

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO PARANÁ
CAMPUS DE PARANAVÁÍ
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E DA EDUCAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO
FORMAÇÃO DOCENTE INTERDISCIPLINAR - PPIFOR**

Alexandre Gabriel Maquera

Uma proposta UEPS para o ensino da Física Moderna: cálculo da constante de Planck utilizando LEDs

Alexandre Gabriel Maquera

**PARANAVÁÍ
2023**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO PARANÁ
CAMPUS DE PARANAVÁI
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E DA EDUCAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO
FORMAÇÃO DOCENTE INTERDISCIPLINAR – PPIFOR**

**Uma proposta UEPS para o ensino da Física Moderna: cálculo da
constante de Planck utilizando LEDs**

Alexandre Gabriel Maquera

**PARANAVÁI
2023**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO PARANÁ
CAMPUS DE PARANAÍ
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E DA EDUCAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO
FORMAÇÃO DOCENTE INTERDISCIPLINAR - PPIFOR**

Uma proposta UEPS para o ensino da Física Moderna: cálculo da constante de Planck utilizando LEDs

Dissertação apresentada por Alexandre Gabriel Maquera, ao Programa de Pós-Graduação em Ensino da Universidade Estadual do Paraná – Campus de Paranaíba, como um dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ensino.
Área de Concentração: Formação docente interdisciplinar.

Orientadora: Prof^a. Dra.: Shalimar Calegari Zanatta

**PARANAÍ
2023**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP

M297u Maquera, Alexandre Gabriel
Uma proposta UEPS para o ensino da física
moderna:
cálculo da constante de Planck utilizando LEDs
/ Alexandre
Gabriel Maquera. Paranavaí: Universidade
Estadual do Paraná,
UNESPAR – Campus Paranavaí, 2023.
Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual do
Paraná
106 p. : il. Color.
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Shalimar
Calegari Zanatta –
Universidade Estadual do Paraná – Campus
Paranavaí
Programa de Pós- Graduação em Ensino Formação
Docente
Interdisciplinar - PPIFOR
1. Física - Estudo e ensino. 2. Física (Ensino
médio). 3. Ausubel, David Paul, 1918-. I.
Universidade Estadual do Paraná – UNESPAR. II.
Título.
CDD: 23 ed. 370.15

Catalogação na publicação: Zineide Pereira dos Santos - CRB 9/1577

Alexandre Gabriel Maquera

Uma proposta UEPS para o ensino da Física Moderna: cálculo da constante de Planck utilizando LEDs

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Shalimar Calegari Zanatta (Orientadora) – UNESPAR

Prof. Dr. Marcelo Alves de Carvalho (UEL – MNPEF)

Prof. Dra. Hercília Alves Pereira de Carvalho – UFPR – campus de Jandaia do Sul

Data de Aprovação:

15/12/2023

Dedico este trabalho à minha família e amigos por todo apoio e suporte. A minha orientadora por tornar possível finalizar esse trabalho com sucesso.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Maria do Carmo Gaffo, meu pai Ademar Maquera e minha irmã Angelita Cristina Maquera por todo o incentivo com meus estudos e desenvolvimento, sem o apoio deles eu não teria conseguido chegar aqui.

Aos pesquisadores e cientistas que construíram os conhecimentos que possuímos hoje e nos permitiram desenvolver a atual sociedade.

Ao corpo docente do Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Formação Docente Interdisciplinar – PPIFOR, da UNESPAR pela oportunidade de desenvolver esse trabalho e obter novos conhecimentos.

À Professora Doutora Shalimar Calegari Zanatta, minha orientadora por possibilitar aprendizagens únicas, orientação e disponibilidade para esclarecer dúvidas.

Aos membros da banca por disponibilizarem seu tempo para participarem desta etapa do meu desenvolvimento.

“Tudo o que você vê, o que ouve ou vivencia de qualquer jeito que seja é específico para você. Você cria um Universo ao percebê-lo, então tudo no Universo que percebe é específico para você.

É loucura dizer que você sabe o que está acontecendo com as outras pessoas. Só elas sabem (...). elas têm seus próprios Universos a partir de seus olhos e ouvidos.”

Douglas Adams

Maquera, Alexandre Gabriel. **Uma proposta UEPS para o ensino da Física Moderna: cálculo da constante de Planck utilizando LEDs**. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ensino) – Universidade Estadual do Paraná – Campus de Paranavaí. Orientadora: Shalimar Calegari Zanatta. Paranavaí, 2023.

RESUMO

O ensino da Física Moderna, no Ensino Médio, apresenta desafios incomensuráveis, primeiro pela própria natureza dos fenômenos envolvidos e depois pela dificuldade do professor em realizar atividades experimentais que possam comprovar as teorias aceitas pela comunidade científica. A Física Moderna abrange a descrição do movimento de partículas que se deslocam com velocidades superiores a 10% da velocidade da luz. Neste universo microscópico, os fenômenos são peculiares e completamente diferentes dos fenômenos observados no nosso cotidiano e descritos pelas leis da Física Clássica. No entanto, é impensável nosso mundo, de hoje, sem os conceitos da Física Moderna. Os LEDs (*Light Emitting Diode*), com amplas aplicações tecnológicas, são um bom exemplo disto. De modo geral, os LEDs são semicondutores capazes de emitir luz visível e as explicações deste fenômeno são explicados pela Física Moderna. Neste contexto, este trabalho é o resultado de uma pesquisa que partiu do seguinte questionamento: como ensinar conceitos da Física Moderna para o aluno do Ensino Médio? Como resultado, elaboramos uma proposta de Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS), fundamentada na Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel (TAS), a qual, inclui uma atividade experimental, de fácil execução, onde se obtêm valores próximos da constante de Planck. Porém, é importante ressaltar que como resultado final, este trabalho, não mostra apenas, a elaboração de um roteiro de atividades para ensinar Física Moderna, mas também discute a formação docente.

Palavras-chave: Ensino de Física, Física Moderna, Ensino Médio, Teoria da Aprendizagem Significativa.

Maquera, Alexandre Gabriel. **A proposal UEPS for Modern physics teaching - calculation of Planck's constant using LEDs**. 101 f. Dissertation (Master in Teaching) – State University of Paraná. Supervisor: Shalimar Calegari Zanatta. Paranavaí, 2023.

ABSTRACT

The teaching of Modern Physics in high school presents immeasurable challenges, firstly due to the very nature of the phenomena involved and then due to the teacher's difficulty in carrying out experimental activities that can prove the theories accepted by the scientific community. Modern Physics covers the description of the movement of particles that move at speeds greater than 10% of the speed of light. In this microscopic universe, the phenomena are peculiar and completely different from the phenomena observed in our daily lives and described by the laws of Classical Physics. However, our world today is unthinkable without the concepts of Modern Physics. The LEDs (Light Emitting Diode), with wide technological applications, are a good example of this. In general, LEDs are semiconductors capable of emitting visible light and the explanations for this phenomenon are did by Modern Physics. In this context, this work is the result of research that started with the following question: how to teach Modern Physics concepts to high school students? As a result, we developed a proposal of the Potentially Significant Teaching Unit (UEPS), based on Ausubel's Meaningful Learning Theory (TAS), including an experimental activity, easy to execute, where values close to Planck's constant, are obtained. However, it is important to highlight that as a final result, this work not only shows the elaboration of a script of activities to teach Modern Physics, but also discusses teacher training.

Key words: Physics Teaching, Modern Physics, High School, Meaningful Learning Theory.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. Fundamentação Teórica.....	13
2.1. O Estado da Arte do ensino da Física Moderna.....	13
2.2. Conceitos Físicos.....	14
2.2.1. Ondas eletromagnéticas.....	15
2.2.2. Modelos Atômicos.....	24
2.2.3. Quantização de energia e espectro de luz.....	26
2.2.4 Efeito Fotoelétrico.....	30
2.2.5 Semicondutores e Efeito Fotoelétrico.....	33
2.2.6 Percepção de cores.....	39
2.3. Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel (TAS).....	41
2.4. Sequência didática, unidade didática e UEPS.....	49
3. Desenvolvimento da UEPS.....	53
3.1. Estrutura da UEPS	54
3.2. A Atividade Experimental.....	57
3.3 Discussão	59
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60
REFERÊNCIAS	63
APÊNDICES.....	67

1 INTRODUÇÃO

A Física é uma das áreas da Ciência que estuda e interpreta os fenômenos naturais.

De modo geral, ela pode ser dividida em Física Clássica e Física Moderna. Estas divisões são meramente didáticas. Isto porque, os fenômenos naturais, são compreendidos a partir da complexidade de todas as áreas das Ciências.

Assim, a Física Clássica, explica o comportamento de corpos macroscópicos que se deslocam com velocidades inferiores a 10% da velocidade da luz, representada pela letra c , com valor muito próximo a 3×10^8 m/s. A velocidade da luz é uma das constantes mais importantes da Física.

Quando trabalhamos com partículas subatômicas, suas velocidades superam os 10% da velocidade da luz e, aí não podemos mais utilizar os conceitos da Física Clássica. Entra em campo os conceitos trazidos pela Física Moderna. É importante salientar que o atual avanço tecnológico se deve, principalmente, à compreensão destes conceitos. A exemplo disto, podemos citar a luz emitida por um LED, acrônimo para *Light Emitting Diode* ou em português, diodo emissor de luz.

Porém, muitos outros exemplos poderiam ser citados, como a luz emitida pelo LASER, acrônimo para *Light Amplifier Source Emission Radiation*, os equipamentos para diagnósticos médicos, o tratamento contra o câncer, utilizado pela medicina nuclear, a internet, o celular e outras tecnologias que invadem nosso cotidiano. Mas, vamos focar nossa atenção nos diodos.

Como já apontado, os diodos são semicondutores que se comportam de acordo com as leis da Física Moderna e, mesmo com amplas utilizações nas tecnologias, os professores de Física não exploram os conceitos envolvidos nestes sólidos cristalinos.

De acordo com a literatura pertinente, trazida por artigos, dissertações e teses, a Física Moderna é considerada, pelos professores de Física, muito complexa para ser abordada no Ensino Médio.

No entanto, documentos que norteiam a educação brasileira apontam que os conceitos básicos do eletromagnetismo e da Física Moderna, devem ser introduzidos no terceiro ano do Ensino Médio.

Assim, promover o ensino da Física Moderna, no Ensino Médio, tem sido um desafio. É nesta seara que esta dissertação se desenvolve.

Aqui propomos uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa, conhecida abreviadamente por UEPS, para que o aluno possa compreender conceitos importantes da Física Moderna. Uma das atividades sugeridas é o cálculo da constante de Planck, obtido experimentalmente. A atividade é de fácil execução e poderá dar suporte para os conceitos teóricos que envolvem a Física Moderna.

É importante salientar que não há nada de novo em apresentar uma atividade experimental para abordar os conceitos teóricos da Física. A novidade fica por conta do fato de que a UEPS é uma sequência didática elaborada e fundamentada na Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel, conhecida abreviadamente por TAS. Isto implica dizer que o professor deve elaborar um processo de ensino com base numa teoria de aprendizagem.

David Paul Ausubel (1918-2008) explicou como ocorre o processo de aprendizagem cognitiva dentro da sala de aula, chamando-a de aprendizagem significativa, AS.

Para Ausubel, a aprendizagem significativa é aquela em que o aluno faz conexões hierárquicas entre os conceitos, reorganizando sua estrutura mental.

Para melhor compreensão do leitor, no Capítulo 2, apresentamos todos os tópicos que fundamentam esta pesquisa, como por exemplo, o Estado da Arte sobre o ensino da Física Moderna no Ensino Médio, conceitos físicos relevantes para compreensão do funcionamento dos semicondutores e percepção das cores, elementos teóricos da TAS e os requisitos para a elaboração de uma UEPS.

No Capítulo 3, apresentamos a UEPS aqui desenvolvida, detalhando a montagem do experimento proposto e as discussões pertinentes.

No Capítulo 4, trazemos as considerações finais, as quais esta pesquisa nos permite obter.

Espera-se que a proposta aqui elaborada, auxilie professores de Física, de qualquer estado do Brasil e, em quaisquer condições de ensino, quebrando paradigmas e estigmas sobre o ensino da Física Moderna e, leve-os a refletir sobre as demandas do processo de ensino.

2. Fundamentação Teórica

Como já pontado na Introdução, este Capítulo apresenta uma revisão bibliográfica que auxilia o leitor a compreender melhor este trabalho, tanto do ponto de vista pedagógico, quanto dos conceitos da Física Moderna.

2.1 O Estado da Arte do ensino de Física Moderna

Para avaliarmos a originalidade e relevância do nosso trabalho, pesquisamos no 'Google Acadêmico' a ocorrência de trabalhos semelhantes. Para tal, utilizamos as palavras-chave: "LED", "Ensino médio", "efeito fotoelétrico", "Ausubel", "UEPS", inseridas em diferentes configurações de agrupamento, inclusive uma a uma.

A pesquisa foi realizada entre maio e junho de 2023. A soma de todos os resultados, em todas as configurações de agrupamento de palavras, depois de excluir as repetições, totalizaram 30.

Devido a pandemia, vivenciada entre 2020 e 2021, onde as aulas se deram de forma remota para todo território nacional, selecionamos os trabalhos publicados no período de 2015 a 2019, resultando em 15 arquivos.

Após a leitura destes 15 trabalhos, identificamos apenas 3 que atendem ao nosso propósito, ou seja, trata-se de dissertações que descrevem experimentos com LED para promover o ensino da Física Moderna no Ensino Médio, utilizando a TAS como teoria.

O Quadro 1 traz o título e o autor de cada um destes trabalhos.

A primeira dissertação traz uma UEPS para o ensino da Física Quântica por meio da utilização de LEDs para geração de energia elétrica, simulando células fotovoltaicas. Como metodologia didático-pedagógica, o autor utiliza questionários e mapas conceituais.

A segunda dissertação propõe uma UEPS para o ensino de alguns conceitos da Física Moderna, tais como: grandezas físicas contínuas e quantizadas, dualidade onda-partícula, efeito fotoelétrico e fotovoltaico e, a emissão estimulada por LASER, LED e OLED. São sugeridas atividades como mapas mentais, mapas conceituais, leitura e interpretação de texto, avaliações somativas e recursivas e, apresentação de

trabalhos pelos alunos do Ensino Médio. Não há proposta de atividades experimentais.

Quadro 1 - Teses e dissertações encontradas e suas respectivas referências.

Título	Referência
NOÇÕES DE FÍSICA QUÂNTICA A PARTIR DO ESTUDO DO FUNCIONAMENTO DE DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES - UMA UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA PARA 3ª SÉRIE DO ENSINO MÉDIO	Campos, 2016.
PROPOSTA DE UNIDADE DIDÁTICA PARA A APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE CONCEITOS DE FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA	Coelho, 2016.
PROPOSTA DE UMA UEPS PARA A INSERÇÃO DO CONTEÚDO DE FÍSICA QUÂNTICA ATRAVÉS DE UMA ATIVIDADE EXPERIMENTAL	Antônio, 2019.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A terceira dissertação propõe e aplica uma UEPS para o ensino de conceitos da Física Quântica para o Ensino Médio por meio de um experimento o qual, calcula-se a constante de Planck, utilizando LEDs. O trabalho defende a necessidade dos alunos se envolverem em atividades mais dinâmicas e o uso de tecnologias. Segundo o autor, estas ações melhoraram a aprendizagem dos alunos. Neste trabalho não foi apresentado os valores do comprimento de onda emitido por cada cor de LED utilizado.

2.2 Conceitos da Física Moderna

Os conceitos físicos apresentados nesta seção são bem estabelecidos e aceitos pela comunidade científica. Eles podem ser consultados nos livros de “**Eletrodinâmica**” (Griffiths, 2010); “**Fundamentos de Física Volume 3: Eletromagnetismo**” e “**Fundamentos de Física Volume 4: Óptica e Física Moderna**” (Halliday; Resnick; Walker, 2009) e “**Física Moderna**” (Tipler; Llewellyn, 2014).

A Física Moderna teve seu início no fim do século XIX e início do século XX, quando alguns fenômenos observados, não poderiam ser explicados à luz da Física que se conhecia na época, a Física Clássica. Um exemplo disto, foi a radiação do corpo negro e o efeito fotoelétrico, sendo este último um fenômeno do nosso interesse.

Antes de falarmos sobre o efeito fotoelétrico, vamos apresentar o conceito de ondas eletromagnéticas, do ponto de vista da Física Clássica e depois, da Física Moderna.

2.2.1 Ondas eletromagnéticas

A compreensão da natureza da luz como propagação de ondas eletromagnéticas foi um dos maiores desafios enfrentados pela história do desenvolvimento da Física. Ampliar esta compreensão foi crucial para o desenvolvimento tecnológico observado na nossa sociedade.

A natureza da luz instigou a curiosidade e criatividade do homem desde a pré-história. Por exemplo, para Euclides (325 a.C. a 265 a. C.), no seu tratado sobre Óptica, a luz eram como raios que partiam dos olhos para os objetos. Foi o primeiro a notar que a luz viajava em linha reta e descreveu a lei da reflexão¹.

Heron de Alexandria (10 a.C – 75 a.C) mostrou, por meio da geometria, que um raio de luz segue o caminho mais curto quando refletido por um espelho plano.

Ptolomeu (90 a.C – 168 a.C) estudou a refração² e sugeriu que o ângulo de refração era proporcional ao ângulo de incidência.

Depois de Cristo, Ibn al-Haitham (963–1039), conhecido na Europa como Alhazen, contrapôs a lei da refração de Ptolomeu, explicando que a referida lei se aplicava, apenas, para pequenos ângulos. Este foi o primeiro a dar uma explicação mais coerente sobre o funcionamento do olho humano.

No final do século XVII, o desenvolvimento da óptica geométrica e a fabricação de lentes não resolveu o mistério sobre a natureza da luz.

Para Isaac Newton (1642–1727) a dispersão³ da luz poderia ser explicada considerando seu caráter corpuscular. Newton interpretou que a luz era formada por pequenas partículas em movimento e, assim explicava a trajetória retilínea e a reflexão da luz.

¹ Reflexão da luz é um fenômeno óptico que ocorre quando uma onda eletromagnética visível incide em um meio e retorna ao meio original.

² Refração da luz é um fenômeno óptico em que ocorre quando a luz, vindo do meio 1, incide e atravessa o meio 2 com alteração da velocidade de propagação.

³ Dispersão é um fenômeno óptico que ocorre quando a luz branca é separada nas cores do arco íris quando atravessa um prisma.

Augustin Jean Fresnel (1788–1827) explicou o comportamento da luz, considerando-a como onda, explicou sua propagação retilínea em meios homogêneos e isotrópicos, calculou padrões de difração e deduziu equações.

Todos estes fenômenos, observados até então, reflexão, refração e dispersão, poderiam ser explicados considerando a luz como perturbação do meio (onda) ou constituída por partículas. No entanto, a onda que se conhecia na época de Isaac Newton era a onda mecânica, como as ondas sonoras, que para se propagarem, precisam de um meio material. O som não se propaga no espaço vazio.

Para Christian Huygens (1629–1695), a luz se propagava como onda, então defendia que o espaço entre o Sol e a Terra era preenchido por uma substância chamada “éter”, que nunca foi observada.

De acordo com a Física Clássica, as teorias ondulatórias e corpuscular são opostas. As partículas são localizadas, possuem massa, não podem atravessar obstáculos. As ondas são perturbações de um meio, não possuem massa e podem contornar obstáculos.

Enquanto a natureza da luz permanecia um mistério, num estudo completamente independente, em 1820, Hans Christian Oersted (1777 – 1851), observou a deflexão da agulha de uma bússola, quando próxima e paralela ao fio de um aparelho que é ligado e/ou desligado. Se a agulha estivesse perpendicular ao fio, nenhum efeito era observado. A explicação foi dada considerando que havia um campo magnético ao redor do fio por onde passa uma corrente elétrica.

Em 1832 Michel Faraday observou que uma corrente elétrica poderia ser induzida e acender uma lâmpada, num circuito sem fonte de tensão de 3 modos diferentes:

I - Um circuito ligado (lâmpada e fonte de tensão) se move com relação a outro circuito (sem fonte de tensão), produz neste último uma corrente induzida capaz de acender a lâmpada;

II - O circuito ligado (lâmpada e fonte de tensão) em repouso e um segundo circuito (sem fonte de tensão) se move com relação ao primeiro;

III - Mantendo os 2 circuitos em repouso, mas ligando e desligando a chave da fonte de tensão do primeiro circuito.

Diante destas observações Faraday teve a perspicácia de compreender que a grandeza que variava nos três exemplos, era o fluxo do campo magnético Φ_B . Ou

seja, Faraday descobriu a existência da corrente elétrica induzida, resultante do movimento relativo entre um ímã (campo magnético) e espiras de fios condutores.

As observações de Faraday mostraram que fenômenos elétricos e magnéticos estão relacionados.

Diante destas observações, James K. Maxwell (1831 – 1879) ajustou as equações da eletrostática para as condições dinâmicas. Como resultado disto, Maxwell previu a existência de ondas eletromagnéticas que são perturbações do campo elétrico e do campo magnético que podem viajar no espaço vazio.

Em 1888 Heinrich Rudolf Hertz apresentou resultados irrefutáveis ao Congresso da Sociedade Alemã que comprovavam a existência de tais ondas.

Com estas descobertas, o mistério da natureza da luz foi desvendado! Luz são ondas eletromagnéticas que podem viajar no espaço vazio com amplos valores de comprimento de onda e frequência. Chamamos de espectro ou arco íris de Maxwell o conjunto de faixas de frequências das ondas eletromagnéticas, como mostra a tabela 1. Em específico, a luz visível para o ser humano, tem comprimento de onda de 400nm a 700nm (Griffiths, 2010).

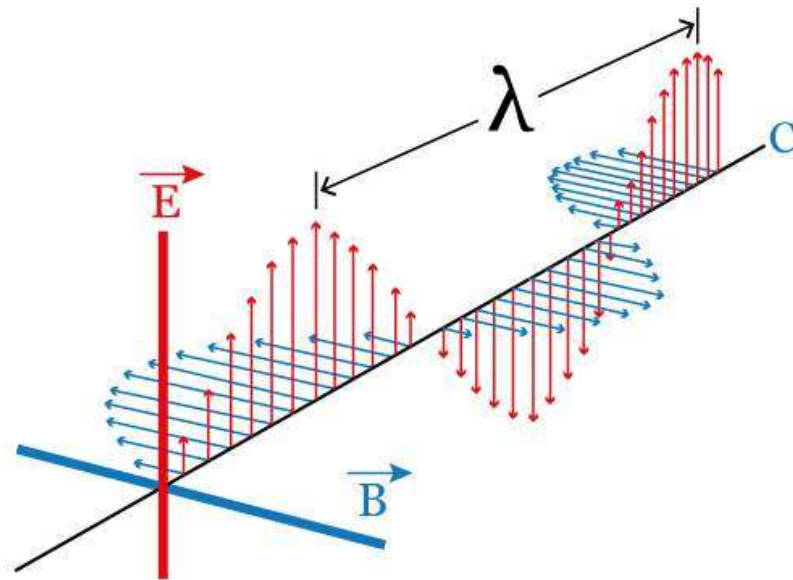
A função matemática que descreve a propagação de uma onda eletromagnética é do tipo:

$$E = E_m \cdot \text{sen}(kx - \omega t) \quad \text{(1.a)}$$

$$B = B_m \cdot \text{sen}(kx - \omega t) \quad \text{(1.b)}$$

Segundo R. Feynman (1964) o campo magnético é uma consequência relativística do movimento da carga elétrica. Numa onda eletromagnética, os campos elétrico e magnético são perpendiculares entre si e com a direção de propagação. A figura 1 mostra um diagrama esquemático para uma onda eletromagnética plano polarizada.

