

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física
Polo **ufscar** Sorocaba



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE

DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

**INTRODUÇÃO À MECÂNICA QUÂNTICA NO
ENSINO MÉDIO ATRAVÉS DA DISCUSSÃO SOBRE A
CONSTANTE DE PLANCK**

JÚLIO CÉSAR GOMES OLIVEIRA

ORIENTADOR: PROF. DR. ANTONIO AUGUSTO SOARES

Sorocaba - SP
Fevereiro de 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

**INTRODUÇÃO À MECÂNICA QUÂNTICA NO
ENSINO MÉDIO ATRAVÉS DA DISCUSSÃO SOBRE A
CONSTANTE DE PLANCK**

JÚLIO CÉSAR GOMES OLIVEIRA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física (PROFIS-So) da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Área de concentração: Formação de professores de Física em nível de mestrado. Desenvolvimento de produtos e processos de ensino e aprendizagem que utilizem tecnologias de informação e comunicação tais como aplicativos para computadores, mídias para tablets, plataforma para simulações e modelagem computacionais, aquisição automática de dados, celulares e redes sociais.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Augusto Soares.

Sorocaba - SP
Fevereiro de 2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências e Tecnologias Para a Sustentabilidade
Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Júlio Cesar Gomes Oliveira, realizada em 28/02/2023.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Antonio Augusto Soares (UFSCar)

Profa. Dra. Adriana de Oliveira Delgado Silva (UFSCar)

Profa. Dra. Silvânia Alves de Carvalho (UFF)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física.

Oliveira, Júlio César Gomes

Introdução à Mecânica Quântica no Ensino Médio
através de uma discussão sobre a constante de Planck /
Júlio César Gomes Oliveira -- 2023.
144f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São
Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba
Orientador (a): Antonio Augusto Soares
Banca Examinadora: Antonio Augusto Soares, Adriana de
Oliveira Delgado Silva, Silvânia Alves de Carvalho
Bibliografia

1. Mecânica Quântica. 2. Constante de Planck. 3. Ensino
de Física. I. Oliveira, Júlio César Gomes. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Deus. À minha família. Aos meus pais, Acácio e Sara, por toda a dedicação fornecida a mim. Aos meus irmãos, Danilo, Glaucio e Natalia, por todos esses anos de convivência e amizade.

AGRADECIMENTO

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) durante todo o período de formação.

Agradeço profundamente ao meu orientador, Dr. Antonio Augusto Soares, por ter aceitado me orientar em um momento bastante crítico da minha trajetória no programa de Mestrado. Obrigado por todo o conhecimento transmitido e por estar sempre próximo e fornecer conselhos valiosos e assertivos durante o processo de escrita dessa dissertação.

Agradeço imensamente a todos os professores do MNPEF, *campus* Sorocaba, e a todos os meus amigos que me acompanharam nessa trajetória.

“O universo não é apenas mais estranho do que imaginamos, é mais estranho do que podemos imaginar.”

Werner Heisenberg

RESUMO

OLIVEIRA, J. C. G. Introdução à Mecânica Quântica no Ensino Médio através da discussão sobre a constante de Planck. 2023. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, Sorocaba, 2023.

Neste trabalho, desenvolvemos um produto educacional para se introduzir mecânica quântica no Ensino Médio através de uma discussão sobre a constante de Planck. Como referencial de aprendizagem utilizamos a Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) de David Ausubel. O produto foi aplicado em três encontros para duas turmas do segundo ano do Ensino Médio integrado ao curso técnico. No primeiro encontro, foi aplicado um questionário de mapeamento com a finalidade de levantar o conhecimento prévio dos alunos relacionado a conceitos introdutórios sobre a Física Quântica e a constante de Planck. No segundo encontro, apresentamos uma breve contextualização histórica sobre a descoberta da constante de Planck e o surgimento da Mecânica Quântica. Ao final deste encontro aplicamos o questionário da atividade 1. No terceiro encontro realizamos uma atividade para determinar a constante de Planck com a utilização de um simulador computacional e outra com o uso da plataforma Arduino para se automatizar a coleta dos dados experimentais. No final deste encontro aplicamos o questionário da atividade 2. Através da análise do questionário de mapeamento, foi possível identificar que grande parte dos discentes de ambas as turmas nunca ouviu falar sobre a constante de Planck e ao se comparar esse questionário com as respostas dos questionários das atividades 1 e 2, notamos uma nítida evolução no conhecimento adquirido pelos alunos relacionado ao tema abordado no produto educacional. Algumas das finalidades desse trabalho foram a de contribuir para o ensino de Física Quântica nas escolas de Ensino Médio, de modo a tornar mais acessível a experimentação, desenvolver o letramento científico dos estudantes, combater a pseudociência, e mostrar aos discentes que a ciência está em constante construção. Espera-se que esse trabalho possa contribuir para a área de ensino de física e colaborar para o desenvolvimento da alfabetização científica dos cidadãos, de modo a promover a capacitação para que eles possam participar assertivamente de discussões na sociedade envolvendo questões científicas e tecnológicas relacionadas à Física Quântica.

Palavras-chave: Ensino de Física. Constante de Planck. Experimentação. Arduino. Simulação computacional.

ABSTRACT

OLIVEIRA, J. C. G. Introduction to Quantum Mechanics in High School through the discussion of Planck's constant. 2023. Dissertation (Master in Physics Teaching) – Federal University of São Carlos, Sorocaba *campus*, Sorocaba, 2023.

In this work, we develop an educational product to introduce quantum mechanics in High School through a discussion about Planck's constant. As a learning framework we used David Ausubel's Meaningful Learning Theory (MLT). The product was applied in three meetings for two classes of the second year of high school integrated into the technical course. In the first meeting, a mapping questionnaire was applied in order to raise the students' prior knowledge related to introductory concepts about Quantum Physics and Planck's constant. In the second meeting, we present a brief historical context about the discovery of Planck's constant and the emergence of Quantum Mechanics. At the end of this meeting, we applied the questionnaire from activity 1. In the third meeting, we carried out an activity to determine Planck's constant using a computational simulator and another using the Arduino platform to automate the collection of experimental data. At the end of this meeting, we applied the questionnaire from activity 2. Through the analysis of the mapping questionnaire, it was possible to identify that a large part of the students in both classes had never heard of Planck's constant and when comparing this questionnaire with the answers from the questionnaires from activities 1 and 2, we noticed a clear evolution in the knowledge acquired by students related to the topic covered in the educational product. Some of the purposes of this work were to contribute to the teaching of Quantum Physics in high schools, in order to make experimentation more accessible, to develop students' scientific literacy, to combat pseudoscience, and to show students that science is in constant construction. It is hoped that this work can contribute to the area of physics teaching and collaborate for the development of scientific literacy of citizens, in order to promote training so that they can participate assertively in discussions in society involving scientific and technological issues related to Quantum Physics.

Keywords: Teaching Physics. Planck constant. Experimentation. Arduino. Computer simulation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Gráfico resumindo a história completa dos resultados obtidos para as determinações experimentais da constante de Planck h (pontos azuis). As barras de erro representam a incerteza atribuída aos resultados. A linha reta verde é o valor moderno. É possível notar a redução do valor da incerteza experimental de h ao longo do tempo (linha tracejada vermelha)..... 17
- Figura 2: Devido ao processo de fluorescência, a luz emitida pelo LED azul, pode ser convertida, por exemplo, para uma luz de menor frequência (luz verde)..... 19
- Figura 3: Plataforma Microcontroladora Arduino. Em (1) temos a entrada USB, (2) o botão reset, (3) as entradas e saídas digitais, (4) as entradas e saídas analógicas, (5) os GNDs ou aterramentos, (6) a saída de 5V, (7) a saída de 3,3V, e (8) a entrada para a fonte de alimentação entre 7V e 12V. 20
- Figura 4: (a) Planilha do Microsoft Excel com a ferramenta PLX-DAQ, mostrando a plotagem do gráfico através da coleta de dados automática do sistema. (b) Plotagem dos dados em tempo real na planilha do *Microsoft Excel*..... 22
- Figura 5: Max Planck (1858-1947). Físico alemão e ganhador do prêmio Nobel de Física de 1918 em reconhecimento aos seus serviços prestados para o avanço da física e à sua descoberta do “*quanta*” de energia. Embora muitos historiadores da ciência afirmem que a apresentação do artigo do físico alemão Max Planck (1858-1947) em 14 de dezembro de 1900 denominado “*Sobre a teoria da lei de distribuição de energia do espectro normal*” tenha marcado o início da Física Quântica, o nascimento da mecânica quântica se deu devido a inabilidade da Física Clássica em responder satisfatoriamente alguns problemas, principalmente aqueles que se apresentaram para os físicos nas últimas décadas do século XIX..... 24
- Figura 6: Wilhelm Wien (1864-1928). Foi o primeiro físico a tentar fornecer uma análise teórica coerente para a obtenção da distribuição espectral da radiação do corpo negro. Em 1911, recebeu o prêmio Nobel de Física, pela descoberta das leis de irradiação do calor, mais conhecida como a Lei de Wien..... 25
- Figura 7: Fundição de metal em indústria siderúrgica. Compreender o comportamento da radiação térmica emitida pelos metais aquecidos em fornos de alta temperatura pela indústria siderúrgica alemã, foi um dos grandes motivadores para que os cientistas investigassem em meados do século XIX a natureza da radiação térmica. 25
- Figura 8: Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906). O físico austríaco é conhecido pelo seu trabalho no campo da termodinâmica estatística. É considerado junto com Josiah Willard Gibbs e James Clerk Maxwell como o fundador da mecânica estatística. 26

- Figura 9: Cavidade de um corpo negro com fótons saltando para frente e para trás a uma determinada temperatura. A cavidade possui um pequeno orifício pelo qual é possível observar a radiação espectral. Planck considerou que na superfície das paredes da cavidade do corpo negro, existem osciladores harmônicos simples (cargas elétricas oscilantes) que só podem ter discretos valores ε de energia, de tal modo que $\varepsilon = hv$ para $n = 1, 2, 3, \dots$. Planck também considerou que os osciladores existentes na superfície do corpo só emitem ou absorvem energia quando passam de um estado quântico para outro.27
- Figura 10: (a) Gráfico dos pontos experimentais (círculos vermelhos) e da previsão teórica da Física Clássica (linha sólida azul) da intensidade da radiação emitida por um corpo negro em função de seu comprimento de onda realizada pelos físicos Rayleigh e Jeans, também conhecida como a catástrofe do ultravioleta. (b) Gráfico dos pontos experimentais (círculos vermelhos) e da previsão teórica (linha sólida azul) da intensidade da radiação emitida por um corpo negro em função de seu comprimento de onda realizada pelo físico Max Planck..... 27
- Figura 11: Albert Einstein (1879-1955). O físico alemão Albert Einstein ganhou o prêmio Nobel de Física em 1921 devido a sua explicação para o efeito fotoelétrico e por suas contribuições para a Física Teórica. 28
- Figura 12: Niels Bohr (1885-1962). O físico dinamarquês, Niels Bohr ganhou o prêmio Nobel de Física em 1922 por seus serviços na investigação da estrutura dos átomos e radiação emanada por eles..... 29
- Figura 13: Radiância espectral de um corpo negro em função da frequência da radiação para as temperaturas de 1000K, 1500K, e 2000K. Podemos notar que a frequência para a qual o valor máximo da radiância ocorre se eleva de modo linear com a temperatura, e a potência total emitida por m^2 tem um aumento rápido com a temperatura. 30
- Figura 14: Cavidades que representam um corpo negro e aparato experimental. Em (a) a radiação que incide pelo orifício da cavidade é refletida repetidas vezes pelas paredes da cavidade, e dificilmente sairá do orifício. Em (b) a cavidade está a uma temperatura T , e portanto, está emitindo radiação térmica que é absorvida e reemitida pelas paredes internas, e eventualmente, sai pelo orifício. Em (c) temos o aparato experimental elétrico de corpo negro brilhante projetado por O. Lummer e F. Kulbaum em 1898. A corrente aquece o filamento localizado em um tubo dentro do cilindro. O espectro desta radiação é observado através do orifício encontrado ao longo do eixo do cilindro. Com uma corrente de cerca de 100A, temperaturas de aproximadamente 1500°C (1773K) podem ser alcançadas. ... 32
- Figura 15: A linha pontilhada indica a previsão de Rayleigh-Jeans utilizando a Física Clássica em comparação com os resultados experimentais (linha sólida) para a densidade de energia de uma cavidade de corpo negro. Essa discrepância entre o resultado experimental e o resultado teórico obtido por Rayleigh-Jeans também é conhecido como a catástrofe do ultravioleta. 33

Figura 16: (a) Gráfico da distribuição de probabilidade de Boltzmann $P(\epsilon) = e^{-\epsilon/kT}$. O valor médio da energia ϵ para essa distribuição é $\epsilon = kT$, que é a lei clássica da equipartição de energia. Para se realizar o cálculo desse valor de ϵ , basta integrarmos $\epsilon P(\epsilon)$ de zero até o infinito. Dessa forma, esta é a quantidade da qual calculamos a média, ϵ , multiplicada pela probabilidade relativa $P(\epsilon)$ com a qual o valor ϵ poderá ser obtido numa medição de energia. (b) Gráfico de $\epsilon P(\epsilon)$ no qual a área sob a curva fornece o valor da energia média ϵ 35

Figura 17: (a) Se a energia ϵ não se trata de uma variável contínua, mas somente limitada a valores discretos $0, \Delta\epsilon, 2\Delta\epsilon, 3\Delta\epsilon, \dots$, como pode ser observado nos traços do eixo ϵ da figura, a integral usada para o cálculo da soma ϵ deve ser substituída por uma soma discreta. O valor médio de ϵ será a soma das áreas dos retângulos, cada qual com largura $\Delta\epsilon$, e com altura fornecida pelo valor possível de ϵ multiplicado pelo valor de $P(\epsilon)$ no início de cada intervalo. Nesta Figura, $\Delta\epsilon \ll kT$, e como as energias e as possibilidades energéticas estão muito próximas, a área de todos os retângulos quase não se diferencia em relação à área sob a suave curva. Desse modo, o valor médio ϵ observado é muito próximo a kT . (b) $\Delta\epsilon \approx kT$, e ϵ possui um menor valor em relação à Figura 17(a). (c) $\Delta\epsilon \gg kT$, e ϵ é mais diminuto ainda. Os retângulos demonstram nas três figuras a contribuição para a área total $\epsilon P(\epsilon)$, para cada possibilidade energética. O retângulo para $\epsilon = 0$ possui, obviamente, sem exceção, altura igual a zero. Isto ocasiona um enorme efeito na área total, caso as larguras retangulares sejam grandes. 36

Figura 18: A linha sólida indica a previsão realizada por Planck para a densidade de energia em comparação com os resultados obtidos experimentalmente (círculos) para a densidade de energia de um corpo negro para uma temperatura de 1595K. Os dados foram divulgados pelo físico William Coblentz em 1916. Depois de traçar as curvas do espectro de energia provenientes de suas medições, o autor observou que “devido ao cansaço da vista, ficou impossibilitado nos meses seguintes de fornecer a devida atenção à análise dos dados. Após finalmente serem analisados, os dados levaram a um valor de $6,57 \times 10^{-34}$ joules \cdot s para a constante de Planck. 37

Figura 19: (a) As possibilidades energéticas para um sistema clássico que oscila senoidalmente com frequência ν são distribuídas de forma contínua. (b) De acordo com o postulado de Planck, as energias possíveis são distribuídas de forma discreta, tendo em vista que podem obter apenas os valores $n h \nu$. Nesta situação, dizemos que a energia é “quantizada”, sendo n o estado quântico de um estado quântico possível. (c) Um exemplo de descontinuidade na redução de energia é a de um pêndulo simples de massa $m = 0,1\text{kg}$, suspenso por uma corda de comprimento $l = 0,1\text{m}$, cuja amplitude máxima de oscilação é de $\theta = 0,1\text{rad}$ em relação à vertical. A energia do pêndulo se reduz por causa dos efeitos do atrito. 38

Figura 20: (a) LED - Diodo Emissor de Luz. (b) Espectro de emissão de diversos LEDs. 40

Figura 21:(a) Material semiconductor formado por silício (Si) não dopado. (b) Material semiconductor do tipo-n dopado com átomo de fósforo (P). (c) Material semiconductor do tipo-p dopado com átomo de boro (B).	41
Figura 22: (a) Esquema representando a diferença de níveis de energia, ou barreira de potencial, e o processo de emissão de luz de um LED. (b) Energia de Fermi (EF), energia de <i>gap</i> (Eg), banda de condução, banda de valência, e a banda proibida de um semiconductor.	42
Figura 23: Curva característica teórica do LED. A seta vermelha indica o ponto de intersecção da reta extrapolada (linha tracejada) com o eixo da tensão elétrica V	43
Figura 24: (a) Esquemática do circuito elétrico para se determinar a constante de Planck por meio de LED. (b) Representação da montagem do circuito elétrico em conjunto com a plataforma Arduino.....	44
Figura 25: Montagem experimental na <i>protoboard</i> do circuito elétrico em conjunto com a plataforma Arduino para a coleta dos dados experimentais. As letras C , D , E , F e G correspondem aos números 6, 7, 4, 8 e 9 indicados na Figura 24.....	45
Figura 26: <i>Print</i> da tela do <i>Monitor serial</i> da IDE da plataforma Arduino com os dados experimentais da tensão e da corrente elétrica impressos. No retângulo vermelho, os valores indicam que o potenciômetro foi configurado para que o valor da tensão elétrica seja igual à zero nos terminais do LED.	46
Figura 27: Gráfico da corrente elétrica (A) vs. tensão elétrica (V) dos dados experimentais coletados com a plataforma Arduino para o LED azul.	47
Figura 28: Gráfico da corrente elétrica i vs. tensão elétrica V para o LED azul. Por meio de uma análise visual o segmento de reta ajusta os dados que visualmente sugerem estar mais alinhados de acordo com uma reta. A linha tracejada indica a extrapolação linear e no interior do círculo vermelho está o ponto de intersecção da reta com o eixo V	48
Figura 29: Gráfico de dispersão de $i(A)$ vs. $V(V)$ dos dados experimentais que visualmente sugerem estar alinhados de acordo com uma reta. Através do método da regressão linear obtivemos a equação da reta que melhor ajusta os dados. Nesta equação, y é a variável da corrente elétrica i e x é a variável da tensão elétrica V aplicada no LED. A linha tracejada indica a extrapolação linear e no interior do círculo em vermelho está o ponto de intersecção da reta com o eixo V	48
Figura 30: Em (a) e (b) temos os gráficos dos dados experimentais e da regressão linear obtidos para o LED verde. Em (c) e (d) temos os gráficos dos dados experimentais e da regressão linear obtidos para o LED vermelho. As linhas tracejadas em (b) e (d) indicam as extrapolações lineares e os círculos as intersecções das retas com os eixos de tensões elétricas.....	49
Figura 31: Gráfico gerado a partir das respostas à questão 1 do questionário de mapeamento pelos alunos das Turmas A e B.	56

Figura 32: Gráfico gerado a partir das respostas da questão 2 do questionário de mapeamento pelos alunos das Turmas A e B.	58
Figura 33: Gráfico gerado a partir das respostas da questão 3 do questionário de mapeamento pelos alunos das Turmas A e B.	58
Figura 34: Gráfico gerado a partir das respostas da questão 4 do questionário de mapeamento pelos alunos das Turmas A e B.	59
Figura 35: Gráfico gerado a partir das respostas dos alunos das Turmas A e B à questão a dos questionários das atividades 1 e 2 (Q1 e Q2) pelos alunos das Turmas A e B. ..	60
Figura 36: Gráfico gerado a partir das respostas à questão b dos questionários das atividades 1 e 2 (Q1 e Q2) pelos alunos das Turmas A e B.	61
Figura 37: Gráfico gerado a partir das respostas dos alunos das Turmas A e B à questão c dos questionários das atividades 1 e 2 (Q1 e Q2) pelos alunos das Turmas A e B. ..	62
Figura 38: Gráfico gerado a partir das respostas dos alunos das Turmas A e B à questão d dos questionários das atividades 1 e 2 (Q1 e Q2) pelos alunos das Turmas A e B. ..	63
Figura 39: Gráfico gerado a partir das respostas dos alunos das Turmas A e B à questão e dos questionários das atividades 1 e 2 (Q1 e Q2) pelos alunos das Turmas A e B. ..	63
Figura 40: Gráfico gerado a partir das respostas dos alunos das Turmas A e B à questão f do questionário da atividade 2 pelos alunos das Turmas A e B.	64

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1: Dados experimentais obtidos para a tensão de corte V_c dos LEDs azul, verde e vermelho, resultados da constante de Planck, e erros experimentais relativos...50
- Tabela 2: Atividades executadas e tempo de aula utilizado para cada encontro realizado durante a aplicação do produto educacional.54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BNCC – Base Nacional Comum Curricular.

EF – Ensino Fundamental.

EM – Ensino Médio.

FC – Física Clássica.

FMC – Física Moderna e Contemporânea.

FQ – Física Quântica.

MNPEF – Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física.

MQ – Mecânica Quântica.

PRCN – Problema da Radiação do Corpo Negro.

PROFIS-So – Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba.

SI – Sistema Internacional de Unidades.

TAS – Teoria da Aprendizagem Significativa.

TIC – Tecnologias de Informação e Comunicação.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	3
REVISÃO DA LITERATURA E JUSTIFICATIVA	5
2.1 DAVID AUSUBEL E A TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA	5
2.1.1 A Teoria de Aprendizagem Significativa (TAS)	6
2.2 O ENSINO DE FÍSICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO	11
2.3 A EXPERIMENTAÇÃO, SIMULAÇÃO, E AUTOMAÇÃO NO ENSINO DE FÍSICA....	14
2.4 A DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CONSTANTE DE PLANCK.....	16
2.4.1 A constante de Planck e a sua incerteza experimental histórica.....	16
2.4.2 Erro experimental ao se determinar a constante de Planck por meio de LEDs devido ao processo de fluorescência	18
2.5 A PLATAFORMA ARDUINO E O ENSINO DE FÍSICA.....	19
2.5.1 Aquisição Automática de dados com o <i>software Microsoft Excel</i> e o PLX-DAQ.....	21
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E PREPARAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL	23
3.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
3.2.2 Radiação Térmica e Corpo Negro	29
3.2.2.1 Radiação Térmica.....	29
3.2.2.2 Corpo Negro	31
3.3.3 As Implicações do Postulado de Planck.....	38
3.3.3.1 Análise se um sistema físico macroscópico é contínuo ou quantizado	39
3.3.4 Determinação da constante de Planck utilizando-se LEDs	40
3.3.5 Determinando a constante de Planck com LEDs: o experimento	43
3.3.5.1 Procedimento Experimental.....	45
3.3.5.2 Resultados e Discussões	47
APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL	52

4.1 PROCEDIMENTOS DA APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL	54
4.2 RESPOSTAS DOS QUESTIONÁRIOS DE MAPEAMENTO DOS ALUNOS	56
4.3 RESPOSTAS DOS QUESTIONÁRIOS DAS ATIVIDADES 1 E 2	60
CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
REFERÊNCIAS	69
APÊNDICE: PRODUTO EDUCACIONAL	76

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Ao ter a oportunidade de trabalhar com o ensino de física experimental no ensino superior, e conseqüentemente ter interagido com inúmeras turmas e alunos, pude perceber através de diálogos e comentários dos discentes que grande parte deles não havia tido contato com experimentos físicos simulados, demonstrativos e verificativos durante o período em que cursaram o Ensino Fundamental (EF) e Ensino Médio (EM). Isso corrobora com o que afirma Moreira (2018):

O ensino de Física está em crise. A carga horária semanal que chegou a 6 horas-aula por semana, hoje é de 2 ou menos. Aulas de laboratório praticamente não existem. Faltam professores de física nas escolas e os que existem são obrigados a treinar os alunos para as provas, para as respostas corretas, ao invés de ensinar Física. [...] Os conteúdos curriculares não vão além da Mecânica Clássica e são abordados da maneira mais tradicional possível, totalmente centrada no professor, baseada no modelo de narrativa criticado por Finkel (1999), na educação bancária de Freire (2007), no comportamentalismo de Skinner (1972). O resultado desse ensino é que os alunos, em vez de desenvolverem uma predisposição para aprender Física, como seria esperado para uma aprendizagem significativa, geram uma indisposição tão forte que chegam a dizer, metaforicamente, que “odeiam” a Física (MOREIRA M. A., 2018).

Muitas vezes essas observações partiram também de alunos que cursaram o ensino básico em escolas privadas. Muitos deles relataram que o foco do ensino de física durante o período em que cursaram o EM se restringia ao preparo para o Vestibular, de modo a treiná-los a resolverem os exercícios de física de uma forma mecanizada, sem uma abordagem adequada sobre os conceitos envolvidos e a fenomenologia por detrás do assunto tratado, convergindo nesse sentido com a afirmação de alguns pesquisadores da área de ensino de física (MOREIRA, CABALLERO, & RODRÍGUEZ, 1997; MEGID NETO & PACHECO, 2001).

Além disso, diversos pesquisadores na área de ensino de física (GRECA & MOREIRA, 2001) ressaltam a necessidade de transformar o ensino de física tradicional em um ensino que

engloba o desenvolvimento da Física Moderna e Contemporânea (FMC) não como uma simples curiosidade, mas como uma área da física que aparece para explicar fenômenos que a Física Clássica (FC) não esclarece, concebendo uma nova visão de universo.

Atualmente, a FMC possui a responsabilidade de atender as novas necessidades que surgem no cotidiano, tornando-se cada vez mais essencial para o homem moderno. Ela contém um conjunto de conhecimentos que vai além das fronteiras da ciência e da tecnologia, de forma a influenciar outras formas do saber humano. Desse modo, os diversos campos de conhecimento abertos pela física desenvolvida no século XX precisam ter a sua presença estabelecida nos currículos das nossas escolas de EM, especialmente a Física Quântica (FQ) e a Física Relativística que geraram novas perspectivas de desbravamento científico impensáveis ao olhar dos cientistas clássicos (ZANETIC & MOZENA, 2019; OSTERMANN & MOREIRA, 2001).

Nesse sentido, Greca e Moreira (2001) afirmam que os efeitos da Mecânica Quântica (MQ) sobre a tecnologia atual e a diversidade de fenômenos por ela explanados torna aconselhável o seu estudo em distintas áreas e cada vez mais cedo. Uma dessas formas é introduzi-la no ensino básico através da discussão sobre a constante de Planck.

A constante de Planck é uma constante fundamental da física que relaciona a energia de partículas subatômicas com sua frequência. Através dessa relação, é possível entender como a energia é quantizada em unidades discretas e, desse modo, obter uma compreensão mais precisa do comportamento dessas partículas. Essa compreensão é fundamental para a descrição de fenômenos em nível microscópico e, por extensão, para a compreensão de fenômenos observáveis em escala macroscópica (YANG, 2016). A sua descoberta pelo físico alemão Max Planck (1858-1947) foi uma peça fundamental para o nascimento da MQ.

Introduzir a MQ no Ensino Médio através da discussão sobre uma constante fundamental da física, abre um leque de possibilidades para abordar sobre o contexto histórico e tecnológico do seu surgimento, possibilitando tratar em sala de aula as dificuldades de Planck e demais cientistas para resolverem o Problema da Radiação do Corpo Negro (PRCN), de forma a poder mostrar aos estudantes que o desenvolvimento da física e da ciência ocorre por meio de um processo construtivo, muitas vezes não linear e árduo, contribuindo dessa forma para desmistificar a figura do gênio que faz descobertas sem esforço algum (ZANETIC & MOZENA, 2019). Esse tratamento da MQ permitirá explorar o seu caráter filosófico, cultural, qualitativo, conceitual, em detrimento de um foco excessivamente matemático (MONTEIRO, NARDI, & BASTOS FILHO, 2009).

Abordar esse tema científico, poderá auxiliar no desenvolvimento da alfabetização científica dos estudantes, proporcionando a estes uma maior capacidade para participarem de discussões e debates que envolvam questões científicas e tecnológicas da atualidade, e desse modo, abrindo espaço, por exemplo, para combater a pseudociência que vem se propagando nos últimos anos na sociedade. Isso poderá auxiliar no combate à proliferação do misticismo quântico e de seus jargões, tais como “cura quântica”, “colchão quântico” etc. (PESSOA JR, 2011).

A BNCC - Base Nacional Comum Curricular (2018), em seus itinerários formativos, contempla o ensino de FQ no EM. Esses itinerários são estratégicos para a flexibilização da organização curricular do Ensino Médio, possibilitando opções de escolha aos estudantes, e podem ser estruturados com foco em uma área do conhecimento, na mobilização de competências e habilidades de diferentes áreas, ou na formação técnica e profissional, de modo a compor os itinerários integrados (BRASIL, 2018).

Ainda de acordo com a BNCC, o mundo contemporâneo é vigorosamente marcado pelo intenso desenvolvimento tecnológico. A computação e as Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) estão progressivamente mais presentes na vida de todos, não somente nas escolas ou escritórios, mas nos nossos bolsos, automóveis, cozinhas, roupas etc. Grande parte dessas informações produzidas pela humanidade está armazenada digitalmente. Isso demonstra o quanto o cotidiano e o mundo produtivo estão sendo movimentados pelas tecnologias digitais, situação que tende a se intensificar no futuro.

Para tanto, levando-se em consideração todo esse contexto científico e tecnológico no qual a sociedade está imersa, neste trabalho desenvolvemos como produto educacional uma sequência didática composta por experimentos envolvendo um simulador computacional e a plataforma Arduino, possibilitando aos discentes explorarem os conceitos fundamentais sobre a constante de Planck e a sua importância para a MQ.

1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Enquanto estudante da disciplina de Física Moderna do curso de graduação em física, como parte integrante do processo avaliativo dessa disciplina, precisei desenvolver um projeto e escrever um artigo com o objetivo de minimizar os problemas de recursos experimentais voltados para FMC.

Desse modo, ao pesquisar sobre o assunto e me aprofundar mais sobre o tema selecionado, pude perceber que diversos artigos tratavam sobre as dificuldades de se inserir no EM experimentos envolvendo temas da FMC. Dentre essas adversidades, o custo elevado dos equipamentos foi um fator impactante.

Além de reduzir esses problemas, e facilitar a introdução de experimentos envolvendo FQ dentro de um contexto de sala de aula, algumas das finalidades desse trabalho foram a de contribuir para o ensino de Física Quântica nas escolas de Ensino Médio tornando mais acessível a experimentação, desenvolver o letramento científico dos estudantes, combater a pseudociência, e mostrar aos discentes que a ciência está em constante construção.

Nesse sentido, tendo-se em vista a necessidade reportada por diversos pesquisadores da área de ensino de física de se inserir e explorar os conceitos de MQ no Ensino Médio sem uma matematização excessiva e relacionando-a com as tecnologias cotidianas (PINTO & ZANETIC, 1999), como discente do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), observei como oportunidade de contribuir para a melhoria do ensino de MQ e de experimentação na área de FMC nas escolas de nível médio, a elaboração de uma sequência didática que englobasse as TIC, tais como simuladores de circuitos elétricos e Arduino, e permitisse determinar a constante de Planck com um grau de exatidão suficientemente satisfatório para o nível de ensino para o qual essa atividade é proposta. Para tanto, ao desenvolvermos este projeto, dentre os recursos educacionais utilizados, selecionamos um circuito elétrico simples, de baixo-custo e de fácil aquisição de materiais para determinarmos experimentalmente a constante de Planck a partir de LEDs.

Ademais, devido ao contexto histórico e tecnológico de sua descoberta, a constante de Planck é um tema bastante rico para servir como um pano de fundo na exploração do desenvolvimento científico junto aos estudantes, além de permitir o estabelecimento de uma relação entre esse tema e a natureza da matéria no seu estado mais fundamental.

Capítulo 2

REVISÃO DA LITERATURA E JUSTIFICATIVA

2.1 DAVID AUSUBEL E A TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

David Paul Ausubel (1918-2008) nasceu na cidade de Brooklyn, Nova York. Filho de uma família de imigrantes da Europa Central, teve uma infância difícil, no qual crescera descontente com a educação que recebera. Na época de seu nascimento e crescimento infantil, ocorrera um intenso movimento de migração judaica, no qual, apenas entre o período de 1905 a 1914, foram migrados para os Estados Unidos da América aproximadamente setecentos mil judeus, marcando uma época repleta de contenções religiosas e discriminações (DISTLER, 2015). No romance intitulado: “*Judeu sem Dinheiro*”, o escritor Iztok Isaac Granich, cujo pseudônimo é Michael Gold, descreve cenas de um período no qual é possível observar um pouco sobre a educação oferecida aos judeus de baixa renda da época, sendo este o caso de David Ausubel. Eis um trecho:

“A escola era cárcere de meninos. O crime de todos é a pouca idade e por isso os carcereiros lhe dão castigos (...). Escandalizou-se com um palavrão que eu, patife de seis anos, empreguei certo dia. Com sabão de lixívia lavou-me a boca. Submeti-me. Fiquei em pé num canto o dia inteiro, para servir de escarmento a uma classe de cinquenta meninos assustados. (...) Comer sabão é desagradável. Mas meus pais protestaram porque o sabão era feito de sebo cristão e não de kosher. Eu fora também obrigado a comer carne de porco: isso é crime contra lei mosaica” (GOLD, 1961 *apud* DISTLER, 2015).

David Ausubel estudou medicina e psicologia. Foi residente de Psiquiatria no serviço de Saúde Pública e trabalhou como cirurgião assistente. Na Alemanha, trabalhou com

tratamento médico de pessoas deslocadas após o término da Segunda Guerra Mundial. Ausubel fez três residências psiquiátricas: a primeira no E.U Serviço de Saúde Pública localizado em Kentucky; a segunda em Buffalo no Centro Psiquiátrico, e finalmente, no Centro Psiquiátrico do Bronx. Em 1943, através do apoio da G.I BILL, também conhecida como Lei de Reajustamento dos Militares – legislação dos EUA que forneceu benefícios aos veteranos da Segunda Guerra Mundial – ele recebeu em 1943 pela Universidade de Columbia, Nova York, o seu PhD em Psicologia do Desenvolvimento. Além disso, foi professor de inúmeras instituições, tais como: Universidade de Toronto, Universidade de Illinois, Universidade Salesiana de Roma, Universidade de Berna, e Training Officer's College, em Munique (DISTLER, 2015).

Ausubel fez uma série de publicações de livros, dentre os quais tem-se como maiores destaques: *Theory and Problems of Adolescent Development* (1954, 1977), *The Use of Advance Organizers in the learning and retention of meaningful verbal material* (1960), *The Psychology of Meaningful Verbal Learning* (1963), *Educational Psychology: A Cognitive View* (1978). Além disso, Ausubel publicou por volta de 120 artigos científicos, aposentando-se somente em 1994, aos 76 anos de idade, para se aplicar aos seus escritos.

