



Alexandre Magno Montibeller

**COMPREENDENDO O EFEITO FOTOELÉTRICO COM LEDS: UM EXPERIMENTO
DIDÁTICO DE BAIXO CUSTO AO NÍVEL DO ENSINO MÉDIO.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – MNPEF, Polo Universidade Federal do ABC como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador:
Prof. Dr. Reinaldo Luiz Cavasso Filho

Santo André - SP
2016

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do ABC
Elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da UFABC
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Montibeller, Alexandre Magno

Compreendendo o efeito fotoelétrico com LEDs : um experimento didático de baixo custo ao nível do Ensino Médio / Alexandre Magno Montibeller. — 2016.

121 fls. : il.

Orientador: Reinaldo Luiz Cavasso Filho

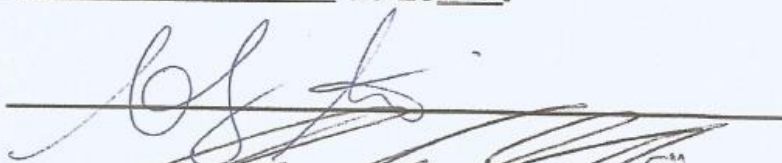
Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do ABC, Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - MNPEF, Santo André, 2016.

1. Efeito Fotoelétrico. 2. Semicondutores. 3. LEDs. I. Cavasso Filho, Reinaldo Luiz. II. Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - MNPEF, 2016. III. Título.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, de acordo com as observações levantadas pela banca no dia da defesa, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

Santo André, 24 de Outubro de 2016.

Assinatura do autor:

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'G. L.', written over a horizontal line.

Assinatura do orientador:

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'M. A.', written over a horizontal line.

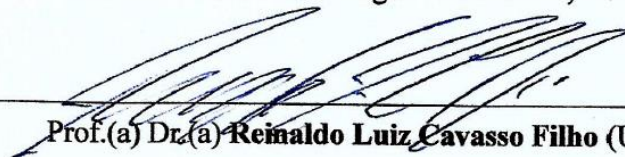


MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Fundação Universidade Federal do ABC
Programa de Pós-Graduação em Mestrado Nacional Profissional em
Ensino de Física

Avenida dos Estados, 5001 – Bairro Santa Terezinha – Santo André – SP
CEP 09210-580 · Fone: (11) 4996-0017
ppg.mnpef@ufabc.edu.br

FOLHA DE ASSINATURAS

Assinaturas dos membros da Banca Examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Alexandre Magno Montibeller, realizada em 29 de julho de 2016:



Prof.(a) Dr.(a) **Reinaldo Luiz Cavasso Filho** (UFABC) – Presidente



Prof.(a) Dr.(a) **Letícia Mendonça Ferreira** (UFABC) – Membro Titular



Prof.(a) Dr.(a) **Mikiya Muramatsu** (USP) – Membro Titular

Prof.(a) Dr.(a) **Marcelo Zanotello** (UFABC) – Membro Suplente

Prof.(a) Dr.(a) **Francisco Amancio Cardoso Mendes** (USP) – Membro Suplente

À minha família, base de minhas realizações. Em especial aos meus pais Lairce e Leocádio, que nunca mediram esforços para os meus estudos. Aos meus queridos filhos Matteo e Italo. E a Jóia, minha doce e amada esposa, sempre ao meu lado.

Agradecimentos

É muito difícil agradecer a todos os envolvidos, pois acabamos esquecendo daqueles que de alguma maneira, mesmo que pequena, contribuíram para este trabalho e sonho realizado.

Primeiramente meus agradecimentos à SBF e à UFABC por tornarem possível essa minha realização assim como a de muitos professores que se dedicam a essa nobre profissão.

Aos meus professores do curso de mestrado da UFABC.

Aos Colégios Bandeirantes e Liceu Jardim por ajudarem com os empréstimos de materiais e permitir que eu me dedicasse para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos do Band, professor Luiz e minha coordenadora Marly, sempre dispostos e me ajudando com o desenvolvimento da pesquisa.

Aos “14 macacos”, amigos e companheiros de sala de aula e de prazerosas conversas acadêmicas durante esses anos de dedicação ao mestrado.

Ao meu orientador e professor Reinaldo Cavasso, um apaixonado por experimentos e ideias novas que me orientou desde o início com muita dedicação, conhecimento e empenho.

Aos meus irmãos Magno, Agnes e Ana que sempre me incentivaram. Em particular a Agnes e aos meus sobrinhos Enrico e Julia pelas orientações na leitura de alguns textos em inglês.

Ao papai, minha referência de vida, pela primeira revisão gramatical do texto. E a mamãe, sempre me abençoando e confortando aos finais de domingo com suas serenas palavras de apoio.

Enfim, aos meus 3 maiores tesouros.

Meus amados filhos Matteo e Italo, que mesmo sem muito entender este trabalho, compreenderam minha ausência na hora de “ir à pracinha”, jogar bola e andar de “bike”. E a minha eterna Jóia, paciente, amiga e companheira que soube suprir com esmero minha parcial ausência na educação de nossos filhos e cuidou de todos nós para que este trabalho fosse realizado.

RESUMO

COMPREENDENDO O EFEITO FOTOELÉTRICO COM LEDS: UM EXPERIMENTO DIDÁTICO DE BAIXO CUSTO AO NÍVEL DO ENSINO MÉDIO.

Alexandre Magno Montibeller

Orientador:
Dr. Reinaldo Luiz Cavasso Filho

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – MNPEF, Polo Universidade Federal do ABC como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Inserir conteúdos da chamada “Física Moderna” no Ensino Médio é um dos grandes desafios da atualidade. Dois experimentos chaves realizados no final do século XIX, a radiação de corpo negro e o efeito fotoelétrico, demonstraram que a Física Clássica era insuficiente para a explicação da natureza e levaram ao subsequente desenvolvimento da Mecânica Quântica. Ao contrário do que ocorre com a radiação de corpo negro, o efeito fotoelétrico pode ser compreendido através de conceitos relativamente simples, acessíveis ao nível de compreensão de alunos do Ensino Médio. Por outro lado, embora experimentos de efeito fotoelétrico já tenham se tornado lugar comum nos laboratórios de Física das universidades, o custo dos sistemas experimentais comercializados ainda são proibitivos para a maior parte das escolas de nível médio, com raríssimas exceções. Assim, o desafio que nos propusemos foi o de elaborar um experimento que envolvesse a absorção quantizada de fótons pela matéria e que pudesse ser concretizado com materiais de baixo custo, demonstrando sua viabilidade como conteúdo do currículo de Física Moderna. Como produto final, elaboramos um manual de construção do aparato experimental para o professor do Ensino Médio, bem como um guia de atividades para o aluno, que será capaz de compreender de maneira prática o efeito fotoelétrico, a dependência da intensidade da fonte luminosa com o comprimento de onda dos fótons, assim como determinar experimentalmente a constante de Planck.

Palavras-chave: Experimentos em Ensino de Física, Física Moderna, Efeito Fotoelétrico, Semicondutores, Constante de Planck, LEDs.

Santo André - SP
2016

ABSTRACT

UNDERSTANDING THE PHOTOELECTRIC EFFECT WITH LEDs: A HIGH SCHOOL LEVEL LOW COST EXPERIMENT

Alexandre Magno Montibeller

Supervisor:
Dr. Reinaldo Luiz Cavasso Filho

Abstract of master's thesis submitted to Programa Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – MNPEF, Polo Universidade Federal do ABC, in partial fulfillment of the requirements for the degree Mestre em Ensino de Física.

Today one of the big challenges at High School teaching is to present contents of the so called "Modern Physics". At the end of the XIX century, two experiments put Classical Physics in trouble, it was not enough to describe the Nature anymore. These two key experiments, the black body radiation and the photoelectric effect, were the ones responsible for the beginning of the development of Quantum Mechanics. Although the black body radiation explanation requires a Mathematics background not accessible at High School level, the photoelectric effect can be understood with relatively simple concepts. Although photoelectric effect experiments are common places at Universities, the cost of such systems is prohibitive for the large majority of High Schools in Brazil, with rare exceptions. Therefore the challenge that we propose ourselves was to develop a low cost experiment to explore the quantized photon absorption by the matter. In this way, we could prove the viability of this very important Modern Physics content. As the final product, we elaborate a construction manual for the High School Teacher, as well as a student guide for the experiment. The students will be able to understand the photoelectric effect in a experimental approach, analysing the intensity of the photoelectric current as a function of the light intensity, the dependence with the photon wavelength as well as they will have the capacity to get the Planck constant experimentally.

Keywords: Experimental Physics at High School, photoelectric effect, Modern Physics, Semiconductors, Planck constant, LED

Santo André - SP
2016

Sumário

Capítulo 1	Introdução.....	10
1.1.	Atividades Experimentais como prática de Ensino.....	13
1.2.	Tipos de abordagens nos Laboratórios.....	16
Capítulo 2	A Lei da Radiação	19
2.1	O Corpo Negro	19
2.2	As Leis de Stefan-Boltzmann e Wien.....	21
2.3	A Lei de Rayleigh - Jeans	25
2.4	A Lei da Radiação segundo Planck	27
Capítulo 3	O Efeito Fotoelétrico	33
3.1	O experimento.....	33
3.2	Os postulados e a explicação de Einstein.....	36
Capítulo 4	Os semicondutores	41
4.1	Teoria de Bandas.....	41
4.2	Condutores Isolantes e Semicondutores.....	42
4.3	Dopagem em Semicondutores.....	45
4.4	Junção PN e Diodos.....	47
4.5	Funcionamento dos LEDs.....	49
4.6	LEDs como detectores de luz: os fotodiodos	51
Capítulo 5	A proposta do experimento.....	54
5.1	A concepção do circuito elétrico.....	54
5.2	Montagem dos circuitos	56
5.3	Tomadas de dados do experimento.....	60
5.4	Cálculo da constante de Planck	65
5.5	Aplicação do experimento em sala de aula.....	66
5.6	Algumas considerações	72
Capítulo 6	Conclusão.....	74
	Referências Bibliográficas.....	77
Apêndice A	Produto Experimental: Construção dos módulos A e B	80
Apêndice B	Produto de Aplicação: Roteiros de aulas e experimentos	101
Apêndice C	Tabelas e Gráficos dos resultados experimentais	118
Anexo A	Material de divulgação da Escola	121

Capítulo 1

Introdução

A Física do século XX, mais precisamente a Física Moderna e Contemporânea, é um dos tópicos dos conteúdos programáticos das escolas públicas e privadas que pouco se fala e comenta com os alunos. Quando é feito, o professor na maioria das vezes, apresenta de forma muito sucinta e superficial dando mais ênfase para o contexto histórico. Mesmo porquê, na maioria dos livros didáticos de Física, este tema é abordado nos “últimos capítulos” e por falta de tempo não é dado. Os próprios vestibulares, em sua maioria, não inserem este assunto como requisito e quando o fazem, geralmente cobram uma ou duas questões. A inserção da Física Moderna é algo que os próprios alunos questionam. Segundo (Cavalcante, 1999), os alunos têm a curiosidade de conhecer a ciência por trás das novas tecnologias que estão no seu cotidiano, “*decorrentes dos avanços tecnológicos provenientes das grandes descobertas científicas deste século*”. Mesmo os professores de Física encontram dificuldades, não só no manuseio destas tecnologias, mas também em ensinar aos seus alunos os conceitos relacionados com a Física do século XX. Desde o funcionamento de CDs, DVDs, lasers, lâmpadas fluorescentes ou de LEDs e até mesmo os carregadores bivolt envolvem muito desses conceitos da “Nova Física” e, portanto, se faz necessário a efetiva ação pedagógica nas salas de aula.

Nas propostas do Currículo do Estado de São Paulo, das Ciências Exatas e suas tecnologias, o conteúdo programático faz referência, desde o 3º Bimestre do último ano do Ensino Médio, ao tema de “Matéria e Radiação”. Dentre os conteúdos abordados pelo programa estão:

- *Átomos e radiações.*
- *A quantização da energia para explicar a emissão e absorção de radiação pela matéria.*
- *Dualidade onda-partícula.*
- *As radiações do espectro eletromagnético e seu uso tecnológico, como a iluminação incandescente, a fluorescente e o laser.*
- *Eletrônica e informática.*

- *Propriedades e papéis dos semicondutores nos dispositivos microeletrônicos.*
- *Impacto social e econômico contemporâneo da automação e da informatização.*

Pode-se notar que não são poucos os assuntos relativos a Física Moderna e Contemporânea. Além dos conteúdos, há a incumbência de ensinar a Física de acordo com as orientações educacionais dos PCN's (Parâmetros Curriculares Nacionais). Em (MEC, 2011) são mencionadas as habilidades e competências fundamentais para que o aluno possa entender a ciência aplicada a tecnologia. Várias propostas são elencadas e cabe aqui salientar algumas delas:

- *Identificar a luz no espectro de ondas eletromagnéticas, diferenciando as cores de acordo com as frequências.*
- *Reconhecer o atual modelo científico utilizado para explicar a natureza da luz.*
- *Diferenciar um condutor de um isolante elétrico em função de sua estrutura, avaliando o uso de diferentes materiais em situações diversas.*
- *Identificar a presença de componentes eletrônicos, como semicondutores, e suas propriedades em equipamentos do mundo contemporâneo.*

Percebe-se que essas Competências e Habilidades são contextualizadas e somente construídas em torno de assuntos e problemas concretos que, de acordo com (São Paulo, 2011) “exigem a aprendizagem de leis, conceitos e princípios”. E, de acordo com (Moreira, 2000), esses conhecimentos ensinados aos alunos devem ser em cadência, passo a passo, com práticas vivenciais dos próprios estudantes, construindo modelos micro e macroscópicos para uma melhor compreensão do mundo tecnológico que o cerca, uma Física “construtivista e não dogmática”.

Outras duas dimensões são citadas no texto dos parâmetros curriculares, o primeiro relativo a formulação matemática e o segundo no que se refere a prática experimental. Prática esta que tem como referência a utilização do método científico recorrendo à utilização de equipamentos de uso do cotidiano dos alunos.

[...] Entende-se, dessa maneira, que a experimentação engloba muito mais do que a prática laboratorial, sendo esta última apenas uma entre várias práticas internas do fazer do físico. (MEC, 2011)

E como estratégia de ação pedagógica, que vai além das aulas expositivas, o texto fala da importância da prática experimental como indispensável no desenvolvimento das habilidades em Física. Uma atividade experimental que vai além das demonstrações como atividade em sala de aula, mas uma dinâmica que faz o aluno colocar a “mão na massa”, medir, indagar, propor experimentos, usar o computador, participar ativamente. É necessário usar esta dinâmica mais centrada no aluno e desapegada do formalismo da aula expositiva apenas. Enfim, a atividade experimental, aliada ao uso de vídeos, simuladores, demonstrações entre outros é de fundamental importância. Como nas palavras de (Moreira, 2015), uma Física que seja “teoria, experimentação e computação” propondo uma nova estratégia de ensino em que todas essas coisas contribuam para a construção do conhecimento em Física.

Portanto, em virtude do imperativo de inserir conteúdos de Física Moderna no currículo do Ensino Médio e transpor as fronteiras da linearidade e hierarquia da Física do Século passado, se fazem necessárias novas propostas e metodologias de ensino. É por isso que este trabalho tem como objetivo dar subsídios, não somente aos alunos como também ao professor, no estudo do tema da *matéria e radiação*, mais precisamente na absorção quantizada de fótons pela matéria, uma introdução a Física Quântica. Neste contexto estudaremos o fenômeno do efeito fotoelétrico, bem como a determinação da constante de Planck. Tudo isso por meio de um conjunto de experimentos utilizando-se de LEDs, multímetros e outros equipamentos elétricos de fácil aquisição. Oferecendo ainda ao aluno a possibilidade de montar tabelas e analisar dados através da construção de gráficos pelo excell. Aliado a esta interpretação do fenômeno do efeito fotoelétrico, o aluno será capaz também de conhecer os conceitos físicos que estão por trás dos LEDs: os semicondutores.

Neste primeiro capítulo, nas seções 1.1 e 1.2, faremos uma breve referência à necessidade do trabalho experimental no ensino de ciências, sendo uma das ferramentas tecnológicas fundamentais no processo ensino aprendizagem recorrendo as formas de como se trabalhar com práticas experimentais, principalmente com materiais de baixo custo.

Nos seguintes capítulos 2 e 3 serão abordados a fundamentação teórica dos conceitos da Lei de Planck para a radiação corpo negro e sua consequente

determinação da constante h , assim como, se utilizando das ideias do próprio Planck, a explicação que Einstein deu para o fenômeno do efeito fotoelétrico e seu experimento. Ambos serão tratados nas referências de seus artigos originais.

No capítulo 4, trataremos a conceituação dos semicondutores no nível básico para a compreensão de bandas energéticas e dopagem de diodos. Essa fundamentação teórica tem por finalidade a explicação dos fenômenos físicos que envolvem o funcionamento dos LEDs de alto brilho como fotodiodos, peças-chaves do nosso produto educacional.

Por fim, no capítulo 5 será mostrado como se concebeu o produto educacional, acompanhado de seus dados e resultados para a aplicação do mesmo. Nos apêndices A e B serão descritos a montagem do aparato experimental que permite a reprodução do mesmo com materiais eletrônicos de custo acessível aos professores e escola, assim como um roteiro da aplicação deste material com os alunos do Ensino Médio. Foi construído não apenas um, mas quatro dispositivos e esses foram já aplicados para alunos do terceiro ano do Liceu Jardim, em Santo André, em um curso de extensão piloto de Física Quântica. Assim, comprovamos que é possível a utilização do produto em uma situação real, demonstrando a viabilidade de apresentar no Ensino Médio um dos conceitos fundamentais de Física Quântica.

1.1 Atividades experimentais como prática de Ensino

No ensino de Física, assim como em qualquer ciência, as atividades experimentais são de extrema importância no processo ensino-aprendizagem. Claro que ela não é a única metodologia que se deve adotar neste processo de ensino, mas é uma das maneiras mais eficazes para que o aluno possa aprender e assimilar o conteúdo ensinado.

Segundo (Silva Junior, et al., 2015) é um processo facilitador para que o aluno aprofunde seu conhecimento permitindo um contato direto com o conhecimento científico, contribuindo para o cotidiano do aluno. Em suas palavras

[...] a abordagem da ciência por meio de experimentos didáticos tem uma grande importância na aprendizagem dos estudantes, pois é na prática, motivados por sua curiosidade, que os alunos buscam novas

descobertas, questionam sobre diversos assuntos, e o mais importante, proporciona uma aprendizagem significativa.

O ensino de laboratório é uma das estratégias no ensino de ciências fundamentais para o aprendizado. Shulman e Tamir (apud Blosser, 1988) enumera 5 grupos de objetivos que podem ser atingidos nas atividades experimentais. São elas:

- (a) Habilidades – de manipular, questionar, investigar, organizar e comunicar;*
- (b) Conceitos – como hipótese, modelo teórico, categoria taxionômica;*
- (c) Habilidades cognitivas – pensamento crítico, solução de problemas, aplicação, análise, síntese;*
- (d) Compreensão da natureza da ciência – empreendimento científico, cientistas e como eles trabalham, existência de uma multiplicidade de métodos científicos, inter-relações entre ciência e tecnologia e entre as várias disciplinas científicas;*
- (e) Atitudes – como curiosidade, interesse em correr risco, objetividade, precisão, confiança, perseverança, satisfação, responsabilidade, consenso, colaboração, gostar de ciência;*

Com base nestes objetivos, pode-se perceber a dimensão da importância do ensino no laboratório. Não só justificando a formação do aluno no ensino de ciências, mas na formação de um cidadão observador e crítico (Ferreira, et al., 2004). É muito mais abrangente do que apenas a realização de um experimento que esteja voltado para a validação de uma lei ou conceito. Envolve participação mais efetiva e investigativa, cuja atividade possa fornecer ao aluno a capacidade de observar, levantar hipóteses, propor ideias, errar, aprender com o erro, experimentar.

Comber e Keeves (apud Blosser, 1988) “examinando o ensino de ciências em 19 países, constataram que em seis deles, nos quais estudantes de 10 anos de idade faziam observações e experimentos em suas escolas, o nível de desempenho em ciências era maior do que em escolas onde os alunos não faziam tais atividades”. Ou seja, na educação básica ou no ensino universitário, são essas

atividades que poderão ajudar na formação de nossos alunos como cidadãos críticos e desenvolvedores do raciocínio científico.

E quando se pensa em Física Moderna, cujo embasamento teórico requer uma descrição matemática mais formal, além dos novos conceitos “distantes da Física Clássica” que são necessários, a atividade experimental no laboratório de física quântica está bem distante da realidade de nossos alunos. Daí a necessidade em buscar novas formas e tentativas dessas atividades experimentais (Zanetic, et al., 1999).

Alguns trabalhos nesta área são encontrados nas referências (Cavalcante, et al., 2007), (Cavalcante, 2002), (Moura, et al., 2011), (Paula, et al., 2011) que trabalham com o uso de equipamentos de baixo custo para a instrumentação de atividades de Física Quântica e Moderna. Principalmente nos temas de espectroscopia e interações da luz com a matéria.

É notório perceber que existe uma concordância entre vários autores em relação ao uso da experimentação como um componente fundamental para que se atinja os objetivos do ensino. Porém o que se vê na realidade é que a maioria das atividades experimentais não passam de meros apêndices dos conteúdos programáticos de Física que se lecionam nas escolas. Desde as séries iniciais até o Ensino Médio pouco se vê nos livros didáticos esse tipo de prática experimental. A única ênfase que se dá se resume em conceituar a teoria e praticar resoluções de problemas, ficando as atividades experimentais voltadas para segundo plano ou até mesmo esquecidas (Ferreira, 1993).

Outros fatores que limitam essa prática são a formação inadequada dos professores de ensino de ciências e as escolas que não possuem materiais ou espaços apropriados, ou até mesmo não incentivam seus professores à realização dessas atividades.

Alguns professores, entretanto, utilizam experimentos de baixo custo que eles mesmos procuram ou produzem e levam a sala de aula com a finalidade de propiciar aos estudantes um aprendizado, pelo menos, mais interessante e motivador. Segundo (Violin, 1979) entende-se que a falta de laboratório ou equipamentos não constituem os principais fatores para não se aplicar atividades experimentais no

ensino de Física, pois é possível programar esse tipo de atividade em uma sala de aula comum e com materiais de fácil aquisição e de baixo custo.

1.2 Tipos de abordagens nos laboratórios.

Todo laboratório deve criar condições para uma participação mais ativa dos alunos, seja de pequenas ou grandes proporções. A metodologia usada não deve se engessar e independe de qualquer teoria de aprendizagem, pois as práticas experimentais são unânimes no que se refere ao desenvolvimento cognitivo do aluno, auxiliando-os na compreensão dos fenômenos envolvidos em estudo.

De acordo com (Ferreira, 1993) há 5 tipos de “modalidades” de laboratórios didáticos. São eles, o Laboratório de Demonstração, o Laboratório Tradicional, o Laboratório Divergente, o Laboratório Aberto e o Laboratório de Baixo custo.

O *Laboratório de demonstração* consiste numa atividade exclusiva do professor. Ele é como um agente da realização experimental, sendo que a ação dos alunos é praticamente nula. O que se vê neste tipo de abordagem é a ação passiva do aluno que apenas observa e ouve, quando no máximo pode reproduzir repetidas vezes o experimento. Como objetivo dessa prática pode-se notar a capacidade de observação do aluno, tornando o conteúdo apenas mais interessante e agradável (Ferreira, 1993).

O *Laboratório tradicional* tem como característica principal a atividade experimental realizada pelo aluno que recebe, geralmente, um texto guia e os materiais bem estruturados. Neste caso a interação do aluno com o material é mais forte que o de demonstração. Já o professor torna-se um orientador que conduz o experimento e o aluno, por este motivo perde a oportunidade de participar da decisão sobre objetivos e procedimentos.

Neste tipo de Laboratório, as avaliações que se cobram dos alunos são, na maioria esmagadora, relatórios que devem apresentar uma introdução teórica, objetivos, procedimentos e análise de dados e erros, o que não é muito atrativo para os alunos. Cabe também a esse tipo de abordagem de laboratório ilustrações que dão suporte ao conteúdo ensinado na teoria, verificando as leis e princípios, mas principalmente levar o aluno a metodologia científica.

De qualquer maneira esse método de atividade experimental contribui para que o aluno não fique apenas no formalismo de uma aula expositiva, repleta de conteúdos e equações matemáticas (Ferreira, 1993).

O *Laboratório divergente* está moldado num contexto de maior abertura ao aluno, no sentido de que o estudante tem a liberdade em escolher sua área de preferência a fim de resolver problemas cujas respostas não são conhecidas. Para que isto ocorra, o aluno é preparado inicialmente pelo professor para que ele se aproprie das práticas do experimento por meio de regras pré-estabelecidas.

Num segundo momento o professor deixa o aluno, decidir que área do conhecimento ele quer se aprofundar, tornando-o responsável na definição dos seus objetivos, metodologia, realizações dos experimentos e apresentação de resultados. Como objetivo principal deste tipo de abordagem de laboratório destaca-se o treino em pesquisa e no manuseio dos equipamentos, além daqueles objetivos já mencionados nos outros tipos de laboratório como, por exemplo, a motivação e o complemento da teoria (Ferreira, 1993).

Outro tipo de abordagem é o chamado *Laboratório Aberto*. Este é aquele cuja proposta os alunos desenvolvem trabalhos experimentais de seu interesse. Ele poderá escolher seu tempo de trabalho contando com ampla disponibilidade de tempo e espaço para trabalhar e, devido sua liberdade de escolha e metodologia, o professor se torna um supervisor. Essa maneira de trabalhar leva a uma outra nomenclatura que (Ferreira, et al., 2004) chama de *Laboratório de projetos*. Neste caso procura-se desenvolver no aluno mais autonomia e responsabilidade na investigação, dando a ele a oportunidade de desenvolver um trabalho experimental com forte conotação de pesquisa, construção, projeto e experimentação, sendo estes os objetivos desta abordagem de laboratório.

Por fim, o *Laboratório de baixo custo*. Este, além de apresentar uma economia orçamentaria, tem por trás de sua abordagem fatores que suportam a sua aplicabilidade. Primeiramente, pelo fato de que a sua utilização não requer um espaço apropriado para sua realização, ou seja, não é necessário um ambiente especial como o Laboratório. Segundo por que os alunos podem ver com mais clareza os fenômenos envolvidos. Pode-se, por exemplo, fazer montagens de circuitos elétricos que envolvam materiais sucateados que não ficam escondidos

como “caixa-preta” dos equipamentos tradicionais (Ferreira, et al., 2004). O próprio professor, ao construir o aparato experimental para o seu aluno, desenvolverá habilidades de manuseio, assim como poderá transmitir aos seus alunos todo o conteúdo desenvolvido no projeto experimental.

Como afirma (Moreira, et al., 1991), não se pode esperar que as escolas invistam em montagem de laboratórios amplos e equipados de materiais de última geração, e por isso “é preciso buscar formas alternativas: experimentar na sala de aula mesmo ou fora dela, juntar material aqui e acolá e envolver os alunos na confecção de determinados dispositivos.”

Mesmo assim ele afirma de que é preciso não desistir de lutar para a aquisição de determinados materiais básicos que a escola pode prover, como: medidores digitais, computadores, LEDs, pilhas entre outros. Cabe aqui salientar o não desmerecimento à importância dos materiais adquiridos no comércio.

Neste trabalho que desenvolveremos, a abordagem escolhida como foco em atividades experimentais foi o laboratório de baixo custo, principalmente pelo fato de que muitos materiais e equipamentos de laboratório são vendidos por preços não convidativos e algumas escolas deixam de investir por este motivo e por outro fator já mencionado: a inexperiência e a falta de habilidade didática de alguns professores.

Orientar na formação desses professores e praticar essas atividades experimentais, seja qual for sua abordagem, tem importância mais que relevante no processo ensino aprendizagem, pois pode desenvolver no aluno habilidades motoras, criatividade, a reflexão e o sentido real do que se aprende na teoria, além dele poder visualizar com seus próprios olhos fenômenos que a aula expositiva não é capaz isoladamente.

CAPÍTULO 2

A Lei da Radiação

2.1 O Corpo Negro

No final do século XIX muito se falava que a Física já era conhecida por completo, suas leis, cálculos e interpretações, sendo que somente seria necessário aprofundar-se nos dados estatísticos dos resultados experimentais e aumentar os algarismos significativos. O eletromagnetismo de Maxwell¹ mostrava que as radiações luminosas, eram fenômenos associados a natureza eletromagnética e a luz, consolidada como uma onda eletromagnética. Outro desenvolvimento da Física, na época, estava no estudo das leis da Termodinâmica, a conservação da energia e a entropia, no qual o próprio Maxwell desenvolveu a teoria dinâmica dos gases. Teoria esta que se baseava nas estatísticas do comportamento das moléculas de um gás que podiam fazer a “previsão da provável distribuição da velocidade das moléculas, baseada em seu modelo” (McEvoy, 2012).

Em 1859, num dos seus artigos, Maxwell não conseguia explicar a diferença entre a teoria clássica do calor específico dos gases com os dados experimentais, ou seja, a discordância do teórico e o experimental. Foi quando, em uma conferência, ele relatou para os colegas cientistas sobre a maior dificuldade encontrada pela teoria molecular no estudo do calor específico. Segundo Feynman, essas palavras representam a primeira descoberta de que as Leis da Física Clássica, comprovadas por teoremas não concordavam com os dados experimentais (Feynman, 2008).

Um ano antes, em 1858, nascia em Kiel, Alemanha, Max Karl Ernest Ludwig Planck, o físico que mostraria para a comunidade científica a derivação empírica da equação que explicava a relação da radiação com a matéria. Esta era também uma pedra no sapato dos físicos da época, pois os dados experimentais do comportamento da radiação da matéria (corpo) aquecida, o que se chamava na época de “corpo negro”, não era condizente com os dados teóricos estudados pela Física Clássica, ou seja, os físicos da época não sabiam a relação entre o calor absorvido e a luz irradiada por ele (Brennan, 2003).

¹ James Clerk Maxwell (1831-1879), físico escocês.

O termo “corpo negro” foi proposto por Kirchhoff², que em 1859 demonstrou um teorema que recebeu seu nome onde ele estabelece que, a relação entre o poder emissivo (e) e de absorvância (a) de um corpo depende somente da temperatura de um corpo e independe da natureza dele.

Poder emissivo (e) ou emissividade, corresponde a quantidade de energia radiante emitida pelo corpo, a uma temperatura T , por unidade de tempo por unidade de área num intervalo de frequência ($\nu + d\nu$). Da mesma maneira, absorvância (a) como a energia absorvida por unidade de tempo por unidade de área num intervalo de frequência ($\nu + d\nu$). Se tivermos dois corpos A e B de tamanhos, composições químicas e formas iguais ou diferentes, mas ambos a mesma temperatura, vale a relação:

$$\frac{e_A}{a_A} = \frac{e_B}{a_B} \quad (2.1)$$

Kirchhoff introduziu então o conceito de corpo negro como sendo aquele em que, no equilíbrio térmico, o poder de absorvância é igual ao de emissão, ou simplesmente a razão $\frac{e_A}{a_A}$ é igual a unidade:

$$\frac{e_A}{a_A} = 1 \quad (2.2)$$

Evidentemente um objeto com essa característica é ideal e o máximo que se pode aproximar de um corpo com as características de um “corpo negro” seria aquele todo revestido de um excelente isolante térmico, revestido de paredes espelhadas e com um pequeno orifício de abertura para o meio externo (figura 2.1).

