

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CAMPUS TIMÓTEO**

André Neves e Leonam Teixeira de Vasconcelos

EFEITO FOTOELÉTRICO

Timóteo

2018

André Neves e Leonam Teixeira de Vasconcelos

EFEITO FOTOELÉTRICO

Este trabalho consiste em uma breve abordagem ao efeito fotoelétrico, que possui uma gama abundante de aplicações na física e nas engenharias. O estudo de tal fenômeno é de grande importância para a física moderna e teve início no século XIX.

Timóteo

2018

Resumo

A dualidade onda-partícula da luz fez com que grandes mentes da ciência investisse todo o esforço para tentar entender e explicar o comportamento das ondas eletromagnéticas durante meados do século XIX e XX. Um dos fenômenos descobertos e explicado nesse meio tempo, foi o efeito fotoelétrico, que além de ter sido utilizado para validar várias teorias modernas, que contradiziam a teoria ondulatória clássica como as leis de Maxwell, sendo o principal foco dos Nobéis de Albert Einstein, em 1905, e Robert Millikan, em 1923, atualmente possui várias aplicações práticas, na ciência e na indústria, como na fabricação de câmeras fotográficas e sensores industriais de alta precisão.

Palavras-chave: efeito fotoelétrico, fotoelétrons, corrente fotoelétrica, fóton.

Abstract

The wave-particle duality of the light have put great minds of the science to invest all of their effort at trying to understand and figuring out how to explain the behavior of electromagnetic waves in the 19th and 20th centuries. One of the discovered and described phenomena in that period of time, was the Photoelectric effect, that has been used to validate several modern physics theories, that contradict the classical waves theory, the Maxwell's laws of electromagnetism for example, being the main focus in the Nobel Prizes of Albert Einstein, in 1905, and Robert Millikan, in 1923, and also has a whole bunch of practical applications nowadays in either scientific or industrial environment. Photographic cameras fabrication and industrial sensor of high precision are a couple examples.

Keywords: photoelectric effect, photoelectron, photoelectric current, photon.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Equipamento utilizado para fazer estudos sobre o efeito fotoelétrico. Fonte: Javier M. G. Duarte (MIT).	8
Figura 2 – Gráfico de tensão por corrente obtidos de um circuito como o da Fig (1). O eixo das abscissas representa a DDP ajustada manualmente no circuito. Fonte: Elaborado pelos autores.	8
Figura 3 – Gráfico de potencial limite no sódio por frequência. Gráfico que representa um dos experimentos de Millikan. Fonte: Eisberg e Resnick	11
Figura 4 – Esquema representando o experimento. Fonte: Javier M. G. Duarte (MIT).	12
Figura 5 – Gráfico de tensão por corrente em um LED. Fonte: Elaborado pelos autores.	13
Figura 6 – Par emissor-sensor paralelos. Fonte: Photoelectric Sensors Theory of Operation (Softnoze)	15
Figura 7 – Par emissor-sensor acoplados. Fonte: Photoelectric Sensors Theory of Operation (Softnoze)	15

Sumário

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	Contextualização histórica	6
1.1.1	Teoria eletromagnética de Maxwell	6
1.1.2	Experimentos de Heinrich Hertz	6
1.1.3	Experimento de Joseph John Thomson	7
1.1.4	Experimento de Philipp von Lenard	7
1.1.5	A contribuição de Planck	7
1.1.6	A teoria de Albert Einstein	7
1.2	Fundamentação teórica	7
2	EXPERIMENTOS	12
2.1	A constante de Planck	12
2.1.1	Experimento para determinar o valor da constante de Planck - método I	12
2.1.2	Experimento para determinar o valor da constante de Planck - método II	13
3	APLICAÇÕES	14
3.1	Fotodiodos	14
3.2	Câmeras fotográficas digitais	14
3.3	Detecção de presença de objetos	14
4	CONCLUSÃO	16
	REFERÊNCIAS	17

1 Introdução

1.1 Contextualização histórica

O efeito fotoelétrico foi formalizado por Einstein, que publicou seu artigo com o tema em 1905. O estado da arte no tocante aos conhecimentos sobre eletromagnetismo, aceitos na época, é um ponto importante no estudo para compreensão do efeito fotoelétrico.