Figura 1: Onda eletromagnética representada por um instante de suas componentes de campo elétrico (E) e magnético (B), a onda se propaga com velocidade aproximadamente de 3×10^8 m/s, representa pela letra *c*. As duas frentes (ou picos) de onda separadas por um comprimento de onda λ .



Fonte: <https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/fisica/ondas-eletromagneticas>

E_m e B_m são as amplitudes máximas para o campo elétrico e campo magnético respectivamente, k é o número de onda (rad/m), ω é a frequência angular (rad/s), x é a posição (m) e t é o tempo (s).

As equações **1.a** e **1.b** satisfazem a equação de uma onda tridimensional:

$$\nabla^2 F = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 F}{\partial t^2}$$

A partir das equações de Maxwell podemos obter o valor para a velocidade de ondas eletromagnéticas:

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.a)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.c)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.d)$$

\mathbf{E} é o campo elétrico, \mathbf{B} é o campo magnético, ρ é a densidade de cargas, \mathbf{j} é a densidade de corrente elétrica, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ é a constante de permeabilidade magnética do vácuo, $\varepsilon_0 = 8,854187817 \times 10^{-12} \text{C}^2 \text{N}^{-1} \text{m}^{-2}$ é a permissividade elétrica do vácuo (Griffiths, 2010).

Para se calcular a velocidade da luz no vácuo devemos considerar que a carga e corrente elétrica no espaço percorrido pela onda eletromagnética sejam nulas. A equação 2.a resulta em zero dado que não há densidade de cargas se não houver cargas, o primeiro termo da equação 2.d se torna nulo sendo que a densidade de corrente elétrica é nula onde não há corrente elétrica (Griffiths, 2010). Para desacoplar as equações diferenciais de primeira ordem de \mathbf{E} e \mathbf{B} aplica-se o rotacional nas equações 2.b e 2.d:

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) &= \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = \nabla \times \left(-\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) \\ &= -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B}) = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) &= \nabla(\nabla \cdot \mathbf{B}) - \nabla^2 \mathbf{B} = \nabla \times \left(\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \\ &= \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{E}) = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} \end{aligned}$$

Dado que $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ e $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$, temos que:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2}$$

Portanto o laplaciano de \mathbf{E} e \mathbf{B} são similares a equação de onda tridimensional para uma função f , assim temos que:

$$\frac{1}{v^2} = \mu_0 \epsilon_0 \rightarrow v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \simeq 299.792.458 \text{ m/s}. \quad (\text{Velocidade da luz}).$$

Com este resultado Maxwell percebeu, pela primeira vez, que a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética e da luz são iguais, confirmando que a luz é uma onda eletromagnética (Griffiths, 2010).

Aplicando as equações 1.a e 1.b em 2.b chegamos à relação entre campos elétrico e magnético:

$$B_m = \frac{k}{\omega} E_m = \frac{1}{c} E_m$$

Para calcularmos a frequência de oscilação da onda eletromagnética utilizamos a relação entre frequência angular e frequência de oscilação:

$$\omega = 2\pi f \quad (\text{Frequência angular}) \quad \mathbf{(3.a)}$$

$$v = \frac{\omega}{2\pi} \quad (\text{Frequência da onda eletromagnética}) \quad \mathbf{(3.b)}$$

O comprimento de onda é definido pela quantidade de deslocamento da onda em um período de oscilação, sabendo que o período de oscilação é o inverso da frequência:

$$\tau = \frac{1}{v} \quad (\text{Período de uma onda eletromagnética}) \quad \mathbf{(3.c)}$$

$$\lambda = \tau c = \frac{c}{v} \quad (\text{Comprimento de uma onda eletromagnética}) \quad \mathbf{(3.d)}$$

As unidades utilizadas pelo Sistema Internacional (SI) para comprimento de onda é o metro (m) e para frequência é Hertz (Hz), respectivamente. Metro é a unidade de comprimento, Hertz é o inverso de segundo (s^{-1}) e significa o número de ciclos por

segundo, afinal o significado literal de frequência é o número de ocorrências por unidade de tempo.

É relevante mencionar que não há limites teóricos para a existência de ondas eletromagnéticas. Os limites são impostos pela tecnologia de produção, impostos pelas válvulas (magnetron e Klystron)⁴ que são responsáveis pela produção de ondas de menor frequência que a luz visível.

A tabela 1 traz o nome atribuído para cada faixa de valores de frequência das ondas eletromagnéticas. A luz interpretada como branca é a soma de todos os comprimentos de onda entre o intervalo de 400nm a 700nm de comprimento. Cada uma das cores representa um salto de elétrons nas diferentes camadas dos átomos.

Cada faixa do espectro eletromagnético apresenta suas especificidades e tem uma energia diretamente proporcional a sua frequência e inversamente proporcional ao seu comprimento de onda. Ou seja, ondas de comprimento maior que a luz visível apresenta frequência menor e são menos energéticas. Diversamente, ondas de comprimento menor que a luz visível, apresentam maior frequência e são mais energéticas e, por isso, são perigosas para o ser humano porque são ionizantes.

Os Raios – X, por exemplo, altamente energéticos e ionizantes, são emitidos, principalmente quando elétrons, em alta velocidade, (alto valor de energia cinética) colidem com uma placa metálica.

Os raios gama, mais energéticos e mais ionizantes que os Raios – X, são emitidos por núcleos atômicos num processo de decaimento, por processos de fusão ou fissão nuclear.

Estas duas faixas de frequências têm amplas aplicações na medicina. Os Raios – X, por exemplo, são utilizados, principalmente para radiografar ossos e dentes. O uso deste método diagnóstico deve ser usado com cautela e em pacientes não gestantes.

Os raios gama são utilizados para tratamento de câncer porque matam células cancerígenas. O processo envolve a ionização de moléculas que compõem as células. O problema é que a ionização não é seletiva, então pessoas saudáveis não devem se expor a esta radiação.

⁴ Magnetron é uma válvula que oscila produzindo micro-ondas e Klystron é uma válvula amplificadora e osciladora de micro-ondas.

A faixa definida como ultravioleta, simbolizada por UV também tem potencial para ionizar e, por isso, é utilizado para esterilizar objetos e requer o uso de protetor solar quando ficamos expostos ao sol.

Tabela 1 - Tabela com valores de frequências das ondas eletromagnéticas - espectro eletromagnético.

Espectro eletromagnético		
Frequência (Hz)	Tipo	Comprimento de onda (m)
10^{22}		10^{-13}
10^{21}	Raios gama	10^{-12}
10^{20}		10^{-11}
10^{19}		10^{-10}
10^{18}	Raios-X	10^{-9}
10^{17}		10^{-8}
10^{16}	Ultravioleta	10^{-7}
10^{15}	Visível	10^{-6}
10^{14}		10^{-5}
10^{13}		10^{-4}
10^{12}	Infravermelho	10^{-3}
10^{11}		10^{-2}
10^{10}	Micro-ondas	10^{-1}
10^9		1
10^8	TV, FM	10
10^7		10^2
10^6	AM	10^3
10^5		10^4
10^4	RF	10^5
10^3		10^6
Espectro Visível		
Frequência (Hz)	Cor	Comprimento de onda (m)
$1,0 \times 10^{15}$	Ultravioleta próximo	$3,0 \times 10^{-7}$
$7,5 \times 10^{14}$	Azul mais curto visível	$4,0 \times 10^{-7}$
$6,5 \times 10^{14}$	Azul	$4,6 \times 10^{-7}$
$5,6 \times 10^{14}$	Verde	$5,4 \times 10^{-7}$
$5,1 \times 10^{14}$	Amarelo	$5,9 \times 10^{-7}$
$4,9 \times 10^{14}$	Laranja	$6,1 \times 10^{-7}$
$3,9 \times 10^{14}$	Vermelho mais longo visível	$7,6 \times 10^{-7}$
$3,0 \times 10^{14}$	Infravermelho próximo	$1,0 \times 10^{-6}$

Fonte: Adaptado de Griffiths, 2010.

Observe que a unidade de medidas da frequência no Sistema Internacional (SI) é Hertz, simbolizado por Hz e representa 1/segundo. O comprimento de onda é dado em metro, simbolizado por m, mas é comum utilizarmos submúltiplos como, por exemplo: Mega (M - 10^6), nano (n - 10^{-9}), kilo (k - 10^3), entre outros.

A luz visível não é ionizante, assim como qualquer faixa de onda de maior comprimento, como as micro-ondas, utilizadas pelos fornos domésticos para o cozimento de alimento.

Os fornos domésticos utilizam ondas com frequência de 2.450MHz, como apontam os manuais. Isto corresponde a ondas de aproximadamente 0,12m. A energia eletromagnética destas ondas, coincide com a energia de vibração e/ou rotação de moléculas pequenas. Desta forma, a energia eletromagnética é absorvida e transformada em movimento de moléculas. Estamos falando do fenômeno da ressonância. Dito de outra forma, os diferentes modos de vibração das moléculas têm energia específicas e são ativados quando o valor é coincidente com a energia da onda eletromagnética incidente. No caso da molécula de água, por ser polar, além da energia dos modos de vibração, que podem ser ressonantes com a energia da onda eletromagnética, o átomo de hidrogênio, com carga parcialmente positiva, acompanha o campo elétrico da onda eletromagnética que muda de direção, como vemos na figura 1. Isto faz com que o cozimento de alimentos rico em água seja mais eficiente nos fornos de micro-ondas.

A energia cinética das moléculas, átomos ou elétrons representa seu movimento em torno de um ponto fixo e está associada a temperatura. Os corpos com diferentes temperaturas se equilibram pela emissão de uma onda eletromagnética - o infravermelho que é emitido pelo corpo com maior temperatura para o corpo de menor temperatura. Ou seja, o infravermelho é também conhecido como calor e representa energia térmica em trânsito. Qualquer corpo com temperatura maior que 0K⁵ emite onda eletromagnética na faixa do infravermelho.

Em resumo, cada faixa do espectro eletromagnética representa ondas eletromagnéticas, produzidas por diferentes formas e, com aplicações tecnológicas específicas.

⁵ De acordo com as leis da termodinâmica, a temperatura de 0K é inatingível.

2.2.2 Modelos atômicos

Por muito tempo a humanidade buscou compreender a constituição da matéria. Para os gregos havia uma partícula indivisível que era a base da construção de toda matéria, o átomo.

Imaginava-se que os átomos poderiam ser representados por esferas maciças.

Em 1808, devido as observações de eletrostática, John Dalton afirmou que estas esferas maciças continham partículas eletricamente carregadas, salpicadas por toda massa esférica.

Em 1887, Thomson considerou a existência de cargas elétricas negativas em meio a uma esfera maciça positiva. O seu modelo atômico ficou conhecido como pudim de passas, onde as passas representavam as cargas negativas salpicadas em meio a massa do pudim, positiva.

Em 1911, Rutherford propôs um modelo que se assemelha ao sistema planetário. Ou seja, as cargas elétricas negativas giram ao redor de um núcleo que contém carga positiva e neutra.

Em 1913 Bohr melhorou o modelo de Rutherford acrescentando informações sobre a energia associada as camadas que os elétrons giram. Aqui começa surgir o modelo atômico da Física Moderna.

Em 1926 Schrödinger descreve o átomo, com elétrons representados por uma função de onda. Neste modelo, o elétron não é considerado uma partícula cuja a posição e momento/velocidade possam ser aferidos simultaneamente com grau de precisão determinado por equipamentos sofisticados. As limitações destas medidas são de origem fenomenológicas. Existe um limite, imposto pela natureza, que se medirmos com precisão a posição do elétron, perdemos a precisão da velocidade e vice-versa. Esta limitação é conhecida pelo Princípio de Heisenberg. Em resumo, o elétron apresenta comportamento dual. Em algumas situações, ele se comporta como partícula e mostra o fenômeno da reflexão⁶. Em outras, ele apresenta comportamento ondulatório e mostra a difração⁷.

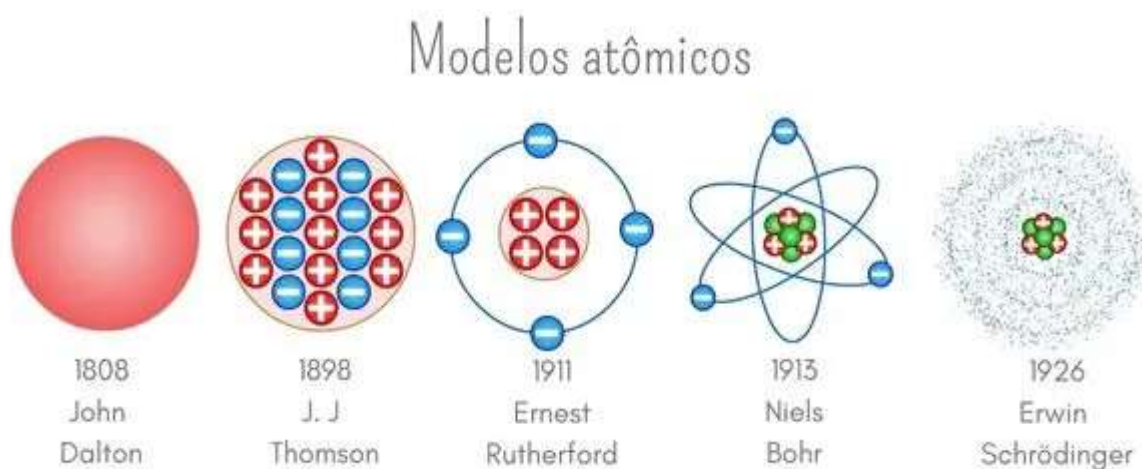
⁶ Fenômeno no qual a partícula ao incidir sobre uma superfície inverte a direção de movimento.

⁷ Fenômeno resultante da interação de ondas com a matéria que resulta no espalhamento das ondas.

O modelo atômico aceito pelos científicos não é compartilhado nas escolas. O professor de Química ou Física apresenta, no melhor das hipóteses, o professor apresenta o modelo de Bohr. Porém, a compreensão dos conceitos da Física Moderna exige o conhecimento do átomo, como proposto por Schrödinger.

A Figura 2 mostra os esquemas representativos dos principais modelos atômicos.

Figura 2: Modelos atômicos.



Fonte: <<https://s4.static.brasilecola.uol.com.br/be/2022/10/modelos-atomicos.jpg>>

O átomo tende a ficar no estado natural. Ou seja, os elétrons ocupam as camadas eletrônicas menos energéticas e esta condição é estável. Mas, os elétrons podem receber energia excedente, absorvê-la e, transitar para camadas mais externas, mais energéticas. Neste momento, o átomo estará num estado excitado que durará um tempo e dependerá de alguns fatores intrínsecos. A luz *laser*, por exemplo, é obtida quando os elétrons retornam, juntos, à sua camada de origem. A luz, assim emitida é coerente.

É importante ressaltar que mesmo hoje, nas atuais condições tecnológicas, não há instrumentos que permitam a observação direta de um átomo, muito menos de um elétron. Todos os modelos atômicos são tentativas de explicar as observações dele recorrentes.

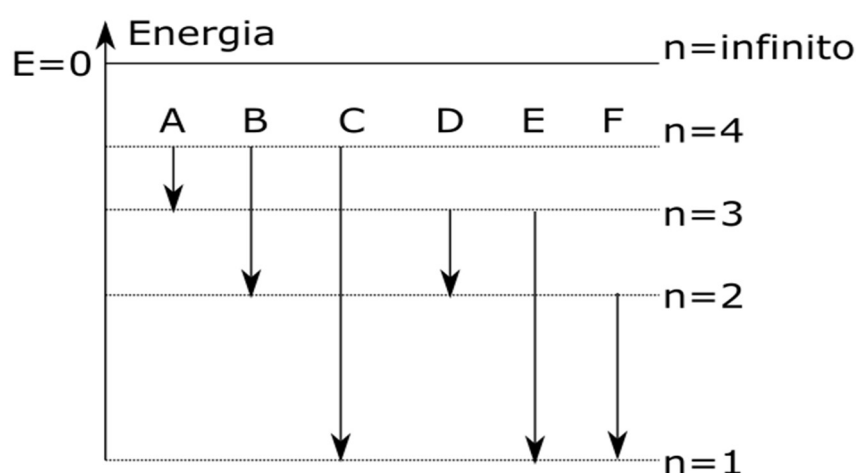
2.2.3 Quantização da energia e espectro de luz

A energia de um elétron é composta pela sua energia cinética, potencial elétrico e potencial gravitacional. A energia potencial gravitacional é desprezível se compararmos com o potencial elétrico que se apresenta em pacote de valores. Outra forma de dizer que a energia é quantizada.

Podemos dizer que a energia do elétron, ligado ao átomo, é discreta e negativa. Isto significa que o elétron está preso ao átomo por valores inteiros e não arbitrários.

Dependendo da distância em que o elétron está do núcleo, terá diferentes valores de energia. Assim, o átomo representa, para o elétron, um poço com vários degraus, como mostra esquematicamente a Figura 3.

Figura 3: Representação de níveis de energia do átomo e possíveis transições.



Fonte: Adaptado de Lupiano Dias, Ivan F., Duarte, José L.; Teixeira, Ricardo C., 2005.

De acordo com a Figura 3, o maior nível de energia para um elétron ligado ao átomo é um valor negativo infinitesimal. Quando o elétron possui energia igual ou maior que zero, ele então não estará mais ligado ao átomo.

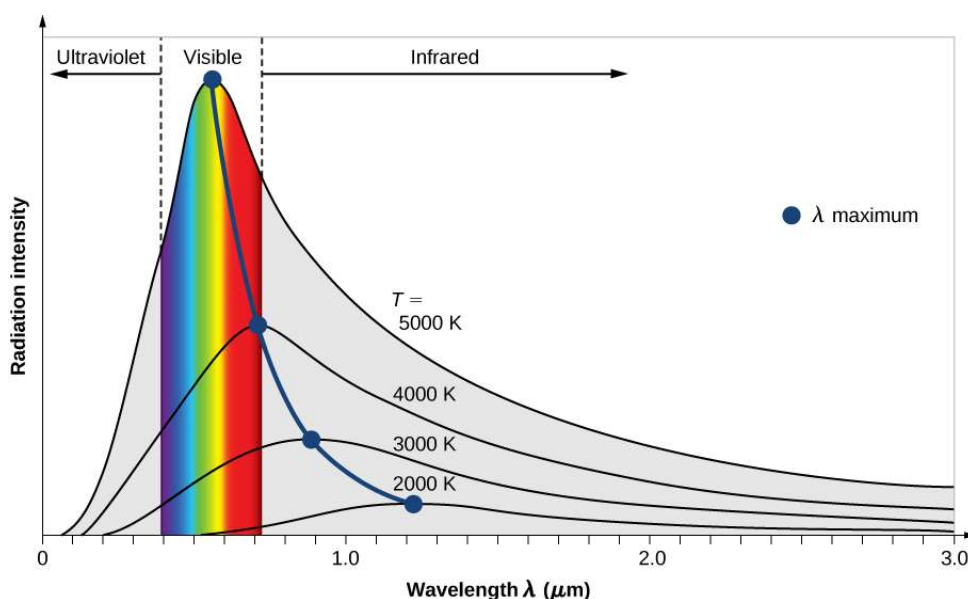
Ao perder elétrons, o átomo é definido como íon positivo, recebendo o nome específico de cátion. Mas, se o átomo ganhar mais elétrons, ele se tornará um íon negativo, denominado de ânion. A título de curiosidade, muitos compostos da natureza surgem pela atração eletrostática entre íons positivos e negativos. A exemplo disto, temos o Na^+Cl^- (cloreto de sódio ou sal de cozinha).

O elétron que gira ao redor de um átomo pode saltar entre os diferentes níveis ou degraus de energia quando receber valor equivalente da diferença de energia entre estes níveis. Quando ocorre estes saltos, o átomo está num estado excitado. Ao voltar para o estado fundamental, ele libera a energia excedente na forma de uma onda eletromagnética na faixa do visível, ou seja, como luz visível.

A compreensão da quantização da energia se deu quando a radiação do corpo negro foi compreendida. A radiação do corpo negro representa a intensidade de energia ou da radiação eletromagnética reemitida por um corpo que não absorve absolutamente nada do que recebe. Para cada valor de temperatura do corpo negro temos uma curva representativa, como pode ser observado na Figura 4.

É importante ressaltar que corpo negro é uma representação ideal de qualquer corpo que reemite toda radiação térmica incidente sobre ele e está em equilíbrio termodinâmico com seu ambiente.

Figura 4: Espectro da intensidade de radiação eletromagnética em função da frequência formulada por Planck.



Fonte: Libre Text, Physics.

O comportamento da radiação do corpo negro foi estudado em 1900, por Max Planck, que fez um ajuste matemático ou teórico para reproduzir o comportamento das curvas.

A explicação do ajuste matemático se deu quando foi considerado que a radiação emitida pelo corpo negro é quantizada. Disto surge a ideia de ‘fóton’ como representante de uma partícula de energia da onda eletromagnética.

Fótons são partículas com massa de repouso zero e com uma quantidade de energia determinada pela sua frequência de oscilação da onda eletromagnética.

A energia do fóton é dada por: $E = hf$ onde h é conhecida como constante de Planck ($6,52 \times 10^{-34} J.s$) apresentada pela equação **(4.c)**.

A solução de Planck para a radiação do corpo negro, além de introduzir a ideia de quantização da energia, também permitiu o cálculo das frequências emitidas pelas transições de níveis de energia dos elétrons no átomo.

O elétron possuirá energia igual a zero apenas quando $n = \infty$. Para os níveis onde $n > 1$, dizemos que o elétron está num estado excitado, ou seja, os elétrons estão em movimento, e se o elétron está no nível de energia $n = 1$ o átomo estará no estado fundamental ou estado de menor energia, onde a temperatura é dada por zero absoluto ($-273,16^\circ C$).

Cada elemento apresenta um valor para a energia do estado fundamental de acordo com sua quantidade de prótons, nêutrons, elétrons, geometria do núcleo, etc. Para o átomo de hidrogênio temos que as energias dos níveis são definidas por:

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \cdot 13,6 \text{ eV} \quad n = 1,2,3,\dots \quad \text{(Eq. 4.a)}$$

$$E_1 = 13,6 \text{ eV}$$

A unidade da energia é dada em elétron-volt ($1\text{eV} = 1,602 \times 10^{-19} J$). Considerando como exemplo a mudança de E_4 para E_2 energia da emissão ΔE será:

$$\Delta E = E_4 - E_2 = -\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{2^2}\right) \cdot 13,6 \text{ eV} = 2,55 \text{ eV} \quad \text{(Eq. 4.b)}$$

Esta energia será emitida na forma de um fóton com frequência correspondente relacionada pela equação:

$$\Delta E = h\nu \quad \text{(Eq. 4.c)}$$

$$h = 4,136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{Hz}^{-1} \quad (\text{Constante de Planck em eV})$$

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = 6,17 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Utilizando a equação 3.d para obter o comprimento de onda:

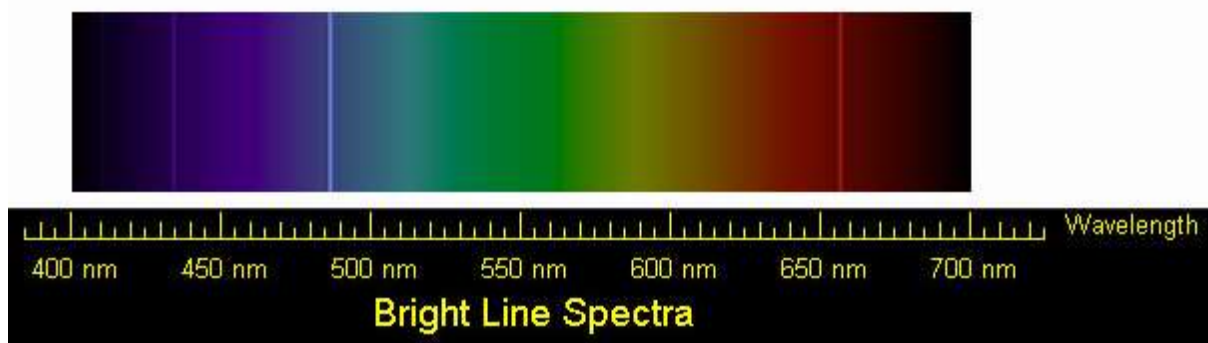
$$\lambda = \frac{c}{\nu} = 4,86 \times 10^{-7} \text{ m} = 486 \text{ nm}$$

Com base na tabela 1, esta frequência se encontra na região do azul do espectro da luz visível.

