ENIVALDO TAVARES DE FREITAS

A Física Moderna no Cotidiano

JI-PARANÁ-RO
OUTUBRO DE 2019

ENIVALDO TAVARES DE FREITAS

A Física Moderna no Cotidiano

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Física de Ji-Paraná, Universidade Federal de Rondônia, Campus de Ji-Paraná, como parte dos quesitos para a obtenção do Título de Licenciado em Física, sob orientação do Prof. Dr Walter Trennepohl Júnior

JI-PARANÁ-RO
OUTUBRO DE 2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Fundação Universidade Federal de Rondônia

Gerada automaticamente mediante informações fornecidas pelo(a) autor(a)

F866f Freitas, Enivaldo Tavares.

A Física Moderna no Cotidiano / Enivaldo Tavares Freitas. -- Ji-Paraná, RO, 2019.

75 f. : il.

Orientador(a): null Walter Trennepohl Júnior

Coorientador(a): null.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Fundação Universidade Federal de Rondônia

1.Física Moderna. 2.Efeito Fotoelétrico. 3.Experimento didático. I. Trennepohl Júnior, Walter . II. Título.

CDU 53.05

Bibliotecário(a) Alex Almeida CRB 11.853

ATA DE AVALIAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DO CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

Aos vinte dias do mês de novembro do ano de 2019, às 9h30min, no Laboratório de Pesquisa em Ensino de Física do Campus da Unir de Ji-Paraná, reuniu-se a Banca Julgadora composta pelo professor orientador Walter Trennepohl Júnior e pelos examinadores Francisco de Assis Pinto Cândido e Marco Polo Moreno de Souza, para avaliarem o Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Licenciatura em Física, intitulado **A Física Moderna no Cotidiano**, do discente *Enivaldo Tavares de Freitas*. Após a apresentação, o candidato foi arguida pelos integrantes da Banca Julgadora por 35 (trinta e cinco) minutos. Ao final da arguição, a Banca Julgadora, em sessão reservada, aprovou o candidato com nota 8,0 (oito inteiros), em uma avaliação de 0 (zero) a 10 (dez). Nada mais havendo a tratar, a sessão foi encerrada às 10h45min, dela sendo lavrada a presente ata, assinada por todos os membros da Banca Julgadora.

Walter Trennepohl Júnior

Prof. Dr. Walter Trennepohl Júnior – DEFIJI/CJP/UNIR
Orientador

Prof. Ms. Francisco de Assis Pinto Cândido – DEFIJI/CJP/UNIR

Prof. Dr. Marco Polo Moreno de Souza – DEFIJI/CJP/UNIR

DEDICATÓRIA

Dedico:

A Deus, a minha família, especialmente minha esposa que sempre me apoiou durante toda jornada do meu curso.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus por ter me dado saúde e animo para que eu pudesse chegar ao final do meu curso de física licenciatura, a minha família, minha mãe, a minha esposa e filhos que sempre me apoiou.

Especialmente ao professor Dr Walter Trennepohl Júnior pela paciência que teve comigo em me orientar este trabalho, pela minha falta de tempo em poder dedicar assiduamente a este trabalho.

E agradecer todos os professores do departamento de física da unir do campus de Ji-Paraná que contribuíram para a minha formação acadêmica.

RESUMO

O público alvo desse trabalho são alunos do ensino médio, na tentativa epistemológica do resgate de alunos que não sabem por que se estuda física, para que serve e qual importância da física na vida cotidiana e ao mundo contemporâneo. Tem-se observado que atividades experimentais e aplicação da física contribuem de forma muito positiva no sentido de aumentar o interesse do aluno nos conceitos discutidos em sala de aula. Desta forma, o objetivo deste trabalho é de apresentar alguns experimentos simples com material de baixo custo sobre o efeito fotoelétrico e fotovoltaico. Inicialmente apresenta-se uma pequena introdução à teoria da relatividade, redigido de um jeito não encontrado nos livros didáticos atuais do ensino médio, e sua aplicação no *GPS* (global positioning system), onde faz se uso da relatividade para corrigir a diferença do tempo do satélite em relação ao receptor de sinais GPS. Em seguida, é tratada a fascinante história da luz: sua natureza, como é formada e suas propriedades de reflexão, refração e difração da luz, a luz na visão moderna. Também se explica o efeito fotoelétrico sua descoberta, importância e aplicação em experimento simples com: transistor, *LDR* (do inglês Light Dependent Resistor) e fotodiodo. A explicação ao efeito fotoelétrico rendeu o prêmio Nobel ao físico alemão Albert Einstein, que desvendou todo o mistério que o envolvia. Aplicações deste efeito incluem: sensor fotoelétrico e fotovoltaico, usina solar etc. Finalmente, serão apresentados alguns experimentos simples de uma célula solar a base de transistor para fins didáticos e experimentos usando LDR, para despertar o interesse do aluno e que ele possa ver a importância da física no mundo em que vive.

Palavras-chave: Física moderna, Efeito fotoelétrico, Experimentos didáticos.

ABSTRACT

The target audience of this work is high school students, in an attempt to rescue students epistemological don't know why, studied physics, what good is and what importance of Physics in everyday life and the contemporary world. It has been observed that experimental activities and application of physics contribute very positively to increase the student's interest in the concepts discussed in the classroom. The aim of this paper is to present some simple experiments with low-cost material about the photoelectric effect and PV. Initially presents a short introduction to the theory of relativity that is not handled in current textbooks of high school, and your application in GPS (global positioning system), if use of relativity to correct the difference of time in relation to the satellite receiver of GPS signals. Then is treated the fascinating history of light: your nature, as is formed and its properties of reflection, deflation, the light in the modern view. Also explained the photoelectric effect: your discovery importance and application in simple experiment with: transistor, LDR (Light Dependent Resistor English) and photodiode. The explanation to the photoelectric effect won the Nobel Prize to German physicist Albert Einstein, which unlocked all the mystery that involved. Applications of this effect include: photoelectric sensor photovoltaic solar plant, and for transformation of light energy into electrical energy etc. Finally, some simple experiments of a transistor-based solar cell for didactic purposes and experiments using LDR, to awaken the interest of the student and that he can see the importance of Physics in the world in which he lives.

Keywords: modern physics, photoelectric effect, educational Experiments.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: CONTROLE E USO GPS. 23
FIGURA 3.1: CURVA CARACTERÍSTICA DE UMA ONDA PERIÓDICA. 28
FIGURA 3.2: PRINCÍPIO DA CONSTRUÇÃO DE HUYGENS. 29
FIGURA 3.3: ESQUEMA DA REFLEXÃO DA LUZ. 30
FIGURA 3.4: ESQUEMA DE UMA FRENTE DE ONDA MUDANDO DE MEIO. 32
FIGURA 3.5: FRENTE DE ONDA DA LUZ. 34
FIGURA 3.6: ESPECTRO DA LUZ VISÍVEL. 35
FIGURA 3.7: MODELO DE PLANCK. 37
FIGURA 3. 3.8: ILUSTRAÇÃO MODERNA DO APARATO PARA DETERMINAR A CARGA DO ELÉTRON. 39
FIGURA 4.1: ÁTOMO DE HIDROGÊNIO SEGUNDO O MODELO DE BOHR. 42
FIGURA 4.2: ONDA ELETROMAGNÉTICA. 43
FIGURA 4.3 DISPOSITIVO PARA PRODUZIR ONDA ELETROMAGNÉTICA 44
FIGURA 5.1: DISPOSITIVO QUE HERTZ DESCOBRIU EFEITO FOTOELÉTRICO. 49
FIGURA 5.2: APARATO PARA TESTAR O EFEITO FOTOELÉTRICO. 51
FIGURA 5.3: POTENCIAL DE CORTE DO EFEITO FOTO ELÉTRICO. 51
FIGURA 5.4: ESQUEMA DA COLISÃO DE FOTO COM ELÉTRON. 53
FIGURA 5.5: FUNÇÃO TRABALHO. 55
FIGURA 5.6: FLUXOGRAMA DO EFEITO FOTOELÉTRICO. 56
FIGURA 5.7: IMAGEM DO GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORTE, EFEITO FOTOELÉTRICO. 57
FIGURA 6.1: PROCESSO DE DOPAGEM DE MATERIAL. 59
FIGURA 6.2: TIPOS DE TRANSISTOR NPN E PNP. 60
FIGURA 6.3: TRÊS MODELOS DE TRANSISTOR E COM A MESMA FUNÇÃO. 61
FIGURA 7.1: SENSORES FOTO CONDUTIVO E FOTOVOLTAICO. 63
FIGURA 7.2: GRÁFICO DA RESPOSTA DA SENSIBILIDADE ESPECTRAL SENSORES. 64
FIGURA 7.3: SENSOR LDR. 65
FIGURA 7. 4: CURVA CARATÊ/ERÍSTICA DO LDR. 66
FIGURA 8.1: MONTAGEM DE PLACA SOLAR COM TRANSISTOR 2N3055. 68

FIGURA 8.2: TRANSISTOR 2N3055 ABERTO. 68
FIGURA 8.3: ESQUEMA ELÉTRICO FEITO NO EAGLE (SOFT PARA DESENHOS E PROJETOS ELETRÔNICO). 69
FIGURA 8.4: LADO DE TRÁS DA PLACA MOSTRANDO AS LIGAÇÕES. 70
FIGURA 8.5: PLACA SOLAR MONTADA. 70
FIGURA 8.6: A PLACA SOLAR EXPOSTA A LUZ. 71
FIGURA 8.7: PLACA COBERTA SEM A INCIDÊNCIA DE LUZ. 72
FIGURA 8.8: ESQUEMA ELETRÔNICO DO EXPERIMENTO, FEITO NO SOFT EAGLE. 75
FIGURA 8.9: MATRIZ DE CONTATO ELETROELETRÔNICO. 75
FIGURA 8.10: MATRIZ DE CONTATO COM A FONTE INSTALADA O LDR EXPOSTO À LUZ E O LED ACESO. 76
FIGURA 8.11: MATRIZ DE CONTATO COM A FONTE CONECTADA E INCIDÊNCIA PARCIAL DE LUZ AO LDR. 77
FIGURA 8.12: MATRIZ DE CONTATO CONECTADO A FONTE COM O LDR SEM INCIDÊNCIA DE LUZ. 77
FIGURA 8.13: USINA DE ENERGIA SOLAR COM PLACAS FLUTUANTE. 79

SUMÁRIO

1 **INTRODUÇÃO** 17
2 **INTRODUÇÃO A TEORIA DA RELATIVIDADE** 19
2.1 RELATIVIDADE RESTRITA OU ESPECIAL 20
2.2 CONTRIBUIÇÃO RELATIVÍSTICA NO COTIDIANO 22
3 **A LUZ** 27
3.1 A LUZ COMO ONDA 29
3.2 REFLEXÃO DA LUZ 29
3.2.1 Leis da reflexão 31
3.3 REFRAÇÃO DA LUZ 32
3.4 DIFRAÇÃO DA LUZ 34
3.5 A LUZ HOJE NA FÍSICA MODERNA 35
3.6 MODELO DE PLANCK 37
3.7 QUANTIZAÇÃO DA ENERGIA 37
3.8 QUANTIZAÇÃO DA CARGA DO ELÉTRON 38
4 **FÓTON** 41
4.1 NATUREZA DA LUZ 42
4.2 ONDA ELETROMAGNÉTICA 43
4.2.1 Associação da física clássica com a física moderna 45
4.3 A IMPORTÂNCIA DO FÓTON à VIDA COTIDIANA 46
5 **EFEITO FOTOELÉTRICO** 49
5.1 EFEITO FOTOELÉTRICO NA VISÃO DE LENARD 50
5.2 EXPLICAÇÃO SOBRE O EFEITO FOTOELÉTRICO POR EINSTEIN 53
5.3 COMO FUNCIONA DE FATO O EFEITO FOTOELÉTRICO 54
5.4 COMPROVAÇÃO DO EFEITO FOTOELÉTRICO POR MILLIKAN 56
6 **SEMICONDUTORES** 59
6.1 TRANSISTOR 60
7 **SENSOR FOTOELÉTRICO E APLICAÇÕES** 63
7.1 FOTODIODO 64
7.2 LDR 65
8 **EXPERIMENTOS COM O EFEITO FOTOELÉTRICO** 67
8.1 EXPERIMENTO 1 67
8.1.1 Material usado no experimento. 67
8.1.2 Montagem do experimento. 67

8.1.3 Procedimento experimental 71

8.2 EXPERIMENTO 2 74

8.2.1 Material usado no experimento 74

8.2.2 Montagem do experimento 74

8.2.3 Procedimento experimental 76

8.2.4 Aplicações do efeito fotoelétrico 78

8.2.5 Principais Usinas Solares do Brasil 79

9 CONCLUSÃO 81

REFERÊNCIA 83

1 INTRODUÇÃO

A relatividade e a mecânica quântica deram um grande impulso para grandes descobertas e aplicações tecnológicas, tanto na área da ciência e tecnologia na descoberta de partículas elementar, quanto na medicina no diagnóstico e tratamento de doenças, como base fundamental para criação de equipamentos para esse fim. A física é, e sempre será, o marco que direciona os fenômenos naturais para conhecimento do Homem, que o desmistifica através de muita pesquisa e experimentos que o torna compreensível e mensurável.

A física clássica tem grande contribuição para o, modernismo mundial. Assim, por exemplo, a termodinâmica permitiu o surgimento da maquinas térmicas, como a máquina a vapor, os motores de combustão interna dos automóveis, usinas termoelétrica para conversão de energia térmica em eletricidade, etc. e o eletromagnetismo, que tem uma larga escala de aplicação que o torna muito importante para a tecnologia moderna do mundo contemporâneo etc.

Já as aplicações da física moderna não são tão visíveis para os alunos. Assim, a ideia principal é mostrar qual a importância da física moderna e algumas de suas aplicações na vida cotidiana, com teoria e experimentos simples, onde professor do ensino médio poderá fazer acontecer os fenômenos físicos experimentalmente em sala de aula com a colaboração dos alunos, sem a necessidade de ir ao laboratório de física, na tentativa de instigar os alunos se dedicarem mais a física e não simplesmente passar por essa disciplina sem dar importância alguma e que não vejam a física como uma disciplina detestável da área das exatas. Acreditando que dessa maneira possa haver um resgate de alunos que não sabem por que estudam físicas e para que ela sirva.

Um exemplo bem cotidiano que evidencia o uso da física são os controladores de velocidades (famoso pardal) instalados nas ruas das cidades, rodovias e BR. Controla medindo a velocidade instantânea dos veículos. Mas já está sendo testado um novo sistema que mede a velocidade média dos veículos, medindo-se o intervalo de tempo que os veículos gastam para passar na frente de duas câmeras de trafego.

A física moderna faz-se mais presente nos dias de hoje devido à grande demanda tecnológica que se renova a todo instante, onde uma enorme população de toda faixa etária está mergulhado neste marinhado tecnológico.

Não saber por que se estuda física é um problema que assola a classe estudantil do ensino médio, com um grande público na rede pública de ensino. Com a tecnologia de ponta do mundo moderno, eles tropeçam em física o tempo todo, sem saber que toda essa tecnologia está suportada pela física clássica e moderna.

2 INTRODUÇÃO A TEORIA DA RELATIVIDADE

Essencialmente no início do século XX, mais precisamente há cerca de três décadas que antecedeu o século passado, a Física deu um grande impulso ao modernismo mundial, com importantes descobertas, e experimento proporcionando assim o surgimento de uma Física, Moderna, diferente e polêmica, que na qual se propôs a resolver os vários problemas insolúveis para a Física clássica. Literalmente, a mecânica Newtoniana ficou limitada ao conhecimento classicista. O uso das leis de Newton para corpos que se deslocam em baixa velocidade, como por exemplo, de uma bala de arma de fogo, foguete, avião, automóvel, trem e planetas, funcionam muito bem sem restrição.

Há cerca de 200 anos após a formulação das leis da mecânica Newtoniana, já no final século XIX, os cientistas da época observaram um desacordo nos resultados de algumas observações interpretadas com as leis de Newton. Foi observado também que essas variações de resultado davam-se quando trabalhavam como experimento que usavam altas velocidades, próximo a velocidade da luz.

Esse problema ficou sem resposta por vários anos, até porque as leis de Newton utilizam referencial inercial na qual espaço e tempo, é grandezas absolutas, isso quer dizer que quando obtêm se um valor do espaço e tempo, esses valores são constantes sem sofrer variação alguma, sem levar em conta a velocidade da partícula ou o movimento do referencial em relação a outro referencial. Com os postulados da teoria da relatividade restrita formulada e apresentado por Albert Einstein em 1905, todas as deficiências da mecânica Newtoniana no tocante velocidade, espaço e tempo, sofrem correções.

As leis da mecânica Newtoniana continuam válidas e são de suma importância ao desenvolvimento, nos mais diversos setores industriais, nas construções civis, na mecânica automotiva e aeronáutica etc., onde as velocidades são baixas. Já a teoria da relatividade se aplica aos casos em que a velocidade dos corpos é elevada e deu um novo rumo à Física, que a partir de então vem sendo cada vez mais aprimorada, sendo que o uso da Relatividade nos diversos campos tecnológicos da ciência que transforma o que antes era ficção científica, em realidade. A teoria da relatividade é a denominação dada ao conjunto de duas teorias cientificas: a Teoria da Relatividade Restrita ou Especial, e a Teoria da Relatividade Geral.

