

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
INSTITUTO FEDERAL SUDESTE DE MINAS GERAIS
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

Wagner Dias Rocha

UMA PROPOSTA DE ABORDAGEM EXPERIMENTAL PARA O
EFEITO FOTOELÉTRICO
CONSTRUINDO CONCEITOS DE FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA COM
LEDS E OUTROS COMPONENTES DE BAIXO CUSTO

Juiz de Fora
2018

Wagner Dias Rocha

UMA PROPOSTA DE ABORDAGEM EXPERIMENTAL PARA O EFEITO
FOTOELÉTRICO
Construindo Conceitos de Física Moderna e Contemporânea com LEDs e Outros
Componentes de Baixo Custo.

Dissertação apresentada ao Programa de
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de
Física, polo 24 - UFJF/IF-Sudeste-MG, como
parte dos requisitos necessários à obtenção do
título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador:
Bruno Gonçalves

Juiz de Fora
2018

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Rocha, Wagner Dias.

Uma proposta de abordagem experimental para o Efeito Fotoelétrico : Construindo conceitos de Física Moderna e Contemporânea com LEDs e outros componentes de baixo custo / Wagner Dias Rocha. -- 2018.

84 f. : il.

Orientador: Bruno Gonçalves

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto Federal Sudeste de Minas Gerais, ICE/IFSEMG. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2018.

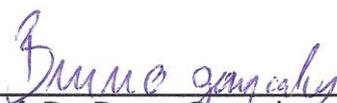
1. Ensino de Física. 2. Abordagem Experimental. 3. Efeito Fotoelétrico. 4. LEDs. I. Gonçalves, Bruno, orient. II. Título.

Wagner Dias Rocha

UMA PROPOSTA DE ABORDAGEM EXPERIMENTAL PARA O EFEITO
FOTOELÉTRICO: CONSTRUINDO CONCEITOS DE FÍSICA MODERNA
E CONTEMPORÂNEA COM LEDS E OUTROS COMPONENTES DE
BAIXO CUSTO

Dissertação submetida ao Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – Polo 24: Universidade Federal de Juiz de Fora e Instituto Federal Sudeste de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada em 21 de agosto de 2018 por:



Prof. Dr. Bruno Gonçalves – Orientador



Prof. Dr. Baltazar Jonas Ribeiro Moraes – CEFET-MG



Prof. Dr. Bruno Ferreira Rizzuti – UFJF

Juiz de Fora, MG
Agosto de 2018

Dedicatória

Dedico esta dissertação a minha família,
de forma especial à minha esposa Ana
Maria e à minha filha Maria Antônia
por terem se tornado a minha principal
fonte de inspiração e de motivação para
nunca desistir.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus por sempre iluminar o meu caminho e me dar forças sobre-humanas para superar todos os obstáculos até chegar aqui.

À minha filha, Maria Antônia, pela grande motivação que trouxe para a minha vida e pela paciência nos momentos em que não pude dar a atenção que merecia ou precisava.

À minha esposa, Ana Maria, pelas orações, pelo incentivo, pela paciência, pela cumplicidade e companheirismo nos momentos mais difíceis, essencialmente por tudo de bom que me trouxe, desde sempre.

À minha mãe, Maria Rosângela, pelos mais belos exemplos de amor, carinho, compaixão, dedicação, sacrifício, educação, enfim, todos os seus ensinamentos que guiam os meus caminhos até os dias de hoje.

Aos meus irmãos, Flávio e Maria Fernanda, pela amizade, pela cumplicidade, pelo incentivo e pelo apoio nos momentos mais difíceis que compartilhamos.

Ao meu pai, Fernando, por todo o incentivo para continuar sempre estudando e nunca desistir.

Ao meu orientador, professor Bruno Gonçalves, pela oportunidade, pela confiança, pela paciência, pelos ensinamentos e pela amizade durante toda nossa convivência, além de todo o suporte fornecido durante o desenvolvimento deste trabalho.

À minha psicóloga, Gina, por me ajudar a quebrar vários bloqueios que comprometiam a minha chegada até esse momento, especialmente a inércia que me impedia de escrever.

A todos os amigos do LIT e do PET Física do IF Sudeste MG, especialmente ao Márcio, à Tamires e ao Sérgio França por todo suporte fornecido por vocês durante o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os amigos, alunos e professores do MNPEF – Polo 24 – UFJF / IF Sudeste MG, pela agradável e saudosa convivência em todo esse precioso tempo que passamos juntos.

A todos os colegas de trabalho e amigos dos Núcleos Acadêmicos de Eletricidade e de Eletrônica e Automação do IF Sudeste MG, pelas orações, pelo incentivo, pela torcida.

À Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio de taxa de bancada - Projeto MPR 00703-15 e pelos demais apoios financeiros na realização deste projeto.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), pois o presente trabalho foi realizado com apoio da referida instituição – Código de Financiamento 001.

RESUMO

UMA PROPOSTA DE ABORDAGEM EXPERIMENTAL PARA O EFEITO FOTOELÉTRICO

Wagner Dias Rocha

Orientador:
Bruno Gonçalves

Este trabalho apresenta uma proposta de abordagem experimental para o Efeito Fotoelétrico baseada em um kit didático capaz de demonstrar a ocorrência (ou não) do fenômeno em função da variação de intensidade e de frequência da luz incidente sobre um material receptor. O principal objetivo é fornecer uma alternativa diferenciada para a construção do conhecimento sobre o assunto. O kit, elaborado com LEDs e outros componentes de baixo custo presentes no cotidiano, é de fácil reprodução e operação, além de compacto o suficiente para viabilizar a execução de atividades práticas em qualquer sala de aula, sendo assim muito útil principalmente para alunos e professores do Ensino Médio, os quais muitas vezes não dispõem de laboratórios e equipamentos, seja pela restrição de acesso ou até mesmo pela inexistência destes. Com três aplicações em sala de aula, desenvolveu-se uma metodologia onde duas hipóteses excludentes entre si e que se apresentam como explicação para o fenômeno são confrontadas experimentalmente. A validade de somente uma dessas hipóteses é comprovada pelas respostas dadas a dois questionamentos pós-atividade. Os resultados obtidos demonstram que os alunos conseguiram compreender o funcionamento do kit, utilizá-lo para realizar a atividade proposta e construir eles próprios o seu conhecimento sobre o assunto. Além disso, as críticas e sugestões coletadas ao final do processo demonstram que houve uma aceitação considerável da proposta pelos mesmos. A fim de torná-la acessível aos professores de Física interessados na sua utilização, são fornecidos adicionalmente dois roteiros, sendo que um descreve passo a passo a montagem do kit e o outro dá suporte à execução da atividade experimental proposta.

Palavras-chave:

Ensino de Física, Abordagem Experimental, Efeito Fotoelétrico, LEDs.

Juiz de Fora
2018

ABSTRACT

A PROPOSAL OF AN EXPERIMENTAL APPROACH TO PHOTOELECTRIC EFFECT

Wagner Dias Rocha

Supervisor:
Bruno Gonçalves

This work presents a proposal for an experimental approach to the Photoelectric Effect based on a didactic kit capable of demonstrating the occurrence (or not) of the phenomenon as a function of the variation of intensity and frequency of light incident on a receiving material. The main objective is to provide a differentiated alternative for building knowledge about the subject. The kit, made with LEDs and other low-cost components present in everyday life, is easy to reproduce and operate, and compact enough to enable the execution of practical activities in any classroom, and is therefore very useful mainly for students and teachers of secondary education, which often do not have laboratories and equipment, either by the restriction of access or even by the lack of them. With three applications in the classroom, a methodology was developed where two mutually exclusive hypotheses that present themselves as an explanation for the phenomenon are confronted experimentally. The validity of only one of these hypotheses is proven by the responses given to two post-activity questions. The obtained results demonstrate that the students were able to understand the operation of the kit, use it to carry out the proposed activity and build their own knowledge about the subject. In addition, the criticisms and suggestions collected at the end of the process demonstrate that there has been considerable acceptance of the proposal by the parties. In order to make it accessible to physics teachers interested in its use, two scripts are additionally provided, one describing step by step the assembly of the kit and the other supporting the execution of the proposed experimental activity.

Keywords:

Physics Education, Experimental Approach, Photoelectric Effect, LEDs.

Juiz de Fora
2018

Lista de Figuras

Figura 1.1: Kit Didático Disponível no Laboratório para o Efeito Fotoelétrico	15
Figura 2.1: A Onda Eletromagnética Plana	19
Figura 2.2: O Espectro Eletromagnético	23
Figura 2.3: O Aparato Experimental de Hertz.....	23
Figura 2.4: O Aparato Experimental de Lenard	26
Figura 3.1: O Simulador PHET do Efeito Fotoelétrico	30
Figura 3.2: Circuito Concebido para a Determinação da Constante de Planck.....	30
Figura 3.3: Curvas Características Obtidas com a Experimentação Proposta	30
Figura 3.4: O Diodo Emissor de Luz ou LED.....	32
Figura 4.1: Pinagem do LED RGB	33
Figura 4.2: Alguns Exemplos de Sinais PWM	34
Figura 4.3: Aspecto Construtivo e Curva de Sensibilidade do LDR	35
Figura 4.4: O Arduino UNO e suas Principais Características	36
Figura 4.5: Interface Gráfica do Arduino IDE com <i>Sketch</i> Ativo e <i>Serial Monitor</i> Aberto.....	37
Figura 4.6: O Segundo Protótipo.....	39
Figura 4.7: O Terceiro Protótipo	40
Figura 5.1: Esquema Representativo de um LED	42
Figura 5.2: Apresentação do 2º Protótipo do Kit Didático durante a Primeira Aplicação.....	44
Figura 5.3: Execução da Atividade Experimental durante a Primeira Aplicação	44
Figura 5.4: Apresentação do 3º Protótipo do Kit Didático durante a Primeira Aplicação.....	45
Figura 5.5: Repetição da Atividade Experimental durante a Primeira Aplicação	46
Figura 5.6: Aplicação do Questionário de Avaliação Inicial durante a Terceira Aplicação.....	49
Figura 5.7: Execução da Atividade Experimental durante a Terceira Aplicação	51
Figura 6.1: Resultados de Execução Obtidos na Primeira Atividade da Primeira Aplicação.....	55
Figura 6.2: Resultados de Execução Obtidos pelo Primeiro Grupo da Terceira Aplicação.....	56
Figura 6.3: Resultados de Execução Obtidos pelo Segundo Grupo da Terceira Aplicação.....	56
Figura 6.4: Resultados de Execução Obtidos pelo Terceiro Grupo da Terceira Aplicação.....	56
Figura 6.5: Resposta dos Alunos da Primeira Aplicação ao Questionamento Feito.....	58
Figura 6.6: Justificativa dos Alunos da Primeira Aplicação ao Questionamento Feito	58
Figura 6.7: Resposta dos Alunos da Segunda Aplicação ao Primeiro Questionamento	59
Figura 6.8: Resposta dos Alunos da Segunda Aplicação ao Segundo Questionamento	59
Figura 6.9: Resposta do Primeiro Grupo da Terceira Aplicação aos Questionamentos	60
Figura 6.10: Resposta do Segundo Grupo da Terceira Aplicação aos Questionamentos	60
Figura 6.11: Resposta do Terceiro Grupo da Terceira Aplicação aos Questionamentos	60

Figura 6.12: Primeiro Resultado das Críticas e Sugestões	61
Figura 6.13: Segundo Resultado das Críticas e Sugestões	62
Figura 6.14: Terceiro Resultado das Críticas e Sugestões	62
Figura 6.15: Quarto Resultado das Críticas e Sugestões	62
Figura 6.16: Quinto Resultado das Críticas e Sugestões	62
Figura 6.17: Sexto Resultado das Críticas e Sugestões	63
Figura 6.18: Sétimo Resultado das Críticas e Sugestões	63
Figura 6.19: Oitavo Resultado das Críticas e Sugestões	63
Figura A.1: Diagrama Esquemático do Circuito a ser Montado.....	69
Figura A.2: Locais de Fixação dos Pregos na Base de Madeira.....	69
Figura A.3: Resultado da Soldagem dos Resistores.....	70
Figura A.4: Identificação dos Terminais dos LEDs.....	71
Figura A.5: Identificação dos Terminais do Transistor BC 548	71
Figura A.6: Resultado da Soldagem de Componentes na Base de Montagem	71
Figura A.7: Locais de Furação e Fixação do Painel Lateral.....	72
Figura A.8: Resultado da Montagem do Painel Lateral.....	72
Figura A.9: Soldagem dos Condutores Necessários (Parte I).....	73
Figura A.10: Soldagem dos Condutores Necessários (Parte II).....	73
Figura A.11: Soldagem dos Condutores Necessários (Parte III).....	74
Figura A.12: Resultado Final da Confeção do Kit Didático.....	74
Figura A.13: Sensores de Luz Confeccionados	75
Figura B.1: Alinhamento do LED Receptor com o LED Emissor.....	78

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Resultados Obtidos para a Constante de Planck	31
Tabela 4.1: Valores Característicos Empregados no Acionamento do LED RGB	35
Tabela 5.1: Sequência Didática Montada	52
Tabela 6.1: Resultados Esperados para o LED Receptor Verde.....	54
Tabela 6.2: Resultados Esperados para o LED Receptor Azul	54
Tabela B.1: Comportamentos do LED Branco para o LED Receptor Verde	79
Tabela B.2: Comportamentos Esperados para o LED Branco	79
Tabela B.3: Comportamentos do LED Branco para o LED Receptor Azul	79

Sumário

Capítulo 1 Introdução	13
1.1 Motivação	13
1.2 Justificativa	14
1.3 Objetivos	15
1.4 Organização do Trabalho	16
Capítulo 2 Efeito Fotoelétrico	18
2.1 As Ondas Eletromagnéticas	18
2.1.1 Energia Transmitida	20
2.1.2 Espectro Eletromagnético	21
2.2 A Descoberta de Hertz	23
2.3 A Investigação de Lenard	25
2.4 A Hipótese de Einstein	26
Capítulo 3 Referenciais Teórico-Experimentais	29
3.1 Os LEDs	31
3.2 LEDs como Receptores	32
Capítulo 4 O Kit Didático	33
4.1. O Primeiro Protótipo	33
4.2. O Segundo Protótipo	38
4.3. O Terceiro Protótipo	40
Capítulo 5 Metodologia e Aplicação	41
5.1. Primeira Aplicação	41
5.2. Segunda Aplicação	46
5.3. Terceira Aplicação	49
5.4. Sequência Didática	51
Capítulo 6 Resultados	53
6.1 Análise da Execução	53
6.2 Análise do Conhecimento Adquirido	57
6.3 Aceitação dos Alunos	61
Capítulo 7 Conclusões	64
Referências Bibliográficas	65
Apêndice A Roteiro de Montagem do Kit Didático	68
Material Utilizado	68
Na Confecção da Base de Montagem e do Painel Lateral	68
Na Confecção do Circuito	68
Circuito Montado	69
Execução	69
1. Confecção da Base de Montagem	69
2. Soldagem dos Componentes (Parte I)	70
3. Confecção do Painel Lateral	72
4. Soldagem dos Componentes (Parte II)	73
5. Confecção dos Sensores de Luz	75
Apêndice B Roteiro de Execução da Atividade Experimental	76
Objetivo	76
Introdução	76
1ª Hipótese	76
2ª Hipótese	77
Validação Experimental	77
Execução	78

Questionamentos	79
Apêndice C Questionário de Avaliação Inicial	80
Apêndice D Sketch Arduino do Primeiro Protótipo	81
Apêndice E Sketch Arduino do Segundo Protótipo	83

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Nos últimos anos, tem se tornado cada vez mais evidente o distanciamento existente entre a Física do cotidiano e a Física proposta pelos livros didáticos. Enquanto inúmeros avanços tecnológicos são vivenciados desde o advento da eletrônica, cuja origem reside na Física Moderna e Contemporânea, livros utilizados no ensino médio ainda se mantêm muito focados na abordagem de conceitos da Física Clássica, os quais se tornam cada vez mais ineficientes na tarefa de explicar os fenômenos observados na atualidade.

Conceitos mais modernos e contemporâneos geralmente são bem resumidos e alocados no final do conteúdo destinado ao 3º ano do ensino médio, induzindo sua abordagem em um momento onde o interesse dos alunos encontra-se normalmente direcionado para as oportunidades de entrada no ensino superior ou de atuação no mercado de trabalho. Essa é a realidade apresentada por vários livros conhecidos, tais como (GUALTER, 2013), (MÁXIMO, 2010) e (RAMALHO JR, n/d).

Diante desse cenário, o professor acaba buscando por metodologias alternativas capazes de reduzir o distanciamento existente e melhorar o processo de ensino e aprendizagem. Nesse sentido, atividades experimentais podem se tornar ferramentas poderosas quando deixam de ser exclusivamente demonstrativas ou comprobatórias para se tornarem ações investigativas ou prospectivas que permitem ao aluno ser protagonista na construção do próprio conhecimento. Esse tipo de transformação é incentivado, por exemplo, por (HEIDERMANN, 2016) e (ORTH, 2016).

A realização de experimentos não representa exatamente uma novidade para o Ensino de Física, mas quando o assunto é Física Moderna e Contemporânea, essa prática ainda se mantém muito restrita aos laboratórios montados para as aulas de graduação ou para o desenvolvimento de pesquisas científicas. Uma explicação para esse cenário pode estar na demanda por equipamentos mais caros, mais complexos e de difícil manutenção, os quais geralmente são importados e exigem certos cuidados no manuseio e transporte, representando um alto custo, incompatível para a realidade vivida em muitas das escolas brasileiras.

Felizmente, a literatura existente oferece inúmeras alternativas de baixo custo. Nela, podem ser encontradas propostas desde as mais lúdicas, como a apresentada em (SILVA, 2012), até as mais elaboradas, como a coletânea de experimentos mostrada em (CAVALCANTE; TAVOLARO, 2005). Dentre essas propostas, trabalhos como (CAVALCANTE, 2002), (CAVALCANTE, HAAG, 2005) e (MOURA, 2011), que apresentam o ensino de Física Moderna por meio de experimentos baseados em circuitos com LEDs e outros componentes, se apresentam como possíveis soluções para o contexto apresentado e servem de referência para o desenvolvimento desse trabalho.

1.2 Justificativa

Efeito Fotoelétrico é o nome atribuído à propriedade que a luz tem de arrancar elétrons ao interagir com meios materiais (SALVETTI, 2008). Está presente, por exemplo, no funcionamento da iluminação pública, de portas automáticas, de esteiras de transporte e dos controles remotos de aparelhos eletroeletrônicos (VALADARES, 1998).

A ideia de explorá-lo nasceu a partir de uma demanda do laboratório de Física Moderna do IF Sudeste MG – Campus Juiz de Fora. Dentre os diversos experimentos disponibilizados, o kit didático utilizado para a demonstração do fenômeno chamou a atenção pelas limitações. Composto por uma fonte de luz ultravioleta, um eletroscópio, um bastão de PVC e um pano de seda, conforme apresentado na Figura 1.1, o kit é destinado à realização de uma única atividade, puramente qualitativa e que não permite muitas variações de execução.

O respectivo procedimento experimental se resume à eletrização do bastão pelo atrito com o pano de seda e do eletroscópio com o toque (eletrização por contato) ou aproximação (eletrização por indução) desse bastão carregado. A seguir, a luz ultravioleta é acesa sobre a placa metálica conectada ao eletroscópio, promovendo uma descarga gradativa do mesmo. A conclusão é que essa descarga ocorre em função de uma ejeção de elétrons presentes (carga acumulada) na placa metálica, caracterizando o fenômeno. Esse procedimento é inspirado no descrito em [Youtube – Efeito Fotoelétrico 2018].



Figura 1.1: Kit Didático Disponível no Laboratório para o Efeito Fotoelétrico
Fonte: Acervo Pessoal.

Como a fonte empregada emite luz com intensidade e frequência fixas, a mesma não permite uma investigação da influência das referidas grandezas na ocorrência do fenômeno, o que seria de fundamental importância para sua correta compreensão.

