

## Exercícios de Mecânica Quântica

### Experimento 3 - Efeito Fotoelétrico

Nome: Lucas Cesar Bedone Zanni

m<sup>o</sup> USP: J0732169

18/09/2020

#### Resumo:

O experimento aqui descrito estuda o efeito fotoelétrico, utilizando um fototubo, filtros e LEDs para a promoção de fenômenos. Além disso, verificou-se a exatidão e precisão dos métodos matemáticos e gráficos para a determinação da constante de Planck e a função trabalho, previamente desconhecidos, atingindo resultados na mesma ordem de grandeza, porém insuficientemente exatos e precisos.

#### Introdução:

O efeito fotoelétrico é um fenômeno físico no qual um material metálico exposto a uma radiação eletromagnética de frequência alta promoveu seus elétrons ejetados, devido a energia fornecida a estes pela radiação eletromagnética.

Em 1887, Heinrich Hertz realizou a experiência que descobriu o efeito fotoelétrico, como no época não existia ainda as teorias quânticas, Hertz utilizou a física clássica para explicar este novo fenômeno. Após novo estudo constatou que a nova efeito descoberto contrariava a teoria ondulatória clássica da luz em 3 questões.

Diante dessas objeções, Albert Einstein, com a sua nova Teoria Quântica, solucionou as 3 questões que a física clássica não explicava. Assim, ele propôs a quantização, pois ejetar elétrons da superfície, da energia da radiação estava concentrada em pacotes e não distribuída sobre a onda. Isso definiu a fórmula de energia do fóton

$$E = h \nu$$

Equação 1: Energia do fóton

\* Onde,  $h$  é a constante de Planck e  $\nu$  é a frequência do fóton

data  
fecha

D S T Q O S S  
D L M M J V S

Aním, pelo Efeito Fotoelétrico, o qual possui um elétron ejetado com energia cinética da superfície metálica, possuindo uma energia cinética de:

$$K = h\nu - W$$

Equação 2: Energia cinética de um elétron, pelo EFE

\* Onde,  $W$  é o trabalho necessário para remover o elétron do metal.

Por uma energia de luz mais fraca e sem perda interna o fóton terá energia cinética máxima, ou seja,

$$K_{\max} = h\nu - W_0$$

Equação 3: Energia cinética máxima, pelo EFE

\* Onde  $W_0$  é a energia característica do material, denominado de função trabalho.

Além disso, variando a frequência, obtemos um certo termo que quando aplicado emula o efeito fotoelétrico. Relacionando estas duas grandezas graficamente é possível obter os respectivos valores do constante de Planck e da função trabalho empregada. Considerando que a energia cinética máxima é equivalente a  $eV_0$  (carga elementar do elétron multiplicado pelo termo de corte), temos que:

$$eV_0 = h\nu - W_0$$

Equação 4: Relação entre o potencial de corte e a função trabalho

\* Onde,  $V_0$  é o potencial de corte.

Sendo assim, a objetivo da presente relação é estudar o efeito fotoelétrico e determinar a função trabalho do material observado do fotocátodo.

\* Potencial de Corte = Potencial Limite = Tensão de corte

## Materiais e Métodos:

### - Materiais

- \* Foto-tubo com amperímetro acoplado
- \* Voltímetro
- \* Filtros coloridos
- \* LEDs, comínones

### - Métodos:

**I** - Foi calibrada a potencial de referência do foto-tubo ao tempo a entrada de luz com um filme opaco e aplicando-se uma tensão de 3V, desse modo, a corrente deve ser nula.

**II** - A fonte de luz branca foi posicionada a uma determinada distância e foi mantida fixa, a distância foi variada até ser encontrada uma posição que gere 30mA, aplicando-se uma potência de retardo para diminuir a corrente. Logo, anotou-se os valores da corrente em função do potencial de retardo, medindo-se para cada 5mA aplicado no tubo. Este mesmo procedimento foi repetido para todos os filtros disponíveis.

**III** - O perfil das curvas de tensão pela corrente foi avaliado e determinou-se os valores do potencial de corte para cada filtro empregado, correlacionando com os valores de comprimento de máxima transmissão dos filtros.

**IV** - A constante de Planck e a função trabalho do material foram determinados com os valores do potencial de retardo e comprimento de onda de corte. Ajustando-se a equação teórica que correlaciona essas variáveis.