1.1.1 Teoria eletromagnética de Maxwell

James Clerk Maxwell foi um físico de grande importância para o desenvolvimento do eletromagnetismo, que publicou 1860 sua teoria sobre o tema, quando procurava entender porque a eletricidade e magnetismo eram fenômenos relacionados, como foi provado por Oersted, Ampère e Faraday, entre outros, em seus trabalhos (TIPLER; MOSCA; GALLAS, 2009; MICHELSON, 1903; LUIS, 2012).

Suas formulações matemáticas permitiram mostrar que existem ondas eletromagnéticas capaz de viajar no espaço com a velocidade da luz ($3 \cdot 10^8 m/s$). Seu trabalho motivou, 20 anos depois, os experimentos de Heinrich Hertz, que confirmaram a existência de ondas eletromagnéticas e a validade de suas equações. (TIPLER; MOSCA; GALLAS, 2009; MICHELSON, 1903; LUIS, 2012).

A síntese de Maxwell parecia levar a física ao seu ápice de descobertas, assim como foi afirmado por William Thompson (Lord Kelvin, 1824-1907) e Albert Michelson (TIPLER; MOSCA; GALLAS, 2009; MICHELSON, 1903).

1.1.2 Experimentos de Heinrich Hertz

Hertz foi o primeiro físico a observar o fenômeno foto elétrico, que até então não era conhecido. Isso aconteceu na década de 1880, quando o cientista realizou experimentos para comprovar os aspectos da Teoria de Maxwell sobre ondas eletromagnéticas (DUARTE, 2008; KLASSEN, 2011).

Hertz observou durante seus experimentos de *Spark gap*, que uma faísca gerada pela mesma diferença de potencial atravessava o *gap* quando o experimento estava exposto à luz e não atravessava quando o experimento era realizado em uma sala escura (HILL, 2002).

Hertz ainda notou que a faísca era menor caso a luz passasse por uma lâmina de vidro antes de atingir o circuito em comparação com a luz emitida através de uma lâmina de quartzo, material que por sua vez não bloqueia tanta radiação Ultravioleta quanto o vidro (HILL, 2002).

Com isso, foi percebido que uma superfície metálica carregada negativamente, ao sofrer incidência de luz ultravioleta, emite eletricidade a um eletrodo coletor. Embora não foi o foco de seus estudos no momento, o registro deixado sobre a observação de Hertz contribuiu para que Einstein formulasse em 1905 (KLASSEN, 2011; BARROS; SOARES, 2016).

1.1.3 Experimento de Joseph John Thomson

Em 1899, Joseph John Thomson realizou um experimento envolvendo raios catódicos que também teve sua contribuição para a análise do efeito fotoelétrico. Elétrons eram ejetados do catodo por meio de ação da radiação ultravioleta (HILL, 2002).

1.1.4 Experimento de Philipp von Lenard

Em 1902, o físico alemão Philipp von Lenard realizou algumas observações, que contradiziam e desafiavam o conhecimento existente sobre radiação eletromagnética.

Um espanto surgiu ao verificar que a energia cinética de elétrons emitidos era independente da intensidade da luz, isso porque pela teoria clássica do eletromagnetismo, maior intensidade de luz implicaria em campo elétrico mais intenso, o que resultaria em maior energia cinética dos elétrons. Além disso, Lenard concluiu que existe um potencial mínimo V_0 , abaixo do qual nenhum elétron atinge o coletor (HILL, 2002).

O experimento de Lenard possuía um aparato semelhante ao de Thomsom. Peculiaridades da experiência eram:

- A placa coletora foi carregada negativamente, a ponto de repelir os elétrons que foram "ejetados" pela placa emissora.
- Os elétrons ejetados deveriam possuir energia cinética suficiente para vencer o potencial retardador e produzir uma corrente elétrica.

1.1.5 A contribuição de Planck

Um ano antes, Max Planck propôs uma equação para explicar a natureza quantizada da luz durante seus experimentos de corpo-negro. Esse feito foi apenas por uma necessidade matemática, pois na verdade Planck não acreditava que a luz poderia se comportar como partícula (HILL, 2002).

1.1.6 A teoria de Albert Einstein

Em 1905, em um artigo que lhe rendeu um Nobel de física, Albert Einstein tomou a interpretação de Planck ($E = hf$) e deu continuidade ao estudo do caráter discreto da luz (EINSTEIN, 1905).

Einstein concluiu que, se a luz pode apenas transportar quantidades discretas de energia, talvez a luz seja composta por pacotes de energias quantizáveis: **Fótons** (HILL, 2002).

