

UMA CRÍTICA AO USO DE CIRCUITOS COM LDR COMO RECURSO DIDÁTICO EM AULAS SOBRE O EFEITO FOTOELÉTRICO

USE OF CIRCUITS WITH LDR AS A DIDACTIC RESOURCE IN LESSONS ON THE PHOTOELECTRIC EFFECT

GLÊNON DUTRA ^{*1}, THÁRCIO ADELINO CERQUEIRA ⁺², CLEITON NOVAIS DOS SANTOS ^{‡1}, HELENILDO DE JESUS SOUSA JUNIOR ^{§1}

¹Centro de Formação de Professores. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia.

²Instituto Federal do Rio Grande do Norte.

Resumo

Discute-se a utilização de circuitos com LDR (Light Dependent Resistor) em aulas sobre o efeito fotoelétrico. A partir de materiais sobre o assunto, reproduzimos um aparato composto por um circuito formado por um relé fotoelétrico e uma lâmpada associados em série. Investiga-se o princípio físico relacionado ao seu funcionamento, identificando se ele constitui um bom exemplo para o ensino do efeito fotoelétrico como feito no Ensino Médio. Verificou-se que esses circuitos funcionam com base no fenômeno da fotocondutividade, o qual, apesar de algumas semelhanças, distingue-se do efeito fotoelétrico da forma como este efeito é descrito nos materiais didáticos, podendo gerar alguma confusão de conceitos entre os estudantes.

Palavras-chave: Ensino de Física Moderna. Dificuldades conceituais. Efeito Fotoelétrico e Fotocondutividade.

*glenon@ufrb.edu.br

[†]tharcio.fisica@gmail.com

[‡]helenildojunior@aluno.ufrb.edu.br

[§]cleitonnoais23@gmail.com

Abstract

The use of circuits with LDR (Light Dependent Resistor) is discussed in classes on the photoelectric effect. Using materials on the subject, we reproduced an apparatus composed of a circuit formed by a photoelectric relay and a lamp associated in series. The physical principle related to its operation is investigated, identifying whether it constitutes a good example for teaching the photoelectric effect as done in high school. It was found that these circuits operate based on the phenomenon of photoconductivity, which, despite some similarities, is distinct from the photoelectric effect as it is described in educational materials, which may generate some confusion of concepts among students.

Keywords: Modern Physics Education. Conceptual difficulties. Photoelectric Effect and Photoconductivity.

I. INTRODUÇÃO

Durante uma aula de Instrumentação para o Ensino de Física em uma turma de Licenciatura do Centro de Formação de Professores da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, enquanto se debatia a respeito do uso de demonstrações experimentais em sala de aula, os estudantes apresentaram um vídeo (Tavares, 2022) em que um professor faz o uso de um LDR (Light Dependent Resistor) para demonstrar o Efeito Fotoelétrico. Após uma busca simples no Youtube e no Google encontramos outros vídeos (Ibidem) além de alguns trabalhos (Muniz *et al.*, 2018; Mendes Jr.; Stevan Jr., 2013; Freitas; Ferreira; Silva Filho, 2019; Valadares; Moreira, 1998) utilizando-se do mesmo circuito como recurso didático para o ensino deste fenômeno. O mesmo tipo de circuito é associado ao efeito fotoelétrico na questão 94, da prova azul do ENEM Digital 2020 (Brasil, 2020).

O vídeo levantou uma discussão sobre a adequação da utilização desse tipo de circuito como recurso auxiliar ao ensino do Efeito Fotoelétrico (EF). Inicialmente os estudantes concordaram com sua utilização e até montaram um circuito semelhante. Mas, a montagem do circuito levou a um questionamento importante que se tornou o objeto de estudo desse artigo:

O circuito com o LDR é um bom exemplo didático para o efeito fotoelétrico, tal como esse fenômeno é apresentado aos estudantes do Ensino Médio?

Para responder à questão, resolveu-se utilizar a seguinte abordagem:

1) Apresentar o Efeito Fotoelétrico tal como proposto em livros e materiais didáticos utilizados no Ensino Médio ou na Graduação.

2) Montar o circuito com LDR, como apresentado por Tavares (2022) e demais trabalhos de referência.

3) Investigar se o circuito é útil como exemplo do Efeito Fotoelétrico tal como proposto na etapa 1.

4) Explicar em que sentido o funcionamento do LDR se enquadra como Efeito Fotoelétrico.

II. O EFEITO FOTOELÉTRICO NO ENSINO BÁSICO

A necessidade da introdução de tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) no ensino de física vem sendo debatida no meio acadêmico desde os fins dos anos 1980 (Veit *et al.*, 1987; Terrazzan, 1992; Pinto; Zanetic, 1999; Ostermann; Moreira, 2000; da Silva; de Almeida, 2011; Rosa; Biazus, 2020). As justificativas envolvem desde a ausência da Física do século XX nas propostas curriculares à necessidade de oferecer ao estudante uma compreensão do funcionamento de aparelhos e dispositivos tecnológicos atuais.

