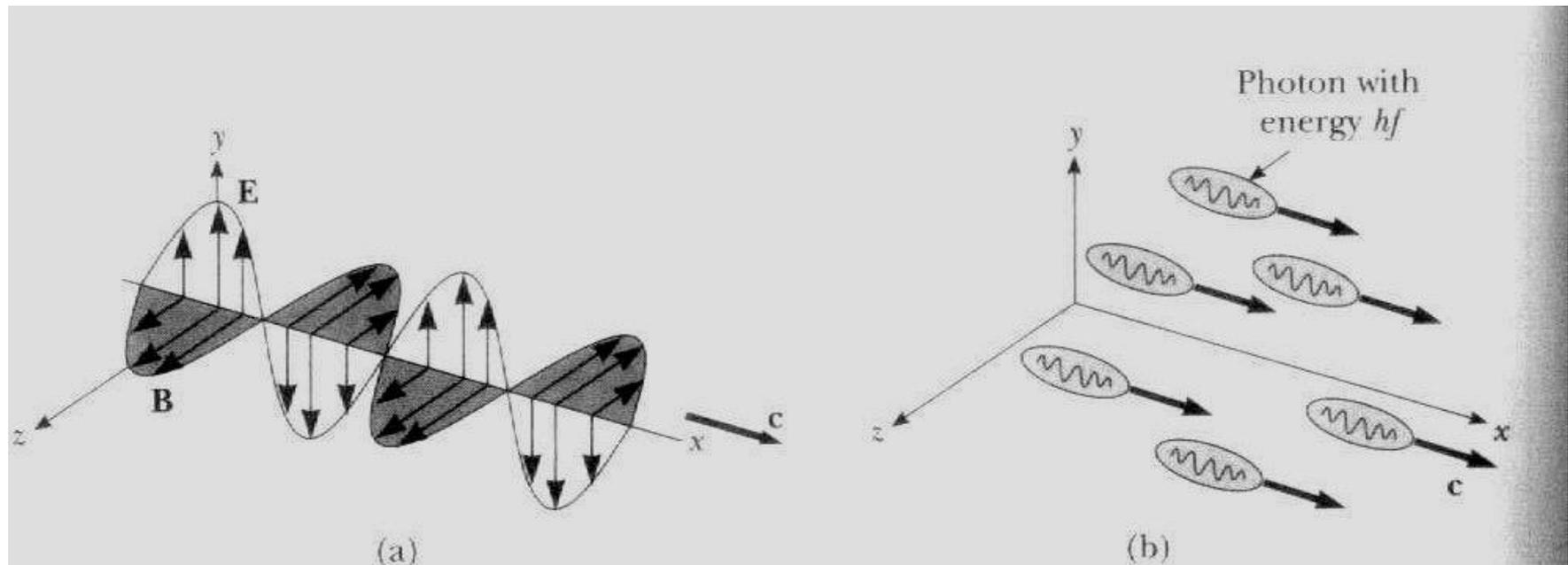
It was not until 1905 that Einstein published his revolutionary explanation of the photoelectric effect, based on his "lightquantum" hypothesis. His theory explained the photoelectric effect fully, but it was controversial. Einstein proposed that light behaves as though it consists of a stream of independent,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



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

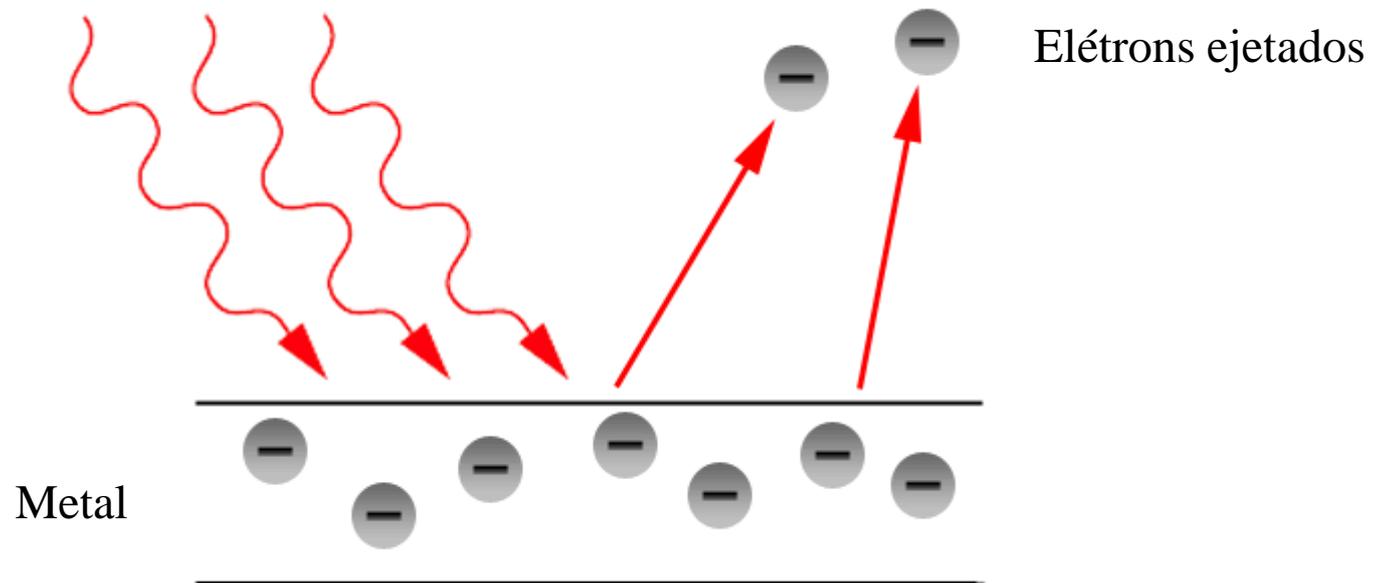
Dualidade onda-partícula da radiação eletromagnética

- A luz é uma onda eletromagnética e uma partícula (fóton) ao mesmo tempo!
- Ela se propaga como onda e interage como partícula...



O que é o Efeito Fotoelétrico

Radiação eletromagnética



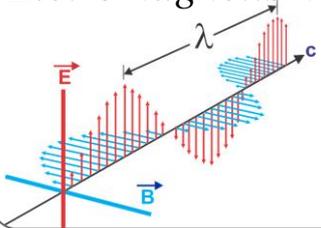
Descrição teórica

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

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.

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



$$F = ma$$

$$v = v_0 + at$$

$$F_e = eE$$

$$v_0 = 0$$

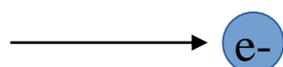
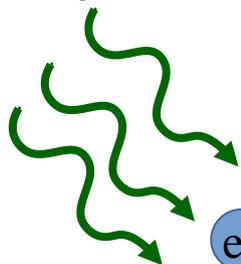
$$F = F_e$$

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

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

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

Radiação eletromagnética



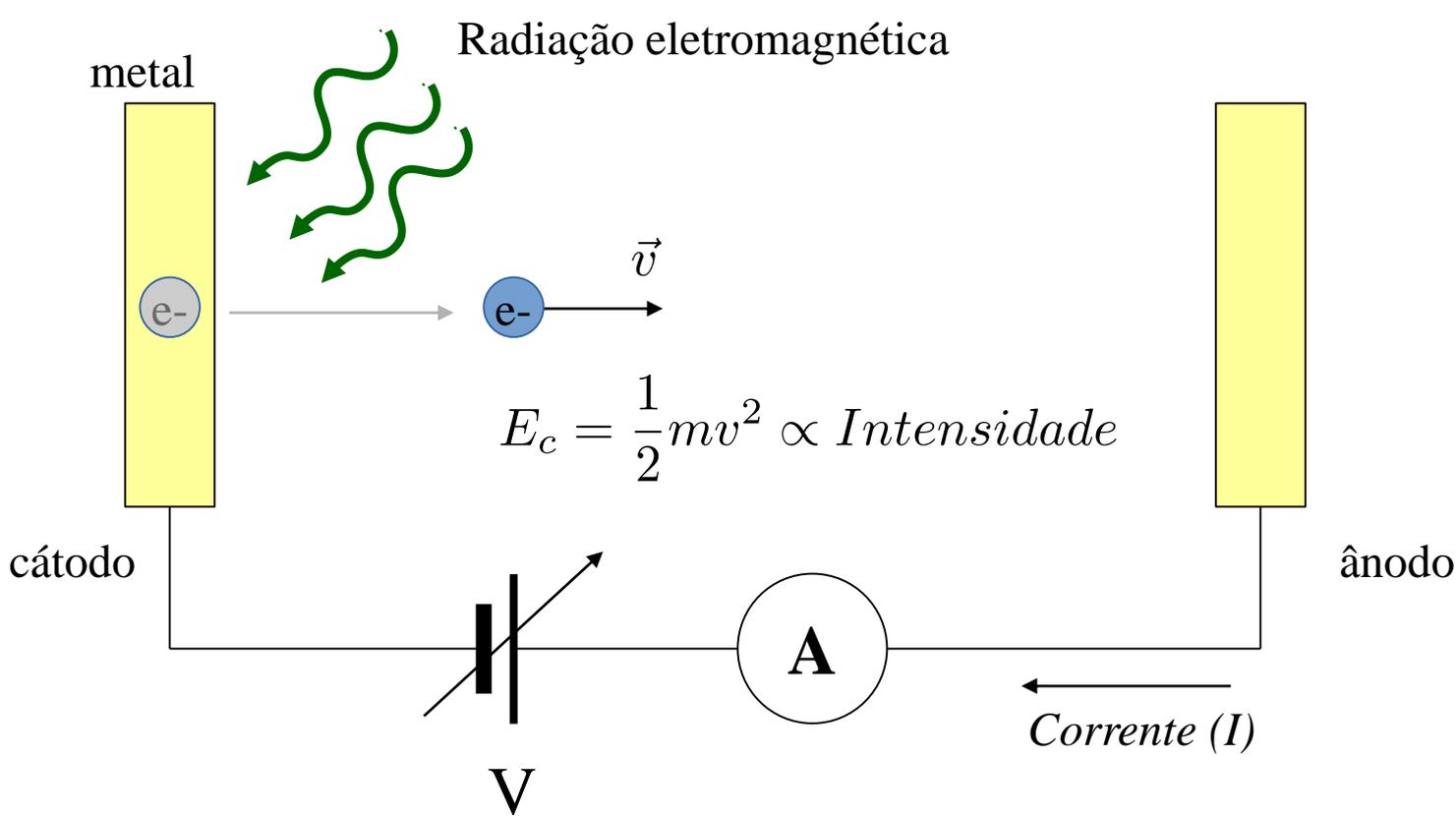
$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \propto \text{Intensidade}$$

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

- \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.