2.1 RELATIVIDADE RESTRITA OU ESPECIAL

Antes do surgimento da teoria da relatividade restrita, publicada por Albert Einstein no ano de 1905 (ano dourado para Einstein), o estado de movimento ou repouso dos corpos em relação a um referencial inercial eram determinados pela chamada transformação de Galileu, baseado na primeira lei de Newton. Para a elaboração da teoria da relatividade restrita, Einstein buscou motivação nas leis de Newton que trata de referenciais únicos, e adota espaço e tempo como se fosse o mesmo para observadores diferentes, de um único fenômeno físico. Com base nisso Einstein apresenta o seu primeiro postulado da relatividade, que diz o seguinte: "As leis da física são as mesmas em todos os referenciais inerciais. Não existe um referencial absoluto".

Um indício da veracidade do primeiro postulado já tinha sido observado por Hendrik Lorentz (1853-1929), ao verificar que as equações de Maxwell não assumem a mesma forma quando observados por dois observadores em referencias que se desloca com velocidades diferentes se for aplicado a transformação de Galileu da mecânica newtoniana.

O termo de relatividade restrita deve-se ao fato que esta teoria se limita a corrigir efeitos devido ao movimento de um corpo em relação a outro que se encontra em referenciais que se deslocam com velocidades diferentes e próximas a velocidade da luz. Com as mudanças feitas na física clássica pela teoria da relatividade, as leis da óptica e do eletromagnetismo permaneceram inalteradas, como preconiza o primeiro postulado.

Com base na física clássica, sabia-se que as ondas mecânicas necessitavam de um meio para se propagar. Como era sabido também que a luz era uma onda e que se deslocava no espaço, levantou-se a hipótese de que a luz também precisava de um meio para se propagar. Esse meio, que imaginavam existir, foi chamado de éter e tinha propriedades estranhas.

Com a explicação de Lorentz para o experimento de Michelson e Morley, que indicava que não havia movimento de translação da Terra em torno do Sol, percebeu-se que o espaço e o tempo deveriam deixar de ser absolutos e passariam a serem relativos. Para obter este resultado, Lorentz obteve o chamado fator de Lorentz, representado pela letra grega $\boldsymbol{\gamma}$ (gama), e dado por:

$$\boldsymbol{\gamma} = \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{1}-(\mathbf{v^2}/\mathbf{c^2})}} \quad , \qquad (2.1)$$

onde v é a velocidade do corpo e c a velocidade da luz.

Analisando o fator de Lorentz, observa-se para valores baixos da velocidade v, a fração (v^2/c^2) fornecerá um número próximo de zero e o fator de Lorentz, sendo próximo de 1 (um), não irá alterar significativamente as leis de Newton.

Mas à medida que o valor de v aumenta, o resultado da fração (v^2/c^2) aproxima-se de um (um) e o fator de Lorentz fica muito grande ou indeterminado, nos mostrando que matematicamente é impossível um corpo atingir a velocidade da luz.

A influência do fator de Lorentz na teoria da relatividade pode ser vista quando se calcula a diferença entre o intervalo de tempo de um evento observado por um observador (t) e outro que se desloca com velocidade v em relação ao anterior (t_0), que é dado por:

$$\mathrm{t} = \boldsymbol{\gamma}_{\mathbf{t_0}} = \frac{\mathbf{t_0}}{\sqrt{\mathbf{1-(v^2/c^2)}}} \quad , \qquad (2.2)$$

que mostra que o intervalo de tempo de um evento, para um observador que se move com velocidade v em relação a outro, é menor por um fator γ, fato conhecido como dilatação do tempo. O mesmo fator influencia a massa de um objeto, que será γ vezes maiores para o objeto que se move com velocidade v em relação a outro.

Para demonstrar a existência do éter, Michelson projetou um dispositivo chamado de interferômetro de Michelson e Morley, construído no ano de 1881, que detectaria uma diferença de velocidade entre dois feixes de luz que fossem emitidos na direção do movimento de translação da Terra e perpendicularmente a este movimento. Como o resultado, não observou nenhuma diferença nestas velocidades, que implicava que ou a Terra estava em repouso ou os objetos contraem durante seu movimento, como era proposto por Lorentz. Em contrapartida, o instrumento que ele inventou (interferômetro) tem grande aplicabilidade nos dias de hoje, sendo um dos instrumentos mais preciso para medir comprimentos de onda, seja da luz ou de ondas gravitacionais.

Usando os resultados de Lorentz, Einstein descreveu então perfeitamente os resultados dos experimentos de Michelson e Morley, derivando equações a partir das hipóteses de Lorentz. Na teoria de Einstein a velocidade da luz independe do movimento da fonte que a está emitindo e a velocidade do observador que a está medindo, mantendo o mesmo valor em todos os referenciais inerciais.

Assim, Einstein formula o segundo postulado, que diz: "A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor c em todas as direções e em todos os referenciais inerciais". O termo

relatividade de sua teoria foi cunhado por Poincaré, que desenvolveu alguns anos antes uma teoria bem semelhante à de Einstein, que levava aos mesmos resultados.

Chamaremos aqui de evento qualquer acontecimento. Na teoria da relatividade um evento é caracterizado por quatro coordenadas, sendo três espaciais *x, y, z* e uma temporal *t*. Alguns exemplos simples de evento que podemos observar: o piscar de uma lanterna, o encontro dos ponteiros de um relógio e a colisão de duas partículas elementares registrado num acelerador de partículas. A explosão de uma estrela é um fenômeno astronômico, que pode ser observado através de um telescópio ou sondas espaciais.

Outra consequência da teoria da relatividade é a relação entre a massa *m* de um objeto e a energia total *E* que ele possui, dada por:

$$\mathbf{E = mc^2} \quad , \qquad (2.3)$$

onde *c* é a velocidade da luz.

2.2 CONTRIBUIÇÃO RELATIVÍSTICA NO COTIDIANO

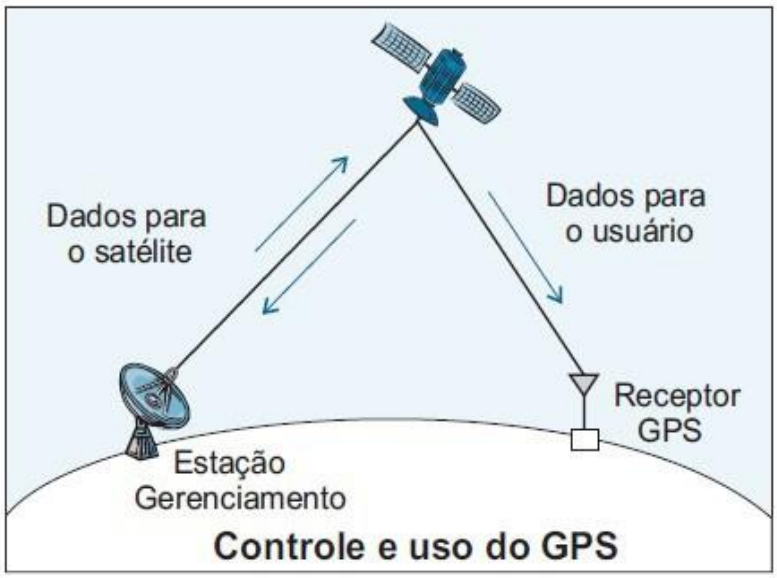
É difícil identificar ou perceber a relatividade do espaço-tempo no dia a dia, a menos que você trabalhe no HLC (Large Hadron Collider), um grande túnel debaixo da fronteira com França e Suíça, onde partículas podem ser aceleradas, até atingido velocidades muito próximas à velocidade da luz.

A teoria da relatividade tem uma grande e importante aplicação corretiva na tecnologia de ponta do mundo moderno, onde os conceitos que têm se da física clássica não foram suficientes para realização do desejo científico, em fazer funcionar um audacioso projeto do GPS (global positioning system), Sistema Global de Posicionamento, cuja finalidade é fornecer coordenadas de um ponto na superfície do planeta, através do uso de satélites que orbitam a terra.

Os dispositivos que recebem sinais de GPS hoje equipam os vários modelos de veículos autos-motores, como: carros, motocicletas, aviões de voo comercial, particular e da aeronáutica, e veículos do exército. E também tropas do exército, navios, barcos, e outros tipos de equipamentos móveis como: celulares, smartphone e aparelho portátil de (GPS), ele

funcionam enviando e recebendo sinais, sendo possível o traçado de coordenada em qualquer ponto da superfície terrestre incluindo mar e a atmosfera. O sistema conta com uma estação de gerenciamento, que tem controle total das informações.

Figura 2.1: Controle e uso GPS.



Fonte: <http://blogdogps.com.br/novidades/como-funcionam-os-receptores-gps/>.

Com base no GPS foi possível criar até um game (jogo) para aparelhos de celulares e smartphone, chamado Pokémon GO, (contração de pocket (bolso) e monster (mostro)), que usa o sistema de mapeamento do Google e o sistema GPS para localizar os jogadores. Foi necessário o auxílio dos cálculos da relatividade para que o ele funcionasse, como explica o professor Leandro F. Aurichi do departamento de matemática da USP.

> Por trás disso, está mais um sofisticado cálculo matemático. O professor da USP Leandro Aurichi, do ICMC, explica que a localização é obtida a partir da diferença entre o tempo marcado pelo relógio presente no seu smartphone na Terra e o tempo marcado nos relógios atômicos que estão a bordo dos satélites. “Como os satélites estão girando mais rápido no espaço e estão no alto, submetidos a uma menor gravidade, é preciso fazer um ajuste na conta do tempo que você está marcando aqui na Terra”. Nesse sentido, não é exagero dizer que, sem Albert Einstein, seriam poucas as chances de você jogar Pokémon GO. Porque **são as duas teorias** criadas pelo famoso físico, a Teoria Especial da Relatividade e a Teoria Geral da Relatividade, que possibilitam realizar esse ajuste entre os relógios e manter a precisão de seu posicionamento no mapa. Leandro revela que a diferença entre os relógios

> pode parecer pequena à primeira vista – 38 microssegundos por dia –, no entanto, se for deixada de lado, vai gerar um erro de 10 quilômetros por dia, o que impediria você de pegar monstrinhos pela vizinhança.

Sem o recurso que a relatividade proporcionou isso tudo não seria possível, porque existe uma diferença de tempo entre o tempo marcado nos relógios na Terra e nos relógios atômico presentes nos satélites, pelo fato de eles estarem a uma grande distância da superfície da Terra (aproximadamente 36.000 km). Como este satélite move-se a grandes velocidades (cerca de 28.000 km/h) em relação a um determinado ponto da superfície terrestre, o tempo escoa mais devagar no relógio do satélite do que no relógio do receptor "estacionário" de sinal de GPS.

Exatamente neste ponto que entra o gênio Albert Einstein com a teoria da relatividade e suas equações, onde os engenheiros fazem uso da relatividade para fazer uma calibragem no tempo do relógio do satélite, de acordo com sua velocidade, devido o referencial e observador estarem em movimento. Sem essa calibragem fina relativística, as trajetórias e as navegações na superfície usando o sistema de GPS produziriam uma incerteza na posição, da ordem dê até 10 quilometro ou mais.

O movimento relativo entre o satélite e o receptor provoca um efeito Doppler, fazendo com que a frequência da radiação eletromagnética seja ligeiramente modificada. Recebendo os sinais simultaneamente, transmitido pelos vários satélites, o detector pode determinar a velocidade do satélite, e usar os dados destas informações para calcular a posição e a velocidade do próprio receptor, ou seja, da aeronave, dos automóveis, etc., mesmo que a contribuição relativística seja extremamente pequena.

Os satélites seriam um referencial em movimento e o aparelho de GPS (receptor de ondas eletromagnéticas no formato de ondas de rádio) o observador, também em movimento. A precisão do reajuste no sistema de GPS na qual a relatividade supriu sua necessidade é uma prova concreta de que ambas as teorias da relatividade funcionam. É incrível porque este fenômeno da física não afeta apenas os relógios que estão funcionados em perfeito estado e sincronizados com outro relógio estacionário.

A teoria da relatividade de um modo geral é muito complexa, tanto a restrita ou especial. Experimentos da teoria da relatividade jamais poderão ser feitos em um simples laboratório.

Os experimentos feitos usando baixa velocidade nos fornecem um valor tão pequeno muito próximo de zero, que não dá para ser usado como base de cálculos experimentais,

tornando-o até desprezível. Pelo fato da infinidade do espaço e o universo não oferecer barreiras à propagação da luz, Einstein usou a luz e sua esplendida velocidade como base fundamental para explicar sua teoria.

3 A LUZ

Sendo um tema de muito polêmico e discussão, A luz séculos atrás, mexeu com o raciocínio de filósofos gregos, físicos e matemáticos que tentavam entender e descobrir os enigmas que a rodeavam. Eles acreditavam que ela era composta por minúsculas partículas que andavam em linha reta e deslocavam em alta velocidade.

Por volta do ano de 1500, o artista, pintor e matemático, Leonardo da Vinci percebeu certa semelhança da refração da luz, com o fenômeno do eco, e levantou a hipótese, a luz tinha um movimento ondulatório.

Na busca de compreender os fenômenos que a envolve, surgiram no século XVII duas correntes de pensamento que tiveram grande importância na física clássica no campo da mecânica e da óptica: a teoria corpuscular da luz defendida por Newton e o modelo ondulatório da luz, defendido por Christian Huygens (1629-1695).

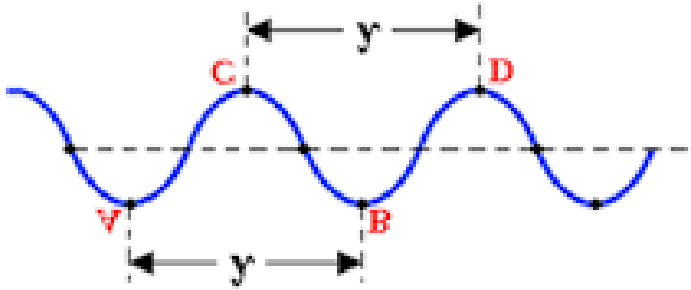
Segundo Newton a luz era formada por partícula ou corpúsculo, sendo que cada cor era constituída por um tipo próprio de corpúsculo, mas todos viajavam à mesma velocidade, efeito das combinações das cores resultaria na luz visível de cor branca, porém quando fazia passar um feixe de luz branca por um prisma, resultava nas sete cores do arco-íris, na qual cada corpúsculo se constituía numa cor e se deslocava com velocidade diferente no prisma, sendo que a cor vermelha teria maior velocidade e teria menor desvio que o corpúsculo da cor violeta, mais lento. Apesar desta teoria, provir de Isaac Newton, sua ideia não foi muito bem aceita pela comunidade científica da época.

Para Christian Huygens a luz necessitaria de um meio para propagar como o som e os outros tipos de ondas. Ele acreditava na existência do éter, e que as partículas de um corpo luminoso formavam ondas de choque, da qual a luz seria composta por minúsculas esferas que propagavam com grande velocidade, formando uma frente de onda, que se deslocavam em série por uma fileira de esfera, transferia seu movimento a todas as partículas que colidissem. Não era uma transferência real de matéria, mas sim uma tendência ao movimento.

Como as partículas da qual era formado o éter, segundo Huygens, não estavam dispostos em linha reta, e sim irregularmente, uma partícula ao colidir com outra qualquer partícula, transferia uma tendência de movimento a todas as partículas que estivessem na direção do seu movimento, fazendo um verdadeiro espalhamento ordenado das partículas. É importante notar também que Huygens não imaginava que a luz era constituída por ondas

periódicas. Denomina-se ondas periódicas as ondas geradas por fontes que executam oscilações periódicas, ou seja, que se repetem em intervalos de tempo iguais. A figura 3.1 a baixo representa um onda periódica propagando-se em uma corda tencionada, onde de uma crista a outra (C a D e de A a D) temos o comprimento de onda.

Figura 3.1: curva característica de uma onda periódica.



Fonte: <https://mundoeducacao. bol.uol.com.br/física/ondas-periodicas.htm>.

O mais importante de tudo isso é a afirmação de Christian Huygens de que a luz se comporta como uma onda, que pode ser visto no seu livro “Tratado da Luz”, que causou grandes repercussões. Na época isso já era uma ideia diferente, mas que explicava os fenômenos da reflexão e refração da luz. Ele comparava as ondas da luz com a onda causada por uma pedra jogada num lago. Para ele, o éter estava para a luz, assim como as ondas estão para a água.

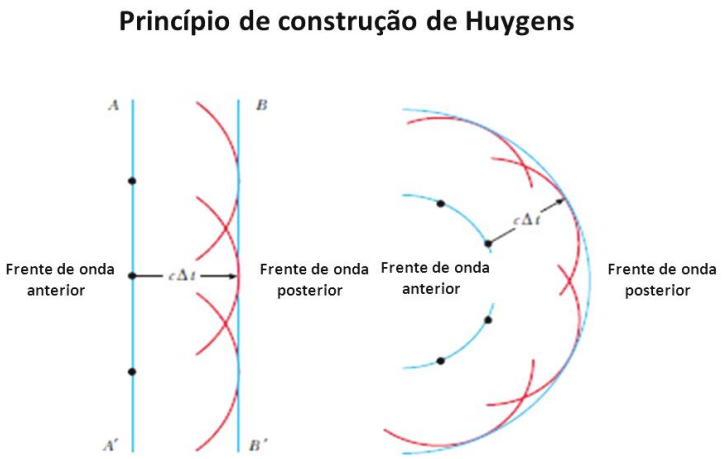
Tudo mudou quando alguns físicos como James Clark Maxwell, Augustin-Jean Fresnel e Thomas Young, com forte embasamento matemático e experimentos, conseguiram provas concretas que confirmaram a teoria de Christian Huygens. Por meio do eletromagnetismo, da óptica ondulatória, e a experiência de dupla fenda, conseguiram consolidar a teoria de que a luz é realmente uma onda.