Logo, a confecção de um novo kit didático e de uma metodologia para sua aplicação em sala de aula, utilizando LEDs e outros componentes de baixo custo, conforme sugerido pela literatura, se apresenta como uma solução viável não somente para atender a demanda apresentada, mas também para permitir uma abordagem experimental diferenciada desse conteúdo no Ensino Médio.

1.3 Objetivos

Com base na argumentação exposta, este trabalho tem o objetivo geral de motivar, a partir da abordagem apresentada para o Efeito Fotoelétrico, a inserção de experimentos no processo de construção de conceitos executado no Ensino de Física, em detrimento da tradicional utilização como simples ferramenta comprobatória de teorias apresentadas, especialmente no tratamento de conteúdos relacionados à Física Moderna. De forma complementar, pretende também alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Confeccionar um kit didático de baixo custo, de fácil reprodução e operação, além de compacto o suficiente, viabilizando sua utilização em qualquer sala de aula, independentemente da existência de um laboratório para a realização de experiências;
- Produzir um roteiro de montagem do kit didático confeccionado, permitindo sua reprodução por professores interessados na aplicação da proposta;
- Elaborar uma atividade experimental caracterizada pela investigação da influência da intensidade e da frequência na ocorrência do Efeito Fotoelétrico;
- Motivar os alunos para o aprendizado da Física, em especial da Física Moderna.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho foi organizado em sete capítulos e cinco apêndices, desenvolvidos conforme descrito a seguir.

No Capítulo 2, a Física do Efeito Fotoelétrico é discutida de uma forma histórico-conceitual-experimental, iniciando com a abordagem de conceitos básicos necessários sobre ondas eletromagnéticas, passando pela descoberta e investigação inicial do fenômeno e terminando com o modelo teórico válido.

No Capítulo 3, são exploradas as propostas encontradas na literatura que fundamentam a confecção do kit didático e de uma metodologia para sua aplicação em sala de aula.

No Capítulo 4, são descritas as três etapas de desenvolvimento e prototipagem pelas quais passou o kit didático proposto até a versão final que se tornou produto deste trabalho.

No Capítulo 5, é relatada a construção de uma metodologia para aplicação em sala de aula, a partir de três aplicações realizadas. Além disso, uma sequência didática foi elaborada a fim de orientar professores interessados na proposta.

No Capítulo 6 são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos a partir das três aplicações realizadas em sala de aula. Alguns critérios foram definidos inicialmente para embasar a referida análise e discussão.

No Capítulo 7 são discutidas as conclusões obtidas com a realização do trabalho. Ao final, são encontrados os seguintes apêndices:

- Apêndice A – Roteiro de Montagem do Kit Didático;
- Apêndice B – Roteiro de Execução da Atividade Experimental;
- Apêndice C – Questionário de Avaliação Inicial;
- Apêndice D – *Sketch* Arduino do Primeiro Protótipo;
- Apêndice E – *Sketch* Arduino do Segundo Protótipo.

Capítulo 2

Efeito Fotoelétrico

Conforme já definido no capítulo anterior, Efeito Fotoelétrico é o nome atribuído à propriedade que a luz tem de arrancar elétrons ao interagir com meios materiais. Se, nessa interação, a quantidade de energia fornecida pela luz é suficiente para deslocar os elétrons arrancados por certa distância, configura-se a circulação de uma corrente elétrica. O aparecimento dessa corrente permite concluir, assim como é afirmado em (CAVALCANTE, 2011), que o fenômeno descreve a produção de eletricidade a partir da luz.

Considerando-se que a relação da luz com a eletricidade e o magnetismo foi estabelecida a partir da previsão de ondas eletromagnéticas (TIPLER, 1995), esse tema se constitui como um ponto de partida natural para a abordagem do Efeito Fotoelétrico, conforme é visto a seguir.

2.1 As Ondas Eletromagnéticas

Por volta de 1860, o escocês James Clerk Maxwell corrigiu a lei de Ampère, introduzindo na respectiva equação uma componente de corrente devida à variação de campo elétrico (a chamada corrente de deslocamento) como fonte alternativa de campo magnético. Até então, acreditava-se que um campo magnético seria produzido exclusivamente por uma corrente elétrica percorrendo um condutor (TIPLER, 1995).

Prosseguindo o trabalho, combinou a nova lei de Ampère com outras três leis experimentais do eletromagnetismo (as leis de Gauss e a lei de Faraday/Lenz). Considerando como meio somente o vácuo, onde não existem cargas produzindo campos nem correntes, encontrou equações de ondas transversais que descrevem a propagação de um campo elétrico e um campo magnético pelo espaço, onde cada campo é mantido exclusivamente pela variação do outro (TIPLER, 1995) (SALVETTI, 2008).

Admitindo que esses campos sejam descritos por funções E_y e B_z , variáveis no tempo e dependentes de uma única e mesma coordenada espacial x , obteve as equações (TIPLER, 1995)

$$E_y = E_0 \cos [(\omega/c)x - \omega t] = E_0 \cos [kx - \omega t], \quad (2.1)$$

$$B_z = B_0 \sin [(\omega/c)x - \omega t] = B_0 \sin [kx - \omega t], \quad (2.2)$$

as quais descrevem uma onda eletromagnética plana, onde E_0 e B_0 são, respectivamente, as amplitudes do campo elétrico e do campo magnético, ω é a frequência angular e c é a velocidade de propagação. Nessa configuração, que pode ser visualizada na Figura 2.1, os campos elétrico e magnético sofrem variação de amplitude em direções perpendiculares entre si e em relação à direção de propagação, sendo esta dada pela coordenada espacial tomada como referência.

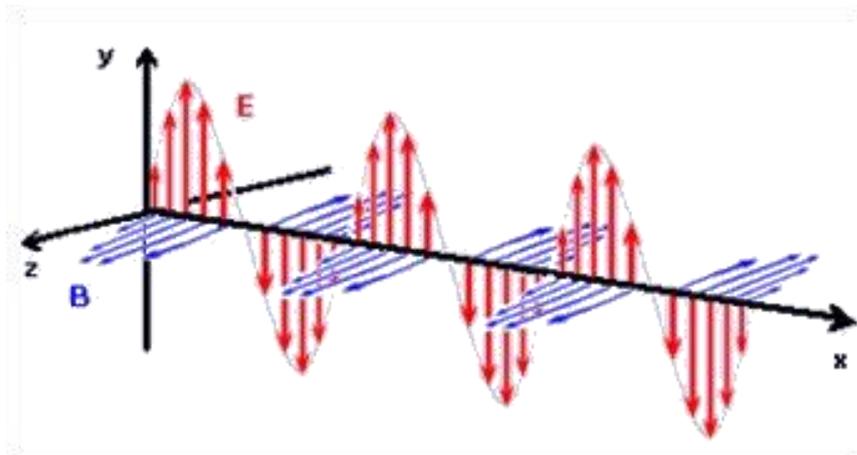


Figura 2.1: A Onda Eletromagnética Plana
Fonte: [Ondas – Eletromag 2018]

Ao determinar a velocidade de propagação dessas ondas, encontrou o mesmo valor (TIPLER, 1995) (SALVETTI, 2008)

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}, \quad (2.3)$$

já conhecido para a velocidade da luz, onde μ_0 e ϵ_0 são, respectivamente, a permeabilidade magnética e a permissividade elétrica do vácuo.

A coincidência trouxe o seguinte questionamento: Se os efeitos elétricos e magnéticos podem se propagar no vácuo como ondas transversais à velocidade da luz, por que não considerar a luz uma onda eletromagnética? Foi o que Maxwell assumiu como verdadeiro, apontando então para a compreensão unificada dos processos de produção, absorção e propagação da luz a partir das interações eletromagnéticas (SALVETTI, 2008). Essa unificação foi comprovada experimentalmente por Hertz, em 1887, conforme é descrito na seção 2.2.

2.1.1 Energia Transmitida

Sendo a luz caracterizada como uma onda eletromagnética e as ondas reconhecidas como estruturas físicas que transportam energia, mas não transportam matéria (CAVALCANTE, 2011), torna-se fundamental estabelecer a relação entre a energia transportada pela luz e as características eletromagnéticas que a produzem.

A princípio, sabe-se que a intensidade I de uma onda eletromagnética é definida por (TIPLER, 1995) (CAVALCANTE, 2011)

$$I = \frac{P}{A} = \frac{\mathcal{E}_{\text{méd}}}{A t_m}, \quad (2.4)$$

onde P é a potência (energia média $\mathcal{E}_{\text{méd}}$ por intervalo de medição t_m) transmitida por unidade de área A . Essa relação permite afirmar que a energia média transmitida pela luz é proporcional à intensidade da onda correspondente, ou seja,

$$\mathcal{E}_{\text{méd}} = A t_m I \Rightarrow \mathcal{E}_{\text{méd}} \propto I. \quad (2.5)$$

Por outro lado, sabe-se que a intensidade da onda também pode ser determinada utilizando-se (TIPLER, 1995) (CAVALCANTE, 2011)

$$I = |\vec{S}| = \frac{E_{\text{RMS}} B_{\text{RMS}}}{\mu_0} = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_0 B_0}{\mu_0}, \quad (2.6)$$

onde $|\vec{S}|$ é o módulo do chamado vetor de Poynting, o qual informa a direção de propagação da onda, e E_{RMS} e B_{RMS} são, respectivamente, os valores médios quadráticos ou eficazes de campos elétrico e magnético propagados. Considerando-se a expressão (TIPLER, 1995) (CAVALCANTE, 2011)

$$E_0 = c B_0 \Rightarrow B_0 = \frac{E_0}{c}, \quad (2.7)$$

a qual relaciona as amplitudes desses campos, é possível afirmar que a intensidade da onda é proporcional ao quadrado da amplitude do campo elétrico que a produz, ou seja,

$$I = \frac{1}{2 \mu_0 c} \cdot E_0^2 \Rightarrow I \propto E_0^2. \quad (2.8)$$

A comparação entre as relações apresentadas em (2.5) e (2.8) permite concluir que a energia média transmitida por uma onda eletromagnética é proporcional ao quadrado da amplitude do campo elétrico que a produz, ou seja,

$$\mathcal{E}_{\text{méd}} \propto I \propto E_0^2 \Rightarrow \mathcal{E}_{\text{méd}} \propto E_0^2. \quad (2.9)$$

Portanto, quanto maior a amplitude do campo elétrico, maior será a energia média transmitida e vice-versa (CAVALCANTE, 2011).

2.1.2 Espectro Eletromagnético

A interpretação da luz como onda não foi uma novidade introduzida por Maxwell. No século XVII, o holandês Christian Huygens e outros físicos já consideravam que a luz era formada por ondas. Para explicar a existência das cores, afirmavam que cada uma delas seria descrita por uma relação do tipo (SALVETTI, 2008) (CAVALCANTE, 2011)

$$c = \lambda f, \quad (2.10)$$

onde λ é o comprimento de onda característico de cada cor e f é a frequência de oscilação da onda correspondente. Vale lembrar que o respectivo período de oscilação T é definido pelo inverso dessa frequência (SALVETTI, 2008) (CAVALCANTE, 2011), ou seja,

$$f = \frac{1}{T}. \quad (2.11)$$

Entretanto, no momento em que a luz é considerada uma onda eletromagnética, assume uma concepção mais abrangente. As ondas eletromagnéticas são produzidas pela oscilação de cargas elétricas com frequências que podem assumir quaisquer valores, não se restringindo apenas à faixa de cores percebidas pela visão humana. Portanto, compreendem não somente a origem da luz visível, mas também das ondas de rádio, raios x, raios gama, micro-ondas e outras radiações invisíveis (TIPLER, 1995) (SALVETTI, 2008) (CAVALCANTE, 2011).

Como exemplo, pode ser citado o filamento de uma lâmpada incandescente. Quando aceso, emite uma grande quantidade de ondas eletromagnéticas, sendo a maior parte invisível e produtora de calor. Dessa forma, a lâmpada mais aquece o ambiente do que o ilumina (SALVETTI, 2008).

O conjunto formado por todas as ondas eletromagnéticas conhecidas recebe o nome de espectro eletromagnético (SALVETTI, 2008). Conforme mostrado na Figura 2.2 (da direita pra esquerda), esse espectro contém as ondas de rádio e TV, que possuem as menores frequências e comprimentos de onda entre quilômetros e dezenas de centímetros; as micro-ondas, muito usadas em eletrodomésticos e telefonia celular, com comprimentos de onda entre alguns centímetros e milímetros; a radiação térmica ou infravermelha, com comprimentos de onda entre décimos de milímetros e um micrômetro; a luz visível, com comprimentos de onda que variam aproximadamente entre 700 nanômetros (da luz violeta) e 400 nanômetros (da luz vermelha); radiações com comprimentos de onda inferiores aos da luz visível, tais como ultravioleta, raios x e raios gama (TIPLER, 1995) (CAVALCANTE, 2011).

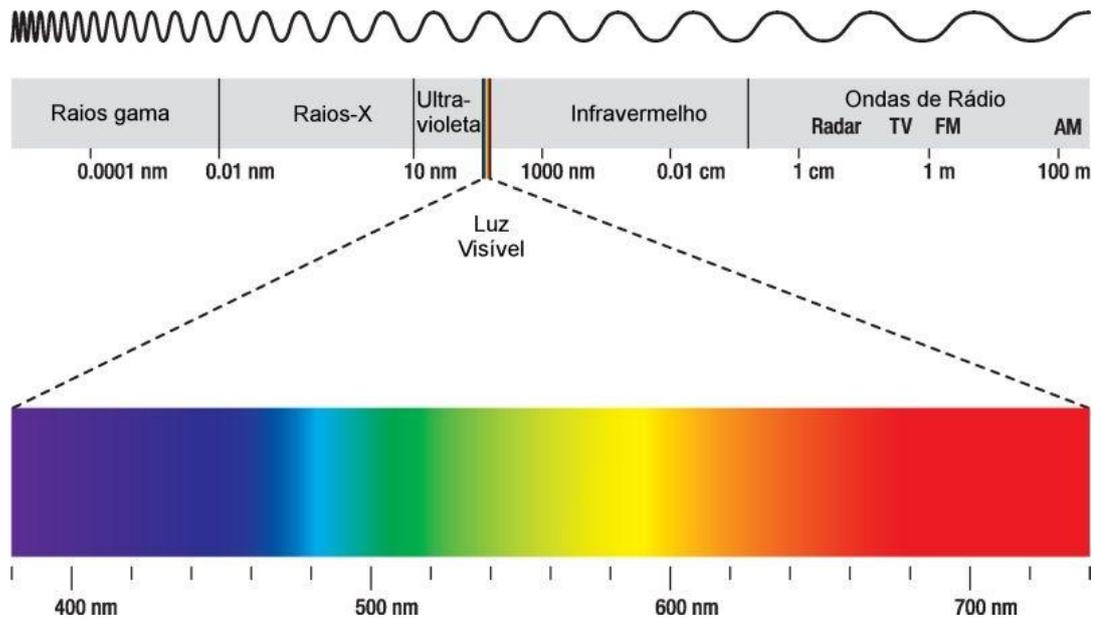


Figura 2.2: O Espectro Eletromagnético
 Fonte: [InfoEscola – Espectro 2018]

2.2 A Descoberta de Hertz

Em 1887, o alemão Heinrich Rudolph Hertz (1857-1894) comprovou experimentalmente a existência das ondas eletromagnéticas (TIPLER, 1995) (SALVETTI, 2008) (CAVALCANTE, 2011) utilizando um aparato similar ao apresentado na Figura 2.3. Nele, um par de hastes metálicas contendo esferas também metálicas nas pontas, sendo uma maior e uma menor em cada haste, foi arranjado de forma a se comportar como um capacitor. A associação em paralelo desse arranjo com um indutor formava o circuito produtor e transmissor de ondas eletromagnéticas. Um anel metálico contendo um pequeno *gap* com duas esferas condutoras menores instaladas nas suas extremidades formava o receptor de ondas.

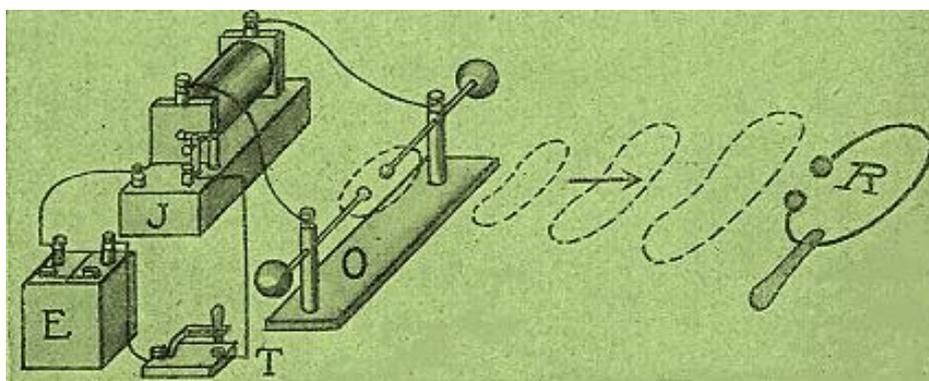


Figura 2.3: O Aparato Experimental de Hertz
 Fonte: [PBX – Pré Quântica 2018]

O fechamento da chave presente no circuito transmissor faz com que o indutor seja percorrido por uma corrente positiva crescente e apresente entre os seus terminais uma tensão positiva decrescente. O capacitor é percorrido por uma corrente positiva decrescente e apresenta entre seus terminais uma tensão positiva crescente, sendo carregado. Devido à relação entre tensão e trabalho, é possível afirmar que a energia fornecida pela fonte encontra-se inicialmente toda armazenada no campo magnético do indutor e se transfere gradativamente ao longo do tempo para o campo elétrico do capacitor. Quando as variações cessam, o indutor não apresenta nenhuma tensão entre seus terminais, forçando o capacitor a se descarregar. Como o respectivo dielétrico é o próprio ar, essa descarga provoca a emissão de um campo elétrico variável para fora do circuito (HALLIDAY, 1996).

A abertura da chave, na sequência, faz com que o indutor seja percorrido por uma corrente positiva decrescente e apresente entre os seus terminais uma tensão negativa crescente. O capacitor é percorrido por uma corrente negativa decrescente e apresenta entre seus terminais uma tensão negativa crescente, sendo carregado no sentido contrário ao observado anteriormente. Considerando-se novamente a relação entre tensão e trabalho, é possível afirmar que a energia residual presente no circuito encontra-se inicialmente toda armazenada no campo magnético do indutor e se transfere gradativamente ao longo do tempo para o campo elétrico do capacitor. Quando as variações cessam, o indutor não apresenta nenhuma tensão entre seus terminais, forçando o capacitor a se descarregar outra vez. Como o respectivo dielétrico é o próprio ar, essa descarga provoca a emissão de um campo elétrico variável para fora do circuito, mas com sentido contrário ao observado anteriormente (HALLIDAY, 1996).

Logo, a alternância periódica entre os dois estados descritos para a chave presente no circuito transmissor promoveria a emissão no ar de um campo elétrico variável oscilando com determinada frequência. Conforme já visto na seção 2.1, um campo desse tipo produz um campo magnético variável que produz novamente um campo elétrico variável e assim por diante, constituindo uma onda eletromagnética que se propaga.

A alternância da chave pode ser substituída pela alimentação do circuito transmissor a partir de uma fonte de tensão alternada. A frequência de oscilação é determinada pelos valores de indutância e capacitância dos componentes empregados no circuito LC do transmissor, conforme descrito em (HALLIDAY, 1996). Valores fora do espectro visível fazem com que a presença da onda seja percebida somente pelas centelhas (descargas eletrostáticas) que ocorrem nos *gaps* entre as esferas menores, tanto no transmissor quanto no receptor, de forma similar à observada em [Youtube – Experiência Hertz 2018].