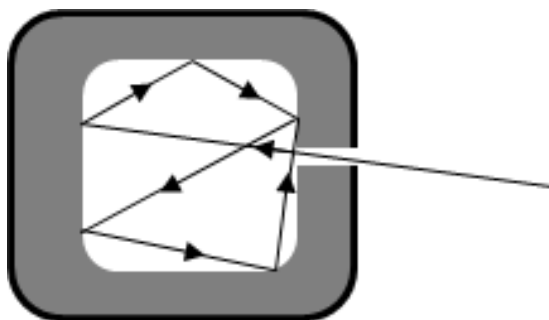


Figura 2.1: representação de um corpo negro

² Gustav Robert Kirchhoff (1824 – 1887), físico alemão.

Toda a radiação que entra pelo orifício por ela é refletida internamente pelas paredes espelhadas, e conseqüentemente absorvida até atingir o equilíbrio térmico. Não é refratado e despreza-se a mínima radiação que pode escapar pelo orifício de entrada. Como toda radiação é absorvida pelo corpo, este é chamado de “negro” (Studart, 2000). Podemos então concluir que qualquer corpo a uma determinada temperatura, e em equilíbrio térmico, comporta-se praticamente como um corpo negro emitindo radiação térmica com o mesmo espectro.

Vale lembrar que, nesta metade do século XIX, era muito importante, economicamente dizendo, conhecer a temperatura de um determinado forno de acordo com a sua cor. Era assim que os antigos oleiros determinavam a temperatura dentro de suas estufas. Portanto o conhecimento espectral da radiação que escapava de um pequeno orifício num forno aquecido (corpo negro) foi objeto de grande interesse de estudo para os físicos da época (McEvoy, 2012).

2.2 As Leis de Stefan-Boltzmann e Wien.

Para conhecer a distribuição da radiação de um corpo negro é necessário entender a definição de Radiância Espectral R_T , definida como a energia emitida por unidade de tempo em radiação de frequência ν , compreendida entre ν a $\nu + d\nu$ por unidade de área a uma determinada temperatura absoluta T . (Eisberg, et al., 1994).

Na figura 2.2 o gráfico mostra essa relação da Radiância $R_T(\nu)$ com a frequência ν para as temperaturas de 1000 K, 1500 K e 2000 K.

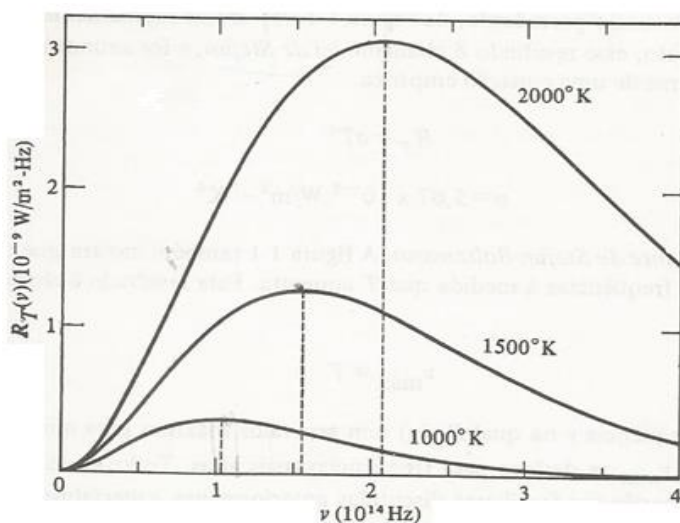


Figura 2.2: Gráfico da Radiância espectral de um corpo negro em função da frequência da radiação extraído da referência (Eisberg, et al., 1994)

Em 1879, Joseph Stefan³ mostrou experimentalmente que a relação da radiação total da cavidade de um corpo negro é proporcional a quarta potência da temperatura dele, em outras palavras, se duplicarmos a temperatura de um corpo negro sua radiação de energia, por segundo, por unidade de área fica 16 vezes maior, independentemente da composição e forma do corpo aquecido, conhecida como a *Lei de Stefan*:

$$R_T(\nu) = \sigma T^4 \quad (2.3)$$

onde σ é a *constante de Stefan-Boltzmann* que vale $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

Esta lei é previsível no gráfico da figura 2.2 onde a radiação sobe muito rapidamente conforme a temperatura aumenta. Mais tarde, em 1884, esta lei foi demonstrada matematicamente por Boltzmann⁴, ex-aluno de Stefan. Ele se orientou nas relações da termodinâmica onde tratava a radiação do corpo negro como uma máquina térmica que pode realizar trabalho por meio de uma pressão de radiação devido a quantidade de movimento transportado por ela mesma (Born, 1969).

O gráfico da figura 2.2 ainda mostra que o espectro de cada temperatura se desloca linearmente para maiores frequências à medida que a temperatura aumenta. Essa lei conhecida como *Lei do deslocamento* foi demonstrada por Wien⁵, amigo de Planck, em 1893. Ela estabelece que para cada frequência ν_{max} de radiação, o valor de $R_T(\nu)$, tem seu máximo para uma dada temperatura T . E quando T cresce, ν_{max} se desloca para frequências mais altas.

$$\nu_{m\acute{a}x} \propto T \quad (2.4)$$

Podemos aqui relacionar esta lei com a emissão de radiação de um corpo, dito negro, que ao ser aquecido, portanto aumentando sua temperatura, este começa a irradiar luz que vai desde o vermelho incandescente (baixas frequências) ao azul esbranquiçado (altas frequências). É importante se notar que no estudo da radiação do corpo negro a radiação contida na cavidade, ou seja, no interior do corpo, pode ser decomposta nas suas componentes espectrais em termos de

³ Josef Stefan (1835 – 1893), físico austríaco publicou esta lei em 20 de março de 1879 no artigo *Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur* (Das relações entre radiação térmica e temperatura) nos Boletins das sessões da Academia das Ciências de Viena. (Wikipedia, 2016)

⁴ Ludwig Eduard Boltzmann (1844 – 1906) físico austríaco.

⁵ Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864 – 1928), físico alemão.

densidade de energia $\rho(\nu, T)$, definida como a energia por unidade de volume, compreendida no intervalo de frequência de ν a $\nu + d\nu$.

Wien mostrou a sua Lei, utilizando a ideia do efeito Doppler que surge dentro da cavidade de um corpo negro devido a inúmeras reflexões no seu interior considerando-as como um espelho em movimento. Essa lei enuncia que a distribuição espectral da densidade de energia $\rho(\nu, T)$ é dada pela equação a seguir

$$\rho(\nu, T) = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right) \quad (2.5)$$

onde $f\left(\frac{\nu}{T}\right)$ é uma função da razão entre a frequência e a temperatura (Born, 1969). Por essa expressão é possível também se chegar a Lei de Stefan integrando a expressão numa determinada região do espectro

$$\int \rho d\nu = \int \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right) d\nu$$

Fazendo $x = \frac{\nu}{T}$ vem que

$$\int \rho d\nu = T^4 \int x^3 f(x) dx = \sigma T^4$$

Como a integral em relação a x é independente de T ela se torna uma constante e a Energia total de radiação por unidade de tempo e volume é proporcional a quarta potência de T , segundo a Lei de *Stefan-Boltzmann*.

Até agora era relacionada a função de distribuição de energia $\rho(\nu, T)$ em um corpo negro em função de sua frequência de radiação. Porém era comum representar essa função de distribuição em função do comprimento de onda λ , ou seja

$$\rho(\nu, T) d\nu = \rho(\lambda, T) d\lambda \quad (2.6)$$

Como $c = \lambda \cdot \nu$ e isolando $\nu = c \cdot \lambda^{-1}$, teremos que $d\nu = -c\lambda^{-2} d\lambda$ e substituindo em (2.5 e 2.6) teremos:

$$\rho(\lambda, T) = (c^4 / \lambda^5) f\left(\frac{c}{\lambda T}\right)$$

Se derivarmos essa expressão e igualar a zero, $d\rho(\lambda, T) / d\lambda = 0$ obteremos o comprimento de onda para o qual o $\rho(\lambda, T)$ é máximo.

$$\lambda_{m\acute{a}x} \cdot T = constante \quad (2.7)$$

Essa é outra maneira de mostrar a Lei de deslocamento de Wien. Se tomarmos o gráfico da distribuição da intensidade de radiação do calor em função do comprimento de onda (figura 2.3) veremos que o comprimento de onda para o qual o λ é máximo, diminui à medida em que a temperatura em que a curva foi medida aumenta (Ribas, 2014). Em outras palavras, ela permite ver como se comporta o máximo do espectro da emissão de um corpo negro quando a temperatura é alterada. Estes máximos estão alinhados como pode-se notar no gráfico 2.3.

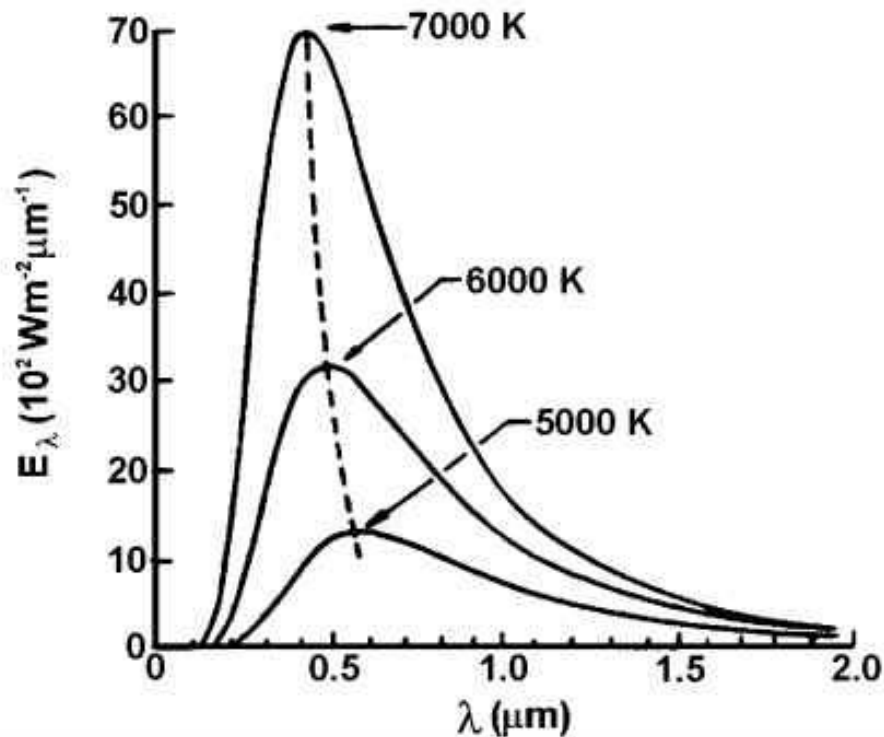


Figura 2.3: gráfico da intensidade de radiação versus comprimento de onda, mostrando para cada temperatura específica, a curva de radiação de um corpo negro. Fonte: <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-5.html>, acesso em 22 de dezembro de 2015.

2.3 A Lei de Rayleigh – Jeans.

Ainda sobre a investigação do comportamento da radiação do corpo negro, Lord Rayleigh⁶ publicou em 1900 uma fórmula radicalmente contrária a de Wien. Ele admitiu que as paredes da cavidade de um corpo negro obedeciam como cargas irradiando energia quando aceleradas devido a energia térmica. Assim essas ondas, no equilíbrio da radiação com a matéria, se comportariam como ondas estacionárias. Ele pretendia calcular o número de ondas estacionárias, ou seja, o número total $N(\nu)d\nu$ do grau de liberdade dessas ondas por intervalo de frequência entre ν a $\nu + d\nu$ (Stuart, 2000). Chegou então no resultado

$$N(\nu)d\nu = \frac{8\pi V}{c^3} \nu^2 d\nu \quad (2.8)$$

A densidade de energia é calculada conhecendo a densidade de energia média $\bar{\rho}$ de cada onda e, pelo teorema da equipartição de energia, a energia média por grau de liberdade é de $\frac{1}{2} kT$. Como em cada onda estacionária, ou oscilador, temos dois destes termos, então

$$\bar{\rho}(T) = kT \quad (2.9)$$

A *Lei de Rayleigh – Jeans*⁷ é obtida pelo produto do número total de ondas estacionárias pela energia média de cada uma, encontrando como resultado a densidade de energia $\rho(\nu)$ dada por

$$\rho(\nu) = \frac{N(\nu)d\nu}{V} \times \bar{\rho}(T) = \frac{8\pi kT}{c^3} \nu^2 d\nu \quad (2.10)$$

Ou em termos de comprimento de onda λ

⁶ John William Strutt (1842 – 1919), físico inglês conhecido como o 3º Barão de Rayleigh

⁷ A Lei da radiação de Rayleigh é conhecida por Lei de *Rayleigh – Jeans* pois James Jeans (1877 – 1946) introduziu o fator 1/8 no cálculo de $N(\nu)d\nu$ que fora esquecido por Rayleigh em um trabalho publicado em 1905 (Stuart 2000).

$$\rho(\lambda) d\lambda = \frac{8\pi k}{\lambda^5} \lambda T d\lambda$$

De acordo com o gráfico da figura 2.4 temos que, para baixas frequências (altos comprimentos de onda) a Lei de *Raleigh – Jeans* comporta-se bem, porém conforme aumenta-se a frequência (diminui-se o comprimento) a distribuição de energia tende ao infinito na região do ultravioleta e além dela estar em desacordo com os dados experimentais⁸. Consequentemente, pela teoria Clássica e, portanto, pela Lei de Rayleigh – Jeans o aumento da temperatura de um corpo negro acarreta na emissão de radiação em frequências que aumentam infinitamente.

Um significado real desta expressão seria de que se olhássemos para um corpo negro, como por exemplo, um pedaço de carvão em brasa, nossos olhos seriam queimados (McEvoy, 2012). Esse paradoxo da Física Clássica ficou conhecido como a Catástrofe do Ultravioleta.

Por outro lado, pela Lei de Wien, dada pela expressão (2.5) ela concorda relativamente bem para altas frequências e não para baixas frequências como a de Rayleigh - Jeans como vemos no gráfico da figura 2.4.

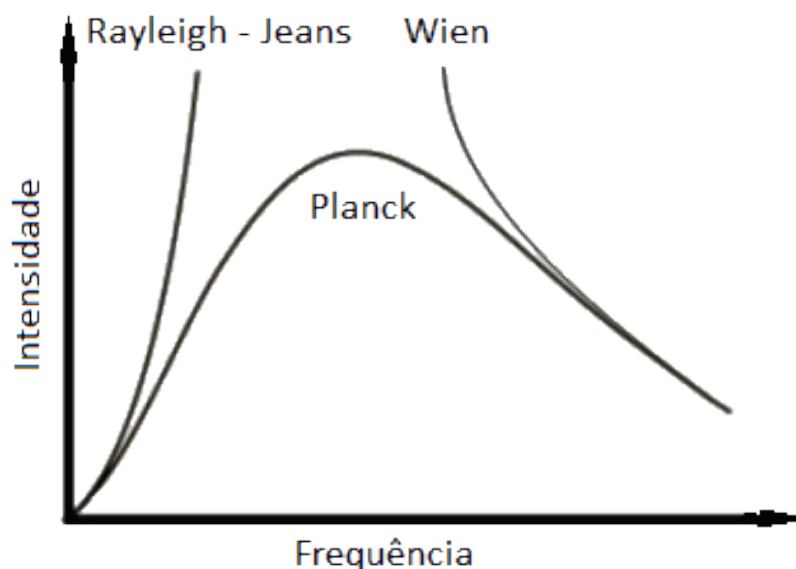


Figura 2.4: gráfico da intensidade de radiação versus frequência. A teoria da época conseguia explicar uma parte da teoria pela Lei de Wien e a outra parte pela lei de Rayleigh-Jeans mas não as duas ao mesmo tempo.

⁸ Esses dados experimentais foram obtidos por Otto Lummer (1860-1925) e Ernest Pringsheim (1859-1917) Heinrich Rubens (1865-1922) e Ferdinand Kurlbaum (1857-1927) (Born, 1969)

2.4 A Lei da Radiação segundo Planck.

Nesse cenário, Planck que em sua dissertação de doutorado estudou os princípios da termodinâmica (Crooper, 2001), apresentou em 19 de outubro de 1900 para a Sociedade Alemã de Física uma fórmula que interpolava os dois limites extremos da distribuição da radiação do espectro de um corpo negro em função da frequência de radiação. E somente dois meses depois em 14 de dezembro de 1900, para esta mesma sociedade Alemã, ele chegou a expressão que introduzia uma nova constante h , chamada constante de Planck⁹.

Ele comparou a radiação estudada como um campo oscilatório que está em equilíbrio com a matéria comparando com osciladores harmônicos, ou seja, a energia nesse processo de equilíbrio estaria dividida em osciladores, introduzindo a hipótese da descontinuidade da energia (Studart, 2000).

A ideia para se chegar a expressão que confrontasse com os dados experimentais da época, foi relacionar a energia média de cada oscilador em função da frequência e temperatura com a segunda lei da termodinâmica em termos da entropia S , como ele próprio diz:

...a lei da distribuição de energia no espectro normal torna-se inteiramente determinada quando se pode calcular a entropia S de um ressonador radiante, oscilando de maneira monocromática, em função de sua energia de oscilação U Assim todo o problema se resume encontrar S em função de U . (Planck, 1901), tradução do inglês de Ildeu de Castro Moreira

Planck considerou a relação da entropia S com a probabilidade W na versão da segunda lei da termodinâmica segundo Boltzmann,

$$S = k (\log W) \quad (2.11)$$

Onde k é a constante de Boltzmann e W é o número de arranjos microscópicos compatíveis com um dado estado macroscópico (Studart, 2000).

⁹ O referido artigo de Planck foi intitulado como: “Sobre a lei da distribuição de energia no espectro Normal” publicado no *Annalen der Physik* (Anais de Física) no início de 1901 sob o título original : *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum*.

Para o cálculo da entropia do ressonador em função da energia, ele supôs que, no equilíbrio térmico, o sistema de radiação no regime estacionário seria composto por N ressonadores iguais e, portanto, sua Entropia total de

$$S_N = N.S \quad (2.12)$$

E, analogamente sua energia total seria

$$U_N = N.U \quad (2.13)$$

Como a entropia S_N do sistema, segundo Boltzmann, é proporcional ao logaritmo de W, teremos

$$S_N = k \log W$$

Planck, que nunca usara essa relação estatística de Boltzmann, menciona em seu artigo de 1900 sobre a “simplicidade” dessa expressão ser necessária para encontrar a probabilidade W para os N ressonadores fornecerem a energia total U_N

Para isto será necessário que U_N não seja uma quantidade contínua, infinitamente divisível, mas antes uma grandeza discreta, composta de um número inteiro de partes finitas iguais. Denominando ε a tal parte elementar de energia; teremos portanto:

$$U_N = P\varepsilon,$$

Onde P representa um número inteiro, em geral grande. Deixaremos, no momento, indeterminado o valor de ε .

É evidente que agora a distribuição dos P elementos de energia entre os N ressonadores só pode ocorrer segundo um número finito e determinado de maneiras. Chamaremos cada uma dessas repartições de um complexo. (Planck, 1901)

Planck menciona então, pela primeira vez, a necessidade de tomar a energia dos ressonadores de maneira “discreta”. Em seguida ele se utiliza da análise combinatória para achar as possíveis maneiras que os N ressonadores podem se

distribuir pelos graus de energia, podendo esta ser de 0ε , 1ε , 2ε , até $P\varepsilon$. O número W de todos os possíveis arranjos desses complexos é dado por:

$$W = \frac{N(N+1)(N+2) \dots (N+P-1)}{1.2.3 \dots P} = \frac{(N+P-1)!}{(N-1)!P!}$$

Aproximando pela fórmula de Stirling $N! = N^N$, teremos

$$W = \frac{(N+P)^{N+P}}{N^N P^P} \quad (2.14)$$

Assim pode-se determinar a probabilidade W de todos os complexos possíveis formados pela repartição de energia entre os ressonadores e pela expressão de Boltzmann, determina-se a entropia S como a seguir,

$$S_N = k \log W$$

$$S_N = k \log \frac{(N+P)^{N+P}}{N^N P^P}$$

$$S_N = k \{ (N+P) \log(N+P) - N \log N - P \log P \} \quad (2.15)$$

Das expressões $U_N = P\varepsilon$ e $U_N = N.U$ chega-se a seguinte relação

$$P = NU/\varepsilon \quad (2.16)$$

E substituindo (2.16) em (2.15), Planck chega a expressão da entropia S de um ressonador como função de sua energia U .

$$S_N = kN \left\{ \left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) \log \left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) - \frac{U}{\varepsilon} \log \frac{U}{\varepsilon} \right\} \quad (2.17)$$

No mesmo artigo Planck retoma a Lei de Wien em que a densidade de energia ρ é função da temperatura T do ressonador em equilíbrio, assim como pela expressão (2.10) em que a mesma densidade de energia é também função da energia U e frequência ν do ressonador.

$$\rho(\nu, T) = \frac{\nu^3}{c^3} f\left(\frac{T}{\nu}\right)$$

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi U}{c^3} \nu^2 d\nu \quad (2.18)$$

Igualando-se as expressões acima tem-se

$$U = \frac{\nu}{8\pi} f\left(\frac{T}{\nu}\right)$$

Podendo escrever também

$$T = \frac{\nu}{8\pi} f\left(\frac{U}{\nu}\right)$$

E, levando em conta que a entropia S do ressonador seja dada por,

$$\frac{1}{T} = \frac{dS}{dU} \quad (2.19)$$

Tem-se que

$$\frac{dS}{dU} = \frac{8\pi}{\nu} f\left(\frac{U}{\nu}\right)$$

Integrando

$$S = f\left(\frac{U}{\nu}\right)$$

E, segundo Planck

a entropia de um ressonador oscilando em um meio depende apenas da variável $\frac{U}{\nu}$, e não contém nada além do que constantes universais. (Planck, 1901)

Se compararmos com a expressão (2.17) da entropia, perceberemos que o elemento discreto de energia ε é proporcional ao número de oscilações (frequência) ν podendo reescrever tal expressão da seguinte maneira

$$S_N = kN \left\{ \left(1 + \frac{U}{h\nu}\right) \log \left(1 + \frac{U}{h\nu}\right) - \frac{U}{h\nu} \log \frac{U}{h\nu} \right\}$$

Onde

$$\varepsilon = h\nu$$

Aqui Planck introduz a necessidade de uma nova constante universal que veio ser chamada, em sua homenagem, de *constante de Planck*, cujo valor foi determinado pela primeira vez neste mesmo artigo na palestra de 1900, assim como a constante k de Boltzmann.

E, para ele chegar a expressão da radiação de um corpo negro que estivesse de acordo com os dados experimentais, Planck substitui essa equação em (2.19), chegando a expressão

$$\frac{1}{T} = \frac{k}{h\nu} \log \left(1 + \frac{h\nu}{U}\right)$$

Então

$$U = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

Substituindo em (2.18), chegamos a lei de Distribuição de energia de Planck, dada por

$$\rho = \frac{8h\pi}{c^3} \nu^3 \left[\frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \right]$$

Enfim, se olharmos esta expressão e compará-la com o gráfico da figura 2.2, veremos que para baixas frequências teremos poucos estados de energia, tornando a emissão deste tipo de radiação mais comum, enquanto que para altas frequências seria necessário uma quantidade de energia maior pois $E = h\nu$ e além disso a probabilidade disto ocorrer seria muito baixa, ou seja, poucos modos deste tipo de vibração podem ser provocados. Isso mostra que a catástrofe da radiação do ultravioleta não existe.

Planck conseguiu, portanto, o que poucos cientistas a época foram capazes, que foi ajustar a teoria aos dados experimentais supondo que a energia é proporcional ao número de oscilações fazendo a hipótese de que a energia pode ser emitida ou absorvida de maneira discreta, em quantidades mínimas, e não contínua como se acreditava à época (Oliveira, 2010).

Capítulo 3

O Efeito Fotoelétrico

3.1 O experimento

Na mesma época em que Planck desenvolvia seus estudos sobre a radiação do corpo negro, Hertz¹⁰ descobrira experimentalmente as ondas eletromagnéticas, que já eram bem conhecidas e desenvolvidas, teoricamente, pelas equações de Maxwell sobre o campo eletromagnético. Em um de seus experimentos ele percebeu que a luz que incidia em um dos eletrodos fornecia uma faísca e quando a onda incidente era ultravioleta o fenômeno era mais intenso.

A esse fenômeno foi dado o nome de *efeito fotoelétrico*, descrito, resumidamente como a emissão de raios catódicos (elétrons¹¹) devido a incidência de luz. A explicação inicial, no campo da Física Clássica, dada a este fenômeno era de que os elétrons eram ejetados do catodo por meio das ondas incidentes de luz sobre ele. Os elétrons absorviam esta energia e a partir de um certo valor energético, quando suas amplitudes de oscilação aumentavam o elétron era expelido do metal (Hewitt, 2011)

Philipp Lenard¹², foi quem estudou com mais detalhe o efeito fotoelétrico e descobriu que alguns dados experimentais não podiam ser explicados pelos conhecimentos da Física Clássica. O experimento consistia em um aparato com duas placas (A e B) confinadas em uma ampola à vácuo, onde em uma abertura de vidro fazia-se incidir uma determinada intensidade de Luz na placa A. Elétrons se desprendiam desta e incidiam na placa oposta B. Nos extremos de cada placa, associava-se uma fonte de tensão variável V (Bateria) e media-se a corrente elétrica entre as placas com um amperímetro associado em série na saída da placa B (Figura 3.1).

¹⁰ Heinrich Rudolf Hertz (1856 – 1894): Físico Alemão.

¹¹ Vale lembrar que o elétron foi descoberto somente em 1897 por J.J. Thompson que associou aos raios catódicos como possuidores de cargas negativas: os elétrons.

¹² Philipp Eduard Anton von Lenard (1862 – 1947), Físico Alemão e ex-aluno de Hertz.

Aparato para observação do efeito fotoelétrico

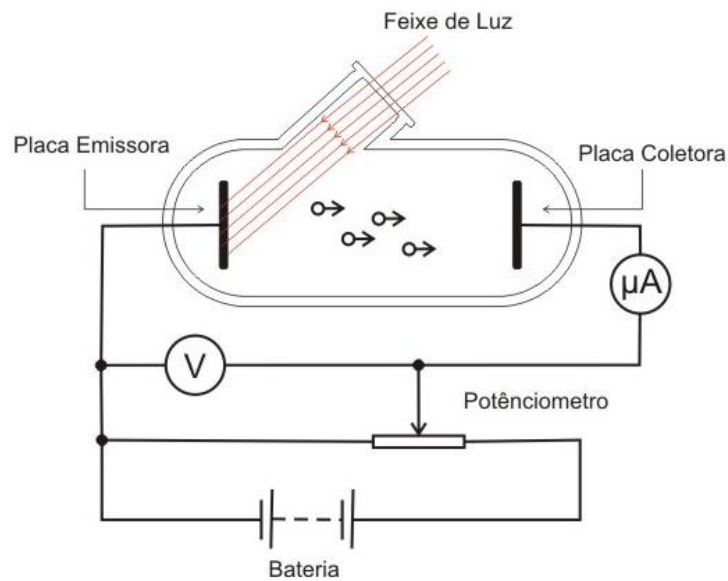


Figura 3.1: Aparato para observação do efeito fotoelétrico, com o voltímetro associado para medir a tensão do potenciômetro. Fonte:

https://pt.wikipedia.org/wiki/Comportamento_dual_da_radiao_eletr%C3%A9tica (acesso em 23/04/2016).

Nesse experimento Lenard tinha em mãos as variáveis:

1. A frequência ν da Luz Incidente.
2. A intensidade I da Luz Incidente.
3. A tensão V do potenciômetro.
4. O material da placa receptora da Luz (catodo).

O que Lenard fez, foi trabalhar com essas variáveis, mantendo algumas constantes e chegou aos seguintes resultados (Martins, 2011)

- i. Inicialmente ele nada detectou no amperímetro na ausência de luz, e ao incidir a luz sobre a placa A (catodo) verificou o acréscimo da corrente elétrica (número de elétrons ejetados do catodo) conforme a intensidade de luz incidente era aumentada.
- ii. Verificou que a corrente elétrica medida pelo amperímetro acusava valores instantaneamente, mesmo com baixa intensidade luminosa. Aqui

percebeu-se que a física clássica não teria condições de explicar tal fenômeno pois, com a diminuição da intensidade da luz (amplitude) diminuía-se o campo elétrico e consequentemente o ganho de energia para os elétrons serem ejetados.

- iii. Ao variar a tensão elétrica V , positivamente, a corrente elétrica aumentava até um certo valor e, a partir daí o gráfico da intensidade de corrente *versus* tensão aplicada permanecia constante (Figura 3.2).

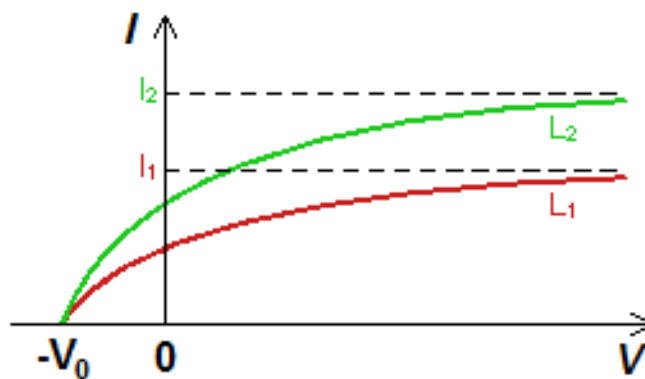


Figura 3.2: Gráfico da Intensidade da Luz versus corrente elétrica. Fonte: http://www.if.ufrgs.br/~betz/ig_XX_A/fotoElec/aFotoElecFrame.htm (acesso em 23/04/2016)

Nesse mesmo caso, ao variar inversamente a tensão V , ou seja, para potenciais menores que zero, ele verificou que era possível frear os elétrons ejetados pelo catodo e tornar nula a corrente elétrica ($i=0$) até atingir um valor V_0 , que foi chamado de tensão de frenagem ou tensão de corte.

- iv. Ainda em relação ao gráfico da figura 3.2, notou-se que iluminando o catodo com uma intensidade maior (I_2), e diminuindo a tensão com a finalidade de zerar a corrente, verificou-se que o potencial de corte era o mesmo. Fato este também inexplicável pela física clássica.
- v. A corrente elétrica estabelecida no amperímetro só acusava valor diferente de zero para determinada frequência, dependendo do metal do catodo, ou seja, havia uma frequência mínima responsável para “retirar” elétrons do catodo, chamada de frequência de corte (ν_0).

- vi. Por fim, os elétrons são ejetados com uma determinada velocidade, e portanto com uma energia cinética máxima ($Ec_{m\acute{a}x}$) dada por:

$$Ec_{m\acute{a}x} = E - \phi$$

Onde E é a quantidade de energia da luz incidente e ϕ é chamada de *função Trabalho*, correspondente a energia mínima para se retirar o elétron do metal.

