

Efeito Fotoelétrico e a Determinação da Constante de Planck

(Photoelectric Effect and the Determination of Planck's Constant)

Gabriel Tolardo Colombo¹, Giovanna Maria Oliveira Nogueira²,
Vitor Hugo Ferrari Ribeiro³

¹ Estudante do terceiro ano da graduação em licenciatura plena em Física pela Universidade Estadual de Maringá;

² Estudante do terceiro ano da graduação do bacharelado em Física pela Universidade Estadual de Maringá;

³ Estudante do terceiro ano da graduação do bacharelado e licenciatura em Física pela Universidade Estadual de Maringá.

Grupo de Laboratório de Física, Universidade Estadual de Maringá, Paraná, PR, Brasil
Laboratório de Física Moderna

Data de Entrega: 12/11/2021

1. Introdução

O efeito fotoelétrico foi descoberto em 1886 pelo físico alemão Heinrich Hertz (1857-1894), durante seus experimentos relacionados à produção e captação de ondas eletromagnéticas. Na ocasião, Hertz percebeu que a incidência da luz ultravioleta em chapas metálicas, dava início a produção de uma série de faíscas. A explicação teórica para o efeito fotoelétrico, entretanto, só foi apresentada pelo físico alemão Albert Einstein, em 1905, que por sua vez, ganhou o prêmio Nobel de física em 1921 por descrever tal fenômeno.

Para explicar o efeito fotoelétrico, Albert Einstein se apropriou dos trabalhos de Max Planck (laureado com o Nobel de física de 1918 pela descoberta da energia quântica) que afirmava que a radiação térmica é quantizada, isto é, apresenta valores de energia discretos. Segundo esse ponto de vista, a luz é formada por pequenos pacotes de energia, que mais tarde foram batizados como fótons. Einstein assumiu que a hipótese de Planck fosse válida para todo tipo de radiação eletromagnética, desse modo, demonstrou que luz podia se comportar como onda e como partícula.

2. Fundamentação Teórica

O efeito fotoelétrico é um fenômeno de origem quântica que descreve o comportamento de certos materiais, geralmente metálicos, que quando exposto a uma radiação eletromagnética de frequência suficientemente alta, como a luz por exemplo, arranca elétrons (fotoelétrons) de sua camada de valência, dando origem a uma corrente elétrica; ou em outras palavras e de forma geral, a luz que incide sobre uma placa metálica é capaz de gerar uma corrente elétrica. Sendo assim, é possível alimentar circuitos elétricos e eletrônicos com a energia gerada por essas placas ^[1].

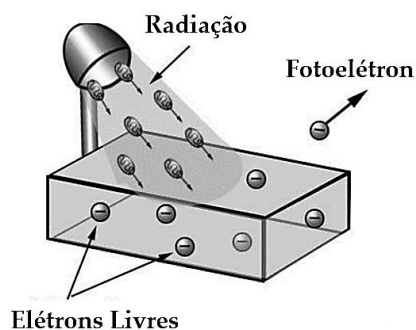


Figura 1 – Representação esquemática de como acontece o efeito fotoelétrico

Adiante, tem-se a constante de Planck, representada pela letra h , ela foi introduzida na física pelo físico alemão Max Planck (1858-1947) no ano de 1900. Ela surgiu na hipótese de solucionar um efeito conhecido na época como "catástrofe do ultravioleta", para isso, Planck assumiu que a energia das ondas eletromagnéticas emitidas pelo corpo negro deveria ser quantizada, isto é, deveria apresentar valores mínimos, como pequenos "pacotes" ou *quanta* de energia.

Com base em resultados experimentais disponíveis na época – medidas da densidade de energia eletromagnética emitida por corpos negros – Planck determinou que cada "pacote" de energia emitida por um corpo negro deveria ser um múltiplo inteiro de um valor mínimo, igual a $6,63 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg/s}^{[2]}$.