1.2 Fundamentação teórica

A figura (1) contém o diagrama do circuito que foi utilizado para estudar o efeito fotoelétrico. A luz penetra uma câmara fechada a vácuo e incide sobre o anodo que está separado do catodo, entre os quais existe uma diferença de potencial V que pode ser variada e seu sentido invertido, como recursos experimentais. O amperímetro e o Voltímetro podem ser utilizados para mensurar os valores obtidos.

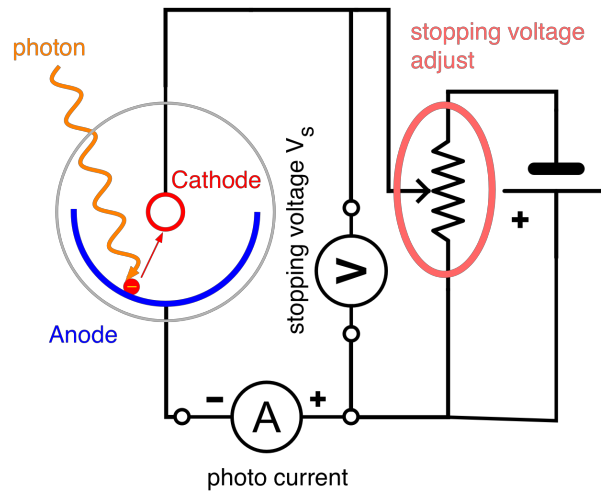


Figura 1 – Equipamento utilizado para fazer estudos sobre o efeito fotoelétrico. Fonte: Javier M. G. Duarte (MIT).

Ao plotarmos o gráfico de tensão por corrente dos valores medidos no amperímetro da Fig. (1) obteríamos uma curva crescente que se estabiliza (ou se satura) caso V seja muito grande. Observamos abaixo um gráfico contendo duas curvas:

- Curva a: Representa o gráfico de tensão por corrente obtidos por um feixe de luz de intensidade I_a incidindo sobre o anodo;
- Curva b: Representa o gráfico de tensão por corrente obtidos por um feixe de luz de intensidade I_b incidindo sobre o anodo;

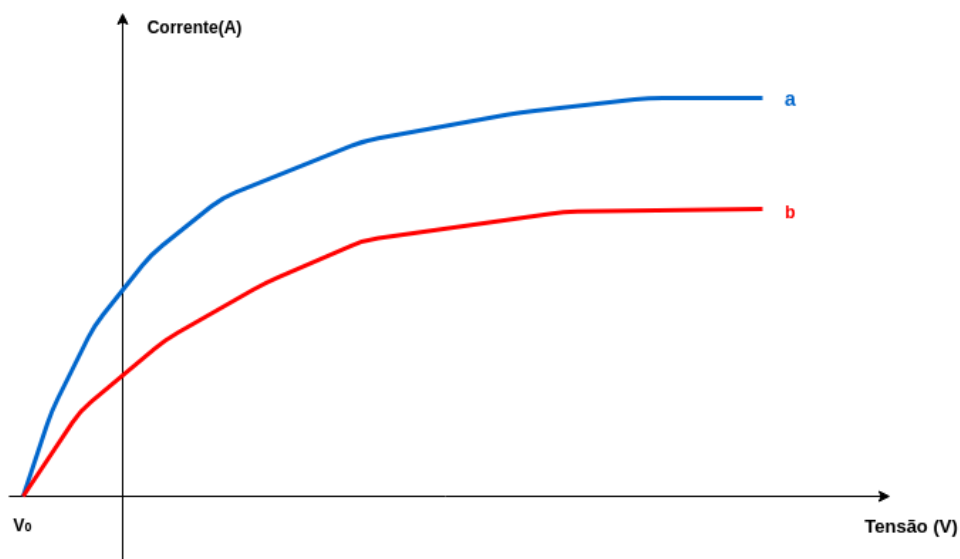


Figura 2 – Gráfico de tensão por corrente obtidos de um circuito como o da Fig (1). O eixo das abscissas representa a DDP ajustada manualmente no circuito. Fonte: Elaborado pelos autores.

Com o ajuste da tensão aplicada de forma de o campo elétrico esteja em sentido contrário, é possível determinar a diferença de potencial V_0 necessária para eliminar a energia cinética dos elétrons -também chamado de potencial limite- de forma que a corrente elétrica seja nula. A energia de potencial elétrico corresponde à energia cinética máxima que pode ser obtida pelos elétrons, calculada pela equação 1.1

$$K_{max} = e \cdot V_0 \quad (1.1)$$

Com " K_{max} " sendo a energia cinética do elétron mais rápido ejetado (tendo como unidade o Joule, $[J]$), " e " a carga elementar de um elétron (de unidade Coulomb, $[C]$) e " V_0 " o potencial de corte (em Volts, $[V]$) (EISBERG; RESNICK, 1999).

