

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



UFRR
UNIVERSIDADE FEDERAL DE RORAIMA
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA - SBF
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 38 UFRR - CAMPUS UFRR / PARICARANA

PRODUTO EDUCACIONAL

UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA A FÍSICA QUÂNTICA: A EXPERIMENTAÇÃO NO ENSINO DO EFEITO FOTOELÉTRICO

Wladimir Ferreira Parente
Autor

Prof. Dsc. Mikael Souto Maior de Sousa
Orientador

Prof. Dsc. Roberto Câmara de Araújo
Coorientador

Boa Vista - RR
2020

SUMÁRIO

1. APRESENTAÇÃO.....	1
2. O PLANO DE AULA.....	2
3. AULA EXPOSITIVA.....	14
4. MANUAL DE MONTAGEM DOS EXPERIMENTOS.....	21

1. APRESENTAÇÃO

A Física Moderna e Contemporânea (FMC) está presente no nosso cotidiano e foi graças aos seus estudos que diversos avanços tecnológicos foram possíveis. Hoje temos aparelhos como smartphones, notebooks, GPS, portas que se abrem e fecham sozinhas, lâmpadas de postes que se acendem ao entardecer etc., devido aos progressos alcançados pela Física.

A motivação da criação deste produto educacional foi pelo fato de que os estudantes se sentem curiosos em saber como as coisas funcionam e, por vezes, recorrem ao professor de Física para que ele esclareça suas dúvidas, mas nem sempre o professor está apto a explicar o funcionamento dos equipamentos eletrônicos.

O presente produto educacional tem como objetivo geral elaborar uma sequência didático-pedagógica partindo da utilização de um experimento de baixo custo e fácil realização sobre efeito fotoelétrico buscando a implementação do ensino da física quântica no ensino básico. Os objetivos específicos são: propor metodologias ativas nas aulas de Física; utilizar a metodologia da unidade de ensino potencialmente significativa (UEPS) como recurso facilitador para a ocorrência da aprendizagem significativa; realizar experimentos de baixo custo a fim de inter-relacionar teoria e prática; elaborar maneiras para a construção de um aluno pesquisador desde a educação básica.

A utilização das metodologias ativas surgiu como fator determinante do processo, visto que as aulas expositivas ditas tradicionais já não prendem tanto a atenção do aluno. Quando os alunos participam da aula como sujeitos ativos do próprio conhecimento, a aula se torna mais atrativa e interessante.

Esse produto foi aplicado em 8 horas/aula distribuídas em 4 encontros (2 horas/aula por semana). Na sequência apresentaremos detalhadamente o planejamento e as atividades a serem realizadas nas aulas.

2. O PLANO DE AULA

Para que o professor obtenha êxito ao utilizar este produto educacional, o mesmo deverá ler este manual e analisar a aplicabilidade da sequência didática nas suas aulas. Para a realização da Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) foram necessárias a utilização de 8 (oito) horas/aulas e os métodos avaliativos estão descritos no decorrer deste manual.

Aula 1: o primeiro passo é definir o tópico a ser abordado.

As atividades propostas nessa aula serão realizadas sem a finalidade de avaliar os alunos. O intuito dessa aula é observar seus conhecimentos prévios (subsunçores).

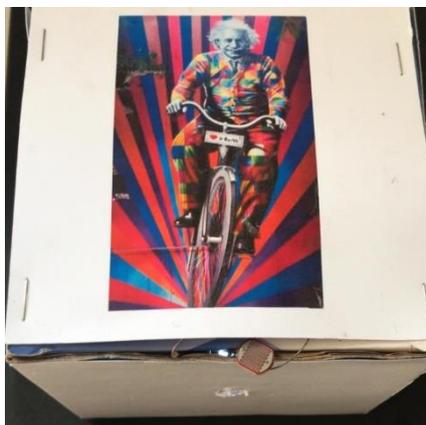
O professor deverá explicar aos alunos que o tema a ser abordado será “o efeito fotoelétrico” e, após uma breve explicação do conteúdo a ser abordado, fará questionamentos acerca do que eles sabem a respeito do tema proposto, registrando as respostas no quadro, a fim de comentá-las em seguida.

Tempo gasto nesse processo: 10 minutos.

O professor deverá confeccionar um experimento de baixo custo e fácil montagem, com a finalidade de mostrar uma das aplicações do efeito fotoelétrico e levantar questionamento dos alunos.

Tal experimento consiste em um sensor LDR (Light-Dependent Resistor) ligado a um resistor, a um LED e a uma bateria de 9V através de fios conectores.

Para fins didáticos, o experimento foi montado numa caixa dentro da qual há uma foto de Albert Einstein e na qual se fez um furo por onde os alunos devem observar a imagem que aparecerá dentro da caixa quando houver iluminação. O LED fica dentro da caixa e o LDR fica para fora, conforme a imagem a seguir.



Experimento montado
(Fonte: próprio autor)

Ao se colocar um dedo sobre o LDR observando o orifício, o LED não acende, pois a falta de iluminação faz com que o LDR tenha uma resistência grande. Ao retirar o dedo, a luz ambiente ilumina o LDR e sua resistência diminui, facilitando a passagem da corrente elétrica e, assim, o LED acenderá e dentro da caixa aparecerá a foto de Albert Einstein. Quanto maior a incidência de luz no LDR, mais intenso será o brilho do LED.

Tempo gasto nesse processo: 15 minutos.

Como se trata de um conteúdo talvez nunca visto, propomos após a realização do experimento a exibição de dois vídeos para que os estudantes possam conhecer um pouco sobre o assunto. Os vídeos são sobre a catástrofe ultravioleta e sobre o Nobel de Einstein. O professor deverá pedir para que os alunos anotem as palavras que acharem mais importantes nos vídeos.