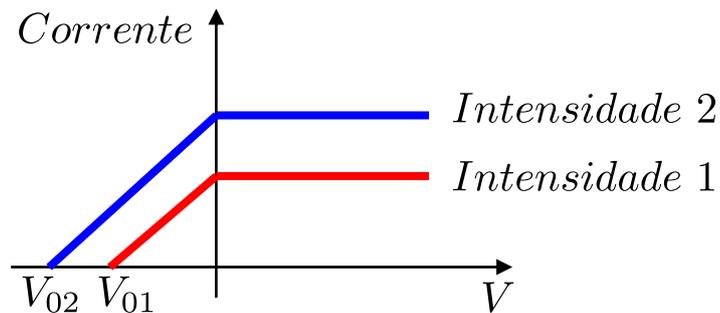
Descrição teórica / Aparato para medir E_c :



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

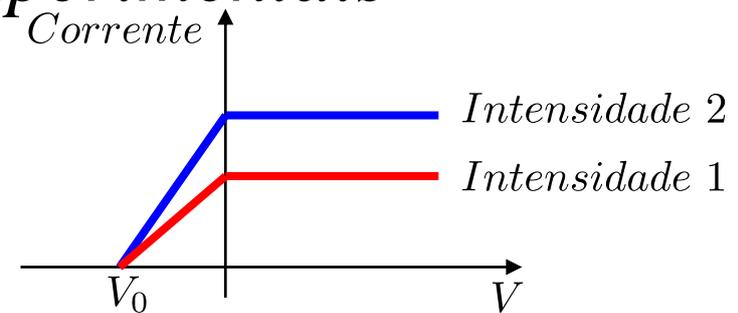
- Tempo que a partícula fica exposta a radiação!
- Mesmo se a radiação não for intensa podemos acumular energia durante um tempo suficiente e ejetar elétrons de qualquer forma!

Previsão da Teoria Clássica



Medidas

Experimentais

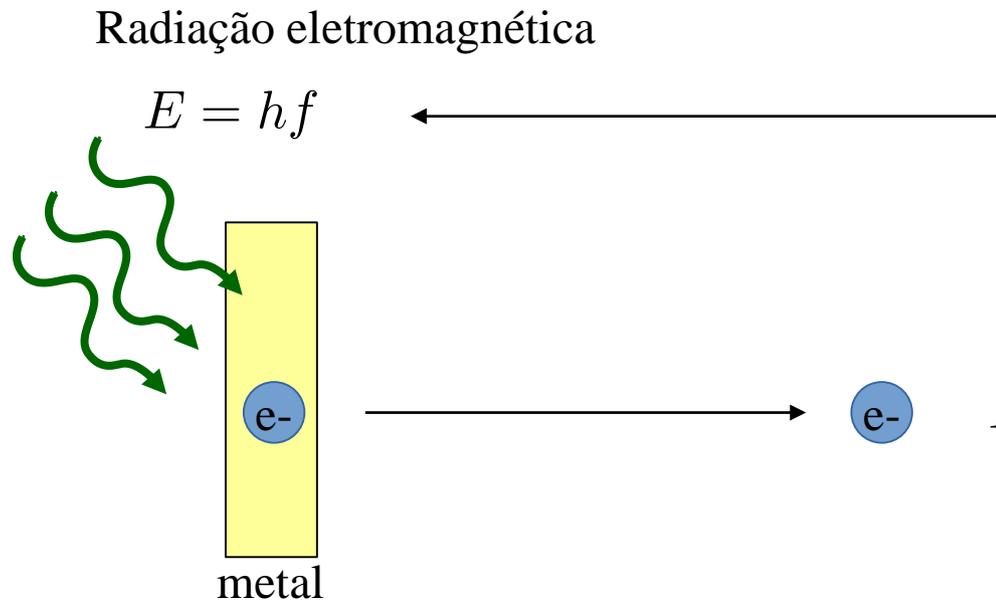
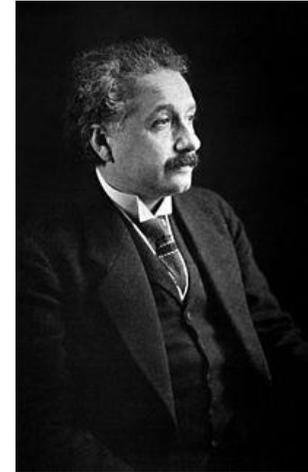


Nova descrição teórica (Albert Einstein)

“... 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)

$$E_c = hf - e\phi$$

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

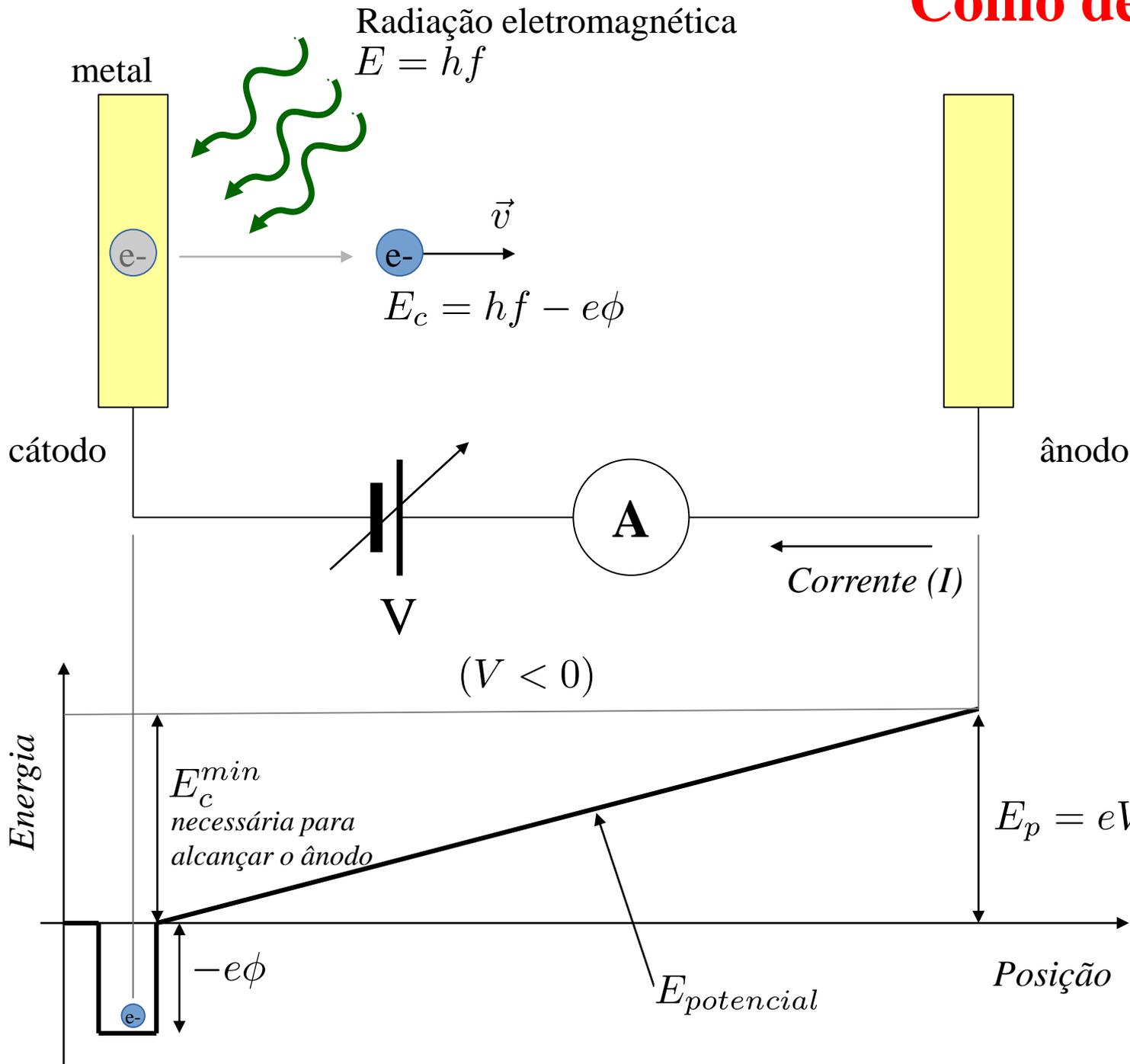
$$e = -1.6021766208(98) \times 10^{19} \text{ [C]}$$

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

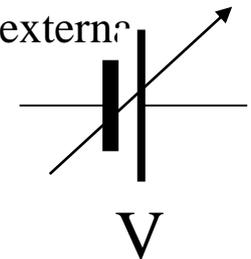
https://en.wikisource.org/wiki/On_a_Heuristic_Point_of_View_about_the_Creation_and_Conversion_of_Light.)

Nova descrição teórica / Caracterização Experimental

Como determinar E_c ??