**V** - O procedimento foi repetido empregando-se os LEDs como fonte de excitação, determinando-se a curva de corrente pela tensão e identificando o potencial de corte para cada LED.

**VI** - Foi plotada uma gráfica dos comprimentos de onda de pico e do potencial de retardo dos LEDs e, então obtivemos a função trabalho e a constante de Planck.

data  
fecha

(D) (S) (T) (Q) (Q) (S) (S)  
 (D) (L) (M) (M) (J) (V) (S)

VII - Analisou-se os dados obtidos para os filtros e para os LEDs, identificando-se os conjuntos mais adequados para fazer a cálculo da função trabalho e da constante de Planck.

Resultados e Discussões:

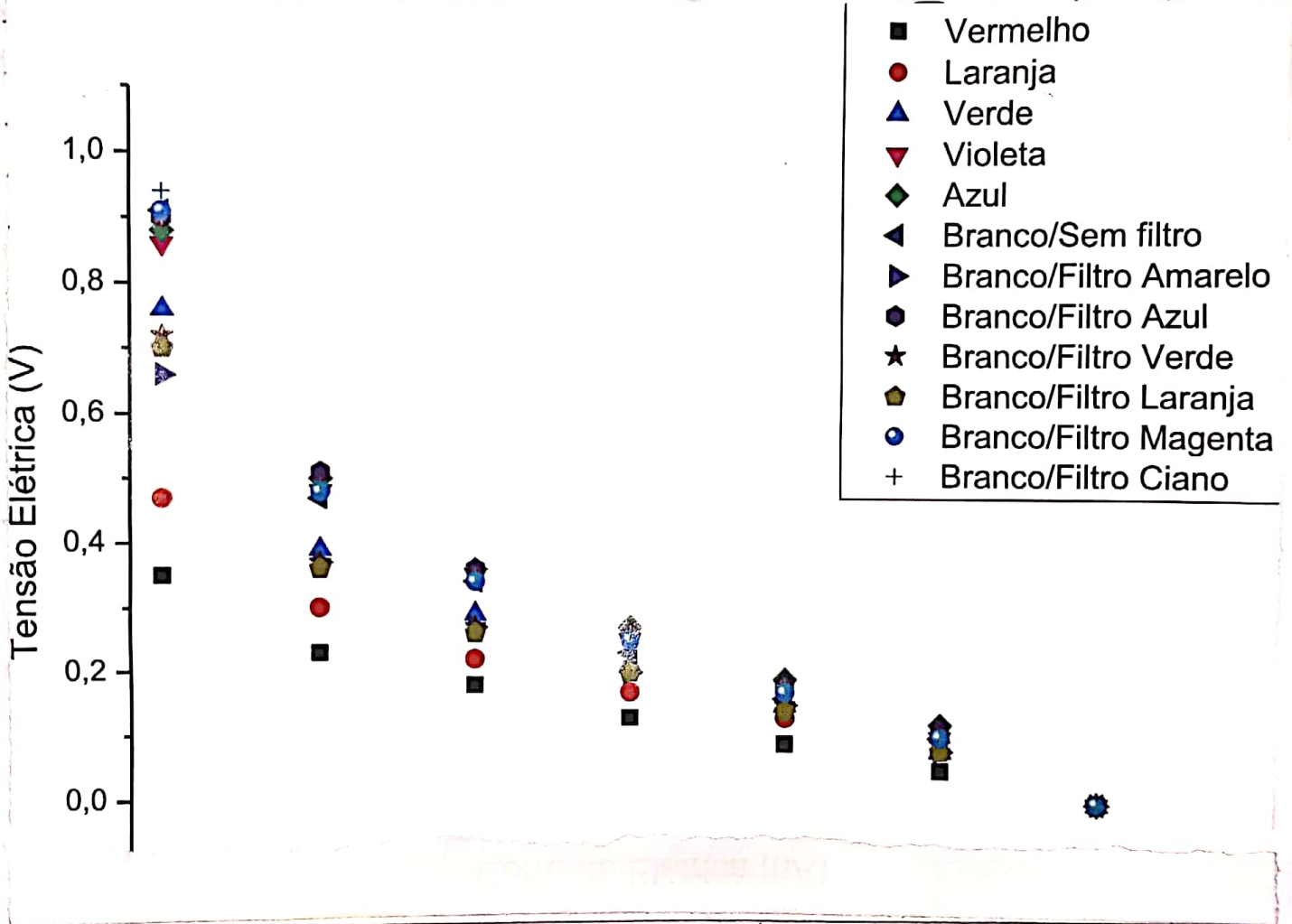
Após a calibração por cada tipo de filtros e LEDs, foram coletados os dados dos tensões elétricas, tensão de corte, comprimento de onda de pico, frequência de pico, os qual estão expostos abaixo