O professor exibirá o vídeo “A Catástrofe Ultravioleta” de 7 minutos disponível em < https://www.youtube.com/watch?v=LKoqBFot_H4> e, após a apresentação do vídeo, discutirá com os alunos as palavras-chaves que eles anotaram.

Tempo gasto nesse processo: 10 minutos.

O professor exibirá o vídeo “O Efeito Fotoelétrico Explicado” de 8min e 2s disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=USGENeYkBd4>> e, após a apresentação do vídeo, discutirá com os alunos as palavras-chaves que eles anotaram.

Tempo gasto nesse processo: 10 minutos.

Como tarefa para casa o professor deverá pedir aos alunos que individualmente construam mapas conceituais sobre a aula, para serem entregues na próxima aula.

Esses mapas conceituais servirão para outro passo que será explanado mais adiante.

Aula 2: o segundo passo é criar situações que levem o aluno a externalizar aquilo que sabe sobre o tópico, ou seja, notar a presença de subsunçores.

O professor fará as seguintes perguntas à turma para que respondam no caderno de individualmente:

- a) O que você já leu, ouviu, ou viu sobre a quantização da energia e o efeito fotoelétrico?
- b) Onde o Efeito Fotoelétrico pode ser aplicado?
- c) Em qual ramo da Física se estuda o Efeito Fotoelétrico?
- d) Como funciona a porta do shopping que abre sozinha quando você chega perto?

e) Por que as luzes dos postes acendem sozinhas em determinada hora do dia?

f) Como funcionam as placas de energia solar colocadas no telhado e em algumas calculadoras?

Após o término da atividade, as questões deverão ser discutidas com a turma e entregues ao professor no final da aula. O objetivo dessa aula é fazer com que os alunos comecessem a compreender o conteúdo tratado.

Tempo gasto nesse processo: 20 minutos.

Após a discussão, os alunos deverão realizar individualmente a leitura do texto “Dualidade Onda Partícula da luz” que será entregue pelo professor.

Texto disponível em <<https://docente.ifrn.edu.br/caiovasconcelos/downloads/ensino-medio/livro-de-fisica-seed-pr>> da página 207 à página 215 (5 páginas). Após a leitura serão formados grupos de três a quatro alunos para que haja uma discussão sobre o texto.

Tempo gasto nesse processo: 20 minutos.

Aula 3: o terceiro tópico é aprofundamento do conhecimento – Etapa 1.

O professor apresentará uma aula expositiva, com slides e vídeos que tratam do contexto histórico e do desenvolvimento científico que explicam a quantização da energia.

O professor, ao longo da aula, deverá incitar a turma a participar da mesma com comentários acerca dos conteúdos propostos.

Tempo gasto nesse processo: 20 minutos.

Aula 4: o quarto tópico será uma avaliação individual.

Os alunos deverão montar um experimento voltado para a quantização da energia com a finalidade de se calcular a constante de Planck.

O experimento é composto por:

- Uma placa protoboard.
- Fios de ligação.
- LED's de diferentes cores.
- Um potenciômetro.
- Um voltímetro.
- Uma bateria de 9V.

Obs.: o professor poderá modificar o experimento simplificando sua complexidade para se adequar a realidade social do aluno e da escola.

O experimento consiste em medir a tensão elétrica entre os terminais do LED e calcular a constante de Planck.

Primeiramente, com a ajuda de um voltímetro, o aluno deverá medir a tensão elétrica entre os terminais de um LED, anotando em seguida na tabela abaixo.

Utilizando o valor da tensão, calcular a energia, através da equação: $E = U \cdot e$, anotando em seguida o resultado na tabela.

Observação: U = tensão elétrica; e = carga elétrica elementar ($e = 1,6022 \times 10^{-19}$ C).

Enfim, o aluno deverá calcular a constante de Planck através da equação:

$E = hf$, anotando em seguida o resultado obtido na tabela.

Observação: E = energia; h = constante de Planck; f = frequência (depende de cada cor).

COR DO LED	TENSÃO ELÉTRICA	ENERGIA (E = U.e)	FREQUÊNCIA	CONSTANTE DE PLANCK (E = hf)
Azul				
Verde				
Amarelo				
Vermelho				

O professor deverá entregar aos alunos uma folha de papel milimetrado e pedir para que eles construam um gráfico de energia em função da frequência para cada cor de LED.

Será observado que a constante de Planck será dada pela tangente do gráfico após o ajuste pelo método dos mínimos quadrados.

Tempo gasto nesse processo: 45 minutos.

Aula 5: o quinto tópico será a apresentação de uma nova situação – Etapa 2.

A aula deverá ser iniciada com uma discussão sobre o experimento da aula anterior.

Após, deverá ser exibido um vídeo de um experimento sobre efeito fotoelétrico, “Tema 01 - Luz | Experimentos - Efeito fotoelétrico” de 2min 54s disponível em

<<https://www.youtube.com/watch?v=VVka6Mp5vyA&t=78s>>, sem o áudio, para que a turma tente explicar o que acontece no experimento.

Após a discussão, o vídeo deve ser passado novamente com o áudio a fim de que eles possam tentar correlacionar com o experimento proposta na aula anterior. E após esta etapa, o professor retorna com uma aula expositiva para sistematização e aprofundamento do tema *efeito fotoelétrico*.

Tempo gasto nesse processo: 30 minutos.

Ao final da aula deverá ser realizada uma atividade no modelo de questionário com perguntas e respostas no estilo de verdadeiro (V) ou falso (F) que servirá como avaliação *qualitativa e quantitativa*. Não haverá nessa aula a discussão das respostas.

Questionário:

01. Entre os vários trabalhos científicos desenvolvidos por Albert Einstein, destaca-se o efeito fotoelétrico, que lhe rendeu o Prêmio Nobel de Física de 1921. Sobre esse efeito, amplamente utilizado em nossos dias, assinale (V) para verdadeiro ou (F) para falso:

() Trata-se do fenômeno que pode gerar uma corrente elétrica quando a luz incide em um material, essa corrente produzida é proporcional a intensidade da radiação luminosa.