A Figura 5 representa o espectro de emissão do átomo de Hidrogênio. Observa-se uma linha azul de 486 nm. Ela informa que os elétrons do nível 2, absorveram a onda eletromagnética azul e, por isso eles saltam para o nível 4.

Cada elemento possui um espectro de emissão único porque as distâncias entre as camadas são específica para cada átomo. Isto permite a análise da composição dos elementos químicos que constituem as estrelas.

Figura 5: Espectro de emissão do Hidrogênio.



Fonte: NASA.

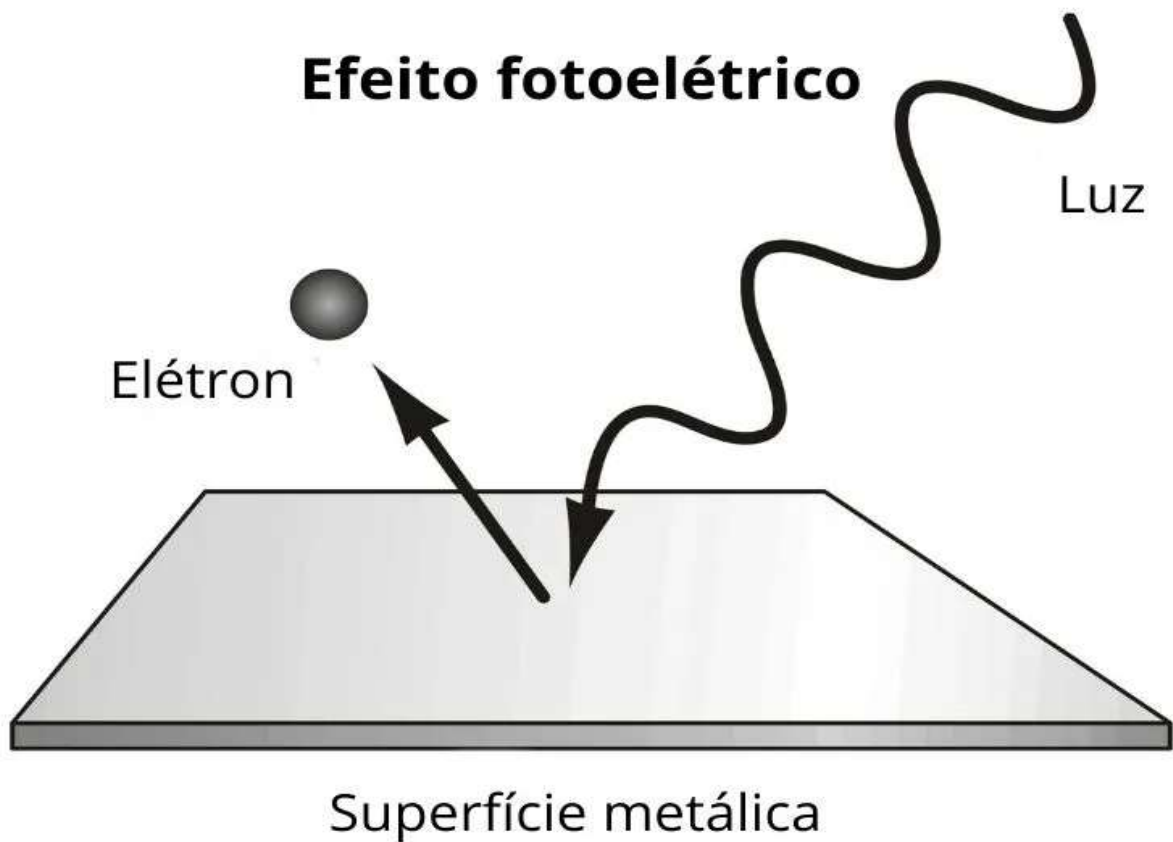
Devido à quantização de energia, o espectro de absorção de luz por determinado material apresenta linhas características escuras nas mesmas faixas que as linhas de emissão.

Uma possível situação é o elétron absorver um fóton com energia suficiente para removê-lo do átomo, esse fenômeno é denominado de efeito fotoelétrico.

Efeito fotoelétrico

O efeito fotoelétrico ocorre quando a luz incide sobre a matéria (mais comum em metais) e remove elétrons como mostra o diagrama esquemático representado na Figura 6.

Figura 6: Representação gráfica do efeito fotoelétrico.



Fonte: <https://www.preparaenem.com/fisica/efeito-fotoeletrico.htm>

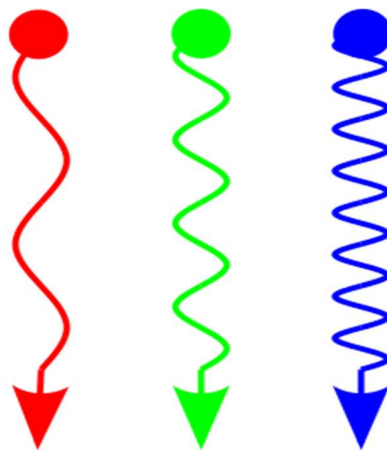
Os elétrons ejetados apresentam energia cinética que variam com a frequência da luz. A intensidade da luz não interfere na energia cinética do elétron ejetado. Quanto maior a intensidade da luz, mais elétrons ejetados com a mesma energia cinética.

O fenômeno só pôde ser explicado considerando a luz constituída por fótons. Cada fóton tem um quantum de energia. Daí a origem da palavra quântica, utilizada pelo senso comum sem nenhum respaldo científico.

A Figura 7 traz uma representação de fótons associados às suas ondas que se propagam na direção da seta. É uma representação grosseira do comportamento dual do fóton.

Na verdade, a natureza tem mostrado que partículas, como o elétron, tem comportamento ondulatório e ondas eletromagnéticas têm comportamento corpuscular, como vimos.

Figura 7: Representação de fótons com frequência/energia crescente da esquerda para a direita.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No efeito fotoelétrico a energia do fóton é absorvida integralmente pelo elétron e se a energia do fóton for maior que a energia de ligação do elétron, a energia excedente será convertida em energia cinética do elétron, dada por:

$$E_{e^-} = \frac{1}{2} m_e v^2 \quad (\text{energia cinética do elétron})$$

O fóton fornece toda sua energia para o elétron, mas parte desta energia é utilizada para vencer o potencial de ligação do elétron, portanto:

$$E_{e^-} = h\nu - W \quad (\text{Lei do efeito fotoelétrico})$$

$$E_{e^-} = E_\gamma - W \quad \text{ou} \quad \frac{1}{2} m_e V^2 = E_\gamma - W$$

Nesta equação v é a velocidade do elétron ejetado, E_γ é a energia do fóton, m_e é a massa do elétron e W é a função trabalho para se remover o elétron do átomo. A função trabalho está relacionada com a energia de ligação do elétron, esta energia é específica para cada metal e podemos representar por:

$$W = h\nu_0 \quad (\text{Função trabalho})$$

ν_0 representa a frequência mínima que o fóton incidente necessita para que ocorra o efeito fotoelétrico, neste fenômeno a intensidade do feixe de luz será proporcional a quantidade de elétrons ejetados, mas se a frequência destes fótons for inferior à ν_0 o efeito não ocorrerá. Nos experimentos realizados por Einstein, feixes de luz vermelhos não foram suficientes para a emissão de elétrons. Este comportamento indica a quantização da energia dos fótons.

Em materiais semicondutores um efeito semelhante, denominado de efeito fotovoltaico é observado.

Para compreender o efeito fotovoltaico, vamos apresentar os conceitos sobre semicondutores.

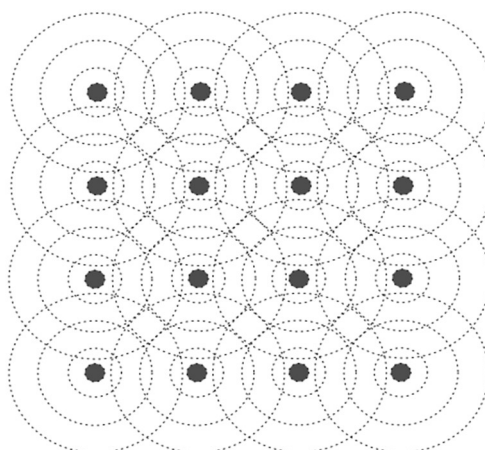
2.2.5 Semicondutores e efeito fotovoltaico

Semicondutores são sólidos cristalinos⁸ que podem permitir a passagem de corrente elétrica dependendo das condições externas, como temperatura, pressão e campo elétrico.

Quimicamente falando, os semicondutores são formados por cristais dos elementos semimetálicos da tabela periódica, como Silício e Germânio.

A Figura 8 representa uma estrutura cristalina. Os círculos pequenos representam o núcleo atômico, os círculos pontilhados representam os níveis de energia do átomo. A sobreposição dos níveis de energia, como ocorre num cristal, contendo na ordem de 10^{23} átomos, resulta na formação de uma banda de energia permitida contínua.

Figura 8: Representação de uma estrutura cristalina com intersecção dos níveis de energia.



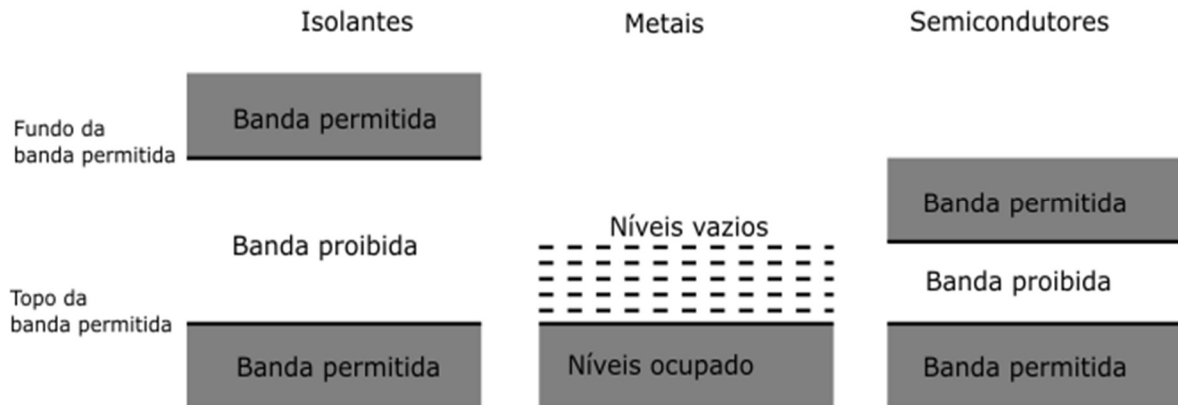
Fonte: Adaptado de Lupiano Dias, Ivan F., Duarte, José L.; Teixeira, Ricardo C., 2005.

As bandas são regiões que comportam níveis eletrônicos muito próximos, por isso, os elétrons podem se deslocar livremente se elas não estiverem completas.

A distância entre uma banda e outra, caracteriza o sólido como condutor, semiconductor ou isolante. A Figura 9 representa estes três tipos de sólidos cristalinos.

⁸ Cristais são sólidos que apresentam organização espacial, de longo alcance, na posição de seus elementos constituintes. (Lupiano Dias, Ivan F., Duarte, José L.; Teixeira, Ricardo C., 2005).

Figura 9: Representação de bandas de energia para os isolantes, condutores e semicondutores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observe que nos sólidos, denominados como isolantes elétricos, existe uma grande distância (denominada de banda proibida), entre as bandas permitidas. Então, os elétrons não conseguem saltar de uma banda permitida para outra (Lupiano Dias, Ivan F., Duarte, José L.; Teixeira, Ricardo C., 2005).

Nos sólidos considerados condutores, as bandas permitidas estão muito próximas e há uma banda vazia. Qualquer valor de energia que os elétrons receberem, podem se deslocar para a banda vazia. Os níveis ocupados e vazios são conhecidos como banda de valência e banda de condução, respectivamente.

A compreensão da formação das bandas, permitiu que o homem manipulasse os isolantes de tal forma a criar semicondutores com diferentes intervalos de energia entre as bandas de condução. Para reduzir a banda proibida e permitir maior fluxo de elétrons, os cristais podem ser 'dopados' com outros elementos e gerar buracos ou carga excedente na rede cristalina originária. Por exemplo, o Arsênio é comumente utilizado para a dopagem tipo n (negativa) e o Boro para o tipo p (positiva).

Na dopagem tipo n, o Arsênio doa um elétron para a banda de condução, o elétron na banda de condução é denominado elétron livre, seu papel é conduzir corrente elétrica.

Na dopagem tipo p, o Boro recebe elétron da estrutura cristalina para formar uma ligação covalente e formar uma vacância⁹ na banda de condução. Tanto o buraco, como o elétron, conduz corrente elétrica.

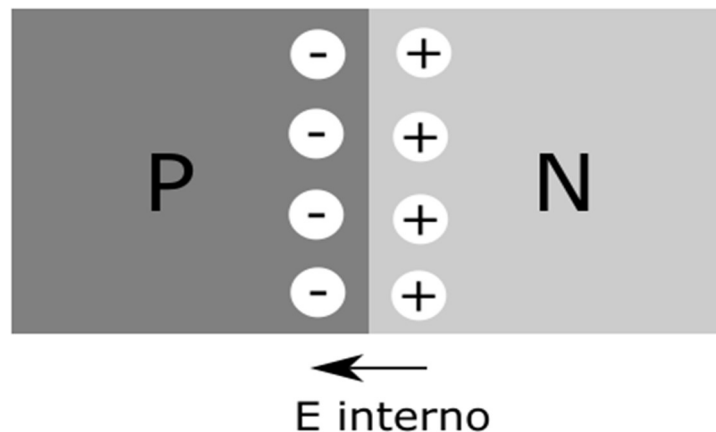
Ao unir um semiconductor tipo p e um tipo n, forma-se um campo elétrico na junção porque as cargas negativas se acumulam na camada tipo p e as cargas positivas se acumulam na camada tipo n, assim não há elétrons livres na banda de condução.

Quando a diferença de potencial externa introduz vacâncias na camada p, elétrons são removidas da região da junção, enfraquecendo o campo elétrico interno e permitindo o fluxo da corrente elétrica.

Se a diferença de potencial for invertida (sentido oposto) a corrente elétrica é bloqueada. Este é princípio de funcionamento do diodo, que permite a passagem da corrente elétrica apenas no sentido de p para n.

A Figura 10 traz uma representação esquemática para um semiconductor do tipo p-n.

Figura 10: Representação da junção p-n e seu campo induzido.



Fonte: Elaborado pelo autor

Na região da junção há uma barreira de potencial característica do semiconductor, esta barreira determina a diferença de potencial mínima para que o diodo possa conduzir corrente elétrica no sentido direto.

Para diodos de Silício esta diferença de potencial está em torno de 0,6 V e para diodos de Germânio 0,3 V. Para um diodo ideal, esta diferença de potencial seria nula,

⁹ Ausência de elétron ou buraco.

permitindo corrente elétrica no sentido direto e bloqueando completamente a corrente elétrica no sentido reverso.

Para LEDs que emitem ondas eletromagnéticas na região do espectro visível, a diferença de potencial para a condução de corrente elétrica, está no intervalo entre 1,8 - 3,2 V.

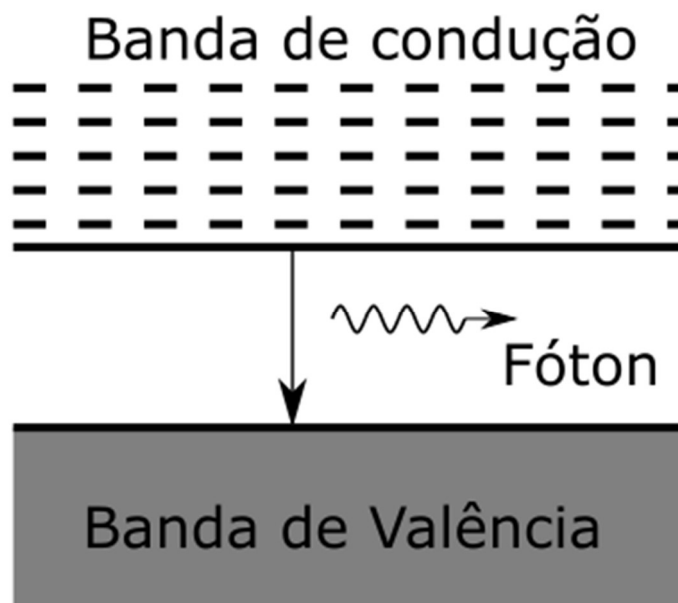
A figura 11 representa o fenômeno da emissão de fóton por recombinação. Neste fenômeno a energia elétrica fornecida ao LED permite que o elétron salte da banda de condução para a banda de valência, emitindo um fóton com comprimento de onda proporcional a diferença de energia entre as bandas.

Ao saber o comprimento de onda ou frequência do fóton emitido, podemos medir a diferença de potencial de ativação de LEDs monocromáticos e calcular a constante de Planck utilizando a equação 4.c. ao considerar ΔE a energia da lacuna de energia entre as bandas.

Ao isolar a constante de Planck na equação temos:

$$h = \frac{\Delta E}{\nu}$$

Figura 11: Representação da emissão de fóton por recombinação.



Fonte: Elaborado pelo autor

A relação entre diferença de potencial em V e energia, dada em eV, é de 1:1, afinal eV é a energia de um elétron em um potencial de 1 V, portanto ΔE tem o mesmo valor que a tensão presente nos terminais de LED. A frequência do fóton pode ser obtida a partir do comprimento de onda:

$$v = \frac{c}{\lambda} \quad (\text{Relação entre frequência e comprimento de onda})$$

A tabela 2 traz o comprimento de onda médio calculado quando somamos os comprimentos de onda, máximos e mínimos do intervalo e dividimos por dois. Utilizaremos estes valores aproximados como referência para o comprimento de onda associado à cor do LED, dado que os LEDs fornecidos pelas lojas de eletrônicos não informam seu comprimento de onda ou frequência.

Os LEDs podem também absorver a energia de fótons incidentes e convertê-la em corrente elétrica com baixa eficiência. Este efeito é conhecido por efeito fotovoltaico.

O efeito fotovoltaico é similar ao efeito fotoelétrico, mas este último não emite elétrons.

Tabela 2 - Tabela com intervalos de comprimento de onda para cores de LEDs.

Cor	Intervalo do comprimento de onda (nm)	Comprimento de onda médio (nm)
Vermelho	~ 625-740	~ 682,5
Laranja	~ 590-625	~ 607,5
Amarelo	~ 565-590	~ 577,5
Verde	~ 500-565	~ 532,5
Ciano	~ 485-500	~ 492,5
Azul	~ 440-485	~ 462,5
Violeta	~ 380-440	~ 410,5

Fonte: Adaptado de <https://www.jameco.com/Jameco/workshop/CircuitNotes/circuit-notes-led.html>

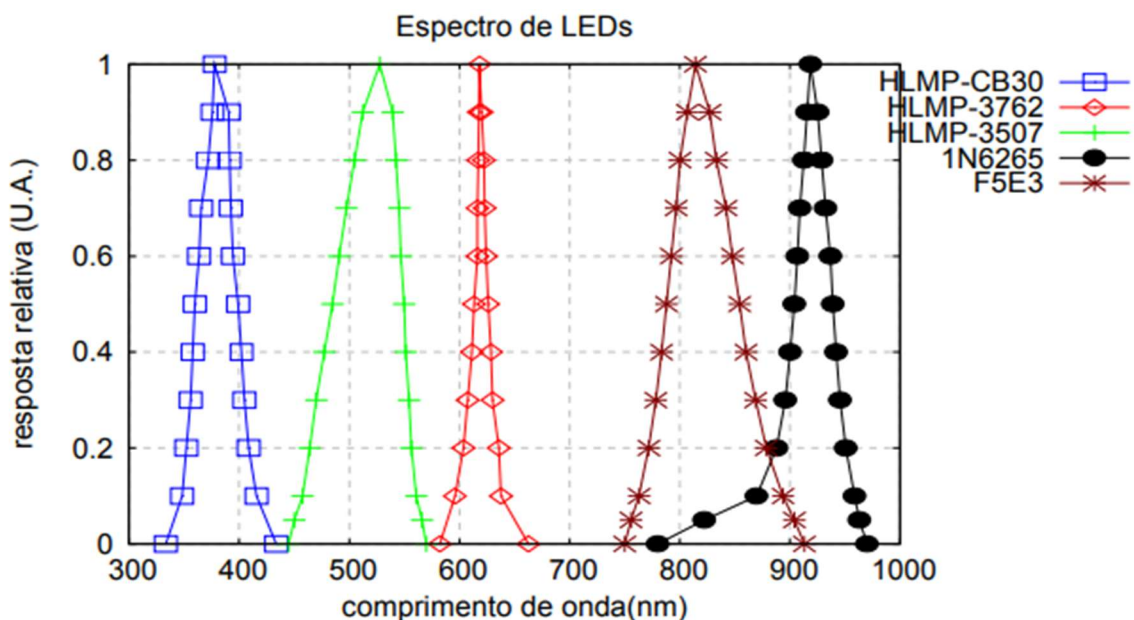
O efeito fotovoltaico permitiu a criação dos painéis fotovoltaicos ou popularmente conhecidos por painéis solares, que convertem energia luminosa em

energia elétrica com uma eficiência aproximada de 20%, ou seja, para cada 100 Joules¹⁰ de energia luminosa apenas 20 J são convertidos em energia elétrica. Esta ineficiência está relacionada com as bandas de absorção do semicondutor.

Em painéis fotovoltaicos a junção P-N tem área igual a superfície do painel e a largura da banda proibida é desenvolvida para apresentar a melhor eficiência possível.

Haag e Krenzinger observaram, que o pico de resposta espectral de absorção da energia eletromagnética de um LED monocromático é próximo do seu pico de emissão. Este efeito compromete a eficiência dos painéis solares. Isto porque para determinados comprimentos de onda, a eficiência do painel será próxima de 100% (ou seja, a conversão entre a energia da onda eletromagnética em corrente elétrica induzida será máxima). Para outros valores, a conversão é próxima de zero. Observe que os pesquisadores, citados, consideraram a intensidade dos fótons absorvidos (fótons/segundo) proporcional à corrente elétrica produzida pelo LED, dada em Ampere (carga/segundo).