A legislação educacional preconiza que os conteúdos, as metodologias e as formas de avaliação serão organizadas de modo que o estudante demonstre domínio dos princípios científicos e tecnológicos que presidem a produção moderna (Brasil, 1996). Tal exigência é reforçada na Base Nacional Curricular Comum (BNCC) que abre espaço para o ensino de conteúdos da Física Moderna e, mais especificamente, o Efeito Fotoelétrico ao afirmar, ser competência esperada ao egresso do Ensino Médio a capacidade de

analisar fenômenos naturais e processos tecnológicos, com base nas interações e relações entre matéria e energia, para propor ações individuais e coletivas que aperfeiçoem processos produtivos, minimizem impactos socioambientais e melhorem as condições de vida em âmbito local, regional e global. (Brasil, 2018, p. 553)

Por meio de uma consulta informal, enviada a grupos de professores de física nas redes sociais¹, dezenove professores: oito de escolas privadas, nove de escolas públicas e dois de ambas, que lecionam principalmente no Sudeste ou no Nordeste do país, inferimos que o efeito fotoelétrico está presente como conteúdo a ser ensinado em alguns materiais didáticos utilizados pelas instituições privadas sendo apenas citado em alguns dos materiais utilizados na rede pública.

Ressalta-se a recorrente alegação, por parte dos professores de escolas públicas, a respeito da redução da carga horária de Física no Novo Ensino Médio como fator que reduz a possibilidade do ensino do Efeito Fotoelétrico ou outro tópico de Física Moderna nesta etapa de ensino. Eles também reclamam da ausência do tratamento adequado da Física Moderna nos materiais didáticos recebidos em suas escolas.

Nos materiais que reservam um capítulo ou seção para tratar de forma mais aprofundada o fenômeno, o Efeito Fotoelétrico é associado a emissão de elétrons por parte de um metal sobre o qual incide uma radiação eletromagnética de frequência elevada. Por exemplo, (Dal Moro, Carvalho e França, 2021) deixam claro que a energia dos elétrons emitidos não tem a ver com a intensidade da radiação incidente, mas sim, com a frequência. Sendo maior a energia destes elétrons para maiores frequências da luz incidente. Por outro lado, radiação com menores frequências são incapazes de arrancar elétrons independente da sua intensidade. Tal explicação coincide com o que é informado em livros didáticos utilizados na graduação em Física.

Eisberg e Resnick (1988) apresentam o Efeito Fotoelétrico a partir de alguns experimentos

¹Os professores foram informados que as respostas do formulário poderiam ser utilizadas nessa pesquisa.

realizados por Heinrich Hertz (1857 - 1894). Entre 1886 e 1887, Hertz utilizou um dispositivo formado por uma bobina de indução² conectada a dois condutores cilíndricos coplanares e separados por uma pequena lacuna. Nessa lacuna era possível observar algumas faíscas causadas pelas altas tensões aplicadas sobre os condutores (emissor de ondas). Um segundo instrumento (receptor), constituído por uma espira circular aberta, tendo suas extremidades separadas por uma distância micrométrica, foi colocado a uma certa distância do dispositivo emissor (Figura 1). Hertz observou que, mesmo não tendo nenhuma conexão direta entre os dois dispositivos, era possível perceber que no receptor também ocorria o surgimento de faíscas, corroborando assim a hipótese da existência das ondas eletromagnéticas. Para observar melhor a faísca produzida no receptor, ele foi encapsulado em uma caixa escura. No entanto, Hertz percebeu que isso afetava o comprimento da faísca gerada. Após mais um conjunto de investigações concluiu-se que o surgimento das faíscas no receptor era facilitado pela incidência da luz ultravioleta advinda do emissor. Hertz sugeriu ainda que outras fontes de luz poderiam causar o mesmo efeito.

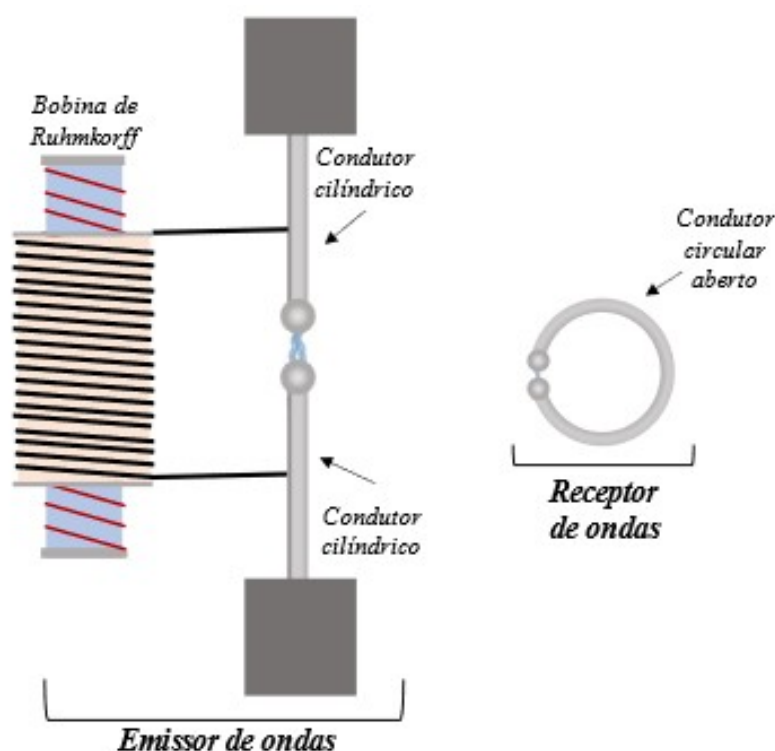


Figura 1: Esquema do experimento utilizado por Heinrich Hertz para investigar a existência de ondas eletromagnéticas.