É importante mencionar aqui que para frear um elétron com energia cinética $Ec_{m\acute{a}x}$ é preciso usar um potencial de corte V_0 , tal que, multiplicado por e (carga elementar do elétron), nos fornece a energia do elétron mais rápido emitido (Eisberg, et al., 1994), ou seja

$$Ec_{m\acute{a}x} = e V_0$$

3.2 Os postulados e a explicação de Einstein

Depois que Planck determinou a equação que explicava o comportamento da radiação do corpo negro, confrontando os dados teóricos com os experimentais e, encontrando inclusive os valores das constantes h e k , muitos cientistas da época deram pouca atenção a essa expressão que explicava a interação da radiação com a matéria.

Somente depois de 5 anos aproximadamente, Albert Einstein utilizou-se das ideias da energia discreta de Planck, para explicar outro fenômeno que a Física Clássica não conseguia explicar: o efeito fotoelétrico.

Em 1905, o jovem Albert Einstein, então com seus 26 anos de idade, funcionário desde 1901 do escritório de Patentes na cidade de Berna, Suíça, publicou no Anuário de Física Alemão, conhecido como *Annalen der Physik*¹³, cinco artigos que viriam revolucionar mais tarde a Física do século XX.

Neste ano, conhecido como o Ano Miraculoso de Einstein, Einstein introduzia as ideias da Relatividade Especial e a explicação do movimento Browniano. Porém, no seu 1º artigo, considerado por ele o mais revolucionário (UFRGS, 2016) e

¹³ Annalen der Physik (Anais de Física) é um dos mais conceituados e antigos periódicos de Física, editado em Berlim, Alemanha desde 1790. Na época Max Planck dirigia o Periódico. Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Annalen_der_Physik (acesso em 21 de Abril de 2016).

intitulado como: “*Über einen die Erzeugung und Umwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Standpunkt*” (“Sobre um ponto de vista heurístico concernente à geração e transformação da luz”), ele, na introdução do artigo, menciona pela primeira vez a palavra **quanta** de energia.

Parece-me que as observações associadas a radiação de corpo negro, fluorescência, a produção de raios catódicos por luz ultravioleta, e outros fenômenos relacionados com a emissão ou transformação da luz são mais facilmente compreendidos se supor que a energia da luz é distribuída descontinuamente no espaço. De acordo com a suposição a ser considerada aqui, de que a energia de um raio de luz que espalha para fora a partir de um ponto não é distribuída continuamente sobre um espaço em crescimento, mas consiste de um número finito de **quanta** (grifo meu) de energia que estão localizados em pontos no espaço, que se movem, sem divisão, e o qual só pode ser produzidos e absorvidos como unidades completas. (Einstein, 1965)

Aqui Einstein refere-se as “*unidades completas*” como os pacotes de energia, que mais tarde chamou de *fótons*. A partir dessa introdução, Einstein discorre sobre a lei da radiação do corpo negro, mencionando que a constante de Planck não se aplica somente a radiação do corpo negro e, no decorrer do artigo, no penúltimo item, ele faz referência a dificuldade em explicar o fenômeno do efeito fotoelétrico frente a concepção atual da época sobre a luz, uma energia distribuída uniforme e continuamente no espaço onde se propaga.

Ele propõe que, não somente as trocas de energia e matéria, como propôs Planck, podem ser quantizadas, mas a própria luz pode ser um conjunto de pequenos pacotes de energia.

E ele prossegue com o novo conceito:

De acordo com o conceito de que a luz incidente é composta de um quantum de energia de magnitude $\frac{R}{N}\beta v$, pode-se, no entanto, conceber a emissão de elétrons pela luz da seguinte maneira. Um quantum de energia penetra na superfície do corpo e, sua energia é transformada, pelo menos em parte, em energia cinética dos elétrons. A maneira mais simples de imaginar isto é que um quantum de luz fornece toda a sua energia para um único elétron. (Einstein, 1965)

A magnitude de energia $E = \frac{R}{N}\beta\nu$ que Einstein se refere equivale a Energia E da luz incidente dado por

$$E = h\nu.$$

Aqui, as constantes $\frac{R}{N} = k$ é a constante de Boltzmann (onde R é a constante Molar dos gases e N é o número de Avogadro) e $\beta = \frac{h}{k}$, onde h é a constante de Planck (Shamos, 1987)

Em seguida, ele faz menção a função trabalho¹⁴ como propriedade do material que a luz incide, escrevendo a equação do efeito fotoelétrico.

Vamos supor que isto acontece, mas ao mesmo tempo não excluir a possibilidade de que o elétron absorve apenas uma fração da energia incidente. Além disso pode-se supor que cada elétron, para deixar o corpo, necessitará de uma quantidade de trabalho P , que é característico do material. Os elétrons ejetados com maior velocidade são aqueles mais próximos da superfície. A energia cinética desses elétrons é

$$E_c = \left(\frac{R}{N}\right) \beta\nu - P$$

Aqui Einstein chama a energia E como função de h (constante de Planck) aquela que se transfere imediatamente para um único elétron, não observando atraso na ejeção de elétrons. Em seguida ele diz que para o elétron mais próximo da superfície ser ejetado do corpo este deve receber um certo Trabalho (função trabalho do material), e pela conservação de energia, o elétron adquire energia cinética, dada por:

$$Ec_{m\acute{a}x} = \left(\frac{R}{N}\right) \beta\nu - P$$

$$Ec_{m\acute{a}x} = h\nu - \phi$$

No decorrer do artigo Einstein cita que, se este corpo (metal) estiver sob um potencial V capaz de frear os elétrons a equação acima pode ser escrita como

¹⁴ A Função trabalho P , chamada por Einstein, é a mesma ϕ chamada por Lenard.

$$eV_0 = h\nu - \phi$$

Onde e é a carga elementar do elétron.

Einstein ainda menciona que se a “fórmula estiver correta”, ao plotar um gráfico do potencial necessário a arrancar os elétrons do metal pela frequência da luz incidente nele, deve-se chegar a uma reta, cuja inclinação é independente da natureza do metal, como observado por Philipp Lenard (Figura 3.3). (Einstein, 1965)

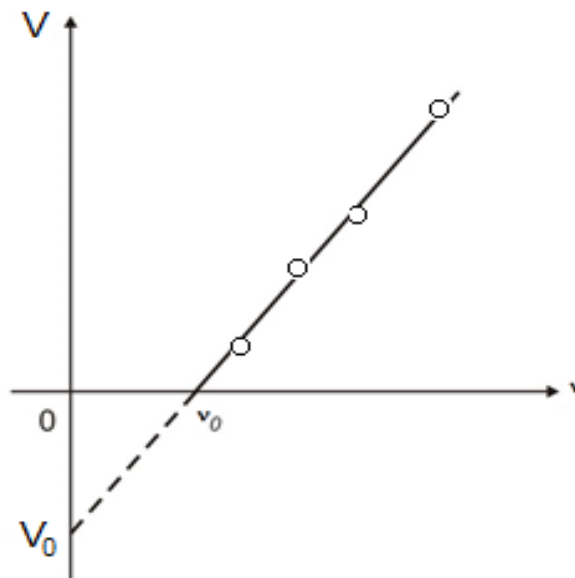


Figura 3.3: por este gráfico de potencial V versus frequência ν é possível perceber que para determinado metal existe uma frequência mínima de corte ν_0 capaz de arrancar elétrons do metal.

Portanto, a mínima energia capaz de arrancar elétrons de um metal é independente da intensidade de luz, ou seja, não depende da quantidade de fótons emitidos pela luz, basta um fóton para um elétron.

Albert Einstein seguiu as ideias de Planck e associou a frequência de oscilação dos átomos do ressonador do corpo negro com a frequência da luz emitida e incidente no metal em forma de pacotes. Posteriormente chamou estes pacotes de fótons (partículas de Luz). Essa nova concepção da luz como partícula não foi bem

aceita entre os cientistas da época, entre eles, Planck e Robert Millikan¹⁵, sendo que somente em 1913, no estudo do efeito Compton¹⁶, esta teoria dual da luz foi aceita.

Foi, portanto, a partir das considerações de Planck sobre a energia discreta no estudo da radiação do corpo negro e as ideias de Einstein sobre a quantização da energia para explicar o efeito fotoelétrico que nasceu um amplo campo de investigação referente a Mecânica Quântica.

Einstein recebeu o prêmio Nobel de Física em 1921 devido a sua “contribuição à Física Teórica e pela descoberta da lei do efeito fotoelétrico”.

¹⁵ Robert Andrews Millikan (1865 – 1953), físico experimental americano que em 1914 determinou experimentalmente a constante de Planck pelo método do efeito fotoelétrico. Realizou várias medidas do potencial de corte em função da frequência da luz incidente, confirmando a teoria de Einstein. Millikan recebeu o prêmio Nobel em 1923 pelo trabalho intitulado como “Seu estudo sobre a carga elétrica elementar e sobre o efeito fotoelétrico” (Eisberg, et al., 1994)

¹⁶ O Efeito Compton consiste em um feixe de raios X que incide em um alvo de grafite. Compton interpretou os resultados experimentais dessa incidência dos raios X com os elétrons da grafite como se fossem um choque entre duas partículas que obedecem a relação de conservação de energia e quantidade de movimento. A energia transmitida deve ser interpretada como fótons e não como uma onda eletromagnética. (Eisberg, et al., 1994)

Capítulo 4

Os semicondutores

4.1 Teoria das Bandas

Neste capítulo será feito um breve estudo dos semicondutores, em especial os LEDs (diodos emissores de luz) pelo fato do produto elaborado neste trabalho utilizar esses elementos no estudo do efeito fotoelétrico.

Para iniciar o assunto dos materiais semicondutores é necessário analisar a condutividade de um material no nível quântico, ou seja, entender a relação de um material condutor, semicondutor e isolante com a sua estrutura molecular no nível da distribuição dos elétrons nas camadas eletrônicas. No modelo quântico os elétrons se distribuem probabilisticamente em uma região em torno do núcleo do átomo seguindo o Princípio de Exclusão de Pauli.

Em cada camada, os elétrons se distribuem em uma determinada quantidade (número) e, dependendo de sua distância ao núcleo, ele ocupará um estado de energia que aumenta conforme se afasta do mesmo. Se considerarmos um sólido, como as combinações de muitos átomos e seus elétrons, podemos imaginar muitos níveis de energia que se superpõem gerando uma região de maior quantidade de níveis permitidos. A esta reorganização dos átomos em níveis de energia chamaremos de bandas de energia (GREF, 1993). Para cada tipo de sólido de acordo com a sua distribuição eletrônica, as bandas de energia podem estar ocupadas ou não por elétrons, e em alguns casos, completamente ou não preenchidas por eles.

Vale lembrar que entre as bandas de energia, dependendo do sólido, há uma região proibida dos elétrons estarem. É nessa região que os elétrons “saltam” passando de um nível energético para outro.

O uso de diagramas do nível energético de Bandas facilitará o entendimento dos sólidos isolantes, condutores e semicondutores (Figura 4.1).

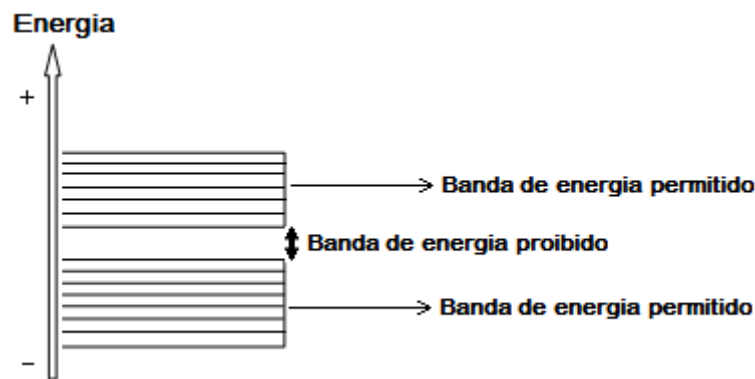


Figura 4.1: Diagrama de bandas e níveis de energia para estudo de condutividade de sólidos. As linhas horizontais representam os níveis de energia e suas distâncias, nesse diagrama, não representam a realidade, servindo apenas como ilustração.

Os elétrons podem passar de uma banda para outra desde que recebam energia suficiente igual ao desnível de uma banda inferior a outra superior. Essa energia é chamada de *Energia de Gap* (E_g).

Porém, para transições dentro de uma mesma banda a energia é muito pequena para os elétrons.

4.2 Condutores, Isolantes e Semicondutores.

Nos sólidos isolantes, os elétrons que preenchem totalmente a banda de menor energia, chamada banda de *valência* estão separadas por uma grande distância daqueles que podem ocupar a banda de maior energia, chamada de banda de *condução* (figura 4.2). Por isso a energia necessária para um elétron transitar de uma banda de valência para uma de condução, que está totalmente vazia, é alta.

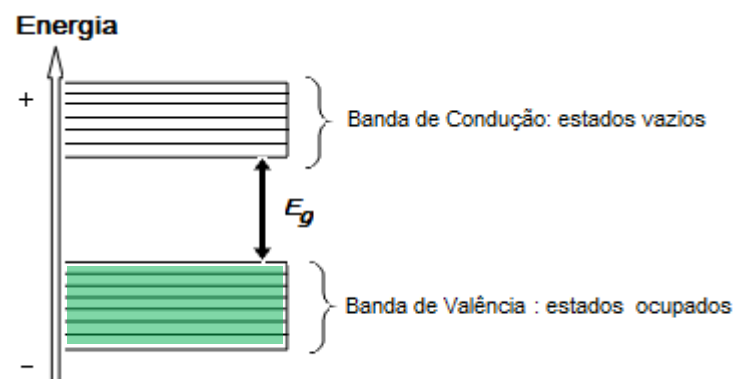


Figura 4.2: Níveis de energia para um sólido isolante. A banda de valência está hachurada para representar seu preenchimento total de elétrons.

Em um sólido condutor não há a diferença entre as bandas de condução (vazia) e de valência (ocupada), havendo um compartilhamento de elétrons por todos os átomos (figura 4.3), propiciando muitos níveis energéticos desocupados onde os elétrons “livres” podem ocupar se movimentando pelo sólido. Os elétrons, se comportam nessa região, por estarem fracamente ligados ao seu núcleo como um “gás de elétrons” (Eisberg, et al., 1994).

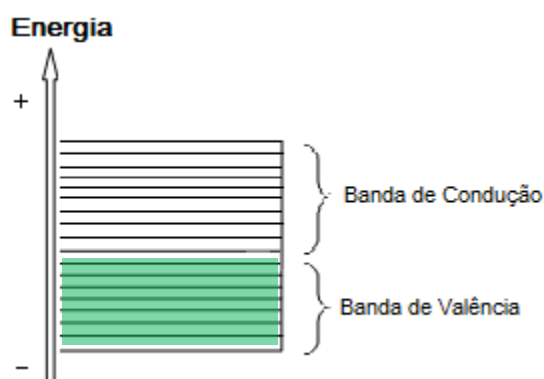


Figura 4.3: Níveis de energia para um condutor. Para este sólido um pequeno campo elétrico aplicado fornece energia suficiente para os elétrons “saltarem” para a banda de condução.

Há um terceiro grupo de sólidos, conhecidos como semicondutores onde a distância entre as bandas de valência e condução são pequenas e com um pequeno aumento de energia (aumentando a temperatura, por exemplo) elétrons “saltam” para a banda de condução tornando-o condutor, daí o nome de **semicondutores**. Alguns materiais como o silício (*Si*) e o germânio (*Ge*), mesmo a temperatura ambiente, e sob ação de um campo elétrico, podem conduzir uma corrente elétrica (GREF, 1993)

Sob o ponto de vista da teoria das bandas, a Energia de gap (E_g) entre as bandas de valência e de condução é relativamente pequena, comparada com os isolantes¹⁷. Com o ganho de energia superior a E_g , os elétrons da banda de valência passam para a banda de condução e com o aumento da temperatura, a quantidade de elétrons transferidos aumenta. Esse fenômeno torna a condutividade do semicondutor bem característica.

¹⁷ A energia de gap (E_g) para os isolantes é por volta de $E_g = 6,0 \text{ eV}$ (cristal de NaCl), enquanto para os semicondutores é da ordem de $E_g = 1,1 \text{ eV}$ (Silício). Para os condutores, onde as bandas estão praticamente justapostas essa energia é muito pequena, sendo que qualquer aplicação de uma campo elétrico há condução.

Como os átomos de Silício possuem 4 elétrons na camada de valência, as ligações covalentes entre os elétrons ficam modificadas. Uma região na parte inferior da banda de condução fica com os elétrons que deixaram a banda de valência, que por sua vez, ficam com lacunas “positivas” (falta de elétrons). Essas lacunas na banda de valência servirão como “buracos” receptores de outros elétrons, e por esse motivo, aparecerá um movimento de elétrons num sentido ao mesmo tempo que um movimento de “lacunas” em sentido oposto, originando uma corrente elétrica (figura 4.4 e 4.5).

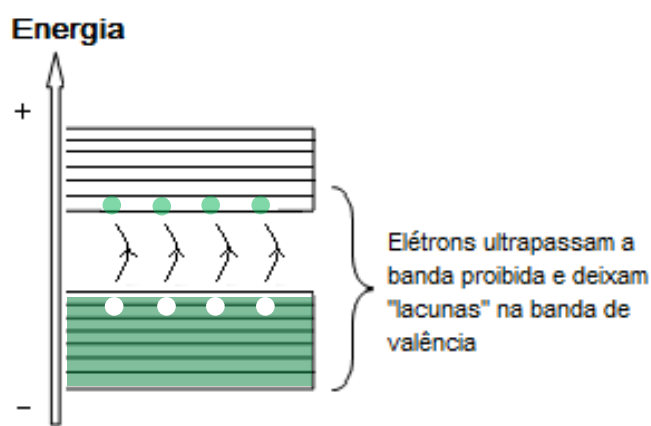


Figura 4.4: Níveis de energia em bandas num sólido de Silício semicondutor. Devido a excitação térmica com ganho de energia superior a energia de *gap* (E_g) os elétrons “saltam” para a banda de condução tornando o sólido de Silício condutor.

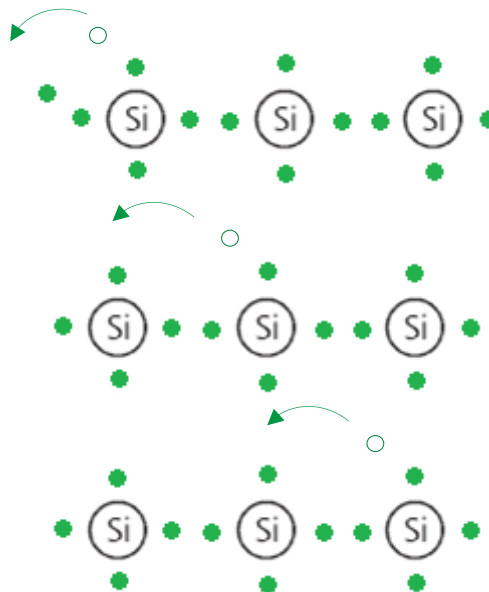


Figura 4.5: Representação da sequência do movimento dos elétrons do átomo de Silício (Si) e suas respectivas “lacunas” (falta de elétrons), devido a uma excitação térmica. (GREF, 1993)

4.3 Dopagem em semicondutores.

Os semicondutores quimicamente puros, como silício e o germânio também são chamados de semicondutores *intrínsecos*. Porém existem aqueles que podem ser misturados com outros átomos de elementos diferentes. Neste caso chamamos de semicondutores impuros ou *extrínsecos*, que recebem uma quantidade limitada de “impurezas”. E é dessa maneira que se produzem os dispositivos eletrônicos como diodos e LEDs.

Sabemos que o Silício compartilha, por meio da ligação covalente tetravalente, os 4 átomos de sua camada de valência (Figura 4.6). Se introduzirmos no material do *silício* (Si) uma quantidade de átomos de *arsênio* (As), verificaremos uma alteração na condutividade do material. No caso o átomo de Arsênio é o elemento chamado de impureza e este processo é conhecido como dopagem (Paula, et al., 2011)

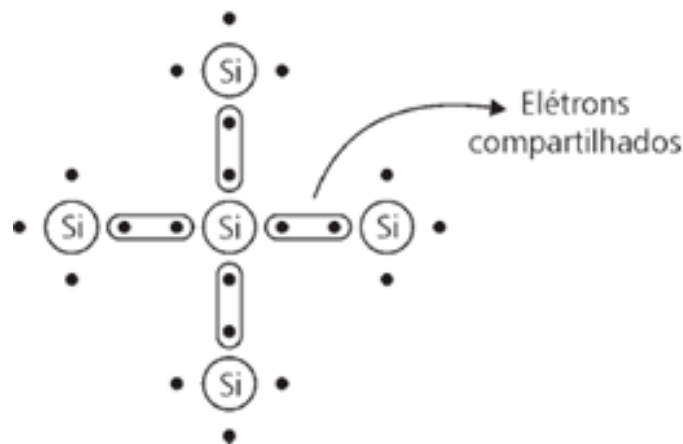


Figura 4.6: Ligação covalente do Silício compartilhando os elétrons.

O arsênio, por sua vez, possui 5 elétrons na camada de valência contra 4 do silício e isso fará com que **um** elétron fique sobrando na estrutura (Figura 4.7) quando for introduzido um átomo desse elemento no sólido de silício. Assim esse novo material “dopado” recebe o nome de semicondutor do tipo **n** (“n” de negativo, pois terá um elétron “livre” em excesso).

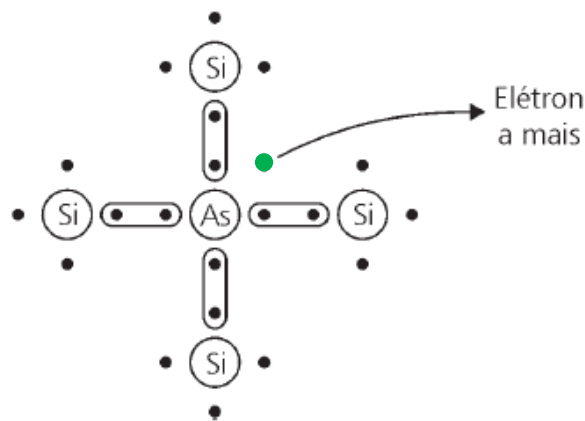


Figura 4.7: Semicondutor de Silício dopado com Arsênio (tipo **n**). A “impureza” depositada no silício torna este átomo **doador** de elétrons.

Agora, se ao invés de colocarmos arsênio, escolhermos a substância *índio* (*In*), que possui apenas 3 elétrons na camada de valência, a introdução de um átomo de Índio¹⁸ em um sólido de Silício, fará com que um elétron fique em “falta” nesta ligação. Esta falta de elétron deixará uma “lacuna” fazendo com que outro elétron seja atraído para este buraco (figura 4.8). Neste caso teremos o surgimento de lacunas “positivas”, e por isso este semicondutor é do tipo **p** (**p** de positivo ou “falta de elétron”).

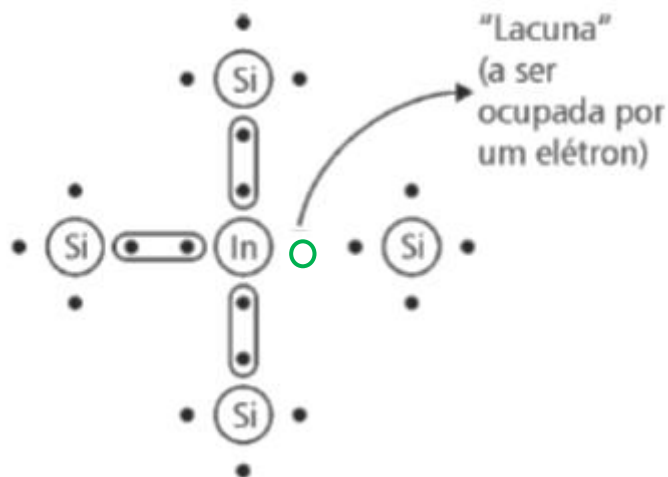


Figura 4.8: Semicondutor de Silício dopado com Índio (tipo **p**). A “impureza” depositada no silício torna este átomo **receptor** de elétrons.

¹⁸ Legenda prática para a visualização dos elétrons distribuídos na camada de valência dos átomos .



4.4 Junção PN e Diodos.

Se juntarmos dois cristais de silício “impuros” do tipo **n** e **p**, formaremos um cristal onde haverá uma troca de cargas positivas (lacunas) e negativas devido as suas interações elétricas. Haverá um fluxo considerável para o estabelecimento do equilíbrio elétrico, onde elétrons da região **n** migram para a região **p**, fenômeno este conhecido por **recombinação**.

Por essa razão, acumular-se-á, na junção, cargas negativas de um lado e “lacunas” positivas do outro, como se fosse um capacitor plano de faces paralelas. Cria-se aí o que se chama de barreira de potencial (figura 4.9a e 4.9b). Essa barreira de potencial é limitada por um campo elétrico que aparece no sentido da região **n** para a região **p**, limitando a movimentação das cargas. (GREF, 1993)

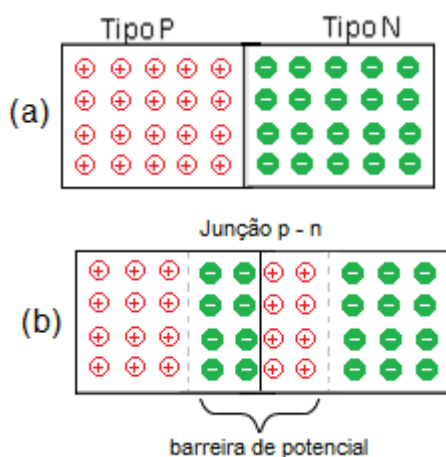


Figura 4.9: (a) representação dos semicondutores tipo **p** e tipo **n**. (b) Equilíbrio após junção p-n com a barreira de potencial.

Os *diodos* são dispositivos eletrônicos que se comportam atômica e eletronicamente como uma junção do tipo p-n, permitindo a passagem de corrente elétrica apenas em um sentido. Aplicando-se uma ddp entre os extremos desse semicondutor (o Diodo) e conseqüentemente um campo elétrico externo, verificamos dois efeitos distintos de acordo com a polaridade da fonte.

1º) Caso o lado positivo da bateria for colocado do lado da junção **p** e o lado negativo colocado do lado **n**, aparecerá uma corrente elétrica pois haverá uma

fluidez dos elétrons “retirados” do lado **p**, gerando novos buracos a serem preenchidos pelos elétrons do lado **n** (Figura 4.10a).

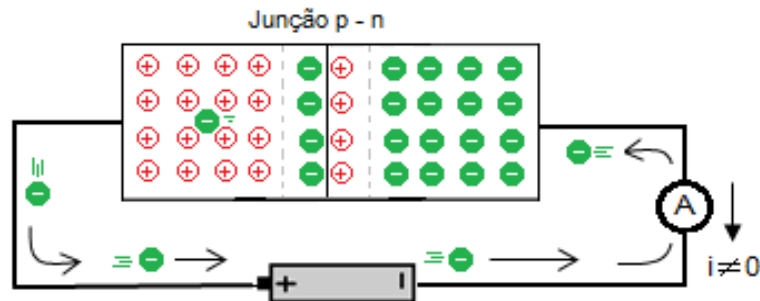


Figura 4.10a: **Há** corrente elétrica. Polaridade direta.

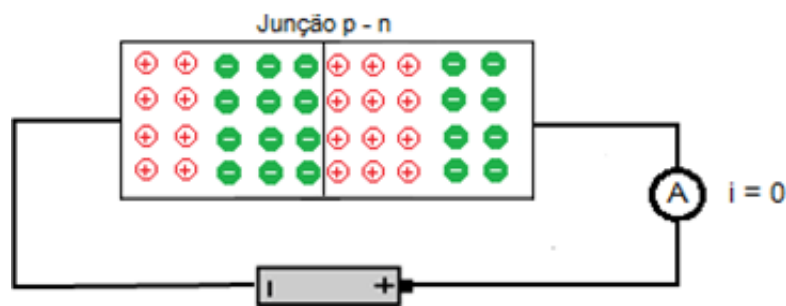


Figura 4.10b: **NÃO há** corrente elétrica. Polaridade indireta ou reversa.

2º) Caso a ligação do polo positivo da bateria for ligada no lado **n** e o polo negativo no lado **p** do semiconductor, **não** aparecerá corrente elétrica ($i=0$) pois haverá um acúmulo de cargas na junção, aumentando a barreira de potencial, não gerando fluxo de um lugar para o outro (Figura 4.10b).

É por isso que o diodo do tipo **pn** somente aceita corrente elétrica em um único sentido, funcionando como uma válvula unidirecional de elétrons e lacunas. Como todo dispositivo eletrônico, o diodo tem um símbolo cuja figura representa a orientação do sentido da corrente elétrica (figura 4.11).

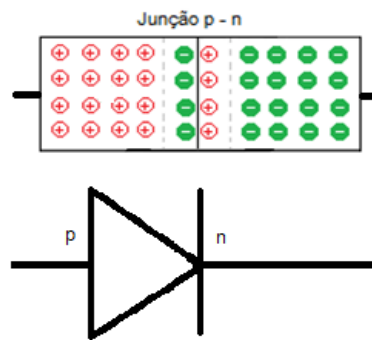


Figura 4.11: Símbolo de um diodo.

4.5 Funcionamento dos LEDs

O LED é um dispositivo eletrônico encontrado em grande parte em aparelhos, como visores de painéis, controle remotos, mostradores digitais, semáforos e, principalmente, na produção de lâmpadas que ultimamente vem substituindo, em razoável escala, as lâmpadas fluorescentes. Isso se deve ao fato pelo qual os LEDs consomem menos energia elétrica e duram mais tempo que os demais tipos de lâmpadas.

Eles são diodos dopados com impurezas do tipo **n** e **p** e é na junção desses dois materiais que haverá a emissão de luz, por isso são chamados de diodos fotoemissores ou diodos emissores de luz¹⁹.

Esses semicondutores são feitos com “impurezas” responsáveis em produzir uma grande quantidade de elétrons na camada de condução (região n, da junção p-n), que quando submetido a uma tensão suficiente, os elétrons em maior energia na camada de condução “saltam” da região **n** para a região **p** de menor energia do LED, ocupando as “lacunas”. Esses saltos são acompanhados da emissão de luz que corresponde a uma energia E na faixa do visível. Como essa energia é quantizada, ela vem associada a um fóton de energia $h\nu$, onde ν é a frequência da luz emitida.

Dependendo do material que é feito a junção do LED, este pode emitir luz do infravermelho ao violeta. (Figura 4.12)

¹⁹ **LED**, do inglês “**L**ight **E**mitting **D**iodes”.

Semicondutor	Cor da luz	Comprimento de onda
Arsenieto de gálio e alumínio	Infravermelha	880 nm
Arsenieto de gálio e alumínio	Vermelha	645 nm
Fosfato de alumínio, índio e gálio	Amarela	595 nm
Fosfato de gálio	Verde	565 nm
Nitreto de gálio	Azul	430 nm

Figura 4.12: Tabela com os elementos químicos de um semicondutor do tipo LED para a geração de luz e seu correspondente comprimento de onda luminosa. Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Diodo_emissor_de_luz (acesso em 12/05/2016).