Figura 12: Resposta espectral de LEDs com pico nos comprimentos de onda de: 375 nm (HLMP-CB30), 525 nm (HLMP-3507), 625 nm (HLMP-3762), 815 nm (F5E3) e 920 nm (1N6265).



Fonte: Haag, R.; A. Krenzinger, A., 2006.

¹⁰ Joule, abreviado por J representa a energia no Sistema Internacional de medidas.

A figura 12 apresenta a resposta relativa para cada LED, observando-se o pico de corrente ocorre quando o comprimento de onda incidente sobre o LED é igual ao comprimento de emissão do LED.

O espectro de absorção de fótons possibilitou o desenvolvimento de câmeras fotográficas digitais com a utilização de sensores CCD (*Charge-Coupled Device*) e CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*). Esses dispositivos foram desenvolvidos para imitar os cones dos olhos humanos que nos dá a percepção de cores.

2.2.6 Percepção de cores

Esta seção é baseada principalmente no livro “**Ryan’s Retina**” de Wilkinson, C. P.; Hinton, David R.; Sada, Srinivas R.; Wiedemann, Peter.

As cores é o resultado da interação da luz com o pigmento presente no objeto colorido. O pigmento terá a função de refletir e/ou absorver alguns comprimentos de ondas para produzir a cor desejada. Esta onda eletromagnética resultante deve ser refratada pela nossa pupila para formar a imagem na retina.

O olho humano possui dois tipos de células sensíveis à luz, os cones e os bastonetes.

Os cones são responsáveis pela percepção de cores enquanto os bastonetes são responsáveis pela visão noturna.

Os cones são células capazes de gerarem impulsos nervosos ao serem incididos com fótons numa banda de frequências, há três tipos de cones e podem ser classificados pelas cores as quais são mais sensíveis, essas cores são vermelha(L), verde(M) e azul(C).

Os bastonetes são células sensíveis à luz de baixa intensidade. Estas células permitem que enxerguemos em lugares escuros, mas possuem um tempo de “aquecimento” para se ativar que leva em entre 15 a 30 minutos em baixa luminosidade. Baixa luminosidade se refere a luminosidade na qual a visão não consegue detectar os fótons do ambiente sem o auxílio dos bastonetes, cenário próximo da escuridão total, como por exemplo a luz das estrelas noturnas até a iluminação do luar.

Quando os bastonetes se ativam adquire-se a visão noturna natural que permite distinguir os contornos dos objetos dentro do campo de visão, desde que

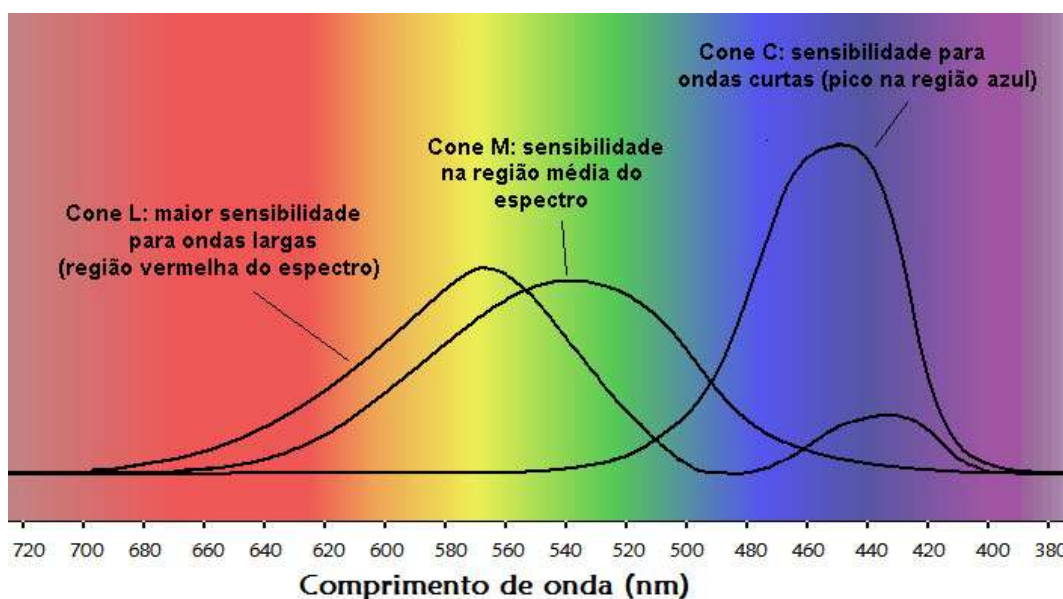
exista alguma luminosidade ambiente, afinal se é necessário fótons de luz para que os bastonetes possam operar.

A Figura 13 apresenta os espectros de sensibilidade para os três conjuntos de células cone do olho humano. Ao somar-se à sensibilidade de cores para cada cone obtém-se o espectro de visão fotópica apresentado na Figura 14, a qual apresenta o pico de sensibilidade do olho humano entre as bandas verde e amarela do espectro de cor. Porém, algumas variações na percepção de cor, por cada indivíduo, pode ocorrer, devido a diferentes quantidades de células cones.

Quando um tipo de célula cone é menor que as outras, por fatores genéticos ou por lesões, podemos ter o daltonismo, a discromatopsia ou a discromopsia, e o indivíduo apresentar dificuldades em diferenciar cores como vermelho e verde.

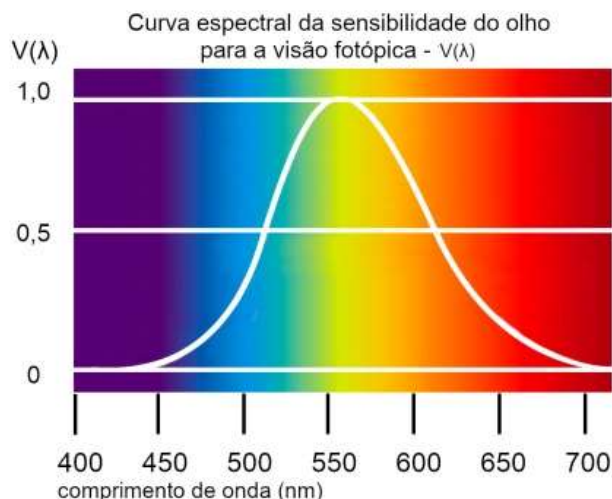
As cores emitidas pelas telas digitais como as de TV, celular, monitor, etc. são resultantes da soma de três cores monocromáticas: Vermelho, Verde e Azul. Este sistema é conhecido como RGB, acrônimo para estas cores em inglês (*Red, Green, Blue*). Estas cores estimulam os cones em seu pico de sensibilidade, passando a impressão de que a cor que é vista na tela é a mesma de uma cor natural (RIGGS, Lorrin A., 1967).

Figura 13: Espectro de sensibilidade dos cones do olho humano em função do comprimento de onda da luz visível.



Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Sensibilidade-dos-tres-tipos-de-cones-no-olho-humano-7-com-as-denominacoes_fig2_271123094

Figura 14: Curva da sensibilidade de cor do olho humano para visão fotópica.



Fonte: <https://ipemsp.wordpress.com/2019/08/26/medindo-a-luz/>

O padrão RGB é fundamentado na teoria tricromática de Young-Helmholtz que permite a percepção de qualquer cor do espectro de luz visível com a soma das cores vermelha, verde e azul (RIGGS, Lorrin A., 1967). Existe uma razão de mixagem das cores RGB, de 3:6:1 para obter fidelidade da cor.

Este fenômeno ocorre devido a forma com que o cérebro interpreta cor. Por exemplo, a cor amarela pode ser indistinguível aos olhos humanos da cor formada pelas luzes monocromáticas verde e vermelha.

Ressaltamos que as cores RGB não são idênticas às cores reais de objetos, são apenas aproximações para se replicar as cores complexas do mundo real ao estimular os cones individualmente. A percepção da cor varia de ser humano para ser humano (Hooi, 2013). Desta forma a percepção de cor pelo olho humano envolve a interação entre fenômenos de física, química e biologia.

2.3 Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel

Uma teoria de aprendizagem representa uma tentativa de descrever como se aprende e o que acontece com o novo conhecimento adquirido. É uma área da psicologia, a qual a pedagogia tenta utilizar e construir pontes com metodologias de ensino.

Neste trabalho, apresentamos uma ponte construída a partir da teoria descrita por Ausubel.

Ausubel, nascido em 25 de outubro de 1918 em Nova Iorque, se graduou em psicologia em 1939 como aluno de honra pela Universidade da Pensilvânia.

Em 1943 graduou em medicina na Universidade de Middlesex, quando então, estagiou no Hospital Gouverneur, localizado nas periferias ao leste de Manhattan, Nova Iorque.

Durante o serviço militar, prestado no Sistema Público de saúde dos Estados Unidos, cursou, na Universidade de Columbia, mestrado e doutorado em desenvolvimento psicológico. Exerceu a docência em várias instituições de ensino.

Em 1973, Ausubel se aposentou da vida acadêmica e se dedicou à psiquiatria prática. Durante este período publicou diversos livros e artigos em revistas de psiquiatria e psicologia.

Ausubel publicou 4 livros: desenvolvimento do ego e psicopatologia (1996), **A aquisição e retenção do conhecimento (2000)**, Teoria e problemas do desenvolvimento adolescente (2002) e Morte e a condição humana (2002) (grifo nosso). Ausubel faleceu dia 9 de julho de 2008.

No livro: **A aquisição e retenção do conhecimento**, Ausubel apresenta a Teoria da Aprendizagem Significativa, conhecida abreviadamente por TAS. Esta teoria descreve como se dá o processo de aprendizagem humana, na sala de aula, de forma significativa.

Para Ausubel, a aprendizagem significativa é aquela que o aluno faz quando estabelece hierarquias entre os conceitos, modificando seus subsunçores. Antes de falarmos mais sobre subsunçores, vamos pontuar que a aprendizagem ocorre no cérebro. Este órgão é responsável por quase todas as funções cognitivas e nervosas do nosso corpo, é formado por células denominadas neurônios.

Os neurônios operam por meio de reações químicas e elétricas que permitem conexões entre si, formando redes neurais, responsáveis por processar sinais nervosos e tomar decisões.

Um exemplo do funcionamento destas redes pode ser verificado quando tocamos em um objeto muito quente. Imediatamente retiramos nossa mão porque o sistema nervoso autônomo, responsável pelo controle de ações

involuntárias do corpo, como respiração, controle de batimentos cardíacos, temperatura, digestão, responde imediatamente à estímulos externos.

O esquecimento é uma operação importante para o funcionamento do cérebro, dado que as ligações químicas consomem energia e reduz a quantidade de dendritos e axônios livres para novas conexões. Por esta razão o cérebro seleciona o que se deve armazenar ou descartar com base nas reações químicas. De forma simplificada, eventos marcantes e/ou emocionantes são armazenados com maior facilidade.

O cérebro possui bilhões de arranjos entre neurônios e cada um destes arranjos responderá de acordo com determinados sinais. Por exemplo, após aprendermos a somar dois números inteiros, utilizaremos este conhecimento para reconhecermos outros símbolos numéricos e o símbolo de adição. Estes saberes são sinais nervosos de entrada para a rede neural completar a operação.

Existem múltiplas conexões necessárias entre redes para se realizar uma operação matemática.

Considera-se que a ordem da aprendizagem é de extrema importância para as redes neurais. Isto porque as redes operam de forma precisa, rápida e eficiente se estiverem conectadas de forma direta.

A aprendizagem exige a identificação e significação de símbolos (Ausubel, 2000). Símbolos são comando neurais.

Para Ausubel esta estrutura cognitiva se amplia por meio da **aprendizagem por assimilação**. Ou seja, uma nova informação ou novo conhecimento é assimilado na estrutura neural já pronta. Para isto, deve haver relação entre o conhecimento prévio e o novo. Ausubel denomina de subsunçores os conhecimentos prévios necessários para ancorar um novo conhecimento (Moreira, 1999).

Para iniciar o processo de ensino, o professor deve identificar os subsunçores dos seus alunos. Caso, eles não os tenham, o professor deve fornecer o que Ausubel chamou de Organizadores Prévios. Ou seja, os organizadores prévios são conceitos fundamentais ou básicos e elementares para o entendimento de um novo conceito. Os organizadores prévios servem para integrar o novo conhecimento com o conhecimento já presente na estrutura cognitiva do aluno, ou seja, integrar o novo conhecimento ao que o aluno já sabe.

Para Ausubel, a aprendizagem pode ocorrer de duas formas: aprendizagem mecânica ou aprendizagem significativa, porém uma pode ser requerida para efetivar a outra.

A aprendizagem mecânica é definida como a aprendizagem que ocorre por meio da memorização, repetição sem que a nova informação se relacione com qualquer outra já presente na estrutura cognitiva do aluno.

Diversamente, na aprendizagem significativa, os novos conhecimentos precisam se relacionar de forma lógica e ordenada com os conhecimentos já presentes na estrutura cognitiva do indivíduo (Ausubel, 2000). Além do estabelecimento de uma lógica hierárquica, o novo conhecimento precisa ser substantivo e não arbitrário. Ou seja, só se considera aprendizagem significativa o que o indivíduo consegue explicar com suas próprias palavras.

Existem outras formas para aquisição do conhecimento, por exemplo a aprendizagem por descoberta, na qual o indivíduo aprende por meio de observações, relação entre fenômenos, descoberta de leis, etc.

Outra forma de aprender é denominada de aprendizagem por recepção. Nesta, o indivíduo recebe o conhecimento pronto, transmitido pelo professor numa aula expositiva e, ao atuar ativamente sobre ele, consegue relacioná-lo aos conhecimentos já presentes em sua estrutura cognitiva.

A aprendizagem por recepção é considerada ineficaz por alguns pensadores, mas Ausubel considera que a aprendizagem não depende exclusivamente do meio utilizado para se obter o conhecimento, mas sim pela forma de relacioná-los com os conhecimentos prévios. Dizendo de outro modo, os métodos de ensino são diversos, mas a aprendizagem ocorre no aluno quando ele relaciona os conceitos hierarquicamente. Ausubel alerta que às vezes, para se chegar na aprendizagem significativa, o aluno deve passar pela aprendizagem mecânica. A aprendizagem mecânica é uma importante etapa que antecede a aprendizagem significativa (Moreira, 1999).

A forma como o aluno pode assimilar novos conhecimentos é importante para Ausubel. Ele distinguiu três formas:

1- **Subordinação:** Ocorre de forma derivativa, da qual o novo conhecimento é apenas um exemplo de um conhecimento previamente aprendido. Ou

pode ser correlativa, na qual o novo conhecimento, adiciona significado ao conhecimento anterior.

2- **Superordenação:** Ocorre quando o novo conhecimento é uma generalização de conhecimentos anteriores. Esta forma de aprendizagem apresenta maior dificuldade para o ser humano dado sua abrangência e complexidade.

3- **Aprendizagem combinatória:** Ocorre quando novos conhecimentos estão na mesma hierarquia dos conhecimentos anteriores e não possuem vínculos diretos com os conhecimentos que serviram como base, estes conhecimentos podem se interconectar com outros conhecimentos ao longo do crescimento da estrutura cognitiva.

A subordinação pode ser exemplificada quando a criança aprende o som das sílabas como “ba” e “la”, o “la” é apenas mais um exemplo entre as sílabas terminadas em “a”, mas ao juntar “ba” e “la” temos um novo significado: a palavra “bala” que representa um objeto.

A superordenação pode ser exemplificada quando se aprende conjuntos numéricos além dos naturais, como conjunto dos números inteiros, racionais, irracionais, reais, complexos etc. Estes conjuntos representam números, mas cada conjunto é mais amplo e abstrato que os conjuntos anteriores.

A aprendizagem combinatória pode ser exemplificada pela biologia quando calculamos a probabilidade de o filho de um casal herdar determinado gene. Neste exemplo há a combinação dos conceitos de estatística e de genética, mas ambos possuem o mesmo grau de importância e não estão diretamente relacionados.

Da a importância da TAS para o desenvolvimento deste trabalho, no quadro 2 apresentamos um resumo sobre os tipos de aprendizagem, como definido por Ausubel.

Quadro 2: Quadro resumo dos tipos de aprendizagem e suas respectivas formas de relacionar informações.

Tipo de aprendizagem	Formas de relacionar as informações
Assimilação	Na aprendizagem por assimilação os conhecimentos são relacionados principalmente pela subordinação e superordenação. Esta é a forma como a neurociência moderna compreende a aprendizagem humana (Bryce, T. G. K., e E. J. Blown, 2023). A estrutura cognitiva sempre busca relacionar as novas informações com as informações já presentes na estrutura cognitiva.
Descoberta	Na aprendizagem por descoberta, a superordenação é a forma predominante de relacionar as informações, requerendo uma estrutura cognitiva formada com todos os conceitos necessários para se aprender o novo conceito. Esta forma de aprendizagem é lenta, devido ao tempo necessário para o desenvolvimento de toda a estrutura cognitiva e propicia a erros de interpretação pelo aprendiz. Embora apresente tais problemas, conceitos aprendidos por descoberta podem ser retidos por mais tempo devido ao processo cognitivo para a formação das ligações neurais.
Recepção	Na aprendizagem por recepção os conhecimentos novos são apresentados ao aprendiz e por meio da subordinação, superordenação e aprendizagem combinatória os novos conhecimentos podem ser relacionados. O aprendiz é menos suscetível à interpretação incorreta dos conceitos, entretanto a recepção de conhecimentos prontos pode diminuir as chances de retenção.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para se obter esta aprendizagem significativa é necessário satisfazer duas condições: 1) o material de aprendizagem deve ser potencialmente significativo e 2) o aprendiz deve apresentar predisposição para aprender (Moreira, 2013).

A segunda condição é mais difícil de satisfazer, uma vez que não se trata apenas de motivação para aprender, mas sim da predisposição a efetuar as relações entre os conhecimentos pré-existentes e os novos (Ausubel, 2000).

A primeira condição implica que o material tenha significado lógico, ou seja, relacionável de maneira não-arbitrária e não-literal a estrutura cognitiva. Isto significa que o aprendiz deve ter os conhecimentos prévios relevantes em sua estrutura

cognitiva para que consiga fazer as relações de forma não-arbitrária e não-literal ao novo conhecimento (Moreira, 2013).

Segundo Moreira (2013), não haverá aprendizagem significativa se uma das condições citadas acima não forem satisfeitas, sem um material potencialmente significativo e sem a disponibilidade de conhecimentos prévios relevantes ou sem a predisposição do aprendiz para aprender.

A elaboração de um material potencialmente significativo ou denominado de Unidade de Ensino Potencialmente Significativa ou UEPS, pelo professor é um dos desafios de maior complexidade da TAS.

A UEPS é uma sequência didática previamente elaborada, que leva em consideração o conhecimento presente na estrutura cognitiva do aluno e, leva em consideração o “sentido” de apresentação dos conceitos (Ausubel, 2002).

Segundo Moreira e Masini (2001) cada disciplina acadêmica tem uma estrutura articulada e hierarquicamente organizada de conceitos que constitui o sistema de informações dessa disciplina. Cabe ao professor identificar, sistematizar e constituir um sistema de informações sobre a disciplina, além de apresentar a disciplina como um conjunto de informações particular com capacidade de resolver problemas. Além disso, para Ausubel, a apresentação dos conceitos deve descer (diferenciação progressiva) e subir (reintegração conciliadora) as hierarquias conceituais.

Ambos os sentidos, propostos por Ausubel, devem ser privilegiados no material a ser elaborado pelo professor.

Moreira e Masini (2001) chama esta dinâmica de um ensino do tipo “desce-sobe”, a qual, privilegia a diferenciação dos conteúdos de forma descendente (dos conceitos mais gerais para os mais específicos) e a reconciliação integrativa (dos mais específicos para os mais gerais). O ensino do tipo sobe e desce faz parte de um processo único dentro da teoria da aprendizagem significativa chamada de diferenciação progressiva e reintegração conciliadora.

Esta capacidade de diferenciação está diretamente ligada ao fato da assimilação de novos conhecimentos na estrutura cognitiva do aprendiz.

Então, podemos apresentar o Mapa Conceitual como recurso importante para a TAS. Mapa Conceitual é, em resumo, diagrama de conceitos e palavras que se relacionam hierarquicamente (Moreira, 2013).

Para esclarecer e exemplificar a elaboração de um Mapa Conceitual, a Figura 15 mostra um Mapa Conceitual, elaborado pelo autor, sobre o efeito fotoelétrico.

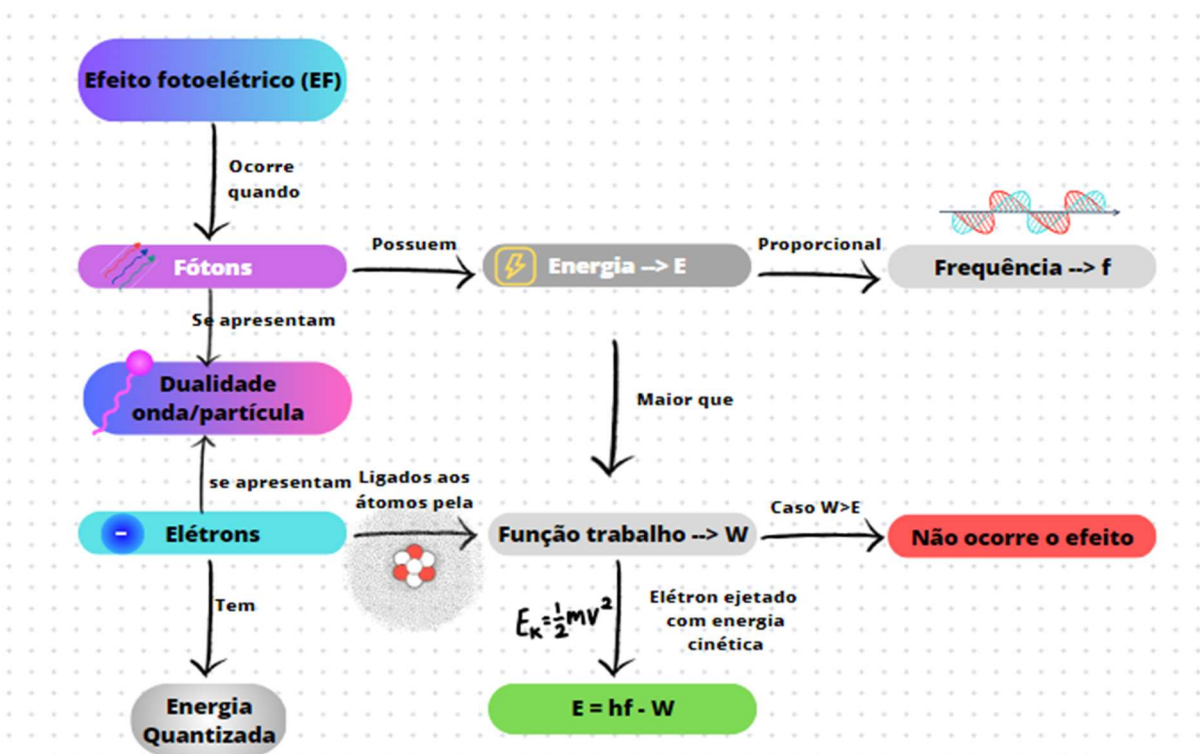
As cores e desenhos servem para facilitar a assimilação dos conceitos e tem o papel secundário de atrair a atenção para o Mapa.

Por outro lado, as práticas experimentais também são recursos importantes que tem sido utilizado para a aprendizagem significativa.

As práticas experimentais podem ser divididas em três tipos: Demonstrações, realização de experimentos e construção de experimentos.