Pouco tempo depois, Wilhelm Hallwachs (1859 - 1922), utilizando uma placa de zinco acoplada a um eletroscópio de folhas negativamente carregado, observou que a incidência de luz ultravioleta na placa provoca a descarga do eletroscópio mais rapidamente do que em uma situação sem incidência de tal luz. De outro modo, quando o mesmo aparelho era positivamente carregado, a incidência de radiação ultravioleta não exercia nenhum

²No experimento original, Hertz utilizou uma Bobina de Ruhmkorff, uma espécie de transformador que produz pulsos de alta voltagem a partir de uma corrente contínua de baixa voltagem.

efeito sobre o dispositivo. A partir desses resultados, Philipp Lenard (1862 - 1947) e o astrônomo Max Wolf (1863 - 1932) sugeriram que a Luz Ultravioleta arrancava partículas do metal e J. J. Thomsom (1856 - 1940) postulou que as partículas emitidas seriam elétrons. O efeito fotoelétrico passou então a ser entendido como sendo a emissão de elétrons de uma superfície, devida à incidência de luz sobre essa superfície (Eisberg; Resnick, 1988, p. 51).

À primeira vista, a explicação para o fenômeno parece ser simples. Os elétrons estão presos às estruturas atômicas que compõem os metais. Alguns deles estão mais fracamente presos que outros. Deve, portanto, haver uma energia mínima, chamada de função trabalho (W), capaz de arrancar alguns desses elétrons do metal fazendo com que ele fique positivamente carregado. A luz, como qualquer onda eletromagnética, é capaz de provocar isso transferindo energia a esses elétrons, forçando a emissão dessas partículas. Aos elétrons emitidos devido à incidência de luz, chamamos atualmente de fotoelétrons. Sendo assim, basta que a energia fornecida pela luz seja maior que a energia necessária para arrancá-los.

Sendo a luz uma onda eletromagnética, a energia da onda luminosa estaria diretamente ligada à sua amplitude, isto é, à intensidade da luz. Ou seja: esperava-se que, quanto maior o brilho da luz incidente sobre o metal, maior a quantidade de elétrons arrancados ou maior a energia desses elétrons. Além disso, deveria haver uma intensidade mínima, abaixo da qual, nenhum elétron seria emitido. A capacidade de arrancar elétrons não dependeria da cor, isto é, da frequência da radiação incidente.

Porém, os resultados experimentais não coincidiam com a previsão teórica. Por um lado, ondas eletromagnéticas de baixa frequência se demonstraram incapazes de arrancar elétrons, mesmo advindas de fontes com alta intensidade. Por outro, ondas eletromagnéticas de alta frequência conseguiam remover elétrons mesmo sendo provenientes de fontes de intensidade baixas. Essas observações não podiam ser facilmente explicadas à luz da física clássica e constituíam um desafio aos pesquisadores da época.

Em 1905, Einstein propôs uma explicação ao fenômeno utilizando-se de alguns postulados:

- Os quanta de luz: Para Einstein, a luz não era contínua, mas formada por pequenos pacotes de energia (denominados inicialmente de quanta e atualmente reconhecidos como fótons). Cada um desses fótons carregava consigo uma quantidade de energia (E_f), determinada pelo produto da frequência da luz emitida (f) e a constante de Planck (h).

$$E_f = h \cdot f \quad (1)$$

- Absorção total dos fótons: Um fóton nunca pode ser absorvido parcialmente por um elétron. Sendo assim, a interação ocorria somente entre pares, onde cada fóton cedia totalmente sua energia para apenas um elétron.
- Energia cinética dos elétrons emitidos (E_c): A energia cinética dos elétrons emitidos é dada pela diferença entre a energia recebida do fóton (E_f) e o trabalho (W) necessário para arrancá-lo da estrutura metálica em que se encontra.

$$E_c = E_f - W \quad (2)$$

Metais são reconhecidos hoje como sendo formados por uma estrutura cristalina constituída por átomos que perdem seus elétrons mais externos tornando-se cátions. Estes elétrons livres preenchem a estrutura ao redor dos cátions formando um mar de elétrons que é responsável por várias das características desses materiais, como a condutividade elétrica e térmica. Quando a luz incide sobre a superfície de um metal fornece energia para que alguns desses elétrons escapem dessa estrutura. Imaginávamos a luz como uma fonte contínua de energia que iria inundando a estrutura metálica e arrancando elétrons na medida que absorvessem a energia necessária para conseguirem escapar do metal. Deste modo, bastaria aumentar a intensidade da luz, independente da sua frequência, para se observar o efeito fotoelétrico. Contudo, Einstein propôs que cada elétron absorve apenas a energia de um único fóton e só é arrancado da estrutura metálica se a energia desse fóton for maior que o trabalho necessário para retirá-lo de lá.

Sendo assim, se sobre o metal incide um feixe de luz vermelha, independente da intensidade da fonte, a energia de cada fóton não será suficiente para retirar os elétrons do metal, pois a frequência correspondente à luz vermelha é pequena (equação 1). Se aumentarmos a intensidade da fonte, aumentaremos a energia total, porém, a energia de cada fóton continuará pequena e insuficiente para que ocorra o efeito de emissão fotoelétrica. Por outro lado, se sobre este metal incidir um feixe de luz ultravioleta, cuja frequência é maior que a luz vermelha, cada fóton individualmente portará uma quantidade maior de energia e será responsável pela emissão de um único elétron, caso essa quantidade de energia seja maior que o trabalho necessário para retirá-lo da superfície (equação 2). Por fim, se aumentarmos a intensidade da fonte luminosa, mais fótons irão interagir com o metal, provocando assim um aumento na quantidade de elétrons emitidos.

Em geral, quando se trata do Efeito Fotoelétrico, tanto no Ensino Médio quanto na Graduação, refere-se ao fenômeno descrito acima. Nos materiais didáticos, o fenômeno é apresentado de maneira semelhante, diferindo entre eles apenas no nível de aprofundamento, se mantendo, portanto, a ideia central que está resumida na Tabela 1 (Carron; Guimarães, 2006; Calçada; Sampaio, 2012; Pietrocola *et al.*, 2016; Dal Moro; Carvalho; França, 2021).