Com esse aparato e outros acessórios, Hertz também realizou diversas outras experiências que o levaram a conclusão de que as ondas eletromagnéticas se comportam como raios de luz, ou seja, sofrem reflexão em superfícies metálicas, tanto planas quanto esféricas, e refração quando passam de um meio para outro (CAVALCANTE, 2011).

Observou ainda que as descargas eletrostáticas eram intensificadas pela incidência de luz sobre os componentes metálicos do experimento. Devido à produção de eletricidade a partir da luz, esse fenômeno foi chamado de Efeito Fotoelétrico. Anos mais tarde, ficou claro que se tratava da ejeção de elétrons presentes nas estruturas dos componentes metálicos pela ação da energia inserida no sistema pela iluminação do mesmo. (CAVALCANTE, 2011).

2.3 A Investigação de Lenard

A interpretação da luz como onda eletromagnética facilitou a explicação do Efeito Fotoelétrico por meio de um modelo teórico no qual um elétron atingido pela luz passa a oscilar na mesma frequência até absorver energia suficiente para vencer a força de atração que o prende na estrutura do metal. Conforme já definido pela equação (2.5), quanto maior a intensidade da luz incidente, maior será a energia fornecida pela mesma, fazendo com que mais elétrons sejam arrancados com mais energia da estrutura (CAVALCANTE, 2011).

Por volta de 1900, o alemão Phillip Von Lenard realizou uma série de experiências com o intuito de testar a validade desse modelo. Para tanto, utilizou um aparato cujo diagrama esquemático é mostrado na Figura 2.4 (CAVALCANTE, 2011) (TIPLER, 1995).

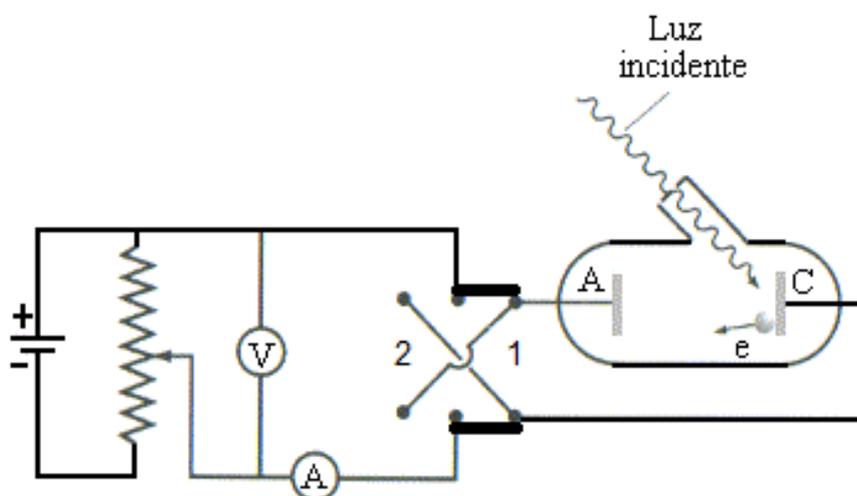


Figura 2.4: O Aparato Experimental de Lenard
 Fonte: [EAD – Aula-4 2018]

Nele, a fonte aplica uma tensão contínua V nas placas encerradas no tubo de vidro, produzindo um campo elétrico uniforme entre elas. Devido à presença desse campo elétrico, elétrons livres são armazenados no catodo C. Quando esse catodo recebe a incidência de luz, uma corrente elétrica é estabelecida entre o catodo C e o anodo A e detectada pelo amperímetro, acusando a ocorrência do Efeito Fotoelétrico (TIPLER, 1995).

Pelo modelo estabelecido, o fenômeno deveria ocorrer para luz emitida em qualquer frequência. Somente a intensidade da luz intensificaria, de forma proporcional, a corrente estabelecida. Entretanto, quando uma luz vermelha era aplicada sobre o catodo com baixa intensidade, nenhuma corrente era detectada. Aumentando-se a intensidade dessa luz, o mesmo resultado era obtido. Quando a luz era azul, a corrente se estabelecia, independentemente da intensidade adotada. Dessa forma, o modelo ondulatório da luz foi posto em dúvida. Diante desses resultados era necessário pensar de uma forma diferente ou pelo menos mais específica em relação ao próprio fenômeno (SALVETTI, 2008).

2.4 A Hipótese de Einstein

A luz visível tem comprimentos de onda da ordem de meio milésimo de mm (0,0005 mm) e o raio clássico do elétron é da ordem de 10^{-15} m, ou seja, na interação entre ambos, o elétron “percebe” somente uma parte da onda, sendo assim capaz de trazer informações sobre qual é sua composição (SALVETTI, 2008).

Ao considerar a luz refletindo numa superfície de vidro, por exemplo, ocorre a interação da luz com os elétrons que estão presos aos átomos que, ligados entre si, formam o vidro. Então, de certa forma, o estudo da reflexão também é o estudo da interação da onda eletromagnética com os elétrons. A reflexão não revela características microscópicas da luz porque, ao interagir com os elétrons do material, esses continuam presos aos átomos, que por sua vez se mantêm ligados entre si e, desse modo, a interação ocorre entre a luz e um todo macroscópico que forma o material (SALVETTI, 2008). O fato de o vidro ser um material isolante reforça a maior dificuldade na liberação de elétrons (HALLYDAY, 1996).

Quando a luz atinge superfícies metálicas, por exemplo, ela transfere sua energia, ou parte dela para alguns elétrons que são arrancados do metal. A energia transferida da luz para o elétron que consegue sair do metal é utilizada em parte para liberá-lo do metal e em parte para movimentá-lo. Como os elétrons estão ligados ao metal de diversas maneiras, eles são liberados com diferentes energias de movimento e, portanto, com várias velocidades (SALVETTI, 2008). O fato de os materiais metálicos serem condutores reforça a maior facilidade na liberação de elétrons (HALLYDAY, 1996).

Para que a luz vermelha não consiga transferir ao elétron energia suficiente para arrancá-lo, é porque o elétron não está interagindo com toda a energia da luz incidente, mas apenas com parte dela (a parte “vista” pelo elétron). Ou seja, o “pedaço de onda” da luz vermelha que interage com o elétron não tem energia suficiente para vencer a sua ligação ao metal, independentemente da respectiva intensidade. Já no caso da luz azul, a quantidade de energia é suficiente para isso (SALVETTI, 2008).

Uma tentativa de explicar esse resultado leva em consideração que a frequência da luz azul é maior que a da luz vermelha. Como a luz azul arranca elétrons e a vermelha não, a energia “vista” pelo elétron deve ser proporcional à frequência (SALVETTI, 2008), ou seja,

$$\mathcal{E} \propto f. \quad (2.12)$$

Essa relação, embora simples, entra em desacordo com a teoria da luz como onda eletromagnética (SALVETTI, 2008). Entretanto, pode ser reforçada com

base no menor comprimento de onda que a luz azul tem em relação à luz vermelha. Esse fato induz o pensamento de que o “pedaço de onda” mostrado pela luz azul apresenta mais “detalhes” do que o mostrado pela luz vermelha. Como são “vistas” mais oscilações, mais energia se apresenta.

Essa hipótese foi formulada por Albert Einstein em 1905. Sabendo que a energia fornecida pela luz é resultante da soma entre a energia necessária para romper a ligação do elétron à estrutura e a energia de movimentação do elétron, e, considerando que o “pedaço de onda” da luz incidente representa uma forma de quantização da luz (inspirada na quantização da matéria de Planck, formulada alguns anos antes), Einstein definiu a relação (TIPLER, 1995) (SALVETTI, 2008) (CAVALCANTE, 2011)

$$\frac{m v^2}{2} = h f - W = h (f - f_0) , \quad (2.13)$$

onde m é a massa do elétron arrancado, v é a sua velocidade, h é a constante de Planck, W é a quantidade de energia necessária para romper a ligação de cada elétron à estrutura do material iluminado e f_0 é a frequência mínima de ocorrência do fenômeno. O “pedaço de onda” ou *quantum* de luz percebido pelo elétron recebeu posteriormente o nome de fóton.

Capítulo 3

Referenciais Teórico-Experimentais

A confecção do kit didático e de uma metodologia para sua aplicação em sala de aula foi fundamentada com base em algumas propostas encontradas na literatura, as quais serão descritas a seguir.

Inicialmente, foi tomada como referência a proposta apresentada por (CAVALCANTE, 2002). O trabalho teve como intenção mostrar como uma aula dinâmica e ao mesmo tempo interdisciplinar, abordando um tema fascinante como o comportamento dual da luz, suas aplicações tecnológicas e implicações filosóficas, pode ser criada utilizando-se recursos experimentais e computacionais.

Nele, é feita uma abordagem conceitual e geral da descoberta do Efeito Fotoelétrico e, ao longo da explanação executada, são indicados os recursos educacionais que podem ser utilizados em uma prática pedagógica. Dentre esses recursos, são propostas duas simulações consideráveis para o desenvolvimento deste trabalho.

A primeira reproduz as principais características do experimento de Lenard, permitindo o ajuste da intensidade e da frequência da luz incidente, além da tensão aplicada entre as placas, a fim de viabilizar uma demonstração explícita da ocorrência ou não do fenômeno. Esse tipo de simulação é amplamente difundido entre os autores de trabalhos voltados para abordagens experimentais e pode ser facilmente encontrado na internet. O mais conhecido é o simulador PHET, cuja demonstração do Efeito Fotoelétrico pode ser baixada em [PHET – Photoelectric 2018]. Sua aparência é mostrada na Figura 3.1.

A segunda apresenta um circuito concebido para o levantamento das curvas características (corrente x tensão) de dois LEDs (um vermelho e um verde) e a posterior determinação da constante de Planck, a partir dos valores encontrados. Seu diagrama esquemático é apresentado na Figura 3.2. As chaves K_v e K_d permitem selecionar o LED a ser analisado.

Com a variação da tensão aplicada, foram obtidas as curvas apresentadas na Figura 3.3. Os pontos onde as retas tangentes a essas curvas tocam o eixo horizontal informam o valor mínimo de tensão que cada LED exige para permitir a passagem de corrente elétrica. Esse valor é conhecido como limiar de condução.

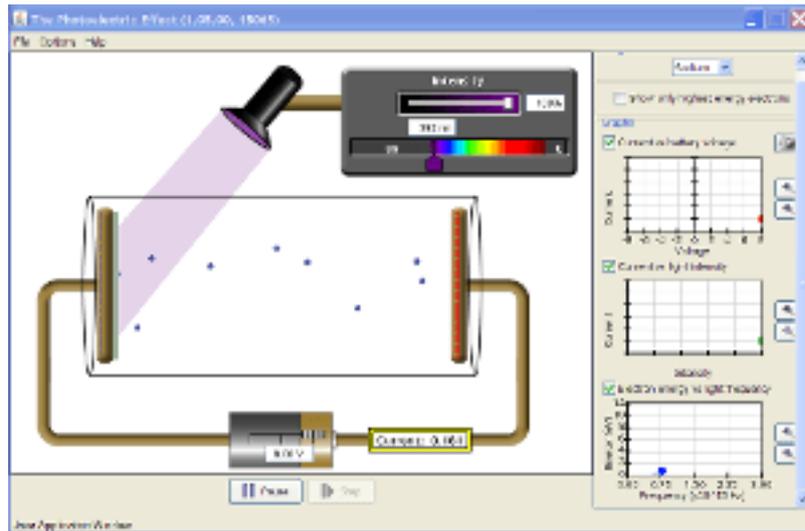


Figura 3.1: O Simulador PHET do Efeito Fotoelétrico
Fonte: [FisTec&Ensino – Fotoelétrico 2018]

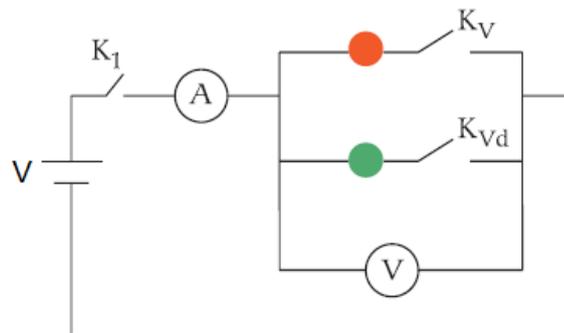


Figura 3.2: Circuito Concebido para a Determinação da Constante de Planck
Fonte: (CAVALCANTE, 2002)

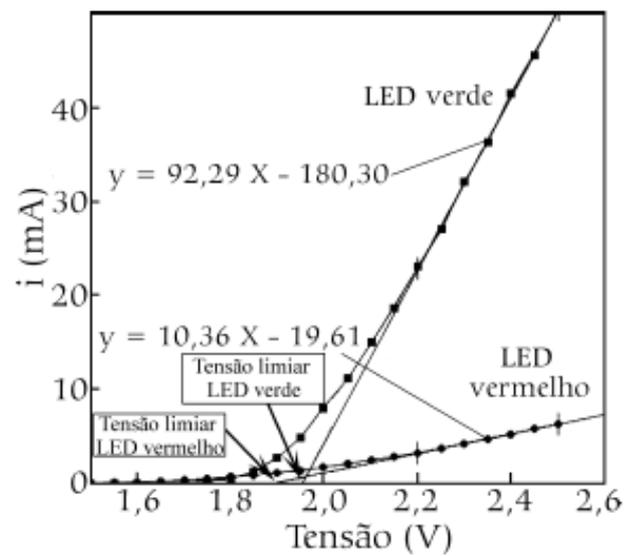


Figura 3.3: Curvas Características Obtidas com a Experimentação Proposta
Fonte: (CAVALCANTE, 2002)

Com os respectivos limiares estabelecidos, a constante de Planck h foi calculada para cada LED, utilizando-se a expressão

$$e V_{\text{limiar}} = h f \Rightarrow h = \frac{e V_{\text{limiar}}}{f}, \quad (3.1)$$

onde $h \cong 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ é o valor esperado para constante de Planck, $e \cong 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ é a carga do elétron, V_{limiar} é o limiar de condução do LED analisado e f é a frequência correspondente à cor da luz emitida por esse LED. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.1. O mesmo experimento é realizado com componentes eletrônicos reais em (MOURA, 2011).

Tabela 3.1: Resultados Obtidos para a Constante de Planck

	LED vermelho	LED verde
Frequência ($\times 10^{14}$ Hertz)	4,5	5,3
V (Volts)	1,89	1,95
Constante de Planck ($\times 10^{-34}$ J.s)	6,66	5,93
Valor médio para a Constante de Planck ($\times 10^{-34}$ J.s)	6,29	

Fonte: (CAVALCANTE, 2002)

3.1 Os LEDs

Segundo (MOURA, 2011), o diodo emissor de luz ou LED é um dispositivo constituído pela junção de dois materiais semicondutores dopados (termo que se refere à adição de outro elemento ou composto) formando uma junção do tipo p-n. Emite uma luz praticamente monocromática (somente um comprimento de onda). A cor produzida é definida pela composição química do material semicondutor. Os LEDs mais comuns são fabricados com ligas de gálio, arsênio e alumínio. A variação das proporções de gálio e alumínio permite a fabricação de LEDs emissores de cores na faixa do espectro visível e do infravermelho. Por exemplo, o arsenieto de gálio (GaAs) é utilizado no LED infravermelho. A dopagem com fósforo, dependendo da concentração, permite a produção de LEDs vermelhos ou amarelos. O fosfeto de gálio com dopagem de nitrogênio está relacionado às cores verde e amarelo. Hoje em dia, com o uso de outros materiais consegue-se

fabricar LEDs azuis, violetas e até mesmo ultravioletas. Existem ainda os LEDs brancos, os quais são geralmente LEDs azuis revestidos com uma camada de fósforo do mesmo tipo usado nas lâmpadas fluorescentes. A estrutura de um LED é mostrada na Figura 3.4(A).

A aplicação de uma diferença de potencial V diretamente polarizada entre os terminais do LED injeta elétrons e lacunas (ou buracos) nas bandas de condução e de valência do material tipo n e p, respectivamente, estabelecendo uma corrente elétrica que atravessa a junção p-n, conforme ilustrado na Figura 3.4(B). A recombinação desse par elétron-buraco resulta na liberação de uma energia eletromagnética que depende da energia do *gap*, ou seja, a quantidade de energia necessária para que o elétron efetue a transição, conforme apresentado na Figura 3.4(C).

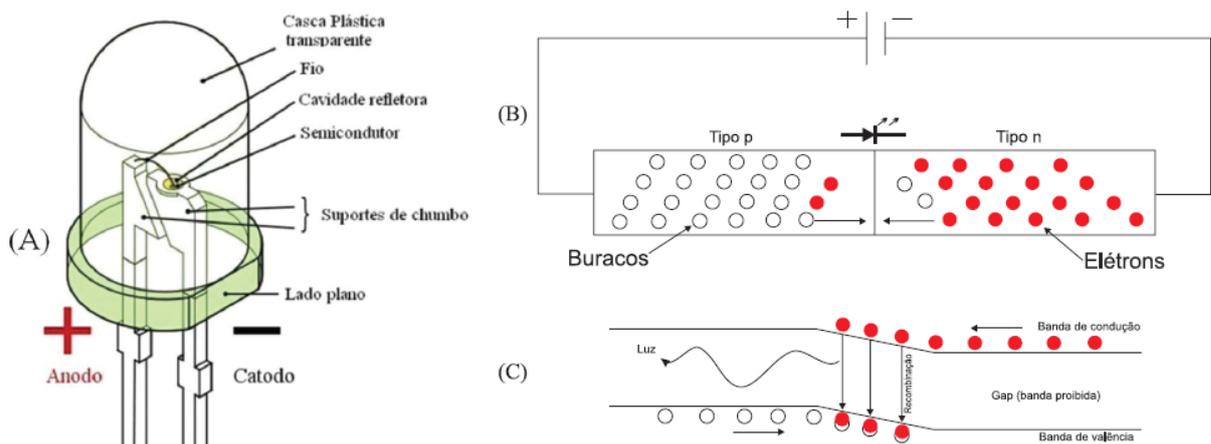


Figura 3.4: O Diodo Emissor de Luz ou LED
Fonte: (MOURA, 2011)

3.2 LEDs como Receptores

Neste trabalho, LEDs foram empregados tanto como emissores como receptores. Apesar da utilização como receptor não se caracterizar como a finalidade natural de um LED, a mesma foi bem sucedida (conforme demonstram os capítulos posteriores). Além disso, possui referência na literatura analisada. Em (CAVALCANTE; HAAG, 2005), é apresentada uma nova proposta para a determinação da constante de Planck utilizando LEDs como sensores espectrais seletivos da radiação emitida por um filamento de tungstênio aquecido (uma lâmpada incandescente). Adicionalmente, é também apresentada uma proposta de verificação da lei de Stefan-Boltzmann que permite a abordagem experimental da distribuição de energia de um corpo negro.

Capítulo 4

O Kit Didático

O produto resultante deste trabalho é um kit didático que, sintetizando conceitos abordados nos capítulos anteriores, consegue demonstrar a ocorrência (ou não) do efeito fotoelétrico em função da variação de intensidade e de frequência da luz incidente sobre um material receptor, fornecendo aos alunos uma alternativa experimental diferenciada para a construção do conhecimento sobre o fenômeno.

Elaborado com LEDs e outros componentes de baixo custo presentes no cotidiano, é de fácil reprodução e operação, além de compacto o suficiente para viabilizar a execução de atividades experimentais em qualquer sala de aula, sendo assim muito útil principalmente para alunos e professores do Ensino Médio os quais, muitas vezes, não dispõem de laboratórios, seja pela restrição de acesso ou até mesmo pela inexistência destes.

Seu desenvolvimento passou por três etapas de prototipagem, conforme descrito pelas seções 4.1, 4.2 e 4.3. Mesmo não sendo esse o foco, em todas as etapas foi levado em consideração o suporte à realização de outras atividades experimentais propostas na literatura tais como a determinação das curvas características de alguns LEDs e da constante de Planck.

4.1. O Primeiro Protótipo

Concebido no segundo semestre de 2016, apresentava como fonte luminosa um LED RGB, cuja pinagem é mostrada na Figura 4.1.