A intensidade do feixe de luz que produziu a corrente plotada pela curva b é menor que a intensidade do feixe de luz que ocasionou a corrente da curva a ($I_b < I_a$). Nota-se que as correntes de saturação ($V \rightarrow \infty$) são diretamente proporcionais à intensidade da luz. Contudo, o potencial limite V_0 é independente dessa (EISBERG; RESNICK, 1999).

Algumas das características do efeito fotoelétrico que não podem ser explicadas pela teoria clássica estão citadas abaixo:

1. Segundo as equações de Maxwell a magnitude do vetor do campo elétrico de uma onda de luz é proporcional à raiz quadrada da intensidade da luz, e se a intensidade aumenta, a magnitude do campo elétrico aumenta e vice-versa. Como a força aplicada em um elétron é proporcional ao campo elétrico, é esperado que a energia cinética do mesmo seja também proporcional. Contudo, foi observado que a energia cinética do elétron não depende da intensidade da luz (DUARTE, 2008).
2. A teoria clássica das ondas diz que a emissão de elétrons devido à incidência de luz deve acontecer para ondas de luz de todas as frequências caso tal onda tenha intensidade suficiente para isso. Porém existe um comprimento máximo de onda inerente ao metal que caso ultrapassado, não haverá a emissão de elétrons da superfície (DUARTE, 2008).
3. De acordo com a teoria clássica, um elétron não iria ser emitido da superfície até que a energia transferida pela luz incidente fosse suficiente para a emissão, o que requer um intervalo de tempo para acontecer. Porém, experimentalmente notou-se que a emissão dos elétrons acontece após um intervalo muito curto de tempo após a chegada da radiação no metal (DUARTE, 2008).

Mais a frente, Albert Einstein apresentou uma nova teoria, colocando o efeito fotoelétrico como um fenômeno que pode ser utilizado para validação das teorias propostas até então. Diferentemente de Planck, que dizia que a energia eletromagnética se propagava como ondas se propagam na água, Einstein propôs que a energia da radiação era transmitida em pacotes (termo utilizado para se referir à quantidades quantizáveis) de energia, conhecidos como **fótons** (EISBERG; RESNICK, 1999).

Einstein utilizou como argumento o fato de que a maioria das experiências conhecidas da área haviam sido realizadas com números grandes de fótons e em consequência, os resultados obtidos pelas mesmas não passavam de uma média dos comportamentos reais (EISBERG; RESNICK, 1999).

Em seus cálculos, Einstein focou no caráter corpuscular com o qual a luz é emitida e/ou absorvida observando que as quantidades de luz emitidas por uma fonte, eram emitidas de formas discretas, e a energia contida nesses pacotes discretos era dada pela equação:

$$E = hf \quad (1.2)$$

Com h sendo a constante de Planck ($[J \cdot s]$) e f a frequência ($[Hz]$), essa equação é conhecida como equação de *Einstein-Planck*. Quando um elétron é emitido da superfície de dado material, sua energia cinética é:

$$K = hf - w \quad (1.3)$$

Onde w é o trabalho necessário para remover elétrons de tal material. A função trabalho do material é uma combinação complexa da energia requerida para excitação ótica de um elétron em uma banda de valência para a banda de condução e a energia tomada para difusão do elétron excitado pela radiação através do sólido (DUARTE, 2008). A função trabalho foi também um argumento utilizado por Albert Einstein para explicar o problema (2) citado anteriormente. Como alguns elétrons possuem ligações mais fracas com outros elétrons e outros possuem ligações mais fortes, os elétrons de ligação mais fraca tendem a sair com uma maior energia cinética, esta, dada por:

$$K_{max} = hf - w_0 \quad (1.4)$$

onde w_0 , chamada de *função de trabalho*, é a energia mínima necessária para um elétron atravessar a superfície do metal.