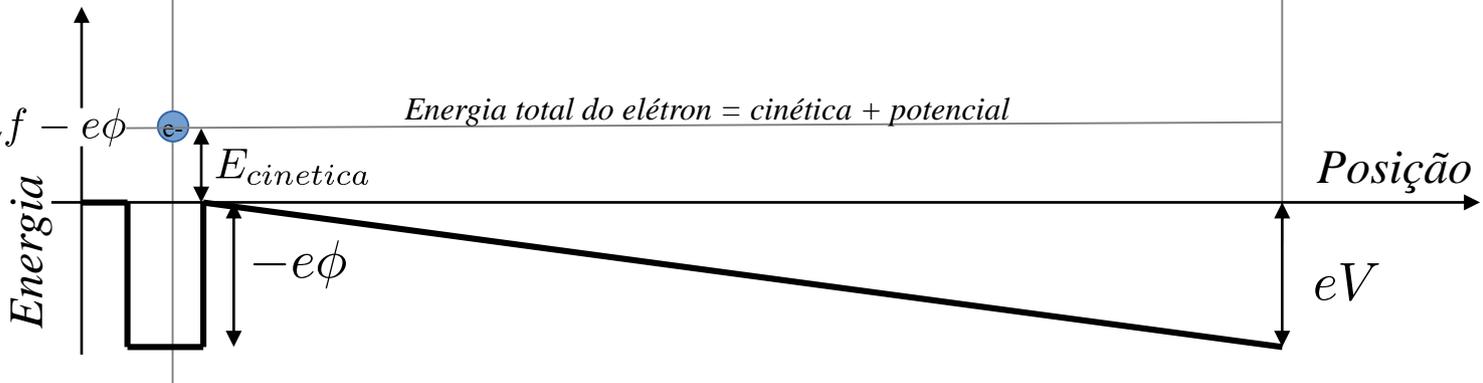
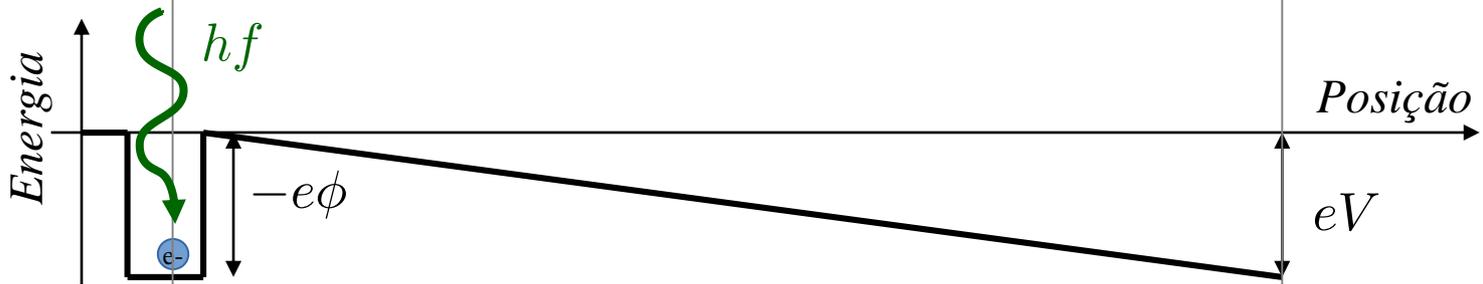
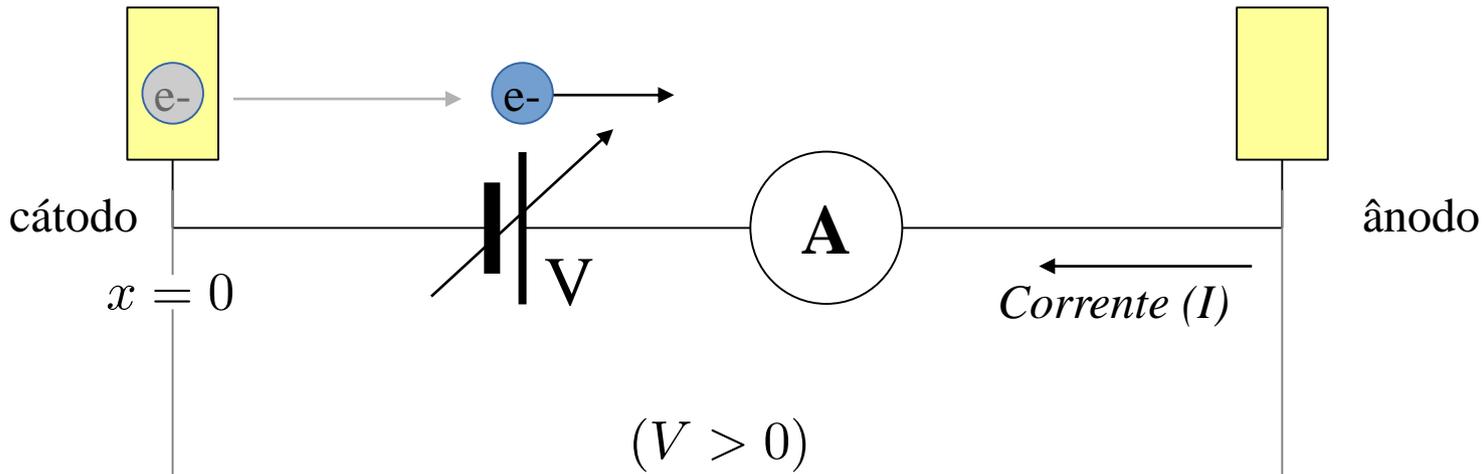


A inclinação do gráfico de energia potencial é ajustado pela fonte de tensão externa

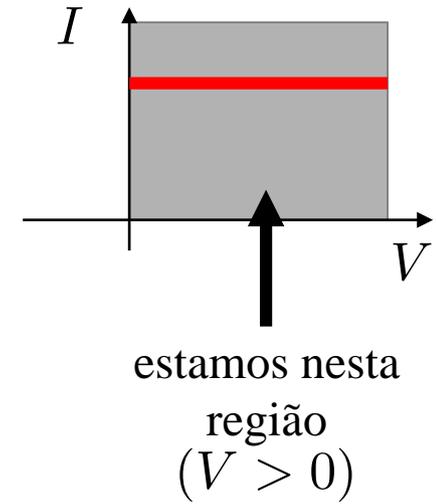


... Variando o potencial V : ($V > 0$)

(Potencial atrativo)



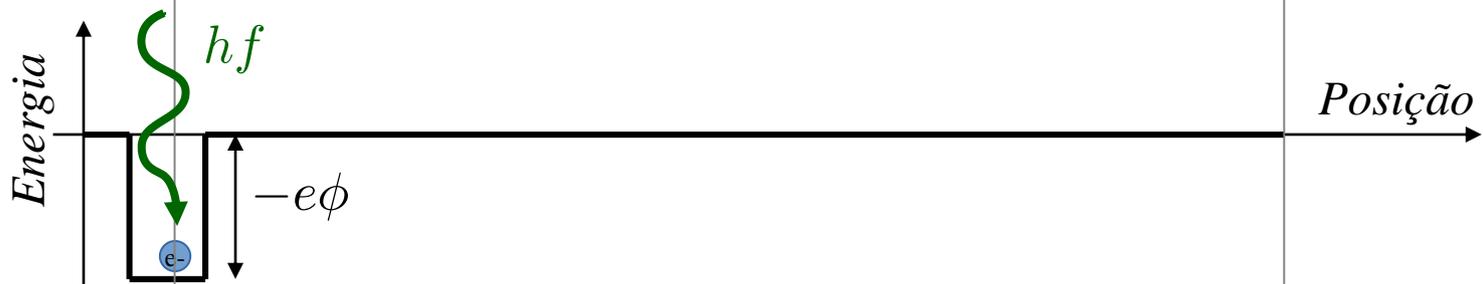
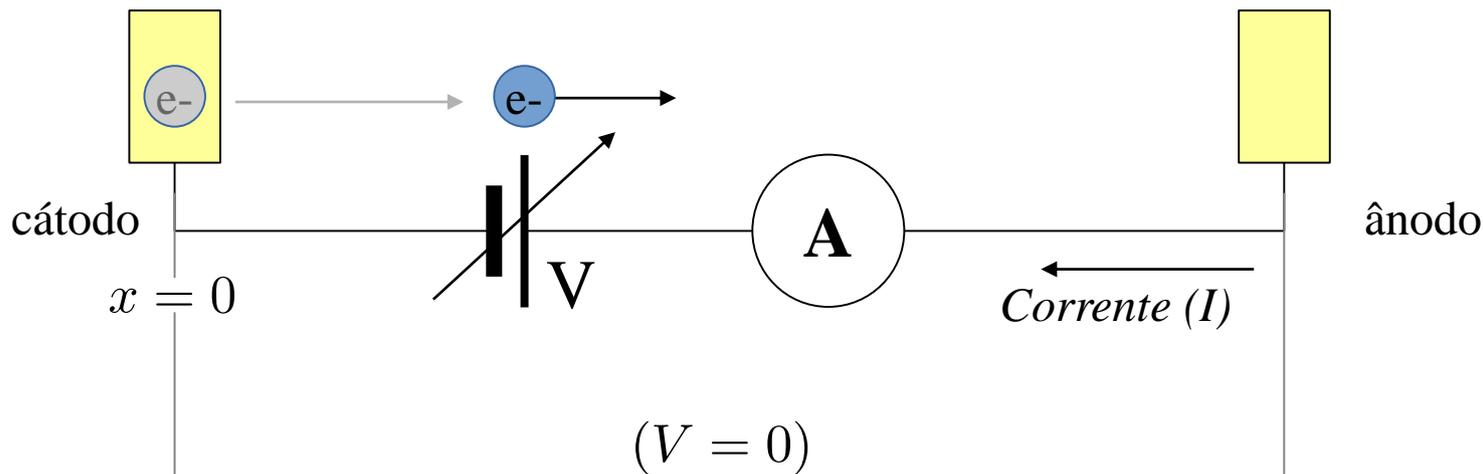
Curva ($I \times V$)



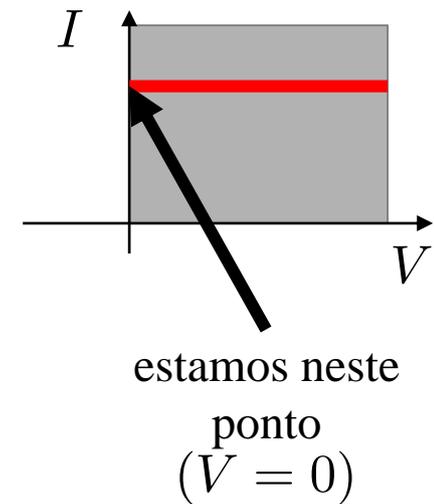
(antes de absorver)

(depois de absorver)

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

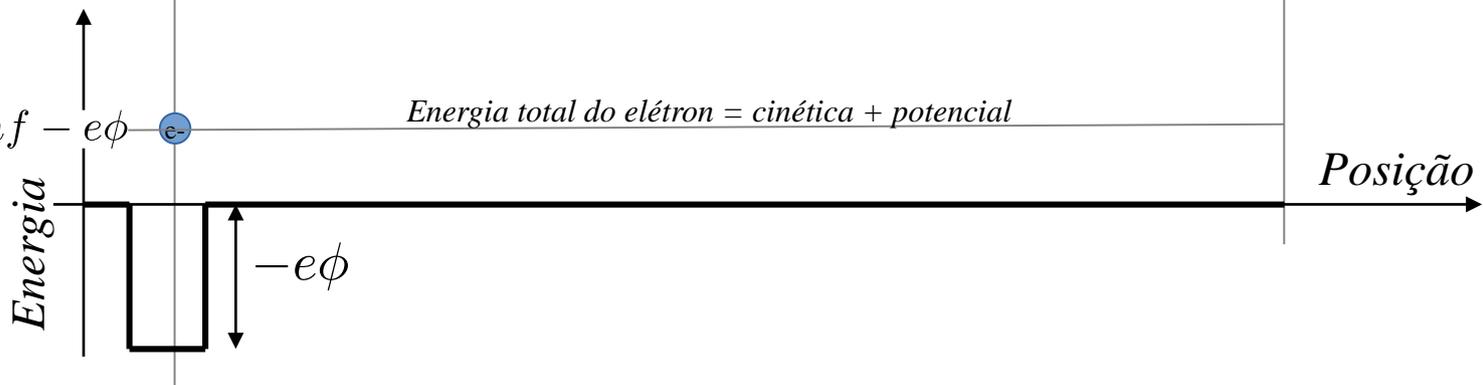


Curva ($I \times V$)