Demonstrações são práticas que demonstram a ocorrência de um fenômeno, por exemplo, podemos demonstrar que um painel solar gera energia quando exposto ao sol se conectarmos uma lâmpada em seus terminais. Este tipo de prática tem como objetivo despertar o interesse de alunos pelo tema, mas não proporciona aprofundamento (Arruda e Laburú, 1996).

Figura 15: Exemplo de Mapa Conceitual para o efeito fotoelétrico



Fonte: Elaborado pelo autor

As realizações de experimentos envolvem a tomada de medidas e observações de fenômenos, ajudando a estabelecer relações entre a teoria e a realidade. Esta

atividade se aprofunda mais no tema e pode ser realizada antes dos conceitos (de forma investigativa) de forma a estabelecer as relações entre valores teóricos e experimentais para as grandezas físicas.

A construção de experimentos é uma atividade mais aprofundada da experimentação. Neste tipo de atividade, os alunos pesquisam sobre experimentos de um determinado tema e, tentam construí-lo para apresentar aos outros alunos (Arruda e Laburú, 1996).

No processo de construção, o aluno aprende sobre as relações entre teoria, realidade e reflete sobre a precisão de medida. Porém, a aplicação em sala de aula apresenta desafios incomensuráveis, dado ao contexto dos alunos das escolas públicas.

Quanto ao processo avaliativo, a ocorrência da aprendizagem significativa capacita o aluno a externalizar, explicar e justificar suas ideias.

A elaboração de um Mapa Conceitual, além de auxiliar na organização das ideias, também é um bom recurso para auxiliar o professor observar o número de conexões hierárquicas que o aluno consegue fazer naquele momento.

É importante salientar que o processo de avaliação não é definitivo. O aluno vai ampliando suas relações hierárquicas de forma contínua e o próprio processo de crescimento confunde com o processo avaliativo. Isto porque, a linha de raciocínio, utilizada pelo aluno na solução de um problema, indica a compreensão dos conceitos de forma significativa. Então, a resolução de um problema tanto faz parte de um processo avaliativo quanto do processo de aprendizagem.

Desta forma, o processo de avaliação da aprendizagem significativa se confunde com o próprio processo de implementação da UEPS.

É importante salientar ainda que, o ponto máximo da aprendizagem significativa é a autonomia do aluno. Enquanto ela não ocorrer, o professor deve ir gerenciando e auxiliando o aluno com as atividades propostas, observando o ensino do tipo sobe e desce, como já apontado aqui.

2.4 Sequência Didática, Unidade Didática e UEPS

Uma Sequência Didática, SD representa uma organização completa de conteúdos e atividades de ensino, separadas por unidades específicas, denominadas Unidades Didáticas, UD (Zabala, 1998).

Dito de outro modo, uma SD representa uma sequência de atividades didático metodológicas, planejada e articulada, que parte de uma teoria de aprendizagem.

Podemos dizer grosseiramente, que uma SD representa a ponte, construída pelo professor, entre uma teoria de aprendizagem, desenvolvida pela psicologia, com metodologias didático-pedagógicas, desenvolvidas pela pedagogia. Uma SD deve ter começo, meio e fim.

Zabala (1998) mostra, criticamente, que os passos de uma SD tradicional, pode ser assim resumidos:

1. **Comunicação da lição** - O tema é exposto e explicado enquanto os alunos tomam nota. O professor permite perguntas e as respondem se for oportuno. Ao acabar, se define a parte do tema que será objeto da prova.
2. **Estudo individual sobre o livro-texto** - Cada aluno realiza o estudo do tema individualmente.
3. **Repetição do conteúdo aprendido** - Cada aluno memoriza individualmente o conteúdo da lição para a prova.
4. **Prova ou Exame** - Durante a aula os alunos respondem individualmente as perguntas do exame.
5. **Avaliação** - O professor comunica aos alunos os resultados obtidos.

No exemplo citado acima, os passos da SD não valorizam o conhecimento prévio dos alunos. Ao nosso ver, esta característica está relacionada com a pedagogia tradicional, cujo ponto máximo é considerar o aluno como uma folha em branco.

Nesta seara, a escola tem a função de transmitir as informações de forma unidirecionada, do professor para o aluno. Quanto maior a quantidade de informações transmitidas, melhor será o processo de ensino. Como consequência, a avaliação mede a capacidade do aluno em reter as informações. Outro fator importante é o direcionamento do conteúdo, do mais simples para o mais complexo. Espera-se que ao final do processo, o aluno possa sintetizar os conteúdos vistos de forma fragmentada, sintetizando-os e abstraindo-os, para formar a ideia do todo.

Para Zabala (1998), o professor deve proporcionar atividades que exijam cooperação mútua entre os alunos. Assim, o processo de ensino será uma via de mão dupla, alunos e professores ensinam e aprendem. As interações permitem que os alunos aprendam uns com os outros e reavaliem seus conceitos.

Atividades como: apresentação de seminários, realização de pesquisas, execução de atividades experimentais, entre outras, podem propiciar as interações necessárias para promover a aprendizagem. Na preparação de um seminário, por exemplo, os alunos pesquisam, organizam, hierarquizam conceitos, selecionam materiais, explicam, entre outras funções que exigem desenvolvimento cognitivo.

É importante ressaltar aqui a importância do professor ensinar o 'como se faz uma pesquisa'. Isto porque a internet, fonte de consulta mais utilizada pelos estudantes do ensino fundamental e médio, fornece inúmeros dados equivocados, seja por intenção ou não, de manipulação dos dados.

Durante a execução de uma atividade experimental, o aluno deve ser conduzido a pensar sobre os limites de precisão do equipamento e procedimento, favorecendo um aprendizado que vai além da compreensão dos conceitos, ou pior, da memorização deles.

Estas atividades são de alta complexidade, ou seja, são atividades que exercitam o processo de construção da autonomia do aluno (Arruda e Laburú, 1996).

Como, apontado por Zabala (1998), ao final de uma SD, é necessário a aplicação de uma avaliação para verificar o nível de aprendizagem. A avaliação pode ser uma prova com questões e exercícios para serem resolvidos durante a aula.

Questões dissertativas permitem o professor interpretar o nível de compreensão dos alunos e detectar possíveis equívocos conceituais.

A resolução de exercícios exige que o aluno desenvolva uma linha de raciocínio coerente com a questão, que deverá ser corretamente interpretada e mostre habilidades com a manipulação da matemática, por exemplo.

Uma SD que priorize o levantamento do que o aluno já sabe e promova a interação deste conhecimento com a nova informação, está de acordo com a TAS.

Além disso, ainda de acordo com a TAS, a SD deve iniciar com a apresentação do conteúdo como um todo, do mais geral para o mais específico e depois do mais específico para o mais geral. Observe que não se espera que o aluno generalize o conteúdo, ampliando seu modelo teórico. Isto já é fornecido para ele de tal forma que faça sentido com aquilo que ele já sabe. Estas especificidades, propiciou chamar a SD de UEPS.

Espera-se que uma UEPS promova a aprendizagem significativa. Para Moreira (2013) a aprendizagem significativa representa a obtenção de significados, a

capacidade de explicar e de hierarquizar os conceitos, de aplicar o conhecimento em situações-problema. A aprendizagem significativa é um processo porque ela se desenvolve ao longo do tempo dentro da estrutura cognitiva. A avaliação deve buscar evidência de aprendizagem significativa e não resultado final.

3. Desenvolvimento da UEPS

Neste capítulo apresentamos a UEPS aqui elaborada, enfatizando o procedimento experimental, utilizado como metodologia estratégica para a aprendizagem de conceitos da Física Moderna.

É relevante mencionar que a completa compreensão de conceitos da Física Moderna exige conhecimento e manipulação de ferramentas matemáticas que utilizam o cálculo diferencial e integral e álgebra avançada, o que não está disponível na estrutura cognitiva do aluno do Ensino Médio e nem representam conteúdos previstos pelos documentos que norteiam a educação. Assim, o processo de ensino dos conceitos da Física Moderna é um desafio maior porque deve passar pela transposição didática¹¹.

A seguir apresentamos as equações que selecionamos para trabalhar com os alunos na UEPS:

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (\text{Frequência da onda eletromagnética})$$

$$\tau = \frac{1}{f} \quad (\text{Período da onda eletromagnética})$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{Comprimento da onda eletromagnética})$$

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \cdot 13,6 \text{ eV} \quad n = 1,2,3. \quad (\text{Equação da quantização de energia})$$

$$W = -E_n \quad (\text{Função trabalho})$$

$$\Delta E = E_i - E_f \quad (\text{Variação de energia entre níveis})$$

$$\Delta E = hf \quad (\text{Energia do fóton})$$

¹¹ Transposição Didática pode ser entendido como o trabalho de construir o objeto de ensino em correspondência com o objeto de saber produzido pelo cientista. A Transposição Didática, em um sentido restrito, pode ser entendida como a passagem do saber científico ao saber ensinado.

$$E_{e^-} = \frac{1}{2} m_e v^2 \quad (\text{Energia cinética do elétron})$$

$$E_{e^-} = hf - W \quad (\text{Lei do efeito fotoelétrico})$$

$$v = \sqrt{2h \frac{(f-f_0)}{m_e}} \quad (\text{Velocidade do elétron ejetado})$$

3.1 Estrutura da UEPS

No Ensino Médio, os conceitos de Física são introduzidos de acordo com o ano: A Mecânica Clássica no primeiro ano, a Termodinâmica no segundo ano, Eletromagnetismo, Ótica Física e Física Moderna no terceiro.

A UEPS aqui desenvolvida exige que os conceitos sobre ondas eletromagnéticas, modelos atômicos, potencial elétrico, já tenham sido trabalhados. Portanto, é uma atividade para ser desenvolvida, mais especificamente, no terceiro ano ou abordar os conceitos juntos, mas promover os Organizadores Prévios¹².

O Quadro 3 se refere ao planejamento da UEPS para ser trabalhada com alunos do 3 ano do Ensino Médio. Ela foi planejada para ser aplicada em 8 seções ou podemos dizer que ela tem 8 UD. Seu desenvolvimento é estimado entre 10 e 14 horas/aula.

¹² Organizadores prévios são recursos instrucionais potencialmente facilitadores da aprendizagem significativa. Eles servem como pontes cognitivas entre novos conhecimentos e aqueles já existentes na estrutura cognitiva do aprendiz.

Quadro 3 - Quadro do planejamento da UEPS.

Seção	Atividade	Número de aulas
1	Avaliação de conceitos prévios – identificação dos subsunçores	1-2
2	Revisão de conceitos de eletromagnetismo e ondas eletromagnéticas	1-2
3	Introdução de conceitos dos modelos atômicos e quantização da energia	2
4	Introdução de conceitos dos semicondutores	1
5	Introdução de conceitos do efeito fotoelétrico e efeito fotovoltaico	2
6	Introdução de conceitos da percepção de cores	1-2
7	Execução da atividade experimental com LEDs	1-2
8	Atividades avaliativas	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos Apêndices encontram-se os planos de aulas e as seções apresentadas no Quadro 3.

Abaixo segue a SD de forma mais detalhada.

1. Avaliação e revisão de conceitos prévios

A atividade consiste em identificar os subsunçores e/ou promovê-los. Pode ser por diálogos ou por mecanismos de verificação: questionário, mapa conceitual, texto dissertativo, entre outros.

Aqui apresentamos um questionário que deve ser respondido pelos alunos e que não será avaliado, mas os alunos podem receber nota pela participação na atividade.

Nesta etapa, a intervenção do professor deverá ocorrer apenas quando necessário ou para escolher um aluno para opinar.

2. Introdução dos conceitos

A introdução dos conceitos de Física, primeiro os mais amplos, pode ser feita com o auxílio do quadro de giz num processo dinâmico e dialógico.

Observação: estratégia como esta pode consumir tempo e depende da dinâmica da classe, se não for possível a discussão com os alunos sobre todos os conceitos, deve-se pelo menos executar esta dinâmica com o conceito mais geral do tema: dualidade onda-partícula.

3. Aplicação

Nesta etapa, o professor buscará utilizar exemplos reais que possam ser explicados com os conceitos discutidos.

A resolução de exercícios, como propostos em livros didáticos, também é bem-vinda. Mesmo que exista um grau de mecanização na resolução de problemas, esta dinâmica poderá auxiliar nas discussões e compreensão dos fenômenos envolvidos. Aqui não é o número de exercícios resolvidos que irá auxiliar a aprendizagem significativa, mas sim, as discussões e análises numéricas que cada um apresenta.

4. Exercícios de memorização

Exercícios de memorização consistem de exercícios para que os alunos desenvolvam um algoritmo para a resolução de problemas.

Os exercícios podem ser elaborados em grupos de alunos para que possam compreender os passos para se chegar numa situação problema.

5. Prática experimental

A execução de uma atividade experimental permite, ao aluno, relacionar a teoria com seus respectivos fenômenos, discutir a precisão dos equipamentos e conceitos de epistemologia das Ciências.

A compreensão de fenômenos físicos como consequência da aprendizagem significativa e a compreensão de outros fenômenos do cotidiano. Leva o aluno a observar mais e fazer novas relações.

6. Avaliação

A avaliação diagnóstica deve ser utilizada como ferramenta para subsidiar o professor em suas decisões de avançar ou repetir os conteúdos. Porém, entendemos que nossa cultura não privilegia o conhecimento e, por isso, atribuir valores para o nível de aprendizagem, ainda é necessário.

Na sala de aula, a prova pode ser realizada de diferentes formas. Os alunos devem responder as questões colocadas e resolver exercícios. Sugerimos que as equações que serão utilizadas devam ser apresentadas no quadro para que possam visualizar durante a prova.

Reconhecemos que há vários desafios na implementação das atividades que deverão ser contornadas especificamente por cada professor.

3.2 A Atividade Experimental

O experimento desenvolvido consiste em um circuito elétrico, o qual se varia e mede a tensão sobre um LED.

Para a montagem do experimento, veja Figura 16, utilizamos uma caixa de projeto de plástico, uma bateria 9V, conector para bateria 9V, potenciômetro de 10k Ohms, *knob* para potenciômetro, resistor de 1k Ohms, soquete DIP 8, fios para eletrônica, multímetro e LEDs coloridos (vermelho, laranja, verde e azul).

O soquete DIP 8 foi utilizado para facilitar a conexão entre os LEDs e o Multímetro.

Para montar os componentes foram utilizados ferro de solda, estanho e alicate para cortar e descascar fios.

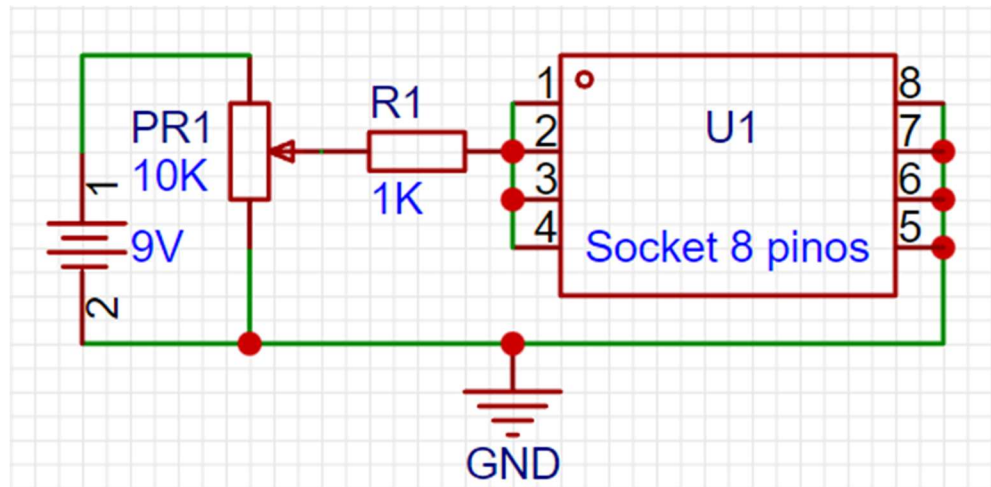
A Figura 17 contém o diagrama esquemático da montagem experimental.

Figura 16: Foto da montagem do experimento para calcular a constante de Planck.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17: Diagrama esquemático da montagem experimental para obtenção da constante de Planck.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No diagrama da Figura 17 o potenciômetro PR1 ajusta a diferença de potencial, ddp fornecida ao LED, o resistor R1 tem a função de limitar a corrente elétrica e prevenir a queima dos LEDs, por excesso de corrente elétrica.

Obtenção da constante de Planck

Neste experimento utilizou-se o circuito da Figura 17 e LEDs de cores monocromáticas diferentes: vermelho, laranja, verde e azul.

O multímetro foi conectado em paralelo com o LED e a escala de tensão DC foi selecionada para medir a ddp sobre o LED. Com a bateria ligada inseriu-se um LED no soquete DIP 8 no sentido direto. O potenciômetro foi rotacionado para o ponto em que o LED começa a brilhar, ou seja, seu ponto de ativação.

Ao rotacionar o potenciômetro para a direita observou-se que, a partir de uma determinada tensão, o LED começa a emitir luz. A tensão em que o LED começa a brilhar será anotada. Realizando este procedimento três vezes para cada cor de LED, obteve-se a tabela 3.

Tabela 3 – Tabela com os valores de tensão medidos em V, comprimento de onda da tabela 2 e constante de Planck calculada.

Cor	1	2	3	Média (eV)	λ (nm)	h ($\times 10^{-15} eV/Hz$)
Vermelho	1,705	1,719	1,701	1,708	682,5	3,88
Laranja	1,785	1,810	1,811	1,802	607,5	3,65
Verde	2,245	2,263	2,283	2,264	532,5	4,02
Azul	1,988	1,987	1,990	3,020	462,5	3,99
Valor médio para h calculado						3,89

Fonte: Elaborado pelo autor.

O percentual do valor teórico obtido para a constante de Planck para cada cor foi de: 93% (Vermelho), 88% (Laranja), 97% (Verde) e 96% (Azul). O valor médio obtido para a constante de Planck foi de $h = 3,89 \times 10^{-15} eV/Hz$ ou 94% do valor teórico esperado.

O experimento desenvolvido buscou a menor complexidade de componentes, tal que não conhecimentos de eletrônica para sua montagem, permitindo que mais professores pudessem reproduzi-lo. Além de estimar o valor do comprimento de onda para cada LED com base na média do espectro para a respectiva cor, com base na tabela 3, facilitando a reprodução do experimento.

3.3 Discussões

Nota-se que os resultados obtidos pelo experimento estão entre 88% e 97% do valor teórico, ou seja, o experimento conseguiu uma aproximação para o valor da constante de Planck.

O circuito pode ser desenvolvido numa *protoboard*, conseqüentemente não há a necessidade de realizar a soldagem dos componentes e também permite a utilização dos componentes em outras montagens.

Com os resultados obtidos, verificamos sua importância para compor a UEPS para o ensino de conceitos de Física Moderna, por ser um experimento de baixa complexidade em sua elaboração.

Para complementar a UEPS foram sugeridos simuladores por serem mais acessíveis. Mas a demonstração do efeito fotoelétrico pode ser feita com a utilização

de painéis solares ou de LDR (*Light Dependent Resistor*) demonstrando a interação da luz com a matéria.

Com os textos apresentados na UEPS (Apêndices) os alunos podem desenvolver a habilidade de interpretação e ao mesmo tempo aprender novos conhecimentos.

4 Considerações Finais

A literatura aponta que uma das dificuldades do processo de ensino no Brasil é o amadorismo do professor que utiliza estratégias didático- metodológicas estabelecidas pelo senso comum.

Este trabalho mostrou que a elaboração de uma SD ou UEPS deve ser estrategicamente pensada e dentro de um pilar teórico.

O professor, não apenas de Física, deve refletir sobre os conceitos de aprendizagem e selecionar os conceitos mais importantes que dão suporte teórico para sua disciplina.

Aqui utilizamos a TAS de Ausubel, mas sabemos que não é a única teoria possível.

A utilização de atividades experimentais pode ser justificada pela necessidade de desenvolver, no aluno, interesse pela ciência, despertar a criatividade e auxiliar na identificação dos conceitos mais importantes que se organizam harmonicamente para explicar fenômenos observados no cotidiano.

O tempo estabelecido para o desenvolvimento das seções são estimativas com base no trabalho de docentes que atuam em sala de aula, portanto o tempo para o desenvolvimento pode variar de acordo com a realidade da sala de aula e com as adaptações que cada professor fizer.

Com as limitações de tempo encontradas no ensino público brasileiro, algumas atividades podem se tornar inviáveis para o desenvolvimento, portanto o professor deve levar em consideração a dinâmica da sala de aula para determinar de que maneira as atividades devam ser desenvolvidas.

Uma UEPS fornece a sequência que os temas devem ser apresentados e atividades que podem ser trabalhadas, mas não consegue prever todos os cenários

possíveis em sala de aula, ou seja, cada sala de aula é única e deve ser trabalhada de acordo com suas características.

A UEPS não foi aplicada, portanto não se é possível avaliar com precisão suas consequências na realidade da sala de aula. Mas considerando as teorias em que se baseia esta UEPS e uma aplicação na qual o professor favoreça a participação dos alunos no desenvolvimento do conhecimento por meio da discussão de temas, a UEPS apresenta um potencial para a aprendizagem significativa dos alunos.

Assim, a maior contribuição deste trabalho é mostrar para o professor a necessidade de pautar seu planejamento didático metodológico a uma teoria de aprendizagem. Ao planejar suas aulas, o professor deve ter em mente como ele define aprendizagem e como ela pode ser medida.

Além disso, o professor deve ter consciência do seu papel no processo de ensino e aprendizagem. A TAS estabelece bem os limites dos agentes envolvidos. Tanto os alunos quanto o professor, têm seus papéis bem definidos e delimitados. Assim, a TAS é uma teoria que se contrapõe as teorias vigentes do 'aprender a aprender', as quais dão protagonismo ao aluno.

Quanto a atividade experimental, ela possibilita o estabelecimento da relação entre causa e efeito de um fenômeno pela estrutura cognitiva do aluno. Ao estabelecer a relação à estrutura irá reconhecer o fenômeno em seu cotidiano e continuar refletindo sobre a causa, tornando-se uma aprendizagem significativa.

Consideramos que a avaliação da aprendizagem ocorra durante todo o processo de ensino e que busque incentivar os alunos opinarem sobre temas e discutí-los com a sala de aula, gerando reflexões e por consequência reforçando os conceitos na estrutura cognitiva do aluno.

O papel do professor é fundamental para a aplicação da UEPS, sua forma de conduzir as atividades podem motivar, principalmente na disciplina de Física que os alunos apresentam dificuldades na compreensão além de se sentirem desmotivados a aprender. Para promover a aprendizagem significativa é necessário que o professor desenvolva os conceitos prévios para os alunos e se atentem aos alunos com maiores dificuldades na aprendizagem para auxiliá-los no desenvolvimento de conceitos prévios.

Esta UEPS deve priorizar discussões e a participação de alunos no desenvolvimento do tema promovendo a autonomia dos alunos e possibilitando uma aprendizagem significativa.

REFERÊNCIAS

Antônio, Alan Pereira. Proposta de UEPS para inserção do conteúdo de Física Quântica através de uma atividade experimental. Disponível em: <<http://app.homologacao.uff.br/riuff/handle/1/14935>>. Acesso em 12 de junho de 2023.

Ausubel, David P. **David P. Ausubel**. Disponível em: <<http://www.davidausubel.org/index.html>>. Acesso em 4 de maio de 2023.