A equação 1.4 fortalece o argumento a favor de três pontos que a princípio seriam brechas que permitem a continuação da clássica interpretação ondulatória do efeito fotoelétrico:

1. **K_{max} não depende da intensidade da iluminação:** Pela figura 2, um feixe de luz de intensidade maior também provocará corrente elétrica mais intensa. Isso pode ser justificado pela teoria do fóton. Dobro de intensidade de luz significa dobro do número de fótons, e portanto duplica a corrente fotoelétrica. É importante ressaltar que não há alteração na energia $E = hf$ de cada fóton, de acordo com 1.2 (EISBERG; RESNICK, 1999).
2. **A existência de um limiar de frequências:** Segundo o gráfico na figura 3, existe uma frequência limite (f_0) a qual resulta em um potencial limite igual a zero ($V_0 = 0$), e com isso, $K_{max} = 0$. Isso pode ser comprovado pela equação 1.1. Ao tomar $K_{max} = 0$, temos $hf_0 = w_0$, o que mostra que um fóton de frequência f_0 terá energia suficiente apenas para ejetar um elétron da superfície metálica, sem nenhuma sobra para energia cinética. Isso mostra que se $f < f_0$, não haverá energia suficiente para ejetar elétrons, o que anula o efeito fotoelétrico (EISBERG; RESNICK, 1999).
3. **A ausência do retardamento:** Como a luz incide em pacotes discretos, não há tempo de atraso para absorção de um fóton, mas é absorvido assim que atinge o material (EISBERG; RESNICK, 1999).

Ao relacionar as equações 1.1 e 1.4, obtém-se:

$$V_0 = \frac{hf}{e} - \frac{w_0}{e} \quad (1.5)$$

A figura 3 ilustra a relação linear entre frequência e potencial limite, dada pela equação 1.5.

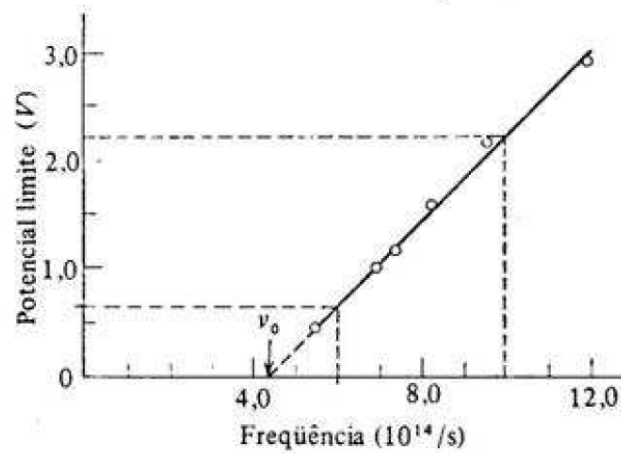


Figura 3 – Gráfico de potencial limite no sódio por frequência. Gráfico que representa um dos experimentos de Millikan. Fonte: Eisberg e Resnick

2 Experimentos

2.1 A constante de Planck

2.1.1 Experimento para determinar o valor da constante de Planck - método I

Observe a imagem a seguir:

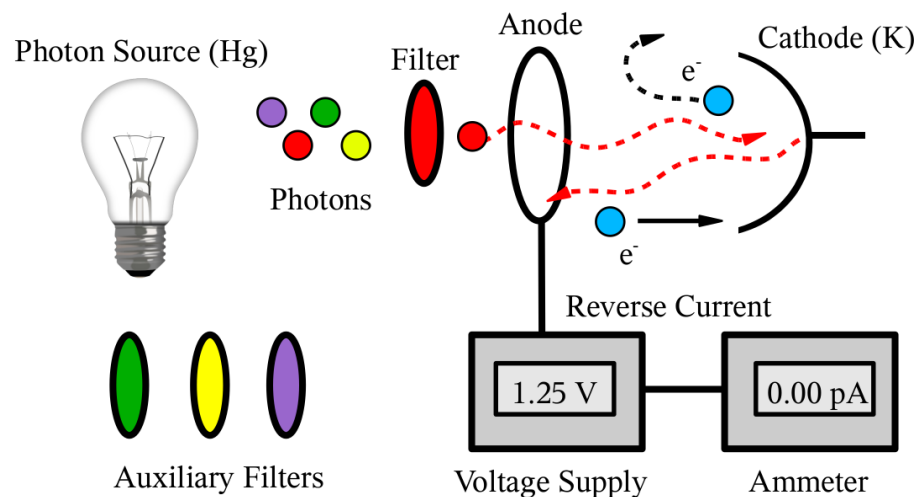


Figura 4 – Esquema representando o experimento. Fonte: Javier M. G. Duarte (MIT).