Intensidade da Luz	Frequência da Luz	Energia do Fóton	Fotoelétrons emitidos.
Baixa	Baixa	Menor que W	Nenhum
Alta	Baixa	Menor que W	Nenhum
Baixa	Alta	Maior que W	Poucos
Alta	Alta	Maior que W	Muitos

Tabela 1: Condições para emissão de fotoelétrons.

III. CIRCUITO COM O LDR

A partir do vídeo produzido por Tavares (2022) recriou-se o aparato experimental que simula o funcionamento de um poste de luz. Para tal, foram utilizados os seguintes materiais:

- Um relé fotoelétrico eletrônico (Figura 2) - Marca G20 Modelo RFE 40101 (constitui-se de um circuito contendo um relé normalmente fechado acoplado a um LDR que liga

ou desliga o circuito na presença ou ausência de luz);

- uma Lâmpada residencial comum;
- um Interruptor;
- uma tomada macho;
- madeira para a estrutura do poste
- parafusos e pregos;
- cerca de dois metros de fios elétricos do mesmo tipo utilizado em iluminação residencial.



Figura 2: Modelo de Relé Fotoelétrico utilizado no experimento.

O circuito constitui-se de uma associação em série entre o interruptor, o relé e a lâmpada (Figura 3). A instalação elétrica foi montada em uma estrutura de madeira que simula um poste de iluminação pública (Figura 4A).

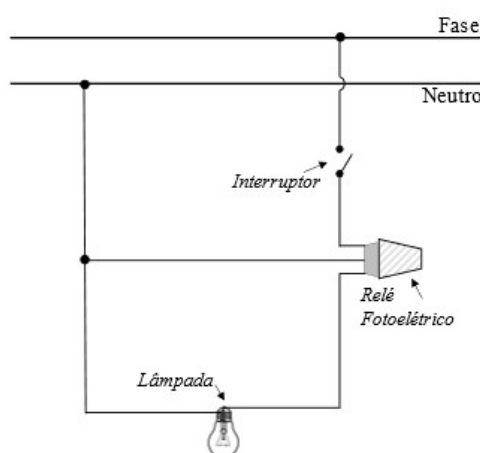


Figura 3: Esquema elétrico utilizado no aparato experimental para simular um poste de iluminação pública.

A tampa que protege o relé fotoelétrico foi retirada para obter-se acesso ao LDR (Figura 4B). Com o circuito ligado à tomada e o interruptor acionado, se a luz do dia incide sobre o LDR, sua resistência elétrica diminui acionando uma corrente elétrica que aciona o relé. O relé atua como um segundo interruptor, desligando a lâmpada quando acionado. Se nenhuma luz incide sobre o LDR, sua resistência elétrica é muito alta, cortando a corrente e impedindo o relé de ser acionado, e, conseqüentemente, mantendo a lâmpada em funcionamento.

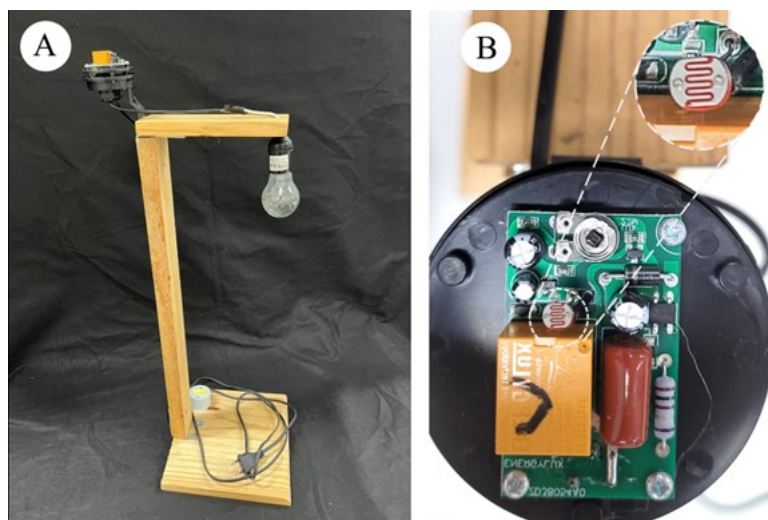


Figura 4: *A: Aparato experimental construído para simular um poste de iluminação pública. B: Circuito Elétrico do relé fotoelétrico utilizado no experimento. Em destaque, no canto superior direito, a identificação do componente fotossensível, o LDR.*

IV. TESTANDO O CIRCUITO DO LDR EM UMA AULA SOBRE EFEITO FOTOELÉTRICO

Com o experimento construído, partindo-se da explicação dada para o Efeito Fotoelétrico encontrada nos materiais didáticos, foi proposto para os alunos da turma de instrumentação que apresentassem uma proposta de utilização deste aparato experimental numa aula sobre o referido fenômeno.

Os alunos reuniram algumas fontes de luz existentes no Laboratório de Ensino de Física, a saber: lâmpada ultravioleta, laser vermelho, laser verde e leds de diversas cores. De posse das fontes de luz, eles levantaram as seguintes hipóteses:

1. Fontes de luz de baixa frequência não seriam capazes de acionar o LDR, independente de sua intensidade e, portanto, não fariam a lâmpada se apagar.
2. Fontes de luz de alta de alta frequência acionariam o LDR independente de sua intensidade e, portanto, fariam a lâmpada se apagar. De acordo com essas hipóteses, a lâmpada do poste não se apagaria quando o LDR fosse iluminado com o laser vermelho, pois, os fótons associados a essa radiação de baixa frequência não conteriam energia

suficiente para arrancar os elétrons (Equação 1). Por outro lado, se fosse utilizada uma fonte de luz ultravioleta, o efeito de emissão fotoelétrica ocorreria, acionando o dispositivo e, conseqüentemente, apagando a lâmpada.