- **Lei de Planck** – A lei de Planck diz respeito à energia que é reemitida por um corpo negro na condição de equilíbrio térmico. De acordo com essa lei, um corpo negro absorve a energia radiante que incide sobre ele, no entanto, essa energia só é reemitida em valores discretos, na forma de pequenos pacotes de energia. Atualmente esses pacotes de energia são chamados de fótons. A energia dos fótons reemitidos é determinada pela seguinte equação:

$$E_1 - E_2 = h f \quad (1)$$

Onde E_1 e E_2 são os níveis de energia, h é a constante de Planck e f é a frequência onda eletromagnética, que pode ser calculado através da seguinte equação:

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

A energia de cada fóton depende de sua frequência f , portanto, existe uma frequência mínima necessária para arrancar os elétrons do material. A energia mínima que cada fóton deve ter para promover o efeito fotoelétrico é chamada de função trabalho e pode ser calculada por meio da lei de Planck. A energia cinética que o elétron adquire após ser atingido por um fóton é determinada pela diferença da energia do fóton com a função trabalho ϕ :

$$E_{\text{elétron}} = h f - \phi \quad (3)$$

Onde ϕ é a função trabalho (energia que mantém o elétron dentro do material), vale lembrar que ela é uma característica de cada material e depende do quão ligados estão os elétrons no material ^[3].

O experimento que ressaltou o caráter quântico do efeito fotoelétrico é conhecido como experimento de Philipp Lenard, um dos assistentes de Heinrich Hertz. Lenard realizou uma série de experimentos e constatou que a intensidade da luz não afetava a energia com que os elétrons eram arrancados das placas metálicas, contradizendo a teoria vigente do eletromagnetismo, em 1903.

Os experimentos de Lenard eram feitos utilizando duas placas metálicas — uma placa emissora, que era iluminada por uma fonte de luz monocromática, e uma placa coletora, que tinha a função de absorver os elétrons que se "soltavam" da placa da emissora. A fim de detectar a absorção de elétrons pela placa coletora, ligava-se um amperímetro em série com as duas placas, além disso, existe uma variação do experimento em que uma fonte de alimentação é ligada às placas.

A função da fonte de alimentação é criar um campo elétrico entre as placas que pode acelerar ou frear os elétrons; ajustando-se à tensão elétrica, é possível determinar o valor da energia cinética de cada elétron ejetado.

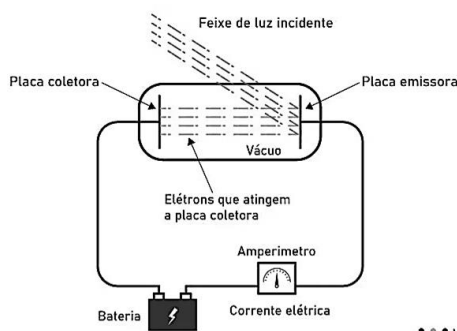


Figura 2 – Representação esquemática do experimento de Lenard

Pode-se verificar experimentalmente que ao inverter a polaridade dos terminais da fonte de alimentação nas placas, inverte-se a direção do vetor campo elétrico, dessa forma, o vetor força elétrica se

opõe ao campo, de modo que nessa configuração do sistema tem-se a desaceleração dos elétrons, provocando assim uma diminuição na corrente elétrica medida pelo amperímetro; quando a corrente fotoelétrica chega ao nível zero a tensão aplicada aos terminais chega no ponto de saturação (tensão de saturação), de modo que a energia cinética máxima atingida pelos elétrons é dado pela seguinte equação:

$$k_{\text{máx}} = \frac{1}{2} m v^2 = e V_0 \quad (4)$$

Onde V_0 é a tensão de saturação e e é a carga elementar.

Assim, os elétrons não conseguem mais ir de uma placa a outra, logo, eles acabam retornando para o mesmo ponto de onde partiram.