As teorias de Ausubel tiveram como direção os relatos de Piaget sobre epistemologia genética. Ao se realizar uma comparação entre as pesquisas realizadas por ambos, percebe-se que Ausubel se concentra prioritariamente na aprendizagem sistematizada, acreditando na aprendizagem por descoberta como Jean Piaget, embora o seu foco de pesquisa prestigie mais a questão dos estímulos externos (DISTLER, 2015).

2.1.1 A Teoria de Aprendizagem Significativa (TAS)

A teoria da aprendizagem significativa trabalhada pelo psicólogo norte-americano David Paul Ausubel ocorre quando há uma interação substantiva e não arbitrária das ideias relevantes da estrutura cognitiva do aprendiz com aquilo que ele já sabe. Não-arbitrária significa que a interação ocorre com um conhecimento especificamente relevante que já há na estrutura cognitiva do sujeito que aprende. A este conhecimento especificamente relevante, dá-se o nome de subsunçor, ou também de ideia-âncora, que também pode ser conhecido como um modelo, representação ou constructo. De acordo com Moreira:

[...] A aprendizagem significativa ocorre quando a nova informação se ancora em conceitos ou proposições relevantes, preexistentes na estrutura cognitiva do aprendiz. Ausubel vê o armazenamento de informações no cérebro humano como sendo

organizado, formando uma hierarquia conceitual, na qual elementos mais específicos de conhecimento são ligados (e assimilados) a conceitos mais gerais, mais inclusivos. Estrutura cognitiva significa, portanto, uma estrutura hierárquica de conceitos que são representações de experiências sensoriais do indivíduo. [...] (MOREIRA M. A., 1999, p. 153).

Este subsunçor pode possuir maior ou menor estabilidade cognitiva, e poderá ter um maior ou menor grau de elaboração em termos de significado. Como o processo é dinâmico, interativo, o subsunçor ao servir de ideia-âncora para um novo conhecimento, se alterará e obterá um novo significado, reafirmando significados que já existem.

Existe a aprendizagem significativa superordenada, no qual uma nova ideia, um novo conceito, uma nova proposição, mais ampla, passa a subordinar conhecimentos prévios, porém esta não é muito comum. E existe a aprendizagem significativa subordinada, no qual um novo conhecimento adquire significado ao ancorar-se interativamente com um determinado conhecimento prévio específico e relevante para o aprendiz.

Caso o subsunçor não seja muito utilizado, pode ocorrer o que o Ausubel chama de “*Obliteração*”, ou seja, um encolhimento do subsunçor, de tal modo que ele não fica tão claro na estrutura cognitiva do sujeito. Isso é uma causa inevitável caso o sujeito não se utilize do subsunçor ao longo do tempo. Porém, neste caso, não há ocorrência de esquecimento total do subsunçor, e o processo de reaprendizagem é mais rápido. Portanto, a aprendizagem significativa não é aquela em que o indivíduo nunca esquece. E segundo Ausubel, se houve esquecimento total, provavelmente a aprendizagem foi mecânica, e não significativa.

O subsunçor é estabelecido na estrutura cognitiva do sujeito que aprende, e não é conveniente “*materializá-lo*” ou “*coisificá-lo*” como um conceito, embora Ausubel tenha o classificado dessa forma em sua obra, pois ele é dinâmico, ou seja, pode tanto evoluir como ocorrer o processo inverso, sofrer uma involução. Segundo Moreira:

A clareza, a estabilidade cognitiva, a abrangência, a diferenciação de um subsunçor variam ao longo do tempo, ou melhor, das aprendizagens significativas do sujeito. Trata-se de um conhecimento dinâmico, não estático, que pode evoluir e, inclusive, involuir (MOREIRA M. A., 2012).

O conhecimento prévio, conforme afirma Moreira (2012), pode também funcionar como um bloqueador no processo de aprendizagem, ou nas palavras do reconhecido filósofo da ciência, *Gastón Bachelard*, pode ser um obstáculo Epistemológico. Um exemplo disso é o fato do conhecimento prévio que o aluno possui sobre corpúsculo poder funcionar como um bloqueador para que ele aprenda sobre o que é uma partícula elementar. Um corpúsculo é uma

parte muito pequena de um corpo, como por exemplo, um átomo, uma molécula. Já uma partícula elementar, não possui nenhuma subestrutura.

A aprendizagem significativa não é um sinônimo de aprendizagem correta, pois esta pode ser significativa e ao mesmo tempo incorreta. Um exemplo disso são as concepções alternativas, que são aprendizagens significativas, nas quais o processo de aprendizagem do discente se baseia em conhecimentos prévios relevantes para este, porém são aprendizagens equivocadas.

Para ocorrer a aprendizagem significativa, Ausubel enumera duas condições básicas. A primeira, é que o material de aprendizagem deve ser potencialmente significativo. A forma correta é “potencialmente significativo”, pois o significado não está nos livros, aulas, ideias, problemas, mas sim nas pessoas, e não nos materiais e recursos didáticos.

A segunda condição é que o aprendiz deve apresentar uma predisposição para aprender. Observa-se que não se trata de motivação ou gostar da matéria. Predisposição seria o sujeito estar disposto a relacionar o conteúdo a ser aprendido (ideia nova, ou nova informação) com algum conhecimento prévio relevante que ele já possua.

O aluno pode ter a predisposição de aprender, porém, pode não ter um material potencialmente significativo, ou seja, o material de ensino pode não satisfazer a realidade cognitiva atual do aluno.

Para se realizar uma ligação entre o que se deseja que o discente aprenda e a sua estrutura cognitiva, Ausubel propõe a utilização de organizadores prévios. A utilização dos organizadores prévios surge quando o aluno não possui subsunçores adequados que permitam-lhe fornecer significados aos novos conhecimentos.

De acordo com Moreira (2012), o organizador prévio é um recurso de instruções com maior grau de abstração, generalidade e inclusividade em comparação ao material de aprendizagem. Não se trata de um resumo, sumário, ou visão geral que está em nível igual de abstração ao do material a ser aprendido. É possível que seja uma leitura introdutória, questão, situação-problema, filme, simulação e demonstração. Pode ser uma aula precedente à outras aulas. As possibilidades são numerosas, contudo, é necessário que preceda a apresentação do material de aprendizagem e que se configure como mais abrangente, inclusivo e geral em relação a este material. Segundo Moreira (2006):

Os organizadores prévios podem se apresentar sob a forma de textos, filmes, esquemas, desenhos, fotos, perguntas, mapas conceituais, entre outros que são apresentados ao estudante, em primeiro lugar, em nível de maior abrangência permitindo a integração dos novos conceitos aprendidos, tornando mais fácil o

relacionamento da nova informação com a estrutura cognitiva já existente (MOREIRA & MASINI, 2006).

Um exemplo de utilização de organizador prévio pode ser encontrado no trabalho de Ronca (*apud* MOREIRA M. A., 2008), no qual alunos universitários dos cursos de Matemática e Física precisaram estudar um material de aprendizagem que constava de um texto relacionado a mudanças comportamentais. Como o conteúdo desse texto era um tema não familiar para a maioria dos discentes, foram elaborados organizadores prévios baseados em um assunto já familiar para eles: o pêndulo simples. Pelo fato do comportamento humano no material de aprendizagem ter sido analisado em função de variáveis de causa e efeito, o exemplo do pêndulo foi utilizado para introduzir esses conceitos. Da mesma forma como no movimento pendular, como por exemplo, o que ocorre com o período e a frequência do movimento oscilatório do pêndulo quando se varia a massa e/ou o comprimento do fio deste pêndulo, foram observadas relações de causa e efeito no comportamento humano.

Outro recurso extremamente relevante no processo de facilitação da aprendizagem significativa é a linguagem. Tanto é que nas descrições iniciais de sua teoria, Ausubel utilizava a terminologia aprendizagem verbal significativa (Ausubel, 1963 *apud* Moreira, 1997, p. 21). Segundo Postman & Weingartner (1969, p. 99 *apud* Moreira, 2012), a linguagem está completamente implicada em todas as tentativas do homem de perceber a realidade. A aprendizagem significativa irá depender da captação de significados que envolvem uma negociação, um intercâmbio, ou seja, depende naturalmente da linguagem. De acordo com Moreira (2012):

O homem vive na linguagem. Portanto, a linguagem é essencial na facilitação da aprendizagem significativa. As palavras são signos linguísticos e delas dependemos para ensinar qualquer corpo organizado de conhecimentos em situação formal de ensino que é a proposta subjacente à teoria da aprendizagem significativa (2012).

Isto é, a aprendizagem significativa depende efetivamente da interação social, de troca, intercâmbio, de significados por meio da comunicação entre as pessoas. No entanto, não se deve imaginar que o processo de facilitação da aprendizagem significativa se reduzirá a isto.

Moreira (2012) sugere que na parte prática, boa parte da aprendizagem ocorre na zona intermediária entre a aprendizagem mecânica e a aprendizagem significativa – o que ele denomina de zona cinza - e que um ensino potencialmente significativo pode facilitar a caminhada do aluno nessa “zona”. Não se ocorre de forma natural a transição da aprendizagem

mecânica para a aprendizagem significativa. É um engano pensar que o aluno pode inicialmente aprender de forma mecânica, pois a aprendizagem acabará sendo significativa no final do processo. A ocorrência disto pode acontecer, porém depende da existência de subsunçores apropriados, da predisposição do estudante para aprender, da mediação do docente e de materiais potencialmente significativos. Na prática, essas condições geralmente não são satisfeitas, havendo, portanto, um predomínio da aprendizagem mecânica.

Não é porque a aprendizagem é receptiva que ela não pode ser significativa, e nem por isso também ela é passiva. Pelo contrário, para que se ocorra a aprendizagem significativa receptiva, é necessário que o aprendiz tenha intensa atividade cognitiva com o objetivo de que haja uma interação entre os novos conhecimentos e os conhecimentos já existentes na sua estrutura cognitiva. Essa aprendizagem inclui a ancoragem, reconciliação integrativa, diferenciação progressiva e mecanismos de captação de significados. Dessa forma, ela envolve processos de captação de significados, diferenciação progressiva, ancoragem, e reconciliação integrativa.

Desse modo, Moreira (2012) faz uma crítica ao fato corriqueiro de diversos pesquisadores da área da educação afirmarem que a educação por recepção é arcaica e que não requer do aluno muita atividade cognitiva. Muitos dos processos de ensino atualmente utilizados nas escolas são enxergados erroneamente como sendo processos de aprendizagem significativa, sendo que, na realidade, são processos estritamente mecânicos.

E também não é porque a aprendizagem é por descoberta que ela pode ser considerada como significativa. No mundo atual, com a vasta quantidade de informações e conhecimentos disponibilizados, seria praticamente impossível aprender significativamente caso a aprendizagem fosse somente pelo processo de descoberta. A aprendizagem que ocorre pela descoberta requer que o aprendiz inicialmente descubra o que irá aprender. Porém, uma vez descoberto o novo conhecimento, as condições para haver a aprendizagem significativa serão as mesmas: predisposição para aprender e conhecimento prévio adequado. Para aprender de modo significativo, não é uma condição necessária a descoberta de novos conhecimentos, salvo em crianças pequenas. Portanto, de uma forma geral, não é necessário descobrir para que ocorra uma aprendizagem significativa (MOREIRA M. A., 2012).

A avaliação para os professores é talvez uma das atividades mais complicadas de se lidar. Não pelo fato de ter que corrigir provas ou trabalhos dos alunos, mas simplesmente devido à questão de ser muito difícil fugir do modo de avaliar comportamentalista. De acordo com Moreira (2018), o ambiente educacional é comportamentalista, de tal forma a se importar que

o aluno apresente o comportamento esperado, ou seja, em outras palavras, a resposta correta. Evidentemente, este é um obstáculo para o ensino, que tem como objetivo promover uma aprendizagem significativa de conhecimentos procedimentais e declarativos.

Para Ausubel (2012, p. 127) a melhor forma de evitar a simulação da aprendizagem significativa é elaborar problemas e questões que exijam uma maximização do conhecimento alcançado. Os exames de compreensão devem, no mínimo, serem escritos de modo distinto e apresentados dentro de um contexto, de certo modo, que difere daquele inicialmente selecionado no material instrucional. Outra opção para checar a existência da aprendizagem significativa seria a de propor ao aluno uma tarefa de aprendizagem que sequencialmente depende da outra. Rigorosamente, o que se está de fato avaliando é a aprendizagem significativa da atividade antecedente.

A aprendizagem significativa precisa ter uma avaliação que busque evidências, pois se trata de uma aprendizagem evolutiva, que desdobra de forma não-linear, ocorrendo na zona cinza (zona do erro) do contíguo da aprendizagem mecânica vs. aprendizagem significativa. Por se tratar de uma zona de erro, este deve ser aproveitado, e não simplesmente punido. É estritamente normal utilizar o erro para aprender. Fazemos isso constantemente, porém, na escola a aprendizagem através do erro geralmente não é observada de forma positiva (MOREIRA M. A., 2013).

2.2 O ENSINO DE FÍSICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO

A Física Quântica é um tema de elevada importância presente em currículos dos cursos de licenciatura e bacharelado em física. Para Lima, Ostermann e Cavalcanti (2017), além de ser um distintivo da cultura da física, e um marco na formação acadêmica, os tópicos abordados em disciplinas de FQ estão mais aproximados das teorias e procedimentos utilizados na pesquisa contemporânea do que os conteúdos observados nas disciplinas iniciais do curso de graduação em física.

De acordo com (SILVA; ALMEIDA, 2011; TELICHEVSKY, 2015 *apud* LIMA, OSTERMANN e CAVALCANTI, 2017), reconhecendo-se a relevância dessa teoria para a sociedade e comunidade científica, a literatura vem apresentando a necessidade da sua abordagem, também, no Ensino Básico, o que traz como benefício a aproximação entre o conhecimento escolar e os debates acadêmicos. Além disso, a nomenclatura da FQ permeia o

discurso externo às universidades – o que reincidente a fundamental necessidade de fornecer uma formação científica e crítica em FQ aos estudantes do Ensino Médio (HILGER, STIPCICH, & MOREIRA, 2017). Greca e Moreira (2001) alegam que os efeitos da Mecânica Quântica (MQ) sobre a tecnologia atual e a diversidade de fenômenos por ela explanados torna aconselhável o seu estudo em distintas áreas e cada vez mais cedo.

Pinto e Zanetic (1999) ressaltam a necessidade de transformar o ensino de física tradicionalmente fornecido por nossas escolas em um ensino que engloba o desenvolvimento da FMC, não como uma simples curiosidade, mas como uma física que aparece para explicar fenômenos que a Física Clássica não esclarece, concebendo uma nova visão de universo. Uma física que atualmente possui a responsabilidade de atender as novas necessidades que surgem cotidianamente, tornando-se cada vez mais essenciais para o homem atual, um conjunto de conhecimentos que vai além das fronteiras da ciência e da tecnologia, de forma a influenciar outras formas do saber humano. Desse modo, os diversos campos abertos pela física desenvolvida no século XX precisam ter a sua presença estabelecida nos currículos das nossas escolas de EM, especialmente a FQ e a Física Relativística que geraram novas perspectivas de desbravamento científico impensáveis aos olhares dos cientistas clássicos.

Contudo, esses novos conteúdos não podem ser meramente adicionados e trabalhados como os tópicos tradicionalmente apresentados no EM. Inúmeros projetos de ensino de física no Brasil se preocupam com a inclusão da FMC no ensino. Terrazan (1992) sugere alguns parâmetros para o desenvolvimento de atividades direcionadas à incorporação da FQ no Ensino Médio, tais como: a necessidade de se privilegiar conceitos fundamentais e leis gerais, exigindo-se pouca matematização; a especificação do currículo; a compatibilização do estudo da FC e da FQ dentro da mesma programação; e a carência de docentes preparados para o ensino da FMC são alguns dos pontos mais importantes que precisam ser colocados em destaque ao se debater esta temática.

Ostermann e Moreira (2001) destacam a importância de se investir na produção de materiais didáticos sobre tópicos de FMC acessíveis aos docentes e aos discentes do Ensino Médio. Para eles, é indispensável investir na formação de professores críticos em relação à estrutura curricular de física e com um leque de ferramentas que possibilite lidar com a questão da atualização curricular. Essa possibilidade só existe com uma formação docente adequada (MONTEIRO, NARDI, & BASTOS FILHO, 2009).

Há uma viabilidade ao se ensinar FMC no EM, tanto do ângulo do ensino conceitual, quanto de atitudes. É errôneo afirmar que os alunos não possuem a capacidade para aprenderem

tópicos atuais. A questão essencial é como realizar a abordagem de tais tópicos, pois sabemos que estes despertam e estimulam a curiosidade científica dos estudantes, de forma a motivá-los a aprenderem física. Nesse sentido, a TAS pode contribuir para o levantamento de subsunçores dos alunos com a finalidade de se elaborar materiais didáticos que sejam potencialmente significativos e que visem uma aprendizagem significativa.

Olsen (2002) faz um questionamento sobre a abordagem de ensino que introduz a FQ estabelecendo referência à dualidade onda-partícula. De acordo com o autor, existem outros conceitos que exporiam de uma melhor forma o quanto essa teoria se afasta do nosso viés tradicional, como por exemplo, o princípio da incerteza de Heisenberg. Além disso, ele aponta que outras pesquisas têm demonstrado que a dualidade onda-partícula é um conceito de árdua compreensão, mesmo para os estudantes de nível superior. Johansson e Milstead (2008) mostraram como o Princípio da Incerteza de Heisenberg poderia ser demonstrado em aulas de física do EM sendo útil na compreensão de fenômenos físicos como a forças de troca e a radioatividade.

Para Monteiro, Nardi e Bastos Filhos (2009), deve-se considerar que, embora existam distinções quanto ao papel assumido pela FC ao se apresentarem conceitos de FQ e quanto a adoção ou não de uma abordagem que acompanhe um trajeto histórico, existe um certo consenso de que só faz sentido levar FQ para o EM caso se privilegie o seu caráter filosófico, qualitativo, cultural, conceitual, em detrimento de um enfoque exageradamente matemático. Inserido nesse ponto de vista, evidencia-se o uso de textos originais de cientistas, textos de divulgação científica, experimentos de pensamento e simulações computacionais. Além de agirem em favor da construção cultural e conceitual, essas estratégias possibilitam a compreensão do modo humano de se construir Ciência, destacando que, nela, criam-se modelos que buscam explicar a realidade.

A Base Nacional Comum Curricular (BNCC), em seus itinerários formativos, contempla o ensino de FQ no EM. Esses itinerários são estratégicos para a flexibilização da organização curricular do Ensino Médio, possibilitando opções de escolha aos estudantes, e podem ser estruturados com foco em uma área do conhecimento, na mobilização de competências e habilidades de diferentes áreas, ou na formação técnica e profissional, de modo a compor os itinerários integrados (BRASIL, 2018).

2.3 A EXPERIMENTAÇÃO, SIMULAÇÃO, E AUTOMAÇÃO NO ENSINO DE FÍSICA

A experimentação deve contribuir para que os alunos compreendam o papel da observação direta na física e diferenciem entre as inferências baseadas na teoria e os resultados experimentais obtidos.

A física é uma estrutura complexa de conceitos, hipóteses, teorias e observações que estão inter-relacionadas de tal forma que muitas vezes é difícil fazer uma separação entre as inferências teoricamente baseadas e as observações diretas que se fundamentam principalmente em experimentos laboratoriais. Os alunos devem entender que a evidência experimental é a base do nosso conhecimento sobre as leis físicas e que a física não é meramente uma coleção de equações e problemas de livros didáticos.

A maioria dos alunos que cursam disciplinas introdutórias de física, tanto no EM quanto no ensino superior, não possui experiência concreta suficiente com fenômenos cotidianos para entender a sutil interação entre a observação e a construção de teorias físicas. Os processos de observar fenômenos, analisar dados e desenvolver modelos verbais qualitativos e matemáticos para explicar observações, oferecem aos alunos uma oportunidade única de relacionar a experiência concreta com as teorias científicas (TEACHERS, 1998).

A simulação por computador modificou substancialmente as relações entre teoria e experimento. Experimentos simulados são realizados para analisar propriedades de sistemas físicos que geralmente são impossíveis de se estudar teoricamente ou experimentalmente. Trabalhos na área de mecânica estatística (dinâmica molecular e simulações de Monte Carlo), bem como no campo da dinâmica de sistemas não lineares, mostram que o principal interesse dos pesquisadores está no modelo físico. Isso é visto como “uma realidade simplificada” com um nível de complexidade definido e abordando apenas características que interessam ao pesquisador. O problema inicial é dividido em partes, simplificado e finalmente reproduzido no computador. O “cenário” para a interpretação de fenômenos é construído pouco a pouco, tornando o modelo gradualmente mais complexo. Esta abordagem à simulação computacional enfatiza o papel do processo de modelagem na condução da física através de computadores. Mas este fato por si só não é suficiente para concluir que o aprendizado do processo de modelagem pode ser um objetivo principal do ensino de física. Dois pontos importantes, intimamente correlacionados, precisam ser considerados: a primeira diz respeito ao ensino

como uma forma específica de comunicação do conhecimento, isto é, “conhecimento da física como é pensado”; e a segunda diz respeito a opiniões sobre conhecimento do aluno e, mais geralmente, sobre o aprendizado do aluno, que são levados em conta na elaboração de estratégias de ensino (ANDALORO, DONZELLI, & SPERANDEO-MINEO, 1991).

O papel do computador no ensino e pesquisa em física evoluiu rapidamente. No passado, computadores desempenhavam um papel estritamente numérico, uma vez que eram empregados principalmente com a finalidade de analisar e exibir os resultados experimentais de forma adequada, e compará-los com as previsões deduzidas de teorias bem estabelecidas. Nos últimos anos, uma nova área da física, a física computacional, surgiu, o que está influenciando campos estabelecidos da física, como a física da matéria condensada, física nuclear, física de partículas e astrofísica. A pesquisa teórica e experimental tem se tornado cada vez mais dependente de métodos computacionais (ANDALORO, DONZELLI, & SPERANDEO-MINEO, 1991; ANDERSON, 1972; KING, 2009).

Nas últimas três décadas, as simulações computacionais tornaram-se cada vez mais poderosas e disponíveis para os professores. Atualmente, os professores de ciências podem selecionar uma ampla gama de simulações de computador disponíveis, por exemplo, na internet. As simulações computacionais são projetadas com o objetivo de facilitar o ensino e a aprendizagem através da visualização e interação com modelos dinâmicos de fenômenos naturais (DE JONG & VAN JOOLINGEN, 1998; PERKINS, 2006; WIEMAN, PERKINS, & ADAMS, 2008).

Paralelamente a isso, a pesquisa sobre o uso da tecnologia na educação tem se expandido e diversificado na medida em que as tecnologias desenvolvidas, e essas rápidas mudanças na tecnologia tornam a investigação difícil, complexa e desafiadora (OSBORNE & DILLON, 2010). Atualmente, temos um vasto panorama de pesquisa sobre o uso das Tecnologias da Informação e Comunicação (do inglês: ICT – “*Information and Communications Technology*”) na educação em geral, ou mesmo no caso específico das ciências naturais, especialmente com relação aos estudos focados no uso de simulações computacionais, e as evidências fundamentadas em estudos experimentais sugerem que podemos melhorar o processo de ensino e aprendizagem ao integrarmos simulações sobre tópicos que os alunos acham conceitualmente difíceis (WEBB, 2005).

Nesse aspecto, De Jong & Joolingen (1998) sugeriram que diferentes estratégias de ensino podem ser usadas para fornecer suporte educacional adequado para aumentar a eficácia do aprendizado. Uma análise de estudos revelou as seguintes cinco estratégias de apoio à

aprendizagem que são benéficas para a aprendizagem baseada em simulação: (i) fornecer conhecimento prévio; (ii) ajudar os alunos na formulação de hipóteses; (iii) ajudar os alunos a realizarem experimentos; (iv) ajudar os alunos na interpretação de dados; (v) ajudar os alunos a monitorarem o seu processo de aprendizagem.

Dentro desse contexto de TIC aplicada na área educacional, de acordo com Bligh, Johnson & Ward (1985), o controle completo da medição de grandezas físicas e a análise por computador é o nome do “jogo” da instrumentação moderna. Os alunos precisam valorizar este desenvolvimento como parte integrante de seu processo educativo.

Nesse sentido, a automação é uma tecnologia que permite operar um sistema sem que haja uma intervenção humana direta, o que inclui uma simples troca de dispositivos de acordo com parâmetros específicos ou mesmo um controle de sistema completo para estabilizar um fenômeno físico em um valor específico.

Esta área tecnológica inclui conceitos matemáticos avançados, mas seus princípios práticos básicos podem ser facilmente demonstrados em sala de aula para alunos principiantes na área de eletrônica, o que pode motivá-los a projetar diferentes outros sistemas para a automatização de experimentos no laboratório de física (SPINRAD, 1967).

2.4 A DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CONSTANTE DE PLANCK

2.4.1 A constante de Planck e a sua incerteza experimental histórica

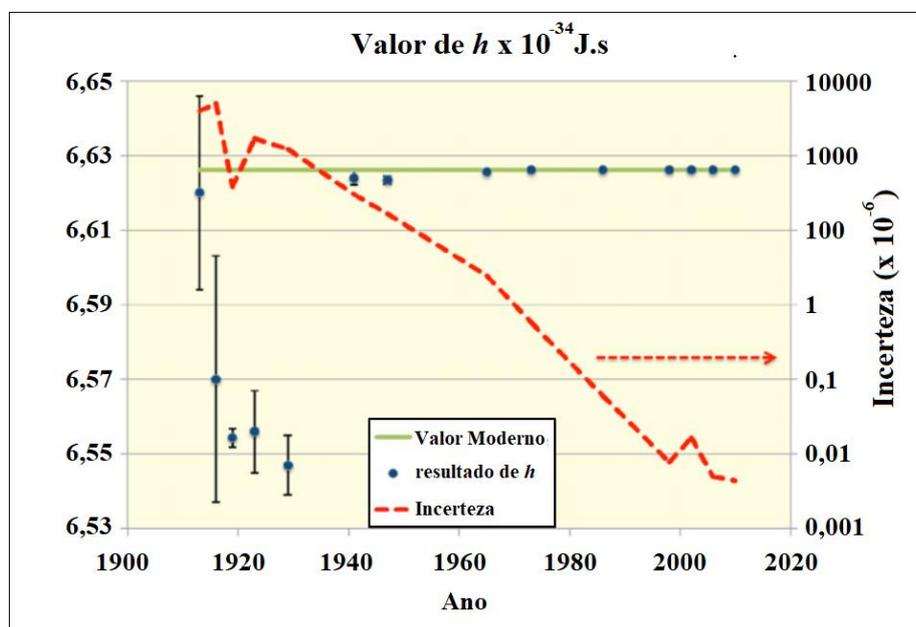
A constante de Planck, normalmente simbolizada por h , é uma constante fundamental da física que quantifica o fenômeno de quantização de energia que ocorre na escala microscópica e que influencia nos fenômenos observados na escala macroscópica. Essa constante é extremamente importante na mecânica quântica, mecânica estatística, eletrônica e atualmente o quilograma padrão é definido em função do seu valor (DAMACENO, 2019; WOOD & BETTIN, 2019; YANG, 2016).

A constante surgiu como uma hipótese há pouco mais de 120 anos para explicar matematicamente o espectro de Radiação do Corpo Negro (EISBERG, 1994). Mesmo as constantes teóricas têm um valor real, então medições numéricas de h dentro do Sistema Internacional de Unidades (SI) foram rapidamente empreendidas.

Atualmente, o método mais popular e preciso para se obter experimentalmente a constante de Planck é aquele que se utiliza da Balança de Kibble. Anteriormente conhecida como Balança de Watt, e posteriormente nomeada de Balança de Kibble como forma de homenagear seu inventor, o físico britânico Bryan Kibble (1938-2016), esse dispositivo eletromecânico foi desenvolvido em 1975 (KIBBLE, 1976; ROBINSON & SCHLAMMINGER, 2016).

Podemos observar pela Figura 1 que a medida experimental da constante de Planck tem sido realizada com uma incerteza cada vez menor com o transcorrer do tempo. Inúmeras vezes na história considerou-se que este valor foi reproduzido adequadamente, e apenas uma década depois foram encontradas diferenças significativas nos valores alcançados. O primeiro valor obtido pelo físico alemão Max Planck em 1900 é aproximadamente 1% diferente dos resultados modernos. Desde essa época, as diferenças nos resultados, juntamente com as incertezas, têm-se reduzido drasticamente. Atualmente, a diferença entre os resultados mais recentes é de apenas $3 \times 10^{-7}\%$ (STEINER, 2012).

Figura 1: Gráfico resumindo a história completa dos resultados obtidos para as determinações experimentais da constante de Planck h (pontos azuis). As barras de erro representam a incerteza atribuída aos resultados. A linha reta verde é o valor moderno. É possível notar a redução do valor da incerteza experimental de h ao longo do tempo (linha tracejada vermelha).



Fonte: Adaptado de Steiner (2012).

De acordo com Steiner (2012), apesar de termos em mãos uma diversidade de medições modernas disponíveis da constante de Planck, ainda não é possível afirmar definitivamente uma conclusão no qual se assume um valor aceito para h . Isso pode demonstrar que esse é um tema

bastante atual que continua incomodando a comunidade científica. A busca por melhores procedimentos e técnicas para se obter resultados mais exatos e precisos para essa constante pode mostrar aos discentes que a ciência não é algo estático, mas sim em constante construção.

2.4.2 Erro experimental ao se determinar a constante de Planck por meio de LEDs devido ao processo de fluorescência

Um experimento educacional de simples montagem, baixo custo e fácil aquisição de materiais que vem sendo reportado nos últimos anos na literatura acadêmica para se determinar a constante de Planck é aquele que se utiliza do Diodo Emissor de Luz (do inglês, LED: *Light Emitting Diode*) (NIEVES, 1997; PILI & VIOLANDA, 2019). Talvez o primeiro artigo a discutir a estrutura de energia do LED e o método que a utiliza para determinar a constante de Planck tenha surgido em 1974 (O'CONNOR & O'CONNOR, 1974; INDELICATO, 2013). Atualmente, uma simples pesquisa em sites de busca da internet usando o termo de busca “*constante de Planck com LED*” fornecerá inúmeros *links* direcionando para páginas, roteiros experimentais, e vídeos no *YouTube* sobre o tema elaborados por pesquisadores de universidades (ZOLLMAN & BEARDEN, 2019).

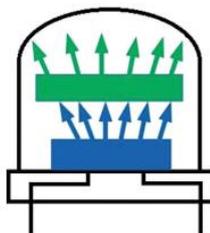
Dois métodos distintos para esse experimento têm sido discutidos na literatura. Uma abordagem usa o equipamento padrão de fotocélula de LEDs que emite luz de diversos comprimentos de onda. A outra depende da banda e *gap* de energia da estrutura de semicondutores para obter uma estimativa da constante de Planck. Vamos discutir sobre este último método e a dificuldade que pode ser introduzida por alguns LEDs que são comumente chamados de ultrabrilhante (GARVER, 2006).

De acordo com Zollman & Bearden (2019), para esse tipo de experimento pode haver um problema relacionado com a informação correta sobre os dados coletados. Para alguns LEDs, a energia da luz emitida pode ser bem diferente da energia do *gap* do semicondutor. Se esses LEDs forem usados para o experimento, os resultados poderão fornecer valores incorretos para a constante de Planck.

Isso pode ocorrer devido a um processo denominado fluorescência. Neste processo, conforme ilustrado na Figura 2, o LED dentro desse dispositivo emite luz azul que é então absorvida por um material fluorescente. O material é construído para converter a luz azul na frequência ou frequências desejadas. Este processo é chamado de “conversão para baixo” (do

inglês: “*down conversion*”) porque converte a luz azul em uma luz de menor energia (menor frequência).

Figura 2: Devido ao processo de fluorescência, a luz emitida pelo LED azul, pode ser convertida, por exemplo, para uma luz de menor frequência (luz verde).



Fonte: Zollman & Bearden (2019).

Desse modo, como a indústria produtora de LEDs continua a desenvolver novos dispositivos de iluminação, é necessário ter cuidado na seleção dos LEDs que serão utilizados para se determinar a constante de Planck. Caso contrário, ao se realizar esse experimento poderemos ter dificuldades em encontrar resultados experimentais considerados satisfatórios.

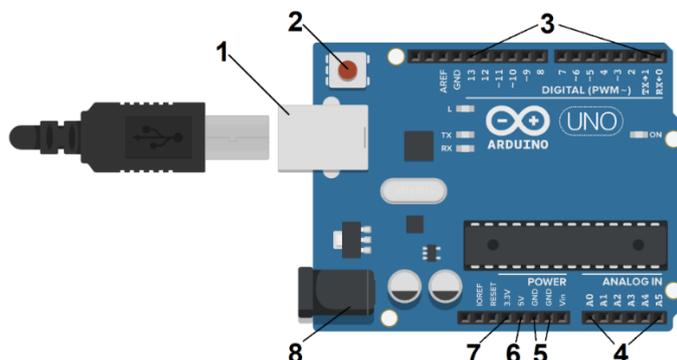
2.5 A PLATAFORMA ARDUINO E O ENSINO DE FÍSICA

Ao se ensinar ciências, muitas vezes nos deparamos com dois tipos particulares de experimentos: demonstrativos e de verificação. Com relação ao primeiro, o professor pode, por exemplo, conectar um dispositivo de medição no computador para exibir os resultados em um projetor multimídia ou televisor para observar o comportamento gráfico dos dados obtidos. No caso de experimentos de verificação, os alunos geralmente realizam os experimentos de forma independente. Nesse caso, também é possível se utilizar de dispositivos eletrônicos de medição para a coleta de inúmeras grandezas físicas, como por exemplo a plataforma Arduino (KUBÍNOVÁ & ŠLÉGR, 2015).

O Arduino (Figura 3) consiste em uma placa microcontroladora embarcada de código aberto, cuja linguagem de programação utilizada é baseada em C/C++ e em *hardwares* e *softwares* livres, permitindo a sua utilização na aquisição de dados via sensores de entrada e saída. A sua programação pode ser realizada no computador por meio de uma IDE, do inglês *Integrated Development Environment* (Ambiente de Desenvolvimento Integrado) que é

disponibilizada gratuitamente na internet¹ e o algoritmo pode ser transferido para o Arduino através de uma porta USB.

Figura 3: Plataforma Microcontroladora Arduino. Em (1) temos a entrada USB, (2) o botão reset, (3) as entradas e saídas digitais, (4) as entradas e saídas analógicas, (5) os GNDs ou aterramentos, (6) a saída de 5V, (7) a saída de 3,3V, e (8) a entrada para a fonte de alimentação entre 7V e 12V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A IDE do Arduino é uma aplicação escrita em Java *cross-plataforma*, não necessitando, portanto, de instalação. Além disso, é portátil para vários sistemas operacionais e originada da IDE para a linguagem de programação *Processing*.