Tabela 1: Dados coletados para os Filtros e LEDs, conforme explicado na metodologia

Led/Filtro	Tensão Medida (V) para a corrente indicada abaixo em (nA)							Comprimento de Onda de Pico (nm)	Frequência de Pico (Hz)
	30	25	20	15	10	5	0		
Vermelho	0,0	0,05	0,09	0,13	0,18	0,23	0,35	653	4,59E+14
Laranja	0,0	0,08	0,13	0,17	0,22	0,30	0,47	595	5,04E+14
Verde	0,0	0,08	0,15	0,21	0,29	0,39	0,76	558	5,38E+14
Violeta	0,0	0,10	0,18	0,25	0,35	0,48	0,86	396	7,58E+14
Azul	0,0	0,12	0,19	0,27	0,36	0,50	0,88	475	6,32E+14
Branco/Sem filtro	0,0	0,10	0,16	0,23	0,34	0,47	0,91	460	6,52E+14
Branco/Filtro Amarelo	0,0	0,08	0,15	0,20	0,27	0,37	0,66	541	5,55E+14
Branco/Filtro Azul	0,0	0,11	0,18	0,26	0,36	0,51	0,90	460	6,52E+14
Branco/Filtro Verde	0,0	0,09	0,15	0,20	0,27	0,37	0,72	537	5,59E+14
Branco/Filtro Laranja	0,0	0,08	0,14	0,20	0,26	0,36	0,70	556	5,40E+14
Branco/Filtro Magenta	0,0	0,10	0,17	0,25	0,34	0,48	0,91	460	6,52E+14
Branco/Filtro Ciano	0,0	0,10	0,18	0,26	0,35	0,49	0,94	460	6,52E+14
Branco/Filtro Vermelho	Não foi possível medir com o filtro vermelho.							663	4,52E+14

A partir dos dados da tabela, foi construído um gráfico de tensão pela corrente elétrica, assim, poderemos analisar melhor a dependência da frequência do onda/comprimento do onda com as tensões colhidas para diferentes correntes elétricas.

Gráfico 1: Tensão elétrica versus corrente elétrica



\* Tensão de corte/Potencial limite é o valor correspondente do tensão elétrica, por corrente elétrica máx

Primeiramente, analisando a tabela percebemos que a luz branca com filtro vermelho não nos fornece dados, porém, a LED vermelha nos fornece dados. Isso acontece devido a baixa frequência de onda, que a luz branca passando no filtro vermelho possui pelo o filtro filtrando os comprimentos de ondas em uma banda de  $\pm 100\text{nm}$ , ou seja, a frequência do onda será baixa, resultando em uma energia baixa para ocorrer o fenômeno. Entretanto, como na LED vermelha, por um banda de um LED, que em termos de  $\pm 10\text{nm}$ , ou seja, precisará

data  
fecha

D S T Q Q S S  
D L M M J V S

uma frequência maior, devido a colibragem do comprimento de onda no emissão do onda, e esta frequência maior resultará em uma energia maior, do qual esta tem a capacidade de realizar o efeito fotoelétrico. Além disso, nota-se que mesmo o LED vermelho conseguindo realizar o fenômeno, o seu potencial limite é baixa, ou seja, a energia cinética que o elétron tiver será baixa, devido a onda possui uma frequência baixa comparada a ondas de comprimento de onda menor, como a luz Azul ou luz violeta, ultra-violeta, Raios-X e entre outros.