Esse tipo de LED contém três emissores de luz (vermelho, verde e azul) embutidos em um único encapsulamento. O acendimento individual de cada emissor ou simultâneo de dois destes permite a produção de luz visível em sete cores (frequências) distintas: vermelho, laranja, amarelo, verde, ciano, azul e violeta.

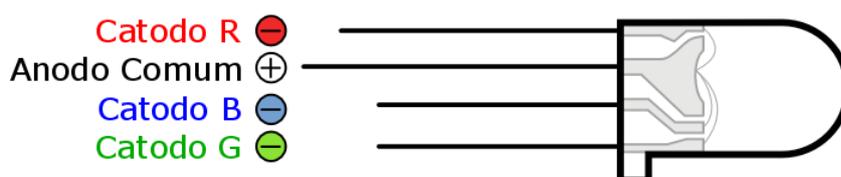


Figura 4.1: Pinagem do LED RGB
Fonte: [Pandora – RGB 2018]

Para variar o brilho (intensidade) do LED RGB foi empregada uma técnica de controle conhecida como modulação por largura de pulso ou PWM.

Aplicando essa técnica, o LED é alimentado por pulsos periódicos de tensão, cuja duração (largura) pode ser ajustada. A princípio, o efeito percebido seria o LED alternando entre um estado de luz acesa com brilho máximo e um estado de luz apagada. No entanto, utilizando-se um intervalo de repetição suficientemente reduzido, a chamada persistência do olho humano faz com que a percepção seja somente da média entre os dois estados, ou seja, uma luz acesa com brilho intermediário. Esse estado intermediário é definido pela razão entre a duração de um pulso e o intervalo de repetição – a chamada razão cíclica ([Citisystems – PWM 2017]).

Na Figura 4.2, são apresentados alguns exemplos de sinais PWM, onde os valores 0V e 5V caracterizam, respectivamente, os estados de luz apagada e luz acesa com brilho máximo, enquanto que T representa o intervalo de repetição dos pulsos produzidos. Na Tabela 4.1, estão descritos os valores característicos empregados no acionamento do LED RGB.

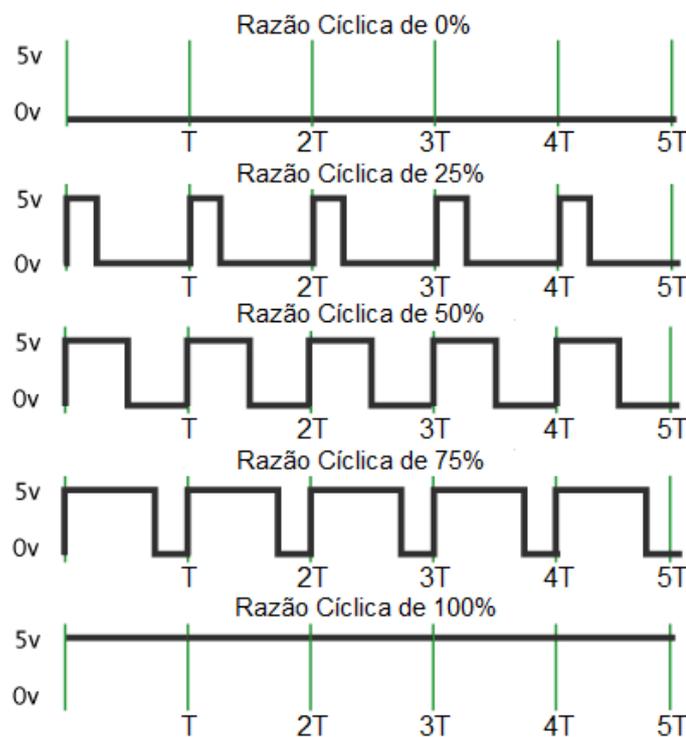


Figura 4.2: Alguns Exemplos de Sinais PWM
Fonte: [Bóson – PWM 2018]

Tabela 4.1: Valores Característicos Empregados no Acionamento do LED RGB

Faixas de Cor	Níveis de Intensidade ¹		
	Vermelho (R)	Verde (G)	Azul (B)
Vermelho	0 a 255	0	0
Laranja / Amarelo	0 a 255	0 a 255	0
Verde	0	0 a 255	0
Ciano	0	0 a 255	0 a 255
Azul	0	0	0 a 255
Violeta	0 a 255	0	0 a 255

Fonte: Acervo Pessoal.

Como sensor ou receptor de luz, o protótipo disponibilizava um LDR. Esse componente é um resistor cujo valor de resistência varia em função da quantidade (intensidade) de luz captada pelo mesmo. Apresenta valores mais baixos sendo iluminado e valores mais altos quando é mantido no escuro. Além disso, tem sensibilidade limitada à faixa da luz visível (VALADARES, 1998). Seu aspecto construtivo e sua curva de sensibilidade podem ser visualizados na Figura 4.3.

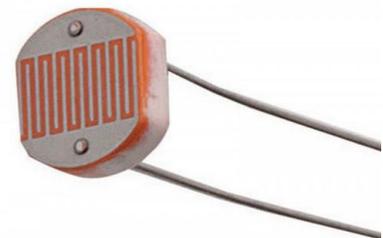
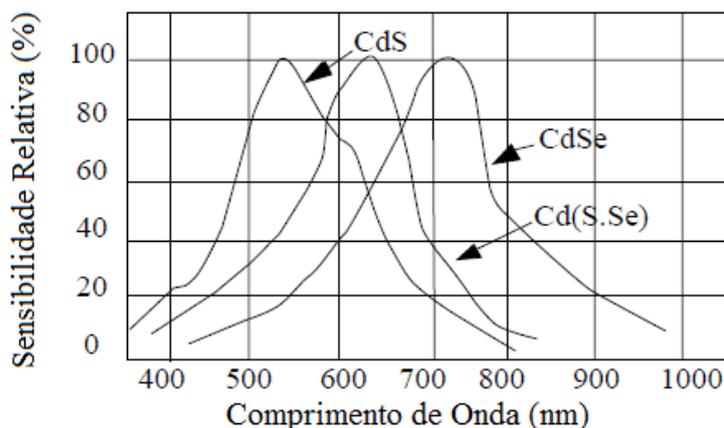


Figura 4.3: Aspecto Construtivo e Curva de Sensibilidade do LDR
 Fonte: [Components101 – LDR 2018] e [Yourduino – Photoresistor 2018]

¹ A escala RGB é definida por três valores inteiros entre 0 e 255 que, no contexto apresentado, correspondem a valores de razões cíclicas entre 0 a 100%.

O conjunto foi integrado por um Arduino. Esse dispositivo é um tipo de plataforma que executa a chamada computação física ou embarcada. Como tal, permite a conexão de componentes eletrônicos (como um LED ou um LDR, por exemplo) e pode ser programado de forma a controlá-los. Sendo assim, é capaz de interagir com o ambiente onde se encontra, constituindo-se numa opção muito prática para a confecção de pequenos protótipos (McROBERTS, 2011).

Sua placa tem arquitetura aberta, podendo ser reproduzida. É comandada por um microcontrolador do tipo *Atmel AVR*[®] e disponibiliza portas digitais e entradas analógicas para a conexão dos componentes eletrônicos necessários. As portas digitais permitem a entrada e saída de dados do tipo 0 ou 1 (nível baixo ou alto), sendo algumas capazes de fornecer sinais PWM. As entradas analógicas realizam a aquisição de tensões entre 0 e VCC (tensão de alimentação) e sua conversão em valores digitais inteiros de 10 bits, os quais podem variar entre 0 e 1024. Conta ainda com uma porta USB ou outra compatível, destinada à conexão com um computador a fim de permitir sua programação (McROBERTS, 2011).

No protótipo foi empregada uma placa do tipo UNO, cujas principais características são mostradas na Figura 4.4.

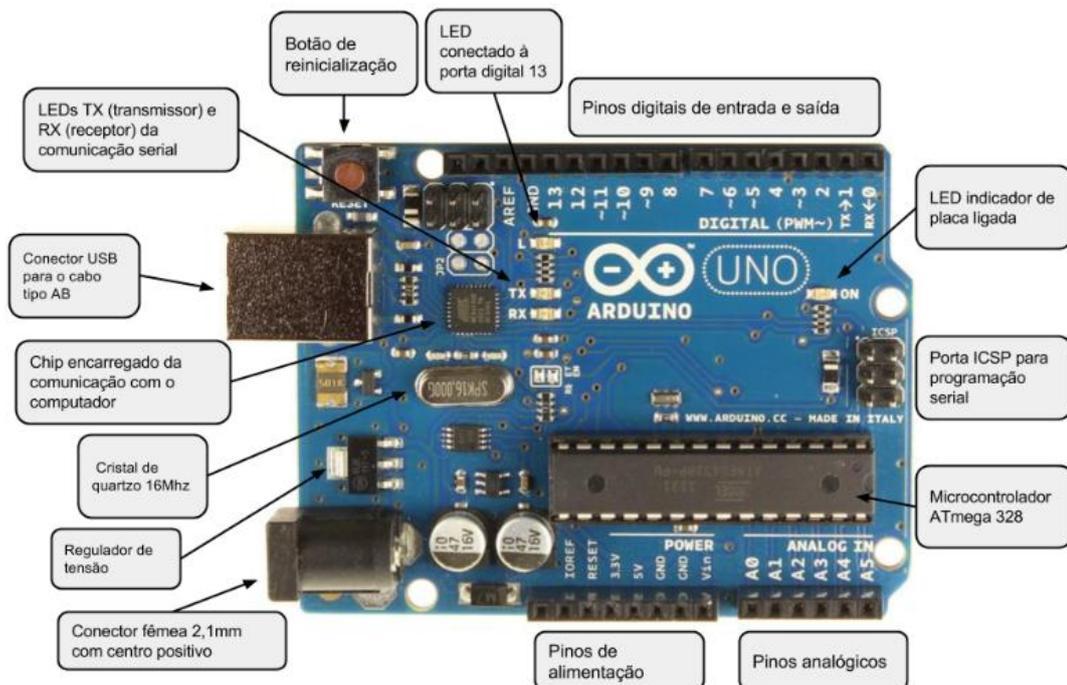


Figura 4.4: O Arduino UNO e suas Principais Características
Fonte: [Natalmakers – UNO 2018]

A programação é efetuada por meio de um *software* livre conhecido como Arduino IDE. Esse *software* permite ao usuário editar, compilar e transferir para a placa o chamado código-fonte ou *sketch*. Cada *sketch* é composto por uma rotina de instruções que são baseadas na linguagem C e definem as tarefas a serem executadas pelo Arduino. O software ainda traz exemplos de *sketches* utilizados em aplicações básicas e exibe variáveis do processo executado no chamado *serial monitor* (McROBERTS, 2011). A interface gráfica do Arduino IDE, mostrando um *sketch* ativo e o *serial monitor* aberto, pode ser visualizada na Figura 4.5.

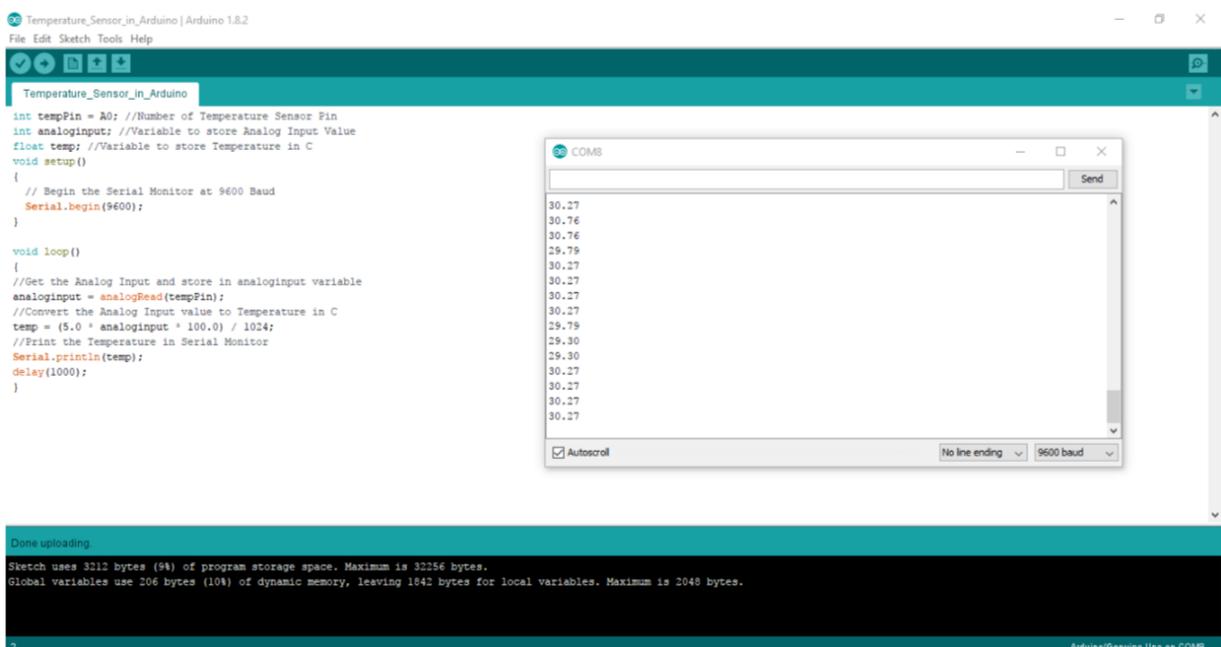


Figura 4.5: Interface Gráfica do Arduino IDE com *Sketch* Ativo e *Serial Monitor* Aberto
Fonte: [Iotguilder – ArduinoIDE 2018]

O *sketch* elaborado para o controle do protótipo pode ser encontrado no Apêndice D deste trabalho. Dentre outras coisas, ele determina que o *serial monitor* forneça os seguintes resultados:

- O código RGB que representa a cor (frequência) da luz emitida;
- O percentual de intensidade (brilho) da luz emitida;
- A tensão obtida entre os terminais do LDR em função da luz percebida;
- A corrente que atravessa o LDR em função da luz percebida.

Em dezembro de 2016, durante a apresentação do trabalho final da disciplina de Atividades Experimentais para o Ensino de Física, o protótipo foi submetido à avaliação de uma banca composta por professores do MNPEF – Polo 24 – UFJF / IF Sudeste MG. A principal crítica recebida foi sobre a interface utilizada para a demonstração dos resultados. A mesma foi considerada muito pouco atrativa e esclarecedora do fenômeno investigado. Em função dessa avaliação e de algumas situações observadas posteriormente, o conjunto acabou sendo totalmente reformulado.

4.2. O Segundo Protótipo

Segundo (SALVETTI, 2008), o sistema de visão humano pode responder da mesma forma a dois estímulos luminosos considerados fisicamente diferentes. Por exemplo, uma luz amarela pode parecer visualmente indistinguível da mistura entre uma luz verde e uma luz azul.

Essa característica foi explorada na concepção do primeiro protótipo para se produzir uma maior quantidade de cores visíveis. No entanto, trouxe posteriormente o seguinte questionamento: será que os sensores de luz eletrônicos percebem as cores secundárias (resultantes de combinação) da mesma forma que o olho humano?

Na dúvida sobre a resposta, a fonte luminosa foi restringida à produção de cores primárias (vermelho, verde e azul) com a substituição do LED RGB pelos três LEDs correspondentes. Para atender a essa modificação, foi confeccionado um novo *sketch*, o qual pode ser encontrado no Apêndice E deste trabalho. O mesmo prevê o acendimento individual ou simultâneo dos LEDs, a fim de garantir a efetiva variação da frequência da luz emitida. Além disso, determina que o *serial monitor* forneça os valores de tensão e corrente do respectivo LED aceso, possibilitando a obtenção de resultados quantitativos, quando necessários.

Expandindo o mesmo raciocínio para o brilho da luz emitida, também não se tinha certeza se sensores de luz eletrônicos seriam capazes de perceber as variações características de um sinal PWM como um único nível de intensidade. Sendo assim, os sinais PWM fornecidos pelo Arduino para alimentação dos LEDs foram substituídos por uma tensão, cujo valor era ajustado por um potenciômetro. Dessa forma, garantiu-se a efetiva variação da intensidade da luz emitida.

Nesse contexto, a utilização do LDR como sensor de luz também foi analisada. Os testes realizados demonstraram que os valores de tensão e corrente medidos sobre o dispositivo se alteravam muito pouco em função da variação de frequência da luz incidente, mas consideravelmente em função da variação de intensidade. Logo, o comportamento apresentado era o oposto do necessário à demonstração do Efeito Fotoelétrico, indicando a substituição do dispositivo.

A fim de corrigir essa falha, passaram a ser disponibilizados como receptores de luz um LED verde e um LED azul, inseridos em arranjos que permitem posicioná-los adequadamente em relação à fonte luminosa e realizar sua rápida conexão ou desconexão do conjunto.

Como nova interface para a apresentação de resultados foi adotado um LED branco operando de modo análogo ao amperímetro do experimento de Lenard, ou seja, demonstrando a presença de corrente em maior ou menor intensidade pelo seu acendimento com maior ou menor brilho. No entanto, foi necessária a utilização de um transistor para acioná-lo com energia da fonte de alimentação, sendo esse acionamento controlado pela incidência de luz nos LEDs receptores, visto que os mesmos não fornecem energia suficiente para excitá-lo diretamente, mas conseguem excitar a base do transistor, fazendo conduzir uma corrente entre os outros dois terminais (coletor e emissor).

Contemplando todas as modificações descritas, um novo protótipo foi finalizado em junho de 2017. O resultado pode ser visualizado na Figura 4.6.

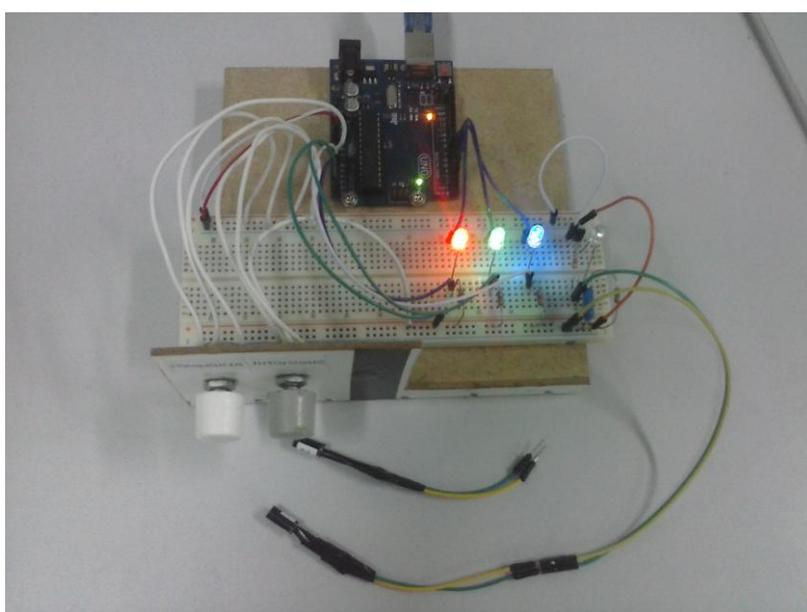


Figura 4.6: O Segundo Protótipo
Fonte: Acervo Pessoal.

Na mesma época, foi avaliado durante a apresentação de um trabalho da disciplina Processos e Sequências de Ensino e Aprendizagem, a qual é ofertada pelo MNPEF – Polo 24 – UFJF / IF Sudeste MG. Não recebeu nenhuma crítica substancial em relação a modificações na nova estrutura.

Em julho de 2017, foi empregado como kit didático durante a primeira aplicação deste trabalho realizada em sala de aula (conforme descrito na seção 5.1).

4.3. O Terceiro Protótipo

As modificações realizadas do primeiro para o segundo protótipo ocasionaram a subutilização do Arduino, cuja função ficou limitada ao ajuste de frequência da luz emitida (escolha da cor) e às possíveis medições das grandezas investigadas.