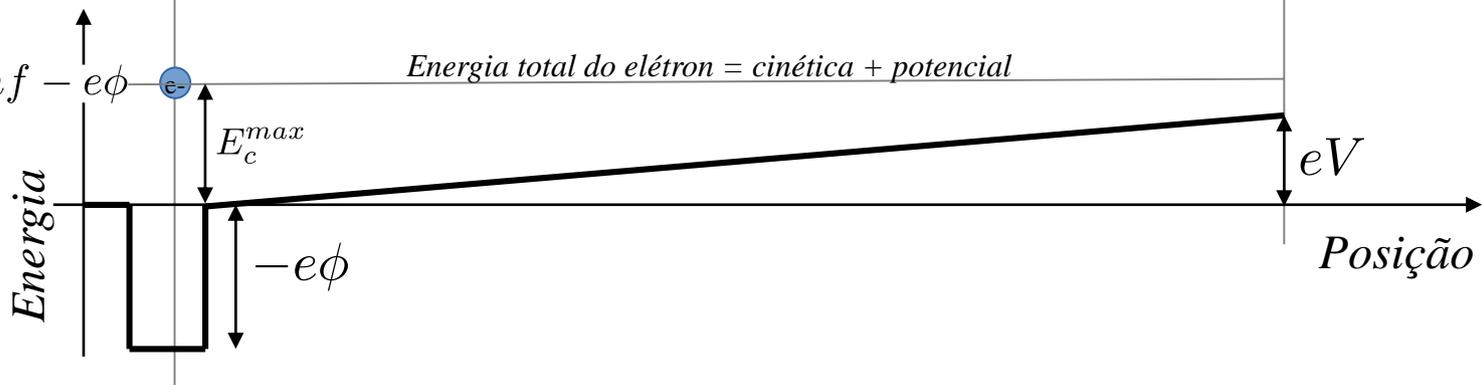
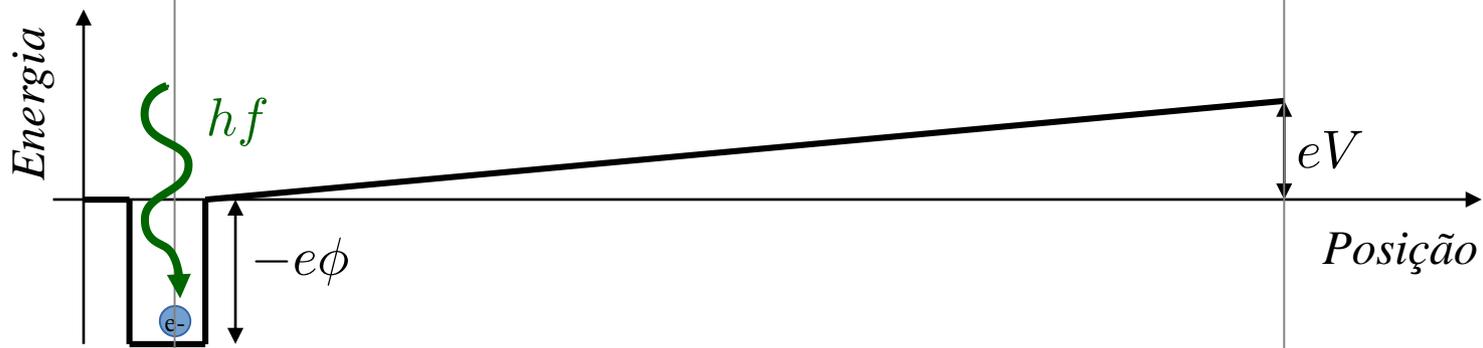
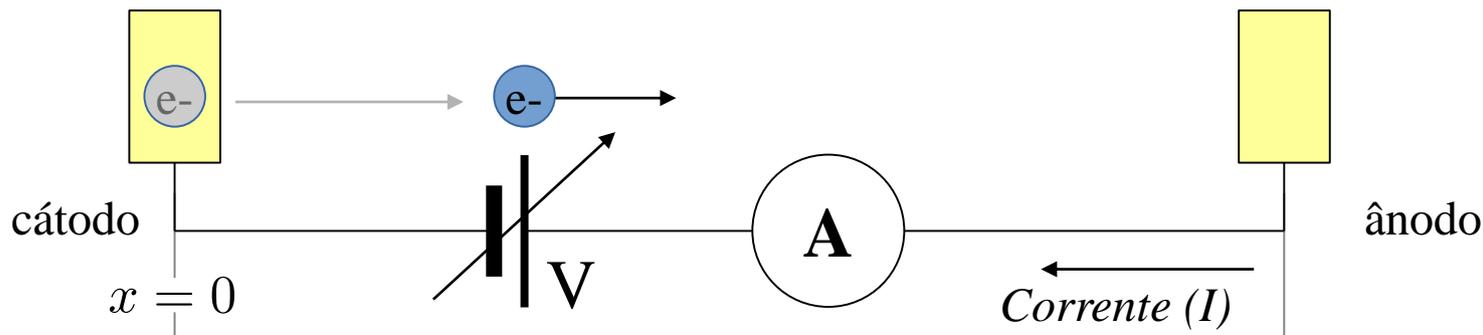
(antes de absorver)

(depois de absorver)

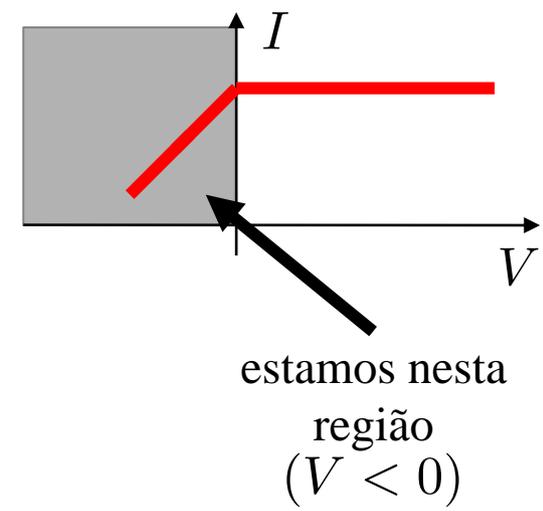


... e para Potencial $V < 0$?

(Potencial repulsivo)



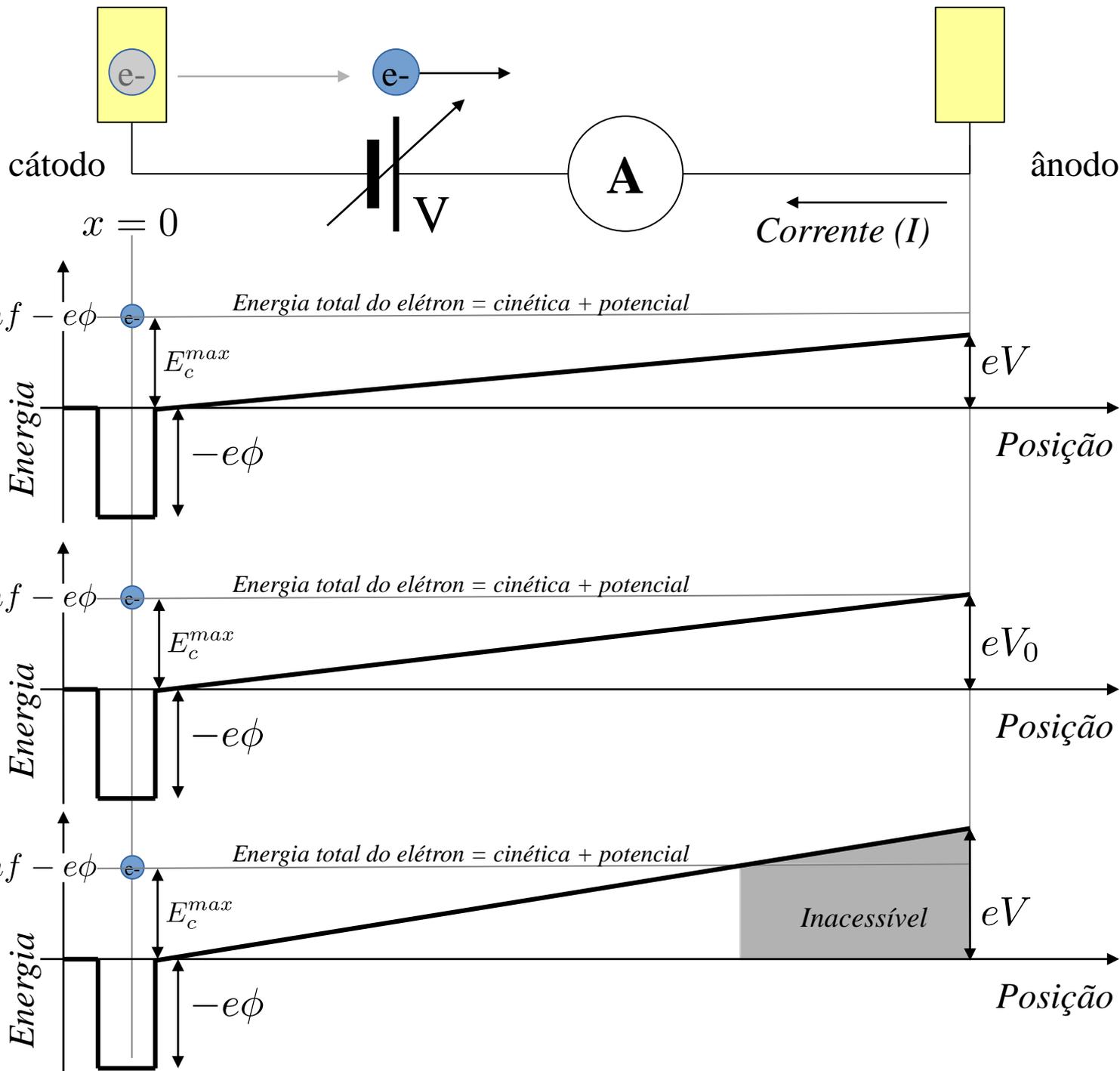
Curva ($I \times V$)



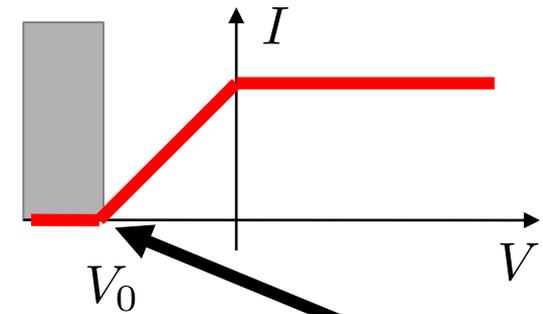
(antes de absorver)

(depois de absorver)

... se fizer V cada vez mais negativo?