A figura (4) apresenta um esquema que nos permite recolher alguns dados para analisar o efeito fotoelétrico. Primeiro, uma lâmpada de mercúrio de alta-potência é ligada, emitindo luz em todas as direções. Com um filtro *passa-banda* (filtro utilizado para permitir a passagem de apenas uma faixa do espectro emitido), a luz da fonte é separada em um feixe e direcionada para um anel anodo até finalmente incidir sobre um catodo revestido com Potássio, que funciona como uma superfície fotoemissora.

Uma fonte de tensão é utilizada para manter uma diferença de potencial conhecida entre o anodo e o catodo, podendo inclusive interferir na trajetória dos elétrons ejetados. Caso os elétrons sejam emitidos, o circuito é fechado e com um amperímetro extremamente sensível podemos medir a corrente gerada.

Pelo controle da diferença de potencial e armazenamento o valor da corrente medida, podemos determinar a tensão necessária em sentido contrário para impedir os elétrons de atravessar a abertura, o que seria possível com o potencial fornecido pela emissão da luz. Esse valor de tensão corresponde à energia cinética máxima do elétron dividida pela carga elementar: $V_0 = K_{max}/e$. Com a utilização de vários filtros diferentes é possível recolher vários pontos de dados do tipo (f, V_0) com f a frequência da banda emitida após o filtro e V_0 a tensão de corte para essa frequência em específico, podemos verificar o caráter linear da relação entre energia de fótons emitidos e energia cinética máxima. Em conjunto com as equações citadas na introdução (1) podemos encontrar valores para a constante de Planck e para a função trabalho do material: É feita uma regressão linear da equação 1.5 ($V_0 = \frac{hf}{e} - \frac{w_0}{e}$),

onde o coeficiente angular corresponde à $\frac{h}{e}$ e o coeficiente linear, à $\frac{w_0}{e}$ (DUARTE, 2008).

2.1.2 Experimento para determinar o valor da constante de Planck - método II

LED's (Diodos Emissores de Luz) são semicondutores que quando polarizados diretamente e ligados a uma diferença de potencial com valor acima de uma tensão limite, conduzem corrente elétrica, e em consequência emitem ondas eletromagnéticas dentro da faixa visível do espectro (CHECCHETTI; FANTINI, 2015).

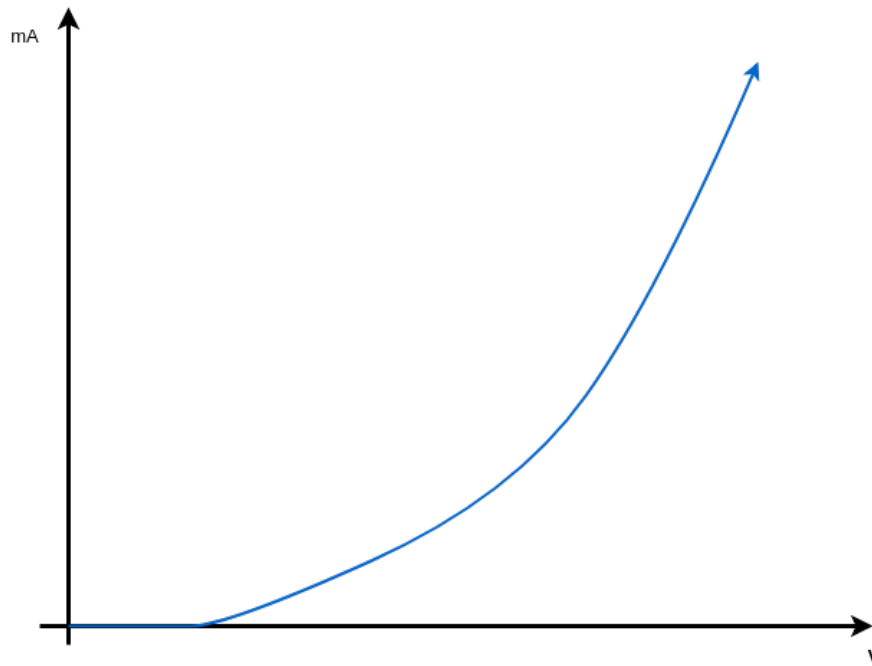


Figura 5 – Gráfico de tensão por corrente em um LED. Fonte: Elaborado pelos autores.