() É o princípio que explica o funcionamento das lâmpadas incandescentes, nas quais, por ação da corrente elétrica que percorre o seu filamento, é produzida luz.

() O Efeito fotoelétrico ocorre quando a luz atinge um metal e a carga elétrica do fóton é absorvida pelo metal, produzindo corrente elétrica.

() É o efeito que explica o fenômeno da faísca observado quando existe uma diferença de potencial elétrico suficientemente grande entre dois fios metálicos próximos.

() Corresponde à ocorrência da emissão de elétrons quando a frequência da radiação luminosa incidente no metal for maior que um determinado valor, o qual depende do tipo de metal em que a luz incidiu.

() A energia mínima necessária para excitar um elétron num material é denominada Função Trabalho e é a mesma para materiais diferentes.

GABARITO: F F F F V F

02. Denomina-se de efeito fotoelétrico o fenômeno que consiste na liberação de elétrons pela superfície de um material quando esse é exposto a uma radiação eletromagnética como a luz. O fenômeno foi explicado por Einstein em 1905, quando admitiu que a luz é constituída por quanta de luz cuja energia é dada por $E = hf$, sendo h a constante de Planck e f a frequência da luz. Das seguintes afirmativas, assinale (V) para verdadeiro ou (F) para falso:

- () O efeito fotoelétrico acontece independentemente da frequência da luz incidente na superfície metálica.
- () A teoria do efeito fotoelétrico afirma que, aumentando a frequência da luz incidente na superfície metálica, é possível arrancar prótons da superfície do metal.
- () O efeito fotoelétrico fornece evidência corpuscular da luz.
- () Considerando que, no vácuo, o comprimento de onda da luz vermelha é maior do que o comprimento de onda da luz azul, a energia dos quanta de luz vermelha é maior do que a energia dos quanta da luz azul.
- () Quando uma luz monocromática incide sobre uma superfície metálica e não arranca elétrons dela, basta aumentar a sua intensidade para que o efeito fotoelétrico ocorra.

GABARITO: F F V F F

03. O efeito fotoelétrico foi descoberto por Hertz no final do século XIX, e a explicação do fenômeno foi dada por Einstein no começo do século XX. Com base nessa explicação, dadas as afirmativas abaixo, assinale (V) para verdadeiro ou (F) para falso:

- () A energia contida no fóton depende da frequência da radiação incidente.
- () A radiação, ao incidir sobre uma superfície metálica, pode arrancar elétrons desta.
- () A energia cinética do elétron arrancado de uma superfície depende da intensidade da radiação incidente.

GABARITO: V V F

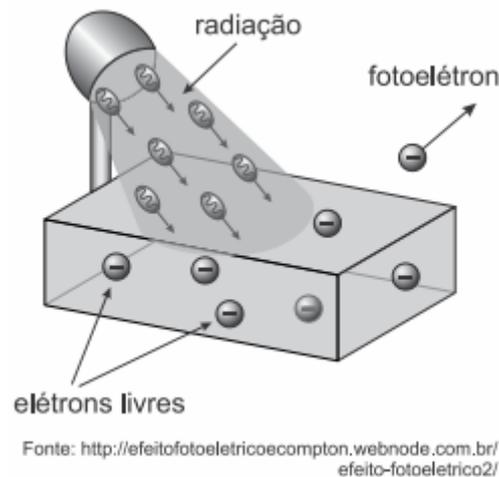
04. Considere as afirmações a seguir com relação ao efeito fotoelétrico, assinalando (V) para verdadeiro ou (F) para falso:

- () A energia cinética do elétron emitido pelo material depende da intensidade da radiação incidente.

- () O efeito fotoelétrico somente ocorre quando há incidência de elétrons sobre uma superfície metálica.
- () A quantidade de elétrons emitidos pelo material depende da intensidade da luz incidente.
- () A menor energia cinética do elétron emitido pelo material é igual a zero.

GABARITO: F F V V

05. Alguns dispositivos funcionam tendo como base o efeito fotoelétrico, que consiste na ejeção de fotoelétrons de uma superfície metálica devido à incidência de radiação eletromagnética, atuando como uma chave em diversos circuitos.



Assinale (V) para verdadeiro ou (F) para falso sobre os aparelhos que fazem o uso dessa tecnologia:

- () a guitarra elétrica, uma vez que o dedilhar do guitarrista produz radiação eletromagnética, gerando corrente elétrica que, por fim, produz o som.
- () os controles remotos que, ao serem pressionados, produzem radiação eletromagnética fazendo com que os circuitos internos do aparelho de televisão passem a funcionar.
- () a porta dos elevadores, sendo que pessoas ou objetos funcionam como uma chave, pois, ao entrarem ou saírem, interrompem a radiação eletromagnética fazendo com que a porta fique aberta.
- () as máquinas fotográficas, nas quais, ao apertar o botão para tirar uma fotografia, fecha-se um circuito e dispara-se um flash que nada mais é que radiação eletromagnética.

- () a lâmpada fosforescente na qual, devido à alta temperatura (em torno de 2.000°C) as ondas de calor arrancam os elétrons do filamento, produzindo o brilho característico.
- () A partir do efeito fotoelétrico tornou-se possível o cinema falado, uma célula fotoelétrica permite reconstituir os sons registrados nas películas do cinematógrafo assim como a transmissão de imagens animadas (televisão).
- () Óculos de visão noturna de otimização de imagem que possuem um tubo intensificador de imagem no qual ocorre o efeito fotoelétrico.
- () Relé fotoelétrico: dispositivo que faz acender e apagar as luzes dos postes de iluminação pública.