3.1 A LUZ COMO ONDA

Geometricamente, a teoria de Huygens utiliza uma construção que permite prever a localização de uma dada frente de onda em qualquer instante futuro, apesar de termos que conhecer sua posição atual. Essa construção se baseia no *Princípio de Huygens*, que diz o seguinte: Todos os pontos de uma frente de onda se comportam como fontes pontuais de onda secundária. Depois de um intervalo de tempo *t*, a nova posição da frente de onda é dada por uma superfície tangente a essa onda secundária.

A figura 3.2 abaixo mostra a propagação de uma frente de onda plana. Se num instante $t = 0$ a frente de onda está no plano AA', pelo princípio de Huygens pontos do plano AA' funcionam como fonte pontuais de ondas secundária que são emitindo no instante $t = 0$. Depois de transcorrer um instante Δt, o raio dessas ondas esféricas secundaria é $c\Delta t$, onde c é a velocidade de propagação da onda. Traçando-se então a envoltória das ondas secundária no instante $t = \Delta t$, obtém-se o plano BB', que é à frente de onda nesse instante.

Figura 3.2: Princípio da construção de Huygens.



Fonte: slidespleyer.com.br disponível em: <http://cmapspublic.ihmc.us.>.

3.2 REFLEXÃO DA LUZ

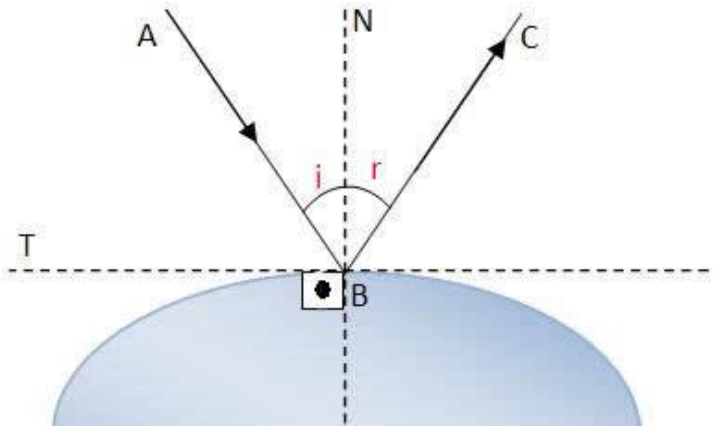
O fenômeno da reflexão da luz pode ser explicado de maneira bem simples: quando abrimos uma janela vemos detalhadamente a paisagem, os prédios, carros, pessoas na rua, etc., isso só é possível por causa da reflexão da luz.

Ao sofrer a incidência da luz do Sol, a paisagem, prédios, carros e as pessoas refletem grande parte dessa energia que, ao tocarem em nossos olhos, formam a imagem. O mesmo acontece quando alguém olha para nós; o nosso corpo reflete a luz incidente até os olhos de quem está nos olhando, formando a nossa imagem.

Todavia, para que nosso olho sinta a reflexão, é necessário que a luz esteja no espectro visível. A reflexão da luz é um fenômeno que consiste no fato de a luz voltar a propagar-se no meio de origem, após incidir sobre um objeto ou superfície.

A reflexão pode ocorrer para qualquer tipo de onda e para qualquer comprimento de onda. É possível esquematizar a reflexão de um raio de luz, ao atingir uma superfície polida, como mostra a figura 3.3.

Figura 3.3: Esquema da reflexão da luz.



Fonte: <https://www.sofisica.com.br/conteudos/Otica/Reflexaodaluz/reflexao.php>

onde:

- AB = raio de luz incidente
- BC = raio de luz refletida
- N = reta normal à superfície no ponto B

- T = reta tangente à superfície no ponto B
- I = ângulo de incidência, formado entre o raio incidente e a reta normal.
- R = ângulo refletido, formado entre o raio refletido e a reta normal.

3.3.1 Leis da reflexão

Os fenômenos de reflexão, tanto regular quanto difusa e seletiva, obedecem a duas leis fundamentais, que são:

1ª lei da reflexão

O raio (c) de luz refletido e o raio (a) de luz incidente, assim como a reta normal à superfície, pertencem ao mesmo plano, ou seja, são coplanares.

2ª Lei da reflexão

O ângulo de reflexão (r) é sempre igual ao ângulo de incidência (i).

$$i = r$$

Exemplos comuns incluem a reflexão da luz e som. Em acústica, reflexão provoca ecos e é usado em sonar. Em geologia, a reflexão é importante no estudo de ondas sísmicas. A reflexão é observada com muitos tipos de onda eletromagnética, para além da luz visível. Reflexão de frequência mais alta é importante para a transmissão de rádio e de radar. Mesmo os raios-X e raios gama podem ser refletidos em ângulos rasos com espelhos especiais.

A reflexão difere de refração porque, nesta segunda, ocorrem alterações nas características do meio por onde passa a onda, isso quer dizer que a reflexão acontece sempre no mesmo meio de propagação, enquanto que o fenômeno da refração aparece na mudança do meio de propagação da luz, que é acompanhado de uma pequena variação da velocidade da luz.

3.4 REFRAÇÃO DA LUZ

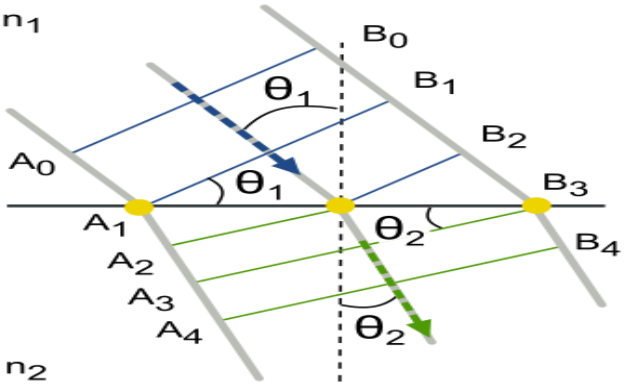
A velocidade das ondas eletromagnéticas em um meio depende da composição do meio e da forma que a onda passa de um meio a outro sua velocidade muda, causando o fenômeno de refração.

Para melhor entendimento da refração da luz, é necessário que conheçamos a grandeza adimensional chamada de *índice de refração da luz*, que é a relação entre a velocidade *c* de propagação da luz no vácuo e a velocidade v de propagação da luz no meio, isto é:

$$n = \frac{c}{v}, \qquad (3.1)$$

Na figura 3.4 mostram como ocorre o fenômeno de refração da luz que atravessa um meio de índice de refração $\boldsymbol{n_1}$, para outro de índice de refração $\boldsymbol{n_2}$.

Figura 3.4: esquema de uma frente de onda mudando de meio.



Fonte; imagem retirada do site: <http://www.wikiwand.com/zh-cn>

O comprimento de onda é a distância entre duas cristas de uma onda, sendo inversamente proporcional à frequência. A velocidade da luz dividida pela frequência, dado pela equação:

$$\boldsymbol{\lambda} = \frac{c}{f}, \qquad (3.2)$$

onde, λ é o comprimento de onda, c é a velocidade da luz e f a frequência. Quanto maior a frequência da luz, menor será o comprimento de onda.

Na figura 3.4, temos um diagrama da refração da luz. O comprimento de onda das frentes de ondas no meio n_1: A_0B_0 e A_1B_1, é λ, enquanto que as frentes de onda no meio n_2: A_4B_4 e A_3B_3 é λ'. Devido à variação de velocidade de propagação no meio n_2, o raio de luz inclina obliquamente em relação à normal, formando um ângulo θ_2.

As leis que governam o fenômeno da refração são.

1ª Lei da Refração

O raio incidente (raio 1), o raio refratado (raio 2) e a reta normal ao ponto de incidência (reta tracejada) estão contidos no mesmo plano, que no caso do desenho acima e o plano da folha de papel.

2ª Lei da Refração - Lei de Snell

A 2ª lei da refração é utilizada para calcular o desvio de um raio de luz ao mudar de meio, e é expressa por:

$$n_1 . sen\theta_2 = n_2 . sen\theta_1 \qquad (3.3)$$

$$\frac{\boldsymbol{n_1}}{\boldsymbol{n_2}} = \frac{\boldsymbol{sen\theta_1}}{\boldsymbol{sen\theta_2}} \qquad (3.4)$$

no entanto, sabe-se que:

$$\frac{\boldsymbol{v_1}}{\boldsymbol{v_2}} = \frac{\boldsymbol{\lambda_{1f}}}{\boldsymbol{\lambda_{2f}}} = \frac{\boldsymbol{\lambda_1}}{\boldsymbol{\lambda_2}} \qquad (3.5)$$

e que:

$$\frac{\boldsymbol{v_1}}{\boldsymbol{v_2}} = \frac{\boldsymbol{n_2}}{\boldsymbol{n_1}} \qquad (3.6)$$

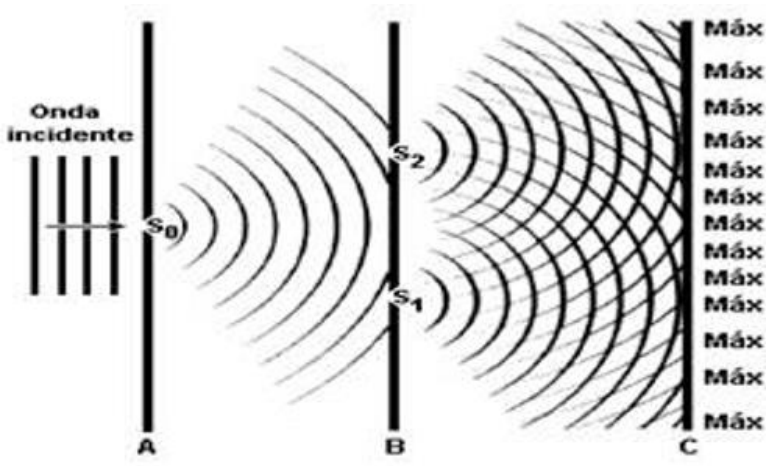
Ao agruparmos estas informações, chegamos a uma forma completa da Lei de Snell:

$$\frac{\mathbf{sen\theta_1}}{\mathbf{sen\theta_2}} = \frac{\mathbf{v_1}}{\mathbf{v_2}} = \frac{\boldsymbol{\lambda_1}}{\boldsymbol{\lambda_2}} = \frac{\mathbf{n_2}}{\mathbf{n_1}} \qquad (3.7)$$

3.5 DIFRAÇÃO DA LUZ

É o fenômeno que consiste de uma onda contornar um obstáculo. Por exemplo, ao produzir uma perturbação batendo com uma régua na superfície da água tranquila de um tanque, forma-se uma onda plana que, ao atingir uma barreira dotada de uma fenda, espalha-se em todas as direções a partir da fenda. A explicação da difração é dada pelo Princípio de Huygens: cada ponto da frente de onda que atravessa a fenda comporta-se como uma fonte de onda secundária como se observa na figura 3.5.

Figura 3.5: Frente de onda da luz.



Fonte: <https://www.ebah.com.br/content/ABAAAAmuwAH/redes-difracao>

O fenômeno da difração é bem aparente e nítido quando o comprimento da fenda ou do obstáculo da ordem de grandeza do comprimento de onda da onda incidente. O comprimento de onda da luz visível varia de $4{,}0 \times 10^{-7}$m, a $7{,}0 \times 10^{-7}$m, ou seja, de 400 a 700 nm (nanômetro), enquanto que o comprimento de onda do som no ar varia de 1,7 cm a 17 m.

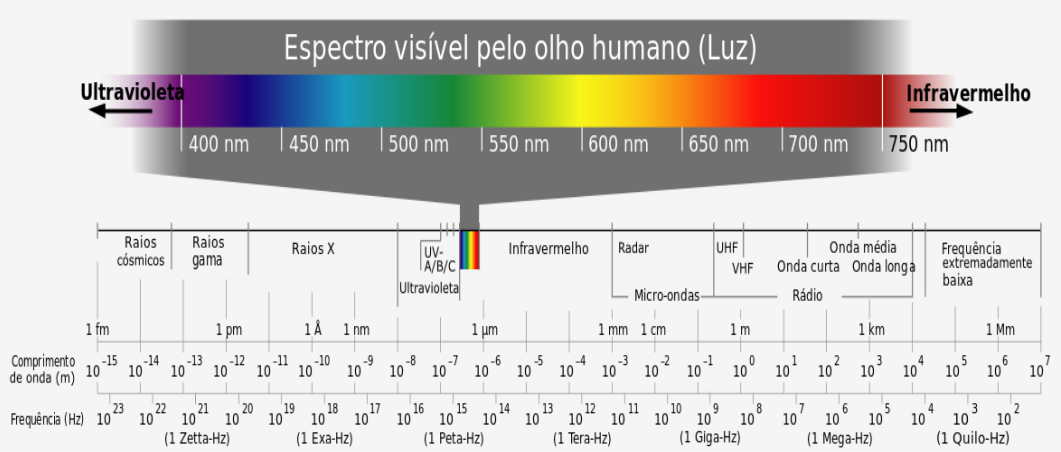
Por isso a difração da luz ocorre em obstáculos e fendas de dimensões muito pequenas, enquanto que a do som ocorre em obstáculos de tamanhos do nosso cotidiano.

3.6 A LUZ HOJE NA FÍSICA MODERNA

Sabe-se hoje que a luz é uma onda eletromagnética, tendo um campo elétrico e um campo magnético, fato demonstrado por James Clarck Maxwell. O que distingue uma forma de luz de outra é a *amplitude e a frequência*. A intensidade ou amplitude é responsável pelo brilho; quer dizer que quanto maior a sua intensidade maior será o seu brilho e a frequência está relacionada à sua cor.

A luz visível consiste na radiação eletromagnética cujo comprimento de onda está limitado entre 400 nm (nanômetro) e 700 nm (nanômetro), sendo que neste intervalo de comprimento de onda o humano é capaz de detectar este tipo de radiação.

Figura 3.6: Espectro da luz visível.



Fonte: disponível em <https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro_vis%C3%ADvel>

A emissão de luz visível depende essencialmente da movimentação dos elétrons contido nos átomos que compõe a fonte emissora de luz, onde os elétrons mudam de um nível de maior energia a outro menos energético e vice versa, para formar a radiação eletromagnética do *espectro* visível e invisível. O termo espectro é usado para representar a

intensidade ou amplitude dos componentes ondulatórios diferenciados em função da frequência (ou comprimento de onda).

A física moderna foi laureada por dois personagens muito importantes que a revolucionaram, trazendo ao mundo da física, respostas concretas e sólidas: Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947) e Albert Einstein (1879-1955). Einstein, com a teoria da relatividade, que vimos o quanto ela importante ela é a vida cotidiana. Ele foi agraciado com o prêmio Nobel de física em 10 de dezembro de 1922 por sua contribuição à física teórica na descoberta da lei do efeito fotoelétrico, que será trado mais adiante.

Por ser o fundador da mecânica quântica, Max Planck é considerado o pai da mecânica quântica e em 1918, recebeu o prêmio Nobel de física, por seu trabalho na teoria quântica, em seu estudo teórico sobre a radiação de corpo negro. Em sua pesquisa ele percebeu que um corpo negro absorve toda energia nele incidente e também emite toda energia na mesma proporção, que o tornaria uma fonte ideal de energia, radiante, perfeito emissor e absorvedor de energia.

Um corpo negro não existe na natureza, um modelo ideal de corpo negro seria as estrelas, como o Sol, que, por consequência, emite grande energia para aquecer o planeta Terra e os demais. Porém, a radiação emitida por um corpo negro só pôde ser calculada quando Planck introduziu uma constante que ele próprio a calculou, chamada de constante de Planck, representada pela letra h e que vale $6{,}62069.10^{-34}\ J.s$. Para obtê-la Planck formulou a hipótese que toda energia é irradiada e absorvida na forma de elementos discretos de energia, chamada *quanta*, que é o plural de *quantum*.

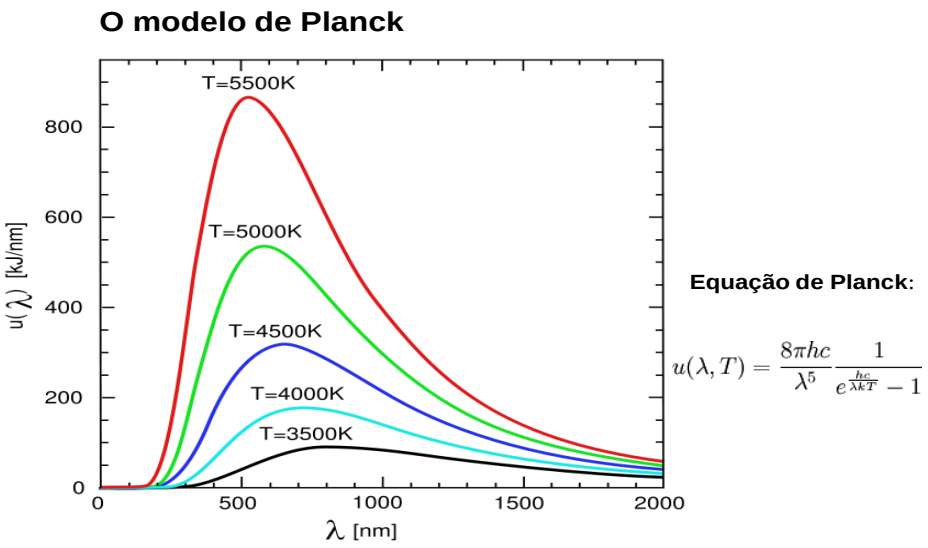
Embora a palavra quantum já fosse usada na literatura científica ao longo do século XVIII, foi a partir do trabalho de Max Planck sobre a radiação de corpo negro publicado em 1900 que o termo passou a ser largamente empregado na física. A partir de então, foi adotado o termo mecânica quântica. A palavra "quântica" vem do *Latim, quantum* que quer dizer quantidade. Segundo Planck, cada um desses quanta transporta energia que é proporcional a frequência da radiação eletromagnética emitida ou absorvida, isto é:

$$E = hf \qquad (3.8)$$

onde E é a energia do fóton, h a constante de Planck e f a frequência da onda eletromagnética.