Ausubel, David P. **Aquisição e Retenção de conhecimentos: Uma Perspectiva Cognitiva**. Lisboa: Paralelo editora, lda. 2000. p. 1-104.

Azevedo, A. L.; Sousa, A. K. S.; Castro, T. J.. **Espectroscopia óptica de baixo custo: uma estratégia para a introdução de conceitos de física quântica no ensino médio**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 41, n. 4, p. e20180349, 2019.

Brasil. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, 2018.

Bryce, T. G. K., and E. J. Blown. Ausubel's meaningful learning re-visited. **Current Psychology**, p. 1-20, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12144-023-04440-4>>. Acesso em: 19 de outubro de 2023.

Busatto, Cassiano Z., et al. O ensino de física moderna e contemporânea na educação básica: conteúdos trabalhados pelos docentes. **Revista CIATEC - UPF**, v. 10, n. 1, p. 104-115, 2018.

Bureau International des Poids et Mesures. **Le Systemè international d'unités**. 9. ed. Sèvres Cedex, França: BIPM, 2019. Disponível em: <<https://www.bipm.org/documents/20126/41483022/SI-Brochure-9.pdf/fcf090b2-04e6-88cc-1149-c3e029ad8232>>. Acesso em: 20 de julho de 2023. p. 130-151.

Campos, Gustavo de Carvalho. **Noções de física quântica a partir do estudo do funcionamento de dispositivos semicondutores – uma unidade de ensino potencialmente significativa para 3ª Série do Ensino Médio**. 2016. 207 f. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Física)- Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2016.

Cavalcante, Marisa A.; Tavoraro, Cristiane R. C. **Física Moderna Experimental**. 2. ed. Barueri: Manole, 2007.

Castro, Alex G. G.. **Do led ao transistor: uma proposta de ensino de efeito fotoelétrico**. Dissertação (Mestrado em Física). Universidade Federal Rural do Semi-árido. Mossoró, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/8849>>. Acesso em 13 de junho de 2023.

Coelho, T. S. O. **Proposta de unidade didática para a aprendizagem significativa de conceitos de física moderna e contemporânea**. 2016. 93 f. Dissertação

(Mestrado Profissional em Ensino de Física em Rede) - Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2016.

Cosenza, Ramon; Guerra, Leonor. **Neurociência e educação**. Artmed Editora, 2009. 151 p.

Do Nascimento Pereira, Patrícia; Guerini, Silvete Coradi; Sé-Silva, Jackson Ronie. Os conteúdos de Física Moderna em livros didáticos de Física do Ensino Médio. **Debates em Educação**, v. 11, n. 24, p. 106-124, 2019.

Dos Santos Batista, Carlos A.; Da Purificação Siqueira, Maxwell R.. A inserção da Física Moderna e Contemporânea em ambientes reais de sala de aula: uma sequência de ensino-aprendizagem sobre a radioatividade. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 3, p. 880-902, 2017.

Feynman, Richard P.; Leighton, Robert B.; Sands, Matthew. **The Feynman Lectures On Physics**. 2. Ed. Oxnard: Addison-Wesley Publishing Company, INC., 1964.

Firmino, Laís S.; Braz, Natália S.. Neurociência: Uma Revisão Bibliográfica de como o Cérebro Aprende/Neuroscience: A Bibliographic Review on How the Brain Learns. **ID on line. Revista de psicologia**, v. 14, n. 53, p. 999-1009, 2020.

Fondriest Environmental, Inc. **Solar Radiation and Photosynthetically Active Radiation**. Fundamentals of Environmental Measurements. 21 de Março de 2014. Disponível em: < <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/weather/solar-radiation/> >. Acesso em: 4 de julho de 2023.

Gowin, D.B.; Alvarez, M. C. **The art of educating with V diagrams**. New York: Cambridge University Press, 2005. p. 4-19.

Griffiths, David J. **Eletrodinâmica**. 3. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

Haag, R.; A. Krenzinger, A. **RADIÔMETRO ESPECTRAL UTILIZANDO DIODOS EMISSORES DE LUZ (LEDs) COMO SENSORES SELETIVOS DE RADIAÇÃO**. Argentina: Asades, 2006. Disponível em: <http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/88190/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 1 de Agosto de 2023.

Halliday, David; Resnick, Robert; Walker, Jearl. **Fundamentos de Física Volume 3: Eletromagnetismo**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2009.

Halliday, David; Resnick, Robert; Walker, Jearl.. **Fundamentos de Física Volume 4: Óptica e Física Moderna**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2009.

Hooi, Lee Boon. **Understand RGB LED mixing ratios to realize optimal color in signs and displays**. LEDs MAGAZINE, 2013. Disponível em: <<https://www.ledsmagazine.com/smart-lighting-iot/color->

[tuning/article/16695054/understand-rgb-led-mixing-ratios-to-realize-optimal-color-in-signs-and-displays-magazine](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/S0030438723000000)>. Acesso em 3 de Agosto de 2023.

Joas, Christian; Lehner, Christoph e Renn, Jürgen. **HQ-1: Conference on the History of Quantum Physics**. Berlin: Max Planck Institute for the History of Science, 2008. p. 1-48. Disponível em: <https://pure.mpg.de/rest/items/item_2274295_1/component/file_2274293/content>. Acesso em 06 de julho de 2023.

Khanna, V. K. **Fundamentals of Solid-state Lighting**. Nova York: CRC Press. 2014. p. 49-62.

Laburú, Carlos Eduardo; Arruda, Sérgio de Mello. Considerações sobre a função do experimento no ensino de ciências. **Série: Ciência & Educação**, n. 3, 1996.

LibreTexts, Physics. **5.2: Blackbody Radiation**. Disponível em: <https://phys.libretexts.org/Courses/Bowdoin_College/Phys1140%3A_Introductory_Physics_II%3A_Part_2/05%3A_Photons_and_Matter_Waves/5.02%3A_Blackbody_Radiation>. Acesso em: 18 de dezembro de 2023.

Loreto, Elgion L. S.; Dos Santos Sartori, Paulo H.. Simulação da visão das cores: decodificando a transdução quântica-elétrica. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 25, n. 2, p. 266-286, 2008.

Lupiano Dias, Ivan F., Duarte, José L.; Teixeira, Ricardo C.. **Introdução aos semicondutores e suas aplicações tecnológicas**. Londrina: EDUEL, 2005.

Millman, Jacob; Halkias, Christos C. **INTEGRATED ELECTRONICS: ANALOG AND DIGITAL CIRCUITS AND SYSTEMS**. Tóquio: McGraw-Hill, inc. 1972. p. 1-117.

Moreira, Marco A.. **Aprendizagem significativa, organizadores prévios, mapas conceituais, diagramas V e unidades de ensino potencialmente significativas**. Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2013. Disponível em: <<https://silو.tips/download/aprendizagem-significativa-organizadores-previos-mapas-conceituais-diagramas-v-e>>. Acesso em: 06 de Julho de 2023.

Moreira, Marco A. **Teorias de Aprendizagem**. São Paulo: EPU, 1999. p. 151-165.

Moreira, Marco A. **Unidades de Ensino Potencialmente Significativas-UEPS**. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/~moreira/UEPSport.pdf>>. Acesso em 12 de julho de 2023.

NASA. **Imagine the universe!**. Disponível em: <https://imagine.gsfc.nasa.gov/educators/lessons/xray_spectra/worksheet-energy-sol.html#:~:text=Neils%20Bohr%20numbered%20the%20energy,be%20part%20of%20its%20atom>. Acesso em 21 de junho de 2023.

Nobel Prize. **The Nobel Prize In Physics 1918: Max Planck**. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1918/planck/lecture/>>. Acesso em 22 de novembro de 2023.

Ostermann, Fernanda; Moreira, Marco A.. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio”. **Investigações em ensino de ciências**, v. 5, n. 1, p. 23-48, 2000.

Riggs, Lorrin A. The “looks” of Helmholtz. **Perception & Psychophysics**, v. 2, p. 1-13, 1967. Disponível em: <<https://doi.org/10.3758/BF03210059>>. Acesso em: 02 de Agosto de 2023.

Silverthorn, Dee Unglaub. **Fisiologia Humana**. Porto Alegre: Artmed, 2017. P. 226-260.

studocu. **The Derivation of the Planck Formula**. Disponível em: <<https://www.studocu.com/in/document/mahatma-gandhi-university/chemistry-ii-physical-chemistry/plank/28008686>>. Acesso em 20 de junho de 2023.

Testa, Maurício José et al. Estruturação de uma sequência didática sobre energia nuclear no contexto do novo ensino médio de física. **Encontro Estadual de Ensino de Física-RS (9.: 2023: Porto Alegre, RS). Atas..** Porto Alegre: UFRGS, Instituto de Física, 2023.

Tipler, Paul A.; Llewelly, Ralph A. **Física Moderna**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2014. p. 75-90.

Wilkinson, C. P.; Hinton, David R.; Sada, Srinivas R.; Wiedemann, Peter. **Ryan’s Retina**. 6. ed. ELSEVIER, 2018. p. 325-339

Zabala, Antoni. **A prática educativa: Como ensinar**. 1. ed. p. 51-87. Porto Alegre: Artmed, 1998.

Zwiebach, B. **MIT opencourseware, 2016. Quantum Physics I, Lecture note 3**. Disponível em: <<https://ocw.mit.edu/courses/8-04-quantum-physics-i-spring-2016/download/>>. Acesso em: 13 de julho de 2023.

Apêndices

Seção 1 - Avaliação de conceitos prévios

Tempo estimado: 1-2 aulas.

Objetivo: Avaliar os conceitos prévios dos alunos.

Recursos: Folha de avaliação (Seção 1), giz e quadro negro.

Dinâmica:

1º Momento: O professor realiza a entrega da folha de avaliação (Seção 1) de conceitos prévios e estabelece um tempo de 20-25 minutos para que os alunos respondam as questões, ao fim do tempo estabelecido as avaliações são recolhidas.

Observação: Alternativamente pode-se iniciar-se do segundo momento.

2º Momento: Fazer o questionamento oral das questões da avaliação para que os alunos formulem as respostas.

3º Momento: Finalizar a aula, solicitando que os alunos pesquisem os tipos de radiações eletromagnéticas como tarefa de casa para discutir na aula 2.

Antes de introduzirmos novos conceitos aos alunos realizamos uma avaliação de conceitos prévios e após a análise desta avaliação esclarecemos dúvidas encontradas. Neste trabalho a avaliação de conceitos traz apenas questões necessárias, podendo ser discutida com os alunos o seu entendimento dos conceitos. Nesta dinâmica as dúvidas dos alunos podem ser esclarecidas por outros alunos e o professor tem o papel de mediar a discussão, intervindo apenas se for considerado necessário.

Avaliação de conceitos prévios de Física Moderna**Nome:****Turma:**

1) O que é o átomo? Do que é composto? Descreva o átomo com suas palavras e desenhe o modelo que conhece.

Desenhe aqui:

2) O que são elétrons? Quais são suas propriedades?

3) Quando dizemos na Física que algo é quantizado, o que significa?

4) O que é frequência? Qual é sua unidade?

5) O que é comprimento de onda? Qual é sua unidade?

6) O que é a luz? O que é cor?

7) Existe relação entre luz e ondas eletromagnéticas?

8) Já ouviu falar de Física Moderna? Se sim, qual o seu entendimento desta área da Física?

Seção 2 - Revisão de eletromagnetismo e ondas eletromagnéticas

Tempo estimado: 1-2 aula.

Objetivo: Rever conceitos de eletromagnetismo e ondas eletromagnéticas

Recursos: Material de apoio (Seção 2), giz e quadro negro.

Dinâmica:

1º Momento: Orientar os alunos na discussão de suas pesquisas com a sala de aula. Após a discussão com os alunos realizar a entrega do material de apoio (Seção 2).

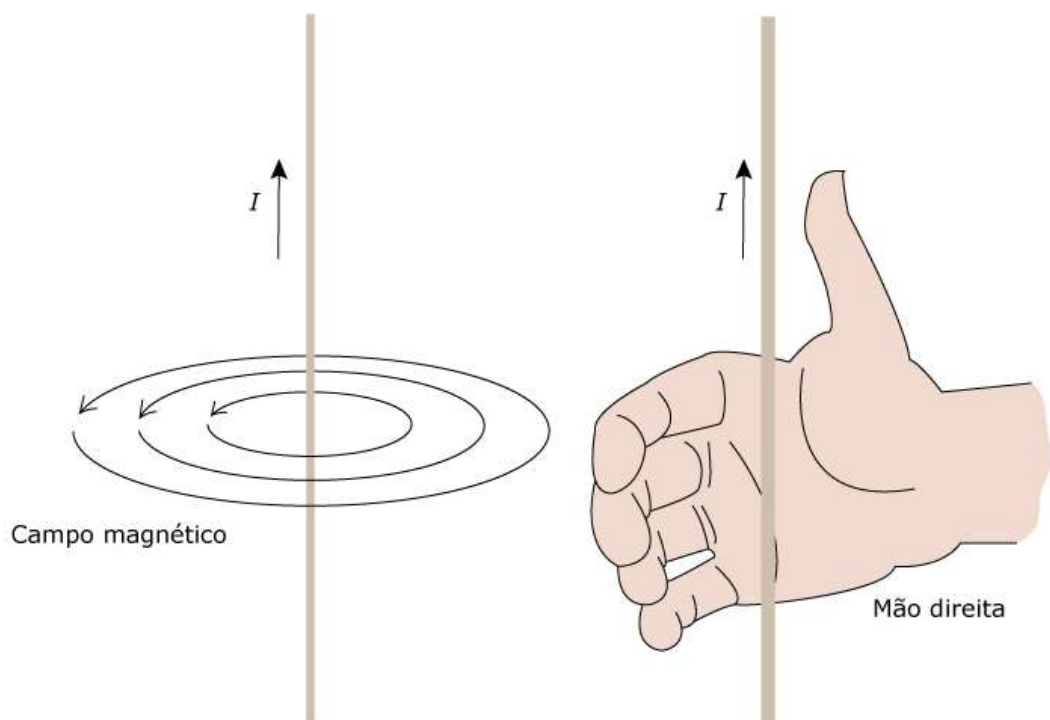
2º Momento: Iniciar a apresentação dos conceitos de ondas eletromagnéticas, espectro eletromagnético e classificação das radiações eletromagnéticas.

3º Momento: Finalizar a aula solicitando que os alunos respondam questões e problemas do material de apoio para a próxima aula e pesquisem o que é fenômenos quânticos.

Eletrromagnetismo e ondas eletrromagnéticas

Em eletrostática aprendemos que cargas elétricas geram campos elétricos, também vimos que a um fio percorrido por uma corrente elétrica gera um campo magnético (Lei de Ampère) como mostra a figura 1.

Figura 1: Campo magnético induzido por corrente elétrica e regra da mão direita.



Fonte: <https://infoenem.com.br/estudando-a-lei-do-ampere-e-a-regra-da-mao-direita/>

A figura 1 representa a corrente elétrica i percorrendo o fio e gerando um campo magnético circular perpendicular ao sentido da corrente elétrica. Em uma onda eletrromagnética a oscilação do campo elétrico induz um campo magnético oscilante perpendicular ao campo elétrico e sentido de propagação. Maxwell em suas deduções matemáticas calculou que a velocidade de propagação de uma onda eletrromagnética é:

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \text{ (Velocidade da onda eletrromagnética)}$$

A velocidade da onda eletromagnética coincide com a velocidade da luz, portanto Maxwell concluiu que a luz é uma onda eletromagnética. Como toda onda a onda eletromagnética possui uma frequência e período que pode ser obtida por:

$$f = \frac{c}{\lambda} \text{ (Frequência da onda eletromagnética)}$$

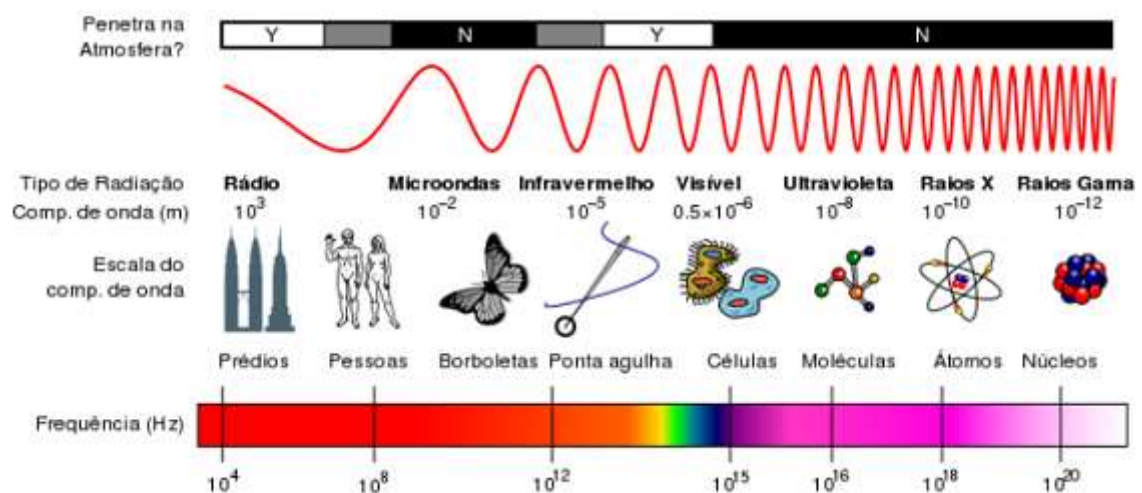
$$\tau = \frac{1}{f} \text{ (Período da onda eletromagnética)}$$

A frequência tem unidade de Hz no SI é o inverso de segundo (s^{-1}), significando número de vezes que a o ciclo de oscilação ocorre. Também podemos obter o comprimento de onda λ com o rearranjo da equação:

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ (comprimento da onda eletromagnética)}$$

O comprimento de ondas está na unidade de metro no sistema internacional, no entanto utilizamos nanômetros ($1nm = 10^{-9}m$) para trabalharmos com comprimentos de onda do espectro de luz visível. Devemos lembrar sempre de converter para o SI quando trabalharmos com a unidade de nanômetro.

Figura 2: Espectro eletromagnético.



Fonte: <https://pt.khanacademy.org/science/9-ano/materia-e-energia-as-ondas/ondas-eletromagneticas/a/o-espectro-eletromagnetico>

A figura 2 apresenta o espectro das radiações eletromagnéticas, pelas relações estabelecidas entre comprimento de onda e frequência nas equações anteriores compreende-se que a frequência de uma onda eletromagnética é inversamente proporcional ao seu comprimento de onda, ou seja, quanto maior a frequência menor será o comprimento de onda e quanto menor a frequência maior o comprimento de onda. As radiações consideradas perigosas para a saúde humana encontram-se à direita do espectro apresentado, essas são ondas eletromagnéticas de alta frequência (ultravioleta, raio-x e radiação gama), portanto possuem alta energia.

Link para a animação de uma onda eletromagnética:
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM-Wave.gif>

Ondas eletromagnéticas de altas energias conseguem ionizar átomos e moléculas em nossos corpos podendo causar danos em nossas células, estas ondas eletromagnéticas de alta energia são chamadas de ultravioleta, raios-x e radiação gama.

RF é a faixa de radiofrequência, utilizada em controle remoto e alguns dispositivos de rádio antigos. Seu comprimento de onda é maior que 10 km.

AM é uma faixa de comprimento de ondas entre 0,1-10 km utilizada nas transmissões de rádios AM.

TV, FM são ondas que eram utilizadas para a transmissão de TVs e rádio FM, seu comprimento de onda é de 1-100 m aproximadamente.

Micro-ondas é o tipo de radiação utilizada nas antenas de comunicação como *wi-fi*, *Bluetooth*, celular, etc. Também é a radiação utilizada em fornos de micro-ondas para aquecer água no estado líquido. Seu comprimento de onda é de aproximadamente 10 cm, portanto não é uma radiação ionizantes.

O infravermelho pode ser considerado como radiação térmica emitida por objetos que tenham temperatura acima de 0 K, seu comprimento de onda é maior que 760 nm.

Luz visível é a parte do espectro eletromagnético que os olhos humanos conseguem ver, seu comprimento de onda encontra-se em aproximadamente 400 nm (azul) e 760 nm (vermelho).

Ultravioleta encontra-se no espectro próximo da luz visível com comprimento de onda máximo de aproximadamente 300 nm, essa radiação é emitida pelo sol e

lâmpadas ultravioleta (luz negra). É uma radiação ionizante, ou seja, consegue remover elétrons da matéria.

Raios-x é uma radiação com comprimento de onda menor que do ultravioleta com aproximadamente 1 nm ou menos, é uma radiação ionizante. São emitidos por tubos de raios-x, são utilizados na área da medicina para o diagnóstico de ossos e órgãos internos.

Radiação Gama é uma radiação ionizante com comprimento de onda menor que 0,1 nm ou menor que o raio de um átomo, é emitida por reações nucleares. Esta radiação é altamente ionizante e penetrante.

Tabela 1: Relação entre cor e comprimento de onda

Cor	Intervalo do comprimento de onda (nm)
Vermelho	~ 625-740
Laranja	~ 590-625
Amarelo	~ 565-590
Verde	~ 500-565
Ciano	~ 485-500
Azul	~ 440-485
Violeta	~ 380-440

Fonte: <https://www.jameco.com/Jameco/workshop/CircuitNotes/circuit-notes-led.html>

Questões e problemas para praticar

- 1) Um relógio com oscilador de cristal de quartzo oscila em uma frequência de 32.768 Hz. Calcule o período e comprimento de onda para a onda eletromagnética emitida pelo oscilador.
- 2) Um forno micro-ondas emite ondas com 12 cm de comprimento de onda. Qual a frequência desta onda?
- 3) Encontre exemplos tais como fontes e aplicações para cada categoria de radiação eletromagnética.
- 4) Quanto maior a frequência de uma radiação eletromagnética, maior será o seu potencial de ionização. Quais das radiações eletromagnéticas ionizantes e não-ionizantes estão em seu dia a dia, monte uma tabela com duas colunas uma para radiações eletromagnéticas ionizantes e outra para não-ionizantes.
- 5) Com base na tabela 1 determine as cores para os seguintes comprimentos de onda: 395 nm, 650 nm, 498 nm, 448 nm, 510 nm, 570 nm e 612 nm.

Seção 3 - Modelos Atômicos e Quantização de Energia

Tempo estimado: 2 aulas.

Objetivo: Apresentar conceitos de modelos atômicos e quantização de energia.

Recursos: Projetor, giz e quadro negro.

Dinâmica:

1º Momento: Fazer a correção das questões e problemas da aula anterior. Após a correção entregar o material de apoio da aula 3 (Seção 3).