3. Montagem Experimental

3.1. Materiais Utilizados

- Fonte de alimentação;
- Lâmpada de mercúrio;
- Amperímetro;
- Cabos;
- Espectroscópio;

3.2. Procedimento Experimental

Primeiramente, liga-se a fonte da lâmpada de mercúrio (ela precisa de um tempo para aquecer e estabilizar). Em seguida, adianta-se a montagem do equipamento e a calibração do amperímetro, por fim usa-se os cabos de prova para realizar a ligação na fonte.

Ligando a fonte, aplica-se uma tensão nos terminais do cátodo e do ânodo (cabo vermelho no terminal do ânodo e o cabo preto no terminal do cátodo). Insere-se o conector BNC no terminal do amperímetro, com a tampa fechada na posição zero da catraca. Com isso, nenhuma luz entra no fotodiodo, então deve-se desconectar o terminal positivo do cátodo. Ligando a tensão e o amperímetro com o aplicador de corrente, obtém-se algumas escalas [4].

Essas escalas são importantes para fazer a leitura da corrente. Para calibrar o amplificador de Corrente, deve-se apertar o botão calibrar na fonte e girar o *knob* do amperímetro até zerar. Feito isso aperta-se o botão de calibrar novamente, desativando-o, podendo portando, conectá-lo ao amperímetro.

A fonte de tensão continua zerada. Para configura as catracas do filtro e a da frente, usa-se um espectroscópio para identificar as linhas espectrais do *Hg* que são produzidas pelo vapor de mercúrio super aquecido dentro da lâmpada. Ao contrário de uma lâmpada comum, a lâmpada de mercúrio tem apenas 5 linhas espectrais, indicando que a mesma tem 5 comprimentos de onda.

Dessa forma, quando excitado por eletricidade (campo elétrico) o vapor de mercúrio tem o seu modo de vibração alterado, possibilitando algumas transições eletrônicas diferentes. À medida que os elétrons excitados decaem (voltando ao seu estado fundamental de mais baixa energia), emitem fótons de luz com comprimentos de onda específicos.

No caso do experimento de Lenard, envolvendo lâmpadas de mercúrio, observa-se cinco transições diferentes; entretanto, para observá-las através da grade de difração, deve-se abrir com cautela as franjas para que as raias espectrais não fiquem saturadas.

4. Resultados

4.1. Resultados Obtidos

Primeiramente, pode-se entender a relação entre a diferença de potencial aplicado entre os eletrodos com a corrente fotoelétrica de saturação, produzida pelos elétrons retirados dos eletrodos por meio da incidência da fonte luminosa. A fenda pela qual o feixe luminoso passa é de 2 mm , implicando em uma certa intensidade luminosa. Nesse caso, tem-se uma fonte luminosa cujo comprimento de onda é $\lambda = 436\text{ nm}$.

Os resultados obtidos experimentalmente estão mostrados na tabela 1.

DDP (V)	Corrente i (pA)
30	1992
26	1840
22	1662
18	1464
14	1290
10	1045
06	740
02	156

Tabela 1 – Relação entre a DDP e a corrente para $\lambda = 436\text{ nm}$ e fenda de 2 mm

Em seguida, pode-se aumentar o tamanho da fenda pela qual passa o feixe luminoso. Com isso, um maior quantidade de fótons provenientes da luz atingem o eletrodo, isso implica em uma intensidade luminosa maior. Mantendo constante o comprimento de onda do feixe luminoso, mas aumentando a fenda para 4mm, os dados obtidos relacionando a diferença de potencial com a corrente elétrica podem ser mostrados na tabela 2.

DDP (V)	Corrente i (pA)
30	7310
26	6620
22	6070
18	5360
14	4320
10	3230
06	1610
02	220

Tabela 2 – Relação entre a DDP e a corrente para $\lambda = 436\text{ nm}$ e fenda de 4 mm

Além disso, percebe-se experimentalmente uma relação entre a tensão de corte e o comprimento de onda da fonte incidente. Para uma fenda cuja abertura é 4 mm, a relação entre os comprimentos de onda e o potencial de corte obtidos experimentalmente podem ser expostos na tabela 3.