Essa facilidade na aquisição de dados através da leitura simultânea de dezenas de sensores de entrada e saída, tanto digitais como analógicos, possibilitará, dependendo do conhecimento em eletrônica e programação, a elaboração de uma infinidade de experimentos, principalmente na área de física. Dessa forma, a plataforma Arduino surge como uma possibilidade ilimitada para o desenvolvimento e estudo de diversos experimentos, dentre eles, a aceleração, movimento uniformemente variado, oscilação, resfriamento, evaporação, queda dos corpos (GALADIMA, 2014; KINCHIN, 2018).

Dentro desse contexto, a plataforma Arduino se torna uma ferramenta ideal. A sua versatilidade e baixo-custo tornam-a uma plataforma acessível para o projeto e elaboração de dispositivos de controle ou instrumentos com sensores para o registro de dados. A sofisticidade do Arduino está na sua capacidade de proporcionar a construção de inúmeros instrumentos de medição. Qualquer coisa que possa gerar um sinal digital ou uma diferença de potencial pode em essência ser usado com um Arduino (KINCHIN, 2018).

No ensino, é comum utilizarmos termistores (sensores de temperatura) e LDRs (sensores de luz) para demonstrar aos alunos como os transdutores funcionam. Com o uso do

¹ O *download* do *software* pode ser realizado gratuitamente no seguinte endereço eletrônico: <https://www.arduino.cc/en/software>.

Arduino, podemos transformá-los em termômetros e medidores de intensidade luminosa, desde que saibamos como eles variam em função de algum parâmetro. O termistor pode ser modelado, por exemplo, pela equação Steinhart-Hart.

2.5.1 Aquisição Automática de dados com o *software Microsoft Excel* e o PLX-DAQ

Planilhas eletrônicas como o *Microsoft Excel* ou *LibreOffice Calc* são ferramentas computacionais e gráficas simples, versáteis, mas repletas de recursos. Devido à facilidade em sua utilização, estas são amplamente empregadas na execução de todo o tipo de tarefa, variando desde a organização de gastos financeiros para a gestão de economia doméstica à organização de dados e resultados para a realização de pesquisa científica avançada.

Para o ensino de ciências as planilhas também têm sua importância, sendo muito úteis para a organização de dados teóricos e experimentais através de tabelas e gráficos. Como exemplos de aplicações e fenômenos estudados no ensino de física com o auxílio de planilhas, podemos citar a elaboração de figuras de Lissajous, a distribuição Weibull para a velocidade do vento e o oscilador harmônico amortecido (GONZÁLEZ, 2018).

Neste trabalho, para a visualização automática dos dados coletados do circuito elétrico via Arduino utilizamos a planilha do Excel. A transferência dos dados da plataforma Arduino para a planilha foi realizada através da ferramenta PLX-DAQ, do inglês *Parallax Data Acquisition tool* (Ferramenta de aquisição de dados da Parallax), também disponibilizada gratuitamente para *download* na internet².

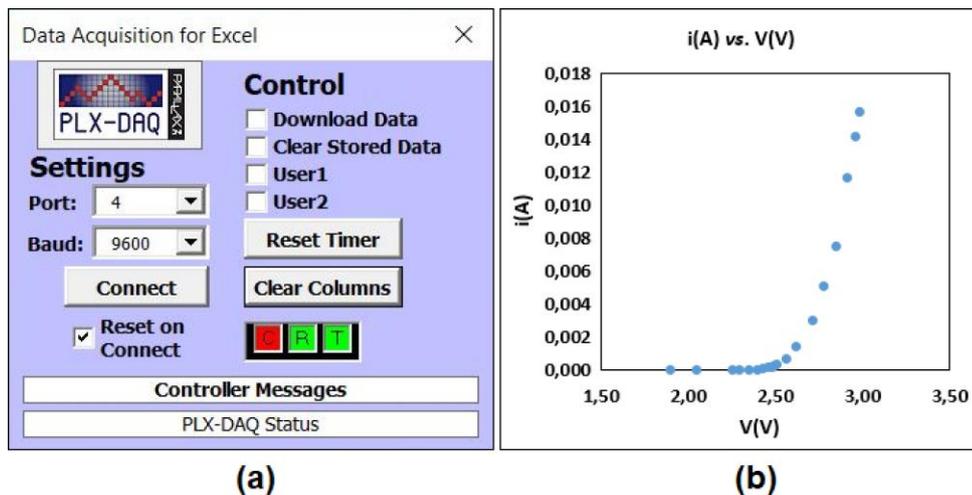
O PLX-DAQ é uma Interface Gráfica do Usuário (GUI - *Graphical User Interface*) desenvolvida para ser integrada ao Microsoft Excel. A leitura dos dados é feita através de uma porta serial e estes são enviados pelo Arduino para a planilha do Excel (RINALDI & FAUZI, 2019). Adicionalmente, a GUI permite estabelecer uma conexão entre o nó receptor³ (Arduino) e o computador, para registrar todos os dados recebidos no formato de arquivo padrão para Excel (.xlsm). Outra grande vantagem da GUI é que sua atualização é feita em um intervalo de apenas um segundo, permitindo o recebimento em tempo real de dados atualizados do sistema, agilizando ainda mais o processo de medição e análise dos resultados (ADETYA, HIDAYAT, & AL FANSYURI, 2021).

² *Download* no site: <https://www.parallax.com/package/plx-daq/>.

³ Um nó receptor é um dispositivo ou sistema projetado para receber e processar dados ou informações de outros dispositivos ou sistemas.

Para a conexão do Arduino com o Excel, primeiramente é necessário programar a placa Arduino por meio da IDE. Após o código do programa ser carregado no Arduino, deve-se clicar no ícone da planilha PLX-DAQ para selecionar a porta serial do Arduino conforme pode ser observado na Figura 4(a). Após a seleção da porta serial, basta clicar no ícone conectar. Com isso, é possível plotar o gráfico dos dados coletados na planilha em tempo real e visualizar cada ponto coletado automaticamente, como ilustrado na Figura 4(b) (NICHOLS, 2017).

Figura 4: (a) Planilha do Microsoft Excel com a ferramenta PLX-DAQ, mostrando a plotagem do gráfico através da coleta de dados automática do sistema. (b) Plotagem dos dados em tempo real na planilha do *Microsoft Excel*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Capítulo 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E PREPARAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

*Acho que posso dizer com segurança
que ninguém entende Mecânica Quântica.” (POLKINGHORNE, 2002).*

*Richard Feymann (1918 – 1988). Físico
teórico norte-americano e vencedor do Prêmio
Nobel de Física em 1965 por seu trabalho
em Eletrodinâmica Quântica.*

“Foi um ato de desespero.” (EISBERG, 1994; KRAGH, 2000).

*Max Planck (1858-1947). Físico alemão
e vencedor do prêmio Nobel de Física em
1918 discorrendo a respeito da descoberta
que leva o seu nome, a Constante de Planck.*

3.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.2.1 Breve contextualização histórica sobre os primórdios da Física Quântica

A Física Quântica é a teoria física que descreve o universo atômico e das radiações, contudo, é difícil situar exatamente a respeito sobre a sua origem. Muitos historiadores da

ciência afirmam que a apresentação do artigo do físico alemão Max Planck em 14 de dezembro de 1900 denominado “*Sobre a teoria da lei de distribuição de energia do espectro normal*” - entende-se espectro normal como o espectro de radiação de um corpo negro - tenha marcado o início de seu surgimento. No entanto, o nascimento da mecânica quântica ocorreu devido a inabilidade da Física Clássica em responder satisfatoriamente alguns problemas, principalmente aqueles que se apresentaram aos físicos nas últimas décadas do século XIX (ZANETIC & MOZENA, 2019; FRANCO, 2002; PLANCK, 1901).

Figura 5: Max Planck (1858-1947). Físico alemão e ganhador do prêmio Nobel de Física de 1918 em reconhecimento aos seus serviços prestados para o avanço da física e à sua descoberta do “*quanta*” de energia. Embora muitos historiadores da ciência afirmem que a apresentação do artigo do físico alemão Max Planck (1858-1947) em 14 de dezembro de 1900 denominado “*Sobre a teoria da lei de distribuição de energia do espectro normal*” tenha marcado o início da Física Quântica, o nascimento da mecânica quântica se deu devido a inabilidade da Física Clássica em responder satisfatoriamente alguns problemas, principalmente aqueles que se apresentaram para os físicos nas últimas décadas do século XIX.



Fonte: *The Nobel Prize in Physics 1918*. Disponível em: "<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1918/summary/>". Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

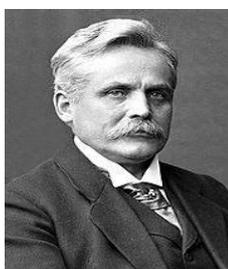
Dentre esses problemas, aquele que a Física Clássica não conseguia dar uma explicação satisfatória era a respeito da distribuição de energia do espectro de radiação do corpo negro, que fora extremamente observada de modo experimental entre o fim do século XIX e o início do século XX. Muitos textos didáticos retratam esse assunto como a catástrofe do ultravioleta.

Nessa época, a Física Clássica tratava a natureza da luz por meio do eletromagnetismo clássico de Maxwell, e a classificando como ondas eletromagnéticas, o que posteriormente fora comprovado experimentalmente pelo físico alemão Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) (ZANETIC & MOZENA, 2019; FRANCO, 2002).

No século XIX, havia extremo interesse em torno do estudo da radiação do corpo negro. A indústria siderúrgica alemã se desenvolveu rapidamente, e não havia aparatos tecnológicos capazes de medir as elevadas temperaturas dos altos fornos. Desse modo, várias pesquisas foram realizadas com a finalidade de determinar essas altas temperaturas através da coloração das radiações térmicas emitidas pelos metais aquecidos nos fornos. Com a utilização de prismas para a análise das radiações emitidas em várias faixas de temperatura, foi possível obter a curva do espectro de radiação térmica do material aquecido.

Portanto, uma necessidade tecnológica, associada ao desenvolvimento industrial alemão ocorrido no século XIX, levou à construção empírica das curvas de radiação térmica dos materiais aquecidos pela indústria siderúrgica. Esse processo provocou um enorme interesse por uma comunidade de físicos experimentais da época, dentre eles, o físico alemão Wilhelm Wien (1864-1928), o matemático e físico inglês John William Strutt (1842-1919), mais conhecido como Lord Rayleigh (1842-1919), o físico, astrônomo e matemático britânico James Hopwood Jeans (1877-1946) e Max Planck (ZANETIC & MOZENA, 2019).

Figura 6: Wilhelm Wien (1864-1928). Foi o primeiro físico a tentar fornecer uma análise teórica coerente para a obtenção da distribuição espectral da radiação do corpo negro. Em 1911, recebeu o prêmio Nobel de Física, pela descoberta das leis de irradiação do calor, mais conhecida como a Lei de Wien.



Fonte: Wilhelm Wien. Disponível em: “<https://www.uni-wuerzburg.de/en/uniarchiv/personalities/eminentscholars/wilhelm-wien/>”. Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

Figura 7: Fundição de metal em indústria siderúrgica. Compreender o comportamento da radiação térmica emitida pelos metais aquecidos em fornos de alta temperatura pela indústria siderúrgica alemã, foi um dos grandes motivadores para que os cientistas investigassem em meados do século XIX a natureza da radiação térmica.



Fonte: Siderúrgica. Disponível em: “<https://www.g-techsistemas.com.br/segmento/industria/12/siderurgica>”. Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

Vários cientistas buscaram solucionar a questão do espectro de radiação do corpo negro. Os estudos iniciais apontam para os trabalhos realizados pelo físico e matemático austro-esloveno Josef Stefan (1835-1893) e pelo físico austríaco Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906). Boltzmann chegou à equação que fornece a radiância total R para uma superfície, também conhecida como a Lei de *Stefan-Boltzmann*.

No entanto, o primeiro físico a tentar fornecer uma análise teórica coerente para a obtenção da distribuição espectral da radiação do corpo negro foi Wihelm Wien em 1894. Ele se baseou nas considerações eletromagnéticas e termodinâmicas de Boltzmann. Embora pareça fácil a obtenção dessa função por Wien através da física predominante da época, não foi isto o que ocorreu, pois, muitos cientistas não obtiveram êxito durante o final do século XIX. A Física Clássica não forneceu resultados satisfatórios para resolver o problema da função de distribuição do espectro de radiação do corpo negro.

Figura 8: Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906). O físico austríaco é conhecido pelo seu trabalho no campo da termodinâmica estatística. É considerado junto com Josiah Willard Gibbs e James Clerk Maxwell como o fundador da mecânica estatística.



Fonte: Ludwig Boltzmann. Disponível em: “<https://www.sciography.com/ludwig-boltzmann.htm>”. Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

Max Planck buscou utilizar um formalismo matemático desenvolvido por Ludwig Boltzmann para a teoria cinética dos gases. Planck postulou que a distribuição de energia se dava em níveis discretos. Ele considerou que, na superfície das paredes da cavidade do corpo negro (Figura 9) existem osciladores harmônicos simples (cargas elétricas oscilantes) que só podem ter determinados valores ε de energia, de tal modo que a energia ε era obtida com múltiplos de um valor mínimo de energia da seguinte forma:

$$\varepsilon = nh\nu, \quad \text{para } n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

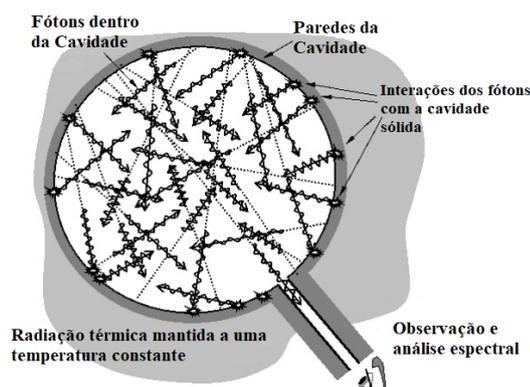
no qual n é o número quântico, $h\nu$ é a frequência do oscilador e h uma constante que fora obtida mais como um artifício matemático do que uma realidade física, pois de algum modo essa constante fornecia resultados corretos para a energia de radiação. Deste fato se origina a seguinte frase de Planck: “foi um ato de desespero” (EISBERG, 1994).

Para cada valor de n o oscilador está em um determinado estado quântico. Assim, no estado quântico $n=1$ sua energia é $h\nu$; no estado quântico $n=2$ sua energia é $2h\nu$, e assim por diante. Isso significa que a energia do oscilador é quantizada, ou seja, só pode ter determinados valores, no caso múltiplos inteiros de $h\nu$.

É importante destacar que essa teoria de fato contraria totalmente a Física Clássica, segundo a qual um determinado oscilador harmônico simples pode ter qualquer quantidade de

energia e, além disso, na Física Clássica essa energia depende apenas da amplitude de suas oscilações e não de sua frequência.

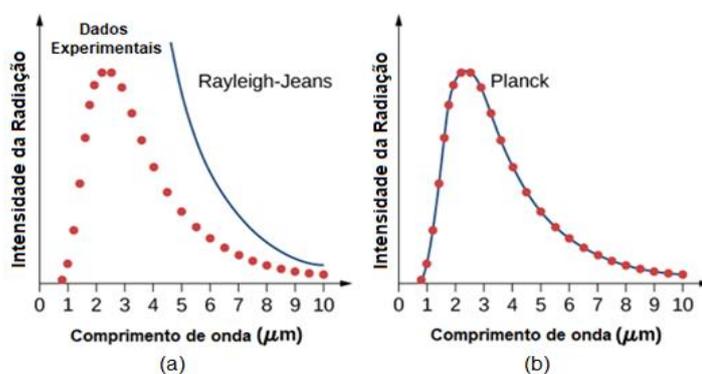
Figura 9: Caverna de um corpo negro com fótons saltando para frente e para trás a uma determinada temperatura. A caverna possui um pequeno orifício pelo qual é possível observar a radiação espectral. Planck considerou que na superfície das paredes da caverna do corpo negro, existem osciladores harmônicos simples (cargas elétricas oscilantes) que só podem ter discretos valores ϵ de energia, de tal modo que $\epsilon = h\nu$ para $n = 1, 2, 3, \dots$. Planck também considerou que os osciladores existentes na superfície do corpo só emitem ou absorvem energia quando passam de um estado quântico para outro.



Fonte: Adaptado de Johnson (2012).

Se o estado quântico passou de $n=1$ para $n=2$, uma porção discreta de energia $h\nu$ foi absorvida pela carga elétrica oscilante. Portanto, a emissão e a absorção de energia também se dão em quantidades quantizadas. Desse modo, essa hipótese fornecia resultados teóricos satisfatórios em comparação com os dados obtidos experimentalmente para a distribuição espectral da radiação térmica de um corpo negro em função de seu comprimento de onda conforme pode ser observado na Figura 10.

Figura 10: (a) Gráfico dos pontos experimentais (círculos vermelhos) e da previsão teórica da Física Clássica (linha sólida azul) da intensidade da radiação emitida por um corpo negro em função de seu comprimento de onda realizada pelos físicos Rayleigh e Jeans, também conhecida como a catástrofe do ultravioleta. (b) Gráfico dos pontos experimentais (círculos vermelhos) e da previsão teórica (linha sólida azul) da intensidade da radiação emitida por um corpo negro em função de seu comprimento de onda realizada pelo físico Max Planck.



Fonte: Disponível em: “[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_\(OpenStax\)/University_Physics_III_-_Optics_and_Modern_Physics_\(OpenStax\)/06%3A_Photons_and_Matter_Waves/6.02%3A_Blackbody_Radiation](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_(OpenStax)/University_Physics_III_-_Optics_and_Modern_Physics_(OpenStax)/06%3A_Photons_and_Matter_Waves/6.02%3A_Blackbody_Radiation)”. Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

No entanto, foi Albert Einstein (1879-1955), de certo modo, contrariando Planck, que atribuiu uma realidade física aos níveis discretos das ondas eletromagnéticas, de tal modo a supor que, independentemente da presença de uma cavidade, a luz seria composta de unidades elementares, também conhecidas como “*quanta*”. O artigo escrito por Einstein em 1905, intitulado: “*Sobre um ponto de vista heurístico da criação e conversão da luz*”, afirma que:

De acordo com as hipóteses aqui assumidas, quando um raio de luz se propaga a partir de um ponto, sua energia não é continuamente distribuída em um volume crescente. Ela consiste em um número de **quanta de energia**, localizados no espaço que se movem sem se dividir e que podem ser absorvidos ou emitidos apenas como um todo (EINSTEIN, 1905 *apud* FRANCO, 2002).

Esse artigo de Einstein se refere primordialmente a aspectos termodinâmicos relativos ao problema da radiação do corpo negro. Ao contrário do que se é afirmado em inúmeros livros-textos, apenas no final do artigo é que Einstein faz considerações a respeito do efeito fotoelétrico (EINSTEIN, 1905 *apud* FRANCO, 2002).

Figura 11: Albert Einstein (1879-1955). O físico alemão Albert Einstein ganhou o prêmio Nobel de Física em 1921 devido a sua explicação para o efeito fotoelétrico e por suas contribuições para a Física Teórica.



Fonte: Albert Einstein. Disponível em: “<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/einstein/facts/>”. Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

O físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962), em um de seus postulados referentes ao seu modelo atômico, apresentou que a produção de espectros é um fenômeno “quântico” (ocorre por saltos). Apesar de algumas contradições, o modelo de Bohr conseguiu explicar quantitativamente todas as séries de linhas de hidrogênio (PIRES, 2008; EINSTEIN, 1905 *apud* FRANCO, 2002).

Figura 12: Niels Bohr (1885-1962). O físico dinamarquês, Niels Bohr ganhou o prêmio Nobel de Física em 1922 por seus serviços na investigação da estrutura dos átomos e radiação emanada por eles.



Fonte: Niels Bohr. Disponível em: “<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1922/bohr/biographical/>”. Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

3.2.2 Radiação Térmica e Corpo Negro

3.2.2.1 Radiação Térmica

Radiação térmica é a radiação emitida por um corpo em função da sua temperatura. Todos os corpos emitem esse tipo de radiação para o meio que o cerca, e dele absorve. Caso um corpo esteja inicialmente com a sua temperatura superior à do meio, ele irá esfriar, pois a sua taxa de emissão de energia térmica será maior que a taxa de absorção.

Os sólidos ou líquidos – matéria em um estado condensado – emitem um espectro contínuo de radiação. A característica do espectro de radiação emitida pelo corpo não depende do material do qual esse corpo é constituído, mas da sua temperatura. Na temperatura ambiente a maior parte dos corpos pode ser visto não pela luz que emitem, mas sim pela que refletem. Se nenhuma luz incidir sobre eles, não poderemos observá-lo sem o uso de óculos ou dispositivos que permitam a visualização da radiação não visível.

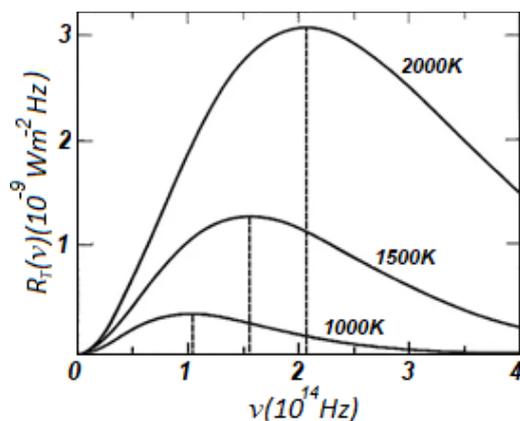
Desse modo, a temperaturas bastante elevadas, os corpos possuem a própria luminosidade. É possível a olho nu observá-los brilhar num local escuro; porém, mesmo a temperaturas na ordem de milhares de Kelvin, boa parte da radiação térmica emitida não é visível para nós, pois está na região do infravermelho do espectro eletromagnético. Desse modo, corpos com própria luminosidade são extremamente quentes, dentre esses exemplos, temos os filamentos de lâmpadas, a brasa e o sol.

De um modo mais abrangente, o espectro de radiação térmica emitido por um corpo aquecido está intrinsicamente ligado com a composição química deste corpo. Todavia, experimentalmente podemos observar a existência de um tipo de corpo aquecido que emite espectros de radiação térmica com características universais. Esses corpos são denominados *corpos negros*, ou seja, corpos na qual suas superfícies absorvem toda a radiação térmica que

incide neles. O nome é adequado, pois a luz não é refletida por esses corpos e eles são negros. Um exemplo próximo de um corpo negro seria um objeto qualquer coberto com uma camada semelhante ao negro de fuligem. É possível constatar que, independentemente dos detalhes materiais do qual o corpo negro é composto, à mesma temperatura eles possuem o mesmo espectro de emissão de radiação térmica. Isso pode ser mais bem compreendido por meio de embasamentos clássicos que envolvem o equilíbrio termodinâmico. Contudo, o formato específico do espectro não pode ser alcançado somente a partir de argumentação termodinâmica. A radiação térmica do corpo negro possui propriedades universais, e devido a isso esses corpos possuem um interesse teórico particular pelos físicos que procuram explicar as suas características espectrais.

A *radiância espectral*, $R_T(\nu)$, que é a distribuição espectral da radiação de corpo negro, se define de forma que $R_T(\nu)d\nu$ seja correspondente à energia emitida por unidade de tempo em radiação de frequência contida no intervalo de ν a $\nu + d\nu$ por unidade de área de uma superfície a uma temperatura absoluta T . Em 1899, os físicos alemães Otto Lummer (1860-1925) e Ernest Pringsheim (1859-1917) realizaram as primeiras medidas precisas ao se utilizarem de um instrumento semelhante aos espectrômetros de prisma usados nas medições de espectros óticos, diferenciando-se apenas nos materiais especiais que eram necessários para que as lentes, prismas etc., fossem transparentes aos materiais de frequência relativamente baixa. Na Figura 13, observa-se a dependência experimental de $R_T(\nu)$ em ν e T para as temperaturas de 1000K, 1500K, e 2000K. Podemos notar que a frequência para a qual o valor máximo da radiância ocorre se eleva de modo linear com a temperatura, e a potência total emitida por m^2 tem um aumento rápido com a temperatura.

Figura 13: Radiância espectral de um corpo negro em função da frequência da radiação para as temperaturas de 1000K, 1500K, e 2000K. Podemos notar que a frequência para a qual o valor máximo da radiância ocorre se eleva de modo linear com a temperatura, e a potência total emitida por m^2 tem um aumento rápido com a temperatura.



Fonte: Adaptado de Eisberg (1994).

A energia total emitida por unidade de tempo e por unidade de área por um corpo negro a uma temperatura T pode ser obtida por meio da integral da radiância espectral $R_T(\nu)$ sobre todas as frequências ν . A radiância R_T pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$R_T = \int_0^{\infty} R_T(\nu) d\nu. \quad (2)$$

Podemos observar pela Figura 13 que R_T cresce rapidamente com o aumento da temperatura T . Esse resultado foi enunciado em 1879 sob a forma de uma equação empírica (Equação 3), e é chamado de *lei de Stefan*. Desse modo,

$$R_T = \sigma T^4, \quad (3)$$

sendo σ a constante de *Stefan-Boltzmann* e possui o valor de $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$. A Figura 13 indica que ocorre um deslocamento do espectro para maiores frequências à medida que T aumenta. Este resultado é denominado *lei do deslocamento de Wien*, de modo que,

$$\nu_{m\acute{a}x} \propto T, \quad (4)$$

no qual $\nu_{m\acute{a}x}$ é a frequência ν onde $R_T(\nu)$ obtém o seu valor mais elevado para uma determinada temperatura T . Ao haver um aumento de T , ocorre um deslocamento de $\nu_{m\acute{a}x}$ para temperaturas mais elevadas.

3.2.2.2 Corpo Negro

Em 1860, o físico alemão Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), baseado em seus estudos fundamentais, realizou uma introdução idealizada de corpo negro, ou corpo perfeitamente negro.

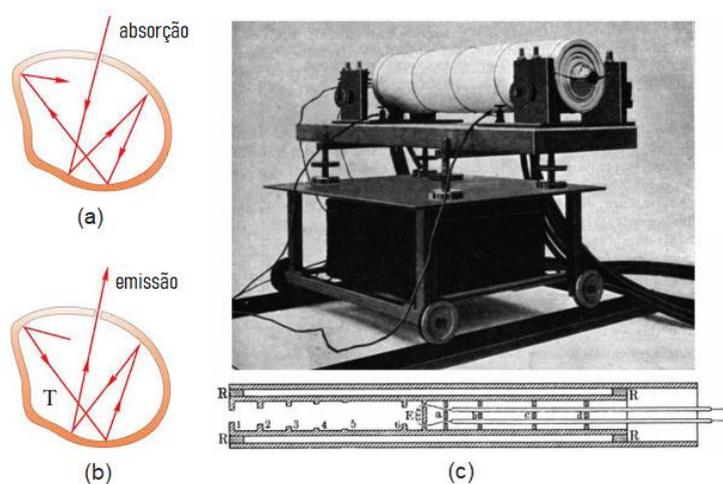
Nosso senso comum diz que corpo negro é um objeto de cor preta que tem como propriedade a capacidade de absorver praticamente toda a luz (radiação eletromagnética) incidente sobre ele. Esta definição está perto da definição correta, mas vamos apenas estendê-la e considerar todo tipo de radiação.

Um corpo negro é definido como um objeto que absorve completamente toda a radiação incidente sobre ele e não é capaz de refletir qualquer radiação. Ele é considerado como um corpo ideal, ou seja, ele não existe na natureza, mas é utilizado como um modelo simplificado para facilitar o estudo da física. Desta forma podemos pensar em um corpo negro bem diferente do primeiro exemplo: imagine um objeto com uma cavidade conectada com o exterior através de um pequeno orifício como pode ser observado na Figura 14(a). A radiação incidente sobre o orifício é refletida seguidamente pelas paredes internas da cavidade, e dificilmente conseguirá sair pelo orifício.

Sendo assim, o orifício é (aproximadamente) um corpo negro, já que quase toda a radiação incidente sobre ele é absorvida. Vamos prosseguir com o exemplo da cavidade com um pequeno orifício. Consideremos agora que a cavidade está a uma temperatura T e, portanto, está emitindo radiação térmica que é absorvida e reemitida pelas paredes internas e, eventualmente, sai pelo orifício como pode ser observado na Figura 14(b). Como já vimos, as cavidades do orifício têm a propriedade de um corpo negro; portanto, a radiação que está saindo por ele tem propriedades de *radiação de corpo negro*, mas, já que ela é meramente uma amostra da radiação que existe dentro da cavidade, podemos dizer que a radiação dentro da cavidade tem propriedades de *radiação de corpo negro*.

Na Figura 14(c), podemos observar um aparato experimental elétrico de corpo negro brilhante projetado por O. Lummer e F. Kulbaum em 1898. A corrente aquece o filamento localizado em um tubo dentro do cilindro. O espectro desta radiação é observado através do orifício encontrado ao longo do eixo do cilindro. Com uma corrente de cerca de 100A, temperaturas de aproximadamente 1500°C (1773K) podem ser alcançadas (HOFFMANN, 2001).

Figura 14: Cavidades que representam um corpo negro e aparato experimental. Em (a) a radiação que incide pelo orifício da cavidade é refletida repetidas vezes pelas paredes da cavidade, e dificilmente sairá do orifício. Em (b) a cavidade está a uma temperatura T , e portanto, está emitindo radiação térmica que é absorvida e reemitida pelas paredes internas, e eventualmente, sai pelo orifício. Em (c) temos o aparato experimental elétrico de corpo negro brilhante projetado por O. Lummer e F. Kulbaum em 1898. A corrente aquece o filamento localizado em um tubo dentro do cilindro. O espectro desta radiação é observado através do orifício encontrado ao longo do eixo do cilindro. Com uma corrente de cerca de 100A, temperaturas de aproximadamente 1500°C (1773K) podem ser alcançadas.



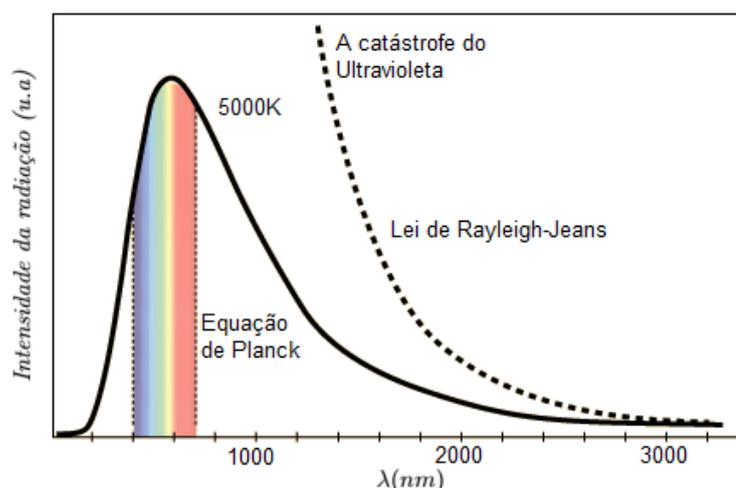
Fonte: Hoffmann (2001).

3.3.2 A Teoria de Planck para a Radiação de Corpo Negro

Os físicos John William Strutt (1842-1919), mais conhecido como Lord Rayleigh, e James Hopwood Jeans (1877-1946), por meio da Física Clássica buscaram solucionar o **Problema da Radiação do Corpo Negro**. Contudo, para frequências elevadas (baixos comprimentos de onda), os resultados teóricos divergiam drasticamente dos valores obtidos experimentalmente, de modo que essa previsão, ficou conhecida como a catástrofe do ultravioleta (Figura 15).

Planck, ao buscar uma solução para a discrepância entre a teoria e o experimento para a radiação de corpo negro, considerou a hipótese de uma violação da lei de equipartição da energia sobre a qual a teoria era baseada (EISBERG, 1994).

Figura 15: A linha pontilhada indica a previsão de Rayleigh-Jeans utilizando a Física Clássica em comparação com os resultados experimentais (linha sólida) para a densidade de energia de uma cavidade de corpo negro. Essa discrepância entre o resultado experimental e o resultado teórico obtido por Rayleigh-Jeans também é conhecido como a catástrofe do ultravioleta.



Fonte: Rayleigh-Jeans vs. Planck. Disponível em: “<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/mod6.html>”. Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

Na Figura 15, pode-se constatar que para elevados comprimentos de onda (baixas frequências), a lei de Rayleigh-Jeans fornece resultados satisfatórios. Portanto, é possível supor que,

$$\bar{\epsilon} \xrightarrow{\nu \rightarrow 0} kT, \quad (5)$$

ou seja, a energia total média, $\bar{\epsilon}$, tende a kT , quando a frequência ν se aproxima de zero, no qual k é a constante de Boltzmann, e T a temperatura. Para elevadas frequências, a discrepância poderia ser eliminada caso houvesse por alguma razão um corte de modo que,

$$\bar{\epsilon} \xrightarrow{\nu \rightarrow \infty} 0, \quad (6)$$

de outra forma, caso a energia total média tenda a zero quando a frequência ν tender ao infinito. Assim, Planck descobriu que a energia média $\bar{\varepsilon}$ das ondas estacionárias se trata de uma função da frequência $\bar{\varepsilon}(\nu)$, com os atributos indicados nas Equações (5) e (6). Isto contraria a lei da equipartição da energia que relaciona à energia média $\bar{\varepsilon}$ um valor que não depende da frequência ν .

A teoria da equipartição de energia se origina, essencialmente, de um resultado mais compreensível da teoria cinética clássica, a distribuição de Boltzmann. Uma forma especial da distribuição de Boltzmann é fornecida pela seguinte equação:

$$P(\varepsilon) = \frac{e^{-\varepsilon/kT}}{kT}, \quad (7)$$

na qual $P(\varepsilon)d\varepsilon$ é a probabilidade de encontrar um determinado elemento do sistema com energia situada no intervalo entre ε e $\varepsilon + d\varepsilon$, quando a quantidade de estados de energia para o elemento nesse intervalo não depende de ε . É suposto que o sistema contenha em equilíbrio térmico uma elevada quantidade de elementos de mesma característica a uma determinada temperatura T , sendo k a constante de Boltzmann. A Equação (7) governa um conjunto de ondas estacionárias que oscilam em movimento harmônico simples e em equilíbrio térmico em uma cavidade de corpo negro, e são as energias consideradas dos elementos do sistema.