Durante os testes utilizando as diversas fontes de luz, foi constatado, no entanto, que ao iluminar o LDR com o laser vermelho, ocorreu o acionamento do relé, apagando a lâmpada do poste. Diante desta observação os alunos concluíram que o fenômeno observado não poderia ser o Efeito Fotoelétrico (pelo menos não o que está descrito nos materiais didáticos), pois a luz vermelha não teria energia suficiente para arrancar elétrons do LDR. Logo, a despeito dos diversos trabalhos que utilizam este circuito como exemplo para tal fenômeno, os estudantes concluíram não ser possível utilizar o circuito do poste de luz com este propósito. Os estudantes foram então estimulados a pesquisar o que acontece no LDR e comparar com o que eles aprenderam como Efeito Fotoelétrico. Este artigo é resultado dessa pesquisa.

A emissão de elétrons a partir da incidência de uma onda eletromagnética em um metal está inserida dentro de um contexto mais abrangente de fenômenos, de modo que o conceito de Efeito Fotoelétrico ganha uma perspectiva mais ampla. No sentido mais abrangente do termo, o efeito fotoelétrico refere-se a mudanças nas propriedades de condução elétrica da matéria, ocasionadas pela interação com a luz ou outros tipos de radiações eletromagnéticas. Esse fenômeno pode ser dividido em duas categorias: Efeito Fotoelétrico externo e interno:

O efeito fotoelétrico externo refere-se ao fenômeno em que os elétrons no objeto escapam da sua superfície e são emitidos para fora sob a ação da luz, o que também é chamado de efeito de emissão fotoelétrica. O efeito fotoelétrico interno refere-se ao fenômeno em que a iluminação altera a condutividade de um objeto ou produz uma força eletromotriz. Ele também é dividido em efeito de fotocondutividade e efeito fotovoltaico (Han, T. et al, 2021, grifo e tradução pelos autores).

Esta relação pode ser melhor entendida através do diagrama presente na Figura 5.

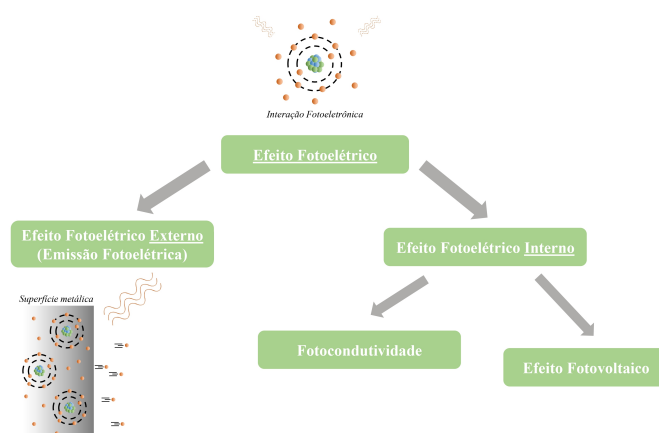


Figura 5: Diagrama do conceito de Efeito Fotoelétrico (EF) e seus desdobramentos.

Assim o termo “Efeito Fotoelétrico” tal como abordado no ensino médio e em alguns materiais utilizados na graduação, corresponde, na verdade, ao Efeito fotoelétrico externo, também denominado de Efeito de Emissão Fotoelétrica. Para fins de clareza, adotaremos o termo “emissão fotoelétrica” no restante deste trabalho, para nos referir ao “Efeito Fotoelétrico” tal qual proposto em livros e materiais didáticos utilizados no Ensino Médio.

V. A FOTOCONDUTIVIDADE E O FUNCIONAMENTO DO LDR

Com os resultados obtidos e observados, conclui-se que o LDR não apresenta reação pelo Efeito de emissão fotoelétrica. Mas, então, qual seria o fenômeno observado e estudado com tanta semelhança que resulta nessa confusão de conceitos e discernimento? Como exposto (Figura 5), o Efeito Fotoelétrico pode ser dividido em externo (emissão fotoelétrica) ou interno. O EF interno, por sua vez, pode ainda ser subdividido em dois tipos de fenômenos, a saber, o Efeito Fotovoltaico e o Efeito Fotocondutivo (EFC). O primeiro diz respeito ao surgimento de uma diferença de potencial em um semicondutor, ocasionado pela exposição à luz. O segundo, também chamado de fotocondutividade, é o fenômeno responsável pelo acionamento do relé quando expomos o LDR à luz visível, e refere-se à variação da condutividade de um material quando exposto a esse tipo de radiação eletromagnética.

V.1. Efeito Fotocondutivo

O Efeito Fotocondutivo foi observado pela primeira vez pelo engenheiro elétrico britânico Willoughby Smith (1828 - 1891), que notou que hastes de selênio, utilizadas em circuito para testes de cabos telegráficos subaquáticos, aumentavam sua condutividade quando expostos à luz intensa. De modo geral, a fotocondutividade é um efeito comumente observado na exposição de um material semicondutor à radiação, onde a luz incidente pode aumentar ou diminuir a condutividade elétrica do material, tornando a condutividade elétrica do material variável através da interação local entre fótons (da radiação incidente) e elétrons ligados aos átomos presentes na estrutura do material. Assim que a energia do fóton é absorvida pelos elétrons nas bandas de energia, os elétrons que antes ocupavam estados na banda de valência passam a ocupar estados de maior energia situados, na banda de condução (Cazati, 2008; Alves, 2020) (Figura 6).