Comprimento de Onda λ (mm)	Tensão de Corte (V)
315	-1,235
405	-0,923
436	-0,664
546	-0,132
547	-0,018

Tabela 3 – Relação entre o comprimento de onda e a tensão de corte

4.2 Análise dos Resultados

Com os valores obtidos nas tabelas 1 e 2, pode-se construir um gráfico para visualizar a relação entre as correntes fotoelétricas de saturação e a diferença de potencial aplicadas nos eletrodos. Ao irradiar uma fonte luminosa de 436 nm no ânodo, a energia da fonte luminosa retira os elétrons da camada de valência do material que compõe o ânodo, fazendo-os migrar para o cátodo.

A diferença de potencial da fonte gera um campo elétrico entre os eletrodos, de modo a acelerar a movimentação dos elétrons do ânodo para o cátodo. Em outras palavras, ao aumentar ou diminuir a diferença de potencial entre os eletrodos, é natural de se pensar que a corrente fotoelétrica de saturação reaja de forma semelhante, conforme pode-se observar no gráfico 1.

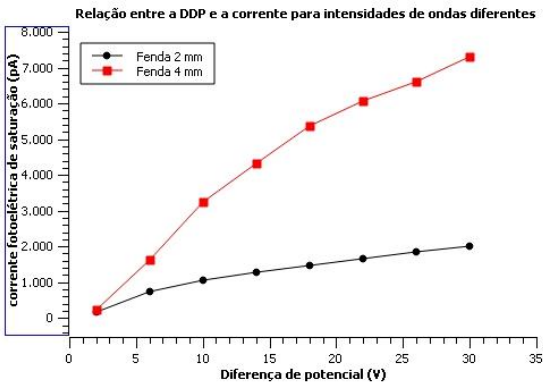


Figura 3 – Valores de corrente obtidos em função da diferença de potencial

Ademais, ao aumentar a intensidade da onda, é possível perceber que, mais elétrons são retirados, desde que os eletrodos estejam submetidos a uma diferença de potencial elevada.

Para baixas diferenças de potencial, é possível perceber pelo gráfico 1 que, embora as luzes tenha intensidades diferentes, a corrente fotoelétrica de saturação resultante converge para um mesmo valor. Isso permite concluir que a intensidade da fonte luminosa não tem relação com a retirada de elétrons do ânodo. A diferença dos valores das correntes observadas se devem a diferença de potencial a qual as placas estavam submetidas.

Por fim, pode-se utilizar os dados da tabela 3 e, através da equação 2, pode-se construir uma tabela 4 expondo a relação entre a frequência calculada (utilizando os comprimentos de onda provenientes da tabela 3) para cada comprimento de onda da fonte luminosa, e a tensão de corte. Assim, tem-se a tabela 4.

Frequência f (Hz)	DDP (V)
$8,2 \times 10^{14}$	-1,235
$7,4 \times 10^{14}$	-0,923
$6,9 \times 10^{14}$	-0,664
$5,5 \times 10^{14}$	-0,132
$5,2 \times 10^{14}$	-0,018

Tabela 4 – Relação entre a diferença de potencial e a frequência

Na tabela 4, os valores das diferenças de potencial são negativos, pelo fato de se ter invertido os polos positivos e negativos da fonte de bancada. Nesse caso, os polos dos eletrodos também serão invertidos: o cátodo se torna o ânodo e vice-versa. Nesse contexto, o campo elétrico que surge tem sentido contrário, de modo que agora, a força elétrica que surge passa a "frear" o movimento dos elétrons.