A seguir uma representação da junção **pn** de um LED (figura 4.13a e 4.13b) onde os elétrons e “buracos” se movem ocupando a barreira de potencial no equilíbrio.

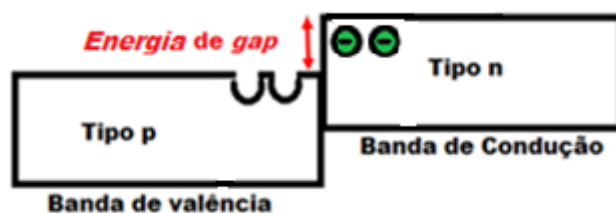


Figura 4.13a: Representação da junção de um LED na situação de equilíbrio, com alguns elétrons e “buracos”.

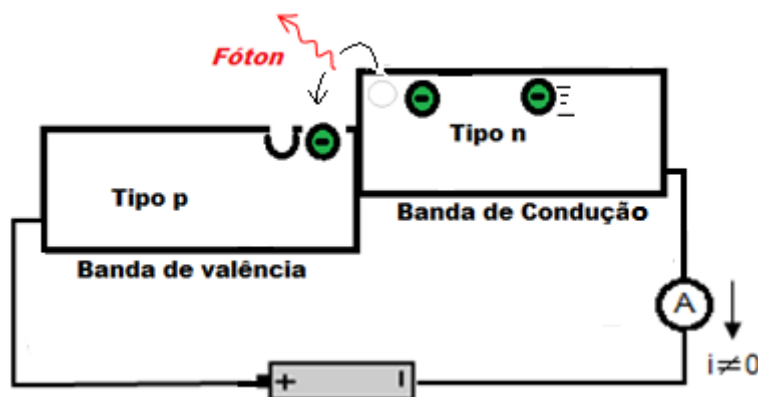


Figura 4.13b: Representação da junção de um LED na situação de desequilíbrio devido a aplicação de uma tensão externa. Os elétrons “saltam” para ocupar os buracos e emitem fótons de luz com energia $h\nu$, onde ν é frequência de luz emitida.

Vale lembrar que a emissão da luz só ocorre a partir de uma tensão acima da tensão limitada pela impureza do LED (Energia de Gap).

Os LEDs (figura 4.14) funcionam normalmente, emitindo luz, sob uma tensão entre 1,5 e 3,4 volts. O comprimento de onda da luz emitida (e consequentemente a sua luz) depende do *gap* de energia dos materiais que constituem a junção **p-n**.

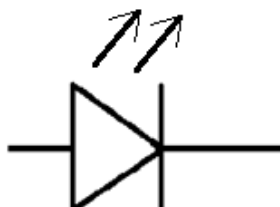


Figura 4.14: Representação de um Led

Se quisermos um LED com maior luminosidade, basta aumentarmos a tensão e por sua vez a corrente elétrica que se estabelece sobre ele.

Mas e se o LED receber uma certa intensidade de luz, ele pode funcionar como um detector de onda eletromagnética?

4.6 LEDs como detectores de Luz: os fotodiodos.

Nos semicondutores a simples aplicação de energia externa, como calor, pode fazer com que elétrons se desloquem de uma banda de energia (valência) menos energética para uma banda mais energética (condução). Isso fará que o semicondutor gere uma corrente elétrica.

Em LEDs (semicondutores dopados e emissores de luz) é possível aplicar essa energia externa sob forma de luz (onda eletromagnética) e esta registrar uma corrente elétrica como nos painéis fotovoltaicos e “baterias solares” (Paula, et al., 2011).

Como os LEDs comerciais são fabricados com cristais semitransparentes e capas transparentes que permitem a passagem de luz, se uma luz de energia $h\nu$ incidir em sua face haverá, dependendo da energia, “saltos” de elétrons para camadas de energia superior. E, portanto, com uma incidência direta de luz (fótons) neste LED, agora chamado de fotodiodo, é possível verificar por meio de um amperímetro o estabelecimento de uma corrente elétrica num circuito associado a ele. (figura 4.15a e 4.15b)

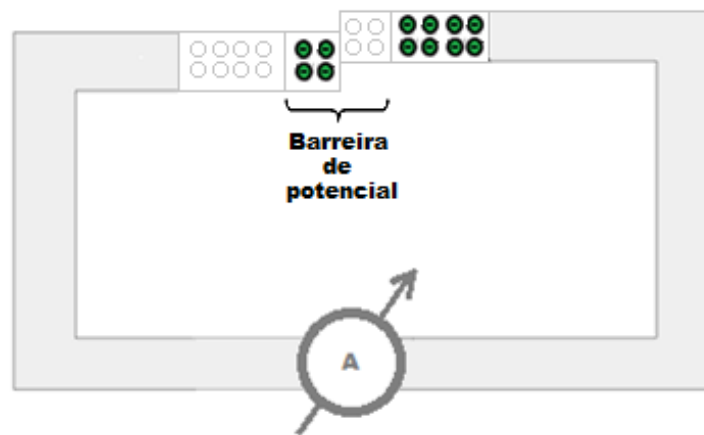


Figura 4.15a: Representação de um LED com a junção **pn** em equilíbrio. A recombinação entre elétrons e “buracos” forma uma barreira de potencial de energia de gap específica para cada material que é feito o LED.

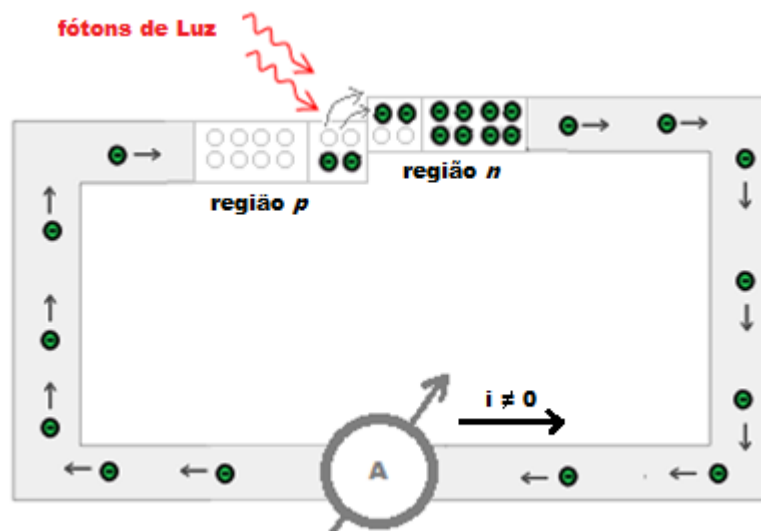


Figura 4.15b: Representação da incidência de **fótons de luz** sobre um LED. Se unirmos os extremos do Led (suas polaridades) por fios e um amperímetro, este acusará uma corrente elétrica.

Os elétrons da barreira de potencial da região **p** que receberam energia $h\nu$ dos fótons de Luz, se deslocam para a região **n** e, por um fio condutor passam para regiões de energia mais baixa (região **p**), que por sua vez recebem novamente energia da luz incidente, gerando assim uma corrente elétrica contínua $i \neq 0$. Essa corrente elétrica é chamada de corrente reversa ou fotocorrente e é muito baixa (da ordem de microamperes – μA). Dependendo da natureza de que é feito o LED essa corrente elétrica pode variar de acordo com a luz monocromática incidente. Para LEDs monocromáticos que vão do

infravermelho ao violeta a energia de gap cresce a medida que a frequência de luz emitida aumenta, ou seja, são proporcionais.

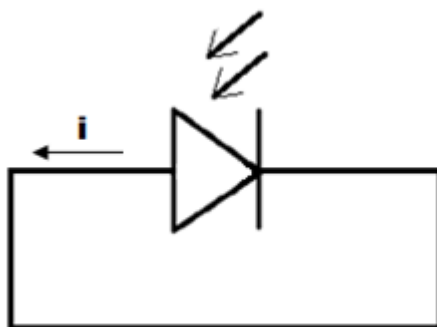


Figura 4.16: Representação de um Led como detector de luz gerando fotocorrente i (Fotodiodo ou fotorreceptor).

Capítulo 5

A Proposta do experimento.

5.1 A concepção do circuito elétrico.

Os experimentos encontrados para comercialização que estudam os fenômenos envolvidos no efeito fotoelétrico, utilizam equipamentos e materiais de altíssimo custo. São nas Universidades e, em raríssimas exceções, nas escolas de Ensino Médio, principalmente as particulares, que se encontram esses experimentos. Algumas empresas especializadas como, Phywe, Leybold, Pasco entre outras comercializam para essas instituições o aparato experimental do efeito fotoelétrico. Além disso, outros fatores impedem a aquisição desses equipamentos:

1º. os cuidados em relação ao manuseio e a exposição de professores e alunos com fontes de luz que envolvem radiação de alta frequência (radiação ultravioleta).

2º: as medidas experimentais obtidas para a corrente elétrica do fotocátodo requerem grande precisão (na ordem de microamperes).

3º: o manuseio desses equipamentos deve ser acompanhado por um técnico, além da manutenção que se deve ter.

Pelos estudos e pesquisas realizados sobre possíveis experimentos que envolvem o estudo do efeito fotoelétrico no Ensino Médio encontramos nas referências (Cavalcante, 2002), (Haag, et al., 2005), (Paula, et al., 2011), (Cavalcante, et al., 2007), (Moura, et al., 2011) muitas aplicações práticas utilizando materiais de baixo custo, como LEDs, lâmpadas e outros dispositivos elétricos. Porém o que se vê, em sua maioria, são experimentos que trabalham muito bem com LEDs e que tem por finalidade a determinação da constante de Planck por meio da iminência da emissão de luz. Não foi encontrado, por exemplo, experimentos que trabalhassem, simultaneamente, outras nuances do efeito fotoelétrico como: fotocorrente, tensão reversa e o estudo da independência da tensão de corte pela intensidade luminosa incidente, também conhecida como potencial de frenagem.

A primeira ideia foi utilizar uma válvula fotoelétrica e usá-la como um fotocátodo ao serem iluminadas por LEDs monocromáticos. Porém não demos prosseguimento ao estudo pois o custo da válvula, mesmo sem testá-la, inviabilizaria

o investimento. A proposta foi utilizar LEDs como fotorreceptor, potenciômetros, multímetros e resistores com a finalidade de elaborar um equipamento que se assemelhasse com o experimento do efeito fotoelétrico. Na configuração final elaboramos dois circuitos, o primeiro utilizando LEDs como fonte de luz cuja intensidade luminosa fosse controlada por meio de um potenciômetro²⁰.

O segundo circuito, como diferencial, foi utilizar outro LED como fotoreceptor, ou seja, ele seria iluminado de tal maneira que o mesmo funcionasse como uma placa de fotocatodo (fotodiodo) e por meio de um amperímetro associado a ele determinaríamos sua corrente elétrica (fotocorrente).

O próximo passo foi inserir neste segundo circuito uma fonte de tensão variável que pudesse “frear” essa fotocorrente e, com um voltímetro, determinar o potencial de frenagem.

Com a construção deste segundo circuito elétrico, em que o “LED iluminado” funcionaria como receptor algumas hipóteses, listadas a seguir, foram levantadas. Vejamos a seguir:

1. Verificar a existência ou inexistência de fotocorrente sobre um “LED iluminado”. Neste caso a ideia é perceber que LEDs de frequência alta, azul por exemplo, ao serem iluminados com LEDs de frequência baixa, vermelha por exemplo, não funcionam como fotodiodos (não geram fotocorrente). Já o oposto, ou seja, LEDs de frequência alta iluminando LEDs de frequência baixa, geram fotocorrente.
2. Variar a intensidade da fonte de luz e verificar que a fotocorrente no “LED iluminado” é diretamente proporcional a esta.
3. Plotar um gráfico da corrente elétrica (i) *versus* tensão reversa (V) e encontrar o potencial de frenagem quando a fotocorrente zerar.
4. Iluminar um mesmo LED com intensidade menor e plotar um segundo gráfico da corrente elétrica *versus* tensão reversa e verificar a independência do potencial de frenagem com a intensidade da luz.

²⁰ Este tipo de circuito é encontrado em várias referências na internet. Destacamos aqui a feita pela professora e pesquisadora Dra. Marisa Cavalcante que tem muitos trabalhos a respeito como já mencionado em (Cavalcante, et al., 2007).

5. Construir um gráfico com os pontos do potencial de frenagem *versus* frequência da luz para cada LED monocromático (infravermelho, vermelho, laranja e verde) e, pela inclinação da reta, determinar a constante de Planck.

Nas pesquisas bibliográficas realizadas encontramos um experimento que utiliza o LED como fonte receptora de luz para a determinação da constante de Planck (Haag, et al., 2005). Neste caso foi utilizado como fonte, uma lâmpada incandescente de automóvel de especificação (12V - 21W) cuja temperatura era determinada em função da Lei de Stefan-Boltzmann e a constante de Planck utilizando uma aproximação da expressão de Wien. Com um gráfico de $\ln(\text{intensidade para um dado}) \times 1/T$ (T é a temperatura do filamento da lâmpada), determinava-se a constante h pela inclinação da reta do gráfico.

O texto ressalta que o próprio experimento, que utiliza um amplificador de corrente, é indicado para os cursos de graduação e licenciatura em Física, o que foge de nossa proposta para o Ensino Médio.

Outras variantes de experimento (Arruda, et al., 1991) (Paranhos, et al., 2008), utilizam lâmpadas de vapor de Mercúrio, onde são desmontadas e retirado o invólucro de vidro. Ao serem ligadas, emitem radiações na faixa do ultravioleta e com um eletroscópio de folhas carregado pode-se perceber o efeito fotoelétrico ao incidir a radiação da lâmpada sobre ele. Neste caso, os alunos assim como os professores ficariam expostos a radiação, tornando a demonstração proibitiva em uma escola.

5.2 Montagem dos circuitos.

O primeiro circuito elétrico a ser construído, chamado aqui de **módulo A**, foi o LED associado a um resistor de $220\ \Omega$ ²¹ e uma fonte de tensão de 9 V. Com um potenciômetro de 10 K Ω regula-se a intensidade de luz do LED (figura 5.1).

²¹ O resistor de $220\ \Omega$ serve como limitador de tensão para o LED. Isso é necessário pois LEDs de alto brilho suportam no máximo tensões de até 3,5V e corrente de 25mA dependendo da cor do Led.

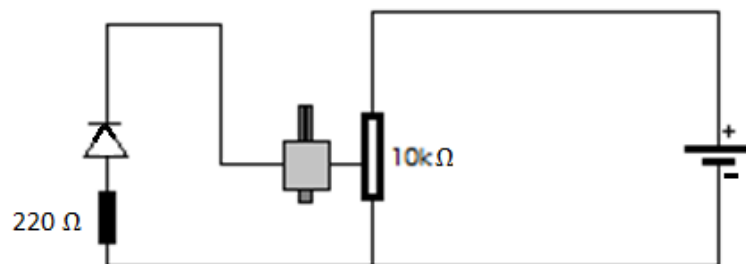


Figura 5.1: circuito elétrico que regula a intensidade de luz emitida por um LED.

Com este equipamento já é possível determinar a constante de Planck. O procedimento consiste em associar um voltímetro nos terminais do potenciômetro e determina-se a tensão quando o LED inicia a emissão de luz (Cavalcante, 2002).

No segundo circuito, chamado de **módulo B**, os terminais do LED a ser iluminado são associados a um amperímetro que medirá uma corrente elétrica. Porém, ao tentar medir esta fotocorrente com um amperímetro de fundo de escala em mA nada foi detectado, pois a fotocorrente gerada pelo “LED iluminado” é da ordem de microamperes (μA)²². Em virtude do exposto, colocamos um resistor de $1\text{ M}\Omega$ na polaridade negativa do “LED iluminado” e com um voltímetro V_1 em paralelo com o resistor medimos a tensão V . Utilizando-se da Lei de Ohm: $V = R \cdot i$, é possível com, determinada precisão, medir a corrente elétrica na ordem de microamperes (figura 5.2).

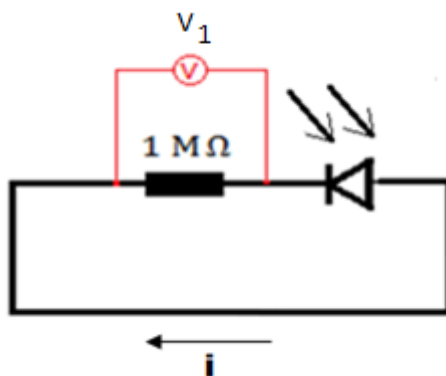


Figura 5.2: diagrama do circuito inicial (*módulo B*), com o “amperímetro de baixo custo” associado ao circuito. O LED iluminado gera a fotocorrente i

O passo seguinte foi elaborar um circuito que fornecesse uma tensão reversa e variável que pudesse frear a corrente de fotoelétrons emitidos pelo “LED iluminado”. Em seguida, com um segundo voltímetro V_2 associado a fonte de tensão

²² Este experimento teste foi feito posteriormente com um pico-amperímetro no Laboratório de Física da UFABC e detectou-se uma corrente elétrica na ordem de microampères (μA).

reversa, mediu-se o potencial necessário para que a corrente no “LED iluminado” fosse zerada. Esta é a tensão (Energia) responsável em parar os elétrons, chamada de tensão de corte ou potencial de frenagem (V_f).

Por fim foi associado à fonte de tensão um potenciômetro multivolta de $50\text{K}\Omega$, com a finalidade de conseguir mais pontos para a confecção do gráfico $i \times V$ (figura 5.3) .

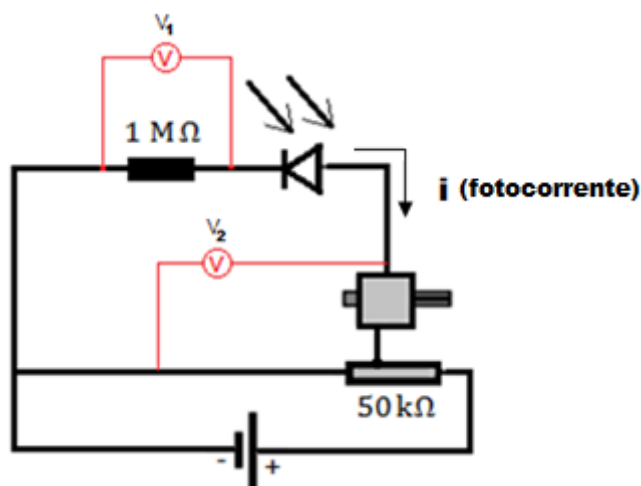


Figura 5.3: esquema final do circuito a ser montado com a fonte de tensão variável conectada ao potenciômetro multivolta.

Para que pudessemos trocar os LED's foi colocado nos dois módulos um conector “molex” (figura 5.4) e seu contato soldado ao fio de cada polaridade do LED. Isso facilitou muito a mudança de LEDs, tanto no módulo A como no B.

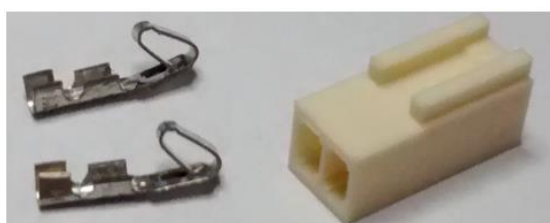


Figura 5.4: conector “molex” e seus contatos.

Todos os testes foram feitos sobre um protoboard²³, sendo que a maior dificuldade era conseguir uma incidência estável da fonte de luz LED (*módulo A*) sobre o “LED iluminado” do *módulo B*.

De modo a contornar essa instabilidade, a ideia foi utilizar um pedaço de caneta tipo “BIC” cortada num comprimento tal, em que os LEDs ficassem

²³ Protoboard é uma plataforma de testes para circuitos elétricos com uma matriz de contatos.

inteiramente dentro do tubinho e alinhados. E para não haver perda do sinal para o meio externo colocou-se um pequeno pedaço de papel sulfite dentro do tubinho da caneta “BIC” (figura 5.5).

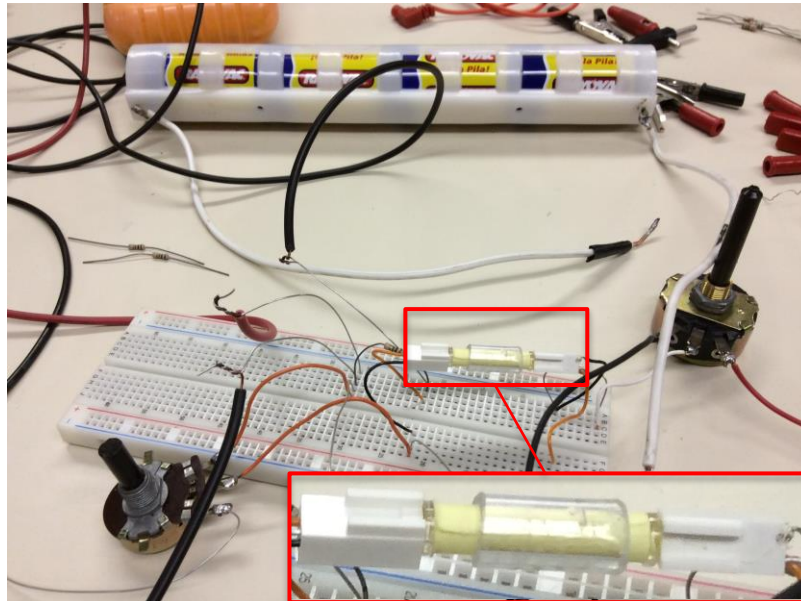


Figura 5.5: imagem dos testes realizados com o protoboard. No detalhe, os conectores “Molex” com os LED’s e o tubinho de caneta tipo “BIC”.

Após todos os testes, foram construídos os dois módulos utilizando os materiais necessários descritos no Apêndice A. (figura 5.6)

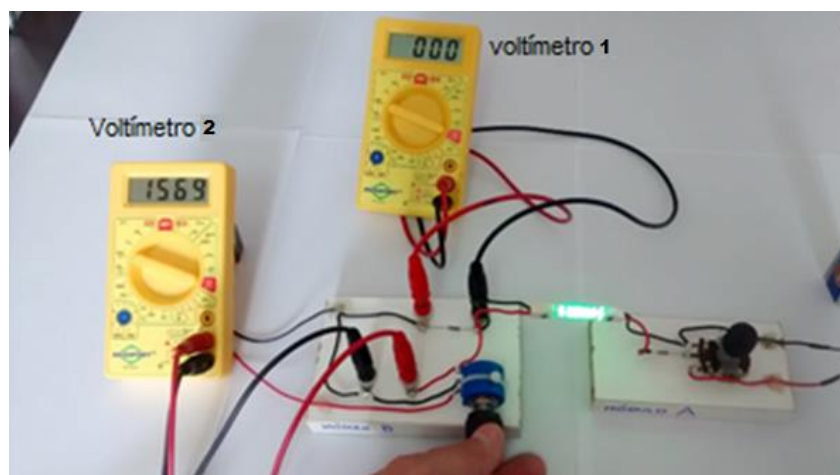


Figura 5.6: imagem do aparato experimental com os dois módulos A e B em funcionamento e seus respectivos multímetros associados. Na imagem podemos ver o voltímetro 2 indicando o potencial de frenagem (V_f) de um LED vermelho iluminado por um verde (módulo A). Repare na fotocorrente zerada no voltímetro 1.

5.3 Tomada de dados do experimento.

Construído os dois módulos do equipamento, fizemos várias medidas e testes do experimento e sua possível aplicação, para posteriormente elaborar atividades com os alunos (Figura 5.7).

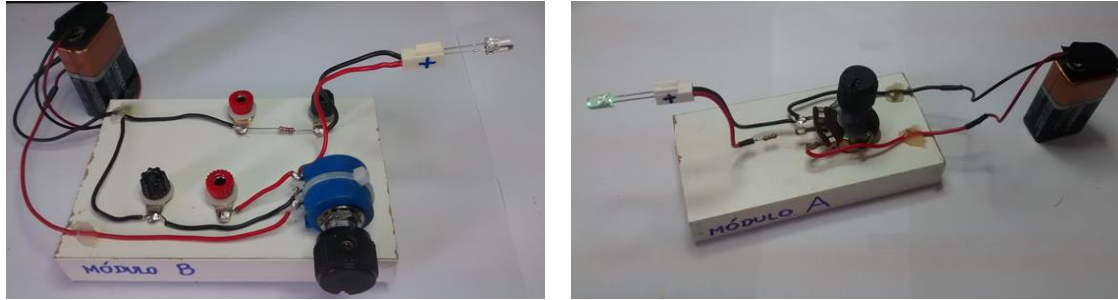


Figura 5.7: Imagens dos módulos A e B finalizados para início do experimento e tomada de dados.

Foram utilizados LEDs monocromáticos de alto brilho das seguintes cores: azul, verde, laranja, vermelho e infravermelho. O primeiro passo foi iluminar LEDs de baixa frequência com LEDs de alta frequência. Em cada caso foi medido a fotocorrente no voltímetro 1 associado ao *módulo B* e registrou-se numa tabela (figura 5.9). Repetiu-se em seguida, o mesmo processo, porém invertendo-se os LEDs. Iluminou-se LEDs de alta frequência com LEDs de baixa frequência (figuras 5.8a e 5.8b).

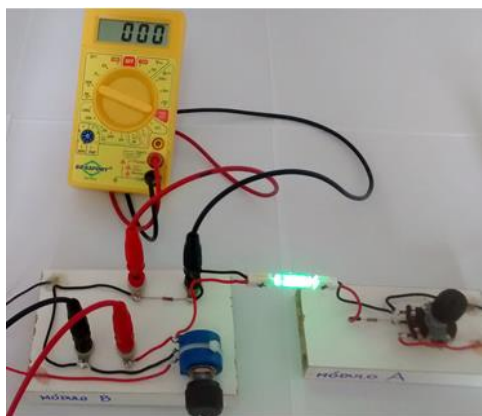


Figura 5.8a: LED verde iluminando LED azul. Sem fotocorrente



Figura 5.8b: LED azul iluminando LED verde. Com fotocorrente de 1,243 μA

Led fonte (módulo A)	Led iluminado (módulo B)	Tensão medida (em mV)	Fotocorrente estimada (em nA)
Infravermelho	Vermelho	0	0
Vermelho	Infravermelho	812 ± 6	812 ± 41
Vermelho	Verde	0	0
Verde	Vermelho	1550 ± 10	1550 ± 78
Laranja	Verde	0	0
Verde	Laranja	1590 ± 10	1590 ± 80
Verde	Azul	0	0
Azul	Verde	2010 ± 12	2010 ± 101

Figura 5.9: tabela com algumas medidas e resultados da tensão acusada pelo LED iluminado e a fotocorrente estimada pela lei de ohm $i = V/R$. O resistor utilizado foi de 1,0 M Ω com tolerância de 5%.

Nesta etapa o aluno pode observar e perceber a dependência da frequência da luz capaz de gerar ou não a tensão (ou fotocorrente) em um LED de maior ou menor frequência. Verificou-se também que, ao iluminar LEDs do módulo B com menor intensidade luminosa, é possível mostrar que o módulo da fotocorrente gerada é proporcional a intensidade da Luz.

Conhecida então as possíveis maneiras de gerar uma fotocorrente em um LED iluminado (*módulo B*), pode-se determinar a energia dos elétrons liberados na junção **pn** de cada LED (verde, laranja, vermelho e infravermelho), por um efeito muito parecido com o do fotoelétrico. Vejamos:

No módulo A colocou-se um LED azul para iluminar um LED vermelho com a máxima intensidade e em seguida anotou-se a fotocorrente estabelecida pelo **voltímetro 1** (Figura 5.10)

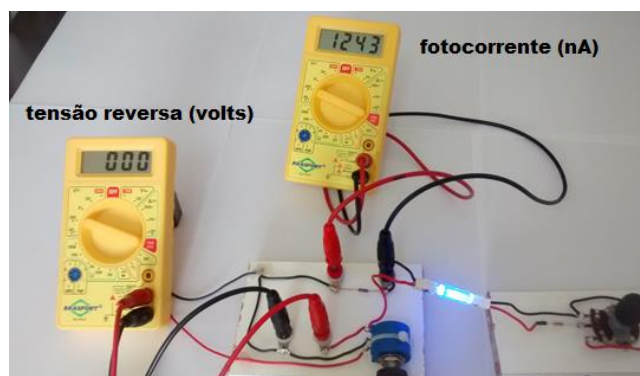


Figura 5.10: Led Azul iluminando com máxima intensidade o Led vermelho do módulo B.

Com o potenciômetro multivolta do módulo B, variou-se a tensão reversa no circuito de zero até um valor de potencial que zerasse a fotocorrente estabelecida no voltímetro 1 (figura 5.11)



Figura 5.11: Sequência de imagens em que os voltímetros 1 e 2 apresentam, respectivamente, fotocorrente zero e potencial de frenagem $V_f = 1511$ mV.

Essa tensão final medida pelo voltímetro **2** (associado ao potenciômetro) é a chamada tensão de frenagem V_f , responsável em anular a corrente elétrica gerada pelo LED vermelho.

Durante esta sequência de medidas, marcou-se em uma tabela (Figura 5.12) os valores da tensão reversa e da fotocorrente do “LED iluminado”.

Tabela1		Tabela 2	
U(V)	i(μ A)	U(V)	i(μ A)
0	0,922 \pm 0,047	0	0,490 \pm 0,025
0,313 \pm 0,002	0,900 \pm 0,045	0,471 \pm 0,004	0,475 \pm 0,024
0,617 \pm 0,004	0,800 \pm 0,040	0,881 \pm 0,006	0,450 \pm 0,023
0,755 \pm 0,005	0,700 \pm 0,035	1,014 \pm 0,007	0,400 \pm 0,020
0,877 \pm 0,006	0,600 \pm 0,030	1,090 \pm 0,007	0,350 \pm 0,018
0,991 \pm 0,007	0,500 \pm 0,025	1,157 \pm 0,008	0,300 \pm 0,015
1,100 \pm 0,008	0,400 \pm 0,020	1,219 \pm 0,008	0,250 \pm 0,013
1,208 \pm 0,008	0,300 \pm 0,015	1,279 \pm 0,008	0,200 \pm 0,010
1,317 \pm 0,009	0,200 \pm 0,010	1,336 \pm 0,009	0,150 \pm 0,008
1,422 \pm 0,009	0,100 \pm 0,006	1,394 \pm 0,009	0,100 \pm 0,006
1,432 \pm 0,009	0,090 \pm 0,005	1,414 \pm 0,009	0,080 \pm 0,005
1,444 \pm 0,009	0,080 \pm 0,005	1,438 \pm 0,009	0,060 \pm 0,004
1,455 \pm 0,009	0,070 \pm 0,004	1,449 \pm 0,009	0,050 \pm 0,003
1,465 \pm 0,009	0,060 \pm 0,004	1,459 \pm 0,009	0,040 \pm 0,003
1,475 \pm 0,009	0,050 \pm 0,003	1,471 \pm 0,009	0,030 \pm 0,003
1,485 \pm 0,009	0,040 \pm 0,003	1,482 \pm 0,009	0,020 \pm 0,002
1,495 \pm 0,009	0,030 \pm 0,003	1,494 \pm 0,009	0,010 \pm 0,002
1,500 \pm 0,010	0,020 \pm 0,002	1,507 \pm 0,010	0
1,517 \pm 0,010	0,010 \pm 0,002		
1,511 \pm 0,010	0		

Figura 5.12: Tabelas da tensão reversa x corrente fotoelétrica do LED vermelho iluminado pelo Azul. A tabela 1 refere-se a máxima intensidade de luz enquanto a tabela 2 a baixa intensidade de luz.