GABARITO: F F V F F V V V

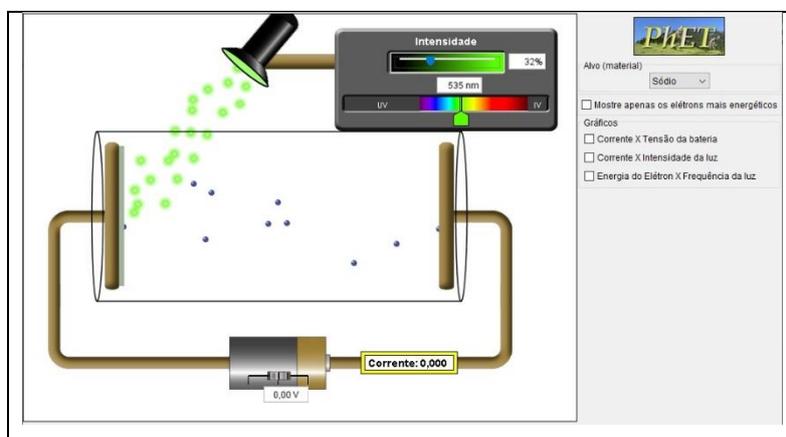
Tempo gasto nesse processo: 30 minutos.

Aula 6: o sexto tópico será a comparação dos mapas conceituais

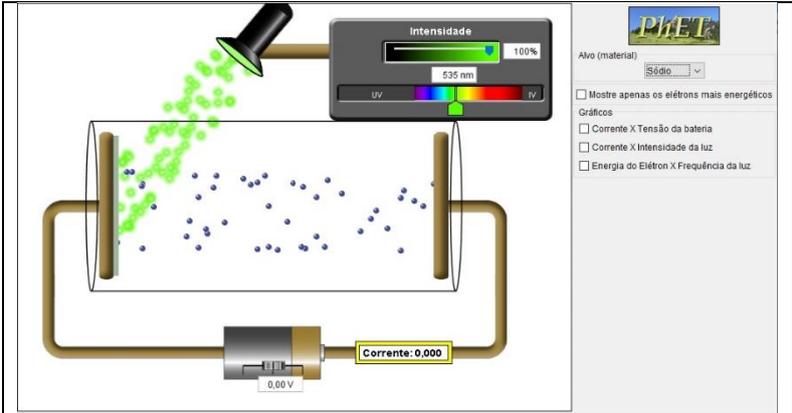
Em sala o professor deverá propor a comparação dos mapas conceituais feitos na primeira aula e os feitos na última aula, como atividade para casa. Desta forma, pode-se observar a construção de um conhecimento mais elaborado a partir de uma discussão dos erros e acertos dos mapas conceituais, quando comparados.

Tempo gasto nesse processo: 40 minutos.

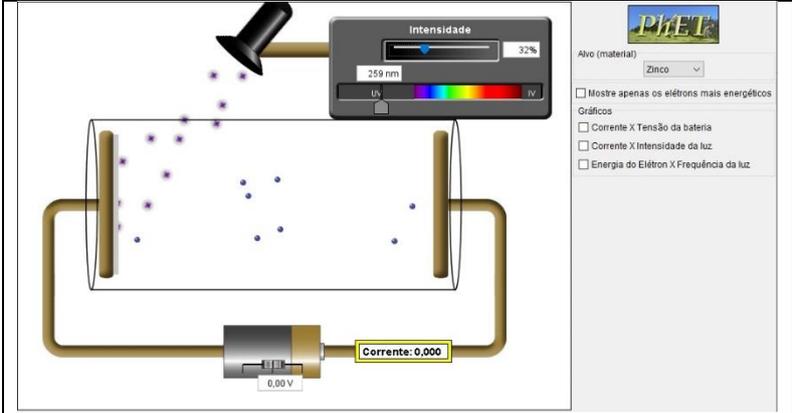
Aula 7: a sétima etapa será feita um experimento avaliativo: utilização da simulação PhET para explicar o efeito fotoelétrico como ferramenta para aplicação de atividade com os alunos (avaliação individual).



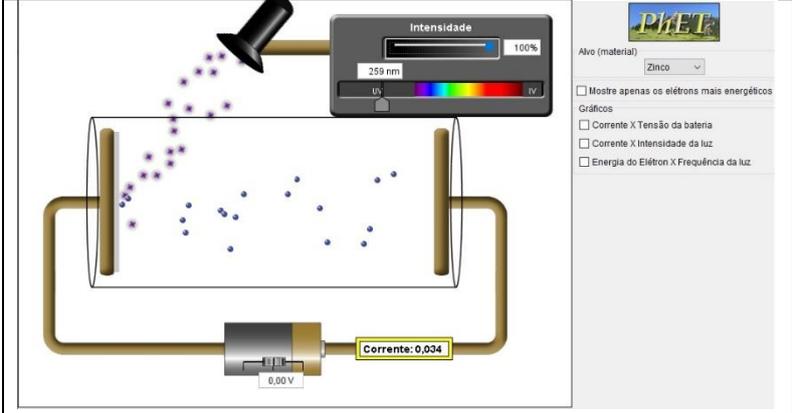
Simulador PhET incidindo radiação na cor verde (comprimento de onda de 535 nm) e intensidade de 32% numa placa de sódio.



Simulador PhET incidindo radiação na cor verde (comprimento de onda de 535 nm) e intensidade de 100% numa placa de sódio.



Simulador PhET incidindo radiação ultravioleta (comprimento de onda de 259 nm) e intensidade de 32% numa placa de zinco.



Simulador PhET incidindo radiação ultravioleta (comprimento de onda de 259 nm) e intensidade de 100% numa placa de zinco.

O professor deverá antes da aula prática no laboratório de informática da escola instalar a simulação PhET sobre efeito fotoelétrico disponível em <

https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/photoelectric>. É uma ferramenta gratuita e de apenas 3,1 MB.

O aluno deverá clicar em “opções” e selecionar “mostre os fótons” e aumentar a “intensidade” até que se observe os elétrons sendo arrancados no material.