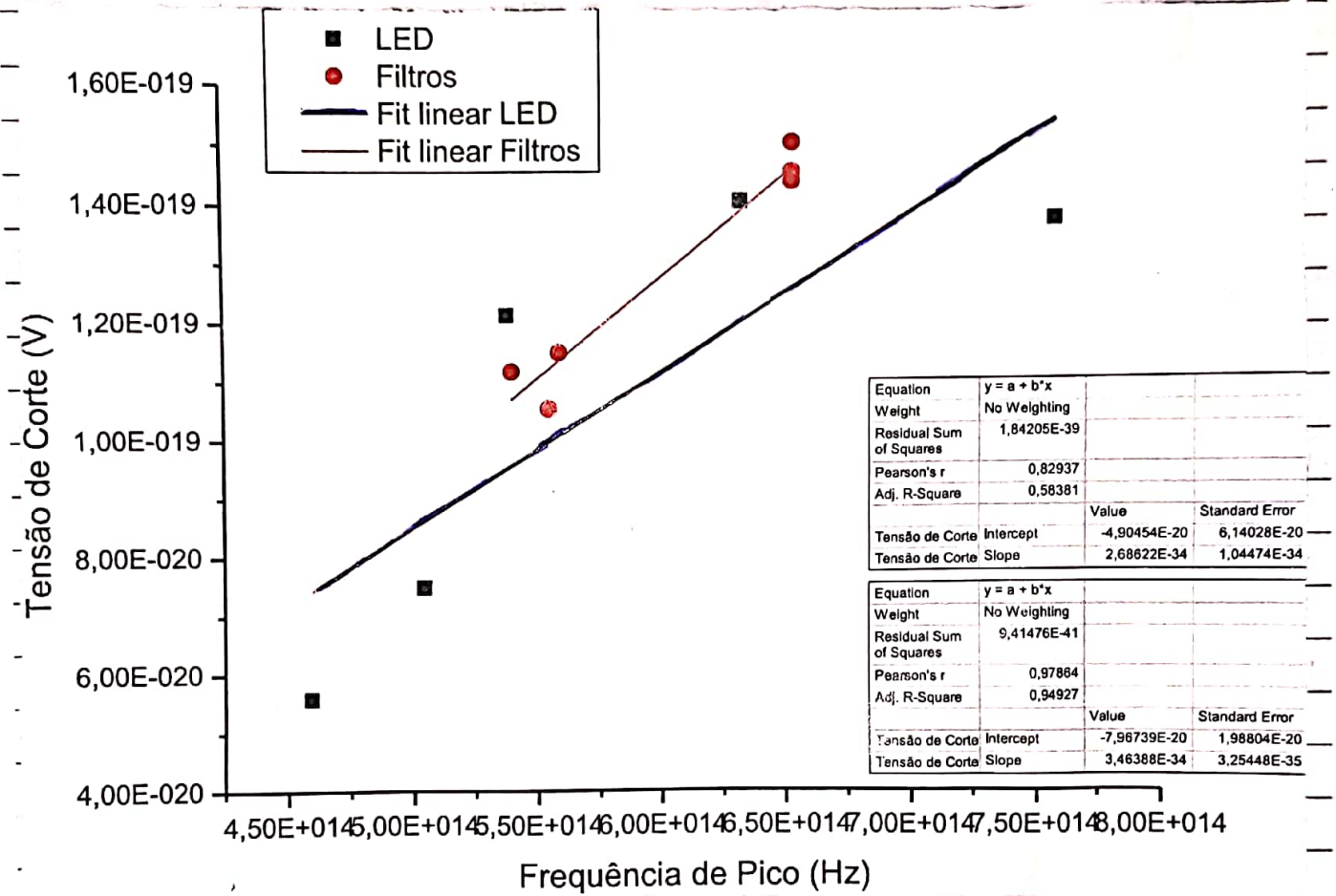
Pelo gráfico podemos classificar as dependências das tensões com a frequência das ondas. Sendo que, quanto maior a frequência do onda, maior será a tensão, ou seja, como o potencial limite está relacionado com a energia cinética máxima do fotoelétrico e a frequência do onda está relacionada a energia do onda (Mais frequência do onda  $\rightarrow$  Mais Energia do onda / Mais potencial limite  $\rightarrow$  Mais Energia cinética máxima do fotoelétrico), temos então que quanto maior a energia do onda, maior será a energia cinética máxima do fotoelétrico. Este fato é notado no gráfico, pois por comprimentos de onda menores, como o azul, temos uma frequência maior, resultando em um potencial limite maior, consequentemente uma energia cinética do fotoelétrico maior, comparado aos outros comprimentos de onda.