Para verificar a independência do potencial de frenagem com a luminosidade, repetiu-se o procedimento acima construindo uma nova tabela da tensão reversa *versus* fotocorrente. Neste caso, diminuiu-se a intensidade do LED pelo potenciômetro do módulo A, a fim de gerar um menor valor da fotocorrente (aproximadamente a metade: 0,490 μ A). E, como anteriormente, determinou-se o potencial de frenagem V_f ao zerar o voltímetro ²⁴.

²⁴ O programa usado para a construção dos gráficos foi o ORIGIN. Os potenciais de frenagem não são idênticos devido a corrente de fundo sobre o voltímetro de pequena impedância associado ao circuito.

Com as tabelas, foram plotadas duas curvas num mesmo eixo e verificou-se que (Figura 5.13):

- independente da luminosidade inicial, as curvas convergem para um mesmo ponto na abscissa, acusando praticamente o mesmo potencial de frenagem (V_f) do LED iluminado.

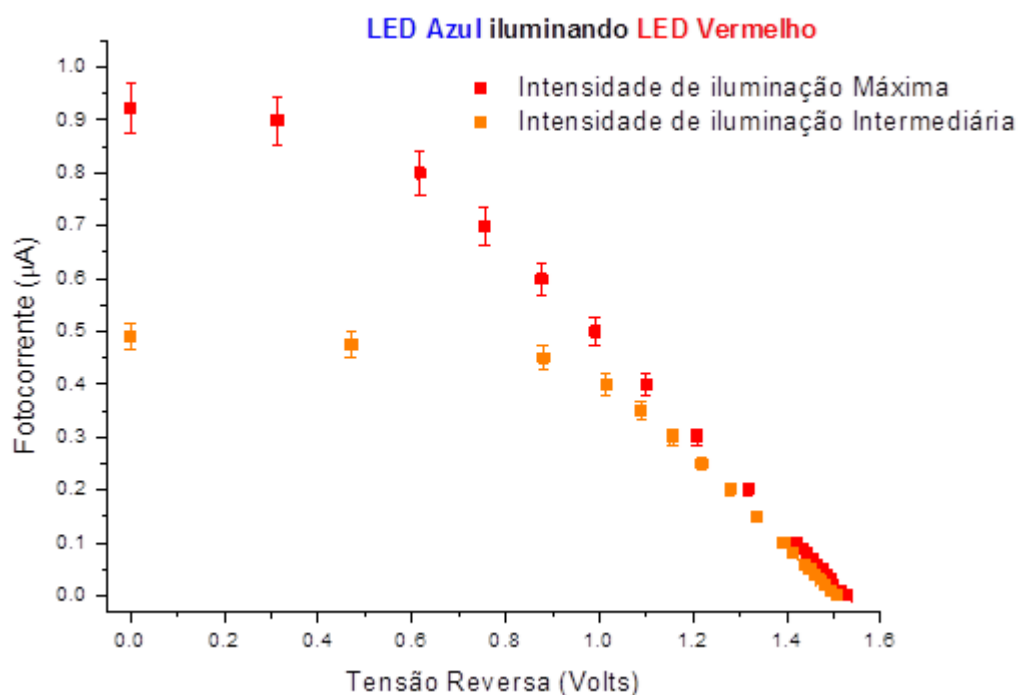


Figura 5.13: gráfico da tensão reversa *versus* corrente elétrica para luminosidades diferentes de um Led monocromático vermelho iluminado por um azul. Nota-se que, independente da luminosidade, as curvas convergem para um mesmo potencial de frenagem ($V_f \approx 1,5$ V).

Iluminando outros LED's do *módulo B* (infravermelho, laranja e verde) é possível determinar o potencial de frenagem de cada um deles²⁵.

Com seus respectivos comprimentos de onda, montou-se um gráfico do potencial de frenagem *versus* frequência de luz ($V \times \nu$) de cada "LED iluminado". Em seguida determinou-se a constante h de Planck.

²⁵ Os dados, tabelas e gráficos referentes aos outros LED's iluminados encontram-se no Apêndice C.

5.4 Cálculo da constante de Planck

O potencial de frenagem V_f é aquele responsável em “frear” os elétrons emitidos pelo LED iluminado. Ele representa a energia mínima, conhecida por Energia de **Gap**, responsável em liberar os elétrons da junção **p-n** do Led para a banda de condução. Como essa energia é função da frequência de Luz (ν) e aparece na forma de fóton, pela conservação da energia pode-se escrever a expressão

$$E = h\nu = e \cdot V_{frenagem}$$

Isolando h , teremos

$$h = e \cdot \frac{V_{frenagem}}{\nu}$$

Para cada Led de cor diferente foi determinado seu respectivo potencial associado ao seu comprimento de Luz. Em posse dos valores da carga elementar $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, dos valores de $V_{frenagem}$ e comprimento de onda λ de cada LED, montou-se a tabela da figura 5.14 a seguir com seus respectivos valores.

LED	$V_{frenagem}(\text{V})$	$\lambda \text{ (nm)}$	$\nu = \frac{c}{\lambda} (10^{14}\text{Hz})$
Verde	$2,00 \pm 0,04$	520 ± 25	$5,77 \pm 0,28$
Laranja	$1,60 \pm 0,04$	580 ± 25	$5,17 \pm 0,22$
Vermelho	$1,52 \pm 0,02$	630 ± 25	$4,76 \pm 0,19$
Infravermelho	$0,80 \pm 0,01$	880 ± 25	$3,41 \pm 0,10$

Figura 5.14: tabela com os dados retirados do apêndice C. Para o cálculo de ν foi admitido a velocidade da luz de $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$. A largura da banda de emissão dos LEDs na região entre 550nm a 900nm foi encontrada na referência (Haag, et al., 2005).

Plotou-se em seguida um gráfico do potencial de frenagem em função da frequência de luz de cada LED e com o coeficiente angular da reta obtida multiplicado pela carga elementar e , determinou-se a constante de Planck.

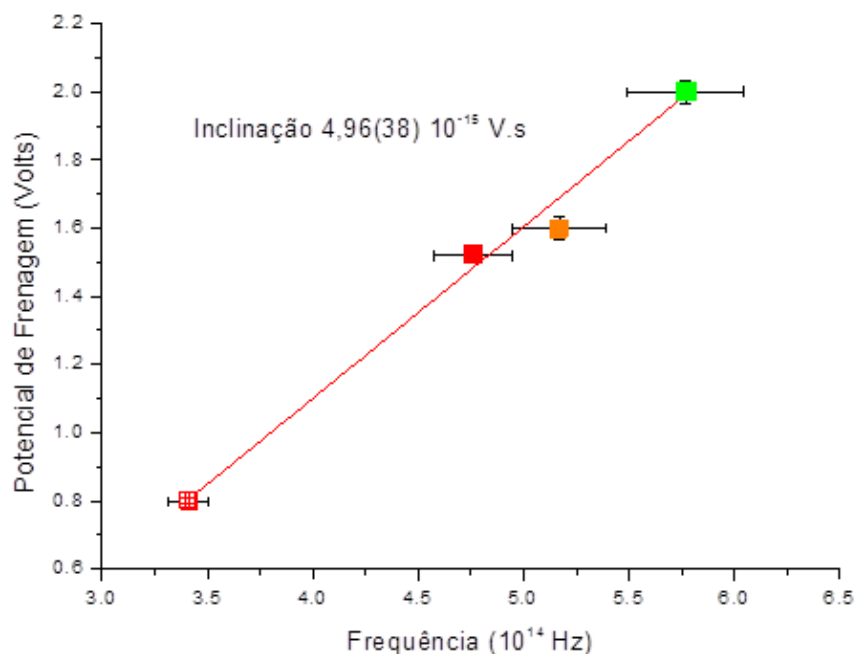


Figura 5.15: Gráfico do Potencial de frenagem (V_{frenagem}) versus frequência de luz dos Leds para determinação da constante de Planck .

Fazendo

$$h = e \cdot (\text{coeficiente angular})$$

Obteremos

$$h = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \times 0,496 \cdot 10^{-14} \text{ J.s/C}$$

$$h = (7,9 \pm 0,6) \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

O cálculo do desvio padrão encontrado no valor final da constante h foi feito com os ajustes de mínimos e máximos da reta obtida pelo gráfico (Vuolo, 1995). A faixa espectral de emissão dos LED's, entre 550nm e 900nm, também foi levada em conta (Haag, et al., 2005).

5.5 Aplicação do experimento em sala de aula

Depois de montado os dois módulos (descritos no Apêndice A), vimos a necessidade de aplicar o experimento junto aos alunos do 3º ano do Ensino Médio. Partimos então para a confecção de um conjunto de quatro equipamentos que

pudessem ser usados em um grupo de 16 alunos (4 alunos por equipamento). Com a finalização da montagem dos equipamentos foi oferecido aos alunos um curso de extensão de Física Quântica Experimental e um grande número de inscrições foram feitas, totalizando 40.

Fizemos então uma seleção de 16 alunos por meio de um sorteio em virtude do número restrito de equipamentos. Cabe aqui salientar o grande interesse dos alunos em relação ao assunto de Física Moderna, mesmo num final de ano letivo.

O curso foi dado em dois dias com duração total de 5 horas (aproximadamente 2h30 de duração cada dia, com início as 14h30). Inicialmente foi trabalhado com os alunos os conceitos de interferência e difração da luz para que pudessemos calcular o comprimento de onda de cada LED experimentalmente, pois seria necessário utilizá-los no experimento do efeito fotoelétrico.

Esse experimento está descrito no Apêndice B, parte I e foi elaborado segundo as referências (Cavalcante, et al., 2007) e (Cavalcante, 2002).

Com os dados do comprimento de onda em mãos de cada LED, o segundo passo foi aplicar o roteiro de aula sobre o fenômeno do efeito fotoelétrico, utilizando-se do produto educacional elaborado neste trabalho.

As aulas foram dadas com recursos audiovisuais, power point, demonstrações e animações com o aplicativo da Universidade de Colorado (EUA) chamado PHET, conhecido por muitos professores.

Feita esta apresentação conceitual dos fenômenos envolvidos do efeito fotoelétrico e dos semicondutores, partiu-se para a tomada de dados com os alunos.

O primeiro passo foi o aluno verificar experimentalmente que LED's de alta frequência quando iluminados por LED's de baixa frequência não geram tensão elétrica, ou seja, eles não funcionam como fotoreceptores e, portanto, não geram corrente elétrica (fotocorrente).

Em seguida eles inverteram os LED's e perceberam que os LED's monocromáticos só funcionam como fotoreceptores se forem iluminados por LED's de maior frequência.

Exemplo

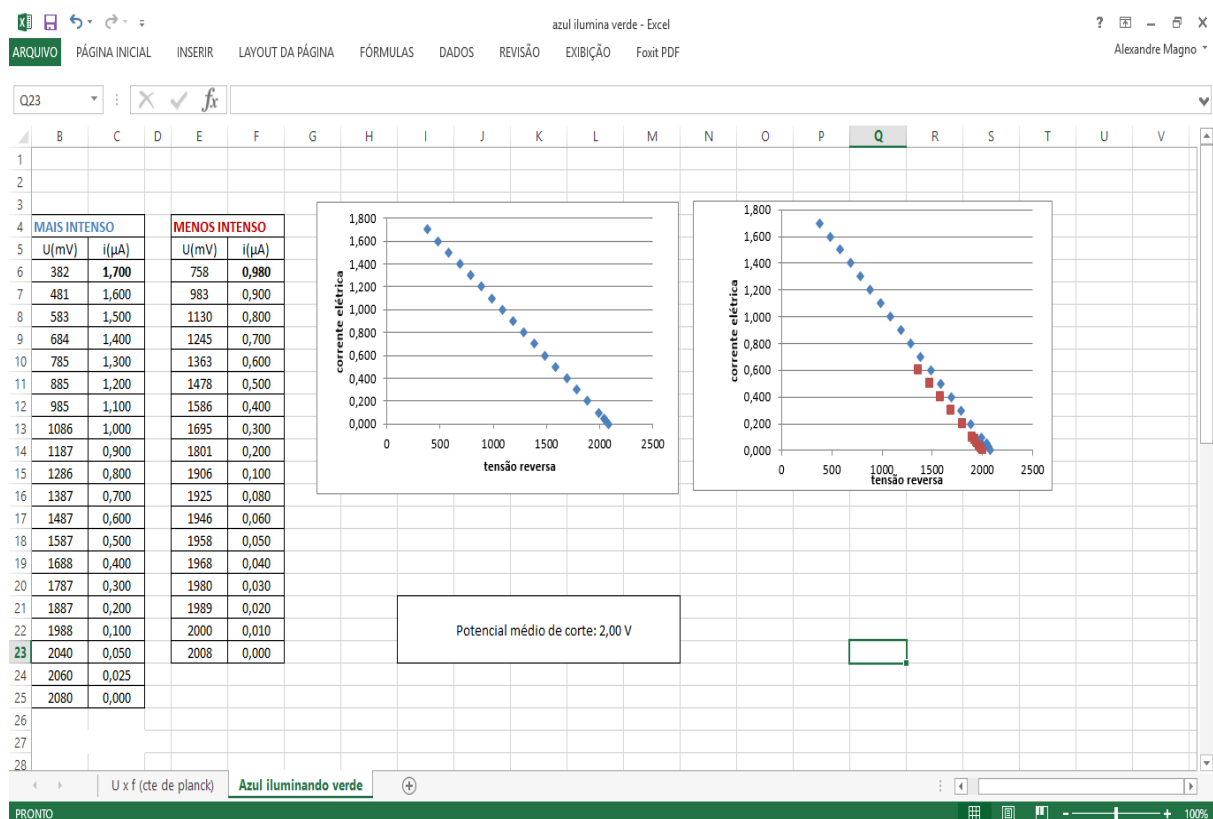
LED verde iluminando LED vermelho	gera	$V_{LED\text{ vermelho}} = 1,86\text{ V}$
LED verde iluminando LED azul	gera	$V_{LED\text{ azul}} = 0\text{ V}$

O segundo passo foi explicar o funcionamento dos equipamentos para se determinar o potencial de frenagem em cada LED, montando no final as tabelas e os gráficos da tensão reversa *versus* fotocorrente.

A seguir estão os dados dos 4 grupos

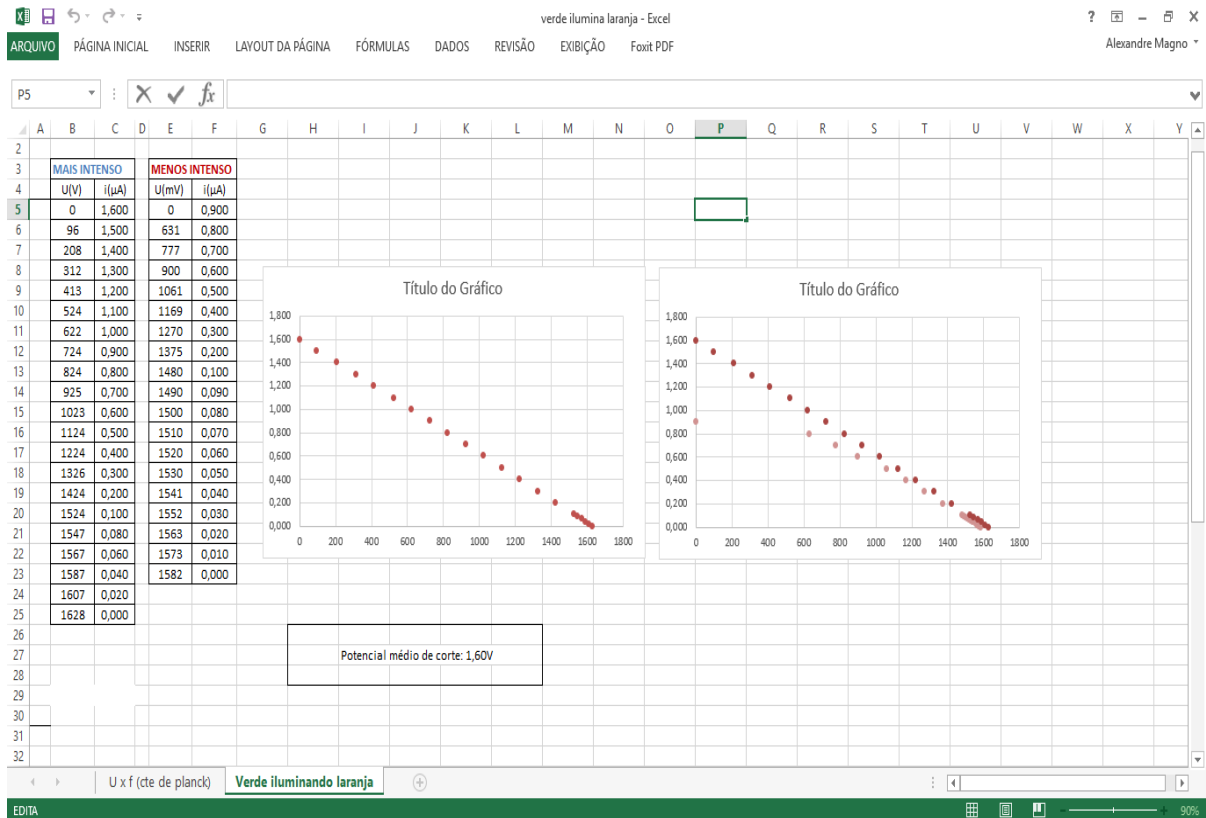
1. Tabelas e gráficos do Grupo 1 e seu respectivo valor médio do potencial de corte.

LED verde iluminado com o LED Azul.



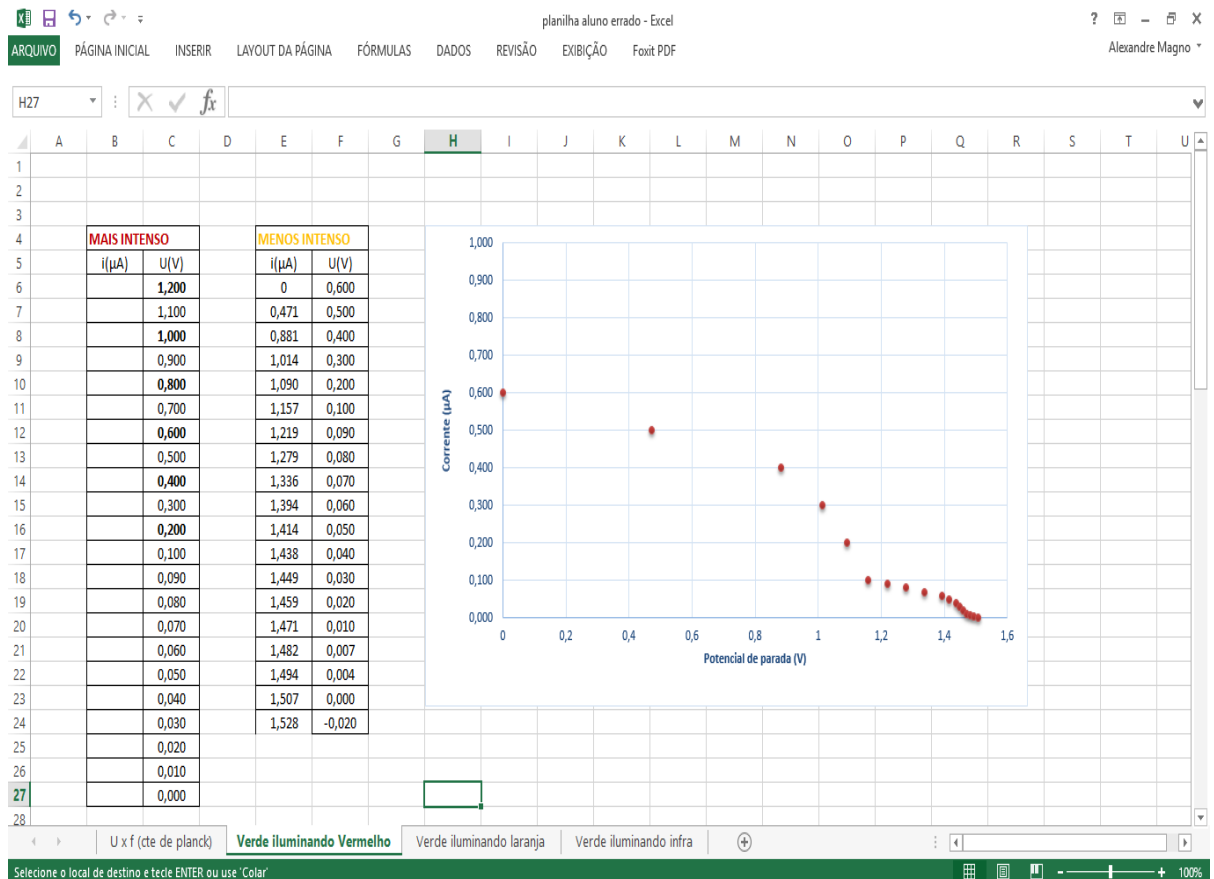
2. Tabelas e gráficos do Grupo 2 e seu respectivo valor médio do potencial de corte.

LED Laranja iluminado com o LED Verde.



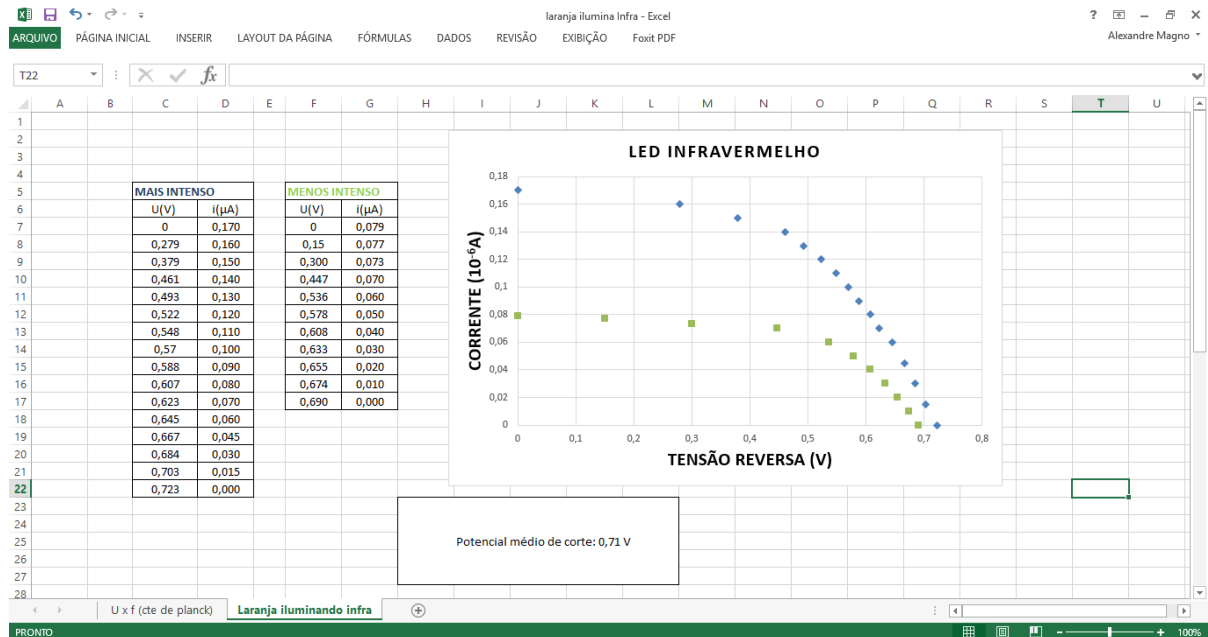
3. Tabelas e gráficos do Grupo 3 e seu respectivo valor médio do potencial de corte.

LED Vermelho iluminado com o LED Verde.



4. Tabelas e gráficos do Grupo 4 e seu respectivo valor médio do potencial de corte.

LED Infravermelho iluminado com o LED Laranja.



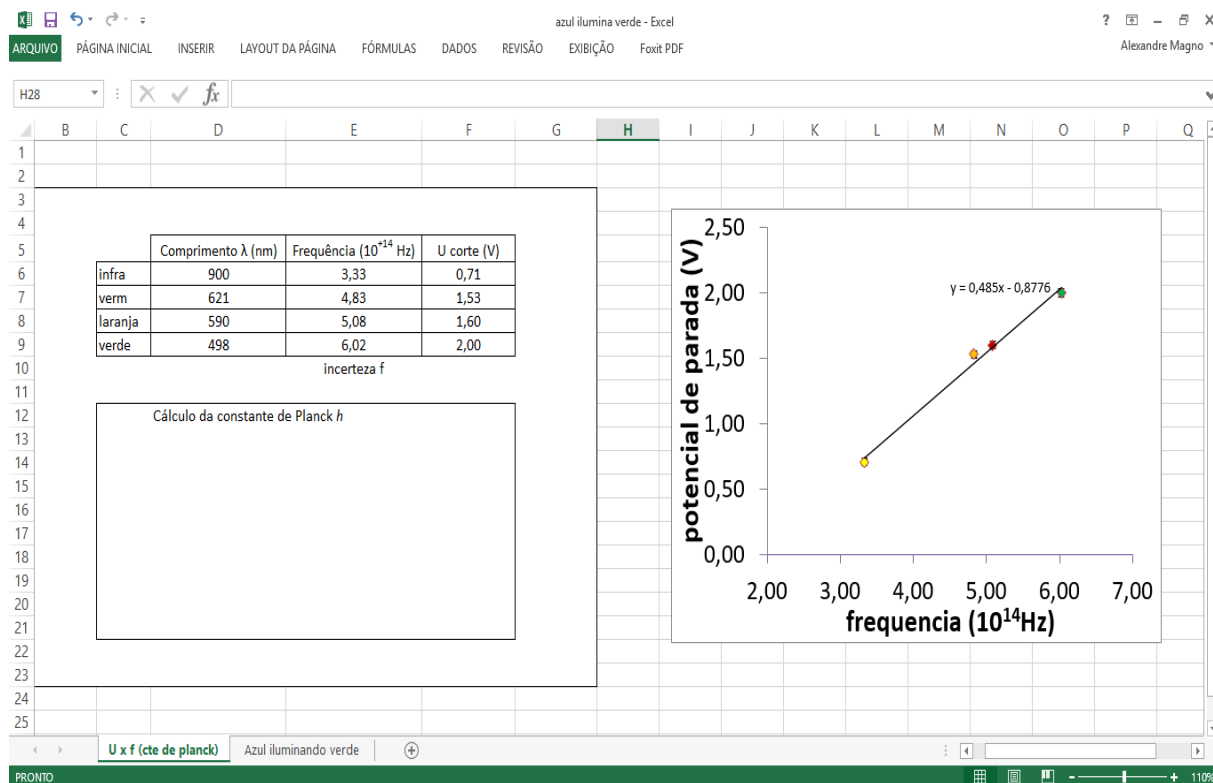
Após a tomada desses dados, a confecção dos gráficos e em posse do valor do Potencial de frenagem, foi montado o gráfico da tensão *versus* a frequência de onda de cada LED e, com a inclinação do gráfico, determinou-se o coeficiente angular da reta e consequentemente a constante de Planck.

Todo o trabalho foi realizado em grupo, com auxílio na montagem dos gráficos e manuseio com os voltímetros.

A seguir o gráfico montado para a determinação da constante de Planck, cujo valor foi de

$$h = 7,8 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

Gráfico da tensão *versus* frequência



5.6 Algumas considerações.

Em função do curso ser dado pela primeira vez e a maioria dos alunos desconhecerem o uso do multímetro assim como o tratamento de dados com as planilhas do programa Excell, pode-se reparar que os gráficos não seguiram um padrão esperado em sua confecção, sendo que um deles, do grupo 3, não foi possível avaliar o potencial de corte com maior luminosidade.

Outro fato, foi a tomada de dados do grupo 1 em que o gráfico do LED menos iluminado não começou com o potenciômetro multivolta totalmente zerado. No grupo 2 o gráfico ficou sem legenda e sem títulos nos eixos e alguns deles sem as respectivas unidades de medida. Erros e desvios também foram desconsiderados por se tratar de cálculos não habituais para os alunos, porém foi enfatizado aos alunos a existência de erros experimentais e em medidas que devem ser levados em consideração.

Por se tratar de uma atividade sem fins acadêmicos, no que se refere a nota, dois alunos não compareceram no segundo dia.

Em função desses entraves acredita-se que o curso poderá ser dado num período de 3 a 4 dias com horários mais flexíveis e num período não tão próximo das férias escolares. Esse mesmo curso será oferecido no segundo semestre de 2016.

Capítulo 6

Conclusão

A Física nem sempre é vista por alunos e até mesmos professores como uma disciplina fácil e prazerosa. Isso ocorre muito pelo fato de não ser dado a ela o seu valor primordial, a sua natureza experimental. Mesmo a teoria mais elegante, se não for baseada em resultados experimentais ela acaba perdendo significado. O que se percebe hoje nesse grande desinteresse dos alunos é eles quererem uma nota, uma promoção de ano. Ela é traduzida pelos alunos, na maioria das vezes, por um conjunto de fórmulas e resoluções de problemas tornando assim muito desinteressante para os alunos como para os que vão lecionar. O laboratório é de longe o último lugar usado por professores e pouco explorado. E quando se fala em conceitos relacionados a Física Moderna essa atividade prática se torna mais escassa ainda.

É verdade que muitas escolas não tem a infraestrutura de um laboratório, ou até mesmo um espaço que possa ser destinado a experimentos, e, quando tem, não é usado pelos professores.

Neste trabalho pudemos mostrar que é possível integrar a teoria a prática principalmente nos conteúdos que envolvem a Física Moderna, em especial o estudo do Efeito Fotoelétrico. Existem muitos trabalhos de autores nessa área, mas poucos que envolvam a aplicação prática deste conteúdo e com a utilização de materiais de baixo custo.

Percebeu-se entre os alunos, durante o curso aplicado, um grande interesse nas atividades práticas e nas dúvidas e interesses que eles têm no desenvolvimento tecnológico dos LEDs, suas aplicações em sensores e nos semicondutores, tornando para eles um aprendizado significativo quando se estudam os conceitos de física que estão por trás dessas inovações.

Um dos facilitadores deste trabalho foi que a escola permitiu aplicar o produto mesmo num final de ano e por ter os equipamentos necessários para a aplicação dele. Dentre eles podemos destacar os multímetros, lentes convergentes, redes de difração, suportes, anteparos, computador, entre outros. Isso não impede o fato do experimento ser aplicado também em escolas públicas, pois o equipamento de maior custo foram aqueles usados na determinação do comprimento de onda, o que não impede o trabalho com o experimento do efeito fotoelétrico. Os próprios alunos

tiveram uma grande iniciativa em participar, mesmo estando em final de ano letivo, quando todos os alunos participantes já haviam alcançado a aprovação acadêmica. Aí pode se ver a necessidade e o interesse que eles têm em conhecer um pouco da Física Moderna com aplicações práticas. Vale lembrar aqui que o curso foi oferecido em caráter não obrigatório e que a quantidade de alunos inscritos foi acima de 40 alunos. Porém, devido ao número pequeno de equipamentos, tivemos que limitar o número de participantes em 16 alunos. Muitos deles no final vieram perguntar se ele seria oferecido no ano seguinte.