Deverá ser pedido aos alunos que calculem a função trabalho de determinados materiais ao realizarem a simulação.

O procedimento seguirá as seguintes etapas:

- O aluno deverá encontrar na simulação o comprimento de onda máximo necessário para que os elétrons fiquem na iminência de serem arrancados ($E_c = 0$), anotando em seguida os valores na tabela abaixo:

MATERIAL	COMPRIMENTO DE ONDA (λ) 10^{-9} m
Sódio (Na)	
Zinco (Zn)	
Cobre (Cu)	
Platina (Pt)	
Cálcio (Ca)	
Magnésio (Mg)	

- Com o valor do comprimento de onda, o aluno deverá calcular a frequência de corte através da equação $c = \lambda \cdot f_0$, observando que c = velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s), anotando em seguida os valores na tabela abaixo:

MATERIAL	FREQUÊNCIA DE CORTE (f_0) Hz
Sódio (Na)	
Zinco (Zn)	
Cobre (Cu)	
Platina (Pt)	
Cálcio (Ca)	
Magnésio (Mg)	

- Com o valor da frequência de corte (f_0), deverá calcular a função trabalho (ϕ) através da equação $\phi = h \cdot f_0$, observando que h é a constante de Planck ($h = 4,14 \cdot 10^{-15}$ eV.s), anotando em seguida os valores na tabela abaixo:

MATERIAL	FUNÇÃO TRABALHO (ϕ) eV
Sódio (Na)	
Zinco (Zn)	
Cobre (Cu)	
Platina (Pt)	
Cálcio (Ca)	
Magnésio (Mg)	

A avaliação nessa parte do estudo será realizada de maneira quantitativa.

Tempo gasto nesse processo: 40 minutos.

Com a finalidade de se avaliar qualitativamente os alunos, os seguintes questionamentos deverão ser respondidos por eles:

- Para qualquer comprimento de onda se observam elétrons sendo arrancados do material? Justifique sua resposta.

Resposta esperada: Não, cada material tem um comprimento de onda máximo o qual há a ejeção de elétrons do material.

- O que acontece quando alteramos o comprimento de onda?

Resposta esperada: ao aumentarmos o comprimento de onda não há ejeção de elétrons, somente com comprimentos de onda menores se observa o fenômeno acontecendo.

- Caso elétrons estejam sendo arrancados, o que acontece se aumentarmos a intensidade luminosa?

Resposta esperada: a quantidade de elétrons arrancados aumenta.

- O que acontece quando aumentamos a tensão elétrica (V)?

Resposta esperada: a energia cinética dos elétrons aumenta.

- O que acontece quando utilizamos uma tensão elétrica negativa (-V)?

Resposta esperada: os elétrons são arrancados, mas retornam ao material.

Tempo gasto nesse processo: 10 minutos.

Aula 8: avaliação das UEPS em sala de aula.

O professor deverá fazer uma análise qualitativa e quantitativa das respostas das avaliações.

Durante a aula o professor deverá discutir com os alunos sobre o efeito fotoelétrico e suas aplicações, observando a participação de cada um durante a aula.

Será uma aula de revisão geral do conteúdo a fim de observar a presença de aprendizagem significativa nos alunos. Para isso, deve ser levado em conta a participação de cada aluno nos tópicos desenvolvidos em sala de aula e nas tarefas realizadas em casa.

3. PROPOSTA PARA AULA EXPOSITIVA

Essa parte do produto educacional tem a finalidade de servir como base para o professor ao utilizar o presente trabalho. Trata-se de um guia-aula abordando o desenvolvimento histórico e científico abordando o problema da quantização da carga elétrica e da energia culminando na explicação dada por Albert Einstein ao efeito fotoelétrico.

3.1. Quantização da Carga Elétrica e o Experimento de Millikan

Foi na antiguidade, através do filósofo grego Demócrito e seu mestre Leucipo, que surgiu a ideia de que a matéria era constituída de pequenas partículas chamadas átomos. Muitos anos se passaram até que Avogadro, em 1811, formulou a hipótese de que todos os gases a certa temperatura possuem o mesmo número de moléculas por unidade de volume, o que permitiu explicar quantitativamente várias propriedades da matéria, ficando assim estabelecida que a matéria não é contínua, mas sim quantizada, ou seja, formada por certas quantidades de partículas (TIPLER; LLEWELLYN. 2001).

3.1.1. Quantização da carga elétrica

Faraday foi o primeiro físico a estimar a ordem de grandeza das cargas elétricas associadas aos átomos. Em um de seus experimentos, Faraday fez com que uma corrente contínua atravessasse soluções fracamente condutoras e, ao observar o resultado, percebeu que parte dos componentes da solução havia ficado depositada nos eletrodos (TIPLER; LLEWELLYN. 2001).

Analisando quantitativamente o fenômeno descrito, Faraday descobriu que a quantidade de eletricidade (F , denominada Faraday) que é igual a 96.500 C aproximadamente, decompõe sempre 1 átomo-grama (massa que contém um número de átomos igual a ao número de Avogadro N_A) de um íon monovalente.

$$F = NAe$$

Onde e é a carga elementar (o valor da carga elétrica de um elétron ou de um próton = $1,6 \times 10^{-19}\text{ C}$).

Essa equação é denominada Lei de Faraday para a eletrólise.

Partindo dessa equação, Faraday percebeu que a carga elétrica, assim como a matéria, não era contínua, mas sim formada por partículas com um valor mínimo de carga (TIPLER; LLEWELLYN. 2001).

3.1.2. O Experimento de Millikan

Em 1909, o cientista R. A. Millikan realizou uma série de experimentos tentando demonstrar o valor da carga elementar e utilizando gotas de óleo que eram borrifadas no ar seco entre as placas de um capacitor. Ao atritar as gotas de óleo no bico do borrifador, elas adquiriam através da eletrização por atrito certa carga elétrica.