Curva ($I \times V$)



estamos nesta região ($V \leq V_0$)

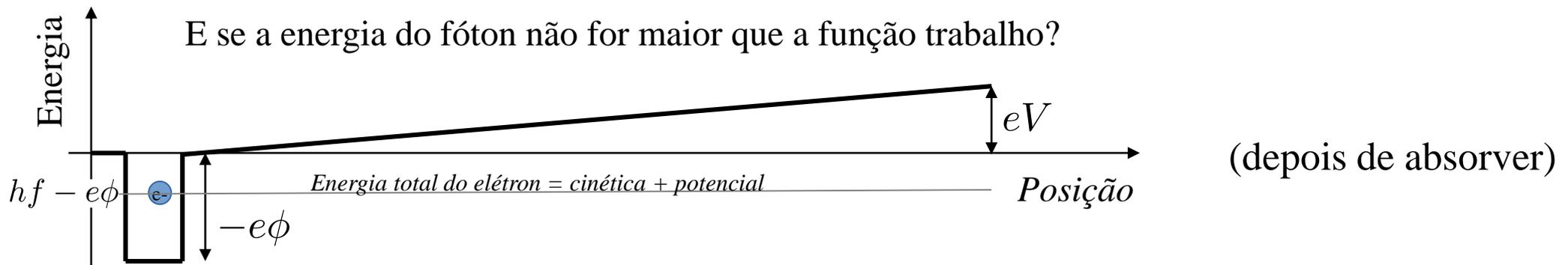
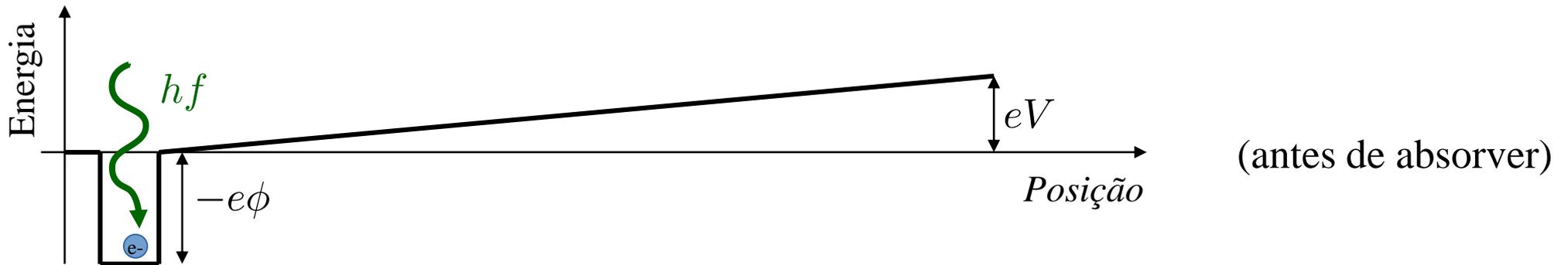
Vai existir um potencial $V = V_0$ no qual o elétron não tem energia para atingir o ânodo.

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:

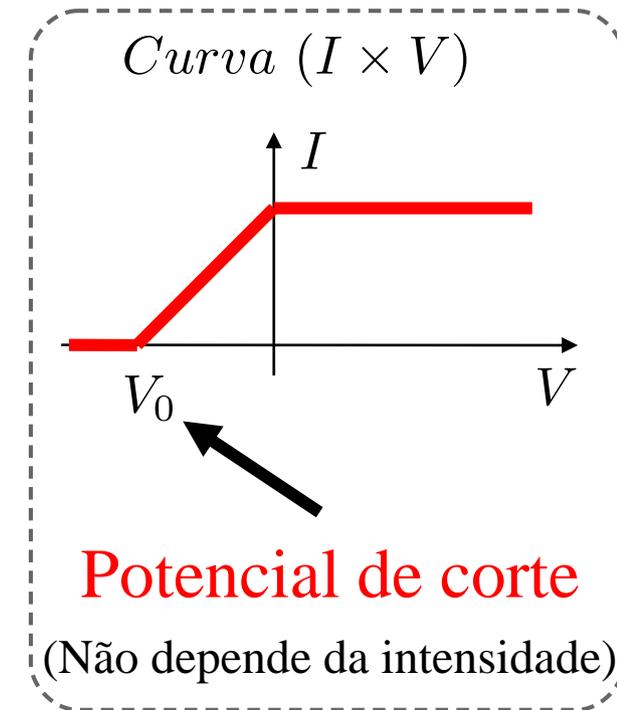
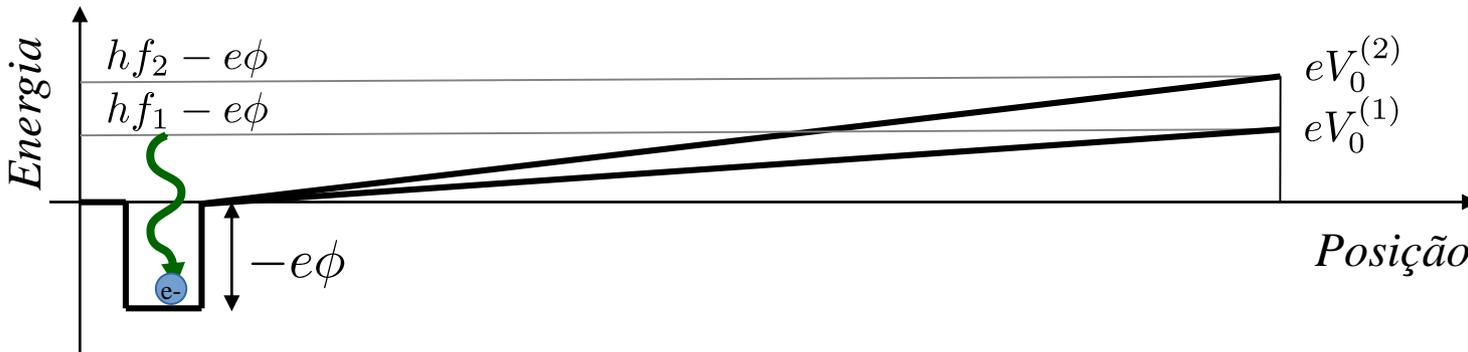
$$E = hf$$

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!!!

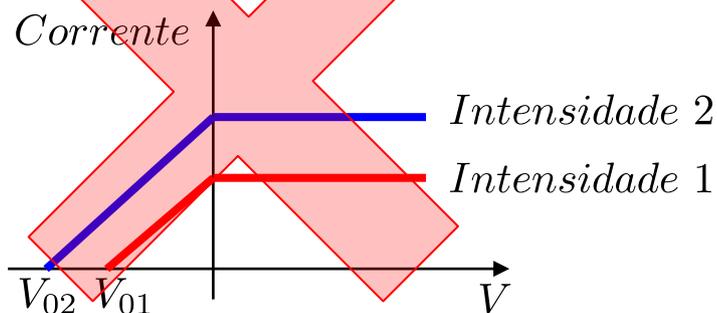
Note que o valor de V_0 depende da energia da radiação incidente!



(e nova teoria)

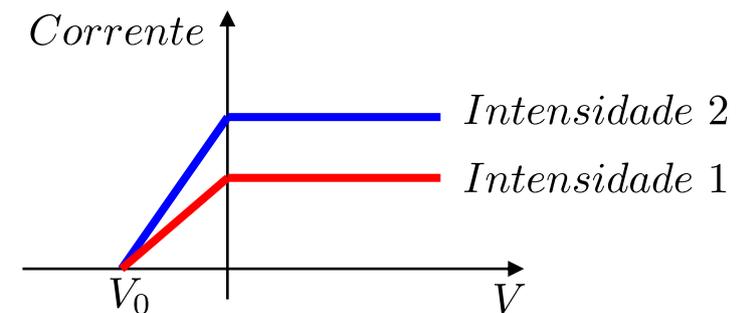
Previsão da Teoria Clássica

(antes dependia da intensidade)



Medidas Experimentais

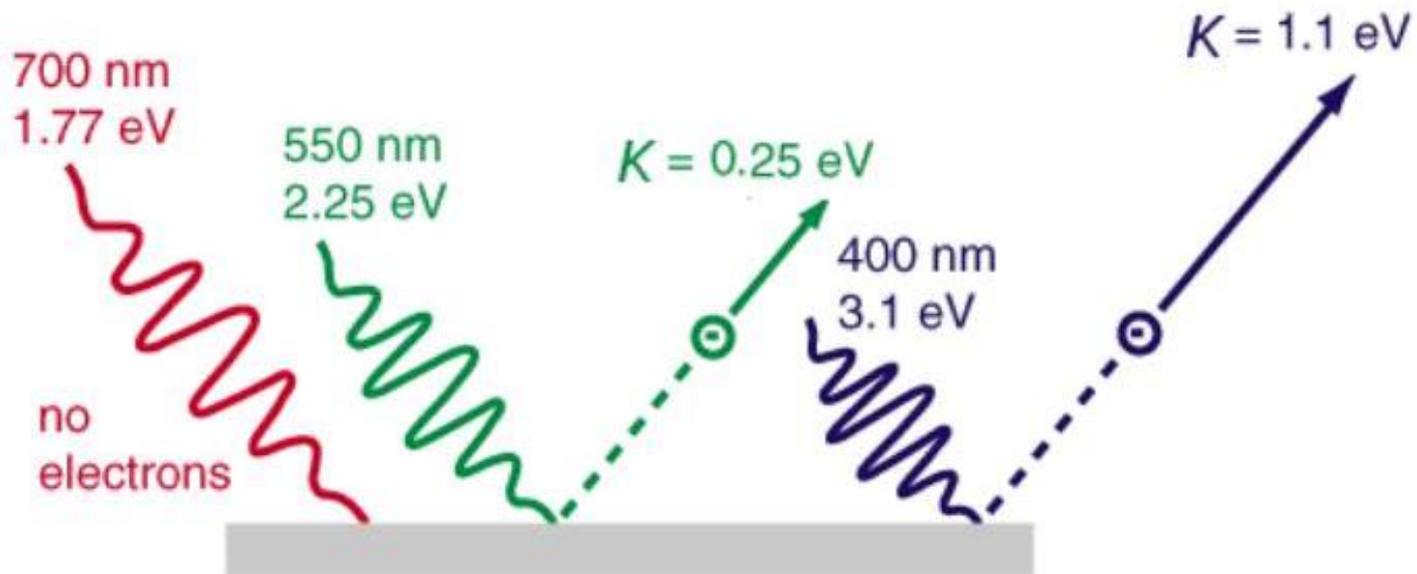
(agora depende só da frequência)



Exemplo para um eletrodo de Potássio

$$E = h\nu$$

$$E_c = K = h\nu - e\phi$$



Para o Potássio, $e\phi = 2 \text{ eV}$

Parte Experimental:

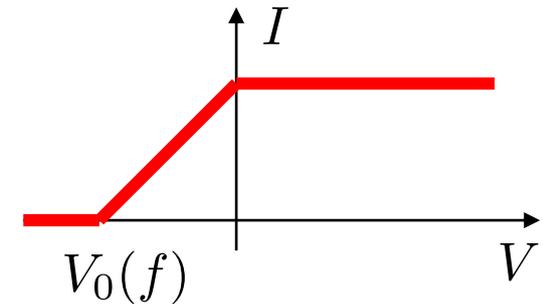
- Verificar as observações de Lenard
- Verificar a previsão de Einstein, e determinar o valor da constante de Planck
- Medir a função trabalho da válvula fotoelétrica



O que será feito?