Quanto as montagens dos módulos do equipamento para o estudo do efeito fotoelétrico, pudemos notar a grande riqueza que pode ser oferecida aos professores que irão aplicá-lo. A própria construção do aparato experimental fará o professor retomar conceitos importantes de física e suas aplicações que estão por trás da construção do equipamento, assim como servirá para um incentivo as práticas experimentais.

Em relação ao local da atividade, mesmo sendo experimental, vimos que não há a necessidade de ser conduzido em uma sala de laboratório tradicional, podendo ser mesmo aplicado na sala de aula ou na sala de informática. Outros fatores importantes que se pôde verificar durante a aplicação do produto foi o contato dos alunos com equipamentos por eles nunca vistos, como multímetros, resistores, potenciômetros. Eles puderam além de fazer medidas tomar conhecimento de fundo de escala e rever prefixos. Muitos dos alunos nunca tinham usado também o programa Excell, principalmente como aplicativo para construção de tabelas e gráficos.

No que se refere a utilidades do equipamento, o fato dos LEDs poderem ser trocados com facilidade deu fluidez na condução do curso, além do tubo de caneta BIC servir com muita praticidade ao alinhamento de um LED com outro na execução do experimento. Vale lembrar que antes de implementar a ideia do tubinho de caneta BIC era difícil manter os LEDs exatamente na mesma posição espacial afim de conseguir a máxima luminosidade entre eles.

A liberdade dos alunos trabalharem com os equipamentos foi fundamental para a prática da investigação e exploração no processo de ensino aprendizagem. Puderam levantar hipóteses ao relacionar os LEDs quando iluminados, assim como

não deixaram de conhecer a metodologia experimental nos procedimentos orientados do roteiro.

Por fim pode-se notar que por meio de materiais de baixo custo e com a orientação detalhada da construção do experimento, é possível que o aluno do Ensino Médio, no manuseio do equipamento e orientação adequada do professor, entenda o efeito fotoelétrico e, com os dados do experimento, possa encontrar um valor muito próximo, em ordem de grandeza, do valor da constante de Planck. O valor calculado pelos alunos para a constante de Planck foi $h = (7,8 \pm 0,6) \times 10^{-34}$ J.s que, comparado com o valor teórico de $6,62 \times 10^{-34}$ J.s, apresenta um desvio do valor esperado de apenas 9%, algo surpreendente para uma montagem experimental de baixo custo. Este desvio pode ser atribuído tanto a erros de medidas experimentais como a de precisão dos equipamentos de medida, entre eles a corrente de fundo de escala dos voltímetros cuja impedância é muito baixa para as medidas da fotocorrente dos LEDs.

Ainda, com os dados do experimento em especial os gráficos da tensão reversa *versus* a corrente elétrica, demonstrou-se que o potencial de frenagem dos elétrons excitados de um LED independe da intensidade luminosa, propriedade importante que ocorre no estudo do efeito fotoelétrico.

Portanto, acreditamos que, com um experimento tecnicamente simples e de fácil manuseio, é possível fazer com que o aluno de Ensino Médio não esteja apenas anotando o valor de uma grandeza tão importante quanto a constante de Planck, mas sim executando um experimento rico em conceitos e aplicações tecnológicas. Assim o estudante pode compreender e vivenciar experimentalmente um dos fenômenos mais importantes da Física Quântica pouco explorada hoje no Ensino Médio, o efeito fotoelétrico.

Referências Bibliográficas

Arruda, S.M. e Filho, D. O. Toginho. 1991. Laboratório Caseiro de Física Moderna. s.l. : Caderno Catarinense de Ensino de Física - Trabalho apresentado na II Conferência Interamericana sobre Educación en Física, Caracas, 1991., Dezembro de 1991. Vol. 8.

Blosser, Patrícia E. 1988. *Matérias em Pesquisa de Ensino de Física: o papel do Laboratório no Ensino de Ciências.* [trad.] Marco Antonio Moreira. Florianópolis : Caderno Catarinense de Ensino de Física, 1988. pp. 74-78.

Born, Max. 1969. *Física Atômica.* [trad.] Egídio Namorado. 4º ed. Lisboa : Fundação Calouste Gulbenkian, 1969. pp. 225-270.

Brennan, Richard. 2003. *Gigantes da Física - Uma história da Física Moderna através de oito biografias.* [ed.] Jorge Zahar. [trad.] Maria Luiza X. de A. Borges. Rio de Janeiro : Zahar, 2003. pp. 58 - 123.

Cavalcante, Marisa A e Tavoraro, Critiane. 2007. *Física Moderna Experimental.* 2ª. São Paulo : Manole Ltda, 2007.

Cavalcante, Marisa Almeida. 1999. *O Ensino de uma NOVA FÍSICA e o Exercício da Cidadania.* São Paulo : Revista Brasileira de Ensino de Física - SBF, 1999. pp. 550-551. Vol. 21 nº4.

Cavalcante, Marisa Almeida. 2002. Uma aula sobre o Efeito Fotoelétrico no desenvolvimento de competências e habilidades. s.l. : Física na Escola, 2002. Vol. 3, pp. 24-29. Trabalho em parceria com IFSC/USP/SP (Dione Fagundes de Souza) e PUC/SP (João Muzinatti) e GoPEF (Grupo de pesquisa em Ensino de Física (Cristiane R.C. Tavoraro).

Crooper, Willian H. 2001. *Great Physicists: the life and times of leading physicists from Galileo to Hawking.* New York : Oxford University Press, Inc., 2001. pp. 231 - 241.

Einstein, Albert. 1965. Concerning an Heuristic Point of View Toward the Emission and Transformation of Light. *American Journal of Physics.* Maio de 1965, Vol. 33. Tradução para o Inglês do artigo original em alemão de A. Einstein, Ann. Phys. Bern, 17 March 1905.

Eisberg, Robert e Resnick, Robert. 1994. *Física Quântica: Átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas.* Rio de Janeiro : Campus, 1994. pp. 19-58.

Ferreira, Norberto C, Santos, Emerson I e Piassi, Luis P C. 2004. Atividades Experimentais de Baixo Custo como estratégia de construção da Autonomia de Professores de Física: uma experiência em Formação Continuada. In: *Atas do IX Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Física.* Jaboticatubas, Outubro de 2004.

Ferreira, Norberto Cardoso. 1993. *A Universidade e o aprendizado escolar de Ciências.* São Paulo : CECAE/USP, 1993. pp. 78-83. Projeto USP/BID Formação de Professores de Ciências (1990-1992).

GRF, Grupo de Reelaboração do Ensino de Física -. 1993. *Física 3 - Eletromagnetismo*. São Paulo : Edusp, 1993. pp. 275 - 295. Vol. 3.

Haag, Rafael e Cavalcante, Marisa Almeida. 2005. *Corpo negro e determinação experimental da constante de Planck*. s.l. : Revista Brasileira de Ensino de Física, 2005. pp. 343-348. Vol. 27.

Hewitt, Paul G. 2011. *Física Conceitual*. [trad.] trieste Freire. 11ª. Porto Alegre : Bookman, 2011.

Martins, Jorge Sá. 2011. *Efeito Fotoelétrico: Experiência de Philipp Lenard*. Universidade Federal Fluminense - IF, 2011.

McEvoy, J. P. 2012. *Entendendo Teoria Quântica*. [trad.] Marcio Marcionilo. 2ª. São Paulo : Leya, 2012. pp. 3 - 59.

MEC. 2011. Parametros Curriculares Nacionais - PCN. [Online] Maio de 2011. [Citado em:] http://www.sbfisica.org.br/arquivos/PCN_FIS.pdf.

Moreira, Marco A e Rolando, Axt. 1991. *O Ensino Experimental e a Questão do Equipamento de Baixo Custo*. Porto Alegre, RS : Revista de Ensino de Física, 1991. pp. 97-103. Vol. 13.

Moreira, Marco Antônio. 2000. *Ensino de Física no Brasil: Retrospectiva e Perspectivas*. Porto Alegre, RS : Revista Brasileira de Ensino de Física - SBF, 2000. Vol. 22 nº1.

Moreira, Marco Antonio. 2015. Orientações sobre o currículo do MNPEF. [Online] 16 de Março de 2015. [Citado em: 25 de Maio de 2016.] <http://www.sbfisica.org.br/~mnpef/index.php/cpg/orientacoes-sobre-o-curriculo>.

Moura, Sílio Lima de, et al. 2011. *Constante de Planck: Uma nova visão para o Ensino Médio*. s.l. : Química nova na escola, 2011. Vol. 33.

Oliveira, Ivan S. 2010. *Física Moderna para iniciados, interessados e aficionados*. 2º. São Paulo : Livraria da Física, 2010. pp. 77 - 83.

Paranhos, R. G, Pizani, P. S. e Richard, V. L. 2008. Lâmpada de Hg para experimentos e demonstrações de física moderna: introdução ao efeito fotoelétrico e outros tópicos. s.l. : Revista Brasileira de Ensino de Física, 2008. Vol. 30.

Paula, Helder F, Esdras, Garcia, Alves e Mateus, Alfredo L. 2011. *Quântica para iniciantes: investigações e projetos*. Belo Horizonte : UFMG, 2011. pp. 107 - 131.

Planck, Max. 1901. On the Law of Distribution of Energy in the Normal Spectrum. *Annalen der Physik*. 1901, Vol. 4, pp. 553-563.

Ribas, Roberto V. 2014. Estrutura da Matéria - I. *Notas de Aula*. [Online] 2 de dezembro de 2014. [Citado em: 20 de 12 de 2015.] <http://www.dfn.if.usp.br/~ribas/download/EstrMat-I.pdf>.

Ribas, Roberto V. 2009. Estrutura da Matéria - I (Notas de aula). [Online] 14 de maio de 2009. [Citado em: 12 de janeiro de 2016.] http://disciplinas.stoa.usp.br/pluginfile.php/148996/mod_resource/content/1/Apostila%20Estrutura%20da%20Mat%C3%A9ria.pdf.

Sansosti, Tanya M. 2002. LED's as Light Detectors. [Online] 2002. [Citado em: 12 de Julho de 2015.] <http://laser.physics.sunysb.edu/~tanya/report2/>.

São Paulo, Secretaria da Educação. 2011. Currículo do Estado de São Paulo: Ciências da Natureza e suas Tecnologias. São Paulo : s.n., 2011. p. 152 p.

Shamos, Morris H. 1987. *Great Experiments in Physics*. New York : s.n., 1987. pp. 232 - 237.

Silva Junior, Romualdo e Moraes, Jose Uibson P. 2015. Experimentos didáticos no Ensino de Física com foco na Aprendizagem Significativa. *Latino American Journal Physics Education*. Junho de 2015, Vol. 9.

Studart, Nelson. 2000. A Invenção do Conceito de Quantum de Energia segundo Planck. UFSCar, SP : Revista Brasileira de Ensino de Física - SBF, Dezembro de 2000. Vol. 22, pp. 523-535.

UFRGS, Universidade Federal do rio Grande do Sul -. O ano Miraculoso de Albert Einstein. Física Moderna. [Online] Universidade Federal do Rio grande do Sul.[Citado em: 12 de março de 2016.] http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod06/m_s03.html.

Violin, Antonio Geraldo. 1979. *Atividades Experimentais no Ensino de Física de 1º e 2º Graus*. São paulo, SP : Revista de Ensino de Física, 1979. pp. 13-24. Vol. 1.

Vuolo, J. H. 1995. *Fundamento da Teoria dos erros*. 2ª. São Paulo : Edgard Blücher, 1995.

Zanetic, J e Pinto, A. Custódio. 1999. É possível levar a Física Quântica para o Ensino Médio. s.l. : Caderno Catarinense de Ensino de Física, Abril de 1999. Vol. 16, pp. 7-34.

Apêndice A

Produto Experimental: Construção dos módulos A e B.

Com estas instruções você será capaz de construir dois módulos de um circuito elétrico para o estudo de Física Quântica, mais especificamente o do efeito fotoelétrico, visando ainda uma melhor compreensão de conceitos de eletricidade, como o manuseio de medidores elétricos, aplicação das leis de ohm e geradores elétricos.

Para a construção dos módulos a seguir foram utilizados os seguintes materiais básicos e necessários que auxiliarão na montagem.

Materiais Básicos

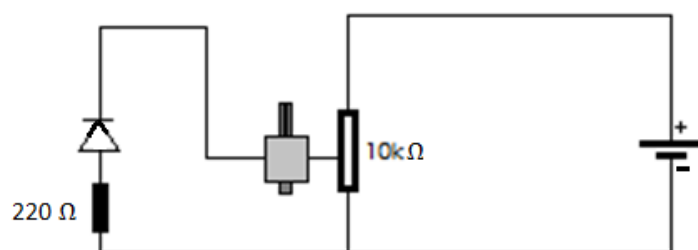
- Ferro de solda (25W a 40W) e suporte de solda.
- Solda elétrica (estanho).
- Alicates de bico.
- Alicates de corte
- Estilete (para descascar os fios).
- Chave de fenda.
- Furadeira e brocas de madeira.
- Cola quente.

OBS: Caso você encontre dificuldade em manusear o ferro de solda, existem sites que poderão auxiliá-lo, assim como vídeos auto instrutivos indicados a seguir²⁶. Antes de começar treine um pouco com pedaços de fio “cru”, soldando fios com alguns resistores ou dois pedaços de fio. Vale lembrar a importância e os cuidados em trabalhar com equipamentos que usam temperatura altíssima e, portanto, deixá-los sempre fora do alcance de crianças e animais domésticos.

²⁶ Vídeo 1: <http://www.fazfacil.com.br/reforma-construcao/como-soldar-videos/> (acesso em 20/03/2016)

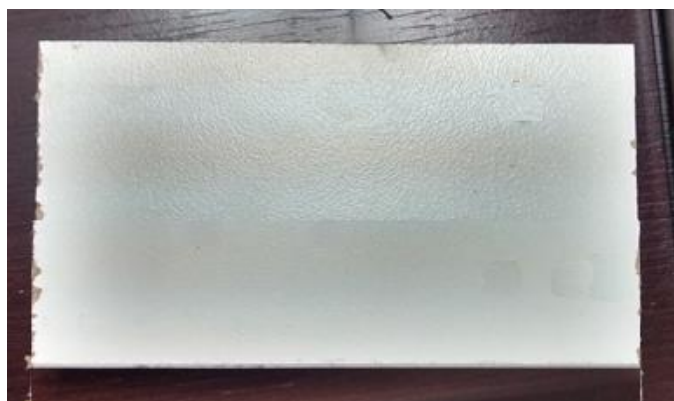
Vídeo 2: <http://www.tecmundo.com.br/area-42/25840-area-42-como-soldar-componentes-eletronicos.htm> (acesso em 20/03 2016)

MÓDULO A



Materiais utilizados:

1. Base de madeira 10cm x 5cm (o uso de madeira branca servirá para melhor visualização do circuito).



2. Fios de ligação de 1 mm – 15 cm de fio vermelho e 30cm de fio preto.



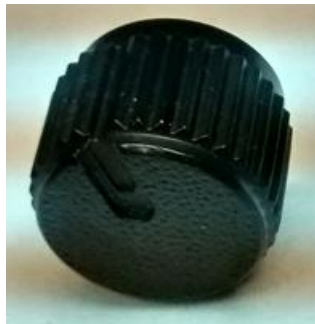
3. 1 resistor de 220 Ω .



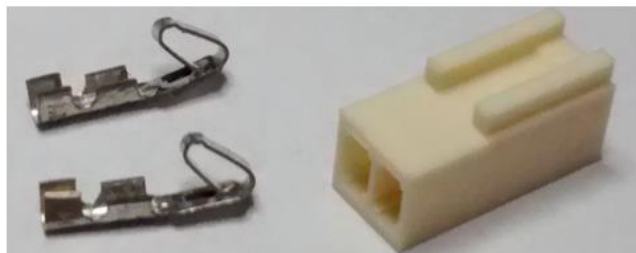
4. 1 potenciômetro de 10 k Ω .



5. 1 Knob (usado para ajuste de tensão no potenciômetro).



6. Conector molex "fêmea" (usado para suporte do LED)



7. Bateria de 9V.



8. Chicote para bateria de 9V.



“Mãos à obra”

1. Montagem da base do circuito

Para montar este circuito na base de madeira será necessário prender inicialmente o potenciômetro. Para isso, com a furadeira e uma broca de madeira faça uma cavilha a aproximadamente 3,0 cm de distância da extremidade da base com um diâmetro tal que possa encaixar o potenciômetro (fig. 1a). Em seguida, com cola quente, prenda o potenciômetro nela (fig. 1b). Com o potenciômetro preso será mais fácil o processo de solda.

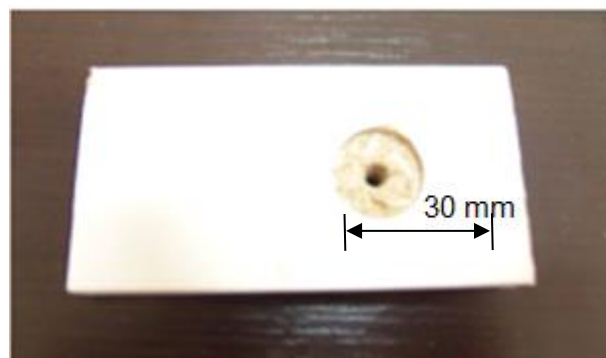


Fig. 1a: tábua de madeira com cavilha para o potenciômetro.



Fig.1b: Base de madeira e potenciômetro fixado.

Preso o potenciômetro, vamos agora fazer as soldas necessárias. Corte 5 cm de fio vermelho e separe. Pegue o resistor de 200 Ω e solde suas extremidades no contato central do potenciômetro e nos 5 cm do fio vermelho separado. Pegue agora o fio preto, descasque-o a 10 cm de uma das extremidades conforme imagem da figura 2a e dobre; na sequência solde-o no contato superior do potenciômetro (fig. 2b)



Fig 2a: fio preto descascado a ser soldado no potenciômetro



Fig 2b: fio preto e vermelho soldados no potenciômetro

Finalmente pegue o restante do fio vermelho (10 cm) e solde-o no contato inferior do potenciômetro (fig. 3)

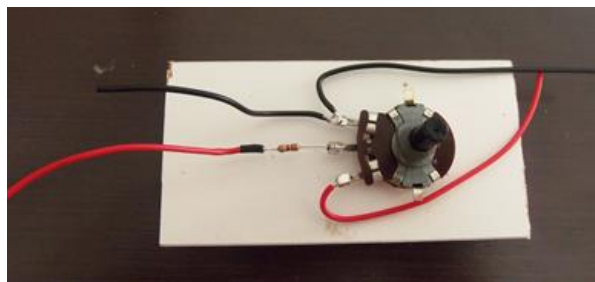


Fig.3: base de madeira com as soldas preliminares no potenciômetro

2. Montagem do Conector molex “fêmea”

Atenção: Essa sequência de montagem servirá para os dois módulos do experimento pois servirão como suporte para os LEDs.

Descasque aproximadamente 5 mm do fio vermelho e do fio preto que saem dos contatos superior e central do potenciômetro. Siga corretamente os passos a seguir pois eles serão os contatos com os LEDs.

Coloque o fio preto descascado na “garra” do conector molex e com uma alicate de bico aperte-o até prendê-lo (fig. 3a e 3b).



Fig. 3a: Fio preto sobre a “garra” do molex



Fig. 3b: fio preto preso na “garra”

Com o ferro de solda quente, coloque-o sobre o conjunto e após alguns segundos encoste a solda para que ela penetre bem nos dois elementos (fio e garra). Cuidado para não colocar solda em excesso, o que prejudicará a conexão com o molex (fig.4)



Fig. 4: Soldando o fio preto na “garra” do molex

Repita esse mesmo procedimento com o fio vermelho e separe-os (fig. 5).



Fig. 5: Fio vermelho e preto prontos para o encaixe no Molex

Pegue agora o Molex “fêmea” e encaixe-o neste conjunto conforme as imagens das figuras 6a e 6b.

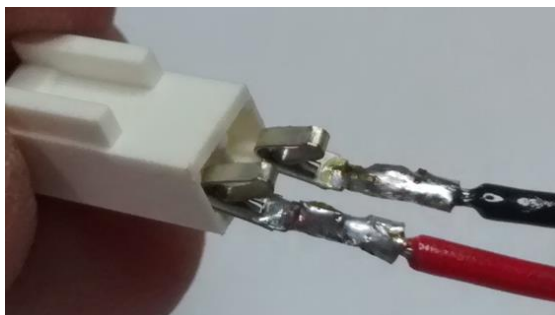


Fig. 6a



Fig. 6b

Para finalizar a montagem do módulo A, solde os fios vermelho (que sai do contato inferior do potenciômetro) e preto (do contato superior) no chicote da bateria. Prenda o Knob no potenciômetro. Para testar, encaixe um Led no Molex e, com o potenciômetro regule a intensidade de luz emitida (cuidado com a polaridade do LED). Pronto, você montou o **módulo A** do experimento (fig. 7a e 7b).



Fig. 7a: Módulo A conectado a bateria e pronto para receber o Led de Alto Brilho

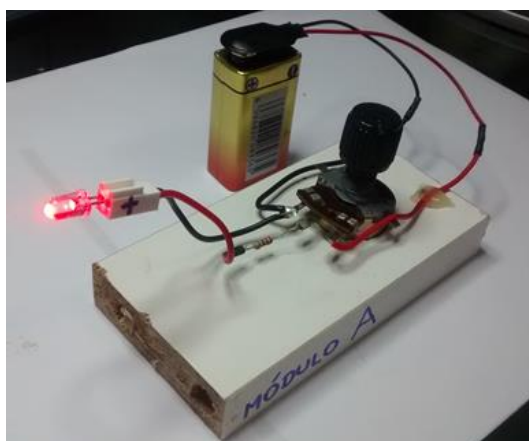
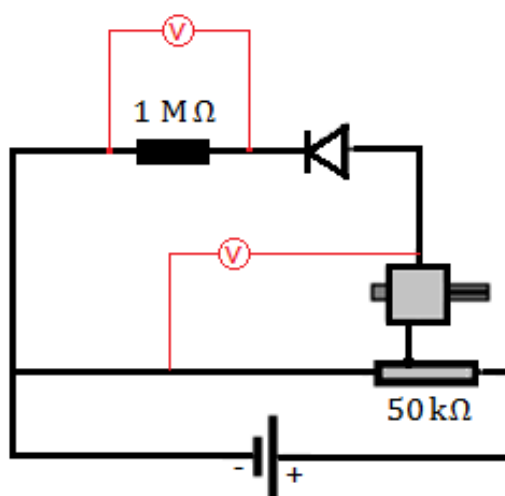


Fig. 7b: Módulo A com LED funcionando (fio vermelho = pólo positivo do LED)

MÓDULO B



Circuito elétrico do módulo B

Materiais utilizados:

1. Base de madeira 12cm x 8cm



2. Fios de ligação de 1 mm – 40 cm de fio vermelho e 30 cm de fio preto.



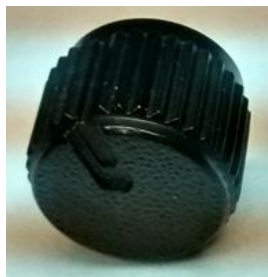
3. 1 resistor de $1\text{M}\Omega$.



4. 1 potenciômetro multivolta de 50k.



5. 1 Knob (usado para ajuste de tensão no potenciômetro).



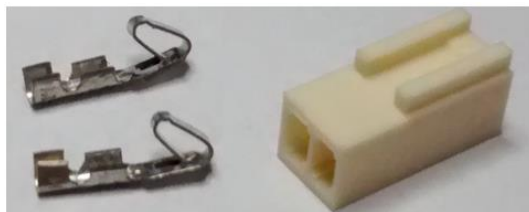
6. 2 conjuntos de borne para multímetro.



7. Braçadeira de plástico de 4 mm (“enforca gato”)



8. 1 Molex fêmea e dois encaixes.



9. Bateria de 9V.



10. Chicote de bateria de 9V.



11. Multímetro.



“Mãos à obra”

1. Montagem da base do circuito

Nesta montagem faremos inicialmente as cavilhas na base de madeira e dois furos que sustentarão o potenciômetro multivolta. Com uma broca de 4 mm faça 4 cavilhas na base (elas servirão para o encaixe dos bornes do multímetro). Com uma broca de 2 mm faça dois furos que servirão para segurar o potenciômetro multivolta. Veja as posições indicadas na figura 8.

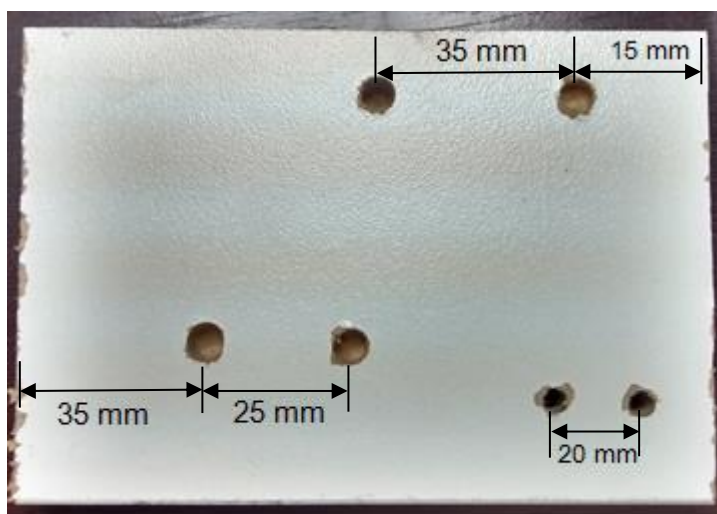


Fig. 8: Base de madeira do módulo B com medidas.

Pelos dois furos separados 20 mm transpasse a braçadeira de plástico (“enforca gato”) e prenda o potenciômetro (fig. 9a e 9b).



Fig. 9a: Braçadeira envolvendo os dois furos.



Fig. 9b: Montagem do potenciômetro multivolta.

Pegue os quatro bornes do multímetro e parafuse-os nas cavilhas respeitando a ordem das cores vermelha e preta de acordo com a figuras 10a e 10b.

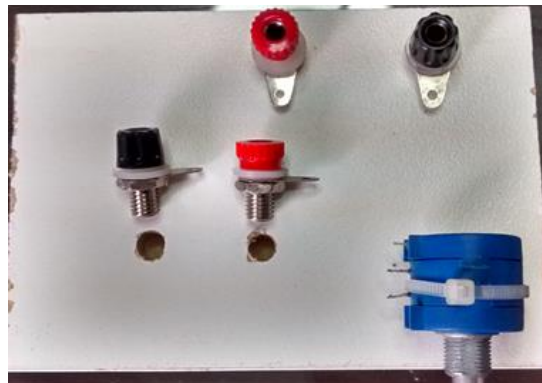


Fig. 10a

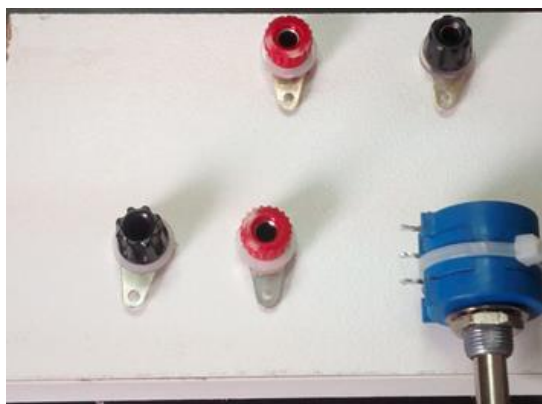


Fig. 10b: Montagem dos bornes para o multímetro

2. Montagem do circuito elétrico com solda

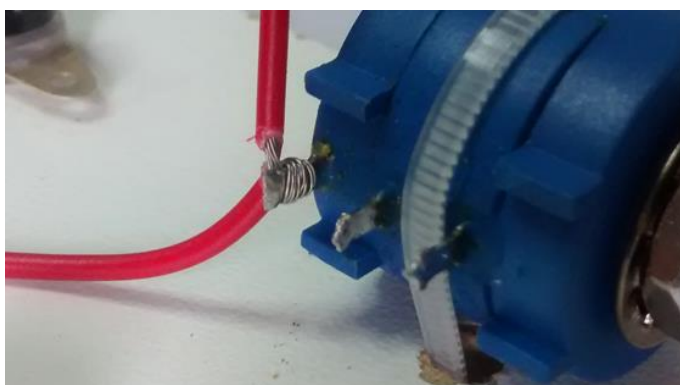
Montado a base do módulo B, vamos agora soldar os fios e preparar o circuito elétrico. Nesse momento é importante fazer uma boa solda para que não haja mau contato entre os elementos.

Pegue o fio vermelho e corte 12 cm. Com o estilete, descasque as pontas e a 2 cm de uma delas, desencape o fio como na figura 11.



Fig. 11: fio vermelho descascado.

Este fio será soldado no potenciômetro e no borne vermelho. Dobre o fio vermelho e encaixe-o como mostrado na sequência das imagens da figura 11, para depois, fazer a solda. Em seguida solde a outra extremidade do fio no borne vermelho inferior.



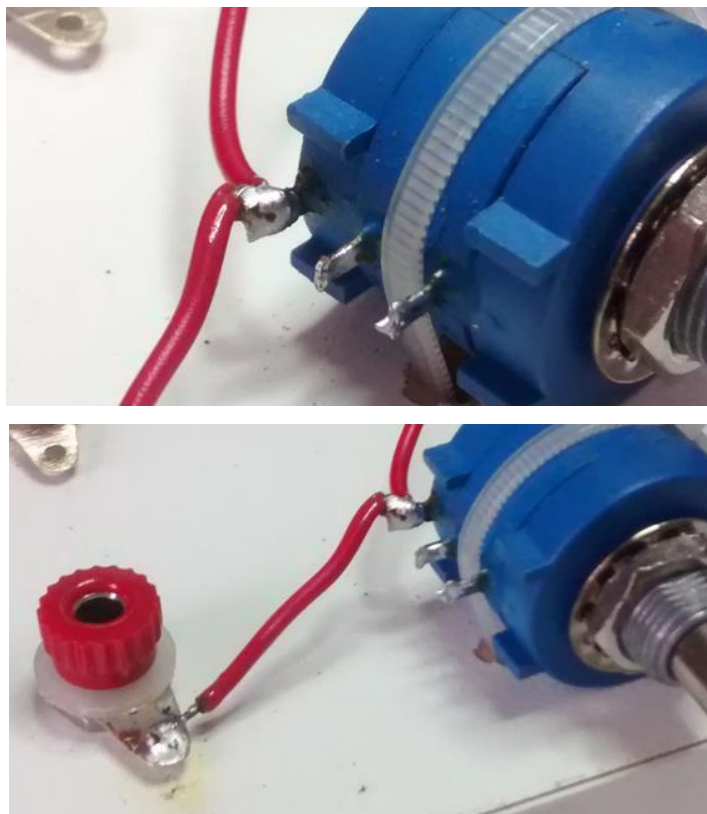


Fig. 11: Sequência de imagens da primeira solda no potenciômetro e no borne vermelho inferior.