A função de distribuição de Boltzmann fornece informações completas a respeito das energias dos elementos do nosso sistema, de modo a incluir, obviamente, o valor médio $\bar{\varepsilon}$ das energias. A partir de $P(\varepsilon)$ é possível obtê-la utilizando-se a Equação (8),

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon P(\varepsilon) d\varepsilon}{\int_0^{\infty} P(\varepsilon) d\varepsilon}. \quad (8)$$

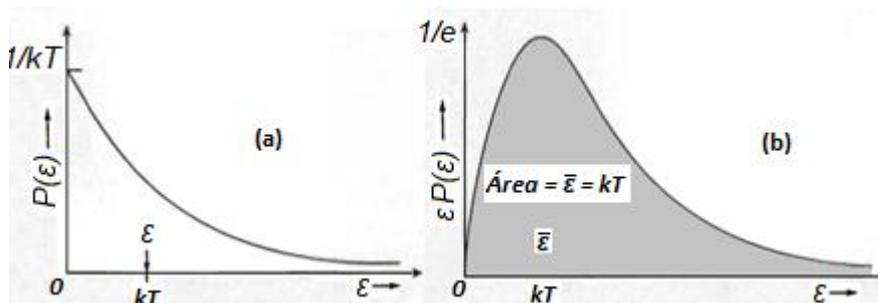
Ao se integrar o numerador, obtém-se a energia ε , com o peso fornecido por meio da probabilidade que o elemento possui de ser encontrado com essa energia. O valor médio $\bar{\varepsilon}$ desta energia é obtido ao se realizar a integração sobre todas as energias possíveis. O denominador, $\int_0^{\infty} P(\varepsilon) d\varepsilon$ é a probabilidade de encontrar o elemento com qualquer energia, e desse modo, possui o valor igual a 1. É possível calcular a integral do numerados, e dessa forma, obtém-se como resultado justamente a lei da equipartição de energia,

$$\bar{\varepsilon} = kT. \quad (9)$$

Na Figura 16(a), podemos observar o gráfico de $P(\varepsilon)$ em função de ε . Para $\varepsilon = 0$, ocorre o valor máximo do gráfico, $1/kT$. Ao aumentarmos o valor de ε , observamos que $P(\varepsilon)$ se reduz suavemente até se aproximar de zero quando $\varepsilon \rightarrow \infty$. Ou seja, ao se medir o valor de ε , a maior probabilidade é de se encontrar como resultado o valor de zero. Contudo, a média $\bar{\varepsilon}$ dos valores

a serem obtidos num elevado número de medições realizadas de $\bar{\epsilon}$ é maior que zero, como pode ser observado na abscissa da Figura 16(b), tendo-se em vista que inúmeras medições de ϵ irão resultar em valores superiores a zero.

Figura 16: (a) Gráfico da distribuição de probabilidade de Boltzmann $P(\epsilon) = e^{-\epsilon/kT}$. O valor médio da energia ϵ para essa distribuição é $\bar{\epsilon} = kT$, que é a lei clássica da equipartição de energia. Para se realizar o cálculo desse valor de $\bar{\epsilon}$, basta integrarmos $\epsilon P(\epsilon)$ de zero até o infinito. Dessa forma, esta é a quantidade da qual calculamos a média, $\bar{\epsilon}$, multiplicada pela probabilidade relativa $P(\epsilon)$ com a qual o valor ϵ poderá ser obtido numa medição de energia. (b) Gráfico de $\epsilon P(\epsilon)$ no qual a área sob a curva fornece o valor da energia média $\bar{\epsilon}$.



Fonte: Adaptado de Eisberg (1994).

A Figura 16(b) mostra o cálculo de $\bar{\epsilon}$ a partir de $P(\epsilon)$. A imensa contribuição de Planck se originou quando ele fez a descoberta de que poderia obter o corte necessário, indicado na Equação (6), caso alterasse o cálculo que leva de $P(\epsilon)$ a $\bar{\epsilon}$, de modo a considerar a energia ϵ não como se fosse uma variável contínua como sempre foi considerada pela Física Clássica, mas sim discreta. Ao se reescrever a Equação (8), isto pode ser feito quantitativamente, em termos de uma somatória discreta, ao invés de uma integral.

Planck postulou que a energia ϵ poderia assumir somente determinados valores discretos, ao invés de qualquer valor, e que tais valores discretos seriam distribuídos de modo uniforme, ou seja, ele assumiu que,

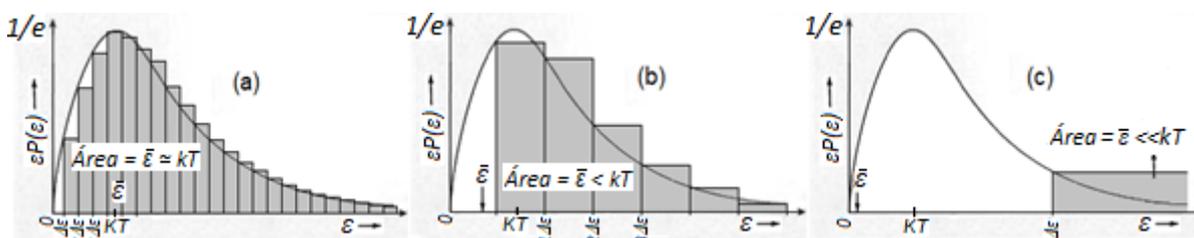
$$\epsilon = 0, \Delta\epsilon, 2\Delta\epsilon, 3\Delta\epsilon, 4\Delta\epsilon, \dots \quad (10)$$

era um possível conjunto de valores da energia. Neste caso, $\Delta\epsilon$ é o intervalo constante compreendido entre os possíveis valores sucessivos da energia.

A Figura 17(a) ilustra um cálculo de $\bar{\epsilon}$ a partir de $P(\epsilon)$, para o caso no qual $\Delta\epsilon \ll kT$. O resultado obtido, neste caso, é $\bar{\epsilon} \approx kT$. Ou seja, é obtido um valor fundamentalmente idêntico ao resultado clássico, tendo-se em vista que o intervalo $\Delta\epsilon$ é extremamente pequeno em comparação com o intervalo de 0 a kT no qual $P(\epsilon)$ varia de modo significativo. Nesta situação não há diferença se ϵ é contínua ou discreta. A Figura 17(b) ilustra a situação na qual $\bar{\epsilon} < kT$. Encontra-se kT , pois grande parte dos elementos possuem energia $\epsilon = 0$, já que $P(\epsilon)$ possui um valor imensamente pequeno para o possível primeiro valor não nulo $\Delta\epsilon$, de modo que $\epsilon =$

O domina o cálculo do valor médio de ϵ , e consegue-se um resultado inferior. A consequência de ϵ ser discreta é observada com maior clareza na Figura 17(c), que ilustra um caso no qual $\Delta\epsilon \gg kT$. Nesta situação, a probabilidade de se encontrar um elemento com qualquer valor de energia superior a zero é desprezível, tendo-se em vista que $P(\epsilon)$ é imensamente pequeno para todos esses valores, e obtém-se o resultado de $\bar{\epsilon} \ll kT$.

Figura 17: (a) Se a energia ϵ não se trata de uma variável contínua, mas somente limitada a valores discretos $0, \Delta\epsilon, 2\Delta\epsilon, 3\Delta\epsilon, \dots$, como pode ser observado nos traços do eixo ϵ da figura, a integral usada para o cálculo da soma $\bar{\epsilon}$ deve ser substituída por uma soma discreta. O valor médio de $\bar{\epsilon}$ será a soma das áreas dos retângulos, cada qual com largura $\Delta\epsilon$, e com altura fornecida pelo valor possível de ϵ multiplicado pelo valor de $P(\epsilon)$ no início de cada intervalo. Nesta Figura, $\Delta\epsilon \ll kT$, e como as energias e as possibilidades energéticas estão muito próximas, a área de todos os retângulos quase não se diferencia em relação à área sob a suave curva. Desse modo, o valor médio $\bar{\epsilon}$ observado é muito próximo a kT . (b) $\Delta\epsilon \approx kT$, e $\bar{\epsilon}$ possui um menor valor em relação à Figura 17(a). (c) $\Delta\epsilon \gg kT$, e $\bar{\epsilon}$ é mais diminuto ainda. Os retângulos demonstram nas três figuras a contribuição para a área total $\epsilon P(\epsilon)$, para cada possibilidade energética. O retângulo para $\epsilon = 0$ possui, obviamente, sem exceção, altura igual a zero. Isto ocasiona um enorme efeito na área total, caso as larguras retangulares sejam grandes.



Fonte: Adaptado de Eisberg (1994).

Desse modo, Planck descobriu que ele conseguiria obter o valor de $\bar{\epsilon} \approx kT$ quando a diferença entre sucessivas energias $\Delta\epsilon$ forem pequenas, e $\bar{\epsilon} \approx 0$ quando $\Delta\epsilon$ é imenso. Como Planck precisava obter o primeiro resultado para pequenos valores de frequência ν , e o segundo para elevados valores de ν , obviamente, ele necessitava fazer de $\Delta\epsilon$ uma função crescente ν . Alguns cálculos lhe possibilitaram perceber que era possível utilizar a relação mais simples possível entre $\Delta\epsilon$ e ν por meio dessa propriedade. Ou seja, ele considerou a proporcionalidade dessas grandezas,

$$\Delta\epsilon \propto \nu, \tag{11}$$

ao se escrever na forma de uma equação ao invés de uma proporcionalidade, obtemos,

$$\Delta\epsilon = h\nu, \tag{12}$$

na qual h é uma constante de proporcionalidade.

Cálculos posteriores possibilitaram a Planck determinar o valor da constante h , de forma a obter o resultado que melhor ajustava a sua teoria aos dados experimentalmente obtidos. Ele obteve um valor bem próximo ao atualmente aceito, $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$. Esta constante, imensamente famosa, é denominada **constante de Planck**.

Ao realizar o cálculo da somatória de modo análogo ao da integral da Equação (4), Planck obteve a seguinte Equação (13) para a energia média $\bar{\epsilon}$,

$$\bar{\epsilon}(\nu) = \frac{h\nu}{(e^{h\nu/kT} - 1)} . \quad (13)$$

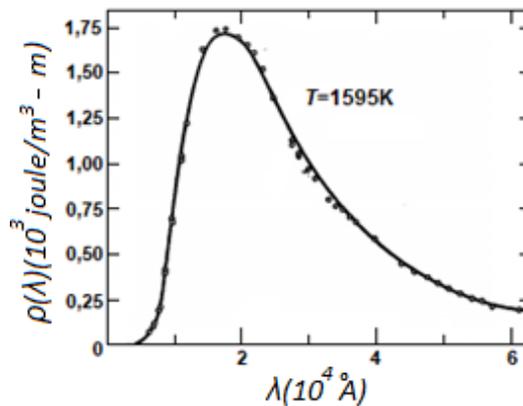
Como $e^{h\nu/kT} \rightarrow 1 + h\nu/kT$ quando $h\nu/kT \rightarrow 0$, observamos que $\bar{\epsilon}(\nu) \rightarrow kT$ neste limite, como é previsto pela Equação (5). No limite, $h\nu/kT \rightarrow \infty$, $e^{h\nu/kT} \rightarrow \infty$, nota-se que $\bar{\epsilon}(\nu) \rightarrow 0$, conforme previsto pela Equação (6).

Ao utilizar o resultado da energia $\bar{\epsilon}(\nu)$ expressa na Equação (13), ao invés do valor clássico $\bar{\epsilon} = kT$, Planck imediatamente obteve para a densidade de energia do espectro do corpo negro a seguinte equação,

$$\rho_T(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{(e^{h\nu/kT} - 1)} d\nu. \quad (14)$$

Este é o espectro de corpo negro obtido por Planck. Na Figura 18, podemos observar uma comparação do resultado obtido pela teoria de Planck (dados expressos em função do comprimento de onda) com os dados obtidos experimentalmente para uma temperatura $T=1595K$. Nota-se que os resultados experimentais estão em pleno acordo com a equação de Planck, para qualquer temperatura T .

Figura 18: A linha sólida indica a previsão realizada por Planck para a densidade de energia em comparação com os resultados obtidos experimentalmente (círculos) para a densidade de energia de um corpo negro para uma temperatura de 1595K. Os dados foram divulgados pelo físico William Coblentz em 1916. Depois de traçar as curvas do espectro de energia provenientes de suas medições, o autor observou que “devido ao cansaço da vista, ficou impossibilitado nos meses seguintes de fornecer a devida atenção à análise dos dados. Após finalmente serem analisados, os dados levaram a um valor de $6,57 \times 10^{-34}$ joules \cdot s para a constante de Planck.



Fonte: Adaptado de Eisberg (1994).

Devemos notar que Planck não modificou a distribuição de Boltzmann, ele apenas tratou de modo discreto, e não contínuo, a energia das ondas eletromagnéticas estacionárias, oscilando senoidalmente em função do tempo.

3.3.3 As Implicações do Postulado de Planck

É possível colocar a contribuição de Planck no modo de um postulado, como se segue:

Qualquer ente físico com um grau de liberdade cuja “coordenada” é uma função senoidal do tempo (isto é, executa oscilações harmônicas simples) pode possuir apenas energias totais que satisfaçam a relação,

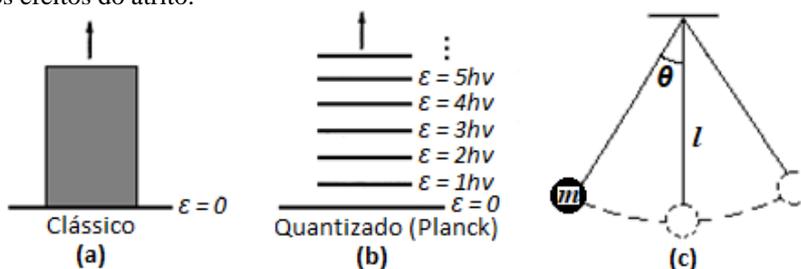
$$\varepsilon = nh\nu, \quad \text{onde } n = 1, 2, 3, \dots,$$

na qual ν é a frequência de oscilação, e h é uma constante universal (EISBERG, 1994).

Neste caso, utiliza-se a palavra coordenada em seu sentido geral, de modo a significar qualquer quantia que descreva a situação instantânea do elemento. A posição angular de um pêndulo, o comprimento de uma mola e a amplitude de uma onda são exemplos, pois em todos esses casos as coordenadas são funções senoidais do tempo.

Na Figura 19(b), é mostrado um diagrama de níveis de energia. Esta é uma ilustração conveniente do comportamento de um elemento dirigido por esse postulado, além de útil para distinguir esse comportamento discretizado em relação ao que seria esperado pela Física Clássica (Figura 19(a)). Nesse tipo de diagrama, indicamos por meio de uma linha horizontal cada um dos possíveis níveis energéticos. De acordo com a Física Quântica, a distância de uma linha até a linha de nível igual a zero, $\varepsilon = 0$, é proporcional ao total de energia correspondida por ela. Dessa forma, o elemento pode assumir qualquer nível energético igual a $\varepsilon = 0, hv, 2hv, 3hv, \dots$, caso seja respeitado o postulado de Planck. O conjunto discreto de linhas em seu diagrama de energia indica isto. É dita “quantizada” a energia do elemento que obedece ao postulado de Planck, as possibilidades dos estados energéticos são chamadas de “estados quânticos”, e o número inteiro n é denominado “número quântico”.

Figura 19: (a) As possibilidades energéticas para um sistema clássico que oscila senoidalmente com frequência ν são distribuídas de forma contínua. (b) De acordo com o postulado de Planck, as energias possíveis são distribuídas de forma discreta, tendo em vista que podem obter apenas os valores $nh\nu$. Nesta situação, dizemos que a energia é “quantizada”, sendo n o estado quântico de um estado quântico possível. (c) Um exemplo de descontinuidade na redução de energia é a de um pêndulo simples de massa $m = 0,1\text{kg}$, suspenso por uma corda de comprimento $l = 0,1\text{m}$, cuja amplitude máxima de oscilação é de $\theta = 0,1\text{rad}$ em relação à vertical. A energia do pêndulo se reduz por causa dos efeitos do atrito.



Fonte: Adaptado de Eisberg (1994).

3.3.3.1 Análise se um sistema físico macroscópico é contínuo ou quantizado

Como exemplo de análise de continuidade ou descontinuidade de um sistema físico que oscila senoidalmente com o tempo, vamos analisar um pêndulo simples de massa $m = 0,1\text{kg}$, suspenso por uma corda de comprimento $l = 0,1\text{m}$, cuja amplitude máxima de oscilação é de $\theta = 0,1\text{rad}$ em relação à vertical conforme é ilustrado na Figura 19(c). A energia do pêndulo se reduz por causa dos efeitos do atrito.

A frequência ν de oscilação do pêndulo é,

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{9,8\text{m/s}^2}{0,1\text{m}}} = 1,6\text{s}.$$

A energia do pêndulo é idêntica à sua energia potencial máxima, de modo que,

$$\begin{aligned} mgh &= mgl(1 - \cos\theta) = 0,01\text{kg} \times 9,8\text{m/s}^2 \times 0,1\text{m} \times [1 - \cos(0,1)] \\ &= 5 \times 10^{-5}\text{J}. \end{aligned}$$

A energia do pêndulo é quantizada, de modo que as variações de energia acontecem em saltos de valor $\Delta\varepsilon = h\nu$; contudo,

$$\Delta\varepsilon = h\nu = 6,63 \times 10^{-34}\text{J} \cdot \text{s} \times 1,6/\text{s} = 10^{-33}\text{J},$$

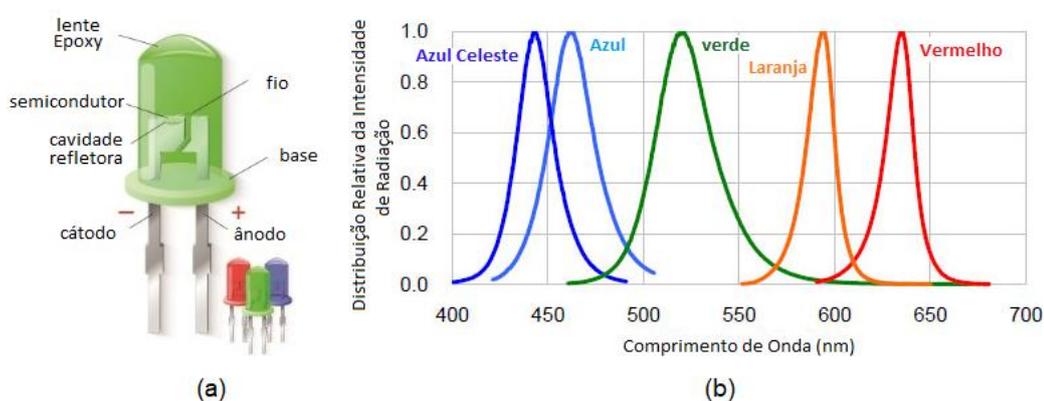
podemos observar pelos resultados que a variação de energia $\Delta\varepsilon = 10^{-33}\text{J}$ obtida para a quantização do pêndulo é extremamente inferior à energia do pêndulo, $\varepsilon = 5 \times 10^{-5}\text{J}$, de modo que $\Delta\varepsilon/\varepsilon = 2 \times 10^{-29}$. Desse modo, para ser observado que a redução da energia é discreta, necessitamos medi-la com uma precisão superior a duas partes em 10^{29} . Notamos que, atualmente, mesmo o aparato experimental com a melhor resolução é plenamente incapaz de poder realizar essa medição de energia.

Portanto, podemos concluir que o postulado de Planck não pode ser validado através de experimentos que se utilizem de um pêndulo simples, e essa conclusão é válida para qualquer outro sistema macroscópico. Pelo fato de h ser extremamente pequeno em comparação com outras grandezas físicas, os níveis energéticos estão muito próximos um do outro, de forma que é praticamente impossível diferenciá-los de uma distribuição contínua. Para sistemas clássicos, indubitavelmente, h poderia ser considerado como zero, e um modo de reduzirmos as equações quânticas ao seu limite clássico é fazendo $h \rightarrow 0$ nessas equações. Somente quando consideramos sistemas nos quais ν é extremamente elevado, e/ou ε é tão reduzido que $\Delta\varepsilon = h\nu$ é da ordem de ε , é que estamos em uma situação que possibilita testarmos o postulado de Planck. Obviamente, exemplos disso são as ondas estacionárias de elevadíssima frequência na radiação de corpo negro.

3.3.4 Determinação da constante de Planck utilizando-se LEDs

Os LEDs são peças semicondutoras que emitem radiação eletromagnética a partir da faixa do espectro do ultravioleta até o infravermelho. Isso ocorre quando uma diferença de potencial é aplicada entre os seus terminais. Em decorrência do seu processo de fabricação e da estrutura cristalina do qual o seu material é composto, os LEDs emitem radiação eletromagnética numa região espectral (intervalo de comprimento de onda) na qual o pico dessa região define a frequência predominante da luz emitida (comprimento de onda de máxima emissão). O espaçamento do comprimento de onda predominante da luz emitida pode ter poucas dezenas de nanômetros. Em decorrência do pequeno espaçamento em torno do pico de emissão, geralmente é estabelecido que a radiação emitida é aproximadamente monocromática, ou seja, tem apenas um único comprimento de onda, conforme é ilustrado na Figura 20(b) (NUSSENZVEIG, 2015; CAVALCANTE & HAAG, 2005; RAYCHAUDHURI, 2011).

Figura 20: (a) LED - Diodo Emissor de Luz. (b) Espectro de emissão de diversos LEDs.



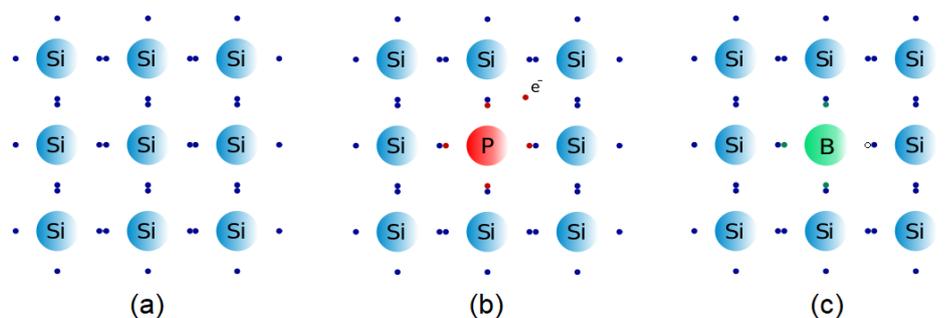
Fonte: Adaptado de: “https://br.123rf.com/photo_24954429_partes-de-uma-light-emitting-diode.-led.-ao-contr.html”. Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

Os LEDs são formados por uma união de semicondutores do tipo-n e do tipo-p (Figura 21). Semicondutores são materiais sólidos, geralmente cristalinos, que possuem uma resistividade elétrica intermediária entre a de um bom isolante e a de um bom condutor. Esses materiais possuem quatro elétrons na camada de valência, sendo os mais comuns o silício (Si) e o germânio (Ge). Um semicondutor é do tipo-n quando a maior parte dos portadores de carga elétrica são elétrons da banda de condução. As bandas de energia (banda de valência e condução, relevantes na descrição da união entre semicondutores do tipo-n e tipo-p) são originadas quando acontecem desdobramentos dos níveis de energia discretos dos átomos isolados durante a formação do cristal. A banda de valência é o nível energético mais afastado

do núcleo, ou seja, desdobramento da última camada discreta, e a banda de condução é o desdobramento do nível discreto seguinte. É normalmente chamado de *gap* (do inglês: “lacuna”), ou barreira de potencial, a diferença entre esses níveis de energia, conforme pode ser observado na Figura 22(a) (YOUNG, 2004).

A fabricação do semiconductor tipo-n pode ser feita através do processo denominado “dopagem”, no qual consiste no acréscimo de um material diferente (impureza) ao semiconductor da matriz original, por exemplo, adicionando-se um átomo de fósforo (P), que pode realizar até cinco ligações químicas (pentavalente), ao silício (Si) que pode fazer até quatro ligações (tetravalente) conforme pode ser observado na Figura 21(b). O semiconductor, então, passa a ter elétrons em excesso e fracamente ligado ao núcleo original, de modo que poderá doá-los, podendo dessa forma conduzir corrente elétrica.

Figura 21:(a) Material semiconductor formado por silício (Si) não dopado. (b) Material semiconductor do tipo-n dopado com átomo de fósforo (P). (c) Material semiconductor do tipo-p dopado com átomo de boro (B).



Fonte: Adaptado de: “<https://www.encyclopedie-energie.org/les-fours-de-cristallisation-du-silicium-photovoltaique/>”. Acesso em 31 de janeiro de 2023.

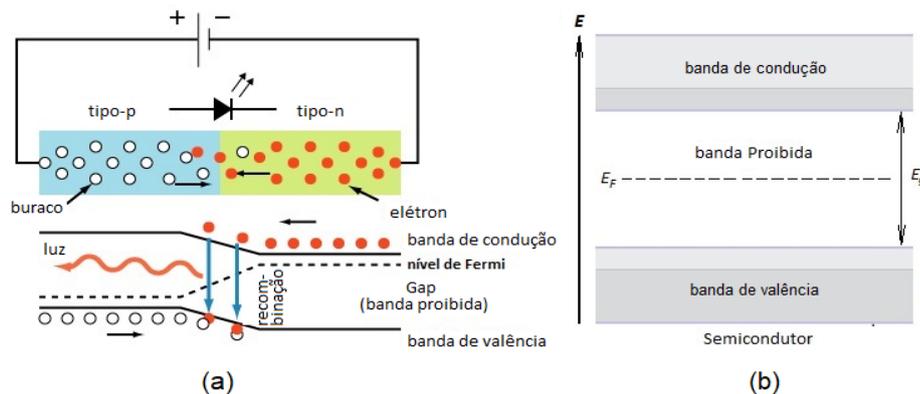
Do mesmo modo, dizemos que um semiconductor é do tipo-p quando acrescentamos um material diferente (impureza) ao material semiconductor da matriz original. Por exemplo, o boro (B), que pode realizar até três ligações (trivalente), ao silício (Si), que pode fazer até quatro ligações (tetravalente), de tal modo que possa existir “buracos” ou “lacunas” nos níveis de energia da banda de valência, deixando portanto, um espaço vazio neste nível que poderá ser ocupado por outro elétron, conforme pode ser observado na Figura 21(c) (DOS SANTOS, DOS SANTOS MENEZES JR, & DA SILVA SANTANA; CARRON & GUIMARÃES, 2006).

Ao ser formada a junção p-n, para que ocorra a passagem da corrente elétrica, é indispensável que se forneça uma energia de *gap*, E_G , necessária para que os elétrons do semiconductor tipo-n vençam a barreira de potencial, e, com isso, passem para a banda de condução, deixando uma lacuna na banda de valência, formando-se, portanto, um par elétron-lacuna. Isso é alcançado quando o diodo é submetido a uma diferença de potencial de magnitude $V_c = E_G/e$, no qual e é a carga do elétron, cujo valor é de $-1,602 \times 10^{-19}C$, e V_c é a tensão de

corrente, ou seja, a mínima tensão necessária para que haja condução de corrente elétrica no dispositivo semiconductor. Ao estarem na banda de condução, esses elétrons podem se deslocar para o semiconductor tipo-p onde se recombinam com as lacunas desse semiconductor, emitindo-se, portanto, a diferença de energia na forma de radiação eletromagnética (DOS SANTOS, DOS SANTOS MENEZES JR, & DA SILVA SANTANA).

Esta energia, E_G , necessária para vencer a barreira de potencial, é bem estabelecida para cada LED, ocasionando, portanto, a emissão da radiação eletromagnética num comprimento de onda bem peculiar. Em decorrência dessa queda de energia acontecer apenas na transição $n-p$, e esta lacuna de energia ter um valor bem específico, a radiação eletromagnética emanada é bem próxima de ter um comprimento de onda bem definido, ou seja, ser monocromática, obedecendo, portanto, a relação de Einstein para a energia de um fóton, dada pela Equação 1 (WALKER, HALLIDAY, & RESNICK, 2009).

Figura 22: (a) Esquema representando a diferença de níveis de energia, ou barreira de potencial, e o processo de emissão de luz de um LED. (b) Energia de Fermi (E_F), energia de *gap* (E_g), banda de condução, banda de valência, e a banda proibida de um semiconductor.



Fonte: Adaptado de (DOS SANTOS, DOS SANTOS MENEZES JR, & DA SILVA SANTANA).

Desse modo, sabemos que um *quantum* de energia igual a $h\nu$ é necessário para vencer a barreira de potencial, e formar um par elétron-lacuna, o que ocasionará na emissão de igual energia. Assim, temos a seguinte equação:

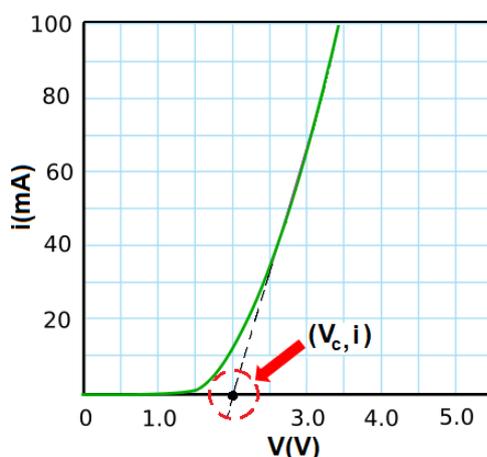
$$E_g = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = |eV_c|, \tag{15}$$

na qual c , é a velocidade da luz no vácuo ($\approx 3,0 \times 10^8 m \cdot s^{-1}$), e h , é a constante de Planck ($6,63 \times 10^{-34} J \cdot s$). De tal forma que, sabendo-se o comprimento de onda λ de máxima emissão de alguns LEDs, e medindo-se a tensão de corte V_c da corrente elétrica i , é possível determinar o valor da constante de Planck h da seguinte forma:

$$h = \left| \frac{\lambda e V_c}{c} \right|. \tag{16}$$

Experimentalmente, uma forma de estimar o valor da tensão de corte V_c do LED é construindo-se a curva característica do LED e, a partir da análise visual dessa curva, selecionar os pontos experimentais que se alinham segundo uma reta. Após a obtenção dessa reta, por extrapolação linear devemos fazer uma estimativa do valor da tensão de corte V_c . Na Figura 23 tem-se um gráfico da curva característica teórica do LED no qual a seta vermelha indica o ponto de intersecção da reta extrapolada com o eixo de tensão elétrica V . A tensão de corte é determinada através da obtenção do valor do par ordenado (V_c, i) desse ponto.

Figura 23: Curva característica teórica do LED. A seta vermelha indica o ponto de intersecção da reta extrapolada (linha tracejada) com o eixo da tensão elétrica V .



Fonte: Adaptado de “<http://lednique.com/current-voltage-relationships/resistance-of-an-led/>”. Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

3.3.5 Determinando a constante de Planck com LEDs: o experimento

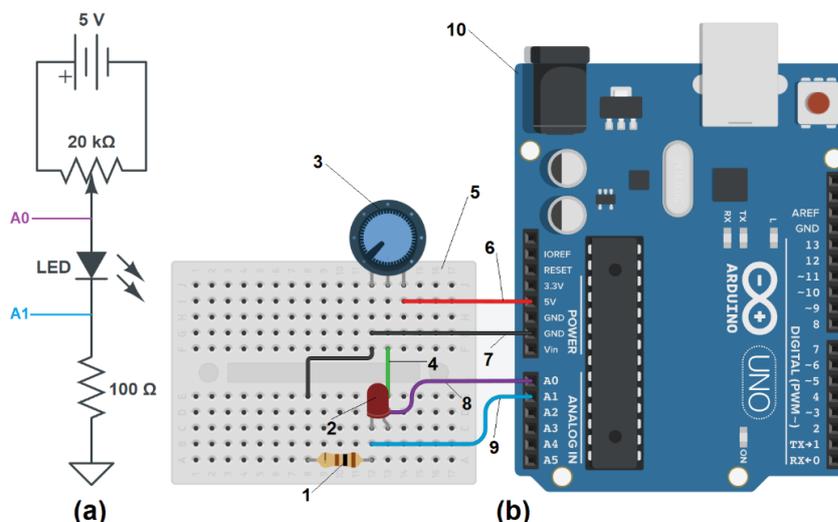
Antes de realizarmos o experimento, como não tínhamos conhecimento sobre as especificações técnicas dos LEDs para termos acesso aos seus *datasheets*, e essas informações nem sempre são obtidas no momento em que se realiza a compra desses componentes eletrônicos, primeiramente certificamos de que os LEDs selecionados não se utilizam do processo de fluorescência. Para isso, realizamos previamente diversos experimentos com a finalidade de verificarmos se haveria discrepância entre os resultados experimentais obtidos e os resultados encontrados na literatura para esse modelo de experimento, e caso fosse constatado algum resultado anormal, seria possível que o LED se utilizasse desse processo.

Além disso, como não realizamos algum experimento de espectrometria para determinarmos o valor apropriado para o comprimento de onda predominante do espectro de radiação eletromagnética emitido pelo LED (RODRIGUES, MARQUES, & CARVALHO, 2015), após realizarmos uma análise qualitativa da luz emitida pelos LEDs, encontramos essa

informação em *datasheets* de LEDs que emitem luz com comprimentos de onda semelhantes aos dos LEDs selecionados para o experimento.

Apresentamos a seguir o experimento propriamente dito onde utilizamos a plataforma Arduino para a aquisição dos dados experimentais e, em seguida, determinação da constante de Planck por meio das curvas características de LEDs. A esquematização e montagem do circuito elétrico em conjunto com o Arduino são apresentadas na Figura 24.

Figura 24: (a) Esquematização do circuito elétrico para se determinar a constante de Planck por meio de LED. (b) Representação da montagem do circuito elétrico em conjunto com a plataforma Arduino.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 24(a) é ilustrado de forma esquemática o circuito elétrico construído para determinar a constante de Planck por meio do levantamento da curva característica de um LED. A tensão contínua de 5V que é fornecida pelo Arduino e que alimenta o circuito está conectada em paralelo ao potenciômetro de 20 k Ω de modo que o sinal elétrico de saída desse dispositivo (pino central) controla a tensão aplicada no LED. Pode-se notar que as entradas analógicas A0 e A1 do Arduino estão conectadas aos terminais do LED de forma que o resultado da diferença do sinal analógico lido entre esses terminais levará, após conversão, ao valor da tensão elétrica aplicada no dispositivo semicondutor. Para limitar a corrente elétrica do circuito e evitar que o LED seja danificado, tem-se um resistor de 100 Ω conectado em série com o LED.

Na Figura 24(b) apresentamos uma representação da montagem do circuito elétrico em conjunto com a plataforma Arduino. O circuito montado é composto pelos componentes a seguir:

1. Resistor de 100 Ω ;
2. LEDs Azul (475nm), Verde (510nm), e Vermelho (625nm);
3. Potenciômetro de 20 k Ω .

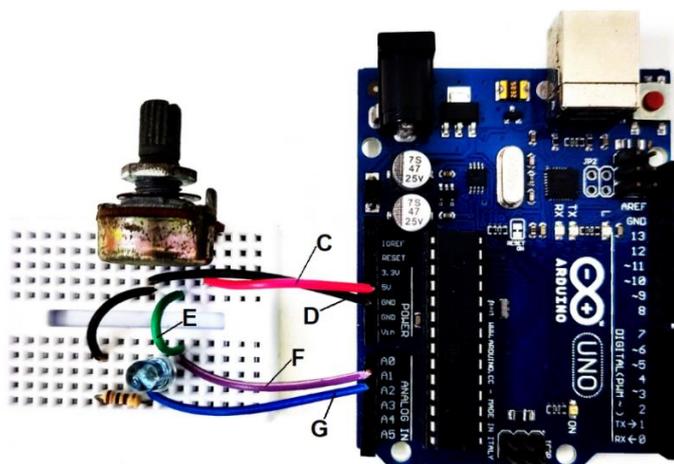
Ainda na Figura 24(b), em 4 temos o fio conectado ao terminal do sinal de tensão elétrica do potenciômetro, em 5 a *protoboard*, em 6 o fio conectado na porta de 5V, em 7 o fio conectado ao aterramento, em 8 o fio conectado à entrada analógica A0, em 9 o fio conectado à entrada analógica A1, e em 10 a plataforma Arduino.