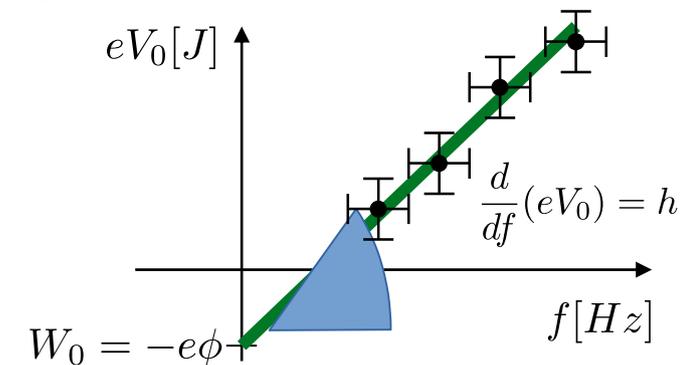
- Para várias radiações de comprimentos de onda e frequência diferentes iremos construir a curva ($I \times V$) de uma válvula fotoelétrica.
- Destas curvas será obtido o potencial de corte V_0 em função de f .
- Ajuste de reta para encontrar a constante de Planck.

Curva ($I \times V$)



$$eV_0 = hf - e\phi$$

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



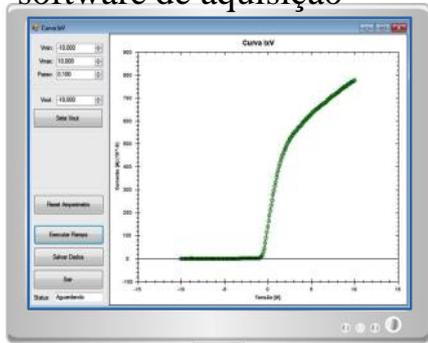
Lembre que: $c = \lambda f$

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

Aparato Experimental

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

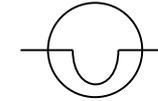
Computador +
software de aquisição



ProKeithley

Filtro de Intensidade

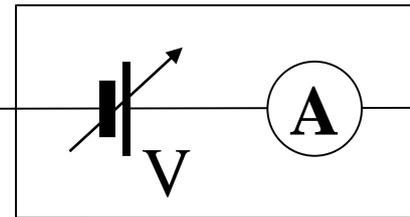
Fonte Luminosa



Rede de Difração



Válvula fotoelétrica

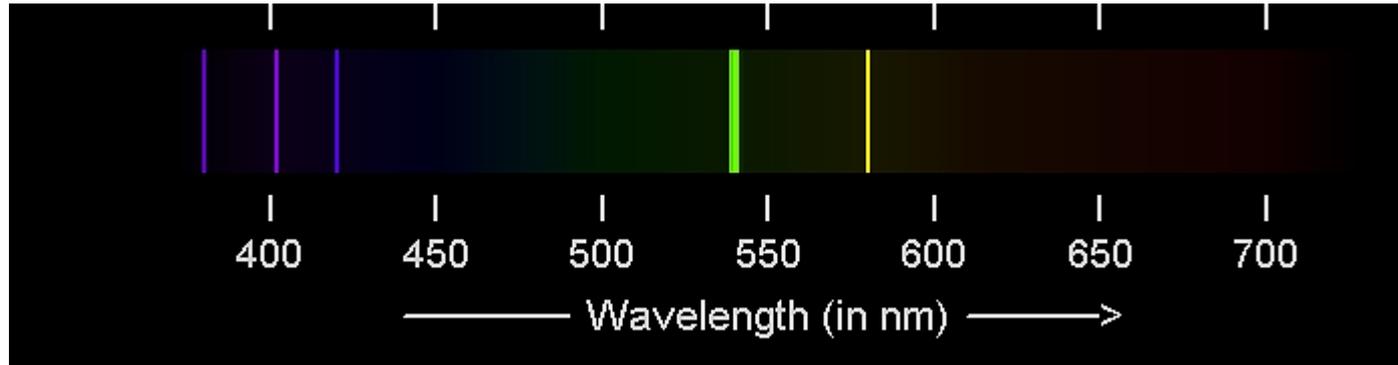


Pico amperímetro +
fonte de
tensão variável

RS232+GPIB

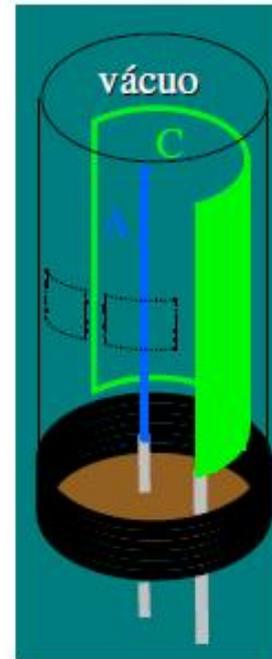


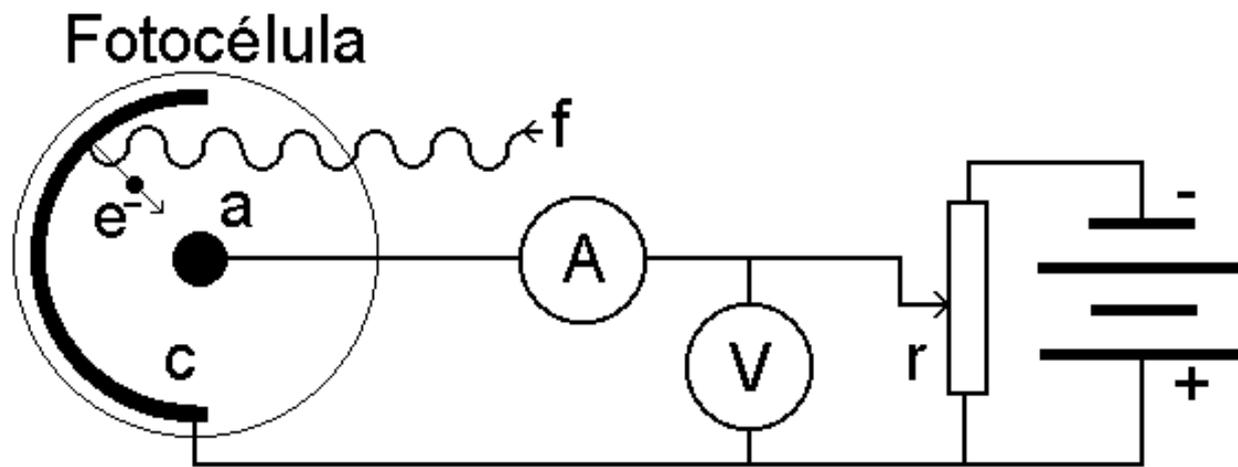
Fonte de luz: **Espectro da Lâmpada de Hg**



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

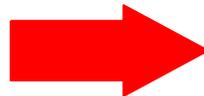
c = catodo

Detalhes do Programa de Aquisição:

Ajustes dos limites de tensão da rampa e resolução



Reset do Picoamperímetro



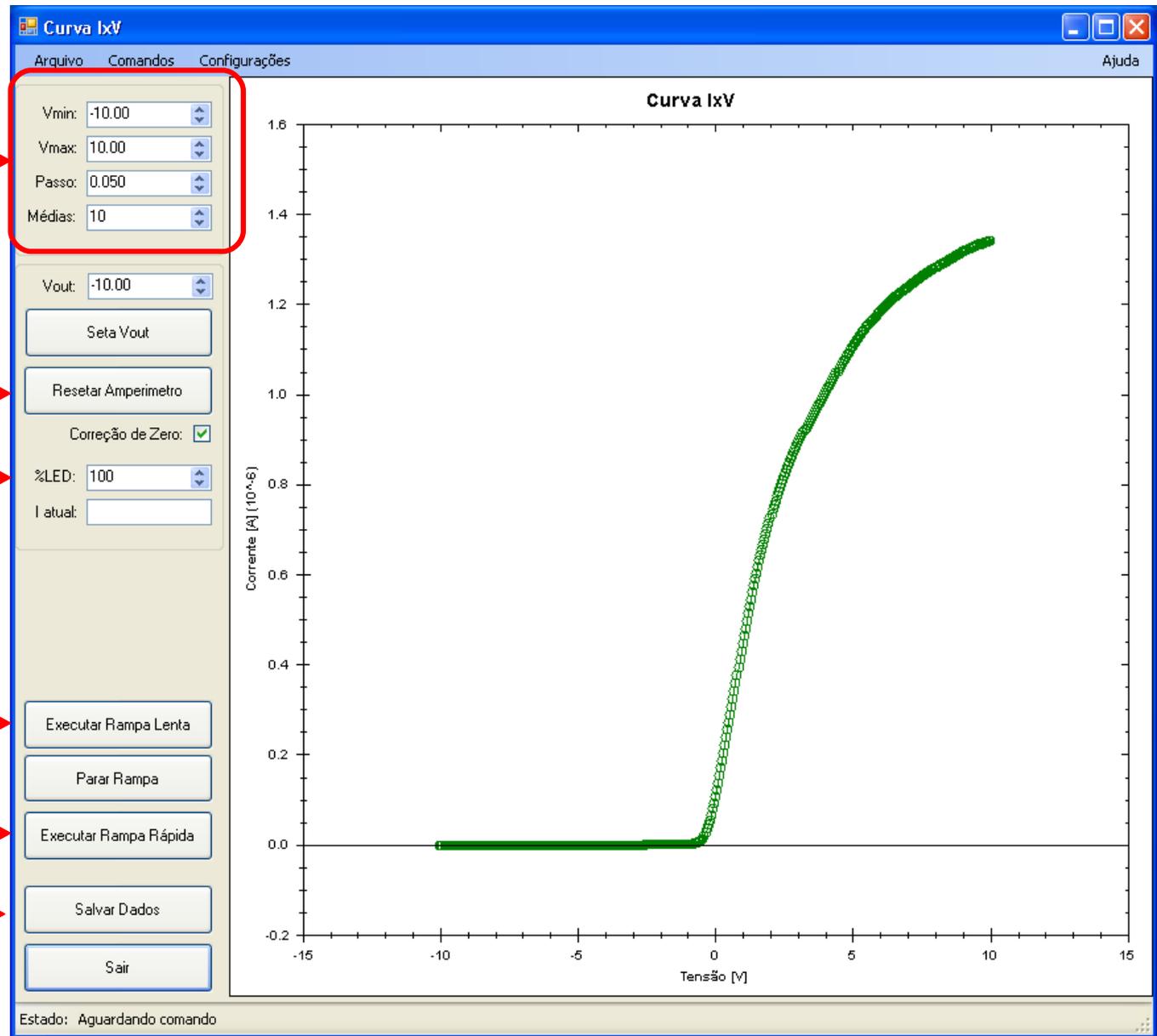
Ajuste de intensidade do LED
(segunda semana)