Variando o valor dessa tensão aplicada ao semicondutor e fazendo medições de corrente para cada uma dessas variações, podemos recolher vários pontos de dados do tipo (i, V) com i sendo a intensidade da corrente elétrica em Ampéres $[A]$ e V sendo a diferença de potencial aplicada ao LED em $[V]$. Com estes dados em mãos podemos fazer uma regressão linear para achar o valor da tensão limite a partir da qual o LED passa a conduzir corrente elétrica. Com essa informação podemos utilizar as equações da introdução (1) juntamente com o valor da carga elementar, para aproximar o valor da constante de Planck (CHECCHETTI; FANTINI, 2015).

3 Aplicações

O efeito fotoelétrico está presente em diversas situações e aplicações científicas, industriais e cotidianas, as quais uma corrente elétrica é gerada em consequência de absorção de radiação eletromagnética de comprimento de onda curto (em consequência, frequência alta). Dentre essas possibilidades, estão:

- Aparelhos que trazem conforto humano, como controle remoto, alarme com sensor de presença, câmera fotográfica digital e portas automáticas de *shoppings*.
- Aplicações industriais, como contagens de objetos que passam por uma esteira rolante, detecção de chegada de objeto em estágio de produção e verificação de fim de bobina de papeis.
- Aplicações científicas, como espectrometria baseada em raios-x, com fins de análise química e estrutural de materiais (KOVÉR, 2010).

A seguir, serão detalhadas algumas das possíveis aplicações do efeito fotoelétrico.

3.1 Fotodiodos

Fotodiodos é uma aplicação genérica do efeito fotoelétrico, que é usado em circuitos elétricos para medir a intensidade de luz incidente (FRIEDMAN; KESSLER, 2007). Com a utilização desse dispositivo, é possível desenvolver diversos aparelhos de grande utilidade.

3.2 Câmeras fotográficas digitais

Câmeras fotográficas digitais funcionam com base no efeito fotoelétrico. Os dispositivos contêm uma matriz de pequenos metais que transmitem eletricidade quando iluminados. Com isso, a placa controladora registra a corrente elétrica de cada uma das células, o que permite a interpretação como imagem digital. A retina dos olhos biológicos possuem comportamento parecido, também baseado no efeito fotoelétrico (FRIEDMAN; KESSLER, 2007).

3.3 Detecção de presença de objetos

Com a utilização de fotodiodos, a presença de objetos pode ser detectada de duas formas:

- **Utilização de pares de emissor-sensor paralelos fotoelétrico:** Quando há presença de um objeto entre os dois dispositivos, o sensor deixa de receber a luz incidente, e com isso, a corrente anula-se (SOFTNOZE, 2018). A montagem é representada pela figura 6.
- **Utilização de pares de emissor-sensor retrorreflexivos:** Nesse tipo de dispositivo, o emissor e o sensor estão acomodados na mesma unidade. É possível detectar presença de objetos que refletem a luz para o sensor, conforme a figura 7 anula-se (SOFTNOZE, 2018).

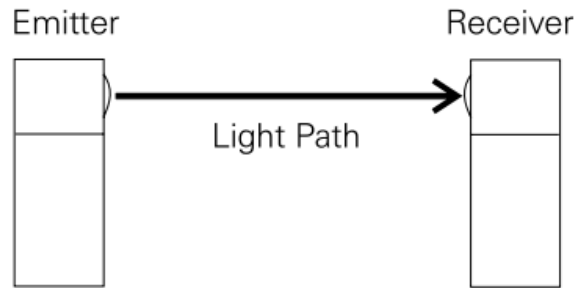


Figura 6 – Par emissor-sensor paralelos. Fonte: Photoelectric Sensors Theory of Operation (Softnoze)

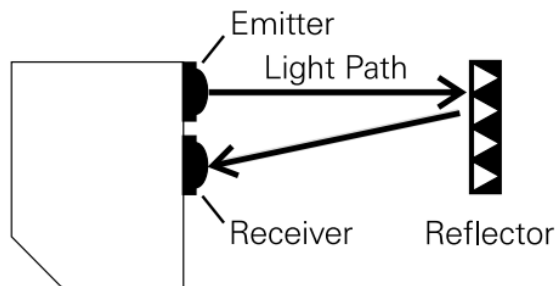


Figura 7 – Par emissor-sensor acoplados. Fonte: Photoelectric Sensors Theory of Operation (Softnoze)

Há também a possibilidade de tirar proveito da emissão de radiação infravermelha pelo corpo humano. Com isso, apenas um sensor que trabalhe bem nas devidas restrições de frequência e intensidade são necessários.