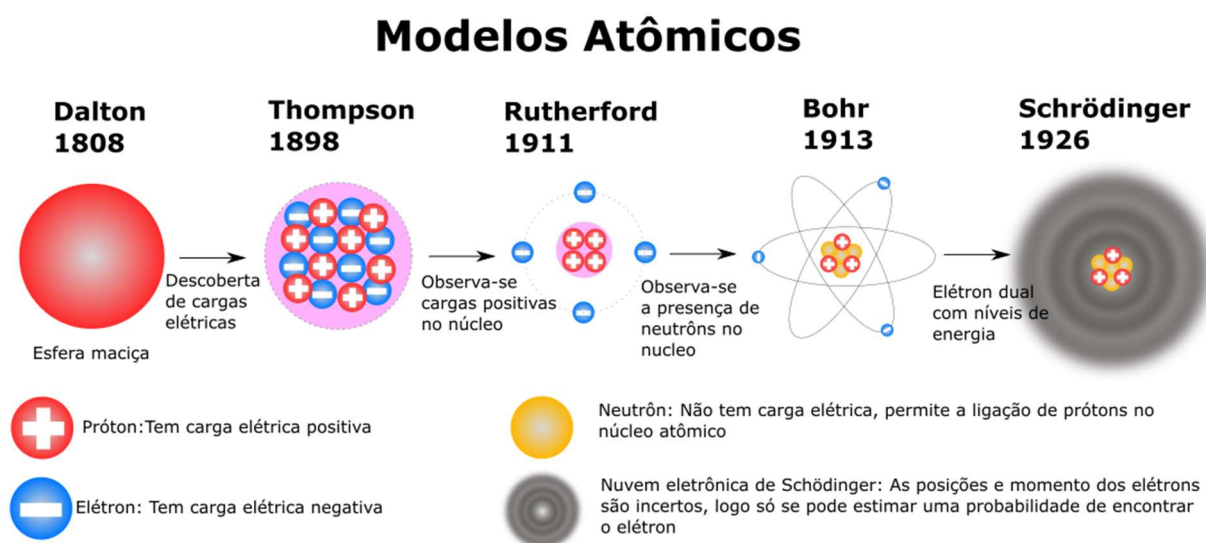
2º Momento: Discutir com os alunos o resultado de suas pesquisas por fenômenos quânticos e o que se foi encontrado e após a discussão, apresentar os conceitos de modelos atômicos, níveis de energia, energia de ligação, espectro de emissão e de absorção.

3º Momento: Finalizar a aula solicitando aos alunos que resolvam as questões e problemas do material de apoio.

Modelos atômicos

Toda a matéria que conhecemos são formadas por átomos, os primeiros modelos atômicos foram propostos pelos gregos ao perceber que a matéria poderia ser dividida em pedaços menores, para os gregos existiria um tamanho mínimo que essas partículas poderiam ser divididas e passaria a ser indivisível, portanto, atribuiu-se o nome de átomo que significa não-divisível em grego.

Figura 1: Modelos atômicos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em 1808 Dalton propôs o primeiro modelo atômico como uma esfera maciça representando os conceitos que os gregos possuíam de átomos. Chamamos o modelo atômico de Dalton como modelo de bola de bilhar, dado que este modelo representa o átomo como uma esfera maciça.

A segunda proposta de modelo atômico foi feita por Thomson em 1898, neste modelo foi considerada a existência de cargas elétricas. O átomo é composto por cargas positivas e negativas, este modelo é conhecido pelo modelo do pudim de passas, pois a "massa" do pudim representa as cargas positivas e as passas representam os elétrons.

Em 1911 Rutherford considerou a existência de um núcleo com cargas positivas fixas e uma eletrosfera com cargas negativas em movimento. Neste modelo os elétrons apenas orbitam o átomo.

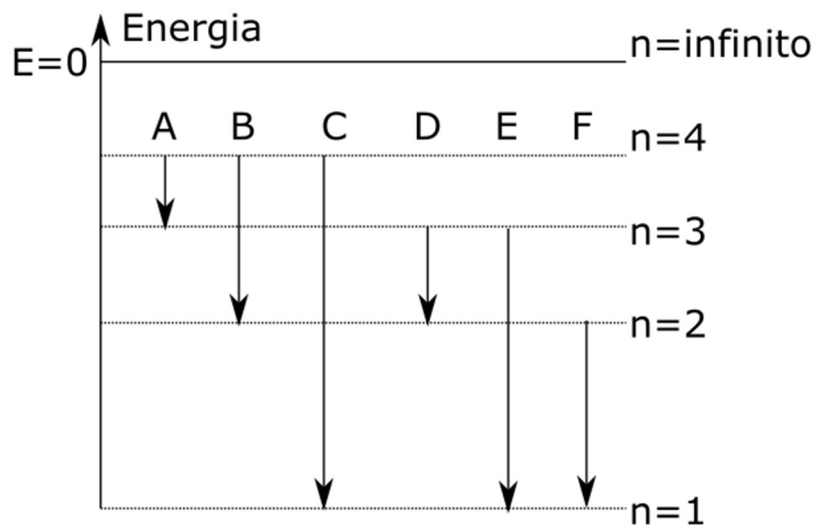
Em 1913 Bohr adicionou ao modelo de Rutherford a existência de nêutrons no núcleo e a existência de camadas eletrônicas que explicam as ligações químicas. Estas camadas eletrônicas precisam ser preenchidas por elétrons para formar uma ligação estável.

Em 1926 Schrödinger propôs um modelo atômico que possui orbitais que determinam a distribuição eletrônica e considera que o elétron é uma partícula dual, dado que seu comportamento pode ser explicado como corpúsculo e também como onda.

Quantização de Energia

No modelo de Schrödinger os elétrons podem assumir níveis de energia quantizados, ou seja, não podem assumir valores arbitrários. A energia do elétron é sua energia cinética ($E = K = \frac{1}{2}m_e v^2$). A temperatura do material está relacionada a energia cinética dos elétrons, quanto mais quente o material, mais rápido seus elétrons se movem.

Figura 2: Representação dos níveis de energia e transições eletrônicas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizando o átomo de hidrogênio como exemplo, temos que a energia de cada nível é dada por:

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \cdot 13,6 \text{ eV} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

O maior nível de energia é zero e ocorrerá quando $n = \infty$, se o nível de energia for maior que zero, o elétron escapará do átomo. Quando $n = 1$ temos o estado fundamental, ou estado de menor energia, para o hidrogênio o elétron neste nível tem $-13,6 \text{ eV}$ de energia. Em termos de temperatura isso equivale ao zero absoluto ($0 \text{ K} = -273,16^\circ\text{C}$).

A função trabalho é a energia necessária para remover um elétron do átomo e pode ser obtida por:

$$W = -E_n \text{ (Função Trabalho)}$$

n é o nível de energia em que o elétron se encontra. A figura 2 apresenta possíveis transições que ocorrem de um nível para o outro, cada nível tem um valor específico de energia. Os elétrons tendem a transitar para o nível de menor energia, quando isso ocorre o elétron emite a diferença de energia na forma de um fóton e pode ser calculado por:

$$\Delta E = E_i - E_f \quad \text{(Variação de energia entre níveis)}$$

$$\Delta E = hf \quad \text{(Energia do fóton emitido)}$$

$$h = 4,136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{Hz}^{-1} \quad \text{(Constante de Planck)}$$

Exemplo: Qual seria o comprimento de onda de um fóton emitido pela transição do nível 4 para o nível 2 do átomo de hidrogênio? Qual a sua cor?

Utilizando a equação para a variação de energia entre os níveis e a equação para se calcular a energia dos níveis, temos:

$$\Delta E = E_4 - E_2 = -\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{2^2}\right) \cdot 13,6 \text{ eV} = 2,55 \text{ eV}$$

Substituindo os valores obtidos na equação de energia do fóton emitido:

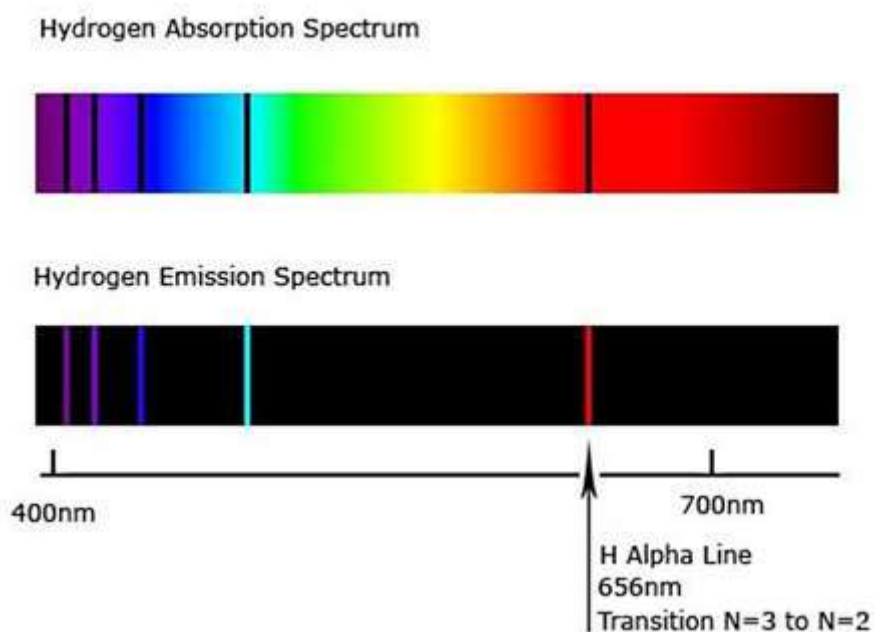
$$f = \frac{\Delta E}{h} = 6,17 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Convertendo frequência para comprimento de onda:

$$\lambda = \frac{c}{f} = 4,86 \times 10^{-7} \text{ m} = 486 \text{ nm}$$

Este comprimento de onda representa a luz azul. Quando aquecemos um material ocorre a emissão de múltiplas frequências de ondas eletromagnéticas devido à múltipla possibilidade de transição. Cada elemento possui suas linhas características únicas, na figura 2 temos o espectro de emissão do átomo de hidrogênio com suas linhas características.

Figura 2: Espectro de absorção e espectro de emissão do hidrogênio.



Fonte: <https://www.khanacademy.org/science/physical-chemistry-essentials/x98cdf762ed888601:structure-of-atom/x98cdf762ed888601:bohr-s-model-of-hydrogen-atom/a/absorptionemission-lines>

Observa-se na figura 2 que o comprimento de onda encontrado no exemplo corresponde a linha azul do espectro de emissão do átomo de hidrogênio. Os espectros de emissão são utilizados para determinar a composição de amostras e também para a determinação da composição de estrelas.

Os átomos constantemente absorvem radiações eletromagnéticas, assim garantindo o equilíbrio de energia com o ambiente (ou equilíbrio térmico). O espectro de absorção será oposto ao de emissão, pois os níveis de energia que podem ser absorvidos são os mesmos que emitem como se representa na figura 2.

Questões e problemas para praticar

- 1) Descreva as características principais de cada modelo atômico apresentado
- 2) Um fóton possui 2,85 eV de energia, qual é a sua frequência? e seu comprimento de onda?
- 3) Considerando o átomo de hidrogênio, quais são as energias dos elétrons nos níveis $n=3$ e $n=5$?
- 4) Calcule o comprimento de onda para um fóton emitido pela transição de $n=5$ para $n=3$ dos elétrons do exercício anterior. Em que parte do espectro eletromagnético se encontra o comprimento de onda calculado?
- 5) Qual é a energia em eV de uma fonte de luz vermelha de 650 nm?

Seção 4 - Introdução aos semicondutores

Tempo estimado: 1 aula.

Objetivo: Apresentar conceitos de semicondutores e suas aplicações.

Recursos: Material de apoio (Seção 4), projetor, giz e quadro negro.

Dinâmica:

1º Momento: Questionar os alunos sobre o conceito de semicondutor e suas aplicações no cotidiano. Após o questionamento, introduzir os conceitos relevantes de semicondutores.

2º Momento: Pedir por exemplos e aplicações de semicondutores aos alunos. Discutir os impactos ambientais do lixo eletrônico.

3º Momento: Finalizar a aula solicitando aos alunos que resolvam as questões e problemas do material de apoio.

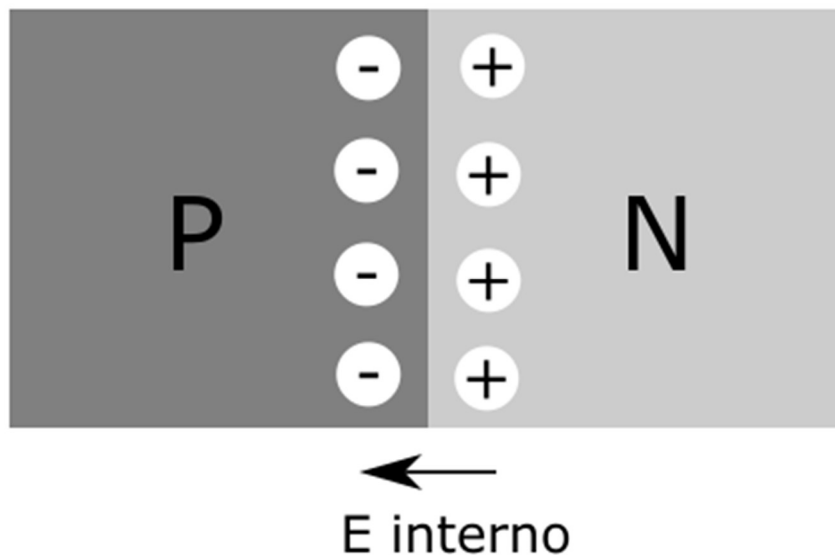
Introdução aos semicondutores

Semicondutores são materiais que podem se comportar como condutores ou como isolantes de eletricidade de acordo com condições estruturais específicas. Os semicondutores são utilizados na fabricação de diodos, transistores, chips e muitos outros componentes eletrônicos.

Os materiais com propriedades semicondutoras mais comuns são o silício e o germânio. Em quase todos os semicondutores se utiliza o silício devido sua abundância na natureza, para que componentes eletrônicos sejam fabricados o silício precisa ser dopado, ou seja, são introduzidos elementos que alteram o equilíbrio de carga no material, a dopagem pode ser positiva (tipo P) ou negativa (tipo N).

O elemento mais simples é o diodo, este componente é formado pela junção de uma camada tipo P com uma camada tipo N. Na junção forma-se um campo elétrico que impede a passagem de corrente elétrica no mesmo sentido.

Figura 1: Junção P-N de um diodo e o campo elétrico interno.

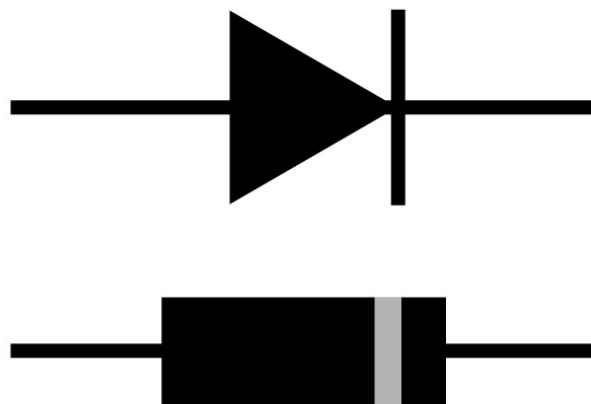


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 1 a corrente elétrica só irá fluir se o sentido for da esquerda para a direita (corrente direta), pois neste sentido a corrente se opõe ao campo elétrico da junção. Se a corrente for da direita para a esquerda (corrente reversa) o campo elétrico interno se fortalece, impedindo a passagem de corrente.

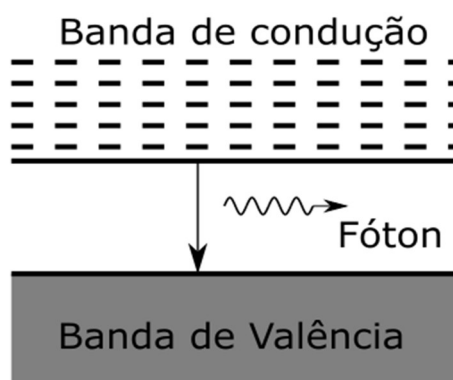
O campo elétrico formado na junção corresponde a uma diferença de potencial (ddp) de histerese no modo de corrente direta, em diodos de silício o valor desta ddp é de 0,5-0,7 V, enquanto para germânio a ddp é de aproximadamente 0,3 V. Esta ddp ocasiona a dissipação de calor.

Figura 2: Na parte de cima da imagem símbolo esquemático de um diodo, o sentido da seta indica o sentido da corrente direta. Na parte de baixo há uma representação de um diodo tradicional com a faixa cinza indicando o sentido da corrente direta.



Fonte: <https://www.geeksforgeeks.org/diode/>

Figura 3: Processo de emissão de luz por um semiconductor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro tipo de diodo é o LED (Light Emitting Diode) ou diodo emissor de luz, no LED a ddp de histerese é resultante da diferença de energia em eV entre os níveis de energia da banda de condução e banda de valência. A banda de condução permite

que elétrons se desloquem livremente entre os átomos do material, enquanto na banda de valência os elétrons estão presos no átomo. Entre a banda de valência e a banda de condução encontra-se a banda proibida, está a região que os elétrons não podem ocupar, a quantidade de energia em eV entre estas bandas é a ddp de histerese.

Figura 4: Símbolo esquemático do LED, a seta maior indica o sentido da corrente direta, enquanto as duas setas pequenas indicam a emissão de luz pelo diodo.



Fonte: <http://www.clker.com/clipart-13366.html>

Quando uma corrente elétrica direta passa pelo LED elétrons da banda de condução se deslocam para a banda de valência, emitindo um fóton por recombinação, portanto os LEDs convertem energia elétrica em luz com eficiência superior a 80%. A luz emitida por um LED será monocromática e obedece:

$$\Delta E = hf$$

$$\Delta E = \text{ddp sobre o LED}$$

$$h = 4,136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{Hz}^{-1}$$

Questões e problemas para praticar

- 1) Nas afirmações a seguir marque V para verdadeiro e F para falso:
 - () No diodo a corrente direta é a corrente no sentido que o diodo conduz, enquanto a corrente inversa está no sentido que o diodo não conduz.
 - () LEDs são transistores emissores de luz.
 - () A dopagem de um semicondutor pode ser do tipo N ou tipo P.
 - () Germânio é o material mais utilizado em semicondutores.
 - () A banda de valência possui elétrons ligados ao átomo.
 - () A banda de condução possui elétrons livres.
 - () LEDs tem eficiência de converter energia elétrica em energia luminosa menor que 80%.

- 2) Pesquisa: Encontre três exemplos de aplicação de LEDs.

- 3) Pesquisa: Encontre 4 exemplos de componentes eletrônicos que utilizam semicondutores.

- 4) Pesquisa: Vimos que os LEDs emitem luz monocromática, então como os LEDs conseguem emitir luz branca (policromática).

- 5) Um LED precisa de uma ddp de 2,8 V para seu funcionamento, qual é o comprimento de onda emitido? a que cor corresponde esse comprimento de onda?

- 6) Calcule a ddp para o funcionamento de um LED que emite infravermelho de 960 nm.

- 7) Calcule a ddp para o funcionamento de um LED ultravioleta de 395 nm.

Seção 5 - Efeito fotoelétrico e efeito fotovoltaico

Tempo estimado: 2 aulas.

Objetivo: Apresentar conceitos de efeito fotoelétrico e efeito fotovoltaico.

Recursos: Material de apoio (Seção 5), projetor, giz e quadro negro.

Dinâmica:

1º Momento: Realizar a correção dos exercícios da aula anterior com os alunos. Após a correção, entregar o material de apoio da aula 5 (Seção 5).

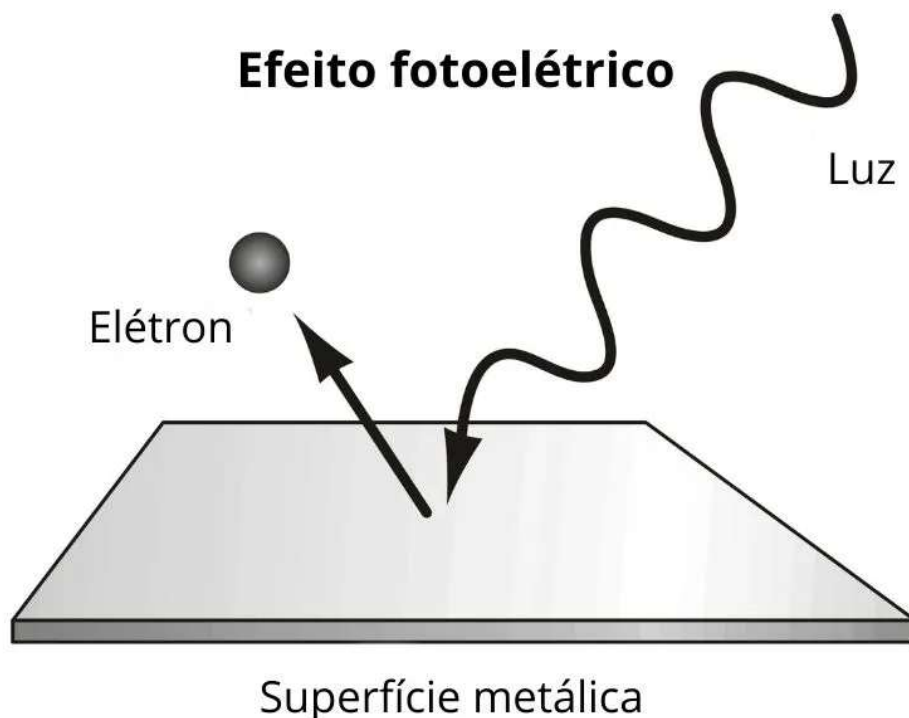
2º Momento: Promover o diálogo para construir com os alunos os conceitos do efeito fotoelétrico e relacioná-los com o efeito fotovoltaico.

3º Momento: Demonstrar no projetor o efeito fotoelétrico por meio da simulação apresentada no material de apoio, explicando as relações entre as variáveis e o fenômeno.

Efeito fotoelétrico e efeito fotovoltaico

O efeito fotoelétrico foi primeiramente observado por Hertz em 1887 quando um centelhador formado por duas placas metálicas com uma diferença de potencial entre elas produziram mais faíscas quando exposto à luz. Em 1905 Einstein observou que apenas fótons com energia maior que um determinado valor poderia remover elétrons de uma placa metálica.

Figura 1: Representação do efeito fotoelétrico.



Fonte: <https://www.preparaenem.com/fisica/efeito-fotoeletrico.htm>

No efeito fotoelétrico a remoção de elétrons ocorrerá se a energia do fóton for maior que o módulo da energia de ligação (função trabalho) do elétron e a energia cinética do elétron será a diferença entre a energia do fóton e a função trabalho.

$$E_{e^-} = \frac{1}{2}m_e v^2 \text{ (energia cinética do elétron)}$$

$$E_{e^-} = hf - W \text{ (Lei do efeito fotoelétrico)}$$

Igualando as equações, obtemos:

$$\frac{1}{2}m_e v^2 = hf - W \text{ (Equação do efeito fotoelétrico)}$$

Na equação do efeito fotoelétrico temos que a massa do elétron é dada por $m_e = 9,019 \times 10^{-31} \text{ kg}$, v é a velocidade do elétron, hf é a energia do fóton e W é a função trabalho que varia para cada metal. Abaixo uma tabela com os valores da função trabalho para alguns metais.

Tabela 1: Alguns metais e suas funções trabalho.