3.7 MODELO DE PLANCK

Figura 3.7: Modelo de Planck.



Fonte: disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/359071/>

A partir da hipótese que a radiação eletromagnética é absorvida por um material em pacotes ou *quantum*, Planck obteve a relação que descreve a quantidade de energia emitida por um corpo negro cuja temperatura é *T*. Na figura 3.7 vemos a emissão de radiação por um corpo descrita pela fórmula de Planck e que concorda com os resultados obtidos experimentalmente.

3.8 QUANTIZAÇÃO DA ENERGIA

Em física moderna, uma grandeza é dita quantizada quando é possível encontrar um menor valor dessa grandeza e seus valores não podem ser contínuos. Por exemplo, quando um ferro de passar roupas é ligado à energia elétrica, a sua temperatura assume todos os valores intermediários sem deixar um sequer que não tenha passado desde a temperatura ambiente

inicial dele T_0, até a temperatura final T ideal para passar a roupa. Portanto o ferro foi aquecido continuamente e sua temperatura varia continuamente.

Enquanto que na quantização da energia, segundo Albert Einstein, a radiação eletromagnética é absorvida ou emitida em múltiplos da energia de 1 fóton cujo valor de energia depende da frequência.

Uma grandeza quantizada que está presente na vida cotidiana, é o dinheiro, já que o menor valor, no caso do real é a moeda de (R$ 0,01) centavo, sendo que os valores de todas as outras notas são obrigatoriamente múltiplos do centavo.

Outro exemplo: um elétron que orbita o núcleo do átomo de hidrogênio, cuja menor energia E -13,6 eV (eletro-volt). Por definição, um elétron volt é a quantidade de energia cinética ganha por um único elétron quando acelerado por uma diferença de potencial elétrico de um volt, no vácuo. Porém, se esse átomo de hidrogênio for aquecido, o elétron pode saltar para o nível de energia seguinte, -3,4 eV, mas nenhum valor intermediário entre estes dois valores.

3.9 QUANTIZAÇÃO DA CARGA DO ELÉTRON

Existem outras grandezas quantizadas na natureza, como a carga elétrica, visto que a carga de qualquer corpo é um múltiplo do número de elétrons a mais ou a menos que o corpo possui em relação ao número de prótons. O valor encontrado para a carga do elétron, em unidades do S.I., foi de $1{,}62.10^{-19}$ C. Esse valor foi encontrado por Robert Andrews Millikan (1868-1953).

O experimento que conseguiu medir a carga elementar do elétron seguiu uma série de experimentos que iniciou em 1907 e que culminou com um dos mais famosos experimentos da história da física. Em 1923 Millikan foi agraciado pelo prêmio Nobel.

A figura 3.8 mostra um esquema do aparato usado por Millikan. Trata-se de uma câmera fechada onde ele posicionou duas placas de metais que podiam ser carregadas eletricamente quando ligado a uma diferença de potencial ΔV externa. Na verdade, o aparato que ele criou é um capacitor com duas placas usando o ar como dielétrico.

Usando um vaporizador, uma nuvem de óleo era introduzida sobre a placa superior, fazendo com que apenas algumas gotículas passassem pelo orifício situado na primeira placa de metal, que caiam em direção a segunda por ação da gravidade.

Figura 3.8: Ilustração moderna do aparato para determinar a carga do elétron.

Fonte: <http://fisicaequantizacao.blogspot.com/2013/08/o-experimento-de-millinkan-e.html>

Desta maneira, entre as duas placas foi estabelecido um campo elétrico uniforme E cujo módulo é dado por $E = V_{AB}/d$, onde d é a distância entre as placas. Algumas gotículas passavam através do espaço da placa superior em direção a inferior, ficando sob ação de duas forças: seu próprio peso, mg, dirigindo para baixo, e a força elétrica $F = qE$, dirigindo para cima. Millikan fazia variar a voltagem V_{AB} até que a gotícula de óleo observada pela luneta ficasse em repouso entre as duas placas. Logo, o valor da força elétrica seria igual à força peso da gotícula.

$$qE = mg \quad \Rightarrow \quad q = \frac{\mathbf{mg}}{\mathbf{E}} \qquad (3.9)$$

Como a intensidade do campo elétrico podia ser calculada pela expressão $E = V_{AB}/d$ e como Millikan conhecia a massa m de cada gotícula de óleo, ele conseguiu obter o valor da carga q do elétron.

4 FÓTON

Após muitas pesquisas e estudo sobre a luz por grandes cientistas da era moderna, foi possível chegar à conclusão de que a luz é formada por minúsculas partículas elementares discretas, que já sabemos são chamadas fótons e possuem energia *hf*, sendo a partícula elementar mediadora de força eletromagnética. Toda radiação eletromagnética é quantizada em número de fótons, é a menor porção da radiação eletromagnética existente, não importa o comprimento de onda, energia ou momento.

Diferentemente das outras partículas, o fóton não possui massa intrínseca detectável, mas tem momento *p*. Os fótons estão sempre em movimento, movendo à velocidade *c* da luz, que varia de acordo com o meio de propagação. Em 1916 Einstein ampliou o conceito de quantum de luz (fóton) ao propor que um quantum de luz possui momento linear. Para um fóton de energia *hf*, o módulo do momento é dado por:

$$\boldsymbol{p} = \frac{\boldsymbol{hf}}{\boldsymbol{c}} = \frac{\boldsymbol{h}}{\boldsymbol{\lambda}} \quad , \qquad (4.1)$$

onde p é o momento, *h* é a constante de Planck (h = $6{,}62.10^{-34}$Js), c é a velocidade da luz ($3{,}0.10^{8}$ m/s) e λ é o comprimento de onda da luz.

Em alguns aspectos, um fóton atua como uma partícula sendo que a melhor e satisfatória explicação para esse fenômeno foi dada em 1905 por Albert Einstein, através do efeito fotoelétrico. Em outras ocasiões, um fóton se comporta como uma onda, tal como quando passa através de uma lente ótica ou por um prisma.

De acordo com a dualidade onda-partícula da mecânica quântica, que diz que os fótons ora se comportam como partículas, ora como ondas. É natural para um fóton apresentar ambos os aspectos, de acordo com as circunstâncias que se encontra. A dualidade onda-partícula foi enunciada pela primeira vez em 1924, pelo físico francês Louis Victor De Broglie (1892-1987) e colocou a seguinte questão: se uma onda comporta-se como partícula, porque não esperar que partículas comportem como onda também? A hipótese de De Broglie diz que a partícula que tem momento e está associada um comprimento de onda λ conforme as equações.

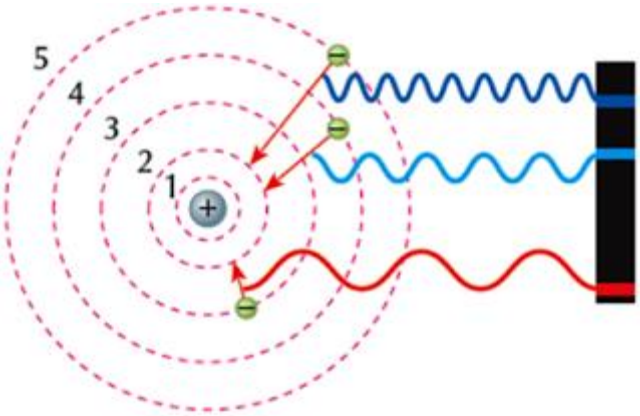
$$p = \frac{h}{\lambda} \Rrightarrow \quad \lambda = \frac{h}{p} \Rrightarrow \quad \lambda = \frac{h}{mv} \qquad (4.2)$$

onde p é o momento da partícula, h a constante de Planck $6.62069.10^{-34}\,J.s$ e λ o comprimento de onda.

4.1 NATUREZA DA LUZ

A luz é formada por um grande número de fótons, tendo a sua intensidade ou brilho ligada a essa grande quantidade de fótons, que é sua amplitude. O salto quântico do elétron no átomo de hidrogênio, por exemplo, é quando um elétron, muda sua órbita em torno do núcleo do átomo de hidrogênio, saltando de um nível de energia mais alto a um mais baixo, com a emissão de um fóton com energia E = *hv*, como mostra a figura 4.1.

Figura 4.2: átomo de hidrogênio segundo o modelo de Bohr.



Fonte: <https://www.slideshare.net/newtondasilva/aula-4-modelo-atmico-de-bohr>

Nesta figura, vemos que quando o elétron passa do nível 3 ao nível 2, emite um fóton na frequência correspondendo a cor vermelha, quando passa do nível 4 ao nível 2 emitem um fóton na frequência azul claro e do nível 5 ao nível 2 um fóton na frequência azul escuro.

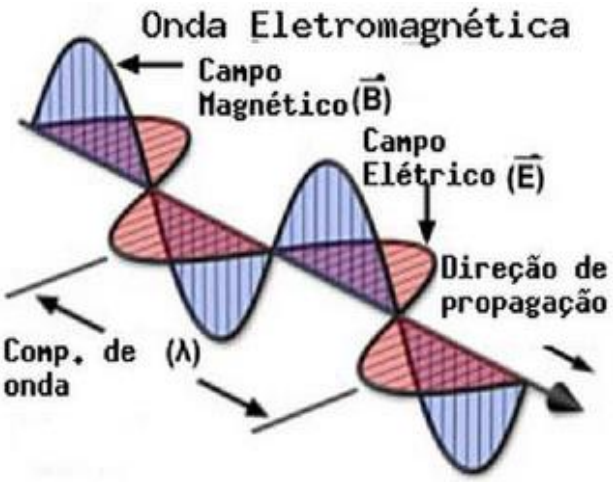
A descoberta do fóton foi uma das mais importantes que aconteceu na física moderna. Saber do que e como a luz é formada foi um passo mirabolante e produtivo para a ciência contemporânea. Isto permitiu a criação e a descoberta de muitas coisas.

4.2 ONDA ELETROMAGNÉTICA

Movimentando-se velozmente, com a velocidade da luz, a radiação liberada pelos átomos dá origem à onda eletromagnética, que é constituída de campos elétricos e magnéticos oscilantes, como mostra a figura 4.2. Graças à descoberta das propriedades dessas ondas é que hoje podemos ouvir músicas ou notícias nos rádios, ver TV, aquecer alimentos no aparelho de micro-ondas, falar ao celular, fazer uso da internet e mais uma infinidade de coisas do nosso cotidiano.

Podem ser classificadas as ondas eletromagnéticas em sete espectros principais: ondas de rádio, micro ondas, radiação infravermelho, radiação visível, radiação ultravioleta, raio x e radiação gama.

Figura 4.2: Onda eletromagnética.



Fonte: <https://www.raffcom.com.br/blog/som-e-criatividade/>0

As características das ondas eletromagnéticas são as seguintes:

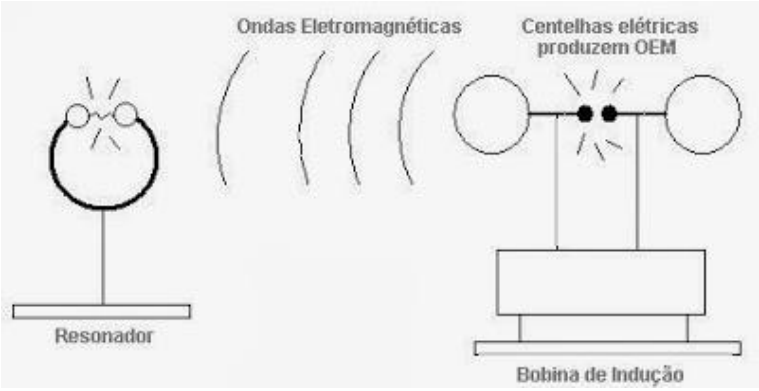
- São formadas pela combinação de campos elétricos e magnéticos variáveis;
- O campo elétrico e o campo magnético são perpendiculares;
- O campo elétrico e o magnético são perpendiculares à direção de propagação o que significa que são ondas transversais;
- A velocidade de propagação dessas ondas no vácuo é $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s;

- Ao propagar em meios materiais, a velocidade obtida é menor do que quando a propagação ocorre no vácuo.

O físico escocês James C. Maxwell (1831-1879) foi o primeiro físico a demonstrar que a oscilação de uma carga elétrica dá origem ao campo eletromagnético. Estes, por sua vez, dão origem ao campo elétrico, assim como a variação de fluxo de campos elétricos dão origem a campos magnéticos. Esta interação é responsável pelo surgimento das ondas eletromagnéticas.

Maxwell partiu das Leis de Ampère, Faraday e Coulomb para relacionar diversas equações que atualmente são conhecidas como equações de Maxwell. Essas equações permitiram que ele fizesse a previsão da existência das ondas eletromagnéticas. Maxwell veio a falecer antes de ver sua teoria confirmada, feita apenas alguns anos depois, pelo físico alemão Heinrich Hertz (1857-1894), que conseguiu obter ondas eletromagnéticas com todas as características descritas por Maxwell. O esquema do dispositivo criado por Heinrich Hertz para produzir ondas eletromagnéticas, comprovando o que Maxwell havia descoberto, está mostrado na figura 4.3.

Figura 4.3 Dispositivo para produzir onda eletromagnética



Fonte: <http://fisicaequantizacao.blogspot.com/2013/08/o-efeito-fotoeletrico-e-Quantização-da.html>

4.2.1 Associação da física clássica com a física moderna

Com o conhecimento da natureza das ondas eletromagnéticas foi possível o desenvolvimento de diversos campos da ciência e tecnologia e a criação de uma gama de produtos tecnológicos, na eletrônica e eletromagnetismo. A junção desses dois conhecimentos é uma verdadeira associação da física moderna com a física clássica para a produção de equipamentos hospitalares, como o aparelho de ressonância magnética (a ressonância magnética é física clássica, mas o processamento dos dados e a projeção das imagens em um monitor de led ou LCD é física moderna).

A radiação eletromagnética, na forma de raio x, é hoje muito empregada em diversos setores das indústrias no controle de qualidade de peças mecânica para a aviação, na visualização de possíveis trincas em soldas e rachaduras do material da qual as peças são feitas.

É usada também na medicina em muitas áreas da saúde, na ortopedia, odontologia, otorrinolaringologia e clínica geral no diagnóstico de doenças. Essa radiação é empregada também na oncologia no tratamento do câncer, pela radioterapia. A intensidade da radiação usada na radioterapia é dosada por um físico médico. A física medica é uma área da física moderna multidisciplinar que aplica os conceitos e as leis da física, trabalhando com os conceitos específicos da física, biologia e medicina.

Atuando junto à medicina, a física médica tem como atividade calcular a dosagem da radiação na dosimetria ideal para cada paciente que se submete ao tratamento de radioterapia, calibragem e manutenção dos equipamentos radioterápicos e raio X, de diagnóstico e tratamento. Na indústria de equipamentos hospitalar, o físico médico atua na melhoria dos aparelhos de diagnóstico e tratamento. A física médica tem como campo de atuação, principalmente, as áreas de radiologia diagnóstica, medicina nuclear, radioterapia, rádio cirurgia, proteção radiológica, metrologia das radiações e radiobiologia.

Atualmente, a comunicação é feita também por radiação eletromagnética via satélite e fibra ótica, proporciona um mundo globalizado em que as informações chegam a tempo real às pessoas que tem acesso a informação. Televisão e internet fazem parte do cotidiano de muitos que, por sua vez, não conseguem mais ficar sem um aparelho celular, por exemplo.

Nos veículos de comunicações são usados tecnologia de ponta, sendo que a física moderna aparece em quase todos os ramos. Assim, por exemplo, na eletrônica, no domínio

dos diversos circuitos que comporta uma infinidade de componentes eletrônicos ultramodernos, que vem sendo criado e produzido de uns 30 anos para cá. Hoje são produzidos na indústria eletrônica componentes nano tecnológico que atua numa escala atômica de 01 a 100 nanômetros (nm) como os *chips*, que são circuitos integrados que possuem minúsculos componentes eletrônicos que desempenha milhares de funções.