Na Figura 25 é ilustrado a montagem experimental da Figura 24(b), e em C temos o sinal de tensão elétrica de 5V, em D o aterramento conectado ao GND do Arduino, em E o sinal de tensão elétrica controlado pelo potenciômetro, em F o sinal de entrada na porta analógica A0 do Arduino, e em G o sinal de entrada na porta analógica A1 do Arduino.

3.3.5.1 Procedimento Experimental

Inicialmente montamos o circuito elétrico na *protoboard* em conjunto com a plataforma Arduino selecionando o LED azul conforme é ilustrado nas Figuras 24(b) e 25, e após isso conectamos o cabo USB ao computador.

Figura 25: Montagem experimental na *protoboard* do circuito elétrico em conjunto com a plataforma Arduino para a coleta dos dados experimentais. As letras C, D, E, F e G correspondem aos números 6, 7, 4, 8 e 9 indicados na Figura 24.



Fonte: Elaborado pelo autor.

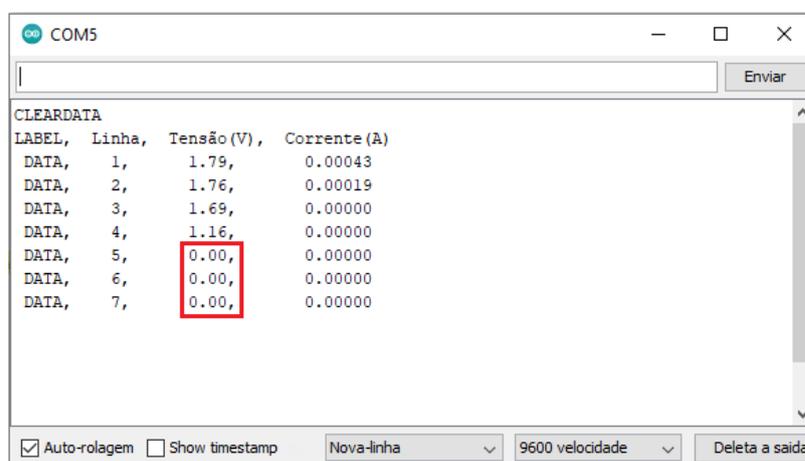
Posteriormente, abrimos a IDE do Arduino, e carregamos o código que consta no Apêndice. Em A0 e A1 temos as portas analógicas que podem ler sinais de entrada de 0 a 5V. Essas portas possuem internamente um conversor analógico-digital (ADC) que realiza a conversão do sinal analógico em um sinal digital que varia de 0 a 1023. O valor lido pela porta analógica é armazenado na memória do Arduino em uma variável do tipo inteiro que pode ser lida e utilizada pelo código do programa Arduino.

Para realizar a conversão desse valor em um valor de tensão elétrica, é possível utilizar a equação $V_n = \frac{V_s \cdot 5}{1023}$, no qual V_n é a tensão elétrica, V_s é o valor do sinal lido pela porta analógica A0, 1023 são os valores que as portas analógicas podem assumir e 5V é o sinal de tensão teórico fornecido pela placa Arduino. Neste trabalho, após medirmos com o multímetro o sinal de 4,91V fornecido pelo Arduino, a equação utilizada ficou da seguinte forma: $V_n = \frac{V_s \cdot 4,91}{1023}$.

Conforme consta no Apêndice, no algoritmo implementado na plataforma arduino utilizamos $V0$ como o valor do sinal de tensão lido pela porta analógica A0 e $V1$ como o valor lido pela porta analógica A1, de modo que a tensão elétrica aplicada no LED é o resultado da diferença entre esses sinais ($V0-V1$). Utilizando a lei de Ohm, determinamos o valor da corrente elétrica no LED (I_{led}) dividindo-se o valor da tensão elétrica $V1$, que é a ddp no resistor, pelo valor da resistência R do resistor de 100Ω do circuito.

Em seguida, abrimos o *Monitor serial* da IDE do Arduino e verificamos se ele está imprimindo os dados da tensão e corrente elétrica do LED conforme exemplo apresentado na Figura 26.

Figura 26: Print da tela do *Monitor serial* da IDE da plataforma Arduino com os dados experimentais da tensão e da corrente elétrica impressos. No retângulo vermelho, os valores indicam que o potenciômetro foi configurado para que o valor da tensão elétrica seja igual à zero nos terminais do LED.



CLEAR DATA			
LABEL,	Linha,	Tensão (V),	Corrente (A)
DATA,	1,	1.79,	0.00043
DATA,	2,	1.76,	0.00019
DATA,	3,	1.69,	0.00000
DATA,	4,	1.16,	0.00000
DATA,	5,	0.00,	0.00000
DATA,	6,	0.00,	0.00000
DATA,	7,	0.00,	0.00000

Fonte: Elaborado pelo autor.

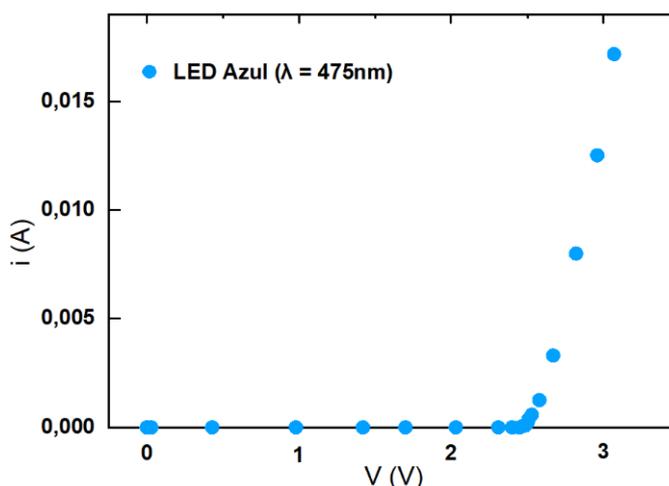
Posteriormente, configuramos a posição do potenciômetro para que o valor da tensão elétrica impressa no *Monitor Serial* seja igual à zero conforme pode ser observado no retângulo vermelho da Figura 26. Feito isso, giramos o potenciômetro lentamente com um baixo incremento no sentido em que ocorre o aumento da tensão elétrica nos terminais do LED. Esse valor, junto do valor da corrente elétrica no circuito, é impresso no *Monitor serial*, gerando um par ordenado (V, i). Em seguida, repetimos esse procedimento dando mais um passo no

potenciômetro, coletando e registrando um novo ponto experimental. Esse procedimento deve ser repetido até o momento em que não seja possível incrementar mais algum passo no potenciômetro.

Finalizada a coleta e o registro dos dados na planilha eletrônica, passamos para a análise dos dados. Primeiramente, é construído um gráfico de dispersão da corrente elétrica vs. tensão elétrica (curva característica do LED) conforme mostrado na Figura 27. A partir da análise visual dessa curva, é feita a seleção dos pontos experimentais que se alinham segundo uma reta. Após a obtenção da equação dessa reta, por extrapolação linear, é realizada uma estimativa da tensão de corte V_c do LED que permitirá a determinação da constante de Planck.

3.3.5.2 Resultados e Discussões

Figura 27: Gráfico da corrente elétrica (A) vs. tensão elétrica (V) dos dados experimentais coletados com a plataforma Arduino para o LED azul.



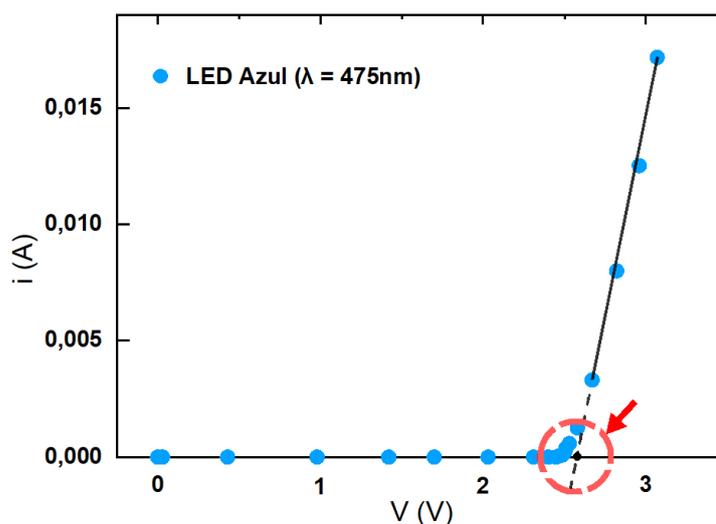
Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os pontos experimentais que se ajustam a uma reta já determinados, construímos o gráfico de dispersão mostrado na Figura 28. Note que o segmento de reta mostrado permite concluir que os quatro últimos pontos experimentais podem ser ajustados segundo uma função de primeiro grau e a linha tracejada colinear a este segmento indica uma intersecção com o eixo horizontal. Utilizando a ferramenta “*adicionar linha de tendência*” da planilha eletrônica determinamos a função que se ajusta a esses pontos e extrapolamos a reta (linha tracejada) até obter sua intersecção com o eixo V conforme pode ser observado na Figura 28. Nesta função a variável y é a corrente elétrica i e a variável x é a tensão elétrica V .

A extrapolação deve ser realizada pelo fato de o material semicondutor não ser ideal, isto é, não são apenas os buracos que irão “conduzir”, mas sim outros elementos, levando ao

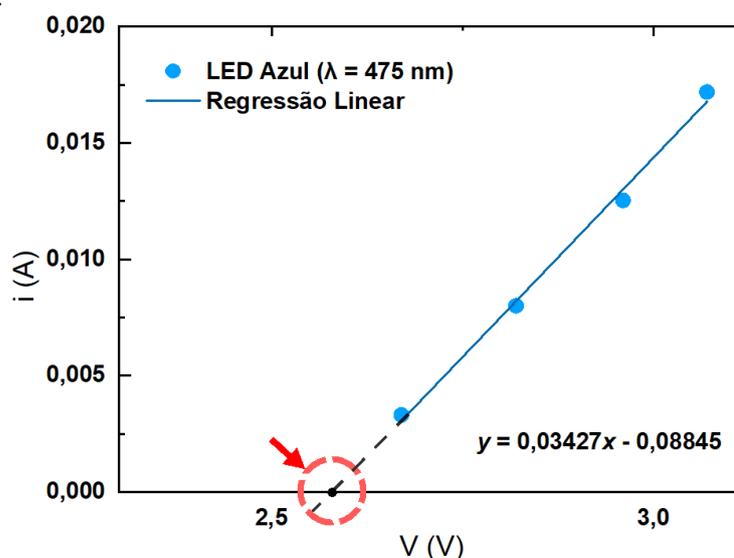
surgimento de um “joelho contínuo” e não uma curva com descontinuidade tal qual a teórica conforme pode ser verificado na Figura 23 (ver seção 3.3.4). O valor de V na intersecção é a tensão de corte V_c do LED, ou seja, a mínima tensão elétrica necessária para que o LED comece a emitir fótons.

Figura 28: Gráfico da corrente elétrica i vs. tensão elétrica V para o LED azul. Por meio de uma análise visual o segmento de reta ajusta os dados que visualmente sugerem estar mais alinhados de acordo com uma reta. A linha tracejada indica a extrapolação linear e no interior do círculo vermelho está o ponto de intersecção da reta com o eixo V .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29: Gráfico de dispersão de i (A) vs. V (V) dos dados experimentais que visualmente sugerem estar alinhados de acordo com uma reta. Através do método da regressão linear obtivemos a equação da reta que melhor ajusta os dados. Nesta equação, y é a variável da corrente elétrica i e x é a variável da tensão elétrica V aplicada no LED. A linha tracejada indica a extrapolação linear e no interior do círculo em vermelho está o ponto de intersecção da reta com o eixo V .

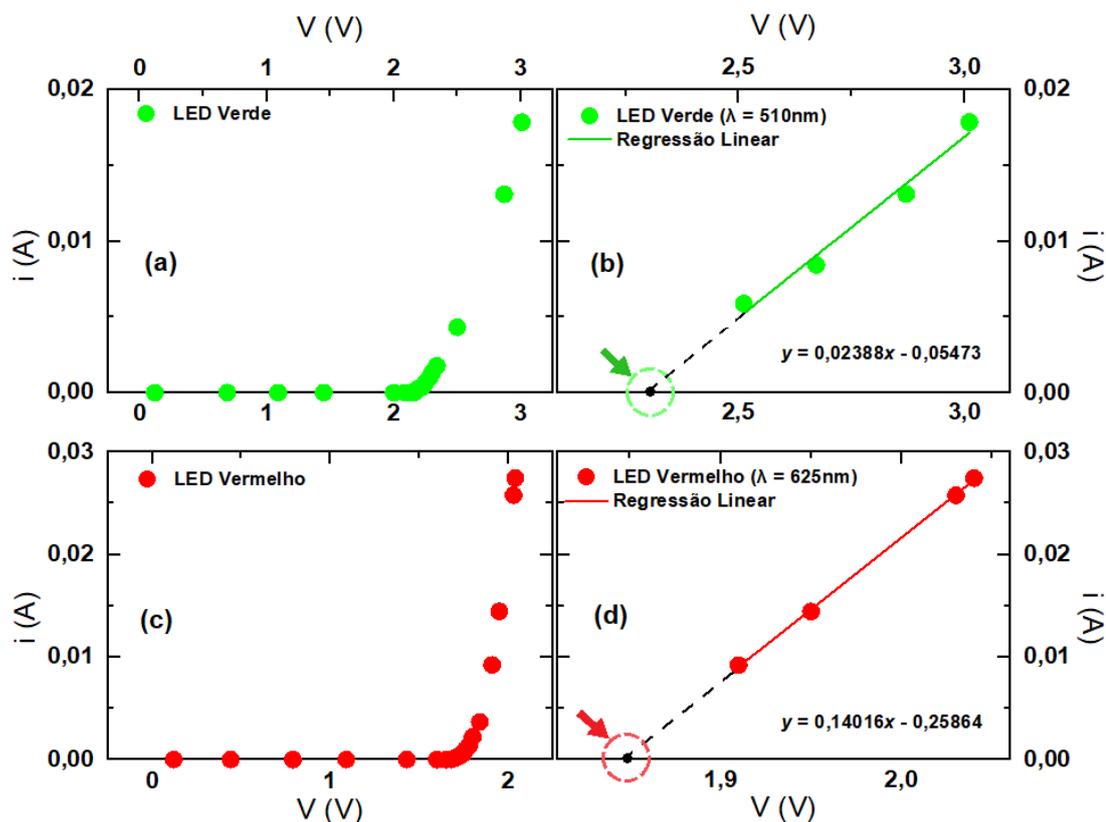


Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida determinamos a intersecção com o eixo horizontal ($y = 0$) obtendo, assim, o valor de V_c para o LED azul. Com essa informação, utilizamos a equação $h = \left| \frac{\lambda e V_c}{c} \right|$ para determinarmos a constante de Planck. Após isso, repetimos esse mesmo procedimento experimental realizado para os LEDs verde e vermelho.

A Figura 30 mostra os resultados obtidos para os LEDs verde e vermelho. Em (a) temos o gráfico dos dados experimentais obtidos para o LED verde. Em (b) tem-se o gráfico da reta que melhor se ajusta aos dados experimentais para o mesmo LED. Em (c) e (d) temos a situação correspondente para o LED vermelho. Os resultados experimentais para os três LEDs utilizados estão compilados na Tabela 1.

Figura 30: Em (a) e (b) temos os gráficos dos dados experimentais e da regressão linear obtidos para o LED verde. Em (c) e (d) temos os gráficos dos dados experimentais e da regressão linear obtidos para o LED vermelho. As linhas tracejadas em (b) e (d) indicam as extrapolações lineares e os círculos as intersecções das retas com os eixos de tensões elétricas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 1 a seguir é possível notar os dados experimentais obtidos para a tensão de corte V_c dos LEDs azul, verde e vermelho, além dos resultados da constante de Planck e seus erros experimentais relativos para cada caso.

Tabela 1: Dados experimentais obtidos para a tensão de corte V_c dos LEDs azul, verde e vermelho, resultados da constante de Planck, e erros experimentais relativos.

LED	$\lambda (\times 10^{-9})$	$V_c (V)$	$h (\times 10^{-34} J \cdot s)$	Erro(%)
Azul	475	2,58	6,54	1,36
Verde	510	2,29	6,23	4,68
Vermelho	625	1,85	6,17	5,99
$\bar{h} (\times 10^{-34} J \cdot s)$			6,31	
Erro \bar{h} (%)			5,01	

O valor médio \bar{h} obtido para a constante de Planck foi de $6,31 \times 10^{-34} J \cdot s$ e o seu erro relativo de 5,01%. Através da análise dos resultados experimentais apresentados da constante de Planck para cada um dos LEDs utilizados, é possível notar nitidamente um maior erro relativo para os LEDs verde (4,68%) e vermelho (5,99%) em relação ao valor obtido para o LED azul (1,36%).

Embora o erro experimental encontrado para o LED verde seja aproximadamente 3,44 vezes superior ao erro encontrado para o LED azul, e o erro encontrado para o LED vermelho seja algo em torno de 4,4 vezes superior em relação ao mesmo LED, os resultados apresentados são satisfatórios se comparados com os encontrados na literatura para esse mesmo modelo de experimento (CAVALCANTE & HAAG, 2005; OLIVEIRA, 2019).

Os diferentes erros obtidos podem estar relacionados à sensibilidade do experimento, pois caso houvesse um menor incremento na tensão elétrica seria possível coletar mais pontos experimentais e conseqüentemente obter uma estimativa melhor para a equação da reta que melhor ajusta esses pontos. Um resultado melhor obtido para o LED azul pode ter sido proveniente do fato da sua tensão de corte V_c ser superior aos obtidos para os LEDs verde e vermelho, de modo a contribuir para uma redução da relação sinal-ruído do sistema.

Embora não tenha ocorrido em nossos experimentos, o possível uso de LEDs que se utilizam do processo de fluorescência (ver seção 2.4.2) é um fator que deve ser levado em consideração. Além dos detalhes anteriormente citados, saber exatamente qual é a frequência predominante do espectro de emissão de luz do LED é fundamental para assegurar melhores resultados. Uma possibilidade para se obter essa informação é tendo-se acesso ao *datasheet* elaborado pelo fabricante do LED ou realizar algum experimento de espectrometria⁴.

Em relação ao registro dos dados na planilha eletrônica, é possível automatizar tal processo usando, por exemplo, o *software* PLX-DAQ (ver seção 2.5.1) que permite que os dados sejam transferidos automaticamente e em tempo real da plataforma Arduino para o

⁴ No artigo intitulado *How to build a low cost spectrometer with Tracker for teaching light spectra* (Como construir um espectrômetro de baixo-custo com o Tracker para o ensino do espectro de luz), Rodrigues, Marques & Carvalho (2015) apresentam um espectrômetro de baixo-custo e fácil aquisição de materiais.

Microsoft Excel. Com esse procedimento, além de agilizar a análise dos dados e obtenção dos resultados experimentais, os alunos poderão visualizar em tempo real a geração de um gráfico da curva característica do LED.

Considerando-se o fato deste ser um experimento de cunho pedagógico, de baixo-custo e fácil aquisição dos materiais, podemos concluir que os resultados obtidos são satisfatórios, permitindo que este seja aplicado em aulas do EM. Desse modo, poderá contribuir para o processo de ensino-aprendizagem de FMC nas escolas de nível médio em um contexto de experimentação, além de possibilitar aos alunos o contato com uma tecnologia acessível que envolve conhecimentos de eletrônica e programação.

Capítulo 4

APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

O produto educacional foi aplicado em uma escola técnica estadual localizada em Sorocaba, interior de São Paulo. A escola oferece diversos cursos técnicos profissionalizantes, sendo alguns deles integrados ao Ensino Médio. Para aplicação do produto educacional, selecionamos dois cursos de Ensino Médio integrados ao curso técnico que são ofertados como projeto de extensão da escola técnica no campus de uma faculdade de tecnologia estadual localizada na mesma cidade.

Nesse campus, os seguintes cursos são ofertados pela escola técnica no período da tarde: Ensino Médio com Habilitação Profissional de Técnico em Desenvolvimento de Sistemas e Ensino Médio com Habilitação Profissional de Técnico em Logística. Ao todo, são seis turmas distribuídas nos três anos de Ensino Médio, sendo que há apenas uma turma por ano para cada habilitação técnica ofertada. A forma de ingresso nesses cursos ocorre por meio de processo seletivo anual, no qual o aluno ao se inscrever no processo seleciona qual a opção de habilitação técnica irá cursar durante o Ensino Médio.

O campus da faculdade está situado em uma região considerada de média/alta renda econômica para a realidade brasileira e atende principalmente alunos de baixa/média renda. Atualmente, atende aproximadamente 3000 estudantes distribuídos em cursos oferecidos nos períodos da manhã, tarde e noite. Os alunos do EM integrado ao curso técnico podem usufruir de boa parte da infraestrutura da faculdade, como salas de aula equipadas com *smart* TVs,

internet *Wi-fi* e ventiladores. Além disso, há uma biblioteca, 7 laboratórios de informática com auxiliares técnicos para o suporte acadêmico, quadra poliesportiva, sala copiadora e cantina. Embora a faculdade possua laboratórios de física, química e biologia, as atividades laboratoriais não constam na grade curricular dos discentes do Ensino Médio dessa escola.

Nenhum obstáculo foi apresentado pela direção da escola para que houvesse o desenvolvimento e aplicação do produto educacional. Com relação à coordenação da escola, encontramos uma pré-disposição para auxiliar no que fosse necessário.

Os alunos do Ensino Médio integrado ao técnico dessa escola não cursam aulas de física no terceiro ano. Desse modo, tivemos apenas as opções de aplicarmos o produto educacional para as turmas do primeiro e/ou segundo ano. Com o objetivo de promover uma melhor assimilação do conteúdo por parte dos discentes, e em função da característica do produto educacional desse trabalho envolver conhecimentos de eletricidade, optamos por aplicar o produto para as duas turmas do segundo ano do Ensino Médio. A aplicação ocorreu dentro de um contexto no qual os alunos já haviam obtido contato com o conteúdo programático de eletricidade e magnetismo previsto na Base Nacional Comum Curricular (BRASIL, 2018, p. 555).

Somente para efeitos de estudo e simplificação, denominaremos neste trabalho de Turma A, a classe do segundo ano do Ensino Médio com Habilitação Profissional de Técnico em Desenvolvimento de Sistemas, e de Turma B a classe do segundo ano do Ensino Médio com Habilitação Profissional de Técnico em Logística. Além disso, participaram da aplicação do produto educacional 32 estudantes da Turma A e 20 estudantes da Turma B.

Salientamos que as análises e resultados aqui apresentados não possuem como finalidade inferir sobre a realidade do ensino de Física Quântica nas escolas de Ensino Médio brasileiras, até porque não possuímos amostra representativa para realizarmos tal estudo. Portanto, apresentamos nesse trabalho apenas uma discussão de aspecto qualitativo e quantitativo com relação ao limitado e reduzido conjunto de amostras coletadas.

Desse modo, as respostas fornecidas neste trabalho pelos discentes podem não refletir a realidade sobre os conhecimentos dos alunos das diversas escolas espalhadas pelo território brasileiro.

4.1 PROCEDIMENTOS DA APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

Com a finalidade de realizar posteriormente um estudo com o máximo de imparcialidade sobre o aproveitamento e evolução dos discentes das Turmas A e B, tivemos o cuidado de reproduzir para ambas as turmas os mesmos conteúdos e procedimentos educacionais durante a aplicação do produto educacional.

A aplicação do produto educacional ocorreu durante três encontros para cada Turma conforme pode ser verificado na Tabela 2. Durante esses encontros, distribuímos para os discentes os questionários de mapeamento, atividade 1 (Q1) e atividade 2 (Q2). O questionário de mapeamento tem como finalidade levantar o conhecimento prévio dos estudantes em relação aos conceitos introdutórios sobre a Física Quântica, Radiação de Corpo Negro, constante de Planck e a sua importância para o nascimento da Física Quântica. Além disso, utilizando a TAS de Ausubel foi possível fazer o levantamento de alguns subsunçores. Os questionários das atividades 1 e 2 têm como função avaliar a taxa de evolução da aprendizagem dos discentes durante as diferentes etapas do processo de aplicação do produto educacional. O questionário 2 possui apenas uma questão diferente e acrescida em relação ao questionário 1. Esta questão visa somente avaliar se houve preferência pelos alunos em realizar o procedimento experimental para determinar a constante de Planck utilizando o simulador, a plataforma Arduino, ou o conjunto constituído pelo simulador e plataforma Arduino. As respostas desses questionários podem ser observadas nas seções 4.2 e 4.3.

Tabela 2: Atividades executadas e tempo de aula utilizado para cada encontro realizado durante a aplicação do produto educacional.

Etapa	Atividade	Tempo de Aula
1° Encontro	Apresentação sobre o produto educacional e aplicação do Questionário de Mapeamento	1h/aula - 50 minutos
2° Encontro	Aula sobre a constante de Planck e o Nascimento da Mecânica Quântica e aplicação do Questionário da Atividade 1	1h/aula - 50 minutos
3° Encontro	Utilização do simulador e da plataforma Arduino e aplicação do Questionário da Atividade 2	2h/aula – 100 minutos

O primeiro encontro com os discentes teve a duração de uma aula de 50 minutos, e utilizamos apenas a sala de aula e a *smart TV* para a apresentação dos slides como recursos. Esta aula teve como finalidade a apresentação preliminar do produto educacional e a aplicação do questionário de mapeamento no início do encontro.

O segundo encontro teve a duração de duas aulas de 50 minutos e utilizamos como recursos a sala de aula e a *smart TV* para a apresentação dos slides. Nestas aulas, inicialmente distribuímos o questionário da atividade 1 a ser respondido no final da aula. Posteriormente, foi lecionada a aula sobre conceitos introdutórios de Física Quântica, o contexto histórico de seu surgimento e a importância da constante de Planck para o seu nascimento.

O terceiro encontro teve a duração de duas aulas de 50 minutos e utilizamos como recurso o laboratório de informática. Nestas aulas, inicialmente distribuímos o questionário 2 para os discentes e realizamos uma revisão sobre os conceitos abordados no segundo encontro. Em seguida, cada aluno utilizou um computador para realizar a atividade com o simulador computacional para determinar a constante de Planck.

Posteriormente, desenvolvemos uma atividade demonstrativa utilizando 1 (um) kit composto pelo circuito elétrico montado na plataforma Arduino. Um segundo kit com uma montagem idêntica foi distribuído aos discentes com a finalidade de observarem e obterem um maior contato com o Arduino. Após isso, foram convidados três alunos voluntários, tanto da Turma A, quanto da Turma B, para coletarem os dados experimentais através da manipulação do potenciômetro do circuito elétrico.

Com esta plataforma, automatizamos o processo de transferência dos dados experimentais para uma planilha eletrônica através do *software* PLX-DAQ e geramos um gráfico em tempo real com a finalidade de construirmos a curva característica do LED (gráfico da Corrente elétrica *vs.* Tensão elétrica). A partir disso, por meio da utilização do método da regressão linear, obtivemos a tensão de corte do LED e determinamos a constante de Planck (ver seção 3.3.5). Em relação a uma coleta manual dos dados, a integração da plataforma Arduino com a planilha eletrônica trouxe algumas possíveis vantagens, como por exemplo, a redução do tempo no processo de coleta dos dados experimentais, e a facilidade de observação e análise dos dados pelos discentes em função da construção do gráfico em tempo real. Tanto a atividade realizada com o simulador, quanto a executada com o Arduino, tiveram a duração de aproximadamente 30 minutos.

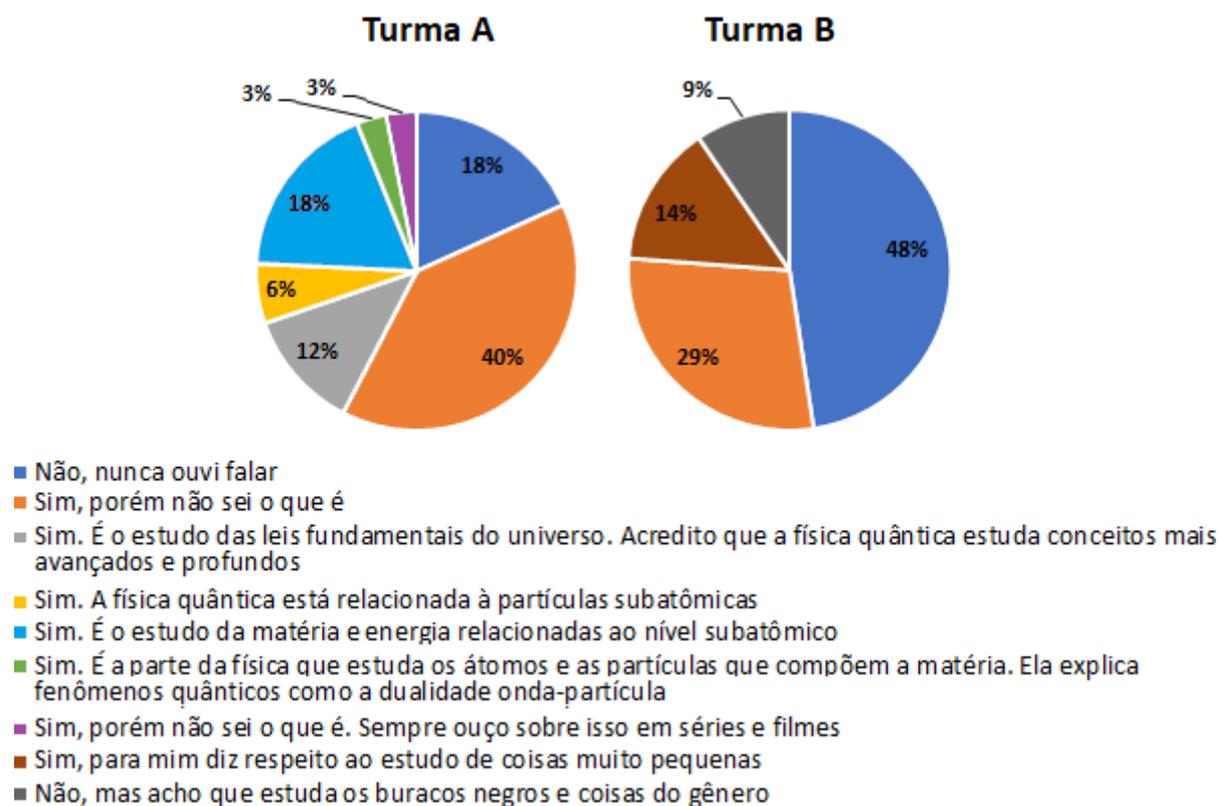
A seguir, são apresentados os resultados alcançados a partir das respostas obtidas com a aplicação dos questionários de mapeamento, atividade 1, e atividade 2 aos discentes das Turmas A e B.

4.2 RESPOSTAS DOS QUESTIONÁRIOS DE MAPEAMENTO DOS ALUNOS

Os gráficos das respostas ao questionário de mapeamento das Turmas A e B são apresentados na Figura 31. Por uma questão de melhor organização e fluxo de leitura, optamos por reproduzir a seguir cada uma das questões contidas no questionário. Salientamos que apesar da apresentação dos dados estarem na forma de gráficos e percentuais, não buscamos aqui fazer uma análise quantitativa e chegar a conclusões estatísticas, mas sim analisar o contexto das turmas que participaram do processo.

1) Você já ouviu falar sobre Física Quântica? Se sim, para você o que é a Física Quântica e o que ela permite explicar?

Figura 31: Gráfico gerado a partir das respostas à questão 1 do questionário de mapeamento pelos alunos das Turmas A e B.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Podemos observar pelos gráficos da Figura 31 que a maioria dos alunos da Turma A já tinha ouvido falar sobre Física Quântica, no entanto, uma parte significativa deles, 40%, não sabe do que se trata. Ainda com relação a esses alunos, 18% declararam que a FQ é o estudo da

matéria e energia relacionadas ao nível subatômico, e 12% responderam que é o estudo das leis fundamentais do universo, e que acreditam que a FQ estuda conceitos mais avançados e profundos. Com relação à Turma B, boa parte dos alunos, 48%, nunca ouviu falar sobre Física Quântica, enquanto 29% dos discentes afirmaram que sim, porém não sabem o que é, e 14% responderam que esta área da Física está relacionada a coisas muito pequenas. Esses dados apontam para o fato de que, em algum instante da vida, boa parte desses discentes estiveram em contato com situações e/ou assuntos relacionados à Física Quântica.

Ao compararmos as respostas fornecidas pelos alunos da Turma A, com as respostas dadas pelos alunos da Turma B, podemos notar que, de um modo geral, os discentes da Turma A apresentaram mais conhecimentos prévios sobre FQ em relação aos alunos da Turma B. Este pode ser considerado um resultado esperado, tendo-se em vista o perfil dos alunos da Turma A, que optaram por uma habilitação profissional com uma grade curricular mais científica e tecnológica em relação à habilitação profissional selecionada pelos alunos da Turma B.

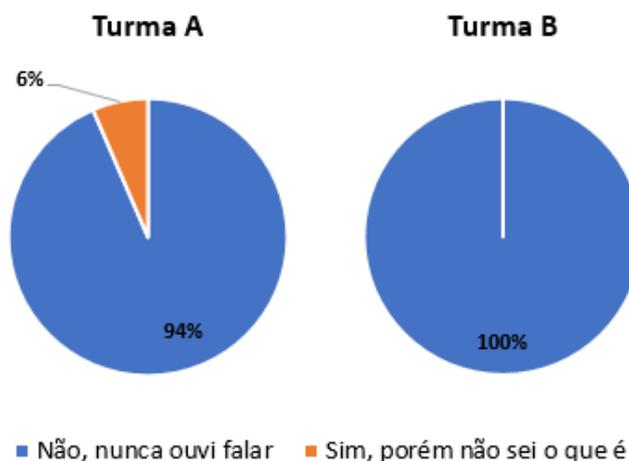
Através da observação das repostas dessa questão foi possível obter informações a respeito do conhecimento prévio de alguns estudantes relacionado à Física Quântica. Uma parte significativa dos alunos associaram a FQ a uma área da física que estuda “*coisas muito pequenas*”, e ao “*estudo da matéria e energia relacionada ao nível subatômico*”. Outros alunos relacionaram a FQ a “*uma área que estuda os buracos negros ou coisas do gênero*”. Essas informações coletadas e analisadas contribuíram para a elaboração de uma aula introdutória sobre FQ cujo conteúdo estivesse atrelado ao conhecimento prévio diagnosticado de alguns estudantes.