Para evitar o ganho ou perda de algumas unidades carga, mudou-se a polaridade do campo entre as placas, a fim de observar o comportamento das gotas durante um longo intervalo de tempo.

Millikan percebeu que a velocidade terminal da gota era proporcional à força que atuava sobre ela, chegando dessa maneira à conclusão de que as cargas sempre ocorriam em valores múltiplos de uma unidade fundamental: $1,601 \times 10^{-19} \text{ C}$ (TIPLER; LLEWELLYN. 2001).

Millikan repetiu a experiência com diversas substâncias, dentre elas um óleo isolante, a glicerina que é semicondutora e o mercúrio que é condutor, e obteve sempre o mesmo resultado para o valor de e .

3.2. Radiação do Corpo Negro

De acordo com Eisberg e Resnick (1994), radiação térmica é a radiação emitida pelo corpo devido a sua temperatura. Todo corpo emite e absorve radiações do meio que o envolve. O corpo de maior temperatura cede energia para o corpo de menor temperatura até atingirem o equilíbrio térmico, quando as taxas de emissão e absorção se igualam.

Segundo Tipler e Llewellyn (2001) a energia cinética dos átomos que constituem um corpo é aumentada ao absorver radiação. Eisberg e Resnick (1994), afirma que em seu estado condensado (sólido ou líquido) a matéria emite um espectro contínuo de radiação. Tal espectro é dependente da temperatura em que o corpo se encontra.

Um aparelho chamado pirômetro óptico é que relaciona a temperatura de um corpo ao espectro de frequência de radiação emitida por ele. Essa frequência depende da composição química desse corpo.

Para Nussenzveig (2010) ao observarmos através de um pequeno orifício o que acontece no interior de um forno em equilíbrio térmico ao deixar escapar um feixe de radiação eletromagnética, podemos determinar seu espectro experimentalmente.

De acordo com Tipler e Llewellyn (2001, p. 83), “um corpo que absorve toda radiação incidente é chamado de corpo negro ideal”. Corpos que emitem espectros térmicos de caráter universal, independente da sua composição, são chamados de corpos

negros. Eisberg e Resnick (1994) afirma que esses corpos conseguem absorver toda radiação que incide sobre suas superfícies. Todos os corpos negros à mesma temperatura emitem radiação térmica com o mesmo espectro.

Perez (2016) diz que Kirchhoff, em 1859, havia proposto o conceito de corpo negro como sendo um corpo ideal capaz de absorver toda a radiação incidente sobre ele. Um corpo negro é a idealização de um objeto que absorve toda radiação eletromagnética que incide sobre ele, a reemitindo depois. O espectro de radiação de um corpo negro depende somente da temperatura do corpo.

No final dos anos de 1800 e início dos anos 1900 a emissão de radiação já havia sido estudada por Lord Rayleigh e Sir James Jeans que estavam interessados em modelar essa radiação a partir de dados experimentais existentes, porém utilizando a Física Clássica. Esse modelo concordava com os dados experimentais apenas em baixas frequências. Segundo Eisberg e Resnick (1994), o cálculo da densidade de energia feito por Rayleigh e Jeans mostrou uma divergência entre a física clássica e os resultados experimentais.

Esse modelo preveria que a temperatura aumentaria sempre que a frequência aumentasse, porém, dados experimentais mostraram que, com o aumento da temperatura, a frequência diminuía. De acordo com Eisberg e Resnick (1994, p. 31), “a densidade de energia vai a zero para frequências muito altas”. Esses problemas ficaram conhecidos como “a catástrofe do ultravioleta”.

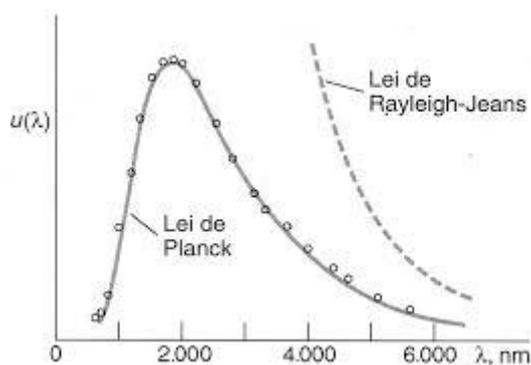


Figura: Comparação da Lei de Planck com a Lei de Rayleigh-Jeans.

3.2.1. A quantização da Energia de Planck

Em 1900 o físico alemão Max Planck se deparou o problema dos corpos negros e passou a tentar resolvê-lo.

Antes de Planck, os átomos que compunham os corpos negros poderiam ser representados como pequenas molas que oscilavam com determinada frequência (osciladores harmônicos simples). Essa frequência era a frequência da radiação absorvida e depois reemitida pelo átomo na forma de luz. Esses osciladores poderiam oscilar com qualquer energia.

Segundo Perez (2016), no final do ano de 1900, no encontro da Sociedade Alemã de Física, Planck apresentou um estudo a respeito da radiação do corpo negro, propondo que os osciladores contribuiriam com uma energia discretizada.

De acordo com Nussenzveig (2010), Planck postulou que a troca de energia entre a radiação e os “osciladores” deveria ser quantizada, ou seja, só poderia haver emissão ou absorção de energia em múltiplos inteiros de um “quantum de energia”.

$$E = hf$$

Onde E é a energia do fóton, h é a constante de Planck e f é a frequência da luz incidente.

Ao solucionar o problema de por que o brilho do carvão em brasa é vermelho e não azul, o físico alemão Max Planck deu início a uma revolução que levou ao nascimento da física quântica. Buscando descrever tanto a luz quanto o calor em suas equações, ele segmentou a energia em pequenos pacotes, ou quanta, e durante esse processo explicou por que corpos aquecidos emitem tão pouca luz ultravioleta (Baker, 2013, p. 10).