Para que ocorra a promoção de portadores de carga para níveis de maior energia, é necessário que a energia do fóton incidente seja maior que o gap do semicondutor. Com isso, os portadores de carga se deslocam da banda de valência, ou de níveis discretos de energia, possivelmente, situados no gap, devido à presença de impurezas ou defeitos na rede cristalina, para a banda de condução, dando início ao processo de fotocondução (Alves, 2020, p. 10)

Entre essas duas bandas, existe uma região proibida³ de energia chamada de gap ou intervalo proibido (Figura 6). Essa região representa uma diferença de energia que os

³A existência de impurezas ou defeitos na rede cristalina pode introduzir estados de energia dentro do *gap*.

elétrons precisam superar para passar da banda de valência para a banda de condução.

Em outras palavras, quando um feixe de luz incidente, com energia maior ou pelo menos igual ao gap do material, interage com um elétron localizado na banda de valência, esse elétron absorve a energia do fóton e se promove à banda de condução, deixando uma lacuna (buraco) na banda de valência, iniciando o processo de fotocondução (Alves, 2020, p.11).

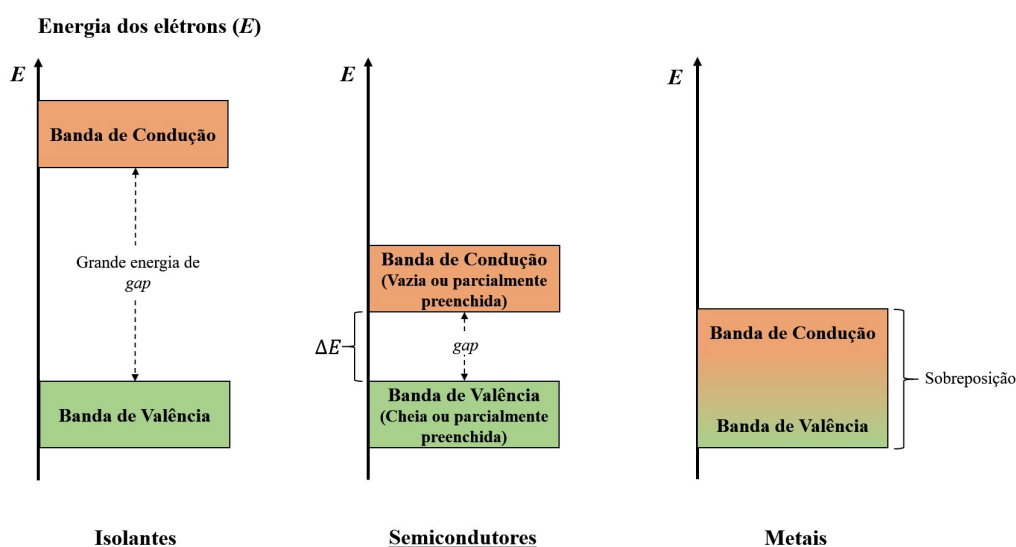


Figura 6: Diagrama de bandas de energia para materiais isolantes, semicondutores e metais.

A fotocondução em um semiconductor ocorre quando o fóton incidente possui energia maior ou igual ao gap presente no material, ou seja, quando a condição $hf \geq \Delta E$ for satisfeita (Figura 6). Sendo assim, atingindo essa energia é possível transferir o elétron da banda de valência para a de condução, sendo esta última o local onde os elétrons possuem energia suficiente para contribuir com a condução da corrente elétrica. Com isso, quando sobre um semiconductor incide luz com energia superior à sua energia de gap , ocorre um aumento da condutividade elétrica desse material, pois, há transferência de elétrons da banda de valência para a banda de condução dentro do próprio material, aumentando os portadores de carga nessa respectiva banda.

V.2. Funcionamento do LDR

A energia de gap de um semiconductor depende de diversas variáveis como a estrutura cristalina, os tipos de átomos que o compõe, a temperatura, impurezas entre outros fatores. No entanto, em geral, grande parte dos semicondutores utilizados em aplicações e dispositivos tecnológicos apresentam gap relativamente baixo, na ordem de algumas unidades de elétron-volts.

Um destes dispositivos é o LDR (*Light Dependent Resistor*), utilizado em uma ampla gama de aplicações tecnológicas, como por exemplo, no acionamento da iluminação de vias públicas. O LDR é projetado de modo que qualquer fóton de luz seja capaz de ativar seu sistema, até mesmo a radiação infravermelha, de baixa frequência (Gutierrez, et. al., 2017).



Figura 7: Componente eletrônico (LDR) utilizado em sistemas para iluminação pública. Fonte: BERTOLETI, Pedro. O que é LDR? Disponível (aqui). Acesso em: 19 mar. 2025

O funcionamento desse instrumento se baseia na variância da intensidade da luz que incide sobre ele. Durante o dia, com a incidência da luz solar, a condutividade elétrica do LDR aumenta (diminuição da resistência), permitindo a passagem de corrente elétrica que mantém um relé em uma posição que desliga as luzes. Ao anoitecer, com baixa luminosidade, a condutividade do LDR diminui (aumento da resistência) mantendo o relé numa posição que fecha o circuito que acende as luzes das vias públicas.

Em resumo, o LDR é constituído por um semicondutor e funciona através da fotocondutividade, isto é, a partir da interação de fótons com o material, podendo variar suas propriedades de condução de acordo com a luz incidente.