Desse modo, na aula introdutória sobre FQ, dentre algumas estratégias de ensino utilizadas, um vídeo⁵ com o tema relacionado à escala do universo foi apresentado aos alunos. Nesse vídeo de curta duração (aproximadamente 3 minutos) e com milhões de visualizações na plataforma *YouTube*, uma representação visual da escala do universo é retratada variando-se a escala na ordem de $10^{-35}m$, no qual é possível observar uma representação da dimensão da constante de Planck, à ordem de $10^{26}m$, no qual é possível ver uma representação do universo observável (BENNETT, 2020).

⁵ *The Scale of the Universe 2* (do inglês: A Escala do Universo 2). Disponível em: “<https://www.youtube.com/watch?v=uaGEjrADGPA&t=19s>”. Acesso em: 4 de fevereiro de 2023.

2) Você já ouviu falar sobre a constante de Planck? Caso sim, você saberia dizer o que é essa constante?

Figura 32: Gráfico gerado a partir das respostas da questão 2 do questionário de mapeamento pelos alunos das Turmas A e B.

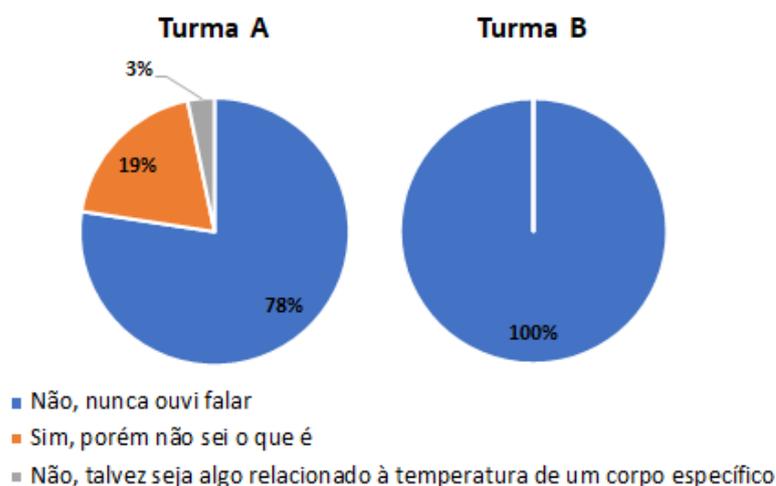


Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando os gráficos da Figura 32, podemos verificar que 94% dos alunos da Turma A e 100% dos alunos da Turma B nunca ouviram falar sobre a constante de Planck. Na Figura 33 notamos através da análise dos gráficos que apenas 19% dos alunos da Turma A ouviram falar sobre Radiação de Corpo Negro, contudo, nenhum aluno da Turma B ouviu falar nesse termo. Isso pode ser um indicativo de que as fontes que os fizeram ter contato com a Física Quântica provavelmente não os correlacionaram ou não forneceram a devida atenção aos conceitos estudados e introduzidos nessa área da ciência pelo físico alemão Max Planck.

3) Você já ouviu falar sobre radiação térmica de corpo negro? Tem noção do que seja?

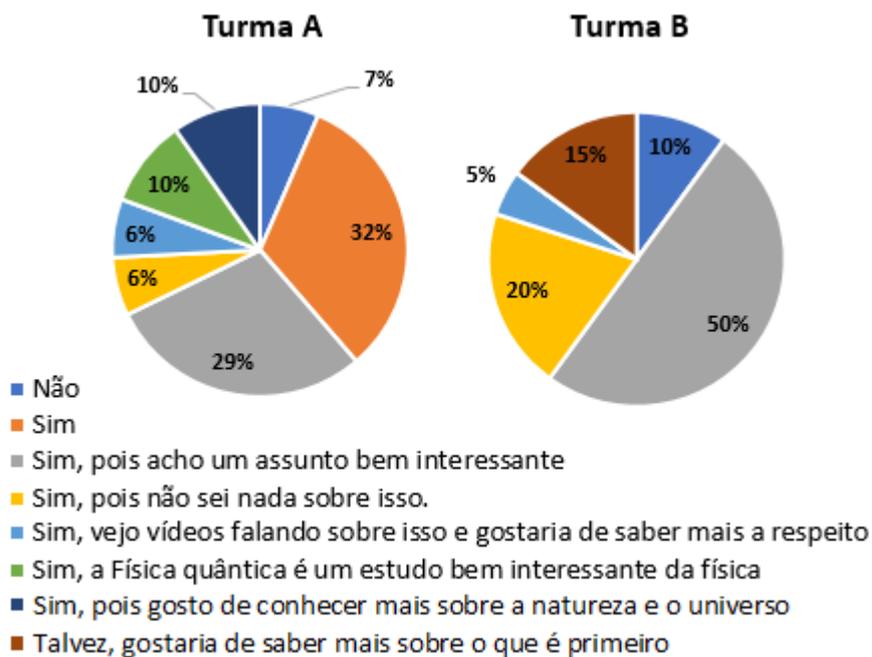
Figura 33: Gráfico gerado a partir das respostas da questão 3 do questionário de mapeamento pelos alunos das Turmas A e B.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4) Você gostaria de aprender mais sobre Física Quântica? Caso sim, por quê?

Figura 34: Gráfico gerado a partir das respostas da questão 4 do questionário de mapeamento pelos alunos das Turmas A e B.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação aos gráficos da Figura 34, pode-se verificar que a maioria dos discentes das Turmas A e B gostariam de aprender mais sobre conceitos envolvendo a Física Quântica. Apenas 10% dos alunos da Turma A e nenhum aluno da Turma B responderam não ter algum nível de interesse em aprender mais sobre FQ.

Todos esses dados podem ser informações relevantes para inferir sobre diversas questões, tal como a importância do desenvolvimento de um produto educacional relacionado a esse tema. Além disso, de um modo geral, os dados demonstram que os alunos possuem interesse em aprender sobre FQ e que carecem de conhecimentos introdutórios sobre esse tema. A aplicação desse produto pode ser uma ótima oportunidade de introduzir de modo formal essa temática no Ensino Médio e contribuir para reduzir a atual lacuna existente entre o excesso de conhecimento informal disponível sobre esse tema em variadas fontes - muitas vezes duvidosas e enviesadas - e a carência de conhecimento que pode ser adquirido formalmente (STADERMANN & GOEDHART, 2021).

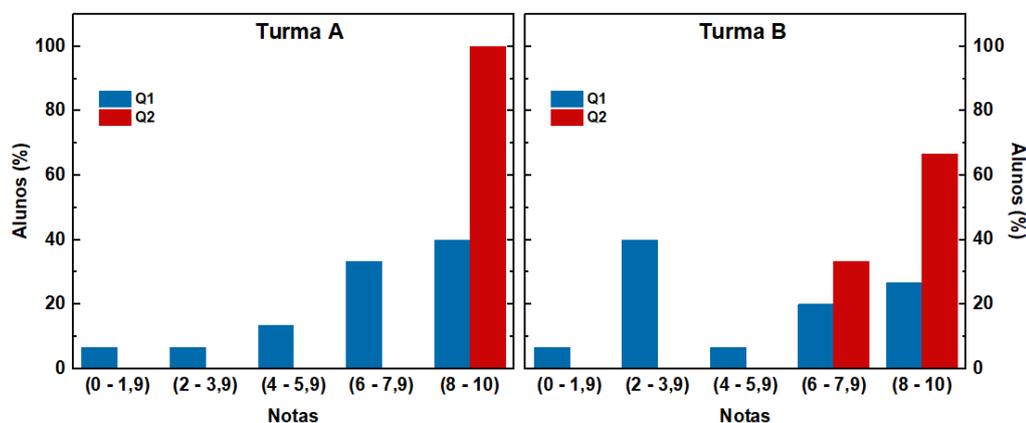
4.3 RESPOSTAS DOS QUESTIONÁRIOS DAS ATIVIDADES 1 E 2

A seguir, tem-se os gráficos gerados a partir da correção das respostas dadas aos questionários 1 e 2 aplicados para as Turmas A e B em dois encontros diferentes. As questões foram corrigidas com base no gabarito sugerido que se encontra no Apêndice. O questionário 1 foi aplicado no segundo encontro com os alunos, e possui questões idênticas ao questionário 2, diferindo-se apenas pelo acréscimo de uma questão. Desse modo, foi possível realizar uma comparação das notas obtidas pelos alunos no questionário 1, com as notas obtidas pelos alunos no questionário 2, possibilitando a verificação da ocorrência de algum grau de evolução ou involução da assimilação de conceitos introdutórios de Física Quântica por parte dos discentes durante o transcorrer da aplicação do produto educacional.

Conforme pode ser verificado nos gráficos das Figura 35 a Figura 39, para avaliarmos os questionários, adotamos como métrica um sistema de pontuação de notas de ordem crescente e compreendidas nos valores de 0 a 10, de modo que 0 (zero) foi utilizado como a menor nota possível, e 10 (dez) como a maior nota possível. Esse conjunto de valores foi subdividido em 5 classificações de notas, sendo elas: 0 a 1,9; 2 a 3,9; 4 a 5,9; 6 a 7,9; e 8 a 10. Dessa forma, um aluno que obteve a nota 7, por exemplo, está com a sua pontuação inserida nos valores classificados de 6 a 7,9.

a) O que é a constante de Planck?

Figura 35: Gráfico gerado a partir das respostas dos alunos das Turmas A e B à **questão a** dos questionários das atividades 1 e 2 (Q1 e Q2) pelos alunos das Turmas A e B.



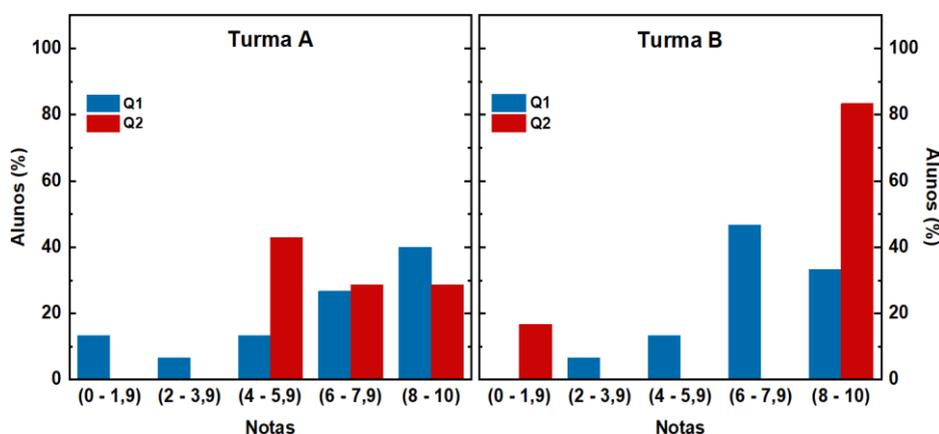
Fonte: Elaborado pelo autor.

Podemos observar pelo gráfico da Figura 35 que houve uma evolução notável tanto da Turma A, quanto da Turma B com relação às notas referentes às respostas fornecidas para a

questão a dos questionários das atividades 1 e 2 (Q1 e Q2). Na aplicação do primeiro questionário, 40% dos alunos da Turma A obtiveram notas entre 8 e 10, enquanto no segundo questionário 100% deles atingiram essa mesma nota. Já com relação à Turma B, 26,67% dos discentes obtiveram notas entre 8 e 10 no primeiro questionário, enquanto 66,67% deles atingiram essas mesmas notas no segundo questionário.

b) O que é um Corpo Negro? Por que o seu estudo foi importante para o nascimento da Física Quântica?

Figura 36: Gráfico gerado a partir das respostas à **questão b** dos questionários das atividades 1 e 2 (Q1 e Q2) pelos alunos das Turmas A e B.

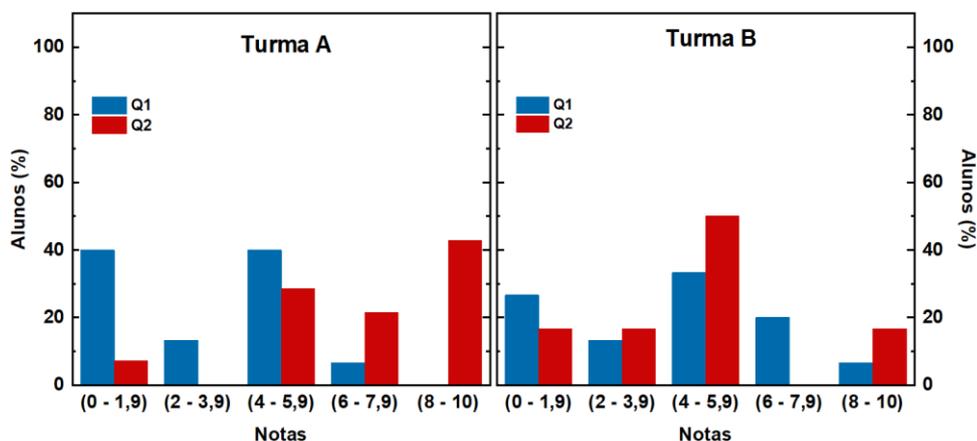


Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação à **questão b**, com a aplicação do Q2, é possível notar nos gráficos da Figura 36 uma evolução no valor das médias das notas da Turma A em relação à aplicação do Q1. Embora tenha ocorrido uma redução das notas entre 8 e 10 após a aplicação de Q2, pode-se verificar que nenhum aluno obteve nota entre 0 e 3,9 nesse questionário. Com relação à Turma B, podemos notar um aumento expressivo das notas entre 8 a 10 após a aplicação de Q2.

c) Qual a importância da constante de Planck para o nascimento da Física Quântica?

Figura 37: Gráfico gerado a partir das respostas dos alunos das Turmas A e B à **questão c** dos questionários das atividades 1 e 2 (Q1 e Q2) pelos alunos das Turmas A e B.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação à **questão c**, nos gráficos da Figura 37, após a aplicação de Q2 é possível verificar que os discentes de ambas as turmas obtiveram uma evolução das notas entre 8 a 10. Além disso, tanto para a aplicação de Q1, quanto para Q2, as notas de ambas as turmas ficaram concentradas nos valores entre 4 a 5,9. Como o foco do produto não foi o estudo da radiação de corpo negro, mas sim o da constante de Planck, isso pode talvez explicar sobre a redução de notas entre 8 a 10 em comparação com os gráficos relacionados às **questões a e b**.

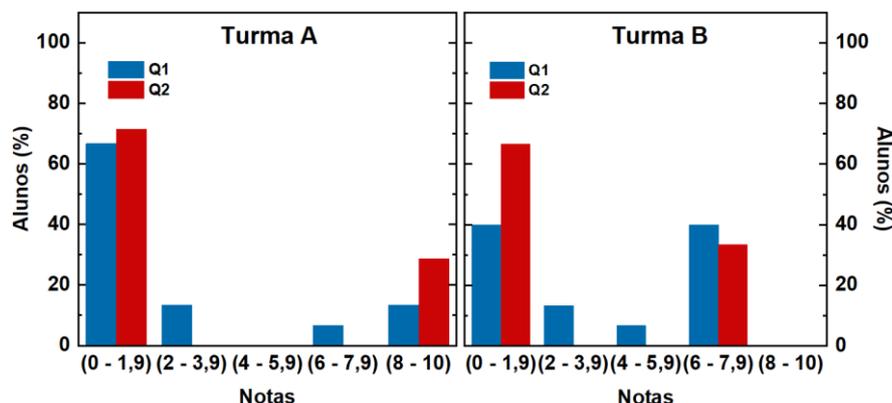
d) Sabe-se que o comprimento de onda do raio-X é menor que o comprimento de onda da micro-onda e a Energia de radiação ε de Planck é dada pela seguinte equação:

$$\varepsilon = hf = \frac{hc}{\lambda},$$

no qual h é a constante de Planck, cujo valor é $6,63 \times 10^{-34} J \cdot s$, f é a frequência da luz irradiada em s^{-1} , c é a velocidade da luz no vácuo ($\approx 3,0 \times 10^8 m \cdot s^{-1}$), e λ é o comprimento de onda da luz irradiada em m .

Desse modo, analisando-se a equação acima, o que se pode afirmar sobre a relação entre a energia de uma onda eletromagnética e o seu comprimento de onda? A energia do raio-X é maior ou menor que a energia de uma micro-onda?

Figura 38: Gráfico gerado a partir das respostas dos alunos das Turmas A e B à **questão d** dos questionários das atividades 1 e 2 (Q1 e Q2) pelos alunos das Turmas A e B.

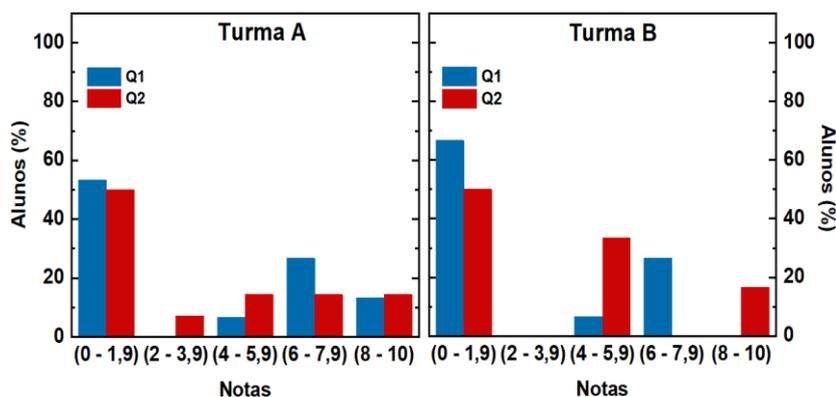


Fonte: Elaborado pelo autor.

Podemos observar na Figura 38 que, tanto os alunos da Turma A quanto os alunos da Turma B, não obtiveram uma evolução significativa nas notas referentes à **questão d**. Uma possível hipótese para explicar essa ocorrência é que, ao se depararem com a notação na base 10, é provável que tenha ocorrido um bloqueio mental por parte dos discentes. Embora nessa fase escolar seja esperado que já tenham realizado diversas operações com frações, eles não possuem a prática ou o conhecimento relacionado à potência de base 10. Por se tratar de uma questão de análise matemática, dependendo dessa forma do embasamento matemático dos discentes para ser respondida de modo satisfatório, o mau desempenho dos alunos nessa questão pode não afetar significativamente a compreensão deles a respeito dos conceitos introdutórios de FQ.

e) O que você entende por tensão de corte do LED? Por que ela é importante nesse experimento para se determinar a constante de Planck?

Figura 39: Gráfico gerado a partir das respostas dos alunos das Turmas A e B à **questão e** dos questionários das atividades 1 e 2 (Q1 e Q2) pelos alunos das Turmas A e B.



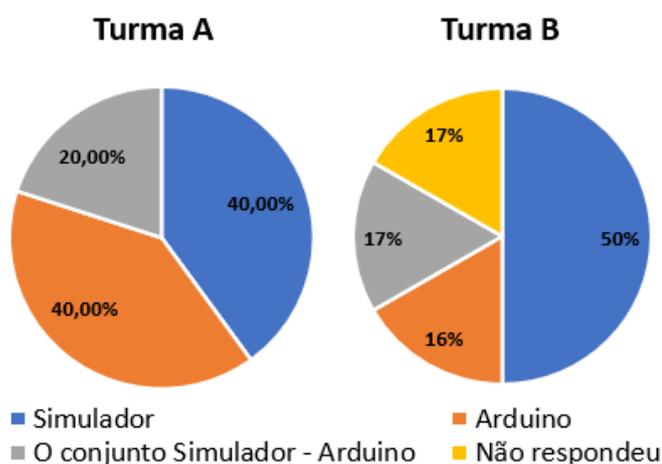
Fonte: Elaborado pelo autor.

Através da comparação entre Q1 e Q2 nos gráficos obtidos a partir das respostas à **questão e**, e contidos na Figura 39, podemos notar que não houve uma melhora expressiva das notas dos alunos das Turmas A e B. Uma possível hipótese para explicar o mau resultado dos estudantes nessa questão, é que eles não tiveram aula sobre semicondutores antes da aplicação do produto educacional, e em razão disso, pode ter faltado o subsunçor adequado para compreenderem esse conceito durante as aulas da aplicação do produto. Além disso, em função do curto tempo disponível para a aplicação do produto, não foi possível aprofundar o ensino desse tema.

Embora o conhecimento sobre a tensão de corte do LED seja relevante para entender o conceito da fenomenologia física dos experimentos apresentados neste produto educacional, através da verificação da evolução dos discentes apresentados pela comparação das repostas obtidas nas **questões a e b** dos questionários 1 e 2, nota-se que o conhecimento insatisfatório dos alunos sobre o que é tensão de corte do LED não afetou de modo significativo a compreensão deles a respeito de conceitos introdutórios sobre Física Quântica.

f) Entre a atividade realizada com o simulador e a atividade realizada com a plataforma Arduino, qual situação o fez aprender mais? O simulador? A plataforma Arduino? Ou o conjunto simulador-plataforma Arduino?

Figura 40: Gráfico gerado a partir das respostas dos alunos das Turmas A e B à **questão f** do questionário da atividade 2 pelos alunos das Turmas A e B.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 40 tem-se os gráficos das respostas dos alunos das Turmas A e B referente à **questão f**. De um modo geral, não houve concordância predominante dos alunos de ambas as turmas sobre qual atividade foi mais relevante para a aprendizagem sobre a constante de Planck. Podemos notar que na Turma A, a preferência tanto pelo simulador, quanto pelo Arduino, foi

de 40%. Com relação à Turma B, 50% dos discentes tiveram a preferência por utilizarem o simulador, enquanto apenas 16% preferiram a plataforma Arduino.

Uma possível hipótese para explicar a ocorrência de um maior valor pela preferência da utilização da plataforma Arduino pela Turma A, é que em função da característica da habilitação técnica que esses discentes selecionaram para cursar durante o Ensino Médio, eles podem ter um maior interesse por tecnologias que envolvam conhecimentos de programação e eletrônica, como por exemplo, a plataforma Arduino. De um modo geral, a geração nascida a partir dos anos 2000, ou seja, os alunos das Turmas A e B que participaram da aplicação do produto educacional, “cresceu em frente à tela dos computadores, *smartphones* e *tablets*”, de modo que é de certa forma natural que esses discentes apreciem situações nas quais esses dispositivos tecnológicos sejam utilizados (MOURA, 2009). Isso pode justificar, por exemplo, certa facilidade na manipulação do computador apresentada pelos alunos de ambas as Turmas.

Observando-se as respostas do questionário de mapeamento e comparando-o com as respostas dos questionários 1 e 2, podemos inferir que os alunos obtiveram uma evolução com relação a conhecimentos introdutórios sobre Física Quântica. É bom salientar que dentre as duas turmas, nas respostas observadas dos questionários 1 e 2, nenhum aluno correlacionou a Física Quântica, constante de Planck, e Radiação de Corpo Negro com algum termo pseudocientífico. Infelizmente, em função do escasso tempo para se aplicar o produto educacional, não foi possível fazer um fechamento com os estudantes referente a todo assunto abordado com a finalidade de se esclarecer eventuais dúvidas e corrigir as respostas das aplicações dos questionários das atividades.

Todos esses dados apresentados podem demonstrar de certo modo que a aplicação do produto educacional contribuiu em determinado grau para que os discentes assimilassem conceitos introdutórios de Física Quântica de maneira formal, colaborando para que o letramento científico ocorra e, portanto, reduzindo situações nas quais termos e ideias científicas sejam utilizados de modo enviesado.

A utilização da plataforma Arduino integrada à planilha eletrônica trouxe uma vantagem relevante na velocidade de aquisição, visualização gráfica, e análise dos dados experimentais obtidos, contribuindo para a redução do tempo experimental em relação à coleta manual de dados. Desse modo, durante a aplicação do produto educacional, apenas duas aulas de 50 minutos foram mais que suficientes para trabalhar com os discentes a determinação da constante de Planck por meio dos procedimentos de simulação computacional e utilização da plataforma Arduino. Ademais, antes da execução desses últimos procedimentos, nestas aulas houve tempo

suficiente para realizar uma breve revisão com os discentes sobre conceitos introdutórios envolvendo Física Quântica, Radiação de Corpo Negro e constante de Planck.

Trazer para a sala de aula uma plataforma que envolve conhecimentos de eletrônica e programação permitiu que os alunos entrassem em contato com a experimentação no ensino de física de modo a despertar o interesse de alguns estudantes, motivando-os a fazerem questionamentos e estimulando-os a terem uma predisposição para aprender. Após o término da aula, alguns estudantes solicitaram o roteiro experimental com o interesse de reproduzirem o experimento fora da sala de aula e se aprofundarem na aquisição de conhecimentos relacionados à plataforma Arduino.

A utilização do Arduino possibilitou discutir com os estudantes as diferenças entre a realização de uma simulação virtual e a experimentação real, de modo a trazer questões importantes que acontecem somente quando há a realização de um experimento real e que contribuem para que haja a ocorrência de erros experimentais, como por exemplo a dissipação de energia térmica nos componentes eletrônicos, a sensibilidade instrumental, o erro associado ao operador do instrumento etc. Além disso, ao se construir os gráficos a partir dos dados coletados da tensão e corrente elétricas do simulador (Figura A.12 do Apêndice), não se obtém a curva característica do LED tal como pode ser observado na Figura 23.

Esses fatores apresentados podem ser cruciais para que o professor selecione o produto educacional apresentado neste trabalho, tendo-se em vista o atual cenário do ensino de física no Ensino Médio brasileiro, no qual se predomina de modo geral a baixa carga horária destinada a essa disciplina.

Para finalizar, um dos principais objetivos desse trabalho é o de contribuir para que os alunos desenvolvam visões com embasamento científico sobre a natureza da ciência. Este pode ser considerado um dos primordiais objetivos ao se ensinar física no Ensino Médio, uma vez que colabora para o letramento científico. É bastante plausível que boa parte desses alunos não necessitem de adquirir um conhecimento mais aprofundado sobre conteúdos de física durante o transcorrer do desenvolvimento de suas trajetórias profissionais. No entanto, todos eles estão constantemente expostos cotidianamente a discussões ou situações nas quais há a predominância de dados científicos provenientes da mídia. Não saber julgar informações relacionadas à ciência pode ser nocivo para o cidadão e para a sociedade, contribuindo desse modo para a disseminação de informações falsas e infundadas (STADERMANN & GOEDHART, 2021).

Capítulo 5

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de todas as medições modernas da constante de Planck em mãos, qual é a situação agora? Ainda não é possível afirmar definitivamente uma “conclusão”, onde há um valor aceito para h (STEINER, 2012). Isso demonstra que esse é um tema bastante atual que continua incomodando a comunidade científica. A busca por melhores procedimentos e técnicas para se obter resultados mais exatos e precisos para essa constante pode ser um ótimo exemplo para mostrar aos discentes que a ciência não é algo estático, mas sim em constante mudança.

Através da aplicação do questionário de mapeamento do Produto Educacional aos estudantes, utilizando a TAS de Ausubel foi possível fazer o levantamento de alguns conhecimentos prévios que contribuíram para a elaboração de uma aula introdutória sobre Física Quântica. Além disso, identificamos que grande parte dos discentes das Turmas A e B nunca tinha ouvido falar sobre a constante de Planck. Ao se comparar esse questionário com as respostas dos questionários das atividades 1 e 2, notamos uma nítida evolução no conhecimento adquirido pelos alunos relacionados ao tema abordado no Produto Educacional.

Além de introduzir conceitos fundamentais sobre a Mecânica Quântica através de uma discussão sobre a constante de Planck e o contexto histórico do seu surgimento, uma das finalidades desse trabalho foi o de colocar os discentes em uma posição mais próxima com as questões que atualmente preocupam os cientistas. A determinação dessa constante, embora tenha sido realizada inicialmente por Max Planck no final do século XIX, decorridos mais de um século, o aprimoramento desse valor ainda continua sendo alvo da comunidade científica. Um exemplo moderno da importância dessa constante é a sua recente adoção pelo Sistema Internacional de Unidades como base para a definição do quilograma-padrão.

Nos últimos anos, com os avanços da computação quântica e diversas outras tecnologias envolvendo a Física Quântica, este tem-se tornado um tema de discussão cada vez mais progressivo e presente na sociedade atual. Dessa forma, dado o contexto científico e tecnológico no qual a sociedade está inserida, tratar desse tema utilizando as TIC pode ser uma ótima forma educacional de fazer articulações entre a ciência, tecnologia e sociedade.

Mostrar aos alunos que esta é uma constante fundamental da física, e que esta grandeza está somente relacionada às propriedades da matéria, pode ser uma maneira bastante interessante de mostrar que a Física Quântica não possui nenhuma correlação com termos e jargões pseudocientíficos. Isso possibilita atuar no processo contínuo de combate a qualquer tipo de relação que esta área da ciência possa ter com o misticismo quântico.

O trabalho também permitiu que os estudantes entrassem em contato com a experimentação no ensino de física por meio de uma plataforma que engloba conhecimentos de eletrônica e programação. Esses conhecimentos estão intrinsecamente ligados às diversas tecnologias que a sociedade, principalmente a sua parcela mais jovem, utiliza cotidianamente. Isso despertou o interesse de alguns estudantes, motivando-os a fazerem questionamentos e engajando-os a terem uma predisposição para aprender.

Desse modo, espera-se que o Produto Educacional desenvolvido neste trabalho possa contribuir para o processo de ensino-aprendizagem na área de ensino de física, colaborando para o desenvolvimento da alfabetização científica dos cidadãos, de modo a promover a capacitação para que eles possam participar assertivamente de discussões na sociedade envolvendo questões científicas e tecnológicas relacionadas à Física Quântica.

REFERÊNCIAS

ADETYA, Falen Bayu; HIDAYAT, Samsul; AL FANSYURI, Buyung. nRF24L01 Distance and Error Link when Operated on Orange Plant Garden. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2021. p. 012036.

AMERICAN ASSOCIATION OF PHYSICS TEACHERS. Goals of the introductory physics laboratory. **American Journal of Physics**, v. 66, n. 6, p. 483-485, 1998.

ANDALORO, G.; DONZELLI, V.; SPERANDEO-MINEO, R. M. Modelling in physics teaching: the role of computer simulation. **International Journal of Science Education**, v. 13, n. 3, p. 243-254, 1991.

ANDERSON, Philip W. More is different: broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science. **Science**, v. 177, n. 4047, p. 393-396, 1972.

AUSUBEL, David Paul. **The acquisition and retention of knowledge: A cognitive view**. Springer Science & Business Media, 2012.

BENNETT, Jeffrey O. et al. **The Cosmic Perspective: The Solar System**. Pearson, 2020.

BLIGH, P. H.; JOHNSON, J. J.; WARD, J. M. Automating the Hall effect. **Physics Education**, v. 20, n. 5, p. 246, 1985.

BRASIL. (2018). Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular.

CARRON, Wilson., & GUIMARÃES, Osvaldo. **As Faces da Física**. Editora Moderna, 2006.

CAVALCANTE, Marisa Almeida; HAAG, Rafael. Corpo negro e determinação experimental da constante de Planck. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, p. 343-348, 2005.

CHIOU, G.- CHIOU, Guo-Li; LEE, Min-Hsien; TSAI, Chin-Chung. High school students' approaches to learning physics with relationship to epistemic views on physics and conceptions of learning physics. **Research in Science & Technological Education**, v. 31, n. 1, p. 1-15, 2013.

DA SILVA, André Coelho; DE ALMEIDA, Maria José Monteiro Pereira. Física quântica no ensino médio: o que dizem as pesquisas. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 28, n. 3, p. 624-652, 2011.

DA SILVA SANTANA, Victor Mancir. Determinação experimental da constante de Planck pela observação da corrente de descarga de um capacitor. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 32, n. 3, p. 824-836, 2015.

DAMACENO, Luiz Paulo et al. A nova definição do quilograma em termos da constante de Planck. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, 2019.

DE JONG, Ton; VAN JOOLINGEN, Wouter R. Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. **Review of educational research**, v. 68, n. 2, p. 179-201, 1998.

DISTLER, Rafaela Regina. Contribuições de David Ausubel para a intervenção psicopedagógica. **Revista Psicopedagogia**, v. 32, n. 98, p. 191-199, 2015.

DOS SANTOS, E. S., DOS SANTOS, Erick Santana; DOS SANTOS MENEZES JR, Roberto; EINSTEIN, Albert. On a heuristic point of view about the creation and conversion of light. **Annalen der Physik**, v. 17, n. 6, p. 132-148, 1905.

EISBERG, Resnick; RESNICK, R. Física Quântica. Tradução de Ribeiro PC, Silveira EF & Barroso, MF. **Rio de Janeiro. Editora Campus**, 1994.

ETKINA, Eugenia et al. Role of experiments in physics instruction—a process approach. **The Physics Teacher**, v. 40, n. 6, p. 351-355, 2002.

FERREIRA, Marcello et al. Unidade de Ensino Potencialmente Significativa sobre óptica geométrica apoiada por vídeos, aplicativos e jogos para smartphones. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, 2020.

FRANCO, Hugo. Evolução dos conceitos da Física. São Paulo: IFUSP, 2º edição, 2002.

GALADIMA, Ahmad Adamu. Arduino as a learning tool. In: **2014 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO)**. IEEE, 2014. p. 1-4.

GARVER, Wayne P. The photoelectric effect using LEDs as light sources. **The physics teacher**, v. 44, n. 5, p. 272-275, 2006. GOLD, M. (1961). *Judeus sem dinheiro*. Editorial Pluma.

GONZÁLEZ, Manuel I. Lens ray diagrams with a spreadsheet. **Physics Education**, v. 53, n. 3, p. 035016, 2018.

GOWIN, D. Bob. **Educating**. Cornell University Press, 1981.

GRECA, Ileana Maria; MOREIRA, Marco Antonio. Uma revisão da literatura sobre estudos relativos ao ensino da mecânica quântica introdutória. **Investigações em ensino de ciências. Porto Alegre. Vol. 6, n. 1 (jan./abr. 2001), p. 29-56, 2001.**

HELOU, Ricardo Doca; BISCUOLA, Gualter José; BÔAS, Newton Villas. (2012). **Tópicos de Física, Vol. 3.** São Paulo: Saraiva.

HILGER, Thaís Rafaela; STIPCICH, María Silvia; MOREIRA, Marco Antonio. Representações sociais sobre Física Quântica entre estudantes de graduação brasileiros e argentinos. **Latin-American Journal of Physics Education**, v. 11, n. 1, p. 3, 2017.

HOFFMANN, Dieter. On the Experimental Context of Planck's Foundation of Quantum Theory1. **Centaurus**, v. 43, n. 3-4, p. 240-259, 2001.