Rampa Lenta
(faz médias por ponto)

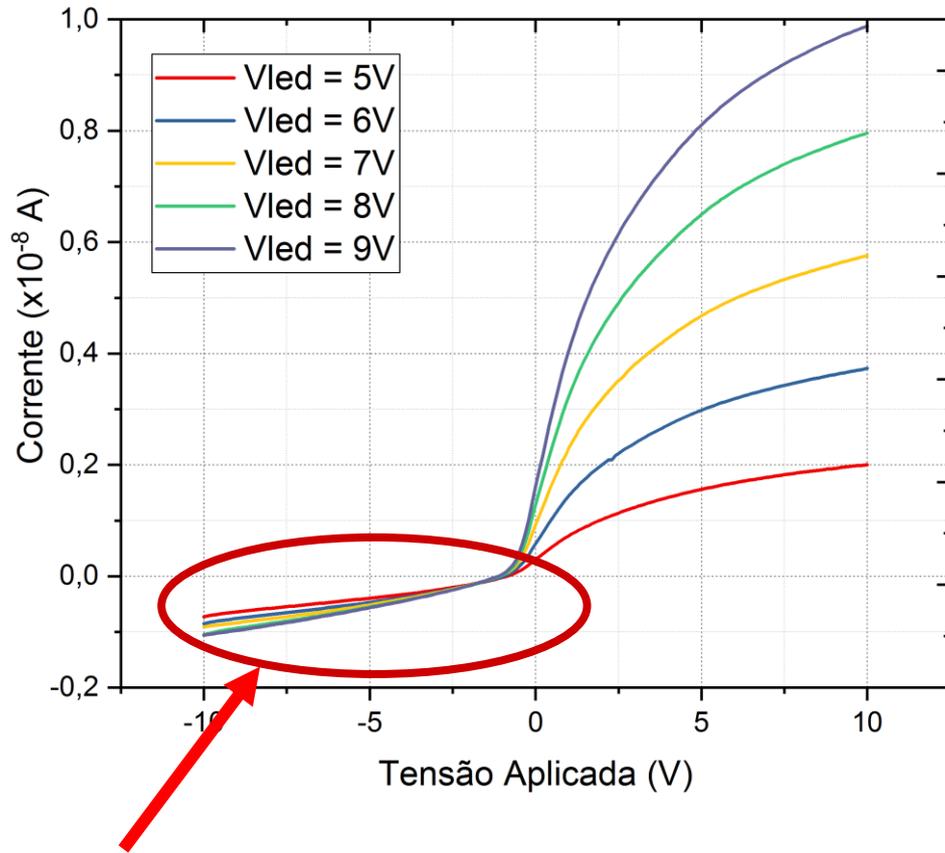


Rampa rápida
(leitura única por ponto)



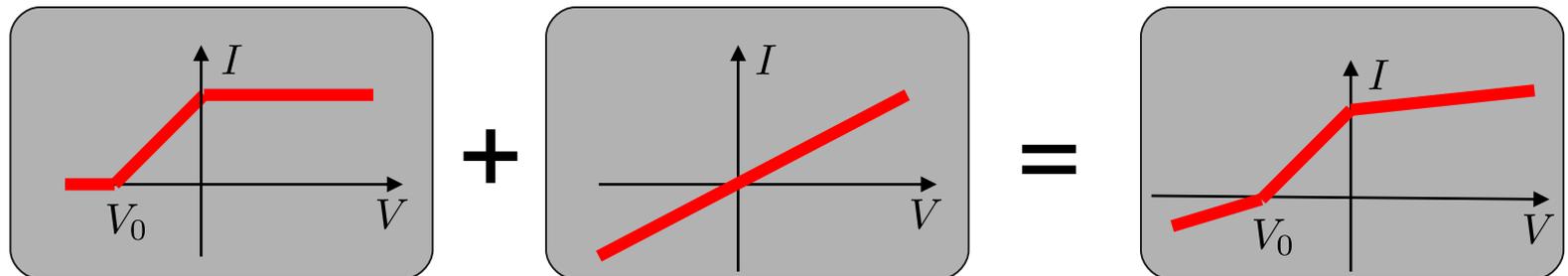
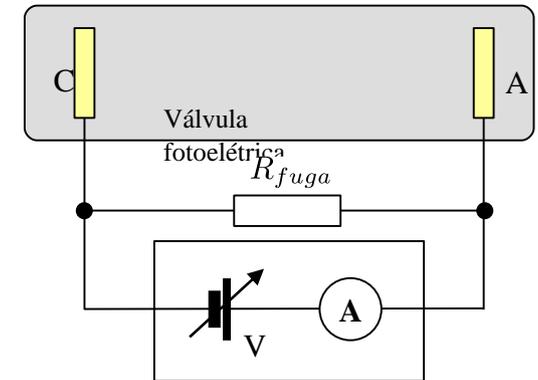
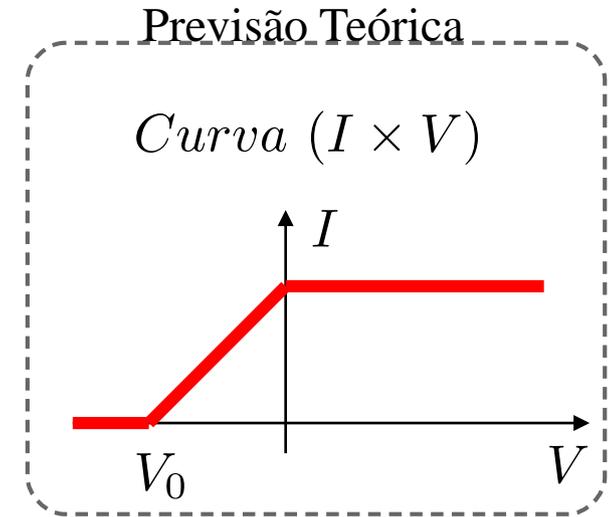
Resete o Pico-amperímetro com a iluminação desligada.

Curvas Experimentais: (Spoiler)



A corrente não vai a Zero!

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

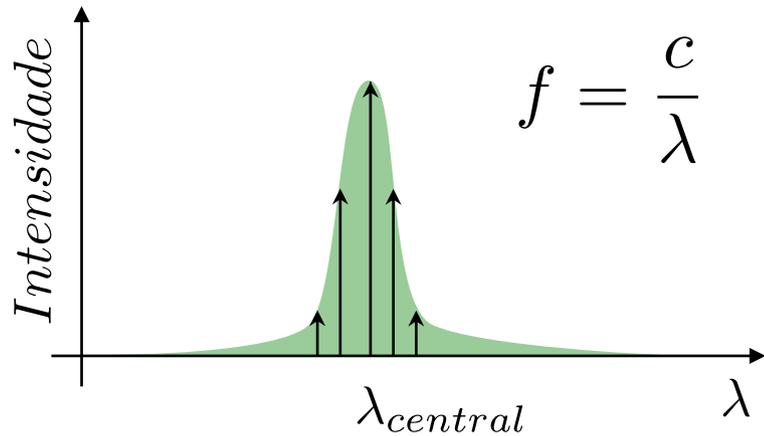


Curvas Experimentais: (Spoiler)

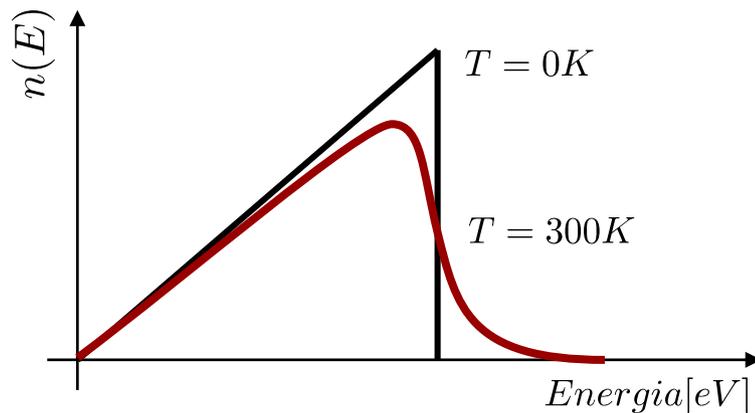
Qual o efeito da largura espectral e da Temperatura?

$$eV_0 = hf - e\phi$$

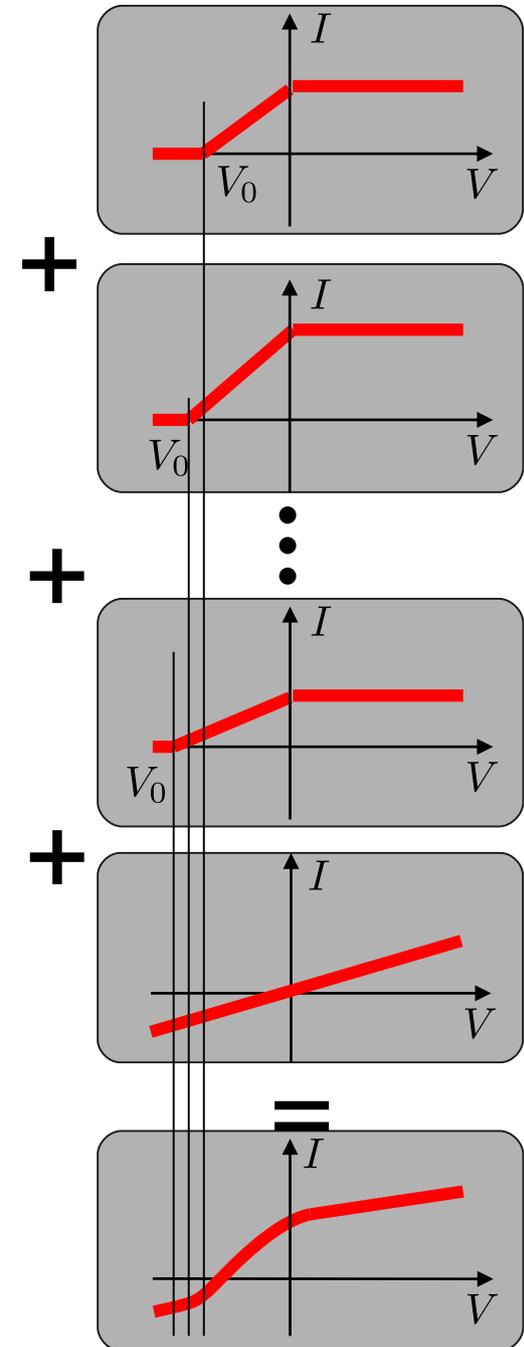
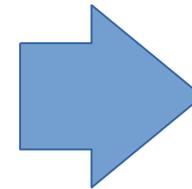
Dispersão da intensidade luminosa em função do comprimento de onda