O LDR ou célula fotocondutiva é um dispositivo fotossensível normalmente fabricado a partir de semicondutores como sulfato de cádmio (CdS) ou seleneto de cádmio (CdSe), entre outros. [...]. Para entendermos seu funcionamento devemos lembrar que um semicondutor possui um pequeno número de portadores de carga na banda de condução quando na temperatura ambiente. Entretanto, quando foto-estimulados com luz de energia superior à energia de gap do semicondutor, há a criação de novos portadores de carga a partir da transição de elétrons da banda de valência para a banda de condução. Como consequência desse processo ocorre um aumento da condutividade elétrica do dispositivo, ou em outras palavras, uma queda de sua resistência elétrica. (Gutierrez, et. al., 2017, p.2)

Além da sua utilização no acionamento de vias públicas, o LDR é um componente elétrico frequentemente usado em diversas aplicações tecnológicas, como por exemplo, em sistemas de segurança, automação residencial e automotiva, equipamentos industriais, dispositivos de medição como os fotômetros ou sensores de radiação solar que podem

ser utilizados para estudos meteorológicos ou aplicações na agroindústria. Desta maneira, faz-se importante o estudo desse dispositivo, uma vez que, além de fazer parte do cotidiano dos estudantes, tal componente apresenta grande potencial didático.

V.3. Comparando o Efeito de Emissão Fotoelétrica e o Efeito Fotocondutor

Diversos trabalhos, vídeos e artigos costumam apresentar equívocos ao distinguir entre o Efeito de emissão fotoelétrica e a Fotocondutividade. Embora, ambos conceitos estejam relacionados à variação das propriedades de condução elétrica de um material através da interação entre radiação e a matéria, os dois fenômenos se diferenciam em diversos aspectos. O Efeito de emissão fotoelétrica é um fenômeno externo, onde o fóton incidente, que possui energia suficiente para vencer a função trabalho do material, interage com um elétron, fornecendo-o energia suficiente para ser ejetado da superfície do material. A Fotocondutividade, por sua vez, é um fenômeno interno, em que as propriedades de condução do material são alteradas devido à promoção de portadores de carga da banda de valência para banda de condução.

Outra característica que diferencia os fenômenos, refere-se ao fato de que o Efeito de emissão fotoelétrica, em geral, ocorre somente quando fótons mais energéticos, com frequência igual ou superior à luz verde, interagem com o material. A fotocondutividade, por sua vez, pode ocorrer com fótons de baixa frequência, até mesmo na faixa do vermelho e infravermelho.

Para fins de clareza, algumas outras características que diferenciam ambos os eventos são apresentadas na Tabela 2.

Efeito de Emissão Fotoelétrica	Efeito Fotocondutivo
Emissão de elétrons de uma superfície metálica quando exposta à luz.	Mudança na condutividade elétrica de um semicondutor quando exposto à luz.
Os fótons incidentes devem ter energia suficiente (alta frequência) para vencer a função trabalho do material.	Os fótons incidentes devem ter energia suficiente (em geral, baixa frequência) apenas para promover o elétron da banda de valência à banda de condução.
Os elétrons são emitidos do material após a absorção dos fótons.	Os elétrons continuam no material, porém, passam a ocupar a banda de condução, aumentando a condutividade elétrica após a absorção dos fótons.
Para a maioria dos metais, ocorre para frequências iguais ou superiores à da luz verde ($\approx 5,26 \times 10^{14} \text{ Hz}$).	Para a maioria dos semicondutores, ocorre para qualquer frequência de luz visível ou até mesmo para espectro infravermelho em alguns casos.

Tabela 2: Comparação entre Efeito de Emissão Fotoelétrica e Efeito Fotocondutivo

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho discutimos a utilização de circuitos elétricos com LDR em aulas de Física acerca do efeito fotoelétrico. Utilizando um aparato experimental que simula a iluminação em vias públicas, constituído de um circuito elétrico composto pela associação em série de um relé fotoelétrico e uma lâmpada, investigamos o fenômeno da fotocondutividade, princípio físico envolvido no funcionamento dos LDRs.

Além disso, mostramos que o conceito do efeito fotoelétrico é mais abrangente do que o que é ensinado nos contextos do ensino básico e superior, podendo ser caracterizado como quaisquer mudanças nas propriedades de condução elétrica da matéria, ocasionadas pela interação com a luz ou outros tipos de radiações eletromagnéticas. Este fenômeno pode ser dividido em duas categorias: Efeito fotoelétrico externo e interno. O primeiro tipo, também denominado de efeito de emissão fotoelétrica, refere-se justamente ao conteúdo que é ensinado na educação básica e superior como sendo o efeito fotoelétrico, ou seja, trata da emissão de elétrons a partir da incidência de uma onda eletromagnética. No segundo tipo, por sua vez, não há a emissão de elétrons para fora da superfície e quaisquer mudanças ocorrem internamente, alterando características do material como sua condutividade elétrica (efeito de fotocondutividade) ou gerando uma diferença de potencial (efeito fotovoltaico).

Sendo assim, o presente trabalho apresenta uma inconsistência comum tanto no ensino básico, quanto no ensino de graduação no que diz respeito ao que é comumente chamado de efeito fotoelétrico. Mostramos, por meio de uma atividade didática, que a definição usual de Efeito Fotoelétrico contida nos materiais didáticos, isto é, o efeito de emissão fotoelétrica, é insuficiente para explicar, por exemplo, o funcionamento de componentes eletrônicos baseados na fotocondutividade, como os LDRs. Ao esclarecer a distinção entre esses fenômenos, acreditamos que este estudo pode oferecer aos professores recursos para enriquecer o ensino de Física, proporcionando uma abordagem mais precisa e abrangente do tema. Esperamos, com isso dar melhores subsídios aos professores em relação ao ensino deste conteúdo.