Considerando que uma chave seletora e um multímetro poderiam executar, respectivamente, as mesmas tarefas com menor custo, um terceiro protótipo foi confeccionado, em julho de 2017, adaptando a estrutura do segundo protótipo para operar sem a necessidade de um Arduino. O resultado é apresentado na Figura 4.7. Seus detalhes podem ser explorados no Apêndice A deste trabalho, onde é descrito o respectivo roteiro de montagem. Por fim, Cabe destacar que o mesmo foi empregado como kit didático durante as três aplicações realizadas em sala de aula (conforme descrito nas seções 5.1, 5.2 e 5.3).

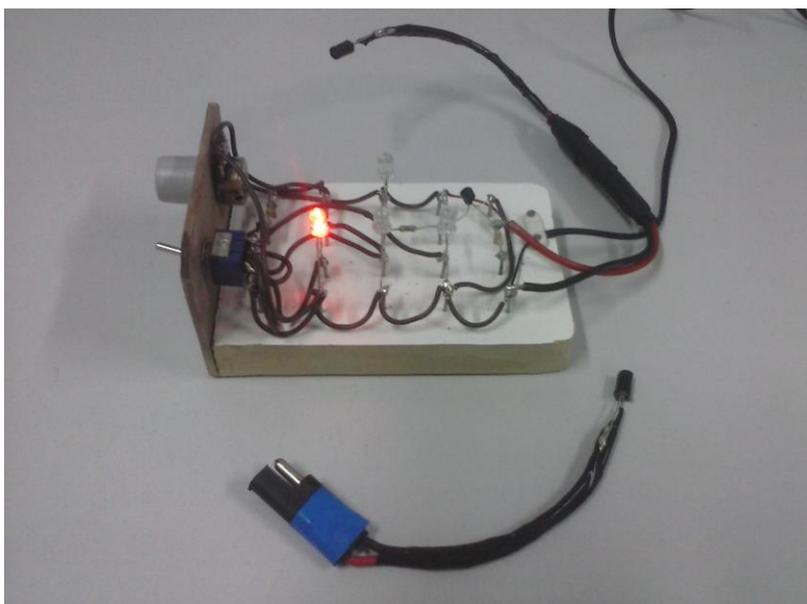


Figura 4.7: O Terceiro Protótipo
Fonte: Acervo Pessoal.

Capítulo 5

Metodologia e Aplicação

Conforme já definido anteriormente, o kit didático desenvolvido tem o objetivo de promover a construção de conceitos fundamentais à compreensão do Efeito Fotoelétrico por meio de uma abordagem experimental diferenciada que pode ser realizada em qualquer sala de aula.

Visando comprovar sua efetividade no cumprimento desse objetivo, o mesmo foi submetido a três aplicações, sendo todas realizadas no Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais (IF Sudeste MG) – Campus Juiz de Fora. Para também fornecer o suporte necessário a professores interessados na sua utilização, uma sequência didática foi montada com base nessas aplicações.

As duas primeiras foram realizadas no primeiro e segundo semestres letivos de 2017, com alunos do curso de Licenciatura em Física, ocupando quatro aulas de 50min (sendo duas por semana) da disciplina de Física Moderna Experimental I. A terceira foi realizada no segundo semestre letivo de 2017, com alunos do terceiro ano do curso Técnico em Edificações Integrado ao Ensino Médio, ocupando quatro aulas de 50min (sendo duas por semana) da disciplina de Instalações Elétricas e Telefônicas. Dessa forma, foram contemplados dois tipos distintos de público-alvo atendidos pela instituição. Em todas as aplicações, o número de aulas foi limitado pelos respectivos planejamentos das disciplinas, os quais já haviam sido elaborados previamente.

5.1. Primeira Aplicação

No dia 21 de julho de 2017, os cinco alunos da turma selecionada foram reunidos no Laboratório de Física Moderna. A primeira aula foi iniciada com o esquema da Figura 5.1, no qual um LED é representado por dois cristais de tipos diferentes do mesmo material semicondutor, separados por um material isolante que pode ser o ar ou o vácuo, por exemplo. O primeiro cristal é projetado para se comportar como receptor de elétrons, sendo identificado por sinais positivos. O segundo é projetado para se comportar como doador de elétrons, sendo identificado por sinais negativos. Esse esquema permitiu afirmar aos alunos que o dispositivo conduz corrente elétrica sob duas circunstâncias:

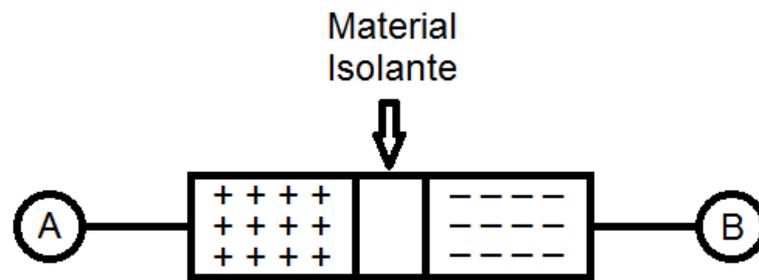


Figura 5.1: Esquema Representativo de um LED
Fonte: Acervo Pessoal.

1. Quando uma diferença de potencial (DDP) é aplicada entre os terminais A e B do dispositivo, o campo elétrico estabelecido fornece energia suficiente para que alguns elétrons saltem do cristal (-). Atraídos pelo cristal (+), esses elétrons liberam a energia recebida sob a forma de luz, fazendo o LED operar como emissor;
2. Quando o material é excitado por uma fonte de luz externa, esta fornece energia suficiente para que alguns elétrons saltem do cristal (-). Atraídos pelo cristal (+), esses elétrons liberam a energia recebida sob a forma de um campo elétrico que produz uma DDP entre os terminais A e B, fazendo o LED operar como receptor.

Porém, destacou-se em ambos os casos que:

A condução de corrente elétrica ocorre somente quando a energia recebida pelos elétrons ejetados é suficiente para vencer a barreira de potencial (função trabalho + material isolante) oferecida pelo conjunto. Também foi esclarecido que a função trabalho representa a quantidade de energia necessária para romper a ligação do elétron ao cristal (-).

Com base nessas informações, o foco da abordagem foi direcionado para a operação do LED como receptor. Pelo princípio da conservação, foi estabelecido que a quantidade de energia fornecida pela luz a cada elétron liberado é dada por

$$\mathcal{E}_{\text{luz}} = W + \frac{m v^2}{2}, \quad (5.1)$$

onde \mathcal{E}_{luz} é a quantidade de energia transferida, W é quantidade de energia necessária para romper a ligação de cada elétron à estrutura do material iluminado e $\frac{m v^2}{2}$ é a energia cinética de cada elétron arrancado. A seguir, foi apresentada uma definição para o Efeito Fotoelétrico:

É a ejeção de elétrons que ocorre em um material, geralmente condutor, quando este é iluminado.

Considerando que o fenômeno também pode ser explicado a partir da relação energética apresentada em (5.1), chegou-se à conclusão que suas características podem ser verificadas com experimentos baseados em LEDs. Como a luz pode ter seu brilho ajustado pela variação de intensidade e sua cor ajustada pela variação de frequência, admitiu-se a necessidade de verificar como essas grandezas influenciam na quantidade de energia transferida para os elétrons ejetados.

A segunda aula foi iniciada com uma apresentação do segundo protótipo do kit didático e de instruções para o seu manuseio, conforme apresentado na Figura 5.2.

Prosseguindo, foi proposta a execução de uma atividade experimental com o kit apresentado, a fim de verificar a influência da intensidade e da frequência da luz na ocorrência do Efeito Fotoelétrico. Os alunos foram orientados a observar e registrar o comportamento do LED branco (indicador de ocorrência do fenômeno) em função da incidência de luz vermelha, verde e azul, com baixa e alta intensidade, sobre os dois LEDs receptores disponibilizados (um verde e um azul). Essa execução é mostrada na Figura 5.3. Com base nos comportamentos observados para a emissão de luz vermelha e de luz azul, os alunos foram questionados, ao final da atividade, com a seguinte pergunta:

Qual é a grandeza que influencia na quantidade de energia fornecida pela luz, ou seja, determina a ocorrência do efeito fotoelétrico: intensidade ou frequência? Como você chegou a essa conclusão?



Figura 5.2: Apresentação do 2º Protótipo do Kit Didático durante a Primeira Aplicação
Fonte: Acervo Pessoal.



Figura 5.3: Execução da Atividade Experimental durante a Primeira Aplicação
Fonte: Acervo Pessoal.

No dia 28 de julho de 2017, quatro dos cinco alunos da mesma turma foram reunidos no Laboratório de Inovação Tecnológica. A terceira aula foi preenchida com a discussão dos resultados obtidos durante a execução da atividade experimental e sua relação com a hipótese de Einstein (descrita na seção 2.4), consolidando a explicação correta do fenômeno.

Visando reforçar o conhecimento construído nas aulas anteriores, a quarta e última aula foi iniciada com a proposta de se repetir a atividade experimental, porém buscando um objetivo diferente do inicial: determinar a cor de LEDs receptores não identificados sem acendê-los previamente.

A conclusão do terceiro e último protótipo do kit didático desenvolvido, ocorrida em meio ao intervalo de uma semana entre a segunda e a terceira aula, permitiu sua utilização na atividade proposta. Antes, porém, foram apresentadas as devidas instruções para seu manuseio, conforme apresentado na Figura 5.4. A execução realizada pelos alunos pode ser visualizada na Figura 5.5.



Figura 5.4: Apresentação do 3º Protótipo do Kit Didático durante a Primeira Aplicação
Fonte: Acervo Pessoal.



Figura 5.5: Repetição da Atividade Experimental durante a Primeira Aplicação
Fonte: Acervo Pessoal.

A experiência acumulada nessa primeira aplicação motivou a elaboração de um roteiro para orientar os alunos na execução das atividades experimentais propostas. Esse roteiro foi empregado nas aplicações seguintes e aprimorado em função delas. Sua versão mais recente pode ser encontrada no Apêndice B deste trabalho.

5.2. Segunda Aplicação

Para a realização dessa etapa, a metodologia empregada na aplicação anterior sofreu algumas modificações, tais como, a inclusão de fatos históricos relevantes no processo de construção do conhecimento sobre o fenômeno e de mais um questionamento feito com base nos resultados da atividade experimental, além de um ajuste na ordem em que os conteúdos foram apresentados. Entretanto, o modo de se abordar os LEDs, a relação energética descrita em (5.1), a definição de Efeito Fotoelétrico e a atividade experimental proposta permaneceram inalterados.

Sendo assim, no dia 13 de novembro de 2017, dois dos três alunos da turma selecionada foram reunidos no Laboratório de Física Moderna. A primeira aula foi iniciada com a definição de Efeito Fotoelétrico. Prosseguiu com uma explanação sobre sua descoberta e sua primeira investigação (descritas nas seções 2.2 e 2.3,

respectivamente), dando destaque ao caráter experimental de ambas com a análise dos equipamentos utilizados.

A segunda aula foi iniciada com a conclusão, a partir do equipamento de Lenard, que o Efeito Fotoelétrico pode ser explicado pela relação energética apresentada em (5.1). Considerando que a luz pode ter seu brilho ajustado pela variação de intensidade e sua cor ajustada pela variação de frequência, foram formuladas duas hipóteses:

1. *A quantidade de energia transferida para cada elétron arrancado é proporcional à intensidade da luz incidente. Esse é o resultado esperado quando se considera que a luz é uma onda eletromagnética. Sendo assim,*

$$\alpha I = \alpha I_0 + \frac{m v^2}{2} \Rightarrow \frac{m v^2}{2} = \alpha (I - I_0), \quad (5.2)$$

onde $\frac{m v^2}{2}$ é a energia cinética do elétron arrancado, I é a intensidade da luz incidente, I_0 é a intensidade mínima necessária para arrancar o elétron da estrutura e α é uma constante de proporcionalidade.

2. *A quantidade de energia transferida para cada elétron arrancado é proporcional à frequência da luz incidente. Esse resultado é diferente do esperado quando se considera que a luz é uma onda eletromagnética. Sendo assim,*

$$\alpha f = \alpha f_0 + \frac{m v^2}{2} \Rightarrow \frac{m v^2}{2} = \alpha (f - f_0), \quad (5.3)$$

onde $\frac{m v^2}{2}$ é a energia cinética do elétron arrancado, f é a frequência da luz incidente, f_0 é a frequência mínima necessária para arrancar o elétron da estrutura e α é uma constante de proporcionalidade.

Fechando o primeiro dia da aplicação, foi realizada a abordagem dos LEDs. Considerando que a operação desse dispositivo como receptor também pode ser explicada a partir da relação energética apresentada em (5.1), concluiu-se que as hipóteses formuladas em (5.2) e (5.3) podem ser verificadas com o uso de experimentos baseados em LEDs.

No dia 20 de novembro de 2017, dois dos três alunos da mesma turma foram reunidos no Laboratório de Física Moderna, sendo que apenas um deles compareceu às duas primeiras aulas. Devido a essa configuração, julgou-se necessário iniciar a terceira aula com uma breve revisão dos tópicos apresentados anteriormente. A seguir, foi realizada uma apresentação do kit didático e de instruções para o seu manuseio. Com o roteiro elaborado em mãos, os alunos executaram a atividade experimental com o objetivo de verificar a influência da intensidade e da frequência da luz na ocorrência do Efeito Fotoelétrico, observando o comportamento apresentado pelo LED branco do kit. Ao final da atividade, os alunos foram questionados com as seguintes perguntas:

- 1. Qual é a grandeza que influencia na quantidade de energia fornecida pela luz, ou seja, determina a ocorrência do efeito fotoelétrico: intensidade ou frequência? Como você chegou a essa conclusão?*
- 2. Qual é a influência da grandeza descartada na resposta anterior sobre o efeito fotoelétrico? Como você chegou a essa conclusão?*

A quarta e última aula foi preenchida com a discussão dos resultados obtidos durante a execução da atividade experimental e sua relação com a hipótese de Einstein (descrita na seção 2.4), consolidando a explicação correta do fenômeno.

A experiência acumulada nessa segunda aplicação motivou a inserção na abordagem de um questionário de avaliação inicial, com função de extrair os conhecimentos prévios espontâneos dos alunos, permitindo assim o ajuste da abordagem às necessidades de cada turma. Nessa turma em particular, os alunos demonstraram muito conhecimento prévio contido nas perguntas e comentários realizados em diversos momentos da aplicação.

A versão mais recente do questionário de avaliação inicial pode ser encontrada no Apêndice C deste trabalho.

5.3. Terceira Aplicação

Para a realização dessa aplicação, a metodologia empregada anteriormente passou por um ajuste nos tempos de abordagem dos conteúdos a serem ministrados, permitindo o uso do questionário de avaliação inicial.

Sendo assim, no dia 14 de novembro de 2017, 18 dos 27 alunos da turma selecionada foram reunidos em uma sala de aula comum e divididos em seis trios para iniciar a primeira aula respondendo ao questionário, conforme mostrado na Figura 5.6. O restante da aula foi ocupado pela discussão dos resultados obtidos, a fim de ajustar a abordagem.



Figura 5.6: Aplicação do Questionário de Avaliação Inicial durante a Terceira Aplicação
Fonte: Acervo Pessoal.

A segunda aula foi iniciada com a definição de Efeito Fotoelétrico. Prosseguiu com uma explanação sobre sua descoberta e sua primeira investigação (descritas pelas seções 2.2 e 2.3, respectivamente), dando destaque ao caráter experimental de ambas com a análise dos equipamentos utilizados. A partir do equipamento de Lenard, chegou-se a conclusão que o Efeito Fotoelétrico pode ser explicado pela relação energética apresentada em (5.1). Considerando que a luz pode ter seu brilho ajustado pela variação de intensidade e sua cor ajustada pela variação de frequência, foram formuladas as duas hipóteses apresentadas em (5.2) e (5.3).

No dia 21 de novembro de 2017, 08 dos 27 alunos da mesma turma foram reunidos novamente em uma sala de aula comum. A terceira aula foi iniciada com a abordagem dos LEDs. Considerando que a operação desse dispositivo como receptor também pode ser explicada a partir da relação energética apresentada em (5.1), concluiu-se que as hipóteses formuladas em (5.2) e (5.3) podem ser verificadas com o uso de experimentos baseados em LEDs. A seguir, foi realizada uma apresentação do kit didático desenvolvido e de instruções para o seu manuseio. Com o roteiro elaborado em mãos, os alunos executaram a atividade experimental com o objetivo de verificar a influência da intensidade e da frequência da luz na ocorrência do Efeito Fotoelétrico, observando o comportamento apresentado pelo LED branco do kit. Essa execução é mostrada na Figura 5.7. Ao final da atividade, os alunos responderam aos questionamentos relacionados.

Na quarta e última aula foi realizada uma discussão dos resultados obtidos durante a execução da atividade experimental e sua relação com a hipótese de Einstein (descrita na seção 2.4), consolidando a explicação correta do fenômeno. Os 15min finais da aula foram reservados para uma sessão de críticas e sugestões a fim de verificar a aceitação dos alunos à metodologia aplicada.

Para esses alunos, a aplicação tornou-se particularmente interessante em função da relação existente entre a Física explorada e dispositivos tais como, por exemplo, os interruptores acionados pela ausência de iluminação (fotocélulas). A abordagem desse tipo de dispositivo, presente no cotidiano de alunos e professores, é prevista no planejamento da disciplina de Instalações Elétricas e Telefônicas, a qual teve aulas cedidas para a realização da aplicação.



Figura 5.7: Execução da Atividade Experimental durante a Terceira Aplicação
Fonte: Acervo Pessoal.

5.4. Sequência Didática

A experiência acumulada ao longo das três aplicações forneceu subsídios para a montagem da sequência didática proposta no início do capítulo como forma de orientar outros professores interessados na utilização do kit didático em suas aulas. A sequência montada possui seis aulas de 50min e pode ser executada conforme descrito pela Tabela 5.1. Prevê uma aula opcional destinada à abordagem teórica de ondas eletromagnéticas, a qual deve ser ministrada somente se essa necessidade for explicitada pela discussão dos resultados apresentados após a aplicação do questionário de avaliação inicial.

Tabela 5.1: Sequência Didática Montada

Aula	Conteúdo a Ministar	Ferramenta Didática	Referência
01	Levantamento dos conhecimentos prévios espontâneos; discussão dos resultados obtidos; ajuste da abordagem.	Questionário de avaliação inicial	Apêndice A
02	Ondas eletromagnéticas (opcional).	Aula expositiva	Seção 2.1
03	Definição de Efeito Fotoelétrico; descoberta e primeira investigação experimental; hipóteses de explicação para o fenômeno.	Aula expositiva	Seções 5.1, 2.2, 2.3 e 5.2
04	LEDs operando como receptores; relação com as hipóteses estabelecidas; apresentação do kit didático; execução da atividade experimental.	Aula expositiva, kit didático e roteiro de execução	Seção 5.1, 5.2 e Apêndice B
05	Discussão dos resultados obtidos e relação com a hipótese de Einstein.	Aula expositiva	Seção 2.4
06	Repetição da atividade experimental com LEDs receptores não identificados.	Roteiro de execução	Apêndice B

Fonte: Acervo Pessoal.

Capítulo 6

Resultados

As três aplicações realizadas no IF Sudeste MG – Campus Juiz de Fora forneceram resultados interessantes, cuja análise tornou-se fundamental para validar a metodologia construída no capítulo anterior e também a sequência didática montada para dar o suporte necessário a professores interessados na utilização do kit didático em suas aulas. Os resultados foram agrupados conforme a natureza dos dados obtidos e as respectivas análises foram realizadas com base nos seguintes questionamentos:

- 1. Os alunos conseguiram obter resultados próximos dos esperados utilizando o kit didático?*
- 2. Os alunos demonstraram ter adquirido o conhecimento pretendido com a execução da atividade experimental?*
- 3. Houve uma aceitação considerável dos alunos à abordagem realizada?*

6.1 Análise da Execução

Para realização dessa análise, compreende-se como execução da atividade experimental a observação e o registro dos comportamentos apresentados pelo LED branco (indicador da ocorrência do Efeito Fotoelétrico) em função da incidência de luz vermelha, verde e azul, com baixa e alta intensidade, sobre os dois LEDs receptores disponibilizados (um verde e azul). Os registros efetuados pelos alunos foram chamados de resultados de execução. A fim de viabilizar a avaliação desses resultados, um conjunto de resultados esperados, mostrado nas Tabelas 6.1 e 6.2, foi estabelecido como padrão de comparação.