> A **nanotecnologia** é o estudo de manipulação da matéria numa escala atômica e molecular. Geralmente lida com estruturas com medidas entre 01 a 100 nanômetros em ao menos uma dimensão e incluí o desenvolvimento de materiais ou componentes e está associada a diversas áreas (como **a medicina, eletrônica, ciência da computação, física, química, biologia e engenharia dos materiais**) de pesquisa e produção na escala nano (escala atômica). O princípio básico da nanotecnologia é a construção de estruturas e novos materiais a partir dos átomos. É uma área promissora, mas que dá apenas seus primeiros passos, mostrando, contudo, resultados surpreendentes (na produção de semicondutores, nano compostos, Biomateriais, Chips, entre outros). Criada no Japão, a nanotecnologia busca inovar invenções, aprimorando-as e proporcionando uma melhor vida ao homem. Um dos instrumentos utilizados para exploração de materiais nessa escala é o microscópio de varredura (MEV) e o microscópio d varredura por tunelamento (STM), que permite a observação de átomos e moléculas ao nível atômico. O objetivo principal não é chegar a um controle preciso e individual dos átomos, mas elaborar estruturas estáveis com eles. Existe muito debate nas implicações futuras da nanotecnologia, pois os desafios são semelhantes aos de desenvolvimentos de novas tecnologias, incluindo questões sobre a toxidade e impactos ambientais dos nano materiais, e os efeitos potenciais na economia global, assim como a especulação sobre cenários apocalípticos, (doomsday scenarios). Essas questões levaram ao debate entre grupos e governos a respeito de uma regulação sobre nanotecnologia. **Richard p. Feynman** foi o precursor do conceito da Nanotecnologia, embora não tenha utilizado este termo em sua palestra para a Sociedade Americana de Física, em 29 de dezembro de 1959 onde apresentou pela primeira vez suas ideias acerca do assunto.

4.3 A IMPORTÂNCIA DO FÓTON À VIDA COTIDIANA

Quando acordamos pela manhã, as retinas dos nossos olhos são interceptadas por uma enorme quantidade de fótons, que estimula os milhões de cones e bastonetes fotossensíveis que compõe a retina, transformando-os em impulso elétrico-químico que, através do nervo óptico, são enviados ao cérebro, que os interpreta e transforma em imagens.

Nós sentimos a física em tudo que está a nossa volta, em qualquer lugar que estejamos. A física se faz presente em toda a tecnologia moderna. São muitas as aplicações, principalmente na eletrônica. Como exemplo, temos aparelho de celular touch screen,

computadores, notebook, televisor de plasma, LCD ou led (diodos que emite luz), forno de micro ondas, injeção eletrônica, etc.

A existência da luz, num contexto geral é de suma importância à vida de toda a espécie humana, animal e vegetal, pois transmite energia, agitando as moléculas de toda matéria existente, provocando o aquecimento e promovendo a vida, como nos vegetais, algas marinhas e em alguns tipos de bactérias que realizam a fotossíntese.

A fotossíntese é o processo pelo qual a matéria transforma-se de inorgânica para orgânica a partir do dióxido de carbono atmosférico e água, através da incidência de luz para síntese da glicose, que é a principal fonte de energia dos fotossintetizantes. É nas folhas que funcionam como fóton-sensor através da clorofila, que acontecem a quebra da molécula de água por fotólise da água, liberando o oxigênio para atmosfera e capturando o hidrogênio, que é usado como transportadores de nitrogênio do solo ao sistema das plantas.

Essa reação foi descrita por Robert Hill no ano de 1937. Esse autor não sabia qual substância era receptora do hidrogênio. Hoje se sabe que é o NADP (NAD + fosfato) NADP (nicotinamida - adenina - nicotinamida fosfato) responsável pela produção da glicose, que é a fonte de energia para o sistema dos vegetais e certos tipos de bactérias que dependem dos fótons para produzir seu próprio alimento.

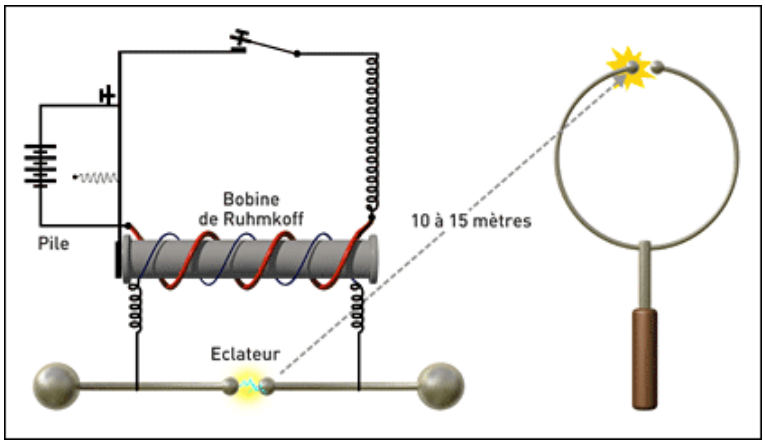
A incidência de fóton no nosso organismo pode causar vários efeitos indesejáveis: envelhecimento precoce e irritações desagradáveis da pele, inclusive o desenvolvimento de certos tipos de doenças na pele. Em contra partida os fótons estimulam a produção de vitamina D necessária ao nosso organismo, que podemos adquirir quando estamos expostos ao Sol. Esse processo pode ser realizado artificialmente no processo chamado de fototerapia. O equipamento usado para a fototerapia é muito simples, a base de radiação eletromagnética produzida por lâmpadas florescentes e lâmpadas alógenas.

5 EFEITO FOTOELÉTRICO

Investigando a natureza eletromagnética da luz, em que demonstrou a validade da teoria de Maxwell, enquanto estudava as centelhas (faíscas) produzidas entre dois eletrodos metálicos de um transmissor quando aplicava uma diferença de potencial; Heinrich Hertz (1857-1894), em 1887 observou que algo diferente saia da superfície de uma desses eletrodos, em forma de uma centelha (faísca) secundaria. Verificou também que a centelha inicial primária provocava o aparecimento de uma segunda centelha também no receptor ressonante.

Devido à dificuldade para observar este fenômeno, Hertz fez um cobertura para evitar a dispersão da luz e entre os eletrodos da antena do receptor e transmissor, colocou um anteparo, tirando a incidência da luz (predominantemente violeta e ultravioleta) proveniente da centelha primária dos eletrodos do emissor, e impediu qualquer interferência de luz externa. Isso ocasionou a diminuição das faíscas secundária fazendo com que Hertz constatar-se que a emissão da centelha não era de natureza eletrostática, pois não havia diferença se a proteção era de material condutor ou dielétrico. Uma ilustração moderna do dispositivo de Hertz pode ser vista na figura 5.1.

Figura 5.1: Dispositivo que Hertz descobriu efeito fotoelétrico.



Fonte: <hptt/t www.google.com.br imagem de Hertz efeito fotoelétrico>.

Hertz estava diante de um novo fenômeno da física, descobrindo assim o efeito fotoelétrico. Este fenômeno é também conhecido por efeito Hertz. Ele foi uma das primeiras evidências experimentais da quantização.

Hertz logo descobriu a razão pela qual a luz ultravioleta facilitava a descarga. Isto era devido à ejeção de elétron pela superfície metálica dos eletrodos, quando incidia nela luz ultravioleta. Os elétrons ejetados eram acelerados pela diferença de potencial entre os eletrodos, provocando assim a ionização do ar o que facilitava a descarga.

5.1 EFEITO FOTOELÉTRICO NA VISÃO DE LENARD

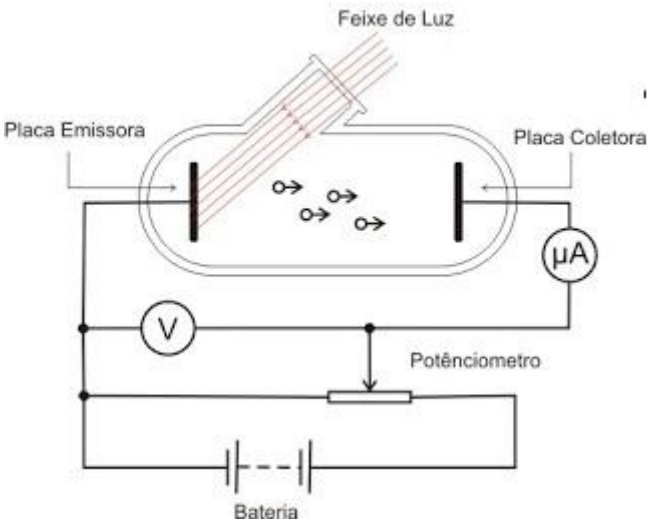
Posteriormente à descoberta do efeito fotoelétrico, outros físicos o investigaram como, Philip Lenard (1862-1947), foi consolidado pelo prêmio Nobel em 1905 pela investigação dos raios catódicos e de suas propriedades.

Para que o efeito fotoelétrico fosse reproduzido, Lenard desenvolveu um instrumento composto por uma ampola de quartzo (transparente a luz ultravioleta) com ar rarefeito (vácuo), para que não houvesse interferência no movimento dos elétrons.

A ampola continha dois eletrodos em seu interior, um catodo e o outro o anodo. E uma entrada de luz de frequência f projetada no catodo e uma bateria para estabelecer uma diferença de potencial ΔV. Lenard usou também um micro amperímetro para medir a intensidade de corrente I, e um potenciômetro para fazer variar a voltagem no anodo.

O esquema da figura 6.2 mostra como funcionava o experimento feito por Lenard. Quando havia a incidência de luz de frequência f e intensidade I no catodo e era estabelecida uma diferença de potencial ΔV entre os eletrodos, o micro amperímetro registrava uma corrente elétrica I passando do catodo para o anodo, mostrando que os elétrons estavam sendo arrancados da superfície do catodo devido à incidência da radiação eletromagnética da luz ultravioleta.

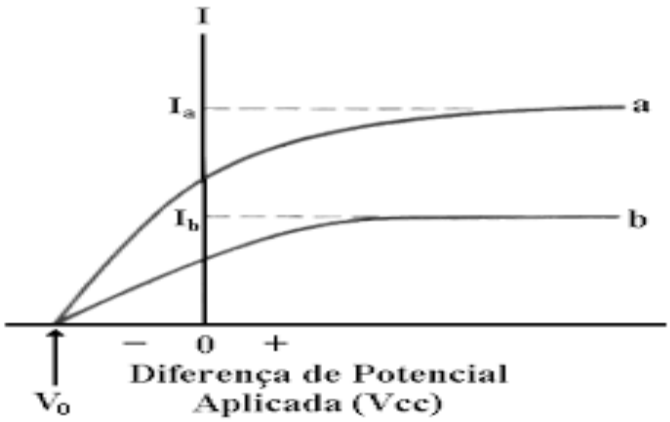
Figura 5.2: Aparato para testar o efeito fotoelétrico.



Fonte: <http://gihelilah.blogspot.com/2009/11/efeito-fotoeletrico_10.html>.

Em sua experiência, Lenard obteve resultados que iam contra os entendimentos clássicos. Assim, para I_0 fixo e um dado material do catodo, todos os elétrons ejetado pela luz são coletado pelo anodo quando a diferença de potencial ΔV é positiva, em que os elétrons são atraídos pelo anodo em função da deficiência de elétrons no anodo.

Figura 5.3: Potencial de corte do efeito foto elétrico.



Fonte: <https://www.ebah.com.br/content/ABAAAgR0cAH/projeto-efeito-fotoeletrico>.

Porém, se inverter a polaridade da voltagem da bateria, a corrente de elétron continua, mais perdendo intensidade. Sentido a repulsão do anodo agora negativo, os elétrons vão diminuído sua velocidade na direção do anodo à medida que o módulo de ΔV aumenta, até que se anula para ΔV = - V_0 (> 0), o chamado potencial de corte.

Se a intensidade for aumentada de I_0 para I_0', a curva da figura 5.3 permanece com o mesmo aspecto, apenas o número de elétron ejetado aumenta.

Agora se variarmos a frequência f da luz incidente aplicada em um catodo alcalino como potássio, em que é possível ocorrer o efeito fotoelétrico com luz visível, mesmo assim não se observa o efeito fotoelétrico para a luz infravermelha. Para a maioria dos metais, o efeito fotoelétrico ocorre além do ultravioleta. O potencial de corte varia para uma dada frequência luminosa aplicada ao catodo, quando troca-se a substância que o compõe.

Uma interpretação desse resultado é que a produção da corrente fotoelétrica deve resultar da energia que a luz incidente fornece aos elétrons do metal, que permite que estes se ejetem do catodo. Com isso, o catodo fica ionizado positivamente e passa a atrair os elétrons. E assim é necessário que a luz forneça energia grande o suficiente para vencer essa atração, segundo Lenard.

Os elétrons livres no interior do material do catodo podem provir de profundidades diferentes, e quando são arrancados devem ter direção, movimento e velocidade diferentes. Para que a energia cinética k = 1/2 $m_e\ v^2$ (m_e = a massa do elétron) de um elétron seja freado é necessário impor uma diferença de potencial retardadora (polaridade invertida) ΔV tal que eV = k, onde e é a carga elementar do elétron. Logo, o potencial de frenagem deve estar associado a elétrons com direção perpendicular ao catodo e com energia cinética máxima k_m = $\frac{1}{2}\ m_e\ v_m^2$.

$$\boldsymbol{\frac{1}{2}\ m_e\ v_m^2} = \boldsymbol{eV_F} \qquad (5.1)$$

onde m_e é a massa do elétron, v a velocidade do elétron, e é a carga elementar do elétron, V_F é a voltagem de frenagem.

Pela conservação de energia, a energia cinética máxima k_m do elétron deve corresponder à energia E do fóton fornecida pela radiação luz menos o trabalho necessário para arrancar um elétron da superfície, vencendo a força de atração do catodo.

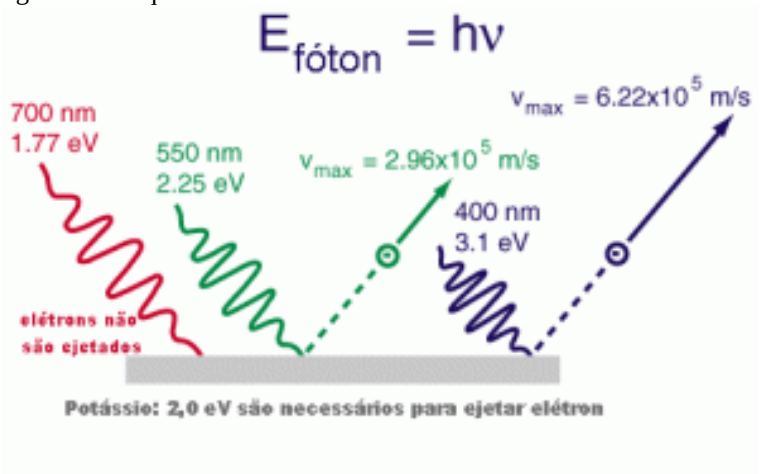
5.2 EXPLICAÇÃO SOBRE O EFEITO FOTOELÉTRICO POR EINSTEIN

Em 1905 Einstein propôs uma explicação do efeito fotoelétrico num trabalho intitulado "Um ponto de vista heurístico sobre a produção e transformação da luz" que reproduzia os resultados experimentais do efeito fotoelétrico, numa extensão mais audaciosa da hipótese do seu amigo Planck, introduzida no ano de 1900, a quantização da energia da radiação eletromagnética de frequência *f*, que consiste em *quanta* de energia.

$$E = hf \tag{5.2}$$

A base de sua teoria é de que a energia da luz estaria concentrada em ***pacotes*** de energias *hf*, onde *h* é a constante de Planck e *f* a frequência da radiação, chamados fótons. Ele propôs também que quando um fóton interage com a matéria, comporta-se como partícula, cedendo toda sua energia a um único elétron individual.

Figura 5.4: Esquema da colisão de foto com elétron.



Fonte: <https://sites.ifi.unicamp.br/lfmoderna/conteudos/efeito-fotoeletrico/>

A figura 5.4 ilustra a radiação de três comprimentos de onda diferentes incidindo sobre uma chapa de potássio e a velocidade máxima do fotoelétron ejetado. Einstein sugeriu que a energia máxima E_{max} do fotoelétron não depende da intensidade da luz incidente e que a energia de cada fóton é transferida na forma de energia cinética para o elétron, que gasta uma

parte desta energia para sair do material, chamada de função trabalho *w*, resultando na seguinte equação para o efeito fotoelétrico:

$$\boldsymbol{k_e} = \boldsymbol{hv_F} - \mathrm{w}, \qquad (5.3)$$

onde k_e é a energia cinética do elétron, hf_F é a energia do fóton e w é a função trabalho do material.

Observa-se, que a intensidade da luz é proporcional à energia total que transporta, e conseguinte ao número de fótons. Pois o número de fótons por segundo será dado pelo quociente da energia total pela a energia de cada fóton, o que explica porque a corrente fotoelétrica i depende da intensidade.

A teoria de Einstein também permite entender porque não se observa qualquer atraso no estabelecimento da corrente em relação ao começo da iluminação. Mesmo se a intensidade da radiação for muito baixa, tão logo a iluminação for iniciada, haverá fótons alcançando o material. Já que apenas um fóton é necessário para produzir o efeito, a corrente será estabelecida imediatamente. Apenas o seu valor será pequeno.

Classicamente não se entendia porque, quando trocava o material do catodo, a frequência de corte mudava. Segundo Einstein, cada material tem uma função trabalho próprio, e cada elétron necessita de uma energia específica de cada fóton para ser ejetado para fora da superfície. A energia do foto *hf* é dependente da frequência da qual ele foi emitido. Esse é motivo do qual quando troca-se o metal do anodo, a frequência f_0 de corte muda seu valor.