A utilização desses sensores permitem uma ampla variedade de aplicações, como portas automáticas de *shoppings*, controle remoto, contagem de objetos em linhas industriais, dentre outras. Um exemplo de uso de tais sensores em todas etapas de uma linha de produção pode ser visto no vídeo: <<https://www.youtube.com/watch?v=SffjC5dYvDI>>

4 Conclusão

O efeito fotoelétrico é um fenômeno que intrigou grandes mentes da ciência nos séculos XIX e XX. Tal fenômeno possui peculiaridades não explicáveis utilizando-se da teoria clássica e portanto sua confirmação fez com que vários teoremas pudessem ser confirmados, além de ter amplas aplicações na ciência e na indústria, podendo ser o principal mecanismo de funcionamento de câmeras fotográficas e sensores industriais de alta precisão.

Referências

- BARROS, M. A.; SOARES, J. M. S. Contribuições teóricas e abordagens históricas do efeito fotoelétrico. *Revista SUSTINERE*, 2016. Disponível em: <<https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/sustinere/article/download/26216/19516>>. Acesso em: 26 nov. 2018. Citado na página 6.
- CHECCHETTI, A.; FANTINI, A. Experimental determination of planck's constant using light emitting diodes (leds) and photoelectric effect. *World Journal of Chemical Education*, v. 3, n. 4, p. 87–92, 2015. ISSN 2375-1657. Disponível em: <<http://pubs.sciepub.com/wjce/3/4/2>>. Citado na página 13.
- DUARTE, J. M. G. The photoelectric effect: Determination of planck's constant. Massachusetts Institute of Technology, September 2008. Disponível em: <http://www.phys.ncku.edu.tw/~cctsai/teaching/10102/IntModernPhysics/Duarte_photoelectric.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2018. Citado nas páginas 6, 9, 10 e 13.
- EINSTEIN, A. Concerning an heuristic point of view toward the emission and transformation of light. March 1905. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/ed6e/cc78f52fc289d5aa87142aa1ba4ac36d99e6.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2018. Citado na página 7.
- EISBERG, R.; RESNICK, R. *FÍSICA QUÂNTICA - ÁTOMOS, MOLÉCULAS, SÓLIDOS, NÚCLEOS E PARTÍCULAS*. 13. ed. [S.l.]: Elsevier, 1999. 51–57 p. ISBN 8570013094. Citado nas páginas 9 e 10.
- FRIEDMAN, R. B.; KESSLER, R. The photoelectric effect its applications. 2007. Disponível em: <https://kicpoutreach.uchicago.edu/nsta/2007/pdf/nsta_2007-photoeleclab.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2018. Citado na página 14.
- HILL, I. G. The photoelectric effect. Dalhousie University, 2002. Disponível em: <<http://fizz.phys.dal.ca/~ihill/Phyc2150/Lab5-PhotoelectricEffect.pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2018. Citado nas páginas 6 e 7.
- KLASSEN, S. The photoelectric effect: Reconstructing the story for the physics classroom. *Science Education*, v. 20, p. 719–731, 07 2011. Citado na página 6.
- KOVÉR, L. X-ray photoelectron spectroscopy using hard x-rays. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, v. 178-179, p. 241 – 257, 2010. ISSN 0368-2048. Trends in X-ray Photoelectron Spectroscopy of solids (theory, techniques and applications). Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0368204809002746>>. Citado na página 14.
- LUIS, V. M. F. Relatório de estágio e aula investigacional sobre o efeito fotoelétrico. 2012. Disponível em: <<https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/2873/1/RelatórioEstágioEnsinoFQ.pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2018. Citado na página 6.
- MICHELSON, A. A. Light waves and their uses. University of Chicago Press, 1903. Disponível em: <<https://archive.org/details/lightwavestheiru00michrich/page/n11>>. Acesso em: 26 nov. 2018. Citado na página 6.
- SOFTNOZE. Photoelectric sensors: Theory of operation. September 2018. Disponível em: <<http://www.softnoze.com/downloads/SensorBasics4.pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2018. Citado na página 14.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G.; GALLAS, M. R. *FÍSICA PARA CIENTISTA E ENGENHEIROS: VOL. 3 FÍSICA MODERNA: MECÂNICA QUÂNTICA, RELATIVIDADE E A ESTRUTURA DA MATÉRIA*. 9. ed. [S.l.]: LTC, 2009. 2–6 p. ISBN 9788521617129. Citado na página 6.