Tabela 6.1: Resultados Esperados para o LED Receptor Verde

Intensidade (Brilho)	Frequência (Cor) do LED Emissor		
	Vermelho	Verde	Azul
Baixa	Apagado	Aceso com Pouco Brilho	Aceso com Brilho Razoável
Alta	Apagado	Aceso com Brilho Razoável	Aceso com Muito Brilho

Fonte: Acervo Pessoal.

Tabela 6.2: Resultados Esperados para o LED Receptor Azul

Intensidade (Brilho)	Frequência (Cor) do LED Emissor		
	Vermelho	Verde	Azul
Baixa	Apagado	Apagado	Aceso com Pouco Brilho
Alta	Apagado	Apagado	Aceso com Brilho Razoável

Fonte: Acervo Pessoal.

Os resultados de execução obtidos pelos alunos submetidos à primeira atividade experimental da primeira aplicação podem ser visualizados na Figura 6.1. Quando comparados às Tabelas 6.1 e 6.2, demonstram o registro de comportamentos um pouco diferentes do esperado para a incidência de luz verde com alta intensidade e de luz azul com baixa intensidade sobre o LED receptor verde. Essa diferença pode ser justificada pela quantidade de comportamentos possíveis considerados para o registro dos comportamentos observados. As Tabelas 6.1 e 6.2 preveem quatro possibilidades (apagado, aceso com pouco brilho, aceso com brilho razoável e aceso com muito brilho) enquanto que os alunos adotaram apenas três (não acende, acende pouco e acende). Mesmo assim, os resultados obtidos podem ser considerados muito próximos dos esperados.

Os resultados de execução obtidos pelos alunos submetidos à atividade experimental da segunda aplicação não foram tabelados ou explicitados de alguma outra forma compatível, conforme orientado pelo roteiro utilizado. Dessa forma, não foi possível executar a respectiva análise.

Receptores	Fontes (led)	Intensidade	led branco ampérimetro
Azul.	Azul.	Alta.	Acende.
		Baixa.	Acende pouco
	Verde.	Alta.	Não acende.
		Baixa.	Não acende.
	Vermelho.	Alta.	Não acende.
		Baixa.	Não acende.
Verde.	Azul.	Alta.	Acende.
		Baixa.	Acende pouco.
	Verde.	Alta.	Acende pouco
		Baixa.	Acende pouco.
	Vermelho	Alta.	Não acende.
		Baixa.	Não acende.

Figura 6.1: Resultados de Execução Obtidos na Primeira Atividade da Primeira Aplicação
Fonte: Acervo Pessoal.

Os resultados de execução obtidos pelos três grupos submetidos à atividade experimental realizada durante a terceira aplicação podem ser visualizados nas Figuras 6.3, 6.4 e 6.5, respectivamente. Como se percebe, esses resultados são similares entre si, mas demonstram que apenas dois comportamentos possíveis (não acendeu e acendeu) foram considerados para o registro dos comportamentos observados. Em função disso, não evidenciam a influência da intensidade da luz emitida na ocorrência do Efeito Fotoelétrico. Entretanto, essa informação pode ser extraída por meio de uma análise complementar: o LED branco apagado para luz verde emitida com baixa intensidade e aceso para a mesma luz emitida com alta intensidade, quando o LED receptor verde é utilizado, indica não só que se trata da frequência de corte do referido receptor, mas também que o fenômeno necessita de certa intensidade para ocorrer nessa frequência. Logo, os resultados não podem ser considerados distantes dos esperados, conforme se apresentavam a princípio.

LED RECEPTOR VERDE:

vermelho fraco e forte → não acendeu
 verde fraco → não acendeu verde forte acendeu
 azul fraco e forte → acendeu

LED RECEPTOR AZUL:

vermelho fraco e forte: não acendeu
 verde fraco e forte: não acendeu
 azul fraco e forte: acendeu

Figura 6.2: Resultados de Execução Obtidos pelo Primeiro Grupo da Terceira Aplicação
 Fonte: Acervo Pessoal.

LED Azul	Baixa	Alta	LED verde	Baixa	Alta
Vermelho	não	não	Vermelho	não	não
Verde	não	não	Verde	não	sim
Azul	sim	sim	Azul	sim	sim

Figura 6.3: Resultados de Execução Obtidos pelo Segundo Grupo da Terceira Aplicação
 Fonte: Acervo Pessoal.

LED VERDE	BAIXA	ALTA	LED AZUL	BAIXO	ALTA
VERMELHO	NÃO	NÃO	VER	NÃO	NÃO
VERDE	NÃO	SIM	VERD	NÃO	NÃO
AZUL	SIM	SIM	AZUL	SIM	SIM

Figura 6.4: Resultados de Execução Obtidos pelo Terceiro Grupo da Terceira Aplicação
 Fonte: Acervo Pessoal.

Diante do exposto, a conclusão da análise é que os alunos conseguiram obter resultados próximos dos esperados utilizando o kit didático. No entanto, a mesma aponta para a necessidade de se definir previamente um conjunto de comportamentos possíveis para o registro dos resultados de execução, os quais devem ser efetuados em duas tabelas padronizadas, sendo uma para cada LED receptor disponibilizado. Sendo assim, o conjunto de comportamentos possíveis e as tabelas padronizadas foram incluídos no Roteiro de Execução da Atividade Experimental, cuja versão mais recente é apresentada no Apêndice B deste trabalho.

6.2 Análise do Conhecimento Adquirido

Essa análise foi realizada com o objetivo de avaliar se os alunos conseguiram entender a influência da intensidade e da frequência da luz na ocorrência do Efeito Fotoelétrico. Para tanto, eles foram submetidos a dois questionamentos pós-atividade experimental, sendo que o segundo foi inserido somente a partir da segunda aplicação (conforme visto no capítulo anterior). Como referências para comparação com as respostas obtidas, foram adotadas como respostas esperadas:

1. *Qual é a grandeza que influencia na quantidade de energia fornecida pela luz, ou seja, determina a ocorrência do efeito fotoelétrico: intensidade ou frequência? Como você chegou a essa conclusão?*

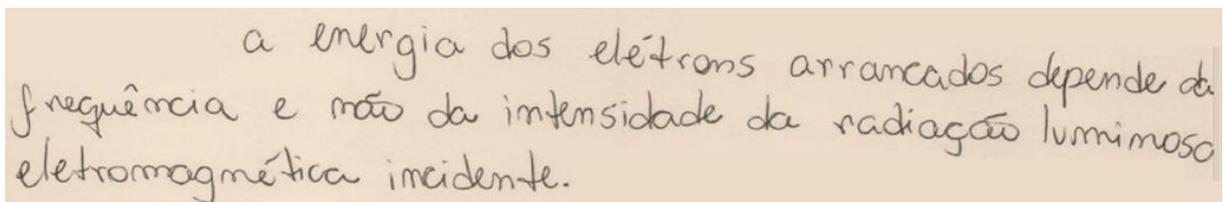
Resposta Esperada: *A frequência da luz incidente. Utilizando o LED receptor verde, o LED branco acende somente quando incide uma luz verde ou azul sobre o receptor. Já utilizando o LED receptor azul, esse fato ocorre somente quando incide uma luz azul sobre o receptor. Em ambos os casos, a incidência de luz vermelha com qualquer intensidade mantém o LED branco apagado. Logo, existe uma frequência mínima (frequência de corte) exigida para haver a ocorrência do fenômeno, a qual deve ter valor maior ou igual ao da frequência correspondente à cor do LED receptor utilizado.*

2. *Qual é a influência da grandeza descartada na resposta anterior sobre o efeito fotoelétrico? Como você chegou a essa conclusão?*

Resposta Esperada: A intensidade da luz incidente determina a maior ou a menor ocorrência do fenômeno, desde que a respectiva frequência seja maior ou igual à frequência de corte. Para ambos os LEDs receptores, o LED branco acende com maior ou menor brilho, dependendo da intensidade da luz incidente, desde que ela seja verde ou azul.

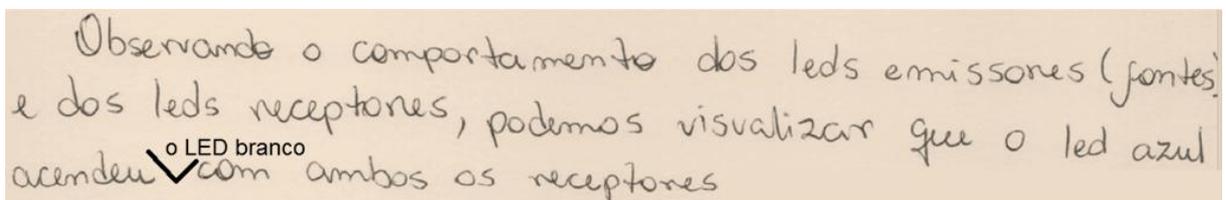
Na primeira aplicação, os alunos foram instruídos a responder o questionamento proposto com base nos comportamentos apresentados pelo LED branco durante a incidência de luz vermelha e de luz azul sobre os LEDs receptores disponibilizados (um verde e um azul). Comportamentos referentes à incidência de luz verde não foram considerados a princípio.

Nesse sentido, a resposta fornecida está correta e pode ser observada na Figura 6.5. No entanto, a respectiva justificativa se apresenta de forma incompleta, visto que nada foi citado sobre o não acendimento do LED branco pela incidência de luz vermelha com qualquer intensidade sobre os receptores. Essa justificativa pode ser observada na Figura 6.6. Todas as informações foram extraídas do relatório solicitado aos alunos para sua avaliação.



a energia dos elétrons arrancados depende da frequência e não da intensidade da radiação luminosa eletromagnética incidente.

Figura 6.5: Resposta dos Alunos da Primeira Aplicação ao Questionamento Feito
Fonte: Acervo Pessoal.



Observando o comportamento dos leds emissores (fontes) e dos leds receptores, podemos visualizar que o led azul acendeu o LED branco com ambos os receptores

Figura 6.6: Justificativa dos Alunos da Primeira Aplicação ao Questionamento Feito
Fonte: Acervo Pessoal.

Na segunda aplicação, os alunos responderam aos dois questionamentos propostos conforme apresentado nas Figuras 6.6 e 6.7, respectivamente. Como se percebe, as respostas fornecidas pelos alunos estão corretas e as justificativas se apresentam muito próximas das esperadas. O único fato que chama a atenção é a

presença do termo “fóton” na justificativa do segundo questionamento. Esse termo foi explicado somente na aula seguinte com a abordagem da hipótese de Einstein. Todas as informações foram extraídas do relatório solicitado aos alunos para sua avaliação.

R: A frequência é a grandeza responsável pelo efeito fotoelétrico. Quando utilizamos o LED verde como receptor, percebemos que apenas os LEDs verde e azul, como emissores, fazem com que o LED branco acenda, enquanto que com o LED vermelho como emissor, não constatamos em nenhum momento que o LED branco se acende, não importando qual a intensidade luminosa que o LED vermelho possui.

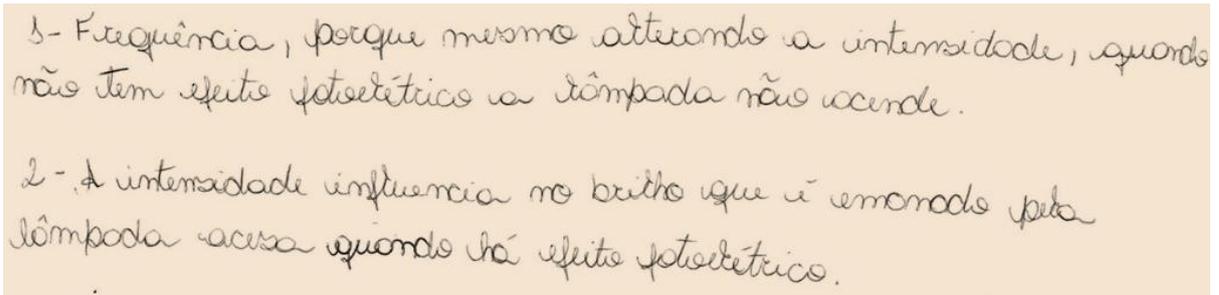
Figura 6.7: Resposta dos Alunos da Segunda Aplicação ao Primeiro Questionamento
Fonte: Acervo Pessoal.

R: A intensidade luminosa é o número de fótons que sai da fonte dividida pelo tempo em que ocorre tal emissão. Ao aumentar a intensidade dos LEDs emissores verde e azul, aumentamos o número de fótons emitidos por tais emissores e que faz a intensidade luminosa do LED branco aumentar. Já no caso do LED emissor vermelho, como já dissemos, ao aumentar sua intensidade, constatamos que nada ocorre com o LED branco, pois em tal frequência os fótons não possuem interação com os elétrons do LED receptor, logo não há efeito fotoelétrico.

Figura 6.8: Resposta dos Alunos da Segunda Aplicação ao Segundo Questionamento
Fonte: Acervo Pessoal.

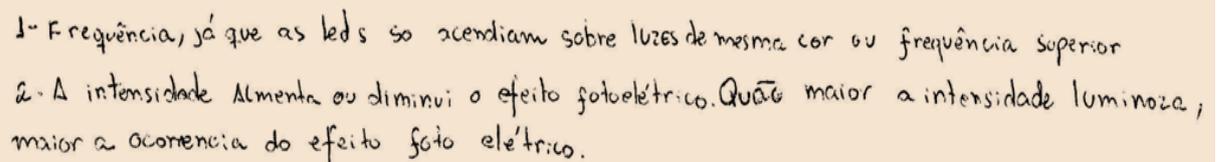
Na terceira aplicação, os três grupos formados responderam aos dois questionamentos propostos conforme apresentado nas Figuras 6.9, 6.10 e 6.11, respectivamente. Como se percebe, todos os grupos forneceram respostas essencialmente corretas, divergindo apenas na forma como expressaram suas justificativas, cometendo alguns equívocos. O primeiro grupo não deixou muito claro

o que quis dizer com “ter ou não ter efeito fotoelétrico” e confundiu o LED branco com uma lâmpada. O segundo grupo se atrapalhou um pouco com a relação entre cor e frequência. O terceiro e último grupo, dentre os três, foi o que apresentou as respostas mais próximas das esperadas, visto que suas justificativas foram baseadas exclusivamente nos respectivos resultados de execução.



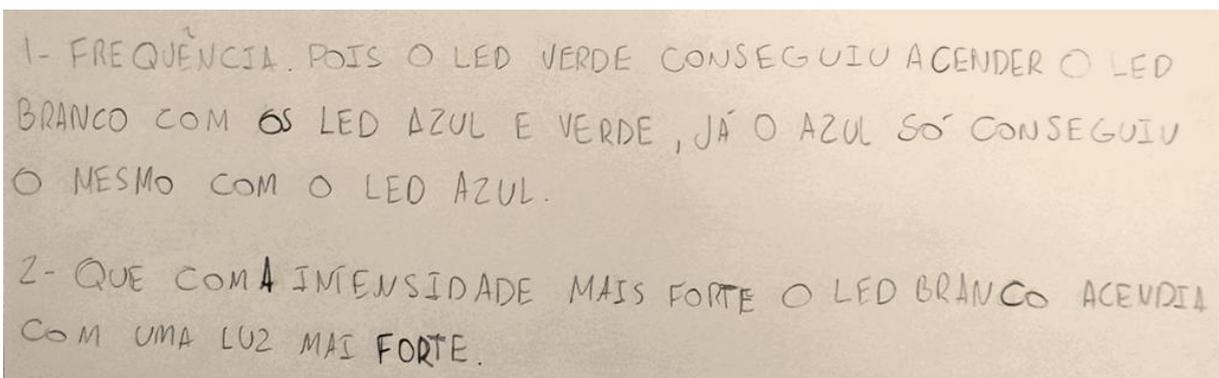
1- Frequência, porque mesmo alterando a intensidade, quando não tem efeito fotoelétrico a lâmpada não acende.
2- A intensidade influencia no brilho que é emitido pela lâmpada e isso quando há efeito fotoelétrico.

Figura 6.9: Resposta do Primeiro Grupo da Terceira Aplicação aos Questionamentos
Fonte: Acervo Pessoal.



1- Frequência, já que as leds só acendiam sobre luzes de mesma cor ou frequência superior
2- A intensidade aumenta ou diminui o efeito fotoelétrico. Quanto maior a intensidade luminosa, maior a ocorrência do efeito foto elétrico.

Figura 6.10: Resposta do Segundo Grupo da Terceira Aplicação aos Questionamentos
Fonte: Acervo Pessoal.



1- FREQUÊNCIA. POIS O LED VERDE CONSEGUIU ACENDER O LED BRANCO COM OS LED AZUL E VERDE, JÁ O AZUL SÓ CONSEGUIU O MESMO COM O LED AZUL.
2- QUE COM A INTENSIDADE MAIS FORTE O LED BRANCO ACENDIA COM UMA LUZ MAIS FORTE.

Figura 6.11: Resposta do Terceiro Grupo da Terceira Aplicação aos Questionamentos
Fonte: Acervo Pessoal.

Diante do exposto, a conclusão da análise é que os alunos demonstraram ter adquirido o conhecimento pretendido com a execução da atividade experimental.

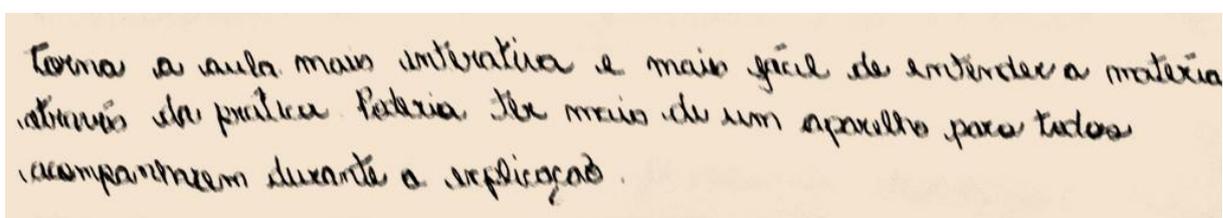
6.3 Aceitação dos Alunos

A sessão de críticas e sugestões inserida ao final da terceira aplicação (conforme visto no capítulo anterior) foi concebida com o objetivo de avaliar se houve aceitação dos alunos à abordagem realizada. Nessa ação, os oito alunos presentes foram orientados a escrever em um pedaço de papel, de forma anônima, quais foram os fatores (positivos ou negativos) que mais chamaram sua atenção durante a abordagem, dando ênfase às opiniões sobre o kit didático.

Os resultados obtidos são apresentados da Figura 6.12 à Figura 6.19. Demonstram que os oito alunos foram unânimes ao afirmar que a interação com o kit didático despertou seu interesse e facilitou a aprendizagem do assunto abordado. Nesse sentido, é importante destacar o uso de termos tais como “uma prática que envolveu todos os alunos presentes” e “prende mais a atenção dos alunos, uma vez que a experiência é mais marcante (que a teoria)”.

Além disso, quatro alunos consideram que seriam necessários mais kits (pelo menos um por grupo) para uma aplicação em turmas maiores, permitindo um melhor acompanhamento das explicações e uma maior participação. Dois acreditam que, pela familiaridade trazida, o emprego de dispositivos do cotidiano como os LEDs trouxe um maior interesse e um maior entendimento do assunto abordado. Dois alegam que o hábito das aulas práticas no ensino médio deveria ser incentivado. Um julga necessária a realização de mais uma atividade experimental. Um visualiza a oportunidade de aplicação do kit didático em diversos locais.