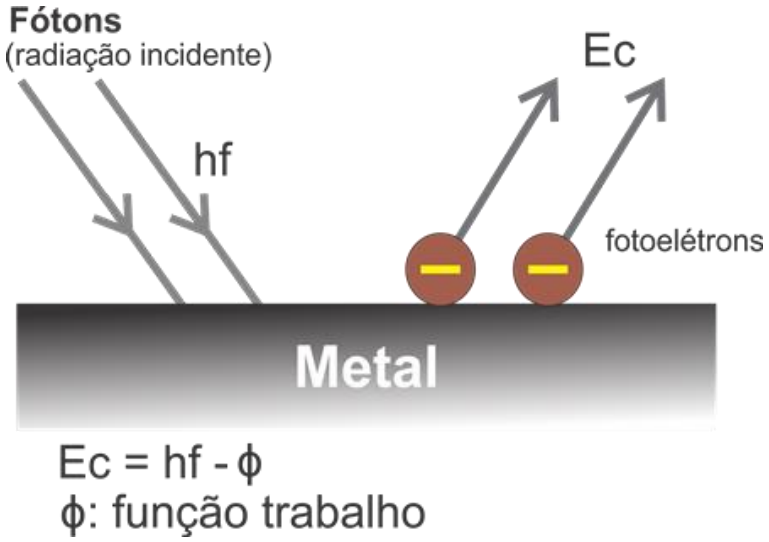
5.3 COMO FUNCIONA DE FATO O EFEITO FOTOELÉTRICO

Para que o efeito fotoelétrico ocorra, é necessário que haja incidência de luz de frequência *f* suficientemente grande em uma superfície preferivelmente metálica que possui elétrons livres, que são ejetados mais facilmente.

Ao incidir a radiação da luz no material, uma enorme quantidade de fótons atinge a superfície metálica, que acabam por colidir com os elétrons. Segundo Einstein, o fóton transfere toda sua energia a um único elétron. Para que ele seja ejetado do metal, é necessário

que o fóton incidente tenha energia suficientemente grande para vencer a função trabalho do material. Se a energia do fóton *hf* for igual a da função trabalho o elétron apena será arrancado do metal sem ganho de energia cinética.

Figura 5.5: Função trabalho.

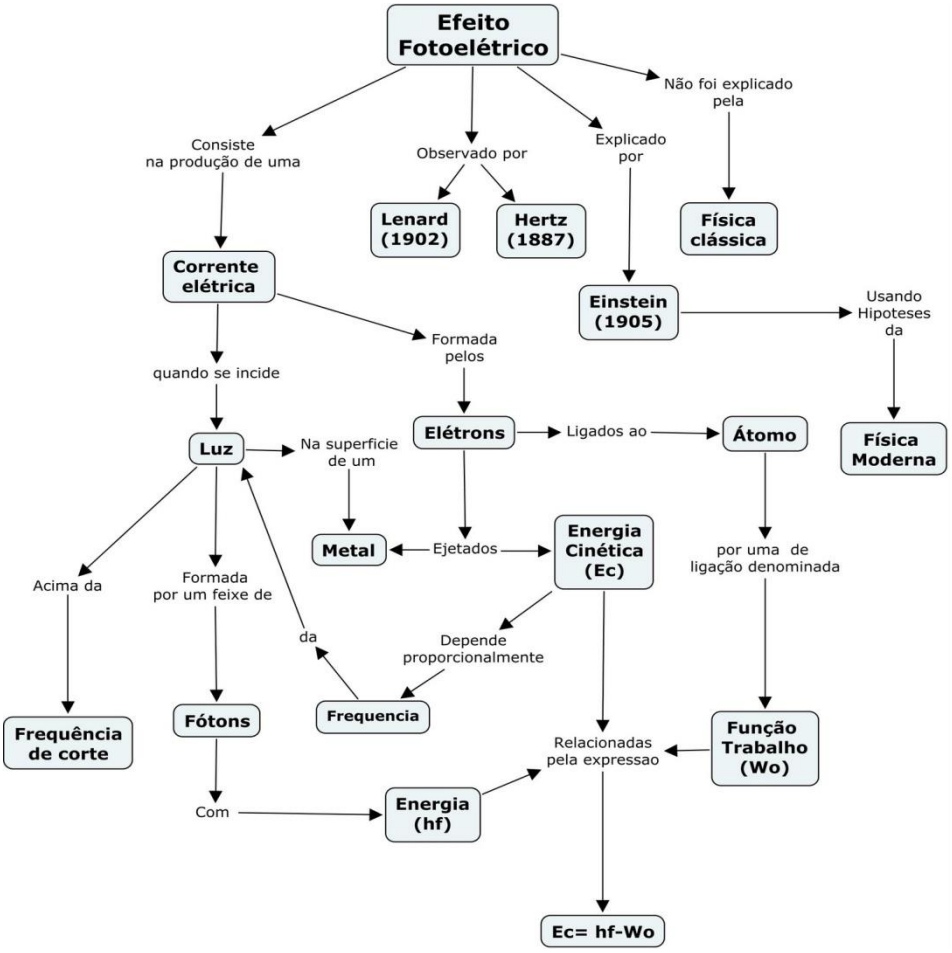


Fonte:<http://osfundamentosdafisica.blogspot.com/2017/11/cursos-do-blog-eletricidade_15.html>

A luz de cor vermelha, por ter baixa frequência, não tem energia suficiente para arrancar elétron do metal. Porém, se a radiação da luz monocromática e de cor azul, com menor comprimento de onda λ e com fótons com maior energia incidir em um metal, arrancará elétrons.

A corrente fotoelétrica aparece quase que instantaneamente quando incide a radiação no metal e permanece continuamente enquanto houver radiação incidente. Quanto maior a intensidade da radiação eletromagnética maior será a quantidade de elétrons ejetados para fora do metal. A rapidez dos elétrons ejetados para fora do metal depende de quão grande é a energia do fóton que vir a colidir nela, ou seja, quanto maior a energia do fóton incidente maior será a energia cinética do elétron ejetado, como está esquematizado no fluxograma mostrado na figura 5.6.

Figura 5.6: Fluxograma do efeito fotoelétrico.



Fonte: <https://www.google.com.br/search> figuras do efeito fotoelétrico.

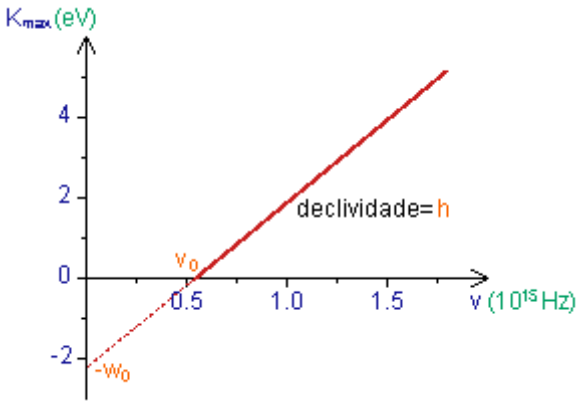
5.4 COMPROVAÇÃO DO EFEITO FOTOELÉTRICO POR MILLIKAN

Muitos físicos criticaram a explicação de Einstein e a teoria corpuscular da luz, inclusive o físico americano Robert Andrews Millikan, que passou dez anos de sua vida fazendo uma série de experiências com o objetivo de demonstrar que a predição de Einstein era incorreta. Os resultados nas palavras do próprio Millikan: "Contra todas as minhas expectativas, vi-me obrigado (em 1915) a afirmar sua completa verificação experimental, embora nada tivesse de razoável, uma vez que parecia violar tudo o que conhecíamos sobre a interferência da luz".

Vê-se que a teoria de Einstein prevê uma simples dependência linear para a variação da energia cinética máxima com a frequência. Como já mencionado, as observações de Lenard não tinham permitido a determinação desta função.

Foi apenas em 1914 que Millikan conseguiu confirmar experimentalmente a teoria de Einstein, apresentando a comunidade científica que a teoria de Einstein estava realmente correta. A figura 5.7 abaixo ilustra o caso do efeito fotoelétrico sobre um catodo de sódio. Repare que a análise do gráfico da variação de E_{max} em função de f permite a determinação da *função trabalho* do material considerado e fornece uma determinação da constante de Planck. Millikan obteve um valor de $6{,}57.10^{-34}$Js, que é muito próximo do valor aceito atualmente.

Figura 5.7: Imagem do gráfico do potencial de corte, efeito fotoelétrico.



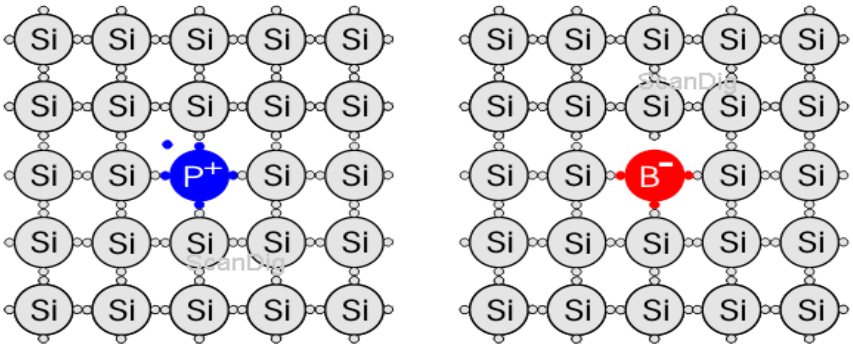
Fonte: <https://www.if.ufrgs.br/~betz/iq_XX_A/fotoElec/aFotoElecFrame.htm>

6 SEMICONDUTORES

Semicondutores, usados em eletrônica na fabricação de transistores, diodos, CEIs, leds, etc., são construídos com materiais cristalinos, como silício, germânio e gálio. Normalmente, os semicondutores não conduzem a corrente elétrica. Para isto ocorrer é necessário que ele passe por um processo chamado dopagem, onde se adiciona ao silício, por exemplo, uma pequena quantidade de certos materiais como alumínio, fósforo, bário, antimônio ou arsênico.

Os materiais usados na dopagem podem ser doadores ou receptores de elétrons, caso tenham mais ou menos elétrons na última camada que o silício, como mostra a figura 6.1.

Figura 6.1: Processo de dopagem de material.



Fonte: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-13-Ilustracao-do-processo-de-dopagem-do- silicio_fig8_303369695>.

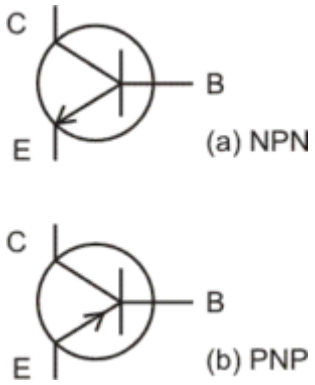
- Percebe-se que, na amostra da esquerda, a dopagem do silício foi feita com átomos de fósforo P^{+}, que libera um elétron na banda de valência do silício.
- Na amostra do lado direito o silício foi dopado com um átomo de bário B^{-}, deixando uma lacuna (falta de um elétron) na banda de valência do átomo do silício.

6.1 TRANSISTOR

O transistor foi inventado nos Laboratórios da Bell Telephone por John Bardeen e Whalter Houser Brattain em 1947 e foi demonstrado em 23 de dezembro de 1948, por John Bardeen, Walter Houser Brattain e Willian Bradford Shockley, que foram laureados com o Nobel de física em 1956.

Os transistores são componentes eletrônicos construídos a base de silício cristalino dopado e se dividem em dois grupos: NPN, que permite um fluxo de corrente negativa e o PNP, que permite um fluxo de corrente positiva, como mostrado na figura 6.2.

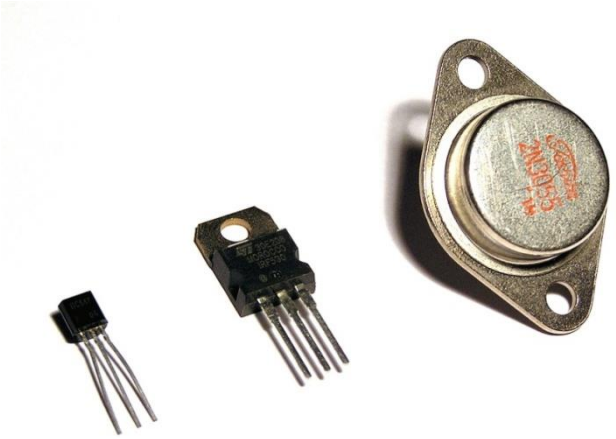
Figura 6.2: Tipos de transistor npn e pnp.



Fonte: <https//pt.wikipedia.org/wiki/Transistor>.

O transistor é utilizado em vários setores devido a suas múltiplas funções como, por exemplo, amplificação de som, interruptor, controlador de velocidades de motores elétricos, regulador de tensão elétrica, controlador de intensidade da luz de lâmpadas alógenas, inversor de frequências e também como célula solar transformando radiação luminosa em energia elétrica. É um caso específico do transistor 2n3055. A figura 6.3 mostra três tipos comuns de transistor.

Figura 0.3: Três modelos de transistor e com a mesma função.



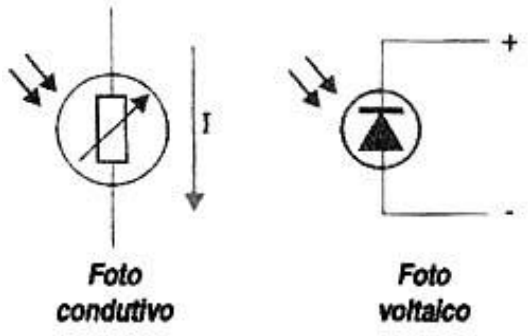
Fonte: <http://blog.novaeletronica.com.br>

7 SENSOR FOTOELÉTRICO E APLICAÇÕES

Um sensor fotoelétrico é um transdutor quando ele converte a energia luminosa em energia elétrica, como é o caso da fotocélula que converte diretamente a luz em energia elétrica.

Há sensores que convertem a luz em variação de uma grandeza elétrica como: intensidade de corrente ou resistência, que são os LDRs e os fotodiodos. Como na figura 7.1, temos a simbologia dos dois casos.

Figura 7.1: Sensores foto condutivo e fotovoltaico.

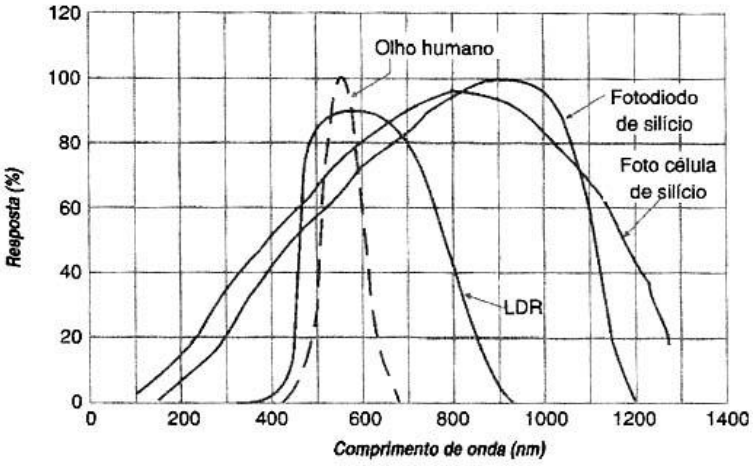


Fonte: <https/www.imagemsensorfotovoltaico.com>

As principais características dos sensores fotoelétricos são:

- Sensibilidade: é o modo com que a grandeza elétrica varia com a intensidade da luz incidente. Na prática, a maioria dos sensores são extremamente sensíveis, no sentido de que basta apenas um fóton para que possa haver uma variação da grandeza associada.
- Resposta espectral: a maioria dos sensores pode ver bem mais além que o olho humano. Em outras palavras, os sensores podem perceber tanto a luz visível quanto à luz invisível ao olho humano, como é mostrado na figura 7.2.

Figura 7.2: Gráfico da resposta da sensibilidade espectral sensores.



Fonte: <https/www.imagemrespostaespectral.com>

- Velocidade: a resposta dos sensores fotoelétricos ou fotovoltaicos acontece com grande rapidez, num espaço de tempo que vai desde a incidência ou sombra da radiação até a variação das grandezas elétricas que o envolve. Como exemplo, a rapidez do leitor de código de barra, controle de velocidade de Máquina, links por fibra óptica com uma resposta muito rápida.

7.1 FOTODIODO

O princípio de funcionamento dos fotodiodos é simples de entender: o fotodiodo é um dispositivo de junção PN. Quando há incidência da luz visível ou invisível ao olho, os fótons colidem com os elétrons da superfície de silício dopado do fotodiodo, ejetando-os da banda de valência para banda de condução, formando uma corrente elétrica nos terminais do fotodiodo por efeito fotovoltaico.

De outra forma, com a aplicação de um potencial positivo no catodo e negativo ao anodo, que é reverso ao diodo tradicional, o potencial positivo aplicado deixa lacunas na região da junção N, enquanto que o potencial negativo aplicado ao anodo deixa elétrons livres na região da junção p, que quando incidido por luz ou sombra forma uma corrente fotoelétrica condutiva nos terminais do dispositivo. Eles são usados em circuito tanto no modo condutivo ou no modo fotovoltaico.