Segundo Eisberg e Resnick (1994), Planck contribuiu grandemente para a resolução do problema quando descobriu que poderia tratar a energia como se ela fosse uma variável discreta e não contínua como se acreditava até então.

Planck postulou que os corpos negros eram formados por esses pequenos osciladores que absorviam radiação e oscilavam com determinada energia. Essa energia era a mesma da radiação emitida, mas somente admitiam valores múltiplos de um certo número, resolvendo assim o problema da catástrofe ultravioleta. Esse postulado foi chamado de “quantização da energia”.

De acordo com Piza (2009), Planck supôs que um corpo negro emitia energia sob a forma de radiação eletromagnética com a frequência f e essa emissão estava associada a porções discretas, as quais chamou de quanta, de intensidade proporcional à frequência (hf).

Segundo Tipler e Llewellyn (2001), Planck propôs que a energia das cargas oscilantes (da radiação emitida) era uma variável discreta que admite apenas valores múltiplos inteiros da energia e não contínua como se acreditava até então.

Somente em 1905 Einstein usou as ideias de Planck para explicar o efeito fotoelétrico, propondo ainda que a quantização era uma característica fundamental da energia luminosa.

3.3. O Efeito Fotoelétrico

Ao incidirmos radiação sobre uma superfície metálica, poderá haver a emissão de elétrons dessa superfície, dependendo da energia da radiação incidente. Em 1887 Hertz realizou um experimento para produzir e detectar ondas eletromagnéticas e acabou por confirmar acidentalmente a teoria ondulatória da luz de Maxwell. No mesmo experimento, acabou por observar o efeito fotoelétrico que, mais tarde, ajudaria na descrição da luz como partícula. (TIPLER; LLEWELLYN, 2001).

Tal experimento consistia em dois eletrodos entre os quais, através de uma descarga oscilante, saltava uma faísca a fim de gerar ondas eletromagnéticas que eram detectadas através de outra faísca por entre eletrodos de uma antena ressonante. Hertz acabou observando que a faísca, quando exposta à luz (violeta e ultravioleta), saltava mais facilmente (NUSSENZVEIG, 2010). Como descrito por Nussenzveig (2010, p. 249), “ao comprovar a teoria de Maxwell, Hertz estava descobrindo o efeito fotoelétrico, uma das primeiras evidências experimentais da quantização”.

Philipp Lenard, um assistente de Hertz, voltou ao laboratório. Ele reduziu o gerador de centelha a sua forma básica: duas superfícies de metal posicionadas no vácuo dentro de um tubo de vidro. As placas internas estavam separadas, mas conectadas do lado de fora do tubo por um cabo e um amperímetro para formar um circuito elétrico. Lenard apontou luzes de diferentes brilhos e frequências para a primeira placa, enquanto mantinha a segunda no escuro. Quaisquer elétrons expelidos da primeira placa voariam pela lacuna e atingiriam a segunda, completando o circuito e fazendo uma pequena corrente fluir. (BAKER, 2015).

Outros físicos como Robert Millikan testaram raios de diversas cores para tentar visualizar o efeito acontecer, porém perceberam que a luz vermelha não era capaz de arrancar elétrons das placas metálicas, independentemente da intensidade da radiação. Perceberam então que cada metal tinha uma “frequência de corte”, abaixo da qual o fenômeno não se observava. Acima da frequência de corte, quanto maior a frequência da luz, maior a energia com que os elétrons eram arrancados da placa. (BAKER, 2015).

Como descrito por Perez (2016, p. 30), “esse fenômeno [...] foi explicado por Einstein em 1905. Segundo ele, a luz era composta de partículas – os fótons – que carregavam energia respeitando a relação: $E = hf$ ”.

A explicação para o efeito fotoelétrico se dá, segundo Halliday, et al. (2009, p.180), da seguinte maneira: “quando iluminamos a superfície de um metal com um raio luminoso de comprimento de onda suficientemente pequeno, a luz faz com que elétrons sejam emitidos pelo metal”. Na visão de Eisberg e Resnick (1994, p. 51), “a emissão de elétrons de uma superfície, devido à incidência de luz sobre essa superfície, é chamada de efeito fotoelétrico”.

A energia cinética máxima do fotoelétron mais rápido não depende da intensidade da luz incidente e é dada pela diferença de potencial V_0 multiplicada pela carga do elétron e :

$$E_{c_{max}} = eV_0$$

De acordo com Tipler e Llewellyn (2001), os experimentos mostraram que a diferença de potencial V_0 não depende da intensidade da luz incidente, o que teria deixado os cientistas surpresos, pois isso estava em desacordo com a teoria clássica.

De acordo com Eisberg e Resnick (1994), existem 3 aspectos principais do efeito fotoelétrico que a teoria ondulatória clássica da luz não conseguem explicar:

1. a intensidade da luz incidente deveria influenciar na energia cinética dos fotoelétrons;
2. o efeito fotoelétrico deveria ocorrer para qualquer frequência de luz, porém experimentalmente se comprovou que existe uma frequência de corte para cada superfície;
3. Deveria haver um intervalo de tempo mensurável entre o instante em que a luz começa a incidir sobre a superfície e o instante do fotoelétron ser ejetado e durante esse tempo o fotoelétron deveria absorver energia do feixe de luz incidente até que houvesse acumulado energia o bastante para escapar, porém esse intervalo de tempo nunca foi medido.

Segundo Tipler e Llewellyn (2001), Einstein propôs que a quantização da energia que Planck usara na resolução do problema do corpo negro deveria ser uma característica universal da luz.

Para Einstein a luz é constituída por quantas isolados de energia $E = hf$. Quando um desses quanta (chamados de fótons) chega no cátodo, toda sua energia é transferida para um único elétron.

Seja ϕ (função trabalho) a energia necessária para mover um elétron da superfície, a energia cinética máxima dos elétrons emitidos pelo cátodo é dada por:

$$E_{c_{max}} = eV_o = hf - \phi$$

Essa equação é chamada de equação do efeito fotoelétrico.