Diante do exposto, a conclusão é que houve uma aceitação considerável dos alunos em relação à abordagem realizada.



Torna a aula mais interativa e mais fácil de entender a matéria através da prática. Seria bom ter mais de um aparelho para todos acompanharem durante a explicação.

Figura 6.12: Primeiro Resultado das Críticas e Sugestões
Fonte: Acervo Pessoal.

Encontrei interessante a experiência e as aulas práticas, pois aprendo mais vendo a aplicação prática da teoria estudada. Como sugestões, gostaria de incentivar o hábito de aulas práticas, visto que é bem interessante.

Figura 6.13: Segundo Resultado das Críticas e Sugestões
Fonte: Acervo Pessoal.

Acredito que a experiência prática imediatamente atrelada ao conteúdo teórico propicia maior entendimento do assunto. Além disso, a utilização de materiais presentes em nosso dia a dia, como o LED, traz maior familiaridade. A possibilidade de interação com o experimento também desperta maior interesse.

Figura 6.14: Terceiro Resultado das Críticas e Sugestões
Fonte: Acervo Pessoal.

Através da prática da matéria apresentada, prova-se necessário um maior número de equipamentos para a realização da experiência em questão, para maior participação dos estudantes. O uso de elementos do cotidiano, como o LED, permitem ao aluno maior entendimento sobre a teoria apresentada, visto que a familiaridade com a prática aqueça o interesse do aluno.

Figura 6.15: Quarto Resultado das Críticas e Sugestões
Fonte: Acervo Pessoal.

→ O modo de aula ministrado misturando o ensino prático e teórico, torna o aprendizado mais interessante e mais fácil compreensão.
→ Disponibilizar um aparelho-teste para cada grupo e mais de uma atividade.

Figura 6.16: Quinto Resultado das Críticas e Sugestões
Fonte: Acervo Pessoal.

A concepção do trabalho foi feita da melhor forma possível tendo uma parte teórica bem explicada e uma prática que conseguiu envolver todos os alunos presentes. Não há nada a ser dito como sugestão, pois a informação foi entendida perfeitamente e poderá ser passada para outras pessoas se me questionarem sobre o assunto.

Figura 6.17: Sexto Resultado das Críticas e Sugestões
Fonte: Acervo Pessoal.

O projeto possibilita a aplicação em diversos locais, a aula é bem instrutiva e prende mais a atenção dos alunos, uma vez que a experiência é mais marcante. Uma sugestão seria disponibilizar mais modelos de teste, uma vez que em turmas maiores, talvez o tempo não seria possível e o restante estaria esperando.

Figura 6.18: Sétimo Resultado das Críticas e Sugestões
Fonte: Acervo Pessoal.

gostei bastante desta aula, primeiro porque com a prática podemos perceber melhor e de maneira mais fácil o que foi apresentado na teoria. Segundo: a aula ficou bastante interativa e no ensino médio nós quase não temos prática, então foi bem divertido. Também acho que esta matéria deveria ser incluída na base curricular de física, por ser ~~fundamental~~ um conhecimento fundamental na formação técnica de uma pessoa.

Figura 6.19: Oitavo Resultado das Críticas e Sugestões
Fonte: Acervo Pessoal.

Capítulo 7

Conclusões

Neste trabalho foi apresentada a confecção e validação de um kit didático de baixo custo destinado à demonstração da ocorrência ou não do Efeito Fotoelétrico em função da intensidade e frequência da luz incidente sobre um material receptor. Além disso, foi construída uma metodologia para sua aplicação em sala de aula.

Os resultados de execução apresentados demonstram que os alunos submetidos às três aplicações realizadas conseguiram compreender o funcionamento do kit confeccionado e utilizá-lo para realizar eles próprios a atividade proposta.

Os resultados fornecidos pelos questionamentos pós-atividade demonstram que os alunos conseguiram eles próprios construir seu conhecimento sobre o Efeito Fotoelétrico. Em todas as aplicações, acabou sendo validada a hipótese considerada a mais correta para explicar o fenômeno – a hipótese de Einstein.

As críticas e sugestões coletadas ao final do processo demonstram que houve uma aceitação considerável do produto pelos alunos. Esse aspecto é reforçado pelo visível engajamento destes, conforme apresentado pelas fotos tiradas durante a realização da atividade proposta.

Portanto, foi estabelecida de forma experimental a explicação de um fenômeno cuja interpretação intuitiva – a hipótese das ondas eletromagnéticas – não é válida.

Por fim, a adição de um multímetro básico ao kit traz como perspectiva futura a realização de medições, abrindo novas possibilidades de execução de atividades experimentais tais como a determinação da constante de Planck, por exemplo, trazendo também a necessidade de se confeccionar novos roteiros para guiá-las.

Referências Bibliográficas

- CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C.; SOUZA, D. F.; MUZINATTI, J. Uma Aula sobre o Efeito Fotoelétrico. *Física na Escola*, v. 6, n. 1, p. 24-29, 2002.
- CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C.; HAAG, R. Experiências em Física Moderna. *Física na Escola*, v. 6, n. 1, p. 75-82, 2005.
- CAVALCANTE, M. A.; HAAG, R. Corpo Negro e Determinação Experimental da Constante de Planck. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, n. 3, p. 343-348, 2005.
- CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C. Física Moderna Experimental, 3ª Edição. Barueri, SP: Manole, 2011.
- GUALTER J. B.; NEWTON V. B.; R. HELOU D. Física 3, 2ª Edição. São Paulo: Saraiva, 2013.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. Física 3, 4ª Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1996.
- HEIDERMANN L. A.; ARAÚJO, I. S.; VEIT, E. A. Atividades Experimentais com Enfoque no Processo de Modelagem Científica: Uma Alternativa para a Ressignificação das Aulas de Laboratório em Cursos de Graduação em Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 38, n. 1, p. 1504.1-1504.15, 2016.
- MÁXIMO, A.; ALVARENGA, B. Curso de Física Volume 3. São Paulo: Scipione, 2010.
- McROBERTS, M. Arduino Básico. Tradução: Rafael Zanolli. São Paulo: Novatec, 2011.
- MOURA, S. L.; DA SILVA, F. I.; DA SILVA, F. C. M.; DOS SANTOS, J. A. V. Constante de Planck: Uma Nova Visão para o Ensino Médio. *Revista Química Nova na Escola*, v. 33, n. 4, p. 246-251, 2011.
- ORTH, A. C. A importância das Aulas Experimentais na Construção e Interpretação de Conceitos Físicos. *Ágora Revista Eletrônica*, a. XII, n. 23, p. 24-30, 2016.
- RAMALHO JR, F.; NICOLAU G. F.; TOLEDO S., P. A. Os Fundamentos da Física Vol. 3. Rio de Janeiro: Moderna, n/d.
- SALVETTI, A. R. A História da Luz, 2ª Edição Revisada. São Paulo: Livraria da Física, 2008.
- SILVA, L F. Física Moderna no Ensino Médio: Um Experimento para Abordar o Efeito Fotoelétrico. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 29, n. 2, p. 313-324, 2012.
- TIPLER, P. A. Física Volume 4, Ótica e Física Moderna, 3ª Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1995.
- VALADARES, E. C.; MOREIRA A. M. Ensinando Física Moderna no Ensino Médio: Efeito Fotoelétrico, Laser e Emissão de Corpo Negro. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 15, n. 2, p. 359-372, 1998.
- [Bóson – PWM 2018] *Bóson Treinamentos: O que é PWM?* Disponível em <<http://www.bosontreinamentos.com.br/eletronica/curso-de-eletronica/curso-de-eletronica-o-que-e-pwm-pulse-width-modulation/>>. Acesso em março de 2018.

- [Burgos – LED 2018] *Burgos Eletrônica: LED*. Disponível em <<https://www.burgoseletronica.net/led/>>. Acesso em julho de 2018.
- [Citisystems – PWM 2017] *Citisystems: O que é PWM e para que serve?* Disponível em <<https://www.citisystems.com.br/pwm/>>. Acesso em novembro de 2017.
- [Components101 – LDR 2018] *Components101: LDR datasheet*. Disponível em <<https://components101.com/ldr-datasheet>>. Acesso em março de 2018.
- [EAD – Aula-4 2018] *Ensino à Distância: Aula 04*. Disponível em <<http://www.ensinoadistancia.pro.br/EaD/QG/aula-4/aula-4.html>>. Acesso em julho de 2018.
- [InfoEscola – Espectro 2018] *Info Escola: Espectro Eletromagnético*. Disponível em <<https://www.infoescola.com/fisica/espectro-eletromagnetico/>>. Acesso em maio de 2018.
- [Iotguider – ArduinoIDE 2018] *Iotguider: Serial Monitor of Temperature Sensor*. Disponível em <<https://iotguider.in/arduino/temperature-sensor-arduino/attachment/serial-monitor-of-temperature-sensor/>>. Acesso em julho de 2018.
- [FisTec&Ensino – Fotoelétrico 2018] *Física, Tecnologias, Mídia e Educação: Simulação do Efeito Fotoelétrico*. Disponível em <<https://fisicatecnologiaeensino.wordpress.com/2012/04/26/simulcao-do-efeito-fotoeletrico/>>. Acesso em julho de 2018.
- [Natalmakers – UNO 2018] *Natalmakers: Conhecendo as Partes do Arduino UNO*. Disponível em <<http://www.natalmakers.com/dispositivo-conhecendo-as-partes-do-arduino-uno/>>. Acesso em julho de 2018.
- [Ondas – Eletromag 2018] *Ondas Eletromagnéticas*. Disponível em <<asondaseletromag.blogspot.com/2012/11/>>. Acesso em maio de 2018.
- [Pandora – RGB 2018] *Pandora Lab.: Diversão com um LED RGB*. Disponível em <<https://pandalab.com.br/aprenda/tutorial-diversao-com-um-led-rgb/>>. Acesso em março de 2018.
- [PBX – Pré Quântica 2018] *PBX: Física Quântica*. Disponível em <<http://www.pbx-brasil.com/FisQuan/Notas/Area01/semana020/antecedentes2.html>>. Acesso em julho de 2018.
- [PHET – Photoelectric 2018] *PHET: Efeito Fotoelétrico*. Disponível em <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/photoelectric>. Acesso em julho de 2018.
- [Piauino – BC548 2018] *Piauino: Transistor NPN BC548*. Disponível em <<http://www.piauino.com.br/pd-44ad22-transistor-npn-bc548.html>>. Acesso em julho de 2018.
- [Yourduino – Photoresistor 2018] *Yourduino: Photoresistor 5516 datasheet*. Disponível em <<http://yourduino.com/docs/Photoresistor-5516-datasheet.pdf>>. Acesso em março de 2018.
- [Youtube – Efeito Fotoelétrico 2018] *Youtube: Efeito Fotoelétrico*. Disponível em <<https://youtu.be/G6YfSsrOewI>>. Acesso em julho de 2018.

[Youtube – Experiência Hertz 2018] *Youtube: Experiência de Hertz*. Disponível em <<https://youtu.be/UYJSv5aJXkQ>>. Acesso em julho de 2018.

Apêndice A

Roteiro de Montagem do Kit Didático

Material Utilizado

Na Confeção da Base de Montagem e do Painel Lateral

- 01 placa de madeira, MDF ou similar de 12,0cm x 7,5cm x 2,0cm (C x L x A);
- 01 placa de madeira, MDF ou similar de 7,5cm x 6,0cm x 0,3cm (C x L x A);
- 23 pregos 10 x 7;
- 01 lápis preto;
- 01 régua de 30 cm;
- 01 martelo;
- 01 furadeira;
- 01 broca de 5 mm;
- 01 broca de 6 mm.

Na Confeção do Circuito

- 01 resistor de 4,7k Ω x 1/4 W x 5% (faixas: amarelo, violeta, vermelho, ouro);
- 04 resistores de 470 Ω x 1/4 W x 5% (faixas: amarelo, violeta, marrom, ouro);
- 01 capacitor de poliéster de 68nF x 250V;
- 01 LED branco de alto brilho 5 mm;
- 01 LED vermelho de alto brilho 5 mm;
- 02 LEDs verdes de alto brilho 5 mm;
- 02 LEDs azuis de alto brilho 5 mm;
- 01 transistor NPN BC 548;
- 01 potenciômetro de 10k Ω linear (preferencialmente) ou logarítmico;
- 01 chave HH tipo alavanca de 03 posições;
- 03 plugues chicote de engate rápido com 02 vias;
- 01 knob;
- Cabinho flexível 0,75 mm²;
- 01 fonte de 5V x 500mA (ou um carregador de celular mais antigo);
- 01 bateria CR 2032 (3V);

- 01 alicate de corte pequeno;
- 01 ferro de solda de 40 W;
- Solda para eletrônica.

Circuito Montado

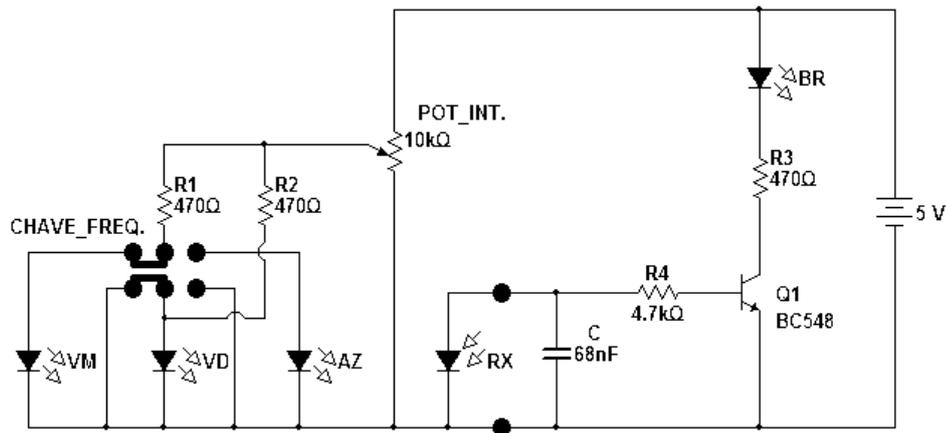


Figura A.1: Diagrama Esquemático do Circuito a ser Montado

Execução

1. Confeção da Base de Montagem

Pegue a placa de madeira de 12,0 cm x 7,5 cm x 2,0 cm. Utilizando o lápis e a régua, faça a marcação dos locais de fixação dos pregos e identifique as colunas (de 1 a 5) e as linhas (de A à D), conforme mostrado no esquema da Figura A.2. Com o martelo, realize a fixação dos pregos nos locais marcados, não se esquecendo de deixar aproximadamente 1 cm destes para fora da madeira. O resultado constitui a base de montagem para o circuito.

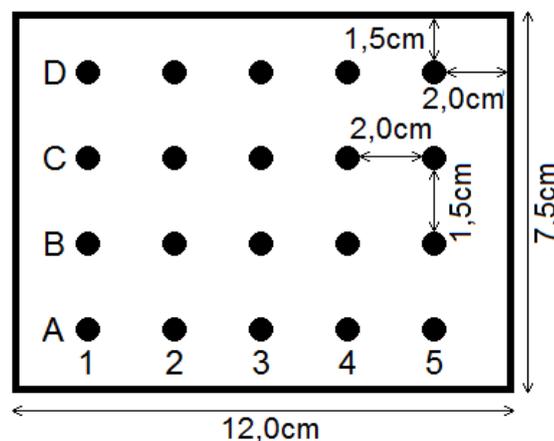


Figura A.2: Locais de Fixação dos Pregos na Base de Madeira

2. Soldagem dos Componentes (Parte I)

Ligue o ferro de solda e espere alguns minutos até que ele esquentado. Se for o primeiro uso, derreta um pouco de solda na ponta do ferro para estanhá-la. Limpe o excesso. Comece soldando os 03 resistores de 470Ω entre as posições C1 e D1, C2 e D2, C3 e C4, e o resistor de $4,7k\Omega$ entre as posições B5 e C5 (Dica: Ao iniciar a soldagem, tente encostar simultaneamente o ferro e a solda no conjunto a ser soldado. Ao terminar, tente retirá-los do local também simultaneamente. A solda bem feita fica com um aspecto brilhoso). O resultado é apresentado na Figura A.3.



Figura A.3: Resultado da Soldagem dos Resistores

A seguir, com o auxílio da Figura A.4, identifique os terminais dos LEDs. Para descobrir a cor de cada LED, basta testá-lo encostando simultaneamente o anodo no polo positivo e o catodo no polo negativo da bateria CR2032.

Pegue o LED vermelho. Solde seu anodo na posição B2 e seu catodo na posição A2. Pegue um dos LEDs verdes. Solde seu anodo na posição B3 e seu catodo na posição A3. Pegue um dos LEDs azuis. Solde seu anodo na posição B4 e seu catodo na posição A4. Pegue o LED branco. Solde seu anodo na posição D3 e seu catodo na posição C3.

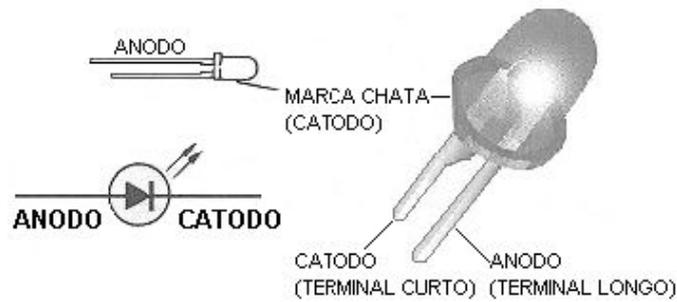


Figura A.4: Identificação dos Terminais dos LEDs
Fonte: [Burgos – LED 2018]

Com o auxílio da Figura A.5, identifique os terminais do transistor. Solde seu coletor na posição C4, sua base na posição C5 e seu emissor na posição D5. Concluindo essa etapa, solde o capacitor entre as posições A5 e B5. O resultado é apresentado na Figura A.6.

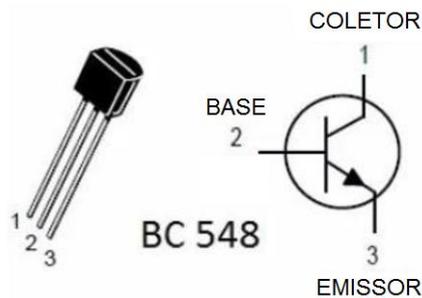


Figura A.5: Identificação dos Terminais do Transistor BC 548
Fonte: Editado de [Piauino – BC548 2018]



Figura A.6: Resultado da Soldagem de Componentes na Base de Montagem

3. Confeção do Painel Lateral

Pegue a placa de madeira de 7,5 cm x 6,0 cm x 0,3 cm. Utilizando o lápis e a régua, faça a marcação dos locais onde serão feitos os furos para a instalação do potenciômetro e da chave HH e dos locais onde entrarão os pregos de fixação da placa na base de montagem. Essa marcação é mostrada no esquema da Figura A.7. Utilizando a furadeira, faça o furo da esquerda com a broca de 6 mm e o furo da direita com a broca de 5 mm. Pregue a placa na base de montagem e encaixe o potenciômetro e a chave HH conforme mostrado na Figura A.8. Encaixe o knob no potenciômetro. O resultado é o painel lateral do kit didático.

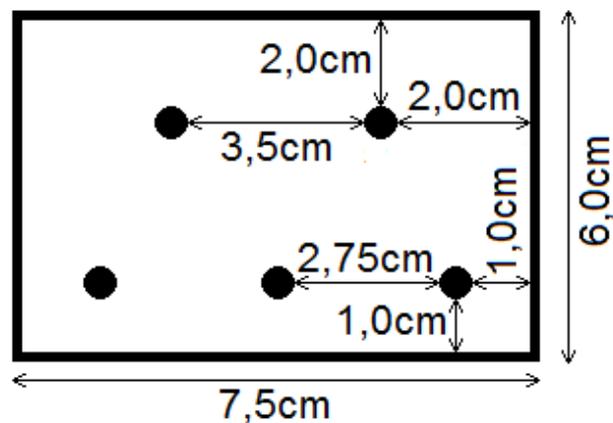


Figura A.7: Locais de Furação e Fixação do Painel Lateral



Figura A.8: Resultado da Montagem do Painel Lateral

4. Soldagem dos Componentes (Parte II)

Solde os condutores necessários, começando pelas conexões do potenciômetro, conforme apresentado na Figura A.9. Prossiga conforme apresentado nas Figuras A.10 e A.11. Utilize o alicate para cortar e desencapar o cabo flexível de acordo com a necessidade.