INDELICATO, Valeria et al. Analysis of LED data for the measurement of Planck's constant in the undergraduate laboratory. **European Journal of Physics**, v. 34, n. 4, p. 819, 2013.

JIMOYIANNIS, Athanassios; KOMIS, Vassilis. Computer simulations in physics teaching and learning: a case study on students' understanding of trajectory motion. **Computers & education**, v. 36, n. 2, p. 183-204, 2001.

JOHANSSON, Anders et al. “Shut up and calculate”: The available discursive positions in quantum physics courses. **Cultural Studies of Science Education**, v. 13, p. 205-226, 2018.

JOHANSSON, K. E.; MILSTEAD, David. Uncertainty in the classroom—teaching quantum physics. **Physics Education**, v. 43, n. 2, p. 173, 2008.

JOHNSON, Claes. Mathematical physics of blackbody radiation. **Icarus iDucation**, p. 19, 2012.

KIBBLE, B. P. A measurement of the gyromagnetic ratio of the proton by the strong field method. **Atomic masses and fundamental constants 5**, p. 545-551, 1976.

KINCHIN, John. Using an Arduino in physics teaching for beginners. **Physics Education**, v. 53, n. 6, p. 063007, 2018.

KING, Ross D. et al. The automation of science. **Science**, v. 324, n. 5923, p. 85-89, 2009.

KRAGH, Helge. Max Planck: the reluctant revolutionary. **Physics World**, v. 13, n. 12, p. 31, 2000.

KUBÍNOVÁ, Štěpánka; ŠLÉGR, Jan. Physics demonstrations with the Arduino board. **Physics Education**, v. 50, n. 4, p. 472, 2015.

LIMA, Nathan Willig; OSTERMANN, Fernanda; CAVALCANTI, Claudio Jose de Holanda. Física Quântica no ensino médio: uma análise bakhtiniana de enunciados em livros didáticos de Física aprovados no PNLDEM 2015. **Caderno brasileiro de ensino de física. Florianópolis. Vol. 34, n. 2 (ago. 2017), p. 435-459, 2017.**

MARTINS, JEM Perea. Automation experiments in physics laboratories. **Physics Education**, v. 53, n. 5, p. 055009, 2018.

MEGID NETO, Jorge; PACHECO, Décio. Pesquisas sobre o ensino de Física no nível médio no Brasil: concepção e tratamento de problemas em teses e dissertações. **Pesquisas em ensino de física. São Paulo: Escrituras**, v. 2, p. 15-30, 2001.

MICHA, Daniel Neves et al. "Vendo o invisível": experimentos de visualização do infravermelho feitos com materiais simples e de baixo custo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, 2011.

MONTEIRO, Maria Amélia; NARDI, Roberto; BASTOS FILHO, Jenner Barretto. A sistemática incompreensão da teoria quântica e as dificuldades dos professores na introdução da física moderna e contemporânea no ensino médio. **Ciência & Educação**, v. 15, n. 03, p. 557-580, 2009.

MOREIRA, Marco Antonio. Teorias de aprendizagem: cognitivismo, humanismo, comportamentalismo. **São Paulo: Ed. EPU**, 1999.

MASINI, Elcie Aparecida Fortes Salzano; MOREIRA, Marco Antonio. Organizadores prévios e aprendizagem significativa. **Porto Alegre, RS: Instituto de Física de UFRGS**, 2011.

MOREIRA, Marco Antonio. UNIDADES DE ENSEÑANZA POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVAS-UEPS (Potentially Meaningful Teaching Units–PMTU). 2011.

MOREIRA, Marco Antonio. ¿ Al afinal, qué es aprendizaje significativo?. **Curriculum: revista de teoría, investigación y práctica educativa. La Laguna, Espanha. No. 25 (marzo 2012), p. 29-56, 2012.**

MOREIRA, Marco Antonio. Aprendizagem significativa em mapas conceituais. **I. d. UFRGS, Ed. Porto Alegre**, 2013.

MOREIRA, Marco Antonio. Uma análise crítica do ensino de Física. **Estudos avançados**, v. 32, p. 73-80, 2018.

MOREIRA, Marco Antonio; MASINI, Elcie Aparecida Fortes Salzano. Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel. 2009.

MOREIRA, Marco Antonio; CABALLERO, M. C.; RODRÍGUEZ, M. L. Aprendizaje significativo: un concepto subyacente. **Actas del encuentro internacional sobre el aprendizaje significativo**, v. 19, n. 44, p. 1-16, 1997.

MOURA, Adelina. Geração móvel: um ambiente de aprendizagem suportado por tecnologias móveis para a “Geração Polegar”. 2009.

NICHOLS, Daniel. Arduino-based data acquisition into Excel, LabVIEW, and MATLAB. **The Physics Teacher**, v. 55, n. 4, p. 226-227, 2017.

NIEVES, L. et al. Measuring the Planck constant with LED's. **The Physics Teacher**, v. 35, n. 2, p. 108-109, 1997.

NOVAK, Joseph D. Clarify with concept maps revisited. In: **Encuentro Internacional sobre el aprendizaje significativo: actas. Burgos (España), 15-19 de septiembre 1997**. Servicio de Publicaciones, 1997. p. 45-64.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica: Eletromagnetismo (vol. 3)**. Editora Blucher, 2015.

O'CONNOR, Patrick J.; O'CONNOR, Leah R. Measuring Planck's constant using a light emitting diode. **The Physics Teacher**, v. 12, n. 7, p. 423-425, 1974.

OLIVEIRA, Ivanor N. de et al. Estudo das propriedades do Diodo Emissor de Luz (LED) para a determinação da constante de Planck numa maquete automatizada com o auxílio da plataforma Arduino. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, 2019.

OLSEN, Rolf V. Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: a study in Norway. **International Journal of Science Education**, v. 24, n. 6, p. 565-574, 2002.

OSBORNE, Jonathan; DILLON, Justin. **Good practice in science teaching: What research has to say: What research has to say**. McGraw-Hill Education (UK), 2010.

OSTERMANN, Fernanda; MOREIRA, Marco Antonio. Atualização do currículo de física na escola de nível médio: um estudo dessa problemática na perspectiva de uma experiência em sala de aula e da formação inicial de professores. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 18, n. 2, p. 135-151, 2001.

PERKINS, Katherine et al. PhET: Interactive simulations for teaching and learning physics. **The physics teacher**, v. 44, n. 1, p. 18-23, 2006.

PESSOA JR, Osvaldo. O fenômeno cultural do misticismo quântico. **Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais**, p. 281, 2011.

PILI, Unofre; VIOLANDA, Renante. Smartphone-based measurement of the Planck's constant with light-emitting diodes. **Physics Education**, v. 54, n. 2, p. 023007, 2019.

PINTO, Alexandre Custódio; ZANETIC, João. É possível levar a física quântica para o ensino médio?. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 16, n. 1, p. 7-34, 1999.

PIRES, Antônio ST. **Evolução das Idéais da Física**. Editora Livraria da Física, 2011.

PLANCK, Max. On the law of the energy distribution in the normal spectrum. **Ann. Phys**, v. 4, n. 553, p. 1-11, 1901.

POLKINGHORNE, John. **Quantum theory: A very short introduction**. OUP Oxford, 2002.

RAYCHAUDHURI, Barun. On the determination of the emission wavelength of an infrared LED with common laboratory instruments. **European journal of physics**, v. 32, n. 4, p. 935, 2011.

RINALDI, R. Gustav; FAUZI, Ahmad. A complete damped harmonic oscillator using an Arduino and an Excel spreadsheet. **Physics Education**, v. 55, n. 1, p. 015024, 2019.

ROBINSON, Ian A.; SCHLAMMINGER, Stephan. The watt or Kibble balance: a technique for implementing the new SI definition of the unit of mass. **Metrologia**, v. 53, n. 5, p. A46, 2016.

RODRIGUES, M.; MARQUES, M. B.; CARVALHO, P. Simeão. How to build a low cost spectrometer with Tracker for teaching light spectra. **Physics Education**, v. 51, n. 1, p. 014002, 2015.

SPINRAD, R. J. Automation in the Laboratory: On-line computers are providing new freedom in the design and conduct of experiments. **Science**, v. 158, n. 3797, p. 55-60, 1967.

STADERMANN, Kirsten; GOEDHART, Martin. 'Why don't you just tell us what light really is?' Easy-to-implement teaching materials that link quantum physics to nature of science. **Physics Education**, v. 57, n. 2, p. 025014, 2021.

STEINER, Richard. History and progress on accurate measurements of the Planck constant. **Reports on Progress in Physics**, v. 76, n. 1, p. 016101, 2012.

TELICHEVESKY, Lucas. Uma perspectiva sociocultural para a introdução de conceitos de física quântica no ensino médio: análise das interações discursivas em uma unidade didática centrada no uso do interferômetro virtual de Mach-Zehnder. 2015.

TERRAZZAN, Eduardo Adolfo. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de 2º grau. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 9, n. 3, p. 209-214, 1992.

VARGAS, Santiago et al. Team-based learning for scientific computing and automated experimentation: visualization of colored reactions. **Journal of Chemical Education**, v. 97, n. 3, p. 689-694, 2020.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de física, volume 4: Óptica e física moderna. **Tradução e revisão Ronaldo Sergio de Biasi, Rio de Janeiro: LTC**, 2009.

WEBB, Mary E. Affordances of ICT in science learning: implications for an integrated pedagogy. **International journal of science education**, v. 27, n. 6, p. 705-735, 2005.

WIEMAN, Carl E. Interactive Simulations for Teaching Physics; What Works, What Doesn't, and Why. In: **American Astronomical Society Meeting Abstracts**. 2006. p. 249.01.

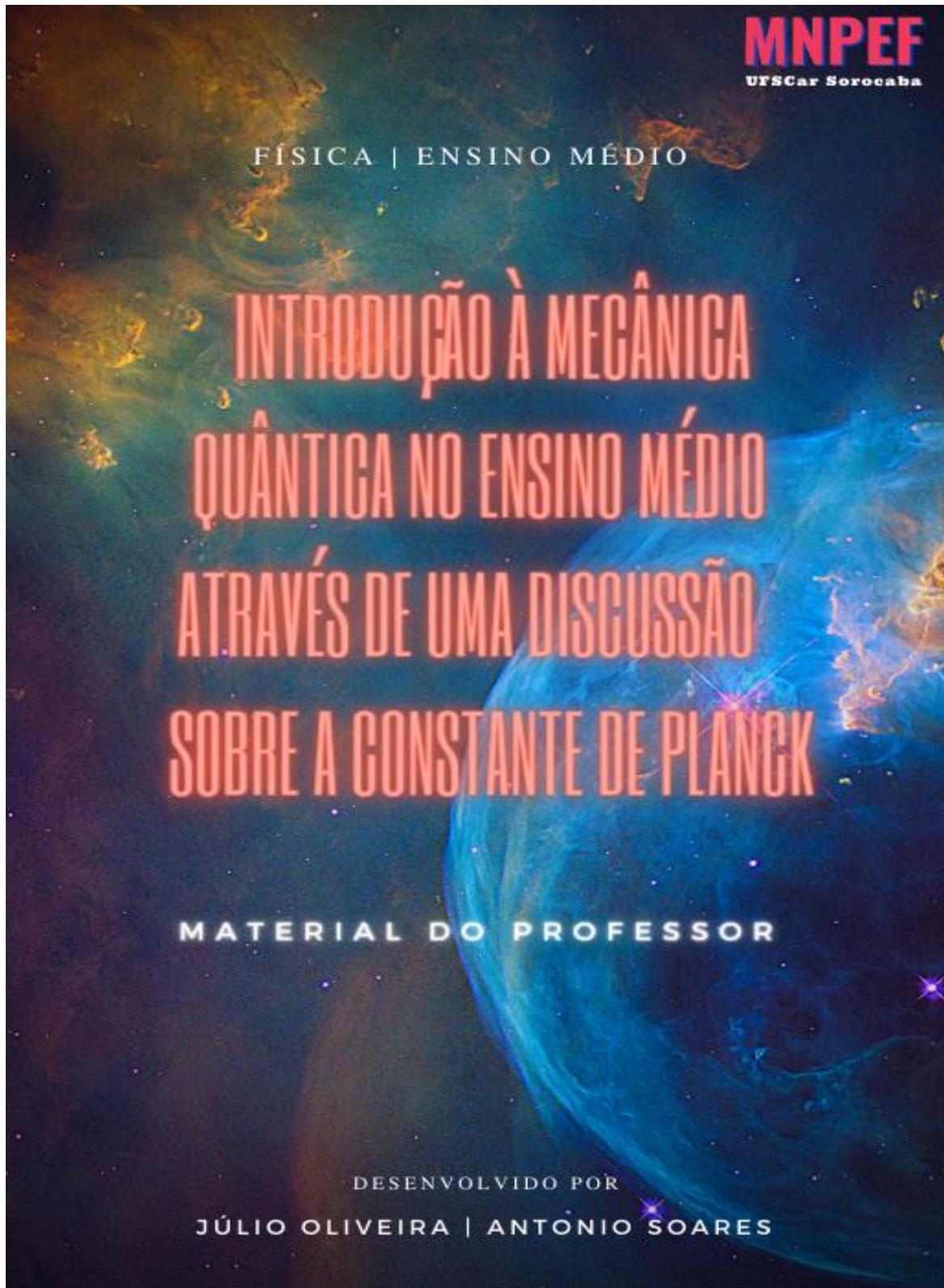
WOOD, Barry; BETTIN, Horst. The Planck constant for the definition and realization of the kilogram. **Annalen der Physik**, v. 531, n. 5, p. 1800308, 2019.

YANG, Pao-Keng. How does Planck's constant influence the macroscopic world?. **European Journal of Physics**, v. 37, n. 5, p. 055406, 2016. YOUNG, H. D. (2004). *Sears e Zemansky física IV: ótica e física moderna*. Pearson.

ZANETIC, João; MOZENA, Erika Regina. Textos de Evolução Apresentação (Primeira Parte): da versão revisada em 2019-2020. 2019.

ZOLLMAN, Dean; BEARDEN, Ian. Determining Planck's constant with LEDs—what could possibly go wrong?. **Physics Education**, v. 55, n. 1, p. 015011, 2019.

APÊNDICE: PRODUTO EDUCACIONAL



PREFÁCIO

O produto educacional⁶ desenvolvido neste trabalho é uma sequência didática direcionada para o professor introduzir Mecânica Quântica no Ensino Médio através de uma discussão sobre a constante de Planck. Para tanto, ela é composta pela introdução teórica, questionário de mapeamento, introdução teórica, e roteiros experimentais com questionários adaptados para os professores e alunos.

O questionário de mapeamento tem a finalidade de coletar informações com o intuito de se construir um diagnóstico prévio dos alunos antes do início da aplicação do produto. A partir disso, durante e após o processo de aplicação do produto educacional, será possível avaliar a evolução do conhecimento desses estudantes.

A introdução teórica (Aula 1) tem como objetivo trazer à tona uma breve contextualização histórica sobre a origem da constante de Planck e o nascimento da Mecânica Quântica, de modo a tratar sobre o problema da radiação de corpo negro e discutir o trabalho que levou Planck a introduzir a constante que leva o seu nome.

A primeira atividade (Aula 2) é constituída por um simulador computacional que permite determinar a constante de Planck através da montagem de um circuito eletrônico simples, e a segunda atividade (Aula 3) se baseia na utilização de um circuito eletrônico montado em conjunto com a plataforma Arduino. Ambas as atividades têm a finalidade de coletar informações da tensão de corte do LED com o objetivo de se determinar a constante de Planck. Ao término de cada atividade, há um questionário a ser respondido pelos alunos. No material desenvolvido para o professor, os questionários das atividades possuem uma sugestão de gabarito.

Procuramos desenvolver um produto educacional de linguagem acessível para o professor do Ensino Médio. Esperamos que esse produto seja útil para motivar tanto os estudantes quanto os professores para verem a importância da constante de Planck no surgimento da Mecânica Quântica.

Os autores.

⁶ Para informações adicionais ou dúvidas, envie um e-mail para julio.oliveira@estudante.ufscar.br.

SUMÁRIO

MATERIAL DO PROFESSOR.....	79
A.1 QUESTIONÁRIO DE MAPEAMENTO	79
A.2 AULA 1: INTRODUÇÃO TEÓRICA SOBRE O SURGIMENTO DA CONSTANTE DE PLANCK E O NASCIMENTO DA MECÂNICA QUÂNTICA	80
A.2.1 A relação entre a radiação eletromagnética emitida por um LED e a constante de Planck	86
A.3 AULA 2: ATIVIDADE 1 - DETERMINANDO A CONSTANTE DE PLANCK COM UM SIMULADOR VIRTUAL	90
A.3.1 Questionário da Aula 2 – Atividade 1 (com sugestão de gabarito)	96
A.4 AULA 3: ATIVIDADE 2 - DETERMINANDO A CONSTANTE DE PLANCK COM LEDS USANDO A PLATAFORMA ARDUINO PARA COLETAR DADOS	98
A.4.1 A seleção adequada de LEDs	100
A.4.2 Questionário da Aula 3 – Atividade 2 (sugestão de gabarito)	108
A.4.3 Implantação do Algoritmo no Arduino e como utilizar o <i>software</i> PLX-DAQ para a transferência automática de dados para o <i>Microsoft Excel</i>	110
MATERIAL DO ESTUDANTE	113
A.5 ROTEIRO DA AULA 2: ATIVIDADE 1 - DETERMINANDO A CONSTANTE DE PLANCK COM UM SIMULADOR VIRTUAL	113
A.5.1 Questionário da Aula 2 – Atividade 1	117
A.6 ROTEIRO DA AULA 3: ATIVIDADE 2 - DETERMINANDO A CONSTANTE DE PLANCK UTILIZANDO LED E A PLATAFORMA ARDUINO PARA A COLETA DE DADOS	119
A.6.1 Questionário da Aula 3 – Atividade 2	125

MATERIAL DO PROFESSOR

A.1 QUESTIONÁRIO DE MAPEAMENTO

O questionário a seguir tem a finalidade de permitir ao professor construir um diagnóstico do conhecimento prévio e o contato que os alunos já tiveram com a Física Quântica. Sugerimos a aplicação desse questionário antes da apresentação dos conteúdos das aulas e demais atividades.

1) Você já ouviu falar sobre Física Quântica? Se sim, para você o que é a Física Quântica e o que ela permite explicar?

2) Você já ouviu falar sobre a constante de Planck? Caso sim, você saberia dizer o que é essa constante?

3) Você já ouviu falar sobre radiação térmica de corpo negro? Tem noção do que seja?

4) Você gostaria de aprender mais sobre Física Quântica? Caso sim, por quê?

A.2 AULA 1: INTRODUÇÃO TEÓRICA SOBRE O SURGIMENTO DA CONSTANTE DE PLANCK E O NASCIMENTO DA MECÂNICA QUÂNTICA

Objetivos de ensino

- Propiciar a discussão sobre a importância da constante de Planck para a mecânica quântica;
- Familiarizar os estudantes com um circuito eletrônico que se utiliza de LEDs para determinar a constante de Planck e propiciar a comparação de um experimento ideal com um experimento real.

Tempo de aula previsto

- 1 hora/aula – 45 minutos.

A Física Quântica é a teoria física que descreve o universo atômico e das radiações, contudo, é difícil situar exatamente a respeito sobre a sua origem. Muitos historiadores da ciência afirmam que a apresentação do artigo do físico alemão Max Planck (1858-1947) em 14 de dezembro de 1900 denominado “*Sobre a teoria da lei de distribuição de energia do espectro normal*” - entende-se espectro normal como o espectro de radiação de um corpo negro - tenha marcado o início de seu surgimento. No entanto, o nascimento da mecânica quântica ocorreu devido a inabilidade da Física Clássica em responder satisfatoriamente alguns problemas, principalmente aqueles que se apresentaram para os físicos nas últimas décadas do século XIX (ZANETIC & MOZENA, 2019; FRANCO, 2002; PLANCK, 1901).

Figura A.1: Max Planck (1858-1947). Físico alemão e ganhador do prêmio Nobel de Física de 1918 em reconhecimento aos seus serviços prestados para o avanço da física e à sua descoberta do “*quanta*” de energia. Embora muitos historiadores da ciência afirmem que a apresentação do artigo do Físico alemão Max Planck (1858-1947) em 14 de dezembro de 1900 denominado “*Sobre a teoria da lei de distribuição de energia do espectro normal*” tenha marcado o início da Física Quântica, o nascimento da mecânica quântica se deu devido a inabilidade da Física Clássica em responder satisfatoriamente alguns problemas, principalmente aqueles que se apresentaram para os físicos nas últimas décadas do século XIX.



Fonte: The Nobel Prize in Physics 1918. Disponível em: "<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1918/summary/>". Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

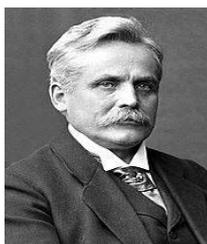
Dentre esses problemas, aquele que a Física Clássica não conseguia dar uma explicação satisfatória era a respeito da distribuição de energia do espectro de radiação do corpo negro, que fora extremamente observada de modo experimental entre o fim do século XIX e o início do século XX. Muitos textos didáticos retratam esse assunto como a catástrofe do ultravioleta.

Nessa época, a Física Clássica tratava a natureza da luz por meio do eletromagnetismo clássico de Maxwell, e a classificando como ondas eletromagnéticas, o que posteriormente fora comprovado experimentalmente pelo físico alemão Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) (ZANETIC & MOZENA, 2019; FRANCO, 2002).

No século XIX, havia extremo interesse em torno do estudo da radiação do corpo negro. A indústria siderúrgica alemã se desenvolveu rapidamente, e não havia aparatos tecnológicos capazes de medir as elevadas temperaturas dos altos fornos. Desse modo, várias pesquisas foram realizadas com a finalidade de determinar essas altas temperaturas através da coloração das radiações térmicas emitidas pelos metais aquecidos nos fornos. Com a utilização de prismas para analisar-se as luzes emitidas em várias faixas de temperatura, pode-se obter a curva do espectro de radiação térmica do material aquecido.

Portanto, uma necessidade tecnológica, associada ao desenvolvimento industrial alemão ocorrido no século XIX, levou à construção empírica das curvas de radiação térmica dos materiais aquecidos pela indústria siderúrgica. Esse processo provocou um enorme interesse por uma comunidade de físicos experimentais da época, dentre eles, o físico alemão Wilhelm Wien (1864-1928), o matemático e físico inglês John William Strutt (1842-1919), mais conhecido como Lord Rayleigh (1842-1919), o físico, astrônomo e matemático britânico James Hopwood Jeans (1877-1946) e Max Planck (ZANETIC & MOZENA, 2019).

Figura A.2: Wilhelm Wien (1864-1928). Foi o primeiro físico a tentar fornecer uma análise teórica coerente para a obtenção da distribuição espectral da radiação do corpo negro. Em 1911, recebeu o prêmio Nobel de Física, pela descoberta das leis de irradiação do calor, mais conhecida como a Lei de Wien.



Fonte: Wilhelm Wien. Disponível em: “<https://www.uni-wuerzburg.de/en/uniarchiv/personalities/eminentscholars/wilhelm-wien/>”. Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

Figura A.3: Fundição de metal em indústria siderúrgica. Compreender o comportamento da radiação térmica emitida pelos metais aquecidos em fornos de alta temperatura pela indústria siderúrgica alemã, foi um dos grandes motivadores para que os cientistas investigassem em meados do século XIX a natureza da radiação térmica.



Fonte: Siderúrgica. Disponível em: “<https://www.g-techsistemas.com.br/segmento/industria/12/siderurgica>”. Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

Vários cientistas buscaram solucionar a questão do espectro de radiação do corpo negro. Os estudos iniciais apontam para os trabalhos realizados pelo físico e matemático austro-esloveno Josef Stefan (1835-1893) e pelo físico austríaco Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906). Boltzmann chegou à equação que fornece a radiância total R para uma superfície, também conhecida como a Lei de *Stefan-Boltzmann*.

No entanto, o primeiro físico a tentar fornecer uma análise teórica coerente para a obtenção da distribuição espectral da radiação do corpo negro foi Wilhelm Wien em 1894. Ele se baseou nas considerações eletromagnéticas e termodinâmicas de Boltzmann. Embora pareça fácil a obtenção dessa função por Wien através da física predominante da época, não foi isto o que ocorreu, pois muitos cientistas não obtiveram êxito durante o final do século XIX. A Física Clássica não forneceu resultados satisfatórios para resolver o problema da função de distribuição do espectro de radiação do corpo negro.

Figura A.4: Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906). O físico austríaco é conhecido pelo seu trabalho no campo da termodinâmica estatística. É considerado junto com Josiah Willard Gibbs e James Clerk Maxwell como o fundador da mecânica estatística.



Fonte: Ludwig Boltzmann. Disponível em: “<https://www.sciography.com/ludwig-boltzmann.htm>”. Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

Max Planck buscou utilizar um formalismo matemático desenvolvido por Ludwig Boltzmann para a teoria cinética dos gases. Planck postulou que a distribuição de energia se dava em níveis discretos. Ele considerou que, na superfície das paredes da cavidade do corpo negro (Figura A.5) existem osciladores harmônicos simples (cargas elétricas oscilantes) que só podem ter determinados valores ε de energia, de tal modo que a energia ε era obtida com múltiplos de um valor mínimo de energia da seguinte forma:

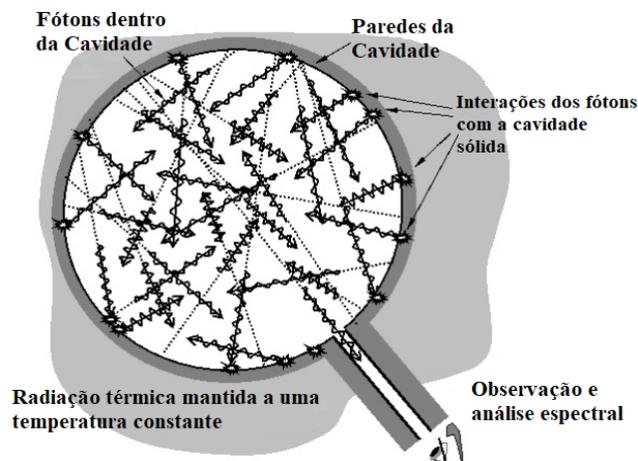
$$\varepsilon = nh\nu, \quad \text{para } n = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{A.1})$$

no qual n é o número quântico, $h\nu$ é a frequência do oscilador e h uma constante que fora obtida mais como um artifício matemático do que uma realidade física, pois de algum modo essa constante fornecia resultados corretos para a energia de radiação. Deste fato se origina a seguinte frase de Planck: “foi um ato de desespero” (EISBERG, 1994).

Para cada valor de n o oscilador está em um determinado estado quântico. Assim, no estado quântico $n=1$ sua energia é $h\nu$; no estado quântico $n=2$ sua energia é $2h\nu$, e assim por diante. Isso significa que a energia do oscilador é quantizada, ou seja, só pode ter determinados valores, no caso múltiplos inteiros de $h\nu$.

É importante destacar que essa teoria de fato contraria totalmente a Física Clássica, segundo a qual um determinado oscilador harmônico simples pode ter qualquer quantidade de energia e, além disso, na Física Clássica essa energia depende apenas da amplitude de suas oscilações e não de sua frequência.

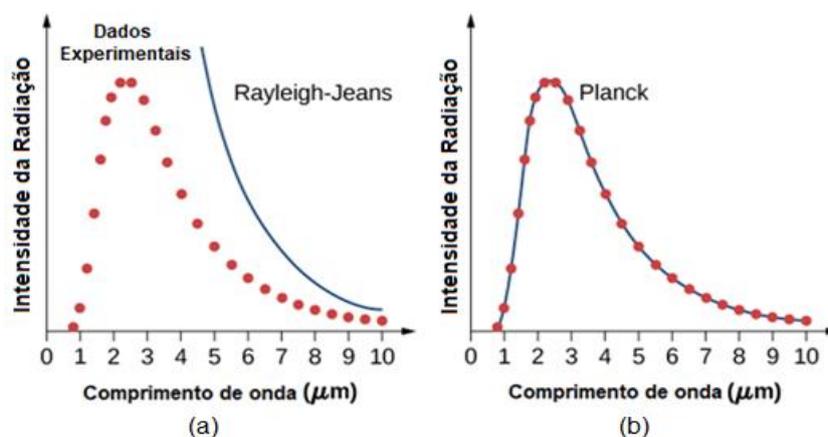
Figura A.5: Cavidade de um corpo negro com fótons saltando para frente e para trás a uma determinada temperatura. A cavidade possui um pequeno orifício pelo qual é possível observar a radiação espectral. Planck considerou que na superfície das paredes da cavidade do corpo negro, existem osciladores harmônicos simples (cargas elétricas oscilantes) que só podem ter discretos valores ε de energia, de tal modo que $\varepsilon = h\nu$ para $n = 1, 2, 3, \dots$. Planck também considerou que os osciladores existentes na superfície do corpo só emitem ou absorvem energia quando passam de um estado quântico para outro.



Fonte: Adaptado de Johnson (2012).

Se o estado quântico passou de $n=1$ para $n=2$, uma porção discreta de energia $h\nu$ foi absorvida pela carga elétrica oscilante. Portanto, a emissão e a absorção de energia também se dão em quantidades quantizadas. Desse modo, essa hipótese fornecia resultados teóricos satisfatórios em comparação com os dados obtidos experimentalmente para a distribuição espectral da radiação térmica de um corpo negro em função de seu comprimento de onda conforme pode ser observado na Figura A.6.

Figura A.6: (a) Gráfico dos pontos experimentais (círculos vermelhos) e da previsão teórica da Física Clássica (linha sólida azul) da intensidade da radiação emitida por um corpo negro em função de seu comprimento de onda realizada pelos físicos Rayleigh e Jeans, também conhecida como a catástrofe do ultravioleta. (b) Gráfico dos pontos experimentais (círculos vermelhos) e da previsão teórica (linha sólida azul) da intensidade da radiação emitida por um corpo negro em função de seu comprimento de onda realizada pelo físico Max Planck.



Fonte: Disponível em: “[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_\(OpenStax\)/University_Physics_III_-_Optics_and_Modern_Physics_\(OpenStax\)/06%3A_Photons_and_Matter_Waves/6.02%3A_Blackbody_Radiation](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_(OpenStax)/University_Physics_III_-_Optics_and_Modern_Physics_(OpenStax)/06%3A_Photons_and_Matter_Waves/6.02%3A_Blackbody_Radiation)”. Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

No entanto, foi Albert Einstein (1879-1955), de certo modo, contrariando Planck, que atribuiu uma realidade física aos níveis discretos das ondas eletromagnéticas, de tal modo a supor que, independentemente da presença de uma cavidade, a luz seria composta de unidades elementares, também conhecidas como “*quanta*”. O artigo escrito por Einstein (1905), intitulado: “*Sobre um ponto de vista heurístico da criação e conversão da luz*”, afirma que:

De acordo com as hipóteses aqui assumidas, quando um raio de luz, se propaga a partir de um ponto, sua energia não é continuamente distribuída em um volume crescente. Ela consiste em um número de **quanta de energia**, localizados no espaço que se movem sem se dividir e que podem ser absorvidos ou emitidos apenas como um todo (EINSTEIN, 1905 *apud* FRANCO, 2002).

Esse artigo de Einstein se refere primordialmente a aspectos termodinâmicos relativos ao problema da radiação do corpo negro. Ao contrário do que se é afirmado em

inúmeros livros-textos, apenas no final do artigo é que Einstein faz considerações a respeito do efeito fotoelétrico (EINSTEIN, 1905 *apud* FRANCO, 2002).

Figura A.7: Albert Einstein (1879-1955). O físico alemão Albert Einstein ganhou o prêmio Nobel de Física em 1921 devido a sua explicação para o efeito fotoelétrico e por suas contribuições para a Física Teórica.



Fonte: Albert Einstein. Disponível em: “<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/einstein/facts/>”. Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

O físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962), em um de seus postulados referentes ao seu modelo atômico, apresentou que a produção de espectros é um fenômeno “quântico” (ocorre por saltos). Apesar de algumas contradições, o modelo de Bohr conseguiu explicar quantitativamente todas as séries de linhas de hidrogênio (PIRES, 2008; EINSTEIN, 1905 *apud* FRANCO, 2002).

Figura A.8: Niels Bohr (1885-1962). O físico dinamarquês, Niels Bohr ganhou o prêmio Nobel de Física em 1922 por seus serviços na investigação da estrutura dos átomos e radiação emanada por eles.

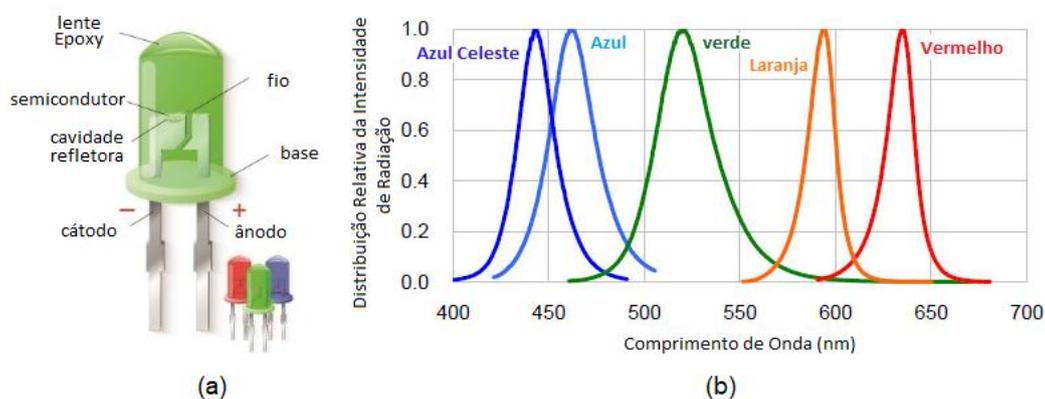


Fonte: Niels Bohr. Disponível em: “<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1922/bohr/biographical/>”. Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

A.2.1 A relação entre a radiação eletromagnética emitida por um LED e a constante de Planck

Os LEDs são peças semicondutoras que emitem radiação eletromagnética a partir da faixa do espectro do ultravioleta até o infravermelho. Isso ocorre quando uma diferença de potencial é aplicada entre os seus terminais. Em decorrência do seu processo de fabricação e da estrutura cristalina do qual o seu material é composto, os LEDs emitem radiação eletromagnética numa região espectral (intervalo de comprimento de onda) na qual o pico dessa região define a frequência predominante da luz emitida (comprimento de onda de máxima emissão). O espaçamento do comprimento de onda predominante da luz emitida pode ter poucas dezenas de nanômetros. Em decorrência do pequeno espaçamento em torno do pico de emissão, geralmente é estabelecido que a radiação emitida é aproximadamente monocromática, ou seja, tem apenas um único comprimento de onda, conforme é ilustrado na Figura A.9(b) (NUSSENZVEIG, 2015; CAVALCANTE & HAAG, 2005; RAYCHAUDHURI, 2011).