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

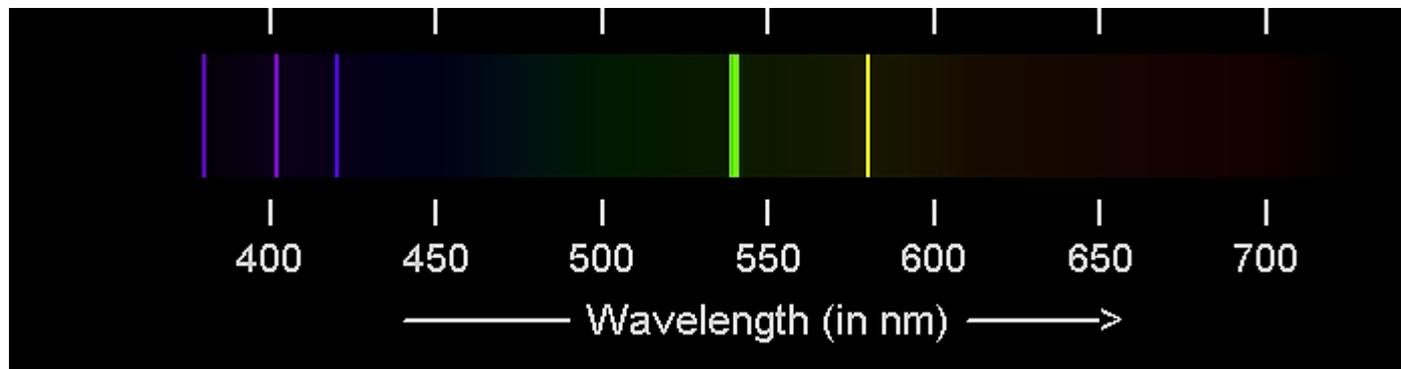


A. L. Hughes, L. A. DuBridge, Photoelectric Phenomena, McGraw-Hill, New York, 1932, Ch1-2, p1-37



Métodos de Análise dos Dados

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



Dados: para cada comprimento de onda : $i \times V$ (-10 a 10 V)

e $i \times V$ (-2 a 2 V)

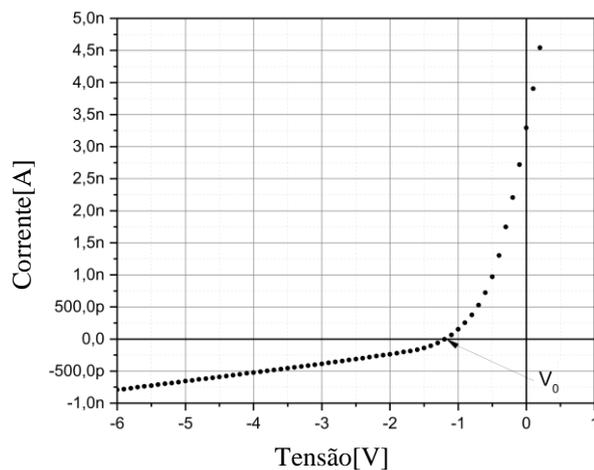
Onde i = corrente

V = tensão aplicada entre catodo e anodo

Métodos para determinação de V_0 :

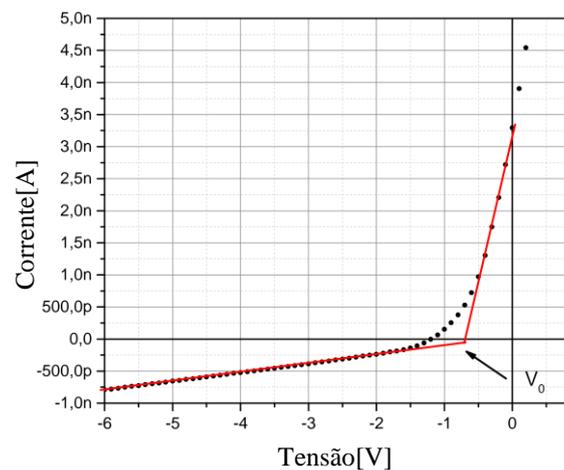
1ª semana

Método 1

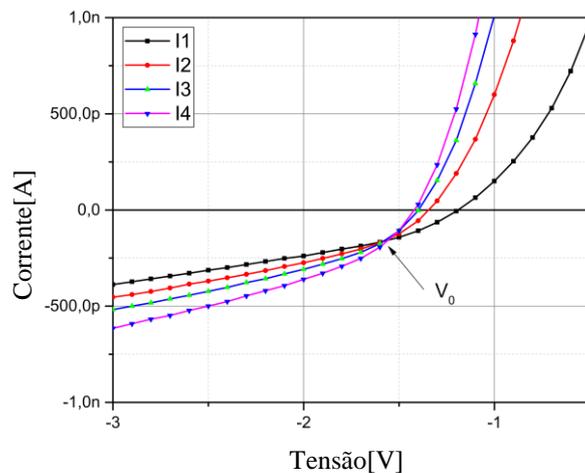


1ª semana

Método 2



Método 3



2ª. Semana de Aula : Método 3: Potencial de corte independe da intensidade da radiação!

Então o ponto de intersecção das curvas é uma boa estimativa do potencial de corte

(uso de outros métodos: justifique!)

1ª semana

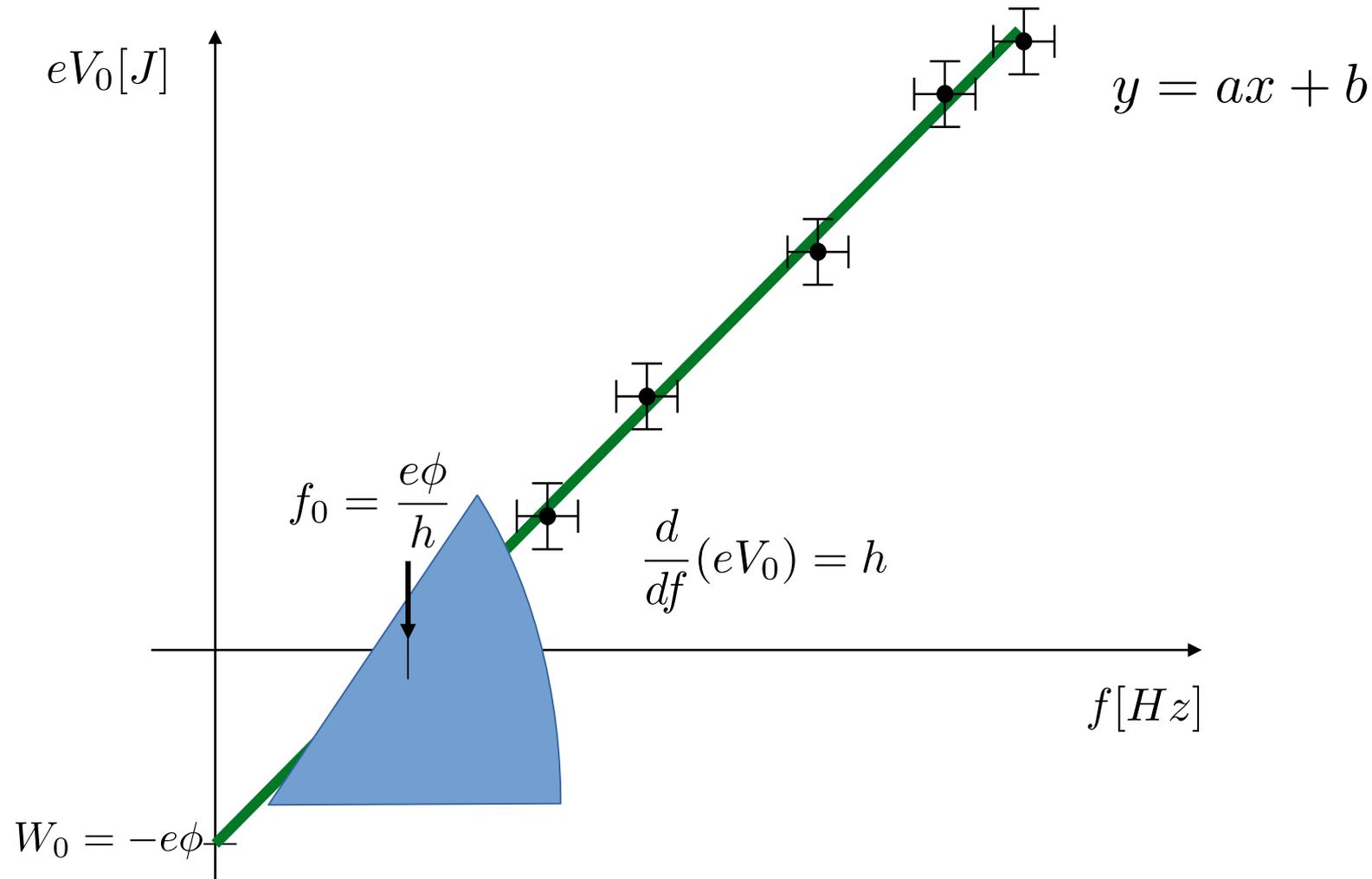
Intensidade total (sem atenuador) – 100%

Arquivos : b1_bl100.csv (blue, -10 a 10V)

[b1_bl2-2.csv](#) ou [b1_bl2-2_100.csv](#) (blue, -2 a 2 V)

Não esqueçam: propagar as incertezas no ajuste

(Compare os resultados dos 2 métodos iniciais)



$$h \pm \sigma_h$$

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

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

Apresentação para próxima aula:

Curvas Experimentais ; corrente x tensão para todos comp onda

Gráficos das análises pelos 2 métodos : pelo menos um exemplo de cada método

Gráficos dos ajustes $V_0 \times f$ para cada método

- ▶ Constante de Planck e função trabalho
Comparação com a literatura
- ▶ Discussão sobre a performance de cada método e em caso de falha, porque falham

Bom Trabalho!