Figura A.9: Soldagem dos Condutores Necessários (Parte I)

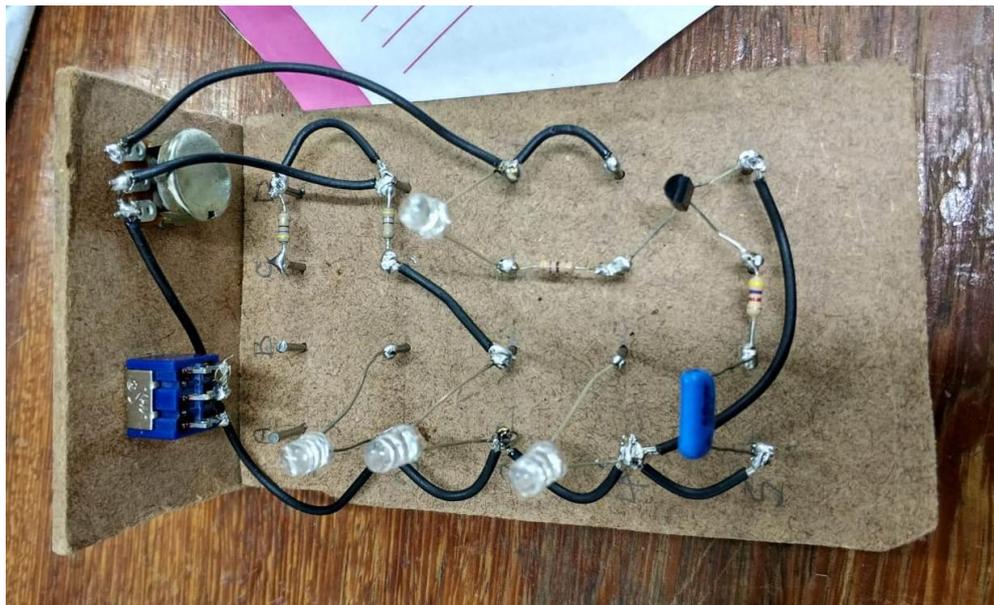


Figura A.10: Soldagem dos Condutores Necessários (Parte II)



Figura A.11: Soldagem dos Condutores Necessários (Parte III)

Pegue um plugue chicote. Solde o condutor correspondente à conexão macho na posição B5 e o correspondente à conexão fêmea na posição A5. Dessa forma o plugue ficará conectado paralelamente ao capacitor. Pegue a fonte. Solde seu terminal positivo na posição D4 e seu terminal negativo na posição A5. O resultado final da montagem do kit didático é apresentado na Figura A.12.

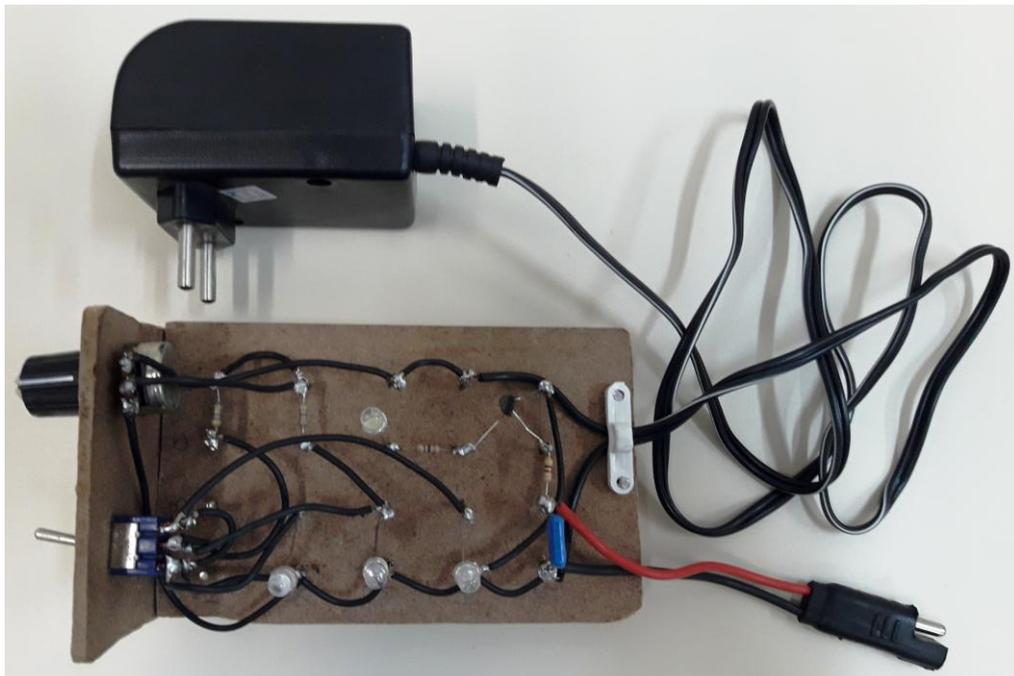


Figura A.12: Resultado Final da Confeção do Kit Didático

5. Confeção dos Sensores de Luz

Pegue os plugues chicote e os LEDs restantes. Para cada plugue chicote, solde o condutor correspondente à conexão fêmea no anodo e o condutor correspondente à conexão macho no catodo de um dos LEDs. A seguir, faça o acabamento em fita isolante dos dois sensores montados, conforme mostrado na Figura A.13.



Figura A.13: Sensores de Luz Confeccionados

Apêndice B

Roteiro de Execução da Atividade Experimental

Objetivo

Verificar a influência da intensidade e da frequência da luz na ocorrência do Efeito Fotoelétrico.

Introdução

Efeito Fotoelétrico é o nome atribuído à ejeção de elétrons que ocorre em um material, geralmente condutor, quando este é iluminado. Pode ser explicado a partir da transferência de energia que ocorre entre a luz incidente e os elétrons arrancados do material. Considerando-se que uma fonte luminosa pode ter seu brilho ajustado pela variação de intensidade e sua cor pela variação de frequência, duas hipóteses podem ser formuladas para descrever o processo:

1ª Hipótese

A quantidade de energia transferida para cada elétron arrancado é proporcional à intensidade da luz incidente. Esse é o resultado esperado quando se considera que a luz é uma onda eletromagnética. Pelo princípio da conservação de energia,

$$\mathcal{E}_{\text{luz}} = W + \frac{m v^2}{2}, \quad (\text{B.1})$$

$$\alpha I = \alpha I_0 + \frac{m v^2}{2}, \quad (\text{B.2})$$

$$\frac{m v^2}{2} = \alpha (I - I_0), \quad (\text{B.3})$$

onde \mathcal{E}_{luz} é a quantidade de energia transferida, W é quantidade de energia necessária para romper a ligação de cada elétron à estrutura do material iluminado (função trabalho), $\frac{m v^2}{2}$ é a energia cinética de cada elétron arrancado, I é

a intensidade da luz incidente, I_0 é a intensidade mínima exigida (valor de corte) e α é uma constante de proporcionalidade. Vale ressaltar que (B.1) é válida para cada elétron e (B.2) e (B.3) representam sua generalização para o material.

2ª Hipótese

A quantidade de energia transferida para cada elétron arrancado é proporcional à frequência. Esse resultado é diferente do esperado quando se considera que a luz é uma onda eletromagnética. Novamente, pelo princípio da conservação de energia,

$$\mathcal{E}_{\text{luz}} = W + \frac{m v^2}{2}, \quad (\text{B.4})$$

$$\alpha f = \alpha f_0 + \frac{m v^2}{2}, \quad (\text{B.5})$$

$$\frac{m v^2}{2} = \alpha (f - f_0), \quad (\text{B.6})$$

onde \mathcal{E}_{luz} é a quantidade de energia transferida, W é quantidade de energia necessária para romper a ligação de cada elétron à estrutura do material iluminado (função trabalho), $\frac{m v^2}{2}$ é a energia cinética de cada elétron arrancado, f é a frequência da luz incidente, f_0 é a frequência mínima exigida (valor de corte) e α é uma constante de proporcionalidade. Vale ressaltar que (B.4) é válida para cada elétron e (B.5) e (B.6) representam sua generalização para o material.

Validação Experimental

Com hipóteses estabelecidas, o próximo passo é definir uma forma de testar sua validade. Nesse sentido, sabendo-se que materiais semicondutores emissores de luz como os LEDs podem também ser utilizados como receptores, apresentando um comportamento análogo ao dos materiais submetidos ao efeito fotoelétrico, essa questão pode ser solucionada experimentalmente, utilizando um kit

didático de baixo custo que disponibiliza como fonte luminosa um conjunto formado por três LEDs – um vermelho, um verde e um azul. Cada LED pode ser aceso individualmente e ter seu brilho ajustado, permitindo assim ao usuário variar a frequência e a intensidade da luz emitida. Como materiais receptores, são disponibilizados dois LEDs – um verde e um azul – inseridos em estruturas que permitem posicioná-los adequadamente em relação à fonte luminosa e realizar sua rápida conexão ou desconexão do kit. Dessa forma, dois valores distintos de função trabalho (ou barreira de potencial) podem ser testados. Um LED branco, ao acender, sinaliza a ocorrência do efeito fotoelétrico e, pelo brilho que apresenta, demonstra a maior ou menor ocorrência do fenômeno.

Execução

Pegue o kit didático apresentado e fornecido pelo professor, ligue na tomada e verifique se um dos LEDs emissores acende. Caso isso não aconteça, peça ajuda ao professor. Atue na chave seletora de frequência até acender o LED emissor vermelho. Atue no potenciômetro de intensidade até que a luz emitida apresente pouco brilho. Conecte o LED receptor verde ao kit e alinhe-o com o LED emissor vermelho, conforme é apresentado na Figura B.1. Observe o comportamento do LED branco. Mantendo essa configuração, aumente o brilho da luz emitida ao máximo e observe o comportamento do LED branco durante esta ação. Repita o mesmo procedimento para os LEDs emissores verde e azul. Preencha a Tabela B.1 com os comportamentos apresentados pelo LED branco em cada situação. (*Obs.: Cada campo da Tabela B.1 deve ser preenchido com um dos comportamentos apresentados na Tabela B.2*).



Figura B.1: Alinhamento do LED Receptor com o LED Emissor
Fonte: Acervo Pessoal.

Tabela B.1: Comportamentos do LED Branco para o LED Receptor Verde

Intensidade (Brilho)	Frequência (Cor) do LED Emissor		
	Vermelho	Verde	Azul
Baixa			
Alta			

Tabela B.2: Comportamentos Esperados para o LED Branco

Apagado	Aceso com Pouco Brilho	Aceso com Brilho Razoável	Aceso com Muito Brilho
---------	------------------------	---------------------------	------------------------

A seguir, desconecte o LED receptor verde e conecte o LED receptor azul ao kit. Repita todos os procedimentos realizados anteriormente e preencha a Tabela B.3 com os comportamentos apresentados pelo LED branco. (*Obs.: Cada campo da Tabela B.3 deve ser preenchido com um dos comportamentos apresentados na Tabela B.2).*

Tabela B.3: Comportamentos do LED Branco para o LED Receptor Azul

Intensidade (Brilho)	Frequência (Cor) do LED Emissor		
	Vermelho	Verde	Azul
Baixa			
Alta			

Com base nos resultados encontrados, responda aos questionamentos propostos.

Questionamentos

1. Qual é a grandeza que influencia na quantidade de energia fornecida pela luz, ou seja, determina a ocorrência do efeito fotoelétrico: intensidade ou frequência? Como você chegou a essa conclusão?
2. Qual é a influência da grandeza descartada na resposta anterior sobre o efeito fotoelétrico? Como você chegou a essa conclusão?

Apêndice C

Questionário de Avaliação Inicial

Utilizando suas palavras e exemplos (caso seja necessário), responda às questões propostas.

1. O que é luz? Como ela sai de uma fonte luminosa (uma lâmpada, por exemplo) e chega até você?
2. Ao invés de simplesmente observarmos e identificarmos por nomes as diversas cores que enxergamos, podemos diferenciá-las por meio de alguma(s) grandeza(s) física(s)? Qual(is)? Por quê?
3. Você conhece algum tipo de luz invisível? Qual(is)? Caso conheça, consegue identificar alguma aplicação desse tipo de luz no cotidiano? Qual(is)?
4. Você consegue estabelecer uma relação entre um rádio, um controle remoto, e uma lâmpada acesa que não seja a utilidade doméstica? Qual?
5. Você consegue estabelecer relações entre a intensidade, a cor e a energia transmitida por uma luz emitida?
6. O que são LEDs? Como funcionam? Qual é a característica física que diferencia suas cores?
7. O que é efeito fotoelétrico? Consegue identificar alguma aplicação desse efeito no cotidiano? Qual?

Apêndice D

Sketch Arduino do Primeiro Protótipo

```
// Efeito Fotoelétrico Utilizando LED RGB como Emissor e LDR como Receptor:

// Declaração de Portas Analógicas:
int potFreq = A0;
int potInt = A1;
int v1 = A2;
int v2 = A3;
int v3 = A4;

// Declaração de Portas Digitais PWM:
int red = 9;
int green = 10;
int blue = 11;

// Inicialização de Variáveis:
int potFreqVal = 0;
float potIntVal = 0;

float v1Val = 0;
float v2Val = 0;
float v3Val = 0;

int redVal = 0;
int greenVal = 0;
int blueVal = 0;

float vLDR = 0;
float iLDR = 0;

void setup() {

  Serial.begin(9600);

  pinMode(red, OUTPUT);
  pinMode(green, OUTPUT);
  pinMode(blue, OUTPUT);

}

void loop() {

  potFreqVal = analogRead(potFreq);
  potIntVal = analogRead(potInt)/1023.0;

  // 1a Faixa de Frequências:
  // Cores:
  Red=(255,0,0),OrangeRed=(255,69,0),DarkOrange=(255,140,0),Orange=(255,165,0),Yellow=(255,255,0);
  if (potFreqVal>=0 && potFreqVal<256){
    redVal = 255;
    greenVal = potFreqVal; // Varia de 0 a 255;
    blueVal = 0;
  }

  // 2a Faixa de Frequências:
  // Cores: Yellow=(255,255,0),Chartreuse=(127,255,0),Lime=(0,255,0);
  if (potFreqVal>=256 && potFreqVal<512){
    redVal = 511 - potFreqVal; // Varia de 255 a 0;
    greenVal = 255;
    blueVal = 0;
  }
}
```

```

// 3a Faixa de Frequências:
// Cores: Lime=(0,255,0),SpringGreen=(0,255,127),Cyan=(0,255,255);
if (potFreqVal>=512 && potFreqVal<768){
  redVal = 0;
  greenVal = 255;
  blueVal = potFreqVal - 512; // Varia de 0 a 255;
}

// 4a Faixa de Frequências – Parte I:
// Cores: DeepSkyBlue=(0,191,255),Blue=(0,0,255);
if (potFreqVal>=768 && potFreqVal<896){
  redVal = 0;
  greenVal = 2*(895 - potFreqVal); // Varia de 254 a 0;
  blueVal = 255;
}

// 4a Faixa de Frequências – Parte II:
// Cores: Magenta=(255,0,255);
if (potFreqVal>=896 && potFreqVal<1024){
  redVal = 2*(potFreqVal - 896) + 1; // Varia de 1 a 255;
  greenVal = 0;
  blueVal = 255;
}

// Intensidade por PWM:
analogWrite(red, (255 - potIntVal*redVal)); // Valor analogico para a saida PWM
analogWrite(green, (255 - potIntVal*greenVal)); // Valor analogico para a saida PWM
analogWrite(blue, (255 - potIntVal*blueVal)); // Valor analogico para a saida PWM
delay(50);

analogWrite(red,255); // Valor analogico para a saida PWM
analogWrite(green,255); // Valor analogico para a saida PWM
analogWrite(blue,255); // Valor analogico para a saida PWM
delay(50);

v1Val = (5.0/1023.0)*analogRead(v1);
v2Val = (5.0/1023.0)*analogRead(v2);
v3Val = (5.0/1023.0)*analogRead(v3);

vLDR = v2Val - v3Val; // Em V;
iLDR = v1Val - v2Val; // em mA;

// Apresentação de Resultados no Serial Monitor:

// Código RGB da Cor da Luz Emitida:
Serial.print("RGB = ");
Serial.print(redVal);
Serial.print(" ");
Serial.print(greenVal);
Serial.print(" ");
Serial.print(blueVal);

// Intensidade da Luz Emitida:
Serial.print("Intensidade = ");
Serial.print(100*potIntVal);
Serial.println("%");

// Tensão e Corrente no LDR Receptor:
Serial.print("DDP = ");
Serial.print(vLDR);
Serial.println("V");
Serial.print("I = ");
Serial.print(iLDR);
Serial.println("mA");

delay(500);
}

```

Apêndice E

Sketch Arduino do Segundo Protótipo

// Efeito Fotoelétrico Utilizando LEDs Primários como Emissores e Receptores:

// Declaração das Portas Analógicas:

```
int potFreq = A0;
int potInt = A1;
int vLedAZ = A2;
int vLedVD = A3;
int vLedVM = A4;
int v = A5;
```

// Declaração das Portas Digitais PWM:

```
int saidaVM = 2;
int saidaVD = 4;
int saidaAZ = 7;
int alim = 11;
```

// Inicialização de Variáveis:

```
int potFreqVal = 0;
float potIntVal = 0;
float alimVal = 0;
float ledVal = 0;
float iLed = 0;
```

```
void setup() {
```

```
  Serial.begin(9600);
```

```
  pinMode(saidaVM, OUTPUT);
  pinMode(saidaVD, OUTPUT);
  pinMode(saidaAZ, OUTPUT);
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
  potFreqVal = analogRead(potFreq);
  potIntVal = analogRead(potInt)/4;
  analogWrite(alim, potIntVal);
```

// Emissão de Vermelho:

```
if (potFreqVal>=0 && potFreqVal<255){
  digitalWrite(saidaVM, 0);
  digitalWrite(saidaVD, 1);
  digitalWrite(saidaAZ, 1);
  alimVal = 5.0 * analogRead(v) / 1023.0;
  ledVal = 5.0 * analogRead(vLedVM) / 1023.0;
}
```

// Emissão de Verde:

```
if (potFreqVal>=256 && potFreqVal<511){
  digitalWrite(saidaVM, 1);
  digitalWrite(saidaVD, 0);
  digitalWrite(saidaAZ, 1);
  alimVal = 5.0 * analogRead(v) / 1023.0;
  ledVal = 5.0 * analogRead(vLedVD) / 1023.0;
}
```

// Emissão de Azul:

```
if (potFreqVal>=512 && potFreqVal<767){
  digitalWrite(saidaVM, 1);
  digitalWrite(saidaVD, 1);
```

```
digitalWrite(saidaAZ, 0);
alimVal = 5.0 * analogRead(v) / 1023.0;
ledVal = 5.0 * analogRead(vLedAZ) / 1023.0;
}

// Emissão de Todos:
if (potFreqVal>=768 && potFreqVal<1023){
  digitalWrite(saidaVM, 0);
  digitalWrite(saidaVD, 0);
  digitalWrite(saidaAZ, 0);
  alimVal = 0;
  ledVal = 0;
}

iLed = alimVal - ledVal;
// delay(100);

// Apresentação de Resultados no Serial Monitor:

// Tensão e Corrente no LED Emissor Aceso:
Serial.print("v = ");
Serial.print(alimVal);
Serial.println(" V");
Serial.print("vLED = ");
Serial.print(ledVal);
Serial.println(" V");
Serial.print("iLED = ");
Serial.print(iLed);
Serial.println(" mA");
delay(1000);
}
```