Ademais, podemos relacionar, também, que quanto maior a energia de uma onda, ou seja, maior frequência, será mais fácil acontecer o efeito fotoelétrico, portanto, mais fácil de ejetar um elétron de uma das camadas de valência do átomo.

$\rightarrow$  Para observar melhor a dependência da frequência das ondas com as tensões de corte foi feito o gráfico 2. Além disso, a partir deste gráfico fazendo um fit linear é possível obter os valores de constante de Planck ( $h$ ) e o valor da função trabalho para cada frequência.

Temos 2 curvas no gráfico 2, sendo que o ajuste azul do gráfico representa os LEDs e o ajuste vermelho representa os filtros utilizados com a luz branca.

Gráfico 2: Potencial Limite versus Frequência de Pico



Assim, determinando os coeficientes lineares e angulares será possível obter a cte de Planck (h) e a função trabalho ( $w_0$ ), baseada na equação 4, pois:

→ Pela equação 4:

$$eV_0 = h\nu - w_0$$

$$V_0 = \frac{h\nu - w_0}{e}$$

$$y = ax + b$$

Então, os coeficientes lineares e angulares serão determinados por e.

data  
fecha

D S T Q Q S S  
D L M M J V S

Logo, en valores obtenidos por: Constante de Planck

$$\text{LEDs} \left\{ \begin{array}{l} h = (2,69 \pm 1,04) \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ Kg} / \text{s} \\ W_0 = (4,91 \pm 6,14) \cdot 10^{-20} \text{ J} \end{array} \right.$$

$$\text{Filtros} \left\{ \begin{array}{l} h = (3,46 \pm 0,32) \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ Kg} / \text{s} \\ W_0 = (7,98 \pm 1,98) \cdot 10^{-20} \text{ J} \end{array} \right.$$

Valor teórico de constante de Planck

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{Kg} / \text{s}$$

Logo, percibimos un error relativo en relación a cte de Planck, de:

$$\text{LEDs: } 59,4\%$$

$$\text{Filtros: } 47,8\%$$

Entonces, nota-se que en valores obtenidos experimentalmente están de esta forma distantes de valor teórico.

Otro dato que nota-se es que el valor referente con filtros está más consistente/sólido de que el valor referente con LEDs, estando un valor con error relativo menor en referencia a constante de Planck e un desvío grande por la función trabajo.

Entretanto, como ya explicado la banda de comprimentos de onda de luz blanca/Filtros es bastante mayor, cerca de  $\pm 100 \text{ nm}$ , comparado a banda de LEDs, cerca de  $\pm 10 \text{ nm}$ . Entonces, técnicamente los valores obtenidos experimentalmente deberían ser más exactos e precisos por un sistema que tende a una luz monocromática, pero, más es una que analizamos sólo, por los LEDs, que parecen que como luz monocromática, obtuve un valor más divergente de valor