Material	Função trabalho W (eV)
Alumínio	4,08
Cobre	4,70
Ferro	4,50
Platina	6,35
Prata	4,73
Zinco	4,30

Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/o-efeito-fotoeletrico.htm>

Podemos reescrever a função trabalho em função de uma frequência f_0 que consiste da menor frequência para a ocorrência do efeito fotoelétrico, desta forma a equação pode ser rearranjada:

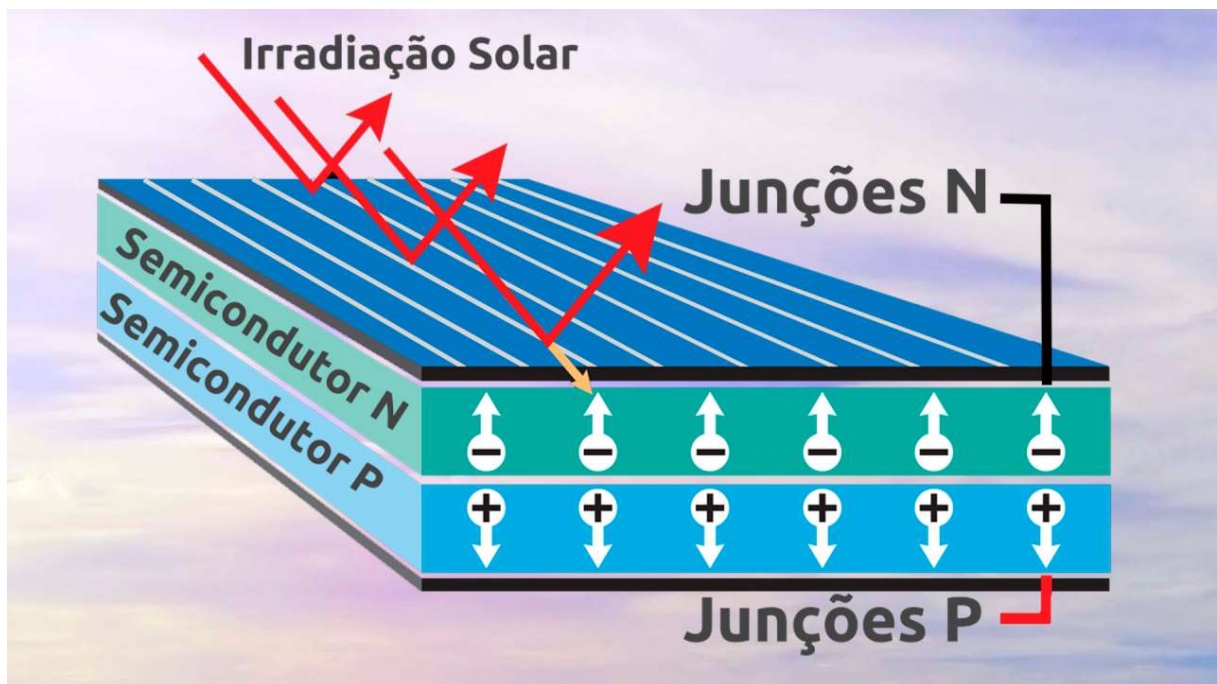
$$W = hf_0 \quad (\text{Frequência mínima para o efeito fotoelétrico ocorrer})$$

$$\frac{1}{2}m_e v^2 = h(f - f_0)$$

$$v = \sqrt{\frac{2h(f-f_0)}{m_e}} \quad (\text{Velocidade do elétron ejetado})$$

Efeito fotovoltaico: É o efeito que ocorre em semicondutores quando fótons de luz gera uma corrente elétrica, fenômeno oposto ao de emissão do LED. No efeito fotovoltaico, fótons incidem no semicondutor fornecendo energia para que elétrons na banda de valência saltem para a banda de condução, gerando uma corrente elétrica. O exemplo mais conhecido da aplicação deste efeito no mundo real são os painéis solares também conhecidos por painéis fotovoltaicos que são utilizados para a geração de energia limpa e renovável ao converter luz do sol em energia elétrica.

Figura 2: Esquema de uma célula fotovoltaica.



Fonte: <https://www.ensolare.com.br/blog/efeito-fotovoltaico-como-a-energia-e-gerada>

Com a incidência de luz sobre os LEDs pode-se gerar uma corrente elétrica e ddp em seus terminais pelos princípios do efeito fotovoltaico, no entanto LEDs geram maior corrente na faixa próxima de sua emissão. Exemplo: Um LED de cor verde tem mais eficiência na geração de corrente quando a luz incidente for verde.

Utilizando simuladores com os alunos

Efeito fotoelétrico

No

link:

https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/photoelectric/latest/photoelectric.html?simulation=photoelectric&locale=pt_BR

encontra-se o simulador do efeito fotoelétrico elaborado pela PHET Colorado. O docente mostrará no simulador que a emissão de elétrons só ocorre quando o comprimento de onda da fonte de luz for menor que um determinado valor característico do material selecionado.

- 1- Inicialmente seleciona-se o metal para observar o fenômeno.
- 2- Ajuste a intensidade da fonte de luz entre 5 e 10%
- 3- Deslizando o ajuste de comprimento de onda tente encontrar o ponto que o metal começa a emitir elétrons.
- 4- Com o valor do comprimento de onda calcule a função trabalho metal.
- 5- Aumente o comprimento de onda para o vermelho e verifique o que acontece quando a intensidade for máxima.
- 6- Repita os passos 1-5 para outros metais

Seção 6 – Percepção de cores

Tempo estimado: 1-2 aulas.

Objetivo: Apresentar conceitos da percepção das cores, e com o apoio de simuladores demonstrá-los.

Recursos: Material de apoio (Seção 6), celular, computador, projetor, giz e quadro negro.

Dinâmica:

1º Momento: Realizar a correção dos exercícios da aula anterior com os alunos. Após a correção, entregar o material de apoio da aula 6 (Seção 6).

2º Momento: Apresentar e discutir o tema com os alunos.

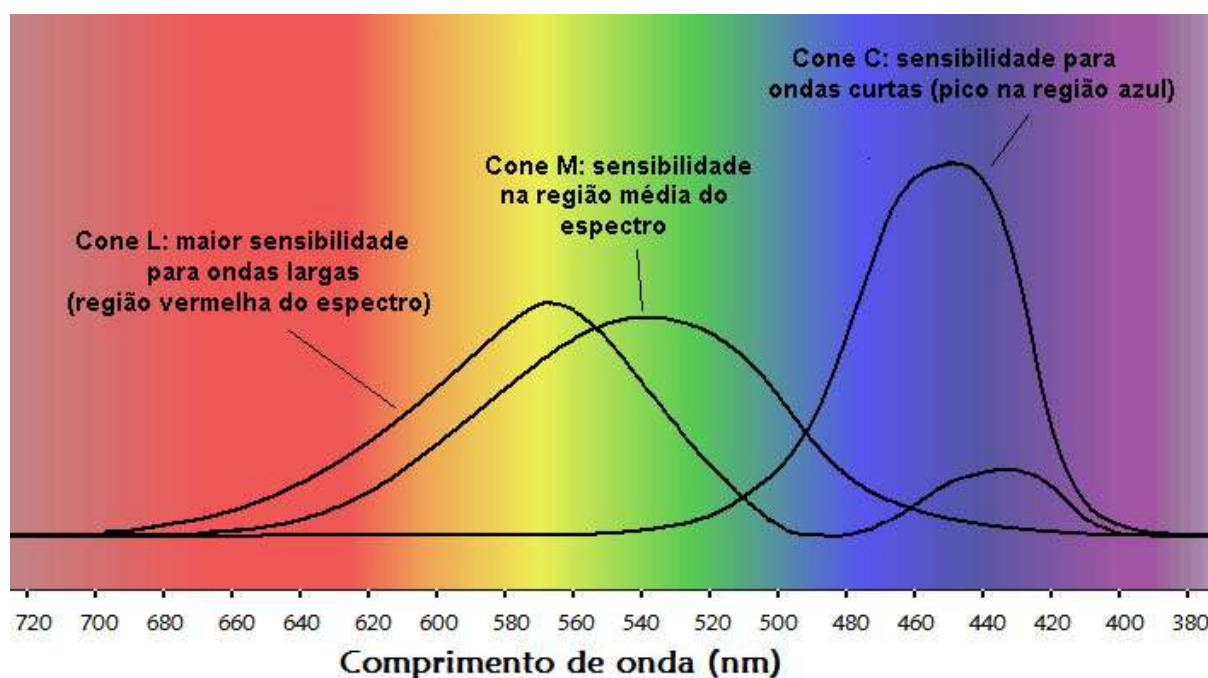
3º Momento: Orientar os alunos para a realização de experimentos com os simuladores de mistura de cores apresentados no material de apoio.

4º Momento: Discutir com os alunos os resultados da simulação e a diferença entre as cores da luz e de pigmentos.

Percepção de cores

Percepção de cores: Os olhos humanos percebem cores e luminosidade por meio de dois tipos de células: Bastonetes e cones. Os bastonetes operam apenas em baixa luminosidade e não distingue cores, este tipo de visão é chamada de visão escotópica ou visão noturna. Os cones são divididos em três tipos: Cones L (região de ondas larga/vermelho), Cones M (região de ondas médias/verde) e Cones C (região de ondas curtas/azul) permitindo a visão fotópica ou visão diurna. Cada tipo de cone apresenta maior sensibilidade para uma faixa de comprimento de onda do espectro visível como apresenta a figura 3.

Figura 1: Sensibilidade dos cones do olho humano em função do comprimento de onda.



Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Sensibilidade-dos-tres-tipos-de-cones-no-olho-humano-7-com-as-denominacoes_fig2_271123094

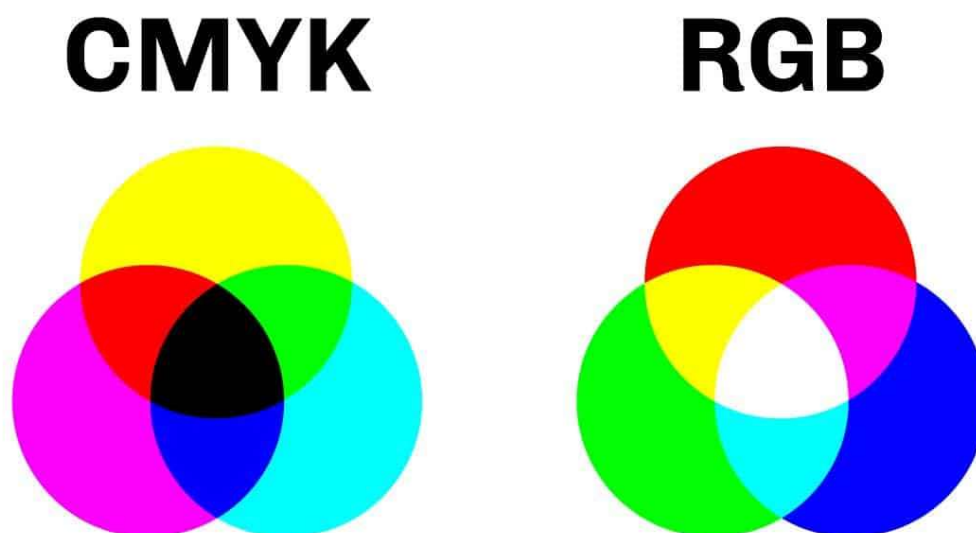
Este mecanismo natural permite que percebamos as cores por meio da mistura de três cores primárias de luz: Vermelho, Verde e Azul. Este padrão de cores de luz primárias é chamado de padrão RGB (*Red Green Blue*), ou padrão Vermelho Verde Azul. Este padrão é utilizado em displays e iluminação de LED para simular cores para

os olhos humanos. No padrão RGB as faixas do espectro de luz se somam, criando um novo espectro.

O outro padrão de cores utilizados é o CMYK (*Cian Magenta Yellow black*), ou padrão Ciano Magenta Amarelo Preto, este é o padrão para mistura de cores de tintas e pigmentos. Quando se mistura duas cores primárias de tinta, as faixas do espectro de absorção de luz se somam, portanto menos luz será refletida pela tinta ou pigmento.

A Figura 2 apresenta a as cores primárias e secundárias dos padrões CMYK e RGB.

Figura 2: Modelo de cores CMYK e RGB.



Fonte: <https://plumgroveinc.com/what-is-cmyk-color/>

Na Figura 2 observa-se que no padrão CMYK as cores são invertidas em relação ao padrão RGB, dado que as cores de pigmentos e tintas removem cores (comprimentos de ondas), portanto ao misturar as três cores primárias se obtém a cor preta. Enquanto no padrão de cor de luz, as cores (comprimento de onda) se somam, produzindo a cor branca.

Utilizando simuladores

Percepção de cores

No link: https://phet.colorado.edu/sims/html/color-vision/latest/color-vision_all.html?locale=pt_BR encontra-se um simulador para a mistura de cores RGB.

Após abrir o simulador siga os passos abaixo:

- 1- Selecione lâmpadas RGB
- 2- Utilize as barras deslizantes para ajustar a quantidade de cada cor de luz.
- 3- Acima da cabeça do personagem estará a cor resultante.

Misture as cores, utilizando números de 0-1 para representar a porcentagem da cor para se misturar. O quadro a seguir será utilizado para a atividade:

Vermelho	Verde	Azul	Cor resultante
0	0	0	
0	0	1	
0	1	0	
0	1	1	
1	0	0	
1	0	1	
1	1	0	
1	1	1	
0,5	0,5	0,5	
0,5	0,5	0	
0,5	0,5	1	
0,5	0,5	0,5	
0	0,5	0,5	
1	0,5	0,5	
0,5	0,5	0,5	
0,5	0	0,5	
0,5	1	0,5	

Seção 7 - Experimento para o cálculo da constante de Planck com LEDs

Tempo estimado: 1-2 aulas.

Objetivo: Realizar o experimento para se calcular a constante de Planck.

Recursos: Material de apoio (Seção 7), experimento com LED, giz e quadro negro.

Dinâmica:

1º Momento: Dividir a turma em grupos de 4-6 alunos e entregar o material de apoio e um kit de experimento para cada grupo.

2º Momento: Orientar os alunos para a realização de experimentos de acordo com a seção 7.

3º Momento: Discutir com os alunos os valores obtidos para o valor da constante de Planck e comparar com o valor teórico.

1 - Experimento para calcular a constante de Planck.

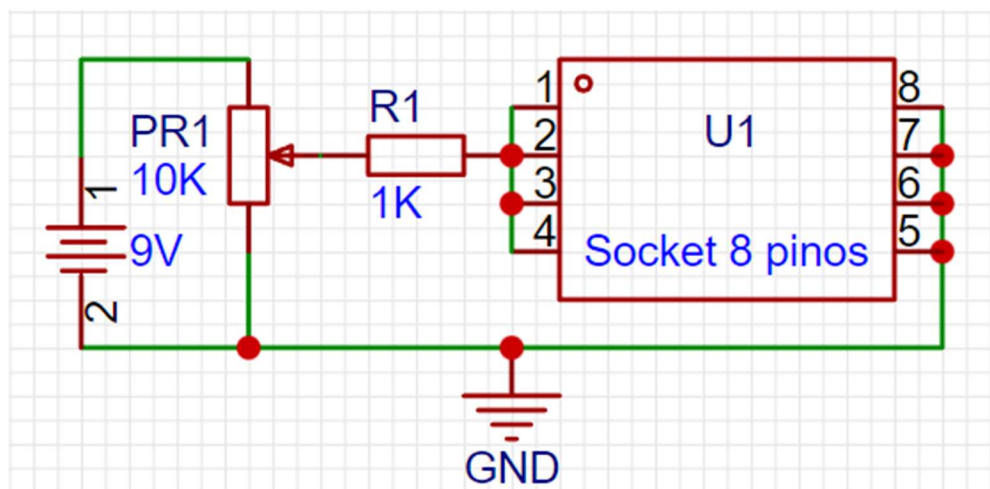
Montagem do experimento

Materiais:

- 1 caixa de projeto de plástico
- 1 bateria 9V
- 1 conector para bateria 9 V
- 1 potenciômetro de 10k ohms
- 1 knob para potenciômetro
- 1 resistor de 1k ohms
- 1 soquete DIP-8
- Fios para eletrônica
- 1 multímetro
- LEDs (Vermelho, laranja, verde e azul)

O soquete DIP 8 foi utilizado para facilitar a conexão dos LEDs e Multímetro durante o experimento. Para montar os componentes foram utilizados ferro de solda, estanho de solda e alicate para cortar e descascar fios. A figura 1 contém o diagrama esquemático da montagem experimental.

Figura 1: Diagrama esquemático da montagem experimental para obter a constante de Planck.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No diagrama da figura 1 o potenciômetro PR1 ajusta a ddp fornecida ao LED, o resistor R1 tem a função de limitar a corrente elétrica e previne a queima de LEDs por excesso de corrente elétrica.

Montagem alternativa

O experimento pode ser montado em uma *protoboard*, assim não há a necessidade de utilizar a caixa de projeto e o soquete DIP-8. Entretanto em uma *protoboard* as conexões não são rígidas e estáveis, podendo utilizar mais tempo para a realização do experimento.

Procedimento experimental

- 1) Primeiramente instale a bateria 9V no conector de bateria.
- 2) Escolha um dos LEDs e instale no soquete DIP-8.
- 3) Ajuste o potenciômetro da montagem até que o LED comece a brilhar
- 4) Selecione a escala de tensão de 20V ou equivalente do multímetro
- 5) Com as pontas de prova sobre os terminais do LED medir a tensão sobre o LED e anotar na tabela 1
- 6) Realizar passos 2 – 5 para todos os LEDs
- 7) Calcular a constante de Planck para cada item na tabela 1.
- 8) Calcular a razão entre o valor obtido e o teórico para a constante de Planck para cada item da tabela 1

Tabela 1

Cor do LED	Tensão medida	Cte Planck em eV	Razão experimental/teórica

2 - Experimento para medir a tensão fotovoltaica do LED

O LED produz uma diferença de potencial ao ser exposto a uma fonte de luz, este efeito de produzir uma tensão sobre um semicondutor é conhecido como efeito fotovoltaico e é utilizado em painéis solares para a produção de energia elétrica.

Nesse experimento veremos quais dos LEDs produzirá maior diferença de potencial ao ser exposto a luz de uma lanterna.

Materiais:

- LEDs (Vermelho, laranja, verde, azul)
- Multímetro
- Lanterna

Procedimento experimental

- 1) Um dos alunos deve conectar os terminais do LED nas pontas de prova do multímetro e manter o contato
- 2) Selecionar a escala de 20V (ou equivalente) do multímetro
- 3) Outro aluno apontará a lanterna para o LED e anotará a tensão gerada pelo LED na tabela 2.
- 4) Repetir o procedimento para os LEDs restantes

Tabela 2

Cor do LED	Tensão medida

Questões após os experimentos

- 1) Ordene a cor dos LEDs de forma que a diferença de potencial medida seja crescente.

Menor tensão		Maior tensão	
1	2	3	4

- 2) Qual a cor do LED que apresentou maior tensão de ativação? De acordo com o espectro de luz e a teoria de Planck, essa cor é a mais energética das cores dos LEDs testados?

- 3) Qual LED apresentou o valor mais próximo para a constante de Planck experimental?

- 4) Qual dos LEDs gerou maior tensão ao ser exposto a luz da lanterna? E qual apresentou menor tensão?

- 5) O LED que apresentou maior tensão emite a cor de luz mais energética?

- 6) Calcule a média da constante de Planck obtida no experimento e determine a razão com a constante de Planck teórica:

Seção 8 - Avaliação

Tempo estimado: 1 aula.

Objetivo: Avaliar a aprendizagem dos alunos por meio de prova, trabalhos, etc.

Recursos: Material de apoio (Seção 8).

Dinâmica:

Esta aula é dedicada à avaliação final dos alunos. Na Seção 8 encontram-se uma lista de exercícios, prova e trabalho sugeridos para a avaliação dos alunos.

Durante o período de aplicação da UEPS deve-se avaliar a participação dos alunos nas aulas e atividades. Além do resultado, deve-se levar em consideração o raciocínio utilizado pelos alunos na resolução de problemas da prova.

Avaliações

A prova foi elaborada com base nos conceitos apresentados na UEPS. Esta folha contém as equações e constantes para a realização da prova.

$$h = 4,136 \times 10^{-15} eV.Hz^{-1}$$

Constante de Planck em eV

$$h = 6,626 \times 10^{-34} eV.Hz^{-1}$$

Constante de Planck em J

$$v = c/\lambda$$

Relação entre frequência e comprimento de onda

$$\Delta E = hf$$

Energia do fóton

$$\frac{1}{2}m_e v^2 = hf - W$$

Equação do efeito fotoelétrico

$$m_e = 9,019 \times 10^{-31} kg$$

Massa do elétron

Avaliação de Física – Moderna I

Nome: _____

Nº _____ Turma: _____ Data: ___/___/___ NOTA: _____

1) Cite três exemplos de radiações eletromagnéticas e suas fontes.

1 _____

2 _____

3 _____

2) Calcule e expresse em eV a energia de um fóton de luz ultravioleta de 300nm que incide sobre os materiais listado na tabela, e com seus conhecimentos preencha a coluna da tabela abaixo com Sim ou Não:

Material	Função trabalho W (eV)	Ocorre efeito fotoelétrico
Alumínio	4,08	
Cobre	4,70	
Ferro	4,50	
Platina	6,35	
Prata	4,73	
Zinco	4,30	

3) Uma luz UV de 260nm atinge uma placa de alumínio, qual a energia cinética do elétron ejetado? Qual a velocidade do elétron ejetado?

4) Um aluno ao tentar determinar a contante de Planck utilizando a tensão de ativação de um LED vermelho com comprimento de onda de 650nm mediu uma tensão de ativação de 1,887 V. Qual o valor obtido para a constante de Planck em eV? Qual a razão entre a constante obtida com a constante teórica?

5) Uma célula solar produz uma diferença de potencial de 0,6 V quando exposta a luz solar. Qual o comprimento de onda do fóton que produz essa diferença de potencial?

6) Sobre os modelos atômicos marque nas afirmações abaixo V para verdadeiro e F para falso:

() A carga do nêutron é nula

() O modelo de Bohr é conhecido por pudim de passas por apresentar cargas negativas em um meio de carga positiva.

() O modelo de Dalton considera o átomo como uma esfera maciça.

() O modelo de Schrödinger representa o elétron como uma partícula dual.

() O modelo de Thompson além de representar a presença de prótons e nêutrons no núcleo, também representa a eletrosfera composta por elétrons em órbitas ao redor do núcleo.

7) Sobre a percepção e mistura de cores, assinale a(s) alternativa(s) correta(s):

() A retina dos olhos humanos são compostos por cones e bastonetes. Os cones são responsáveis pela visão noturna, enquanto os bastonetes são responsáveis pela visão colorida.

() A retina dos olhos humanos são compostos por cones e bastonetes. Os cones são responsáveis pela visão colorida, enquanto os bastonetes são responsáveis pela visão noturna.

() Os cones são divididos em três grupos devido ao seu intervalo de sensibilidade a luz visível: Cones vermelhos, cone verdes e cones azuis.

() A mistura das cores de pigmentos resulta soma dos espectros de cores refletidas por cada pigmento, enquanto as cores de luz resulta na subtração das cores.

() No padrão RGB (cor de luz vermelha, verde e azul) a soma das três cores primárias resulta em branco, enquanto no padrão CMYK (Cor de pigmentos ciano, magenta, amarelo e preto) a soma de todas as cores primárias resulta em preto.

Sugestões de trabalhos e textos

A apresentação de seminários pelos alunos é uma opção de atividade avaliativa que compõe a nota final. Os textos abaixo podem ser utilizados para a discussão dos temas em sala, para esta atividade os alunos têm o dever de ler o texto antes de discuti-los em sala com a orientação do professor.

Textos sobre energia solar:

<https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/fisica/energia-solar>

<https://www3.unicentro.br/petfisica/2021/04/01/uma-visao-geral-sobre-a-energia-solar/>

Texto sobre percepção de cores:

<https://aprovatotal.com.br/introducao-optica-conceitos/>

Texto sobre a diferença entre efeito fotoelétrico e efeito fotovoltaico:

<https://energiaqueinova.com/publicacoes/a-sinergia-entre-o-efeito-fotoeletrico-e-o-efeito-fotovoltaico/>