Corte 20 cm do fio preto e faça o mesmo que foi feito com o fio vermelho, descascando aproximadamente a 6 cm de uma das extremidades (fig. 12)

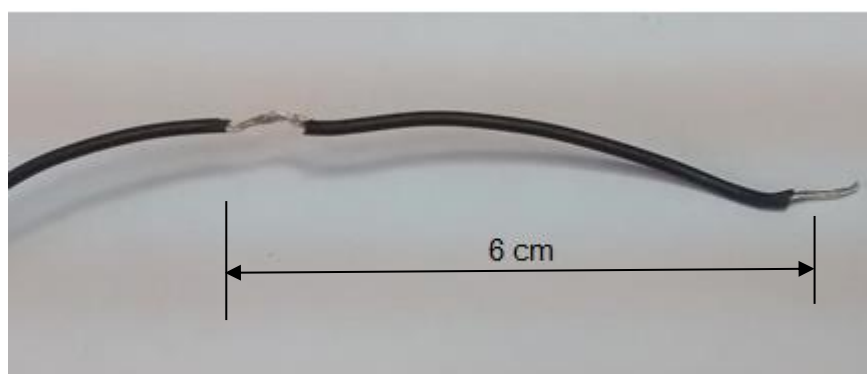


Fig.12: 20 cm de fio preto a ser soldado

Pegue o restante do fio vermelho e solde os dois fios (vermelho e preto) no potenciômetro (Fig. 13a e 13b)



Fig. 13a: Soldas no potenciômetro



Fig. 13b: Soldas nos bornes inferiores.

Estamos terminando. Pegue o resistor de $1M\Omega$ e dois pedaços de fio preto restante cortados ao meio e faça a solda como mostra a figura 14.



Fig. 14: solda do resistor de $1M\Omega$ e fios nos bornes superiores.

Faça a junção dos fios pretos e solde-os e em seguida. Com cola quente prenda os fios vermelho e preto como indicado nas figuras 15a e 15b.

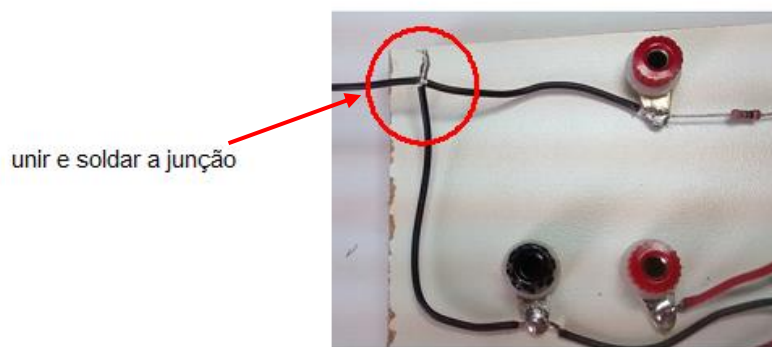


Fig. 15a: união dos fios pretos de saída para a fonte.

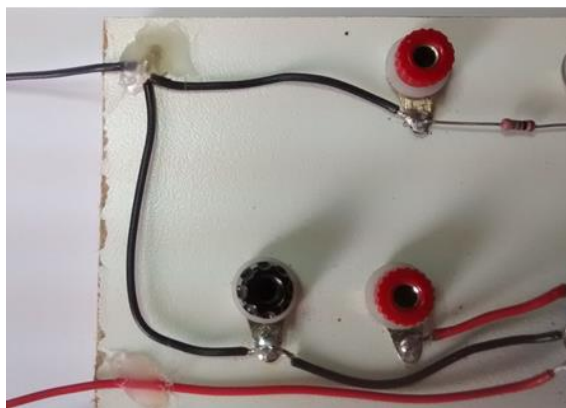


Fig. 15b: fixação com cola quente dos fios de saída da fonte.

Finalizando, repita o procedimento da montagem do molex que está indicado no item 2 do *módulo A*. Solde o chicote nos fios de saída da fonte e encaixe o Knob no eixo do potenciômetro (fig. 16a e 16b)

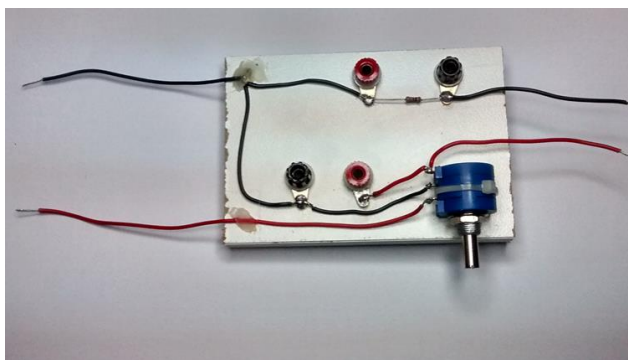


Fig. 16a: módulo B sem os periféricos (Molex e Chicote)

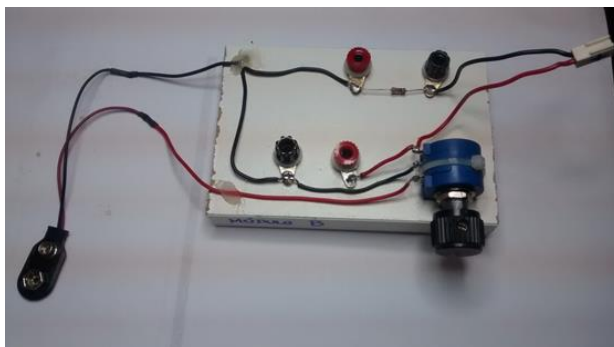


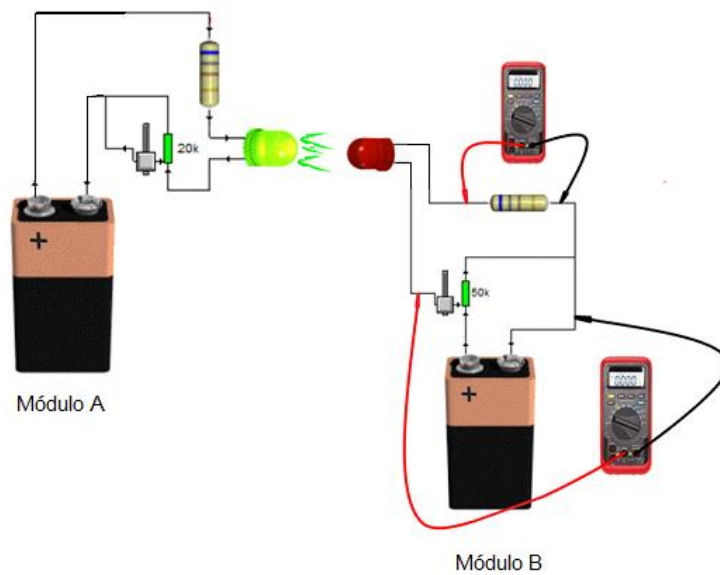
Fig. 16b: Módulo B pronto.

Tabela de preço dos materiais utilizados

Todos os materiais foram comprados em lojas de eletroeletrônicos no ano de 2015, mas podem ser adquiridos também via internet.

Quantidade	Material	Preço em reais
1	Potenciômetro de 10 k	R\$ 10,00
1	Potenciômetro multivolta	R\$ 40,00
1	Resistor de 220	R\$ 0,40
1	Resistor de 1 M	R\$ 0,40
60 cm de cada	Fios de contato (vermelho e preto)	doação
2	Multímetro	R\$ 46,00
4	Bornes do multímetro	R\$ 10,00
2	Molex “fêmea”	R\$ 4,50
2	Knob preto	R\$ 4,80
1	Braçadeira (“enforca gato”)	doação
1	Led de alto brilho 5mm: infravermelho	R\$ 1,00
1	Led de alto brilho 5mm: vermelho	R\$ 1,00
1	Led de alto brilho 5mm: amarelo	R\$ 1,00
1	Led de alto brilho 5mm: verde	R\$ 1,00
2	Led de alto brilho 5mm: azul	R\$ 1,00
2	Madeira branca	doação
2	Baterias de 9V	R\$ 36,00
2	Chicotes de bateria de 9V	R\$ 5,00
	TOTAL	R\$ 162,10

Preparação para o experimento com os módulos A e B



Circuito elétrico do experimento com os módulos A e B

Para dar início ao experimento, alguns ajustes devem ser feitos para que a tomada de dados seja a melhor possível. Coloque, então os dois módulos (A e B) próximos um do outro e conecte os dois multímetros nos bornes correspondentes como na figura 17.

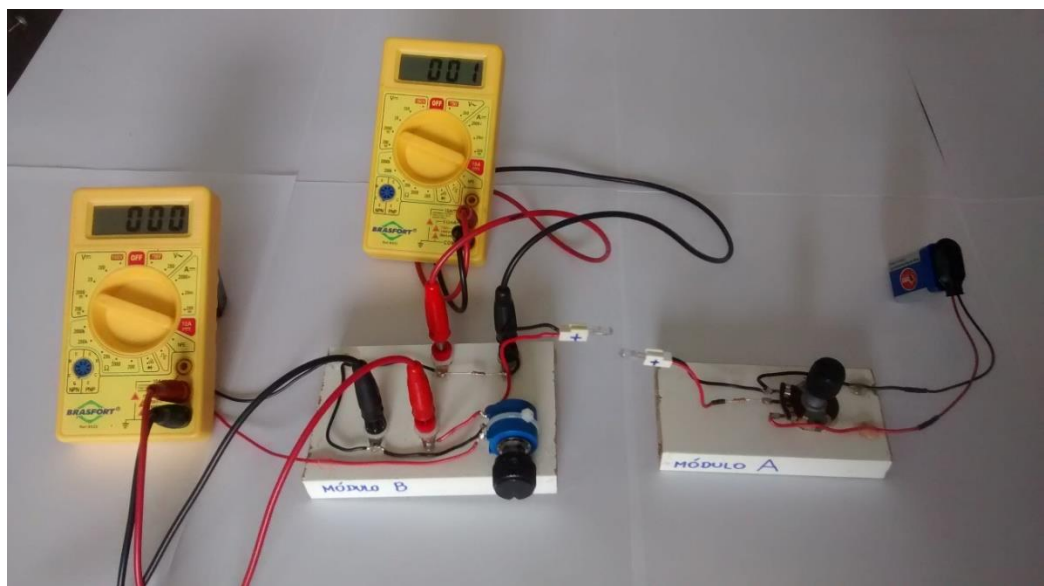


Fig. 17: Preparação da montagem do experimento

Com a finalização da montagem dos módulos A e B, a conexão entre os mesmos é de extrema importância para que haja a menor perda possível de luminosidade para o meio externo.

Para isso serve exatamente 1,5 cm de um pedaço de caneta “BIC” (fig. 18).



Fig. 18: tubinho de caneta “BIC”

Ele servirá como uma espécie de guia entre os dois Leds (um de cada módulo). Como esse pequeno tubo de caneta é transparente, é providencial cortar um pedaço de papel sulfite de 2cm x 1,5 cm e enrolá-lo a fim de se encaixar dentro do tubinho (sequência das fig. 19a , 19b e 19c)



Fig. 19a



Fig. 19b



Fig. 19c

Para finalizar, aproxime os dois módulos e encaixe os LEDs, um em cada extremidade do tubinho e pronto, seu experimento pode começar (fig. 20 e 21).

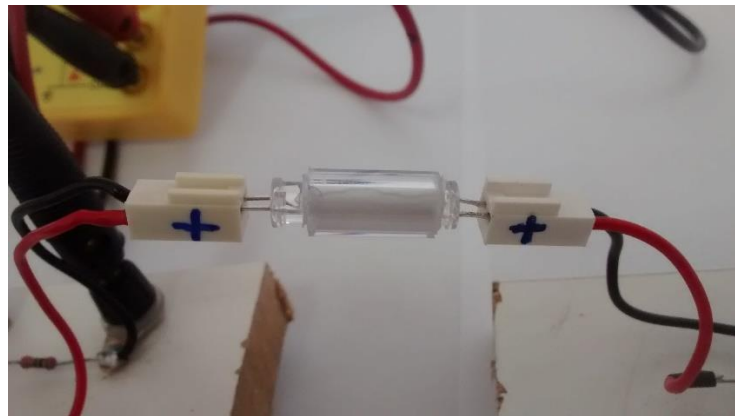


Fig. 20: Tubinho como guia para os Leds



Fig. 21: Experimento iniciado com as indicações do voltímetros.

Apêndice B

Produto de Aplicação: Roteiros de aulas e experimentos.

Os roteiros a seguir apresentam uma breve teoria dos conceitos a serem abordados pelo professor na aplicação do curso proposto deste trabalho.

A Parte I trata de conteúdos relativos a interferência e difração de ondas e, como sugestão de experimento, propõe-se uma sequência experimental (Cavalcante, et al., 2007) para a determinação do comprimento de onda (λ) dos LEDs, o que auxiliará no experimento proposto neste trabalho. Foram utilizados equipamentos da escola, como rede de difração, lentes convergentes e diafragmas. Caso a escola não possua, pode-se utilizar os dados de λ que se encontram na figura 5.14 (pág. 66) deste trabalho. A rede de difração utilizada neste trabalho também pode ser substituída por CDs.

Na parte II, o professor terá como breve referência os conceitos do fenômeno do efeito fotoelétrico e dos LEDs. E como atividade experimental, é fornecido um roteiro detalhado da aplicação dos aparatos experimentais (descritos no Apêndice A) sobre o efeito fotoelétrico.

I. Determinação do comprimento de onda do LED

Difração e Interferência

A difração e interferência de ondas são fenômenos ondulatórios que servirão para compreender como determinaremos os comprimentos de onda de uma luz monocromática.

As ondas eletromagnéticas são transversais e podem propagar-se em qualquer meio, inclusive no vácuo. Existe um grande conjunto de radiações eletromagnéticas, produzidas de formas diferentes, natural ou artificialmente. Quando organizadas; por exemplo, em ordem crescente de comprimento de onda (ou ordem decrescente de frequência), temos **o espectro das radiações eletromagnéticas**.

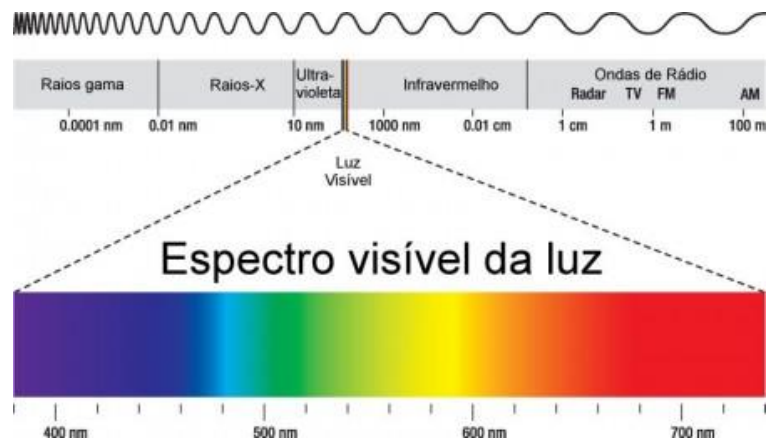
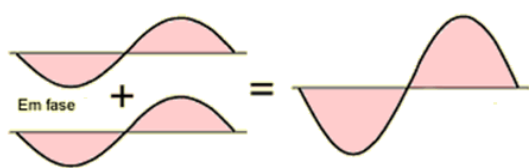


Figura 1: O espectro eletromagnético. Fonte: <http://www.infoescola.com/fisica/espectro-eletromagnetico/> (acesso em 20/11/2015)

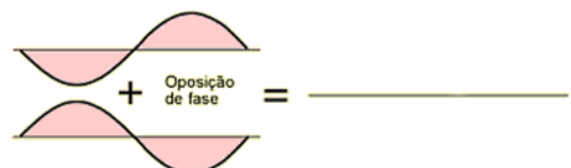
As radiações visíveis pelo ser humano do espectro eletromagnético são aquelas compreendidas entre a violeta e o vermelho, que em ordem de grandeza variam seu comprimento de onda, aproximadamente entre 380nm a 750nm (figura 1).

Dentre os fenômenos ondulatórios existe a **difração**, que consiste em uma onda contornar um objeto (obstáculo) ao incidir sobre o mesmo. Dependendo do comprimento da onda esta pode difratar mais ou menos quando incide no objeto. Se a ordem de grandeza de um objeto, por exemplo uma fenda, for próxima do comprimento de onda então ela se difrata mais.

Outro fenômeno importante que precisamos saber é a **interferência** de onda. Quando duas ondas se propagam em um meio, ao se interagirem, suas amplitudes resultantes se somam ocorrendo uma interferência por superposição de ondas. Se as amplitudes somadas tiverem mesma fase a interferência é dita construtiva, porém se as fases estiverem em oposição a interferência é dita destrutiva.



Interferência CONSTRUTIVA



Interferência DESTRUTIVA

Esses dois fenômenos servirão para entender como vamos determinar o comprimento de onda de um LED monocromático usando o experimento a seguir.

Com os materiais necessários, faremos a luz incidir numa fenda muito pequena, uma rede de difração, e esta ao difratar iluminará um anteparo em franjas claras (interferência construtivas) e escuras (interferência destrutivas).

Veja na figura 2:

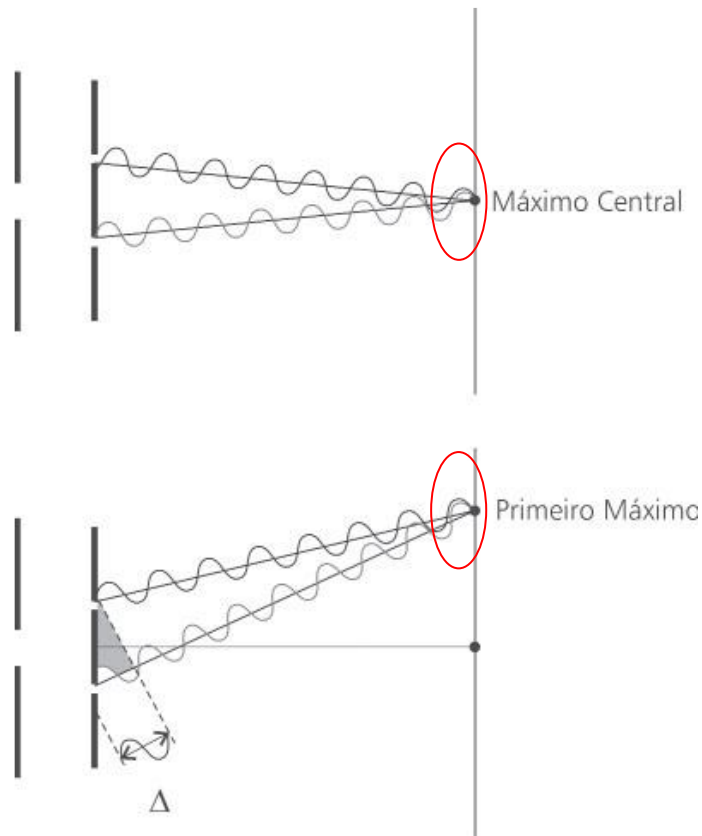


Figura 2

O chamado máximo central refere-se a região iluminada mais intensa, enquanto o primeiro máximo corresponde a próxima região iluminada. Entre essas duas regiões forma-se uma interferência destrutiva (ausência de luz). Para se determinar o comprimento de onda, vamos utilizar uma expressão que nos auxiliará na determinação do comprimento de onda. Essa expressão é conhecida como relação de Young.

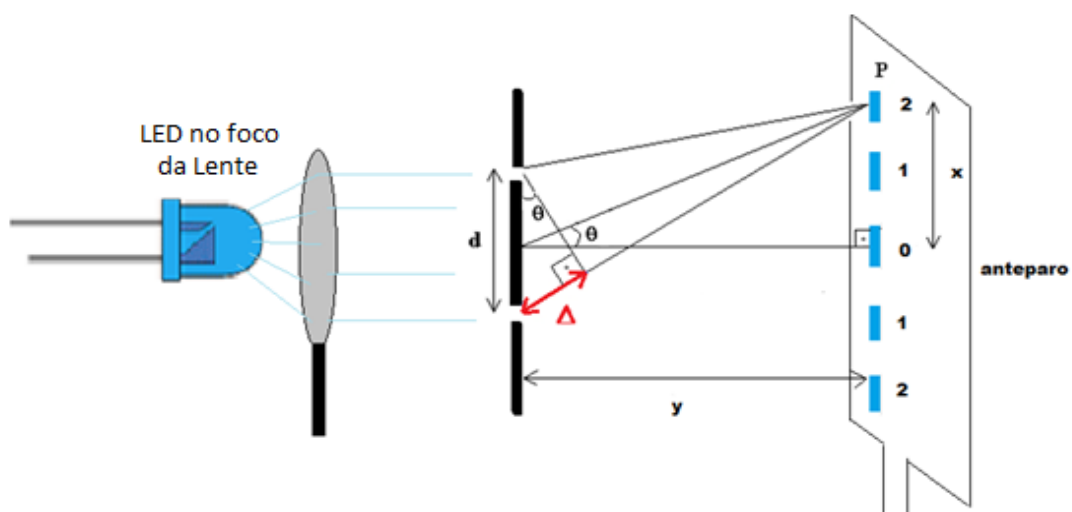


Figura 3

Demonstração da relação de Young

Na figura 2, pode-se perceber que a medida de Δ corresponde a um comprimento de onda λ

$$\Delta = 1 \lambda$$

E, segundo a figura 3, o seno do ângulo θ é dado por

$$\text{sen } \theta = \frac{\Delta}{d}$$

Teremos então que

$$\text{sen } \theta = \frac{1 \lambda}{d}$$

$$d \cdot \text{sen } \theta = 1 \lambda$$

Como o primeiro máximo é 1 então teremos para os próximos máximos m os valores 2, 3, 4, 5, 6 e assim por diante. Ficando a expressão de modo geral representada por:

$$m \cdot \lambda = d \cdot \text{sen } \theta$$

onde,

m = ordem dos máximos de interferência

λ = comprimento de onda

d = distância de separação entre duas fendas da rede de difração.

$\text{sen } \theta$ = seno do ângulo de desvio obtido para o segundo máximo.

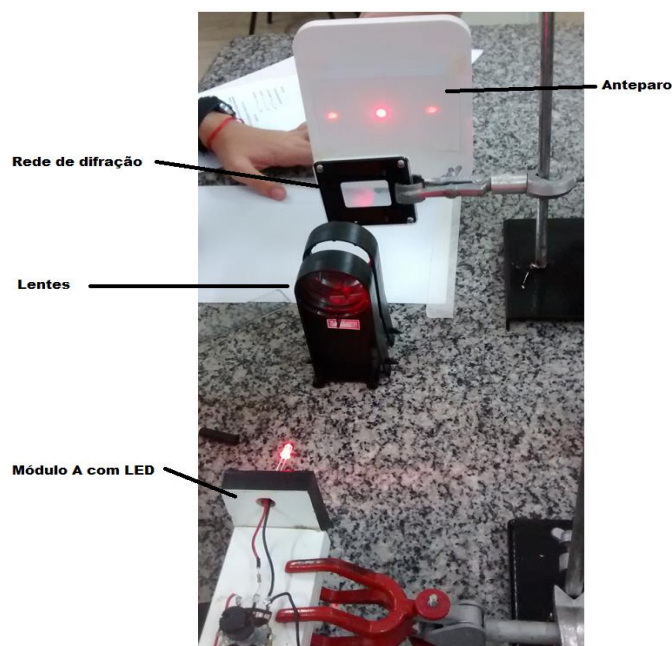
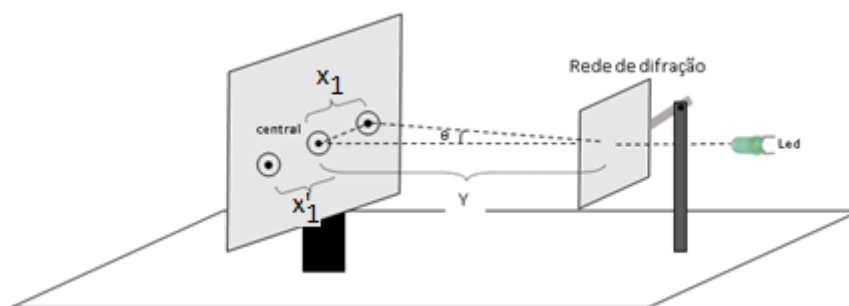
Roteiro do Experimento 1 (determinação do comprimento de onda)

Vamos utilizar um arranjo experimental composto de:

- Fonte de luz com leds (módulo A);
- Rede de difração de 500 linhas por mm ou CD (\approx 640 linhas por mm);
- Lentes convergentes;
- Anteparo (fita crepe + papel milimetrado);
- Régua.
- Suporte
- Diafragma

A partir desta montagem vamos determinar experimentalmente o comprimento de onda da luz do LED através do seu espectro e da utilizando a relação de Young. Esse valor será necessário para determinar a constante de Planck no experimento do Efeito fotoelétrico.

Montagem:



Procedimento.

1. Observando a imagem e figura acima meça com uma régua a distância Y , da rede de difração ao anteparo.
 $Y =$ _____
2. Determine a distância d (a largura de uma linha) para a rede de difração dada.
 $d =$ _____
3. Siga o que se pede:
 - a. Coloque com a fita crepe o papel milimetrado no anteparo.
 - b. Observe o espectro no anteparo.
 - c. No papel milimetrado, marque as posições dos 2 primeiros máximos (a esquerda e a direita) onde o espectro está projetado e o máximo central. Guarde o papel milimetrado
 - d. Meça, com a régua, as distâncias x_1 e x'_1 e em seguida calcule a média X_m .

$$X_1 =$$

$$X'_1 =$$

$$X_m =$$

e. calcule o valor de **senθ**.

f. Sendo $m = 1$ (primeiro máximo), calcule o valor de λ , segundo a relação de Young, onde:

$$m \cdot \lambda = d \cdot \text{sen}\theta$$

Anote os valores dos comprimentos de onda a seguir:

Led vermelho → _____ nm.

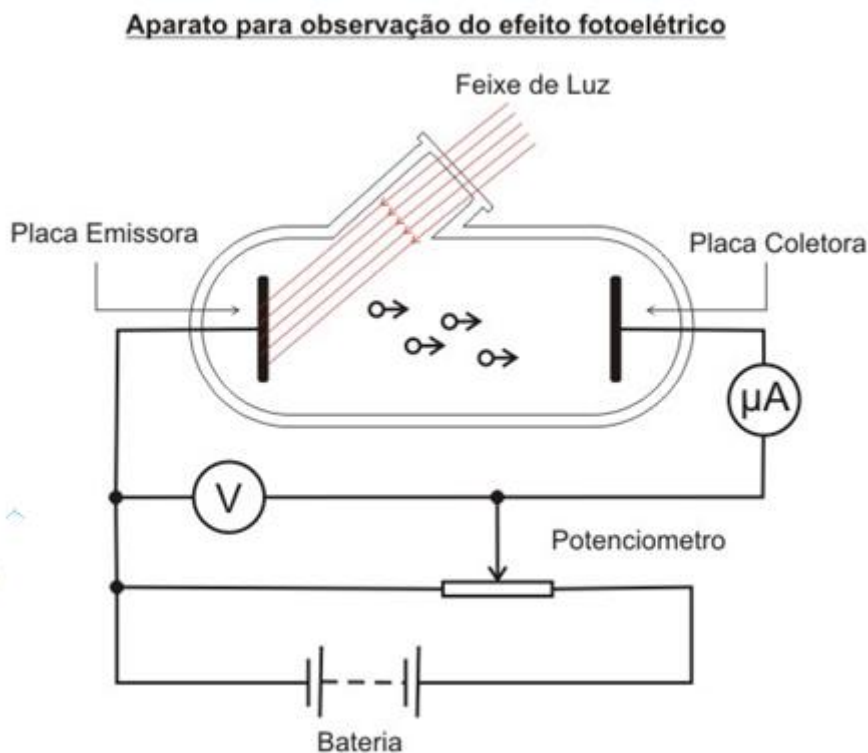
Led Laranja → _____ nm.

Led azul → _____ nm.

Led verde → _____ nm.

II. O EFEITO FOTOELÉTRICO e A DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE PLANCK

O efeito fotoelétrico consiste em iluminar uma determinada placa de metal e verificar que esta emite elétrons devido a incidência de uma determinada frequência de Luz. O experimento consiste em um aparato com duas placas (A e B) confinadas em uma ampola à vácuo, onde em uma abertura de vidro incide uma determinada intensidade de Luz na placa A. Elétrons se desprendem desta e incidem na placa oposta B. Nos extremos de cada placa, associa-se uma fonte de tensão variável V e mede-se a corrente elétrica entre as placas com um amperímetro associado em série na saída da placa B (Figura).

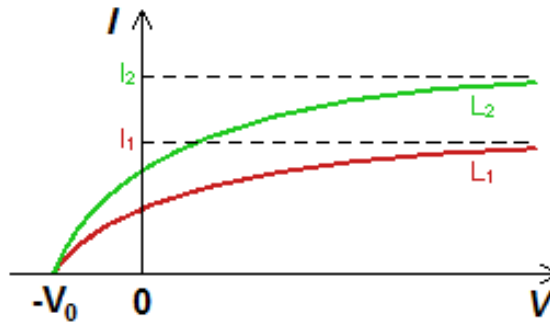


Nesse experimento verifica-se que:

1. nada se detecta no amperímetro na ausência de luz, e ao incidir a luz sobre a placa A (catodo) verifica-se o acréscimo da corrente elétrica (número de elétrons ejetados do catodo) conforme a intensidade de luz incidente aumenta.
2. Verifica-se que a corrente elétrica medida pelo amperímetro acusa valores instantaneamente, mesmo com baixa intensidade luminosa. Aqui percebe-se que a física clássica não tem condições de explicar tal fenômeno pois, com a diminuição da intensidade da luz (amplitude) diminui-se o campo elétrico e

consequentemente o ganho de energia para os elétrons serem ejetados também deveria.

3. Ao variar a tensão elétrica V positivamente a corrente elétrica aumenta até um certo valor e, a partir daí o gráfico da intensidade de corrente *versus* tensão aplicada permanecia constante (Gráfico 2).



Nesse mesmo caso, ao variar inversamente a tensão V , ou seja, para potenciais menores que zero, verifica-se que é possível frear os elétrons ejetados pelo catodo e tornar nula a corrente elétrica ($i = 0$) até atingir um valor V_0 , que se chama de tensão de frenagem ou tensão de corte.

4. Ainda em relação ao gráfico 2, nota-se que iluminando o catodo com uma intensidade maior (I_2), e diminuindo a tensão com a finalidade de zerar a corrente, verifica-se que o potencial de corte é o mesmo. Fato este também inexplicável pela física clássica.
5. A corrente elétrica estabelecida no amperímetro só acusa valor diferente de zero para determinada frequência, dependendo do metal do catodo, ou seja, há uma frequência mínima responsável para “retirar” elétrons do catodo, chamada de frequência de corte (ν_0).