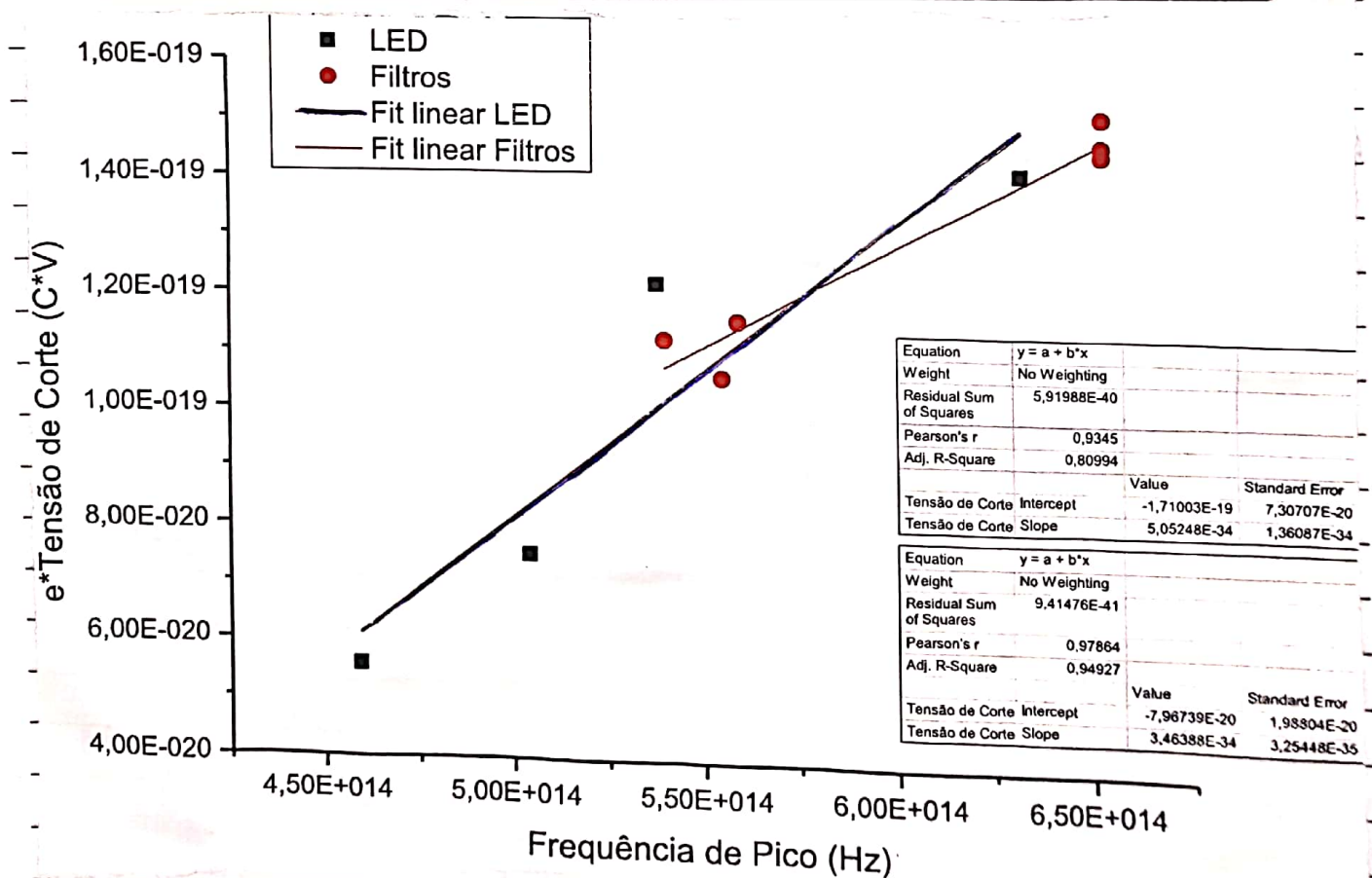
esperado.



Notando esta inconsistência na teoria e analisando o gráfico foi descoberto que o ponto no gráfico, o qual representa o LED violeta estava errado, ou seja, as grandezas medidas para o LED violeta pode ter sido medidas de forma errônea, sendo que o valor errado resultou em uma inconsistência com a teoria.

Sendo assim, foi notado este ponto do gráfico e, conseqüentemente, o gráfico foi plotado e fitado com o antigo ponto - logo, obtiveram valores melhores em relação aos LEDs e, também, afirmamos a teoria, a qual esperava melhores valores para fontes monocromáticas, sendo que o LED pode ser considerado em partes como um fonte monocromática.

Gráfico 3: Potencial Limite Versus Frequência de Pico - Gráfico Corrigido



data  
fecha

D S T Q Q S S  
D L M M J V S

→ Realizando o mesmo ajuste que foi utilizado nos gráficos 2, obtemos

$$\text{LEDs} \left\{ \begin{array}{l} h = (5,05 \pm 1,36) \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ Kg/s} \\ W_0 = (17,10 \pm 7,31) \cdot 10^{-20} \text{ J} \end{array} \right.$$

$$\text{Filtros} \left\{ \begin{array}{l} h = (3,46 \pm 0,32) \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ Kg/s} \\ W_0 = (7,98 \pm 1,98) \cdot 10^{-20} \text{ J} \end{array} \right.$$

→ Comparando os valores obtidos com o valor teórico da constante de Planck, obtemos um erro relativo de:

$$\text{LEDs} : 23,8\%$$

$$\text{Filtros} : 47,8\%$$

Logo, nota-se um valor mais próximo do valor teórico para os LEDs. Além disso, o valor dos LEDs ficou mais exato do que os valores dos filtros, confirmando a teoria, que espera melhores resultados para luzes monocromáticas conforme já dito.