- O condutivo; quando há incidência de luz ele apena permite a condução de corrente elétrica entre seus terminais.
- O fotovoltaico; libera carga elétrica quando incidido pela luz formando uma diferença de potencial entre os terminais

7.2 LDR

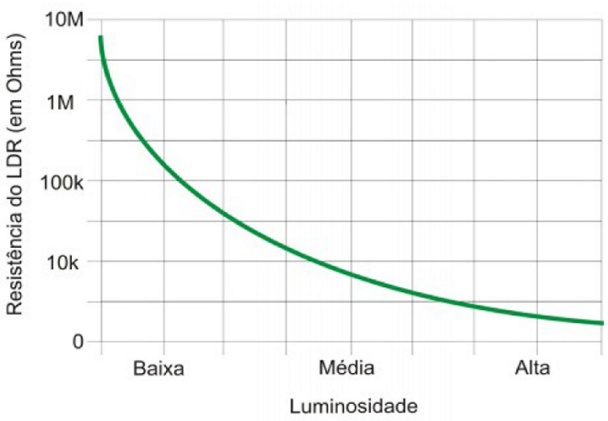
O LDR ou light dependent resistor (resistor dependente da luz) é um sensor fotoelétrico a base de sulfeto de cádmio, que é um metal de transição, cuja estrutura atômica sofre modificação com a incidência de luz. As colisões inelásticas dos fótons com os elétrons da rede cristalina do sulfeto de cádmio modificam sua resistividade, o que modifica a corrente que passa por ele. No escuro total sua resistência chega mais de um MΩ. E na luz natural solar a resistência cai para algumas dezenas de homs, permitindo a passagem de maior corrente elétrica.

Figura 7.3: Sensor LDR.

Fonte: <https://www.electronicaembajadores.com/PT/Productos/Detalle /SSLDR34/sensores>

O LDR também é um sensor bidirecional que pode operar diretamente em circuito, inclusive de corrente alternada. Sua resistividade não varia linearmente com a intensidade da luz, como mostra a figura 7.4.

Figura 7.4: Curva característica do LDR.



Fonte: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-Curva-caracteristica-do- LDR>

8 EXPERIMENTOS COM O EFEITO FOTOELÉTRICO

8.1 EXPERIMENTO 1

O objetivo desse experimento é montar uma célula solar com transistor, capaz de transformar a energia da luz visível em energia elétrica, usando material eletrônico danificado, exposto a luz solar. O experimento consiste na associação em série e paralelo de transistores 2N3055, que são protegidos por um invólucro de metal, fixados em uma placa de PVC ou madeira. Os transistores por sua vez são produzidos com material semicondutor a base de silício, que ao ser submetido à incidência de luz, passa converter a energia luminosa em energia elétrica.

8.1.1 Material usado no experimento.

- 01 placa de PVC
- 08 réguas de madeira
- 18 transistores de referencia 2n3055.
- 02 parafusos, bornes positivo e negativo
- 1,5 metros de fio 0,8 milímetro de diâmetro

8.1.2 Montagem do experimento.

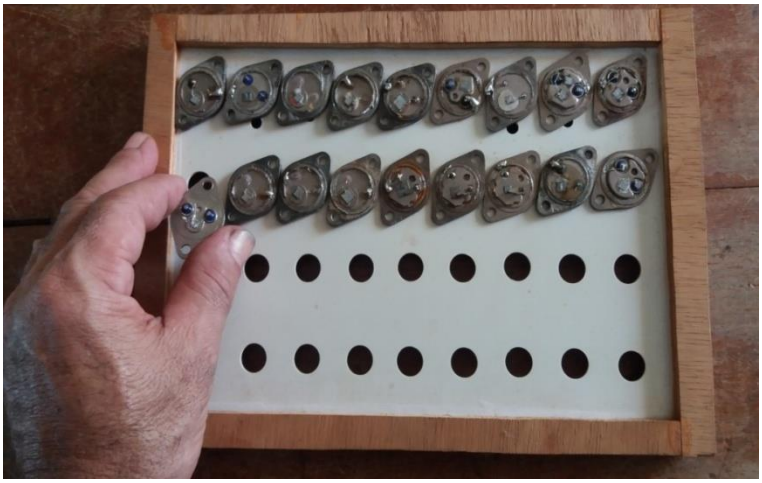
Inicialmente é necessário fazer a aquisição dos transistores de referência 2N3055 cujo modelo é mostrado na figura 8.2.

Em seguida adota-se o seguinte procedimento.

- Cuidadosamente, para não danificar as ligações internas, remove-se a tampa metálica do transistor com auxílio de uma serra, para que a parte interna possa ficar exposta à luz.

- Na placa de PVC, deve-se fazer a demarcação para a furação, de acordo com as dimensões do transistor, furar usando uma furadeira ou qualquer outro tipo de material cortante e fixar os transistores como mostra a figura 8.1.

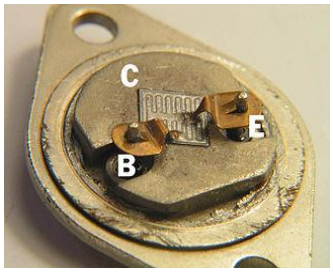
Figura 8.1: montagem de placa solar com transistor 2n3055.



Fonte: o autor.

A fixação dos transistores pode ser feita através de cola ou parafusos. Usando o esquema elétrico da figura 8.2, foi feito as ligações dos transistores e bornes.

Figura 8.2: Transistor 2n3055 aberto.

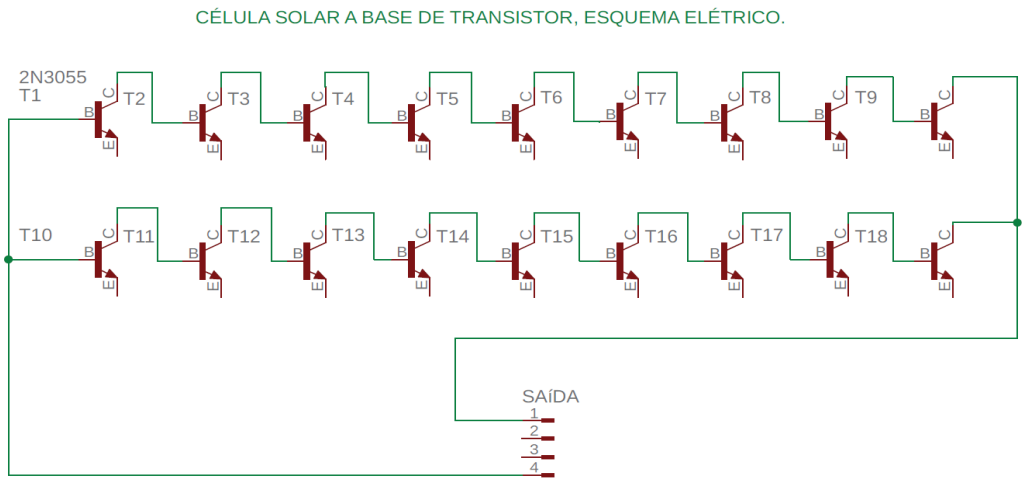


Fonte: <http://blog.novaeletronica.com.b>

Devido à área do silício do transistor ser muito pequena como mostra a figura 8.2, uma célula solar feito à base de transistor tem utilidade mais didática e experimental do que

prática. Pois, para gerar uma potência de 15 watts, que é o suficiente apenas para acender uma lâmpada fluorescente compacta, seria preciso milhares de transistor 2n3055 para isso.

Figura 8.3: Esquema elétrico feito no Eagle (Soft para desenhos e projetos eletrônico).

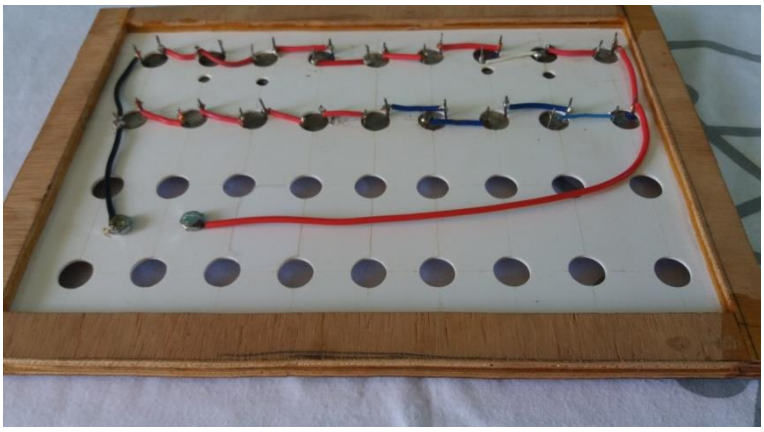


Fonte: o autor.

Observando o esquema é possível visualizar que os transistores T1 ao T9 estão ligados em série: o coletor do T1 está conectado a base do T2 e assim sucessivamente. Quanto maior for a quantidade de transistor ligado em série maior será a voltagem de saída. A intensidade da corrente elétrica produzida em cada transistor pelo efeito fotovoltaico é de algumas dezenas de microampères.

Para ter um fluxo maior de corrente elétrica nos bornes de saída é preciso que as ligações sejam feitas em paralelo, entre cada grupo de transistor que estão ligados em série do T1 ao T9 e do T10 ao T18, com mostra no esquema, o grupo de T1 ao T9 estão ligados em paralelos com o grupo de T10 ao T18, a base do transistor T1 está conectado com a base do transistor T10, e o coleto do T9 está conectado com o coletor do T18.

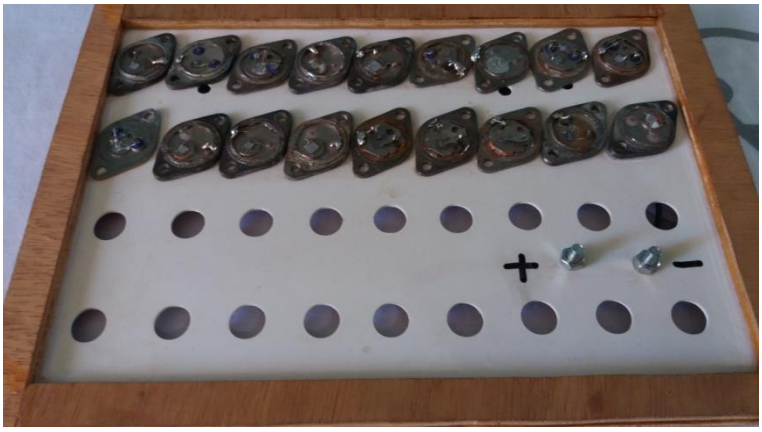
Figura 8.4: Lado de trás da placa mostrando as ligações.



Fonte: o autor.

As ligações foram feitas nos transistores 2n3055 de acordo com o esquema elétrico mostrado na figura 8.3.

Figura 8.5: Placa solar montada.



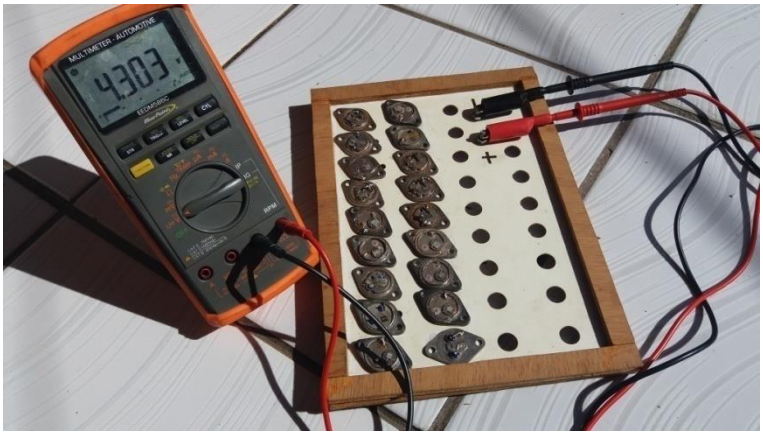
Fonte: o autor.

A placa está pronta.

8.1.3 Procedimento experimental

Quando a placa é submetida à incidência de luz, logo aparece uma diferença de potencial entre os terminais positivo e negativo de saída da placa solar. Com os dados coletados da placa como tensão elétrica, intensidade de corrente elétrica, frequência da luz visível e comprimento de onda da luz, é possível se calcular a energia do fotoelétron, a quantidade de fotoelétron emitido por unidade de tempo e a função trabalho do material.

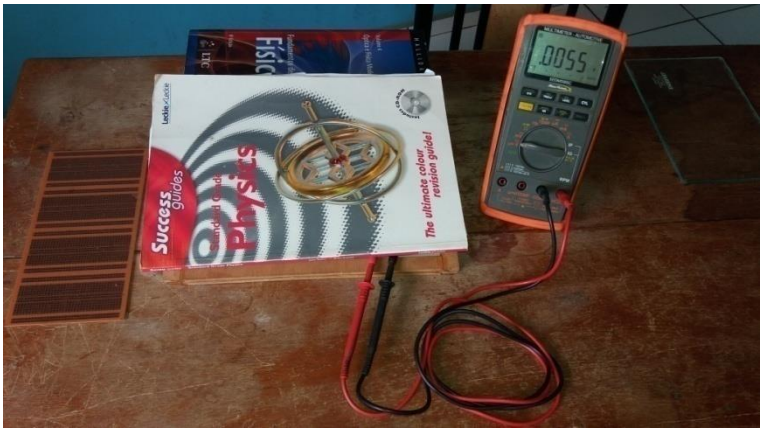
Figura 8.6: A placa solar exposta a luz.



Fonte: própria.

A figura 8.6 a cima mostra que a leitura do multímetro é de 4,3 volts quando a placa está exposta a luz solar. Os fótons da luz visível transferem toda sua energia ao elétron do silício dopado do transistor por colisão inelástica, movendo-os da camada de valência para a camada de condução, promovendo uma diferença de potencial entre os terminais anodo e catodo de cada transistor, produzindo uma corrente fotovoltaica.

Figura 8.7: Placa coberta sem a incidência de luz.



Fonte: própria.

Nesta figura 8.7 a placa está coberta e o multímetro mostra aproximadamente zero volt. A cobertura, (capa do livro) está disposta paralelamente a placa de silício de cada transistor, impedido a entrada de fóton de forma direta ou por reflexão.

A energia de um único fóton é dada pela equação:

$$\boldsymbol{E = hf} \tag{8.1}$$

A energia do fóton será igual ou maior que a função trabalho mais a energia cinética, para que o elétron seja ejetado. O valor da função trabalho depende do material incidido pela radiação.

$$\boldsymbol{hv = w + \frac{mv^2}{2}} \tag{8.2}$$

$$\boldsymbol{E_C = \frac{mv^2}{2}} \tag{8.3}$$

A energia necessária Para levar a carga de um potencial a outro é definido como o trabalho *w*.

$$\mathbf{\Delta V = \frac{W}{q}} \tag{8.4}$$

$$\boldsymbol{w = \Delta Vq} \tag{8.5}$$

O trabalho também e a variação da energia cinética.

$$\boldsymbol{w} = \boldsymbol{E_{cf}} - \boldsymbol{E_{ci}} \tag{8.6}$$

Substituindo a equação 8.5 na equação 8.6.

$$\Delta \boldsymbol{Vq} = \boldsymbol{E_{cf}} - \boldsymbol{E_{ci}} \tag{8.7}$$

Como a energia inicial é zero.

$$\Delta \boldsymbol{Vq} = \boldsymbol{E_{cf}} \tag{8.8}$$

Substituindo a equação 8.8 na equação 8.1

$$\boldsymbol{eV_c} = \boldsymbol{hv} - \boldsymbol{w} \tag{8.9}$$

Com a dedução das equações do efeito fotoelétrico é possível calcular a energia do fóton, a energia cinética do elétron, a função trabalho e a frequência da luz incidente.

Para calcular a quantidade de fotoelétrons que há numa determinada corrente fotoelétrica é necessário que conheçamos o valor da corrente fotoelétrica produzida por uma fonte geradora de energia elétrica solar.

Se cada fotoelétron é ejetado por um fóton, então a razão da corrente fotoelétrica I pela carga do elétron resulta no número de fóton:

$$n_f = \frac{A}{e} \tag{8.10}$$

onde *e* é a carga do elétron.

8.2 EXPERIMENTO 2

O experimento consiste em montar um circuito eletrônico muito simples, com poucos componentes eletrônicos, na qual o LDR funciona como um sensor variando sua resistência com a presença ou ausência de luz, em que excita um transistor para acionar o led.

8.2.1 Material usado no experimento

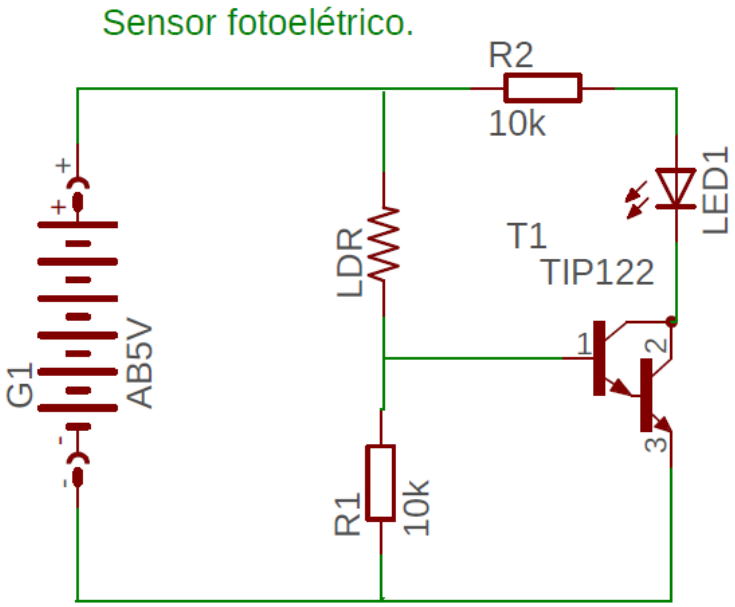
Foram poucos componentes eletrônicos necessários para a realização do experimento, que o tornou simples e de baixo custo.