Em 1921, Albert Einstein ganhou o prêmio Nobel devido a teoria do Efeito Fotoelétrico.

4. MANUAL DE MONTAGEM DOS EXPERIMENTOS

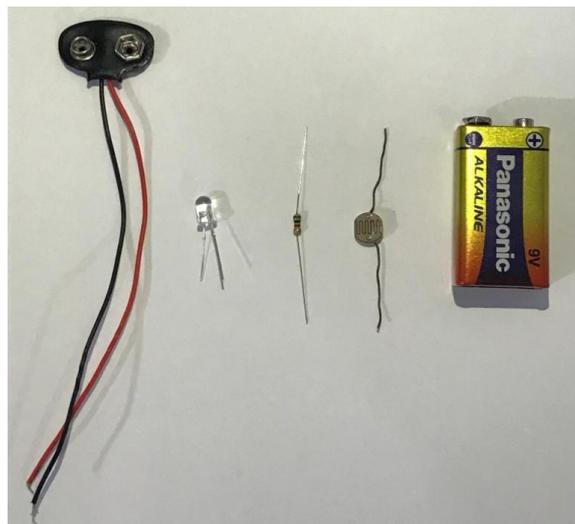
4.1. Experimento com LDR

O LDR, em Inglês: Light-Dependent Resistor, é um resistor dependente de luz. A resistência oferecida pelo foto-resistor varia de acordo com a intensidade da luz que sobre ele incide.

Aumentando-se a intensidade luminosa sobre o sensor LDR a resistência elétrica diminuirá, logo, maior será a intensidade de corrente elétrica; diminuindo-se a intensidade luminosa sobre o sensor LDR, resistência elétrica irá aumentar, logo, menor será a intensidade de corrente elétrica.

No LDR acontece o efeito fotoelétrico interno: processo no qual há a transformação de energia luminosa em energia elétrica. Esse dispositivo é utilizado em fotômetros (para avaliar a intensidade da iluminação a partir da corrente elétrica), em pilhas solares que são utilizadas em foguetes espaciais e em alguns tipos de calculadoras portáteis. Na sua composição há materiais semicondutores.

Os fótons que incidem nesses materiais quebram as ligações covalentes, aumentando assim o número de elétrons livres no material, alterando sua resistência e, conseqüentemente, a intensidade de corrente elétrica do circuito.



Materiais necessários
(Fonte: próprio autor)



Fios de ligação interligados

(Fonte: próprio autor)

O experimento foi montado numa caixa dentro da qual há uma foto de Albert Einstein e na qual se fez um furo por onde os alunos devem observar a imagem que aparecerá dentro da caixa quando houver iluminação. O LED fica dentro da caixa e o LDR fica para fora, conforme a imagem a seguir.



Experimento montado

(Fonte: próprio autor)

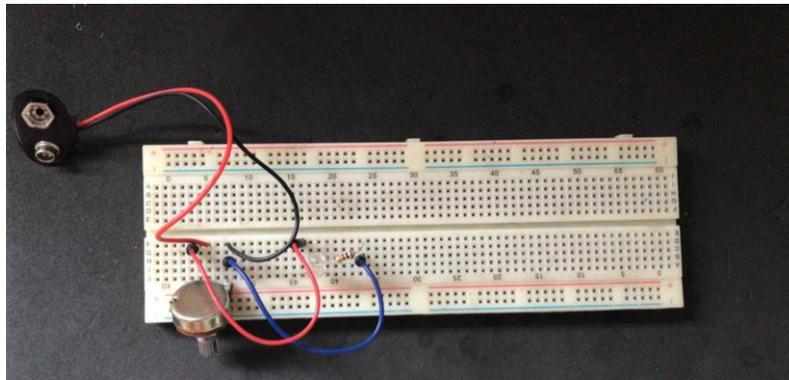
Ao se colocar um dedo sobre o LDR observando o orifício, o LED não acende, pois a falta de iluminação faz com que o LDR tenha uma resistência grande. Ao retirar o dedo, a luz ambiente ilumina o LDR e sua resistência diminui, facilitando a passagem da corrente elétrica e, assim, o LED acenderá e dentro da caixa aparecerá a foto de Albert Einstein. Quanto maior a incidência de luz no LDR, mais intenso será o brilho do LED.

4.2. Experimento para medir a constante de Planck

O experimento é composto por:

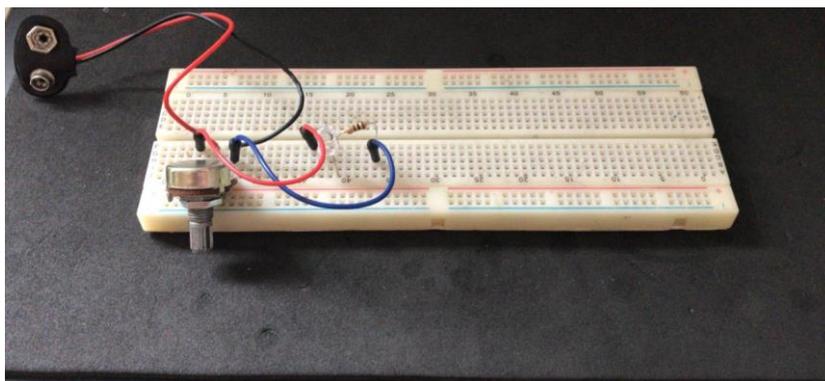
- Uma placa protoboard.
- Fios de ligação.
- LED's de diferentes cores.
- Um potenciômetro.
- Um voltímetro.
- Uma bateria de 9V.

Deve-se ligar os fios conectores conforme esquema a seguir:



Fios de ligação interligados

(Fonte: próprio autor)



Fios de ligação interligados

(Fonte: próprio autor)