Questões:

8- Um fototubo é um detector de radiação, sendo como um tubo de vidro selado, composto por vácuo em seu interior, onde possui dois eletrodos.

Uma fotocélula é um dispositivo utilizado para o acionamento da iluminação de forma automatizada, por exemplo, a iluminação do ambiente está escura, logo a fotocélula acenderá as luzes e apagará, assim que ficar claro.

9- Utilizando dados da tabela 1, fazemos:

→ Como,

$$K_{\text{máx}} = e V_0$$

↓  
Energia cinética máxima

↳ Potencial limite / Tensão de corte

Mos como,

$$K_{m\ddot{o}i} = h\nu - W_0$$

Então,

$$eV_0 = h\nu - W_0$$

Logo,

$$W_0 = -eV_0 + h\nu$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} / \text{s}$$

Agora, calcularemos a função trabalho p/ cada frequência de onda e tiraremos uma média, sendo esta média será referência para sabermos qual é o material.

$$\bar{W}_0 = (2,70 \pm 0,34) \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\bar{W}_0 = (1,68 \pm 0,21) \text{ eV}$$

Este valor é relativamente baixo para ser um metal. Logo, podemos pensar que o material que compõe a superfície observada do fototubo é uma junção de um metal com um semicondutor.

A maioria dos fototubos são compostos por superfícies de cádio, rubídio, potássio ou césio, as qual estes semicondutores são combinados com bismuto ou óxido de prata. Agora, estes tipos de superfícies tem um valor menor de função trabalho, portanto, julgamos que a superfície do fototubo deste experimento é de alguma dessas substâncias.

30 -	LEDs	Potencial Limite (V)	Filtros	Potencial Limite (V)
	Vermelho	0,35	Branco/Filtro Amarelo	0,66
	Laranja	0,47	Branco/Filtro Laranja	0,70
	Verde	0,76	Branco/Filtro Verde	0,72
	Violeta	0,86	Branco/Filtro Azul	0,90
	Azul	0,88	Branco/ Sem Filtro	0,91
			Branco/Filtro Magenta	0,91
			Branco/Filtro Branco	0,94

-> Note-se que quanto menor o  $\lambda$ , maior será a tensão de corte, o que é o esperado. Portanto, as ondas que possuem uma maior frequência, possuem uma energia maior e, conseqüentemente, um potencial de corte maior.

11 - Tendo uma fonte com mais de um pico de emissão, o pico/comprimimento de onda que deve ser utilizado nos cálculos é o pico de maior intensidade.

Logo, para um experimento mais preciso e exato é necessário o uso de luzes monocromáticas, pois diminuem as imprecisões que uma fonte com uma banda grande de  $\lambda$  comete.

Conclusão:

A partir dos resultados obtidos, e comparando-os com os valores teóricos para cada variável, concluímos que o método não é suficientemente exato e preciso. Assim, para uma maior exatidão e precisão do experimento é necessário realizá-lo com fontes mais próximas possíveis de uma fonte monocromática.

Entretanto, para o objetivo de entender o que representa o efeito fotoelétrico na prática, o método empregado é satisfatório. Portanto, o objetivo de compreender o efeito fotoelétrico foi atingido, porém, calcular as constantes foi atingido em partes, necessitando, assim, em realizar o experimento com outros tipos de fontes para adquirir resultados mais precisos e exatos.

Referência:

- Eisenberg e Resnick - "Física Quântica"
- Material disponibilizado pela docente
- Tipler - "Modern Physics"
- Números Educados
- Imps Escola

Apêndice A (Outra explicação)

→ Em relação a explicação de porque o filtro vermelho não possui sinal:

A luz branca emitida pelo LED, possui uma faixa pequena no  $\lambda$  do vermelho e, além disso, o filtro vermelho filtra uma banda ampla de  $\lambda$ , deixando a maior parte das ondas com  $\lambda$  perto do infr-

vermelho, ou seja, ~~as ondas com energia baixa~~ ou a baixa energia do onda não é capaz de realizar o efeito fotoelétrico