- 01 matriz de contato elétrico
- 01 LDR (resistor dependente de luz)
- 01 transistor de referência TIP 122
- 02 resistores 10 kΩ (homs)
- 01 led de cor azul 3 mm
- 01 carregado de celular (usado)

8.2.2 Montagem do experimento

Os componentes eletrônicos são montados em uma matriz de contatos, facilitando o manuseio e conexão dos bornes das peças eletrônica, que poderá ser feita em sala de aula do ensino médio, sem que se tenha a necessidade de ir ao laboratório. O esquema eletrônico é mostrado na figura 8.8.

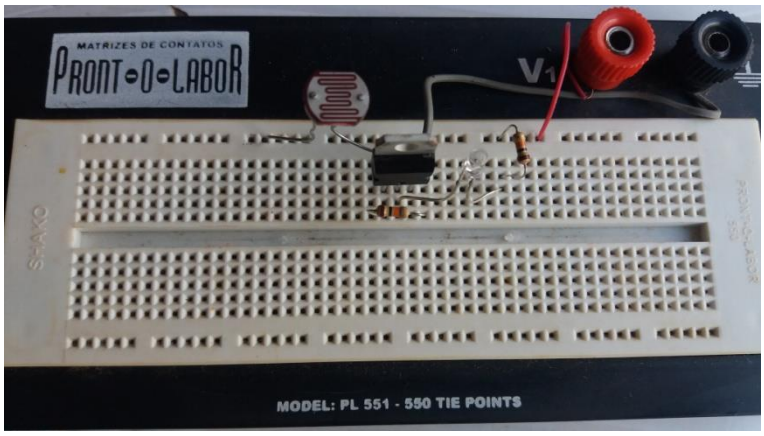
Figura 8.8: Esquema eletrônico do experimento, feito no Soft Eagle.



Fonte: o autor.

O circuito eletrônico da figura 8.8 é alimentado com um carregador de celular de 5V (volts).

Figura 8.9: Matriz de contato eletroeletrônico.



Fonte: própria.

Os componentes eletrônicos foram montados na matriz de contatos da figura 8.9 de acordo com o esquema eletrônico mostrado na figura 8.8.

8.2.3 Procedimento experimental

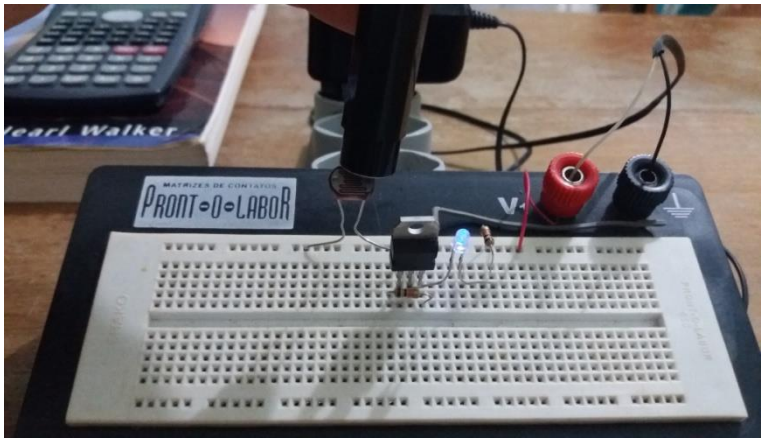
Ao conectar os fios de cor branca (positivo) e de cor preta (negativo) da fonte à matriz de contato, com o LDR exposto a luz natural ou artificial, o led logo acende. Os fótons que atingem o LDR e arrancam elétrons, deixando-os livre e fazem sua resistência diminuir, permitindo um fluxo de corrente elétrica.

Figura 8.10: Matriz de contato com a fonte instalada o LDR exposto à luz e o led aceso.

Fonte: própria.

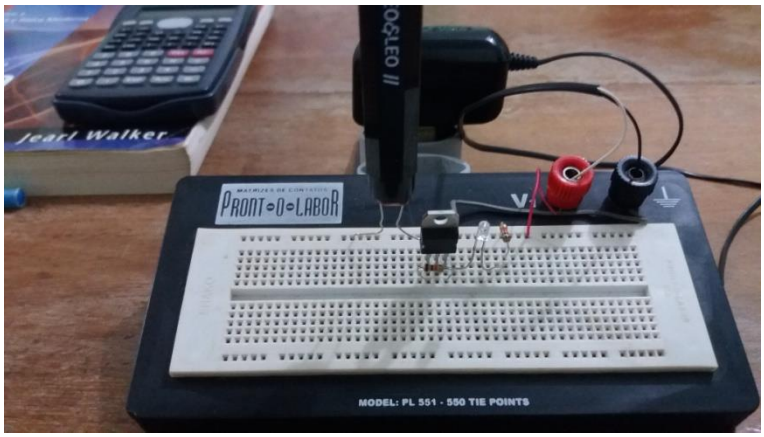
Com a incidência de luz artificial (experimento feito à noite) no LDR, o led de cor azul acende como mostra a figura 8.10 Se diminuir a intensidade da luz incidente no LDR na figura 8.11, a luz do led também diminui, pois sua resistência aumenta.

Figura 8.11: Matriz de contato com a fonte conectada e incidência parcial de luz ao LDR.



Fonte: própria.

Figura 8.12: Matriz de contato conectado a fonte com o LDR sem incidência de luz.



Fonte: própria.

Já na figura 8.12 há ausência total de luz no LDR e sua resistência se eleva a dezenas de MΩ (mega ohms). Portanto, o led permanece apagado. Esse experimento mostra perfeitamente funcionamento do LDR em todas as etapas.

Os experimentos sobre o efeito fotoelétrico e fotovoltaico, realizado neste trabalho, foram apresentados em salas de aulas do segundo e terceiro ano do ensino médio. Houve a participação direta dos alunos, desde a escolha dos componentes eletrônicos, a montagem e o procedimento experimental.

O resultado dos experimentos foi muito proveitoso pelos alunos, que ficaram entusiasmados ao ver a célula solar experimento um e o sensor acionado pela luz o segundo

experimento, funcionar de fato. Isto trouxe melhor entendimento aos alunos dos conceitos sobre o efeito fotoelétrico da física moderna e despertando o interesse dos alunos pela física.

8.2.4 Aplicações do efeito fotoelétrico

Mesmo que a maioria das pessoas não conheça o efeito fotoelétrico, ele está presente no cotidiano delas. Alguns exemplos do uso desse fenômeno:

- **Códigos de barras**: são usados em caixa de supermercados, caixa eletrônico, controle de produção industrial etc.,
- **Controle remoto infravermelho**: utilizados para controlar TV, aparelho de som vídeo game, emite luz no comprimento de onda do infravermelho.
- **Cinema**; o cinema falado só foi possível através de células fotoelétrica
- **Processo industrial**: com o uso do efeito fotoelétrico foi possível construir máquinas com alta precisão na produção de peças, sem qualquer intervenção do Homem.
- **Iluminação urbana**: utiliza LDR que tem grande variação na sua resistência quando é submetido à incidência de luz.
- **Portas automáticas**: muito utilizadas em concessionárias de carro, em shopping etc., com sensor de presença associado a interruptores eletromecânico de fim de curso.
- **Torneira sem registro**: com sensor onde sua abertura é feita automática, basta colocar as mãos sob ela e a água é liberada.

Uma aplicação prática promissora deste fenômeno é a usina solar, que utiliza células fotovoltaicas aos milhares na conversão da energia luminosa em energia elétrica. É fonte de energia renovável e não polui.

Para não ter que devastar área de vegetação, foi criado no ano de 2016 um projeto para reaproveitar área alagada dos reservatórios das usinas hidroelétricas, onde é instalado os painéis solar flutuantes. A primeira usina solar flutuante do mundo deste tipo será no

reservatório da Eletronorte de Balbina, no Amazonas, usando tecnologia francesa de flutuantes.

Figura 8.13: Usina de energia solar com placas flutuante.

Fonte: <http://www.pensamentoverde.com.br/sustentabilidade/brasil-inaugura-primeira-usina-solar-flutuante-mundo/>

Apesar de o Brasil ser um do país tropical com mais dias ensolarados que nublados, a produção de energia solar fotovoltaica no Brasil ainda possui baixa participação na matriz energética brasileira (cerca de 1%) em relação às hidroelétricas, termoelétricas e eólicas. Porém, é um dos sistemas de geração de energia elétrica que mais cresce. O país possui diversas usinas solares, também conhecidas como parques solares.

8.2.5 Principais Usinas Solares do Brasil

- **Parque Solar Lapa** (Bom Jesus da Lapa-BA) – uma das maiores usinas solar do Brasil (em agosto de 2017). Começou a operar no começo de junho de 2017. Possui capacidade de geração de 80 MW.

- **Usina Cidade Azul (Tubarão)** – segunda maior usina de energia solar do Brasil. Possui capacidade geradora instalada de quatro MW (capacidade para

abastecer cerca de duas mil residências). Possui 19.424 painéis fotovoltaicos instalados. Foi inaugurada em agosto de 2014.

- **Usina Solar de Tão (Tauxiara)** – primeira usina solar a operar em caráter comercial no Brasil. Possui capacidade de geração de um MWp.

- **Usina Solar Noronha I** (Fernando de Noronha-PE) – foi inaugurada em 2014. Sua potência instalada pé de 400 kWp (600 MWh por ano).
- **Usina Solar Noronha II** (Fernando de Noronha-PE) – foi inaugurada em 2015. Possui potência instalada de 550 kWp (800 MWh por ano).

- **Usina Solar do Estádio de Pitu Açu** (Salvador-BA) – inaugurada em 2012, possui capacidade para gerar 630 Me por ano.

- **Usina Megawatt Solar** (Florianópolis-SC) – possui capacidade geradora de um MWp. Ela gera atualmente um GWh por ano (consumo de cerca de 670 casas).

- **Usina Solar Fotovoltaica de Tanquinho** (Campinas-SP) - possui capacidade de 1,05 MWp. Foi inaugurada em dezembro de 2012, época em que era a maior do Brasil.

- **Usina Solar do Estádio do Mineirão** (Belo Horizonte - MG) – sua capacidade

9 CONCLUSÃO

Este trabalho atingiu seu objetivo, deixando a Física Moderna mais evidente no cotidiano, através dos conceitos, da teoria relatividade restrita, à luz e do efeito foto elétrico. E com atividades experimentais sobre o efeito fotoelétrico e fotovoltaico.

Deixando mais transparente e abrangente o entendimento dos conceitos da física, os experimentos de física moderna realizado, deixa mais explicito o fenômeno do efeito fotoelétrico. Satisfaz os anseios dos alunos em aprimorar seu aprendizado e instiga-o a ter mais interesse à física.

A vantagem dos experimentos serem simples, é que pode ser realizados em sala de aula, onde o aluno pode participar ativamente da pratica experimental, com equações que podem ser resolvidas apenas com o conhecimento da matemática básica. Tem também o intuito atender essa categoria tão importante da educação que são aos professores de outra graduação que atuam na docência da área da física, nos três anos do ensino médio.

REFERÊNCIAS

J. W. S. G. projeto efeito fotoelétrico. **www.ebah.com.br**, 2013. Disponivel em: <https://www.ebah.com.br/content/ABAAAgR0cAH/projeto-efeito-fotoeletrico>. Acesso em: 16 jan. 2018.

Esplicação da dualidade onda-particula. **www.wikipédia.com.br, dualidade onda corpúsculo**, 27 outubro 2015. Disponivel em: <http://www.wikipédia.com.br>. Acesso em: 25 novembro 2017.

Nanotecnologia. **wikipedia.com.br**, 15 maio 2016. Disponivel em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Nanotecnologia>. Acesso em: 05 agosto 2017.
wikipédia Efeito Fotoelétrico, 2013. Disponivel em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_fotoel%C3%A9trico>. Acesso em: 04 fev. 2018.

ALVARO, G. slideplayer.com.br. **Principio de Construção de Huygens capítulo 35 item 3**, 05 fev. 2015. Disponivel em: <https://slideplayer.com.br/slide/359122/>. Acesso em: 20 abr. 2017.

AURICHI, L. F.. **WWW.icmc.usp.br USP inovação sep 8**, 09/2016. Disponivel em: <http://WWW.icmc.usp.br>. Acesso em: 12 outubro 2017.

BOETTGER, A. haffcom. **blog@raffcom.com.br designer**. Disponivel em: <https://www.raffcom.com.br/blog/som-e-criatividade/>. Acesso em: 08 out. 2017.

COLVERO*, A. P.. **pucrs.com.br modulo de ensino Fototerapia**, 02 jun. 2005. Disponivel em: <http://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/scientiamedica/article/viewFile/1550/7974.> . Acesso em: 10 jul. 2017.
EFEITO fotoelétrico if ufrgs. **www.if.ufrgs.br**, 2015. Disponivel em: <https://www.if.ufrgs.br/~betz/iq_XX_A/fotoElec/aFotoElecFrame.htm>. Acesso em: 17 fev. 2018.

ESPECTRO visível. **wikipédia.com.br**. Disponivel em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro_vis%C3%ADvel>. Acesso em: 05 set. 2017.

HALLIDAY, R. W. D. R. J. **Óptica e Física Moderna**. Tradução de Ronaldo Sergio de Biasi. 8. ed. Rio de Janeiro: Itc, v. 4, Fundamento da Física, 1 de janeiro de 2009. 247 p.

HALLIDAY, R. W. D. R. J. **Eletromagnetismo**. Tradução de Ronaldo Sergio de Biasi. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, v. 3 Fundamentos da Física, Eletromagnetismo, 2009.

ITOCAZU, V. Redes de Difração. **Fisicavestibular.com.br**, 12 mar. 2009. Disponivel em: <https://www.ebah.com.br/content/ABAAAAmuwAH/redes-difracao>. Acesso em: 16 set. 2017.

LECURO.. **blogdogps**, 05 jun. 2016. Disponivel em: <http://blogdogps.com.br/novidades/como-funcionam-os-receptores-gps/>. Acesso em: 20 jan. 2017.

LILA, G. E. **www.gihelilah.blogspot.com efeito fotoelétrico**, 2009. Disponivel em: <http://gihelilah.blogspot.com/2009/11/efeito-fotoeletrico_10.html>. Acesso em: 10 jan. 2018.

LOBATO, N. Fotons e Onda de Matéria. **http/hyperphysics.ply-astr.gsu.edu/hbase/mod6html**, 2012. Disponivel em: <https://slideplayer.com.br/slide/359071/>. Acesso em: 03 out. 2017.

MELO, B. **www.fisicaequantizacao.blogspot.com**, 2013. Disponivel em: <http://fisicaequantizacao.blogspot.com/2013/08/o-efeito-fotoeletrico-e-quantizacao-da.html>. Acesso em: 22 out. 2017.

MELO, B. Quantização da Carga Luz e Energia, 2013. Disponivel em: <http://fisicaequantizacao.blogspot.com/2013/08/o-experimento-de-millinkan-e.html>. Acesso em: 20 out. 2017.

NICOLAU, B. E. os fudamentos da física. **osfundamentodafisica.blogspot.com**, 2017. Disponivel em: <http://osfundamentosdafisica.blogspot.com/2017/11/cursos-do-blog-eletricidade_15.html>. Acesso em: 08 mar. 2018.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física básica**. 1. ed. São Paulo, SP, Brasil: Ed. Edigard Blücher ltda, v. 4; Ótica, Relatividade e Física Quântica pg. 249, 1998.

REFREXÃO da luz so física. **www.sofisica.com.br**, 2008. Disponivel em: <https://www.sofisica.com.br/conteudos/Otica/Reflexaodaluz/reflexao.php>. Acesso em: 18 jun. 2017.

REMES, C. **Inslustração do processo de dopagem**, 2016. Disponivel em: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-13-Ilustracao-do-processo-de-dopagem-do-silicio_fig8_303369695>. Acesso em: 17 fev. 2018.

SANTOS, J. L. Slidshare. **www.slidshare.com.br modelo atomico de Bohr**, 2015. Disponivel em: <https://www.slideshare.net/newtondasilva/aula-4-modelo-atmico-de-bohr>. Acesso em: 12 out. 2017.

SILVA, D. C. M. D. www.mundoeducacao.bol.uol.com.br. **Estudo das Ondas Periódica**, 12 jun. 2014. Disponivel em: <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/ondas-periodicas.htm>. Acesso em: 15 fev. 2017.

TRANSISTOR. **Wikipédia transistor**, 2014. Disponivel em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Trans%C3%ADstor>. Acesso em: 06 mar. 2018.

TERMO DE AUTORIZAÇÃO

Eu, _____, abaixo assinado, aluna regularmente matriculada no Curso de Licenciatura em Física, portadora do RA: _____, RG: _____, Órgão Expedidor: _____, CPF: _____, venho por meio deste autorizar a disponibilização pelo Departamento de Física da Fundação Universidade Federal de Rondônia, *Câmpus* Ji-Paraná (DEFIJI/UNIR-JP) do meu Trabalho de Conclusão de Curso em meios eletrônicos existentes ou que venham a ser criados.

Ji-Paraná, _____ de _____ de _____.

_____

Enivaldo Tavares de Freitas