Editora Responsável: Maria de Fátima da Silva Verdeaux

REFERÊNCIAS

ALVES, D. C. *Investigação do efeito de fotocondução em poços quânticos de PbTe do tipo p*. f. 51. Dissertação (Mestrado em Física) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2020.

BRASIL. Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, p. 27833, 23 dez. 1996.

BRASIL. *Base Nacional Comum Curricular*. Brasília, DF: MEC, 2018. p. 533.

BRASIL. Ministério da Educação. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. *Exame Nacional do Ensino Médio Digital: caderno azul, questão 94*. Brasília,

DF: INEP, 2020. Disponível em: <https://download.inep.gov.br/enem/provas_e_gabaritos/2020_PV_digital_D2_CD7.pdf>. Acesso em: 6 out. 2024.

CALÇADA, C. S.; SAMPAIO, J. L. *Física clássica, volume 3: eletricidade e física moderna*. 1. ed. São Paulo: Atual, 2012.

CARRON, W.; GUIMARÃES, O. *As Faces da Física, volume único*. 3. ed. São Paulo: Moderna, 2006.

CAZATI, T. *Efeito da fotocondução em diodos com camada ativa de derivados de poli(p-fenileno vinileno) (PPV)*. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

DA SILVA, A. C.; DE ALMEIDA, M. J. P. M. Física quântica no ensino médio: o que dizem as pesquisas. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 28, n. 3, p. 624652, 2011. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2011v28n3p624>>. Acesso em: 6 out. 2024.

DAL MORO, G. A.; CARVALHO, C. L. de; FRANÇA, H. dos S. *Sistema Positivo de Ensino: ensino médio: física*. v. 12. Curitiba: PSD Educação, 2021.

EISBERG, R.; RESNICK, R. *Física Quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas*. Tradução: P. C. Ribeiro, E. F. da Silveira, M. F. Barroso. Rio de Janeiro: Campus, 1988.

FREITAS, A.; FERREIRA, M.; SILVA FILHO, O. L. Uma Proposta de Ensino Investigativo Sobre a Física Moderna e Contemporânea: o Efeito Fotoelétrico. *Revista do Professor de Física*, v. 3, n. esp., p. 3738, 2019. Disponível em: <<https://periodicos.unb.br/index.php/rpf/article/view/25867>>. Acesso em: 6 out. 2024.

GUTIERRE, H. G. *et al.* Sistema fotodetector econômico para utilização em laboratórios de ensino e pesquisa. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 39, p. e3501, 2017. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/dm5Xvpq6SwcwwxCjtNn73fD/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 6 out. 2024.

HAN, T. *et al.* *Photoelectric materials and devices*. Singapura: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2021.

MENDES JÚNIOR, J. J. A.; STEVAN JUNIOR, S. L. LDR e sensores de luz ambiente: funcionamento e aplicações. *Semana de Eletrônica e Automação*, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Ponta Grossa, PR, 2013. Disponível aqui. Acesso em: 6 out. 2024.

MUNIZ, D. S.; DA SILVA, A. J.; SILVA, J. P. C.; NASCIMENTO, D. O. Proposta metodológica sobre o efeito fotoelétrico para o ensino médio. *Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente*, v. 9, n. 2, p. 841845, 2018. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/dm5Xvpq6SwcwwxCjtNn73fD/?format=pdf&lang=pt>>.

[//repositorio.unifaema.edu.br/handle/123456789/2247](https://repositorio.unifaema.edu.br/handle/123456789/2247)>. Acesso em: 6 out. 2024.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 5, n. 1, p. 2348, 2016. Disponível em: <<https://ienci.if.ufrgs.br/index.php/ienci/article/view/600>>. Acesso em: 6 out. 2024.

PIETROCOLA, M.; POGIBIN, A.; ANDRADE, R. de; ROMERO, T. R. *Física em contextos, volume 3: ensino médio*. 1. ed. São Paulo: Editora do Brasil, 2016.

PINTO, A. C.; ZANETIC, J. É possível levar a física quântica para o ensino médio?. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 16, n. 1, p. 734, 1999. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6873>>. Acesso em: 6 out. 2024.

ROSA, C. T. W. da; BIAZUS, M. de O.; DARROZ, L. M. Estudo envolvendo a função das imagens associadas a tópicos de Física Moderna nos livros didáticos do ensino médio. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 37, n. 1, p. 2750, 2020. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2020v37n1p27>>. Acesso em: 6 out. 2024.

TAVARES, P. Efeito fotoelétrico: experimento para sala de aula. *YouTube*, 29 mar. 2022. Disponível em: <<https://www.youtube.com/shorts/9WjWy4lq164>>. Acesso em: 22 maio 2023.

TERRAZZAN, E. A. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de Física na escola de 2º grau. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 9, n. 3, p. 209214, 1992. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/7392>>. Acesso em: 6 out. 2024.

VALADARES, E. C.; MOREIRA, A. M. Ensinando Física moderna no segundo grau: Efeito fotoelétrico, laser e emissão de corpo negro. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 15, n. 2, p. 121135, 1998. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6896>>. Acesso em: 6 out. 2024.

VEIT, E. A.; THOMAS, G. L.; FRIES, S. G.; AXT, R.; SELISTRE, L. F. O efeito fotoelétrico no segundo grau via microcomputador. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 4, n. 2, p. 6888, 1987. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/7850>>. Acesso em: 6 out. 2024.