A medida que se vai aumentando a diferença de potencial, em módulo, a força elétrica que age no sentido de frear os elétrons tende a ficar maior, até o momento que eles, ao serem retirados da placa pela incidência do feixe luminoso, não conseguirão atingir a placa contrária. A tensão associada a este fenômeno é a tensão de corte. A partir da equação 3, tem-se:

$$e V_0 = h f - \phi \Rightarrow V_0 = \frac{h}{e} f - \frac{\phi}{e} \quad (5)$$

A equação 5, é a equação de uma reta, pois o potencial de corte muda linearmente com a frequência. Assim, pode-se estabelecer construir o gráfico 2 para verificar geometricamente essa reta.

Além disso, toma-se o módulo do potencial de corte, tendo em vista que o sinal negativo indica apenas a orientação do campo elétrico por ele produzido.

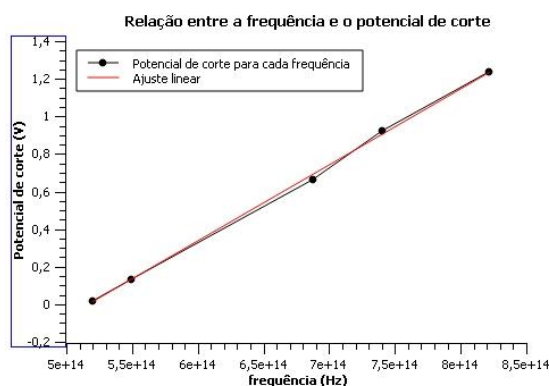


Figura 4 – Valores do potencial de corte obtidos em função da frequência

Da equação 5, o termo que acompanha a variável f , é o coeficiente angular, obtido geometricamente através da tangente do ângulo que a reta forma com o eixo x . Isso nos permite escrever a equação 5 como sendo:

$$V_0 = \tan \theta f - \frac{\phi}{e}$$

Com:

$$\tan \theta = \frac{h}{e} \quad (6)$$

Do gráfico 2 ajustado, tem-se que a $\tan \theta = 4,04 \times 10^{-15}$. Da equação 6, tem-se:

$$\tan \theta = \frac{h}{e} \Rightarrow h = \tan \theta e \Rightarrow h = 6,46 \times 10^{-34} \text{ C}$$

Calculando o desvio percentual entre o valor obtido experimentalmente h_e com o valor teórico da constante de Planck $h_t = 6,64 \times 10^{-34}$, tem-se:

$$\Delta = \left| \frac{h_t - h_e}{h_t} \right| \times 100 = 2,71 \%$$

5. Conclusão

Numa análise mais rigorosa, percebe-se que alguns fatores não podem ser desprezados na conclusão final da análise dos dados. Alguns desses fatores são a qualidade do vídeo, o erro humano na imprecisão da medição dos dados e principalmente o fato das medidas serem extremamente minuciosas de modo que, qualquer flutuação cause drásticas alterações nos resultados. Inúmeros são os fatores que podem atuar como interferências no experimento, mesmo fazendo o máximo para evitá-los.

Todavia, os dados obtidos neste experimento não extraviaram as tolerâncias admitidas. A constante de Planck se aproximou muito do valor teórico considerado pela comunidade científica, razão pela qual o desvio percentual foi extremamente baixo mediante as medições que foram realizadas nas condições experimentais.

6. Referências Bibliográficas

- [1] EFEITO fotoelétrico: Radiação e matéria. Rio Grande do Sul: Ifufrgs, 2012. Disponível em: https://www.if.ufrgs.br/~betz/iq_XX_A/fotoElec/aFotoElecFrame.htm. Acesso em: 28 out. 2021.
- [2] TIPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph A.. **Física Moderna**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2019. 487p.
- [3] NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Ótica, Relatividade e Física Quântica**: curso de física básica. 2. ed. São Paulo: Bluncher, 2017. 359 p.
- [4] INSTRUCTION Manual and Experiment Guide for the PASCO scientific Model OS-8501: **Photoelectric Effect Apparatus**. Roseville, Ca: Pasco, 1987. 28 p.