Por fim, os elétrons são ejetados com uma determinada velocidade, e portanto com uma energia cinética máxima ($Ec_{máx}$) dada por:

$$Ec_{máx} = E - \phi$$

Onde E é a quantidade de energia da luz incidente ($E_{fóton}$) e ϕ é chamada de *função Trabalho*, correspondente a energia mínima para se retirar o elétron do metal. Portanto, se esta energia cinética máxima for zero, ou seja, o elétron ganha energia mínima para deixar o metal com velocidade nula, teremos:

$$E_{fóton} = Ec_{máx} + \phi$$

$$E_{fóton} = 0 + \phi$$

Utilizando-se da ideia de Planck, Einstein propôs a energia da luz do fóton quantizada, incidindo em pacotes, daí

$$E_{fóton} = h \cdot \nu$$

$$h \cdot \nu = 0 + \phi$$

$$h \cdot \nu_0 = \phi \quad [1]$$

Ou seja, a função trabalho é dependência apenas da frequência da luz que incide sobre o metal e terá um valor mínimo, de corte para que o elétron saia do metal. É importante mencionar aqui que para frear um elétron com energia cinética $Ec_{máx}$ é preciso usar um potencial de corte V_0 , tal que, multiplicado por e (carga elementar do elétron), nos fornece a energia do elétron mais rápido emitido, ou seja

$$Ec_{máx} = e V_0$$

$$Ec_{máx} = E_{fóton} - \phi$$

$$Ec_{máx} = h\nu - \phi$$

Da expressão [1], teremos

$$eV_0 = h\nu - h\nu_{corte}$$

$$V_0 = \frac{h\nu - h\nu_{corte}}{e}$$

Einstein afirmou que, se a “fórmula estiver correta”, ao plotar um gráfico do potencial necessário a arrancar os elétrons do metal pela frequência da luz incidente nele, deve-se chegar a uma reta, cuja inclinação é independente da natureza do metal, como observado por Philipp Lenard (Gráfico 3). (Einstein, 1965)

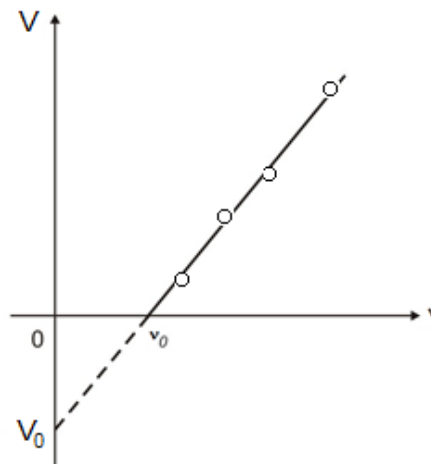


Gráfico 3: por este gráfico de V uversus ν é possível perceber que para determinado metal existe uma frequência mínima de corte ν_0 capaz de arrancar elétrons do metal.

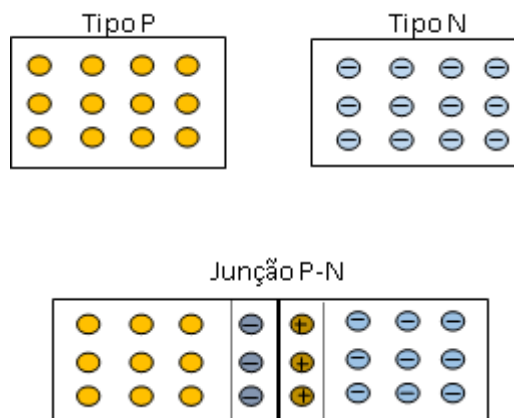
Portanto, a mínima energia capaz de arrancar elétrons de um metal é independente da intensidade de luz, ou seja, não depende da quantidade de fótons emitidos pela luz, basta um fóton para um elétron.

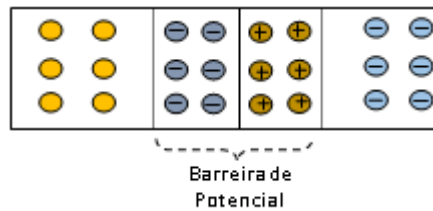
Albert Einstein seguiu as ideias de Planck e associou a frequência de oscilação dos átomos do ressonador do corpo negro com a frequência da luz emitida e incidente no metal em forma de pacotes. Posteriormente chamou estes pacotes de fótons (partículas de Luz).

Funcionamento de um LED

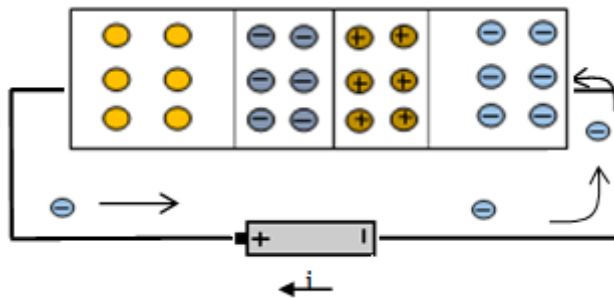
Os LEDs são diodos dopados com impurezas do tipo **n** e **p** e é na junção desses dois materiais onde haverá a emissão de luz, por isso são chamados de diodos fotoemissores ou diodos emissores de luz.

A seguir uma representação da junção pn de um LED onde os elétrons e “buracos” se movem ocupando a barreira de potencial no equilíbrio. Reparem que aí aparece um campo elétrico e consequentemente uma diferença de potencial na barreira de potencial.





Quando o LED é ligado numa bateria como na figura a seguir, ou seja, numa polarização direta, elétrons fornecidos a região **n** pela bateria “saltam” para a região **p** para os “buracos” (lacunas) ali existentes.



Esses elétrons extras na região **n** possuem um nível de energia maior que os da região **p** onde há “lacunas” e, nesses saltos, eles rompem a barreira de potencial e liberam energia em forma de luz (fótons).

Vale lembrar que a emissão da luz só ocorre a partir de uma tensão acima da tensão limitada pela impureza do LED. Esse fenômeno é chamado de eletroluminescência, daí o nome de *diodo emissor de luz* ou *diodo fotoemissor*.

Mas, e se o LED receber uma certa intensidade de luz, ele pode funcionar como um detector de onda eletromagnética? Ele pode gerar corrente elétrica como se fosse um efeito fotoelétrico?

LEDs como fotorreceptores (fotodiodos)

Nos semicondutores a simples aplicação de energia externa, como calor, pode fazer com que elétrons se desloquem de uma banda de energia (valência) menos energética para uma banda mais energética (condução). Isso fará que o semicondutor gere uma corrente elétrica.

Em LEDs (semicondutores dopados e emissores de luz) é possível aplicar essa energia externa sob forma de luz (onda eletromagnética) e esta registrar uma corrente elétrica como nos painéis fotovoltaicos e “baterias solares”.

Como os LEDs comerciais são fabricados com cristais semitransparentes e capas transparentes que permitem a passagem de luz, se uma luz de energia $h\nu$ incidir em sua face haverá, dependendo da energia, “saltos” de elétrons para camadas de energia superior. E, portanto, com uma incidência direta de luz (fótons) neste LED, agora chamado de fotodiodo, é possível verificar por meio de um amperímetro o estabelecimento de uma corrente elétrica num circuito associado a ele.

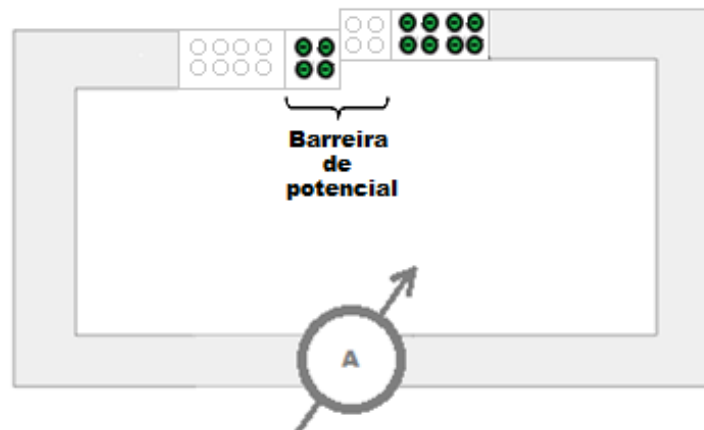


Figura 1: Representação de um LED com a junção **pn** em equilíbrio. A recombinação entre elétrons e “buracos” forma uma barreira de potencial de energia de gap específica para cada material que é feito o LED.

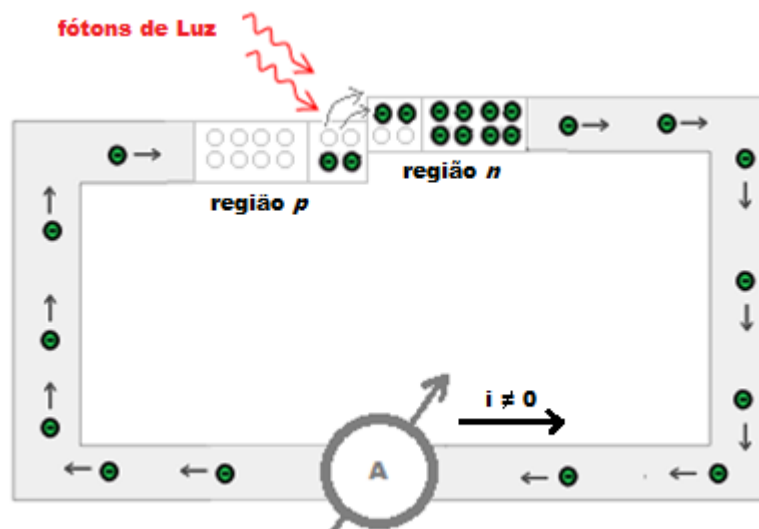


Figura 2: Representação da incidência de **fótons de luz** sobre um LED. Se unirmos os extremos do Led (suas polaridades) por fios e um amperímetro, este acusará uma corrente elétrica.

Os elétrons da barreira de potencial da região **p** que receberam energia $h\nu$ dos fótons de Luz, se deslocam para a região **n** e, por um fio condutor passam para regiões de energia mais baixa (região **p**), que por sua vez recebem novamente energia da luz incidente, gerando assim uma corrente elétrica contínua $i \neq 0$. Essa corrente elétrica é chamada de corrente reversa ou fotocorrente e é muito baixa (da ordem de microamperes – μA). Dependendo da natureza de que é feito o LED essa corrente elétrica pode variar de acordo com a luz monocromática incidente. Para LEDs monocromáticos que vão do infravermelho ao violeta a energia de gap cresce a medida que a frequência de luz emitida aumenta, ou seja, são proporcionais.

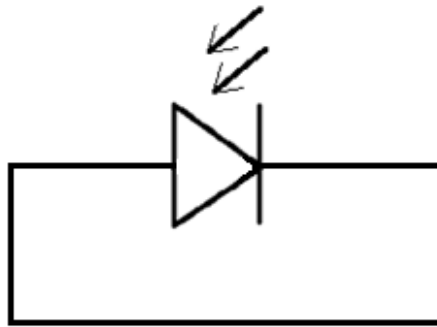


Figura 4.16: Representação de um Led como detector de luz (Fotodiodo ou fotorreceptor).

Roteiro do Experimento 2 (Estudo do Efeito fotoelétrico)

Você recebeu dois módulos A e B de equipamentos para a realização do experimento do “efeito fotoelétrico”.

O módulo A (já usado na determinação do λ da Luz monocromática do LED) será usado como fonte de luz para iluminar o LED do módulo B e, assim, controlar a intensidade de luz por meio de seu potenciômetro.

O módulo B é o sensor (receptor) de luz e o LED colocado nele receberá luz do Led do módulo A. Repare que na entrada do Led, mais precisamente no terminal negativo (módulo B) há um resistor de $1\text{M}\Omega$ ($1 \cdot 10^6 \Omega$) em paralelo com o voltímetro. Este voltímetro indicará a existência de tensão no LED iluminado.

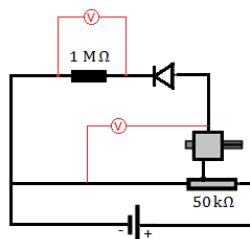


Diagrama do circuito B

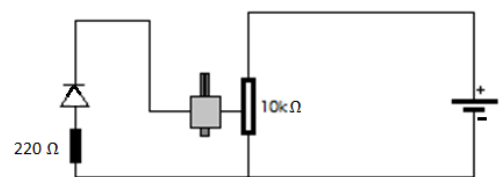
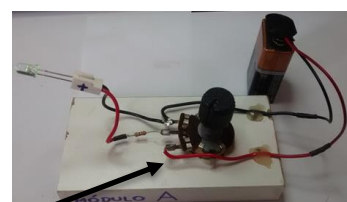


Diagrama do circuito A



potenciômetros

Na sua bancada há 5 potinhos (kinder ovo) com LEDs monocromáticos.

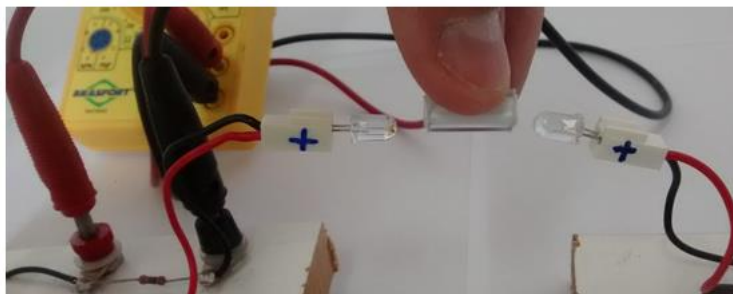
1ºPasso:

Conecte LEDs de cores diferentes no módulo A e com ele ilumine outros LEDs do módulo B. Verifique a existência ou não de tensão elétrica gerada no LED iluminado, montando uma tabela.

Cuidados: 1. Não esqueça de conectar o voltímetro para medir a tensão.

2. Como os LEDs tem polaridade, conecte corretamente os terminais no conector “molex”. Lembre-se que terminal maior é positivo.

3. Os LEDs podem ser colocados face a face por meio de um tubinho de caneta que se encontra ao lado dos potinhos. Vide figura.



Depois de montado sua tabela, responda as questões:

1ª. Questão.

Por que alguns LEDs não geram fotocorrente (tensão elétrica)?

Qual a condição para que o LED iluminado funcione como um sensor de Luz, ou seja, ele acuse no voltímetro uma determinada tensão? Relacione com a energia e a frequência do espectro de cada LED.

2ª. Questão.

Ao aumentar a intensidade da luz sobre o LED iluminado, o que acontece com a indicação do voltímetro? A intensidade da luz é proporcional a essa corrente elétrica, também chamada de fotocorrente?

2ºPasso:

Agora vamos usar como fonte de luz no módulo A um LED de cor **Azul** e iluminar outro LED de cor **verde** do módulo B.

Procedimento:

1. Conecte os voltímetros nos seus respectivos bornes e as baterias de 9V.



2. Certifique-se de que o potenciômetro multivolta (do módulo B) esteja no seu curso mínimo, girando-o totalmente no sentido anti-horário.
3. Ilumine com máxima intensidade o LED do módulo B e anote a fotocorrente elétrica gerada por ele usando a indicação do Voltímetro e a Lei de Ohm $V = R \cdot i$ (lembre-se de que $R = 1M\Omega$).

Cálculo de i

Neste caso, o LED (módulo B) estará fazendo o papel da placa metálica emissora de fotoelétrons, como no Efeito fotoelétrico.

4. Abra um programa do excell que está em seu computador e anote na tabela dada, o valor da fotocorrente.

	MAIS INTENSO		
	U(V)	i(μA)	
	0		

5. No módulo B há um potenciômetro multivolta ligado a uma bateria externa de 9V. Esta tem a função de estabelecer no circuito uma corrente elétrica “inversa”, capaz de desacelerar os elétrons ejetados do LED iluminado. (Como ocorre no experimento do Efeito Fotoelétrico)
Com o potenciômetro pode-se variar a tensão da bateria até “zerar” a corrente elétrica dos fotoelétrons (representado pelo voltímetro A). O Potencial de frenagem é dado pelo voltímetro (B) quando a corrente é zerada.
Faça várias medidas e anote-as na tabela dada do Excell. Sugestão: varie a corrente, diminuindo de 0,50 em 0,50 μA.

6. Terminada a tabela, plote o gráfico $U(V) \times i(\mu A)$.
7. Zere novamente a tensão “reversa” e, com o LED do módulo A iluminando com a **metade** de sua intensidade, construa novamente **uma tabela** $U(V) \times i(\mu A)$ e um **gráfico**.
8. No final plote os dois gráficos juntos no mesmo eixo.
9. Repita todo o procedimento (de 1 a 9), trocando o LED iluminado verde pelo laranja, vermelho e infravermelho, respectivamente.

Com os gráficos em mãos responda:

1ª. Questão:

Quanto maior a frequência da luz incidente, maior o potencial de corte?

2ª. Questão:

Quanto maior a intensidade de luz incidente, maior a frequência de corte?

3ª. Questão:

Quanto maior a frequência da luz incidente, maior a energia cinética dos elétrons ejetados?





4ª. Questão:

Todos os gráficos tem um mesmo aspecto, começam espaçados e convergem para um mesmo potencial de parada aproximadamente. O Potencial de parada depende da Intensidade da luz incidente sobre o mesmo LED iluminado? Responda de acordo com o que você aprendeu sobre o funcionamento de LED's.

CÁLCULO da constante de planck h

Para se determinar a constante de Planck siga o procedimento a seguir:

1. Monte uma tabela com: os comprimentos de onda calculados por você no experimento 1, calculando a sua frequência $\nu = \frac{c}{\lambda}$ onde $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$. Anote também os potenciais de corte para cada LED

LED	λ (nm)	$\nu(10^{14}$ Hz)	V_{corte} (V)
 infravermelho			
 vermelho			
 laranja			
 verde			

2. Com o programa de Excell, plote um gráfico do Potencial de parada *versus* frequência de luz do LED.
3. Trace uma reta e determine a constante de Planck conforme a seguir:
Considerando que a Energia necessária para frear os elétrons seja dada por

$$E = e.V = h\nu$$

Isolando h , teremos

$$h = e \cdot \frac{V_{corte}}{\nu}$$

onde

$\frac{V_{corte}}{\nu}$ é o coeficiente angular da reta.

Apêndice C

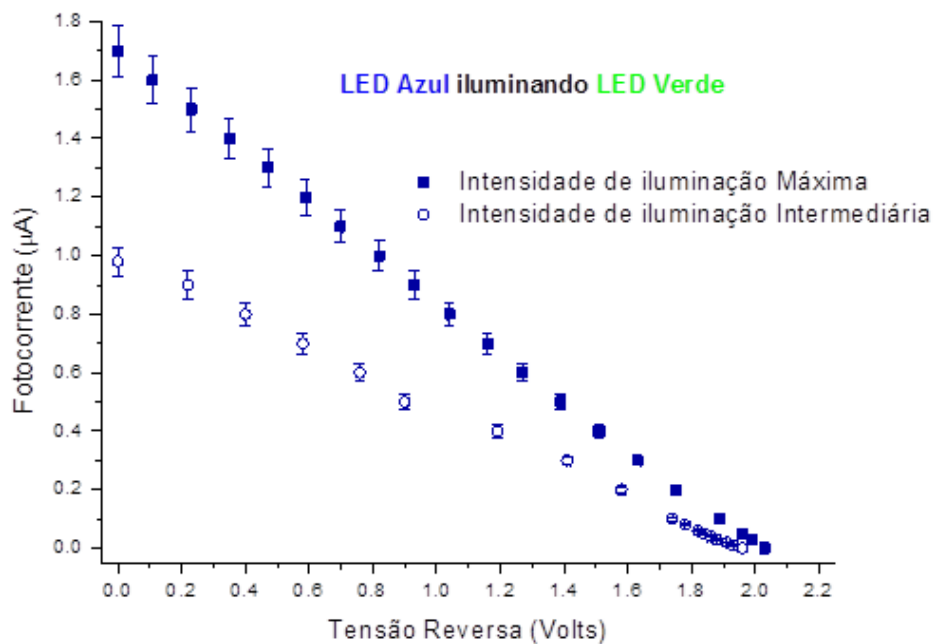
Tabelas e gráficos dos resultados experimentais

LED Azul iluminando verde

Mais intenso

Menos intenso

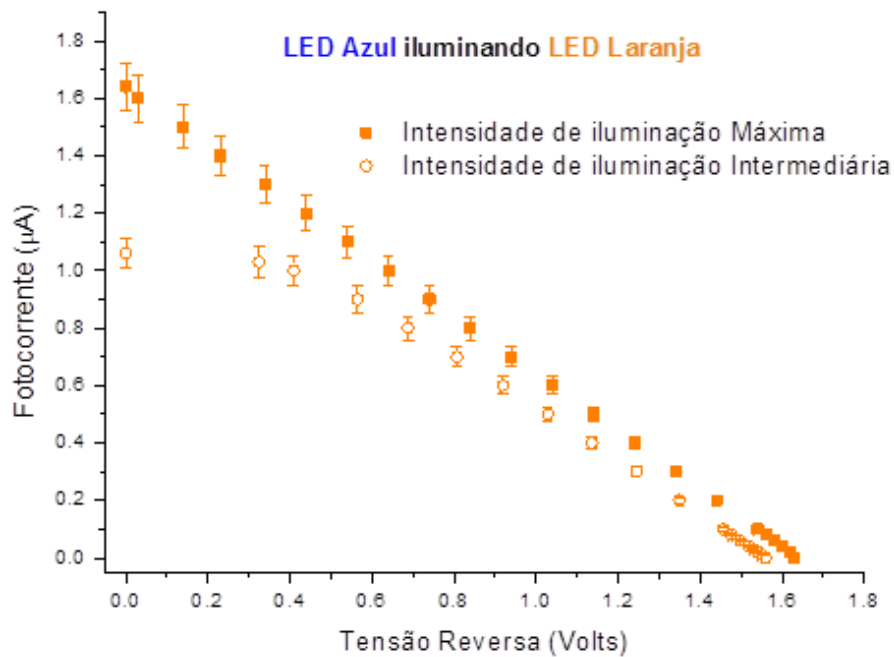
U(V)	i(μA)	U(V)	i(μA)
0,000 ± 0,002	1,700 ± 0,086	0,000 ± 0,002	0,980 ± 0,049
0,110 ± 0,003	1,600 ± 0,081	0,220 ± 0,003	0,900 ± 0,045
0,230 ± 0,003	1,500 ± 0,076	0,400 ± 0,004	0,800 ± 0,040
0,350 ± 0,004	1,400 ± 0,071	0,580 ± 0,005	0,700 ± 0,035
0,470 ± 0,004	1,300 ± 0,066	0,760 ± 0,002	0,600 ± 0,030
0,590 ± 0,005	1,200 ± 0,061	0,900 ± 0,007	0,500 ± 0,025
0,700 ± 0,006	1,100 ± 0,056	1,190 ± 0,008	0,400 ± 0,020
0,820 ± 0,006	1,000 ± 0,050	1,410 ± 0,009	0,300 ± 0,015
0,930 ± 0,007	0,900 ± 0,045	1,580 ± 0,010	0,200 ± 0,010
1,040 ± 0,007	0,800 ± 0,040	1,740 ± 0,011	0,100 ± 0,006
1,160 ± 0,008	0,700 ± 0,035	1,780 ± 0,011	0,080 ± 0,005
1,270 ± 0,008	0,600 ± 0,030	1,820 ± 0,011	0,060 ± 0,004
1,390 ± 0,009	0,500 ± 0,025	1,840 ± 0,011	0,050 ± 0,003
1,510 ± 0,010	0,400 ± 0,020	1,860 ± 0,011	0,040 ± 0,003
1,630 ± 0,010	0,300 ± 0,015	1,880 ± 0,011	0,030 ± 0,003
1,750 ± 0,011	0,200 ± 0,010	1,910 ± 0,012	0,020 ± 0,002
1,890 ± 0,011	0,100 ± 0,006	1,930 ± 0,012	0,010 ± 0,002
1,960 ± 0,012	0,050 ± 0,003	1,960 ± 0,012	0,000
1,990 ± 0,012	0,030 ± 0,003		
2,03 ± 0,01	0,000		



Potencial médio de parada: $V_{corte} = (2,00 \pm 0,04) V$

- LED Azul iluminando Laranja

Mais intenso		Menos intenso	
U(V)	i(μA)	U(V)	i(μA)
0,000 ± 0,002	1,640 ± 0,083	0,000 ± 0,002	1,06 ± 0,054
0,030 ± 0,002	1,600 ± 0,081	0,325 ± 0,004	1,03 ± 0,052
0,140 ± 0,003	1,500 ± 0,076	0,409 ± 0,004	1,00 ± 0,050
0,230 ± 0,003	1,400 ± 0,071	0,565 ± 0,005	0,90 ± 0,045
0,340 ± 0,004	1,300 ± 0,066	0,688 ± 0,005	0,80 ± 0,040
0,440 ± 0,004	1,200 ± 0,061	0,807 ± 0,006	0,70 ± 0,035
0,540 ± 0,005	1,100 ± 0,056	0,919 ± 0,007	0,60 ± 0,030
0,640 ± 0,005	1,000 ± 0,050	1,029 ± 0,007	0,50 ± 0,025
0,740 ± 0,006	0,900 ± 0,045	1,136 ± 0,008	0,40 ± 0,020
0,840 ± 0,006	0,800 ± 0,040	1,245 ± 0,008	0,30 ± 0,015
0,940 ± 0,007	0,700 ± 0,035	1,350 ± 0,009	0,20 ± 0,010
1,040 ± 0,007	0,600 ± 0,030	1,456 ± 0,009	0,10 ± 0,006
1,140 ± 0,008	0,500 ± 0,025	1,477 ± 0,009	0,08 ± 0,005
1,240 ± 0,008	0,400 ± 0,020	1,498 ± 0,009	0,06 ± 0,004
1,340 ± 0,009	0,300 ± 0,015	1,519 ± 0,010	0,04 ± 0,003
1,440 ± 0,009	0,200 ± 0,010	1,530 ± 0,010	0,03 ± 0,003
1,540 ± 0,010	0,100 ± 0,006	1,540 ± 0,010	0,02 ± 0,002
1,560 ± 0,010	0,080 ± 0,005	1,551 ± 0,010	0,01 ± 0,002
1,580 ± 0,010	0,060 ± 0,004	1,560 ± 0,010	0
1,600 ± 0,010	0,040 ± 0,003		
1,620 ± 0,002	0,02 ± 0,002		
1,630 ± 0,002	0		



Potencial médio de parada $V_{corrente} = (1,60 \pm 0,04) V$

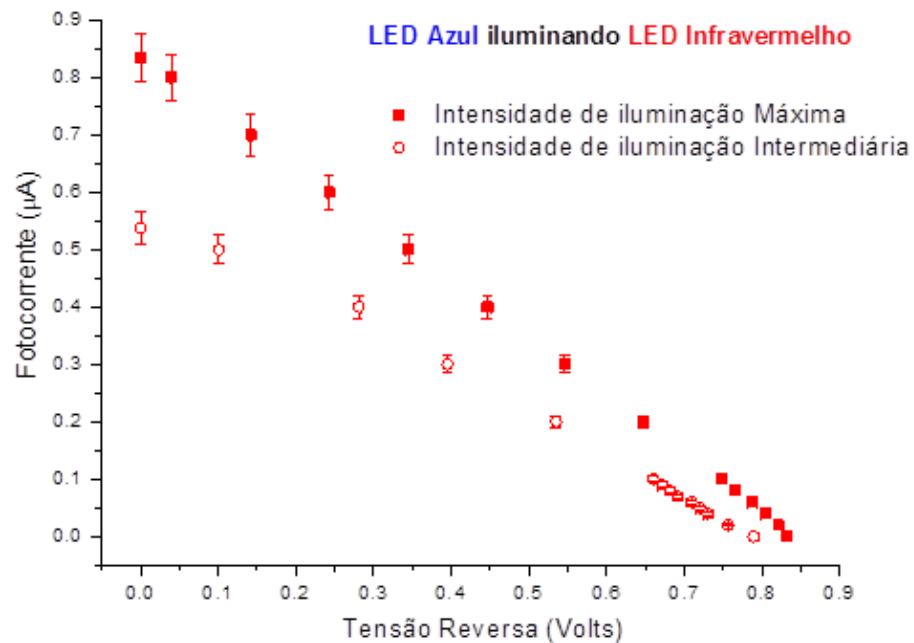
- LED Azul iluminando Infravermelho

Mais intenso

U(V)	i(μA)
0,000 ± 0,002	0,834 ± 0,042
0,040 ± 0,002	0,800 ± 0,040
0,142 ± 0,003	0,700 ± 0,035
0,243 ± 0,003	0,600 ± 0,030
0,345 ± 0,004	0,500 ± 0,025
0,447 ± 0,004	0,400 ± 0,020
0,546 ± 0,005	0,300 ± 0,015
0,648 ± 0,005	0,200 ± 0,010
0,748 ± 0,006	0,100 ± 0,006
0,765 ± 0,006	0,080 ± 0,005
0,787 ± 0,006	0,060 ± 0,004
0,804 ± 0,006	0,040 ± 0,003
0,821 ± 0,006	0,020 ± 0,002
0,831 ± 0,006	0

Menos intenso

U(V)	i(μA)
0,000 ± 0,002	0,538 ± 0,027
0,101 ± 0,003	0,500 ± 0,025
0,281 ± 0,003	0,400 ± 0,020
0,395 ± 0,004	0,300 ± 0,015
0,535 ± 0,005	0,200 ± 0,010
0,660 ± 0,005	0,100 ± 0,006
0,671 ± 0,005	0,090 ± 0,005
0,681 ± 0,005	0,080 ± 0,005
0,691 ± 0,005	0,070 ± 0,004
0,709 ± 0,006	0,060 ± 0,004
0,720 ± 0,006	0,050 ± 0,003
0,730 ± 0,006	0,040 ± 0,003
0,756 ± 0,006	0,020 ± 0,00
0,789 ± 0,006	0



Potencial médio de parada $V_{corde} = (0,81 \pm 0,01) V$

Anexo A

Material de divulgação da escola



The screenshot shows the website of Liceu Jardim. The header includes the school's logo, social media links, and navigation menus. The main content area features a news article titled "Alunos do Ensino Médio participam de curso de Física Moderna".

Notícia

Alunos do Ensino Médio participam de curso de Física Moderna
Publicado em 04/12/15 por Depto. de Marketing

Nos dias 24 e 25 de novembro, os alunos do Ensino Médio tiveram a oportunidade de participar de um curso "hand's on" de Física Moderna, com o professor de Física Alexandre Magno Montibeller. O curso experimental foi realizado no laboratório, com uma breve introdução histórica do nascimento da Física Quântica e, em seguida, os alunos colocaram a "mão na massa".

O curso foi dividido em dois momentos. No primeiro dia, os estudantes utilizaram o método de espectroscopia para determinar o comprimento de onda de luz emitido por Leds monocromáticos, com lentes, anteparo e uma rede de difração. No segundo dia, eles tiveram contato com os semicondutores e puderam simular o fenômeno do efeito fotoelétrico, explicado por Einstein (Prêmio Nobel de 1905), com um circuito feito com Leds e resistores culminando na determinação da constante de Planck.

"Os alunos do Liceu Jardim puderam vivenciar experimentalmente um pouco da Física Quântica e a sua importância nas aplicações tecnológicas do nosso cotidiano. Essa foi uma oportunidade única que eles tiveram para conhecer a Física Moderna de uma maneira experimental. Puderam visualizar, tomar dados e fazer medidas muito precisas de grandezas pouco discutidas num curso normal de Física.", explica o professor.

Confira as fotos!