Figura A.9: (a) LED - Diodo Emissor de Luz. (b) Espectro de emissão de diversos LEDs.



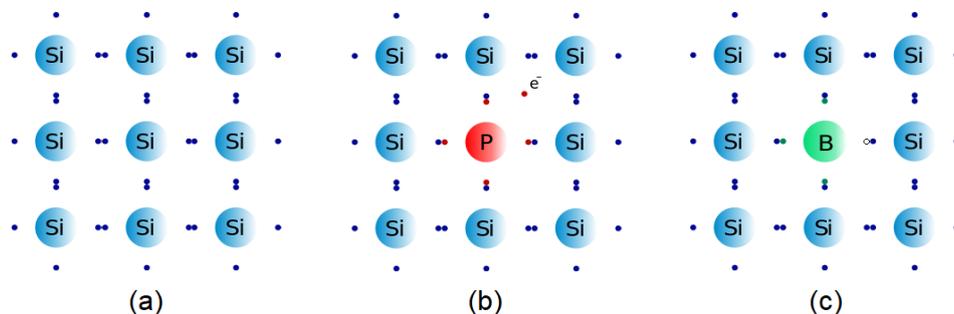
Fonte: Adaptado de: “https://br.123rf.com/photo_24954429_partes-de-uma-light-emitting-diode.-led.-ao-contr.html”. Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

Os LEDs são formados por uma união de semicondutores do tipo-n e do tipo-p (Figura A.10). Semicondutores são materiais sólidos, geralmente cristalinos, que possuem uma resistividade elétrica intermediária entre a de um bom isolante e a de um bom condutor. Esses materiais possuem quatro elétrons na camada de valência, sendo os mais comuns o silício (Si) e o germânio (Ge). Um semicondutor é do tipo-n quando a maior parte dos portadores de carga elétrica são elétrons da banda de condução. As bandas de energia (banda de valência e condução, relevantes na descrição da união entre

semicondutores do tipo-n e tipo-p) são originadas quando acontecem desdobramentos dos níveis de energia discretos dos átomos isolados durante a formação do cristal. A banda de valência é o nível energético mais afastado do núcleo, ou seja, desdobramento da última camada discreta, e a banda de condução é o desdobramento do nível discreto seguinte. É normalmente chamado de *gap* (do inglês: “lacuna”), ou barreira de potencial, a diferença entre esses níveis de energia, conforme pode ser observado na Figura A.11(a) (YOUNG, 2004).

A fabricação do semiconductor tipo-n pode ser feita através do processo denominado “dopagem”, no qual consiste no acréscimo de um material diferente (impureza) ao semiconductor da matriz original, por exemplo, adicionando-se um átomo de fósforo (P), que pode realizar até cinco ligações químicas (pentavalente), ao silício (Si) que pode fazer até quatro ligações (tetravalente) conforme pode ser observado na Figura A.10(b). O semiconductor, então, passa a ter elétrons em excesso e fracamente ligado ao núcleo original, de modo que poderá doá-los, podendo dessa forma conduzir corrente elétrica.

Figura A.10:(a) Material semiconductor formado por silício (Si) não dopado. (b) Material semiconductor do tipo-n dopado com átomo de fósforo (P). (c) Material semiconductor do tipo-p dopado com átomo de boro (B).



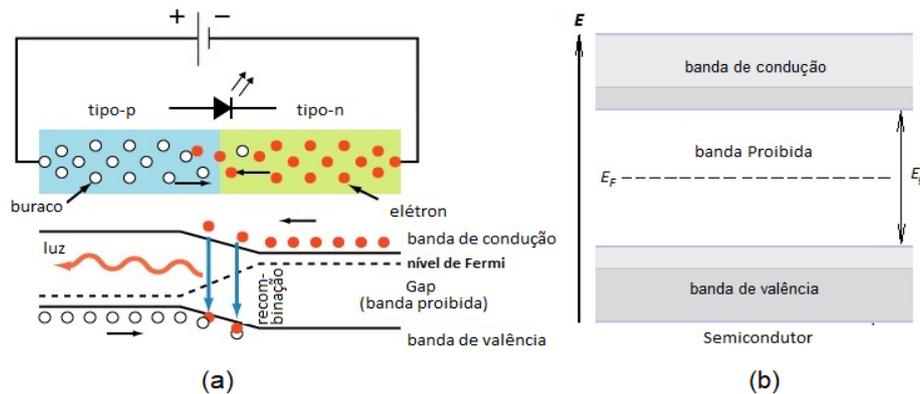
Fonte: Adaptado de: “<https://www.encyclopedie-energie.org/les-fours-de-cristallisation-du-silicium-photovoltaique/>”. Acesso em 31 de janeiro de 2023.

Do mesmo modo, dizemos que um semiconductor é do tipo-p quando acrescentamos um material diferente (impureza) ao material semiconductor da matriz original. Por exemplo, o boro (B), que pode realizar até três ligações (trivalente), ao silício (Si), que pode fazer até quatro ligações (tetravalente), de tal modo que possa existir “buracos” ou “lacunas” nos níveis de energia da banda de valência, deixando portanto, um espaço vazio neste nível que poderá ser ocupado por outro elétron, conforme pode ser observado na Figura A.10(c) (DOS SANTOS, DOS SANTOS MENEZES JR, & DA SILVA SANTANA; CARRON & GUIMARÃES, 2006).

Ao ser formada a junção p-n, para que ocorra a passagem da corrente elétrica, é indispensável que se forneça uma energia de *gap*, E_G , necessária para que os elétrons do semicondutor tipo-n vençam a barreira de potencial, e, com isso, passem para a banda de condução, deixando uma lacuna na banda de valência, formando-se, portanto, um par elétron-lacuna. Isso é alcançado quando o diodo é submetido a uma diferença de potencial de magnitude $V_c = E_G/e$, no qual e é a carga do elétron, cujo valor é de $-1,602 \times 10^{-19}C$, e V_c é a tensão de corte, ou seja, a mínima tensão necessária para que haja condução de corrente elétrica no dispositivo semicondutor. Ao estarem na banda de condução, esses elétrons podem se deslocar para o semicondutor tipo-p onde se recombinam com as lacunas desse semicondutor, emitindo-se, portanto, a diferença de energia na forma de radiação eletromagnética (DOS SANTOS, DOS SANTOS MENEZES JR, & DA SILVA SANTANA).

Esta energia, E_G , necessária para vencer a barreira de potencial, é bem estabelecida para cada LED, ocasionando, portanto, a emissão da radiação eletromagnética num comprimento de onda bem peculiar. Em decorrência dessa queda de energia acontecer apenas na transição *n-p*, e esta lacuna de energia ter um valor bem específico, a radiação eletromagnética emanada é bem próxima de ter um comprimento de onda bem definido, ou seja, ser monocromática, obedecendo, portanto, a relação de Einstein para a energia de um fóton, dada pela Equação A.1 (WALKER, HALLIDAY, & RESNICK, 2009).

Figura A.11: (a) Esquema representando a diferença de níveis de energia, ou barreira de potencial, e o processo de emissão de luz de um LED. (b) Energia de Fermi (E_F), energia de *gap* (E_g), banda de condução, banda de valência, e a banda proibida de um semicondutor.



Fonte: Adaptado de (DOS SANTOS, DOS SANTOS MENEZES JR, & DA SILVA SANTANA).

Desse modo, sabemos que um *quantum* de energia igual a $h\nu$ é necessário para vencer a barreira de potencial, e formar um par elétron-lacuna, o que ocasionará na emissão de igual energia. Assim, temos a seguinte equação:

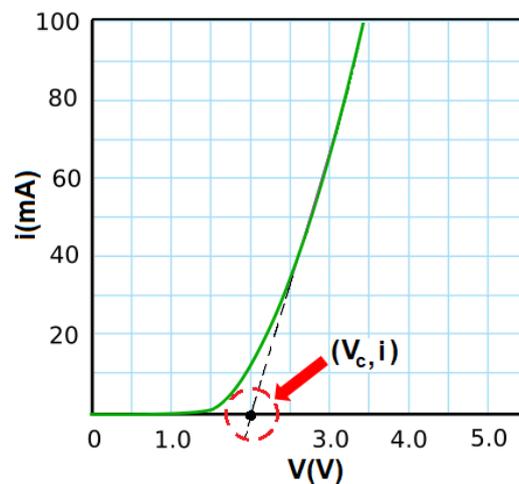
$$E_g = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = |eV_c|, \quad (\text{A.2})$$

na qual c , é a velocidade da luz no vácuo ($\approx 3,0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), e h , é a constante de Planck ($6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$). De tal forma que, sabendo-se o comprimento de onda λ de máxima emissão de alguns LEDs, e medindo-se a tensão de corte V_c da corrente elétrica i , é possível determinar o valor da constante de Planck h da seguinte forma:

$$h = \left| \frac{\lambda e V_c}{c} \right|. \quad (\text{A.3})$$

Experimentalmente, uma forma de estimar o valor da tensão de corte V_c do LED é construindo-se a curva característica do LED e, a partir da análise visual dessa curva, selecionar os pontos experimentais que se alinham segundo uma reta. Após a obtenção dessa reta, por extrapolação linear devemos fazer uma estimativa do valor da tensão de corte V_c . Na Figura A.12 tem-se um gráfico da curva característica teórica do LED no qual a seta vermelha indica o ponto de intersecção da reta extrapolada com o eixo de tensão elétrica V . A tensão de corte é determinada através da obtenção do valor do par ordenado (V_c, i) desse ponto.

Figura A.12: Curva característica teórica do LED. A seta vermelha indica o ponto de intersecção da reta extrapolada (linha tracejada) com o eixo da tensão elétrica V .



Fonte: Adaptado de “<http://lednique.com/current-voltage-relationships/resistance-of-an-led/>”. Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

A.3 AULA 2: ATIVIDADE 1 - DETERMINANDO A CONSTANTE DE PLANCK COM UM SIMULADOR VIRTUAL

Objetivos de ensino

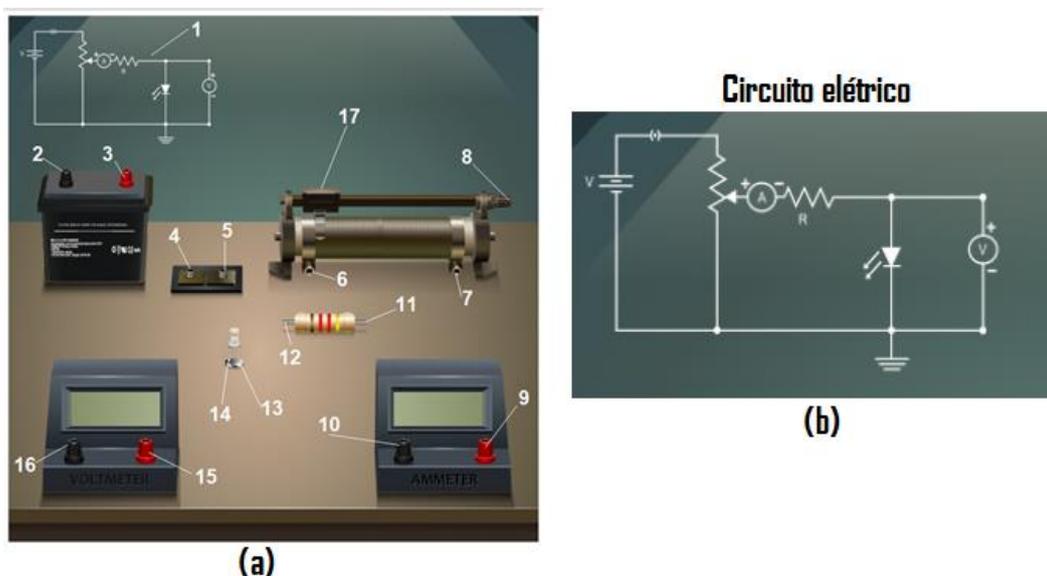
- Propiciar a discussão sobre a importância da constante de Planck para a mecânica quântica;
- Familiarizar os estudantes com um circuito eletrônico que se utiliza de LEDs para determinar a constante de Planck e propiciar a comparação de um experimento ideal com um experimento real.

Tempo de aula previsto

- 1 hora/aula – 45 minutos.

Nesta atividade apresentamos um simulador virtual⁷ para determinar a constante de Planck. Este simulador consiste em um circuito elétrico cujos componentes e esquematização podem ser observados nas Figuras A.13(a) e (b). Para que a atividade seja executada corretamente, oriente os alunos para seguirem as orientações do(a) professor(a).

Figura A.13: (a) *Print* da tela do simulador virtual para se determinar a constante de Planck. (b) Circuito elétrico a ser montado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

⁷ O simulador virtual está disponível no seguinte endereço eletrônico: http://mpv-au.vlabs.ac.in/modern-physics/Determination_of_Plancks_Constant/experiment.html.

A seguir, tem-se a descrição dos componentes do circuito elétrico ilustrados na Figura A.13(a).

1. Circuito a ser montado;
2. Polo negativo da bateria;
3. Polo positivo da bateria;
4. Entrada do sinal positivo do conector;
5. Saída do sinal negativo do conector;
6. Entrada do sinal positivo do reostato;
7. Entrada do sinal negativo do reostato;
8. Saída do sinal positivo do reostato;
9. Entrada do sinal positivo do amperímetro;
10. Saída do sinal positivo do amperímetro;
11. Entrada do sinal no resistor;
12. Saída do sinal no resistor;
13. Terminal positivo do LED;
14. Terminal negativo do LED;
15. Terminal positivo do voltímetro;
16. Terminal negativo do voltímetro;
17. Cursor do reostato.

Esse experimento tem como objetivo a obtenção da tensão de corte V_c do LED. A partir dessa e de outras informações que posteriormente serão apresentadas, será possível determinar a constante de Planck. Um passo a passo de como utilizar o simulador virtual para coletar os dados experimentais foi apresentado a seguir.

Procedimento Experimental

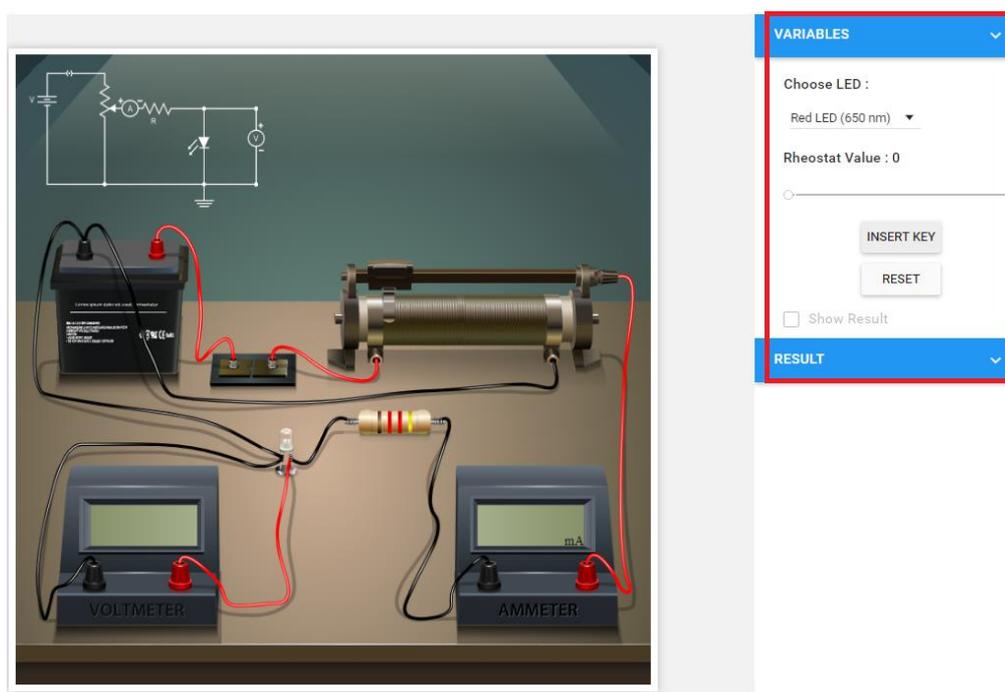
Passo 1: Acesse o seguinte endereço eletrônico: http://mpv-au.vlabs.ac.in/modern-physics/Determination_of_Plancks_Constant/experiment.html. Ao acessá-lo, você encontrará o simulador ilustrado na Figura A.13.

Passo 2: Com a tela do simulador aberta no monitor do computador, posicione o ponteiro do mouse sobre os itens 2 a 17 ilustrados na Figura A.13(a). Note que o ponteiro se transforma em uma pequena mão . Ao clicar e manter pressionado o botão esquerdo do

mouse sobre cada conector, verifique que é possível arrastar um fio condutor e que ao fazer isso uma seta verde  aparece no local em que o fio deverá ser conectado.

Passo 3: Monte no simulador o circuito elétrico da Figura A.13(b). Caso tenha dúvidas de como montar o circuito, execute a montagem conforme é ilustrado na Figura A.14.

Figura A.14: Montagem do circuito elétrico da Figura A.13(b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 4: Conforme pode ser notado na Figura A.14, no interior do retângulo vermelho situado na parte lateral superior do *print* da tela do simulador, abaixo de **Choose LED** (tradução do inglês: selecionar LED), clique com o botão esquerdo do mouse e selecione **Blue LED** (LED Azul).

Passo 5: Clique com o botão esquerdo do mouse em  e note que o voltímetro e o amperímetro ligaram no simulador

Passo 6: Na barra deslizante localizada abaixo de **Rheostat Value** (tradução do inglês: Valor do Reostato), deslize a barra até o ponto em que no mostrador do amperímetro apareça um valor acima de zero, porém bem próximo de zero.

Passo 7: Faça a leitura do valor da tensão elétrica que aparece no mostrador do voltímetro. Essa tensão é chamada de tensão de corte, V_c . Anote esse valor na Tabela A.1. Realize o mesmo procedimento para os LEDs *green* e *red* (verde e vermelho).

Tabela A.1: Dados experimentais obtidos para a tensão de corte V_c dos LEDs azul, verde e vermelho e valores determinados para a constante de Planck.

LED	$\lambda (\times 10^{-9} \text{m})$	$V_c (\text{V})$	$h (\times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s})$
Azul	475	2,628	6,566
Verde	510	2,040	6,566
Vermelho	650	1,594	6,566
		Média \bar{h}	6,566
		Erro \bar{h} (%)	0,906

Passo 8: Por meio da Equação A.3, determine o valor da constante de Planck, h . Nessa equação, λ , é o comprimento de onda da luz emitida pelo LED em metros (Tabela A.1), c é a velocidade da luz, cujo valor é de $3 \times 10^8 \text{ m/s}$, e e é a carga do elétron, $-1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

$$h = \left| \frac{\lambda e V_c}{c} \right| \quad (\text{A.3})$$

Passo 9: Através dos valores anotados na Tabela A.1 e da Equação A.4, obtenha o valor médio para a constante de Planck, \bar{h} , e anote-o na Tabela A.1.

$$\bar{h} = \frac{(h_{\text{azul}} + h_{\text{verde}} + h_{\text{vermelho}})}{3} \quad (\text{A.4})$$

Passo 10: Utilizando o valor médio obtido para a constante de Planck, \bar{h} , e com base no valor da constante de Planck h encontrado na literatura, $6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, use a Equação A.3 para determinar o erro percentual experimental e anote-o na Tabela A.1.

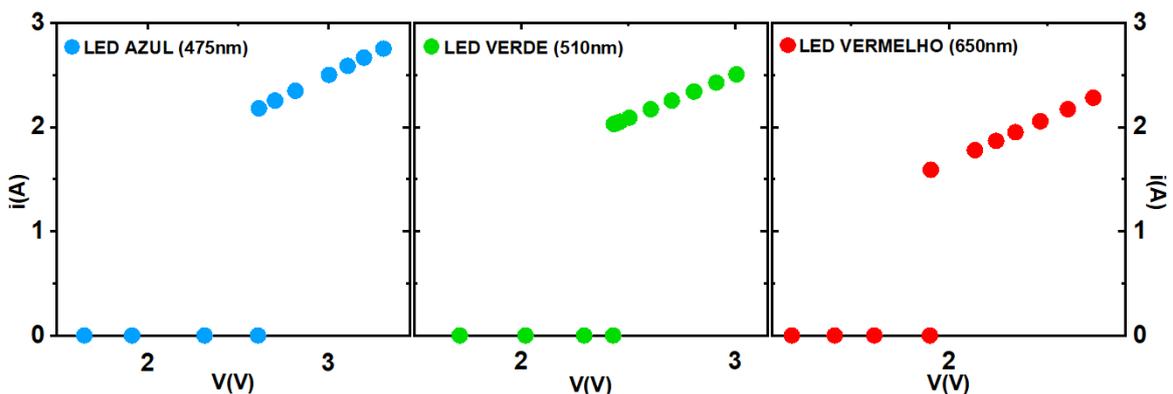
$$\text{Erro}(\%) = \left| \frac{(h - \bar{h})}{\bar{h}} \right| \times 100\% \quad (\text{A.5})$$

Resultados e Discussões

A média \bar{h} obtida para o valor da constante de Planck foi de $6,566 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ e o erro experimental em relação a esse valor foi de 0,906%. Podemos verificar na Tabela A.1 que os valores da constante de Planck obtidos para os LEDs azul, verde e vermelho foram idênticos.

Isso ocorre devido ao fato do circuito eletrônico virtual simular um ambiente ideal. Neste caso não há a interferência de inúmeras variáveis, como por exemplo a dissipação de energia térmica em função da impedância no resistor, conexões, LEDs e condutores elétricos. Dessa forma, o erro experimental ocorre porque o circuito eletrônico foi programado para tê-lo.

Figura A.15: Gráficos obtidos através da coleta dos dados das tensões e correntes elétricas dos LEDs azul, verde e vermelho do simulador virtual.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Podemos observar na Figura A.15 que os gráficos plotados a partir dos dados coletados das tensões e correntes elétricas dos LEDs azul, verde e vermelho do simulador não são similares à curva característica do LED tal como pode ser verificado na Figura A.12. É possível notar claramente que na aplicação da tensão de corte V_c do LED ocorre um salto no valor da corrente elétrica, não sendo possível observar o “joelho” da curva característica.

Essas questões podem ser relevantes para se debater em sala de aula as divergências existentes entre um experimento real e um virtual, de forma a poder mostrar aos alunos que um ambiente de simulação muitas vezes despreza inúmeras características encontradas no mundo real.

Embora não seja possível observar o gráfico da curva característica do LED com o uso do simulador virtual, este cumpre bem a função de fornecer um ambiente acessível e

intuitivo para se familiarizar com a montagem de um circuito elétrico para determinar a constante de Planck, de modo a propiciar um ambiente de aprendizagem interativo e fornecer um maior embasamento técnico antes de se explorar a montagem de um circuito elétrico real.

Os resultados obtidos permitirão realizar uma comparação com o experimento real, de modo a poder fomentar discussões sobre as vantagens e desvantagens de se realizar cada modelo de experimento.

A.3.1 Questionário da Aula 2 – Atividade 1 (com sugestão de gabarito)

a) O que é a constante de Planck?

A constante de Planck é uma constante fundamental da física utilizada para determinar a quantização de energia. Ela está relacionada com a quantidade de energia contida em um quanta (ou pacote) de radiação e a frequência dessa radiação. A sua descoberta foi fundamental para o nascimento da Mecânica Quântica.

b) O que é um Corpo Negro? Por que o seu estudo foi importante para o desenvolvimento da Mecânica Quântica?

O Corpo Negro é um absorvedor e emissor ideal de energia. Utilizando-se a Física Clássica não foi possível obter a curva teórica que descreve o espectro de radiação eletromagnética emitido por um Corpo Negro. Somente com o surgimento da Física Quântica foi possível obter satisfatoriamente essa curva.

c) Qual a importância da constante de Planck para o nascimento da Mecânica Quântica?

A descoberta dessa constante fundamental da física permitiu obter de modo satisfatório a curva teórica que descreve o espectro de radiação eletromagnética emitido por um Corpo Negro.

d) Sabe-se que o comprimento de onda do raio-X é menor que o comprimento de onda da micro-onda a Energia de radiação ε de Planck é dada pela seguinte equação:

$$\varepsilon = hf = \frac{hc}{\lambda},$$

no qual ε é a energia de radiação, h , é a constante de Planck, cujo valor é $6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, f , é a frequência da luz irradiada em s^{-1} , c é a velocidade da luz no vácuo ($\approx 3,0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), e λ é o comprimento de onda da luz irradiada em m .

Desse modo, analisando-se a equação acima, o que se pode afirmar sobre a energia de uma onda eletromagnética e o seu comprimento de onda? A energia do raio-X é maior ou menor que a energia de uma micro-onda?

Pode-se afirmar que a energia de uma onda eletromagnética é inversamente proporcional ao seu comprimento de onda. Desse modo, a energia do raio-X é maior que a energia da micro-onda.

e) O que você entende por tensão de corte do LED? Por que ela é importante nesse experimento para se determinar a constante de Planck?

A tensão de corte do LED, V_c , é a mínima tensão necessária aplicada no LED para que este comece a emitir luz (fóton). Ela é importante nesse experimento, pois, através da determinação do seu valor e usando a equação $E = |eV_c| = hf$, no qual E é a energia do fóton emitido pelo LED, e é a carga do elétron, e f é a frequência da luz emitida, é possível obter experimentalmente o valor da constante de Planck h .

A.4 AULA 3: ATIVIDADE 2 - DETERMINANDO A CONSTANTE DE PLANCK COM LEDS USANDO A PLATAFORMA ARDUINO PARA COLETAR DADOS

Objetivos de ensino

- Propiciar a discussão sobre a importância da constante de Planck para a mecânica quântica;
- Familiarizar os estudantes com uma plataforma eletrônica que envolve conhecimentos de eletrônica e programação e propiciar a comparação de um experimento ideal com um experimento real.

Tempo de aula previsto

- 1 hora/aula – 45 minutos.

Antes de realizar o experimento em sala de aula, caso não seja possível conhecer as especificações técnicas dos LEDs para se ter acesso aos seus *datasheets*, e sabendo-se que essas informações nem sempre são obtidas no momento em que se realiza a compra desses componentes eletrônicos, é imprescindível que sejam realizados experimentos prévios com a finalidade de se certificar de que os LEDs selecionados não se utilizam do processo de fluorescência. Após a realização desses experimentos, caso seja verificada a ocorrência de elevada divergência entre os resultados experimentais obtidos e os resultados encontrados na literatura para esse modelo de experimento, é possível que o LED se utilize desse processo.

Além disso, aconselhamos a realização de algum experimento de espectrometria⁸ para se determinar o valor mais apropriado para o comprimento de onda predominante do espectro de radiação eletromagnética emitido pelo LED. Uma outra alternativa é por meio da seleção de um LED que emite luz no comprimento de onda do infravermelho⁹. Apontando a luz desse LED para a câmera ligada de um celular, é possível verificar na tela do *smartphone* se há uma luz emitida pelo componente eletrônico. Caso esta seja identificada, há a confirmação de que este LED emite luz nesta faixa de comprimento de

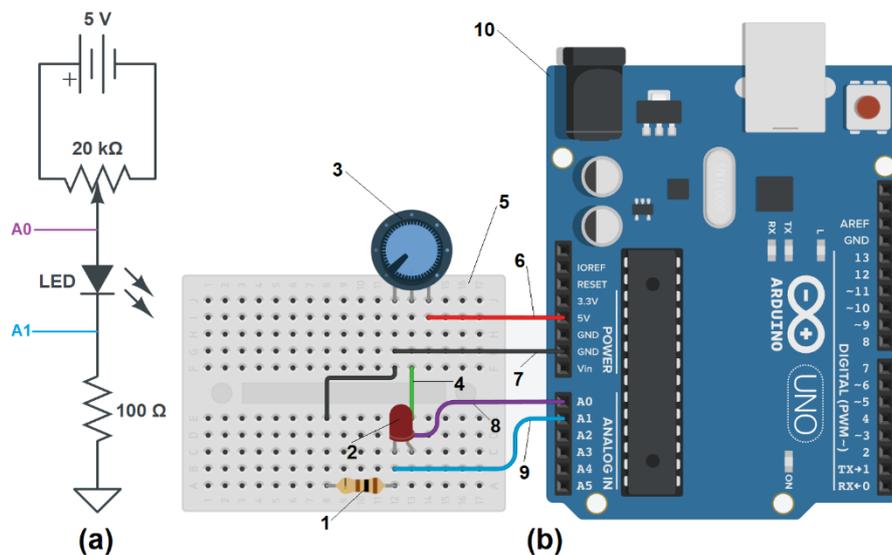
⁸ No artigo intitulado *How to build a low cost spectrometer with Tracker for teaching light spectra* (Como construir um espectrômetro de baixo-custo com o Tracker para o ensino do espectro de luz), Rodrigues, Marques & Carvalho (2015) apresentam um espectrômetro de baixo-custo e fácil aquisição de materiais.

⁹ No artigo intitulado: “Vendo o invisível”. Experimentos de visualização do infravermelho feitos com materiais simples e de baixo custo (MICHA, E. *et al.*, 2011) é possível realizar experimentos para se detectar a luz infravermelha de um LED.

onda. Após a confirmação dessa informação, podemos estimar o comprimento de onda predominante emitido por este LED a partir de datasheets de LEDs que emitem luz com comprimentos de onda nessa mesma faixa do espectro eletromagnético.

Apresentamos a seguir o experimento onde utilizamos a plataforma Arduino para a aquisição dos dados experimentais e, em seguida, determinação da constante de Planck por meio das curvas características de LEDs. A esquematização e montagem do circuito elétrico em conjunto com o Arduino são apresentadas na Figura A.16.

Figura A.16: (a) Esquematização do circuito elétrico para se determinar a constante de Planck por meio de LED. (b) Representação da montagem do circuito elétrico em conjunto com a plataforma Arduino.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura A.16(a) é ilustrado de forma esquemática o circuito elétrico construído para determinar a constante de Planck por meio do levantamento da curva característica de um LED. A tensão contínua de 5V que é fornecida pelo Arduino e que alimenta o circuito está conectada em paralelo ao potenciômetro de 20 kΩ de modo que o sinal elétrico de saída desse dispositivo (pino central) controla a tensão aplicada no LED. Pode-se notar que as entradas analógicas A0 e A1 do Arduino estão conectadas aos terminais do LED de forma que o resultado da diferença do sinal analógico lido entre esses terminais levará, após conversão, ao valor da tensão elétrica aplicada no dispositivo semiconductor. Para limitar a corrente elétrica do circuito e evitar que o LED seja danificado, tem-se um resistor de 100Ω conectado em série com o LED.

Na Figura A.16(b) apresentamos uma representação da montagem do circuito elétrico em conjunto com a plataforma Arduino. O circuito montado é composto pelos componentes a seguir:

1. Resistor de 100Ω ;
2. LEDs Azul (475nm), Verde (510nm), e Vermelho (625nm);
3. Potenciômetro de $20\text{ k}\Omega$.

Ainda na Figura A.16(b), em 4 temos o fio conectado ao terminal do sinal de tensão elétrica do potenciômetro, em 5 a *protoboard*, em 6 o fio conectado na porta de 5V, em 7 o fio conectado ao aterramento, em 8 o fio conectado à entrada analógica A0, em 9 o fio conectado à entrada analógica A1, e em 10 a plataforma Arduino.

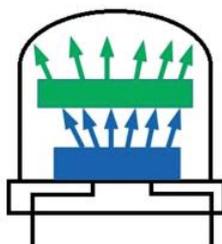
Na Figura A.18, em A temos a *protoboard*, em B a plataforma Arduino, em C o sinal de tensão elétrica de 5V, em D o aterramento conectado ao GND do Arduino, em E o sinal de tensão elétrica controlado pelo potenciômetro, em F o sinal de entrada na porta analógica A0 do Arduino, e em G o sinal de entrada na porta analógica A1 do Arduino.

A.4.1 A seleção adequada de LEDs

Para se buscar obter um melhor resultado experimental, é importante selecionar adequadamente os LEDs a serem usados no experimento. Para tanto, deve-se evitar a escolha de LEDs que se utilizem do processo de fluorescência. Neste processo conforme ilustrado na Figura A.17, o LED dentro desse dispositivo emite luz azul que é então absorvido por um material fluorescente. O material é construído para converter a luz azul na frequência ou frequências desejadas. Este processo é chamado de “conversão para baixo” (do inglês: “*down conversion*”) porque converte a luz azul em uma luz de menor energia (menor frequência).

Desse modo, ao se considerar essa questão, evita-se a possibilidade de ocorrer prováveis enganos devido à formação de uma errada concepção de que o espectro de luz medido de um determinado LED é o mesmo produzido pelo material semicondutor do qual ele é composto.

Figura A.17: Devido ao processo de fluorescência, a luz emitida pelo LED azul, pode ser convertida, por exemplo, para uma luz de menor frequência (luz verde).



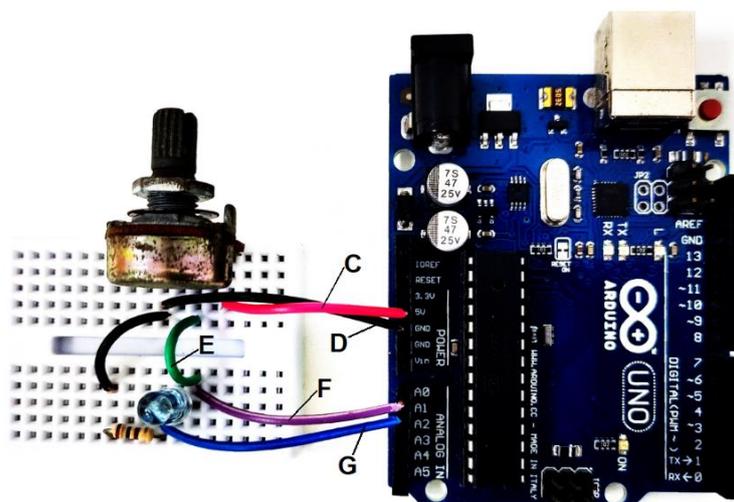
Fonte: Zollman & Bearden (2019).

Além dos detalhes anteriormente citados, saber exatamente qual é a frequência predominante do espectro de emissão de luz do LED é fundamental para assegurar melhores resultados. Uma possibilidade para se obter essa informação é tendo-se acesso ao *datasheet* elaborado pelo fabricante do LED ou realizar algum experimento de espectrometria (RODRIGUES, MARQUES, & CARVALHO, 2015).

Procedimento Experimental

Passo 1: Inicialmente montamos o circuito elétrico na *protoboard* em conjunto com a plataforma Arduino selecionando o LED azul conforme é ilustrado na Figura A.16(b) e A.18, e após isso conectamos o cabo USB ao computador.

Figura A.18: Montagem experimental na *protoboard* do circuito elétrico em conjunto com a plataforma Arduino para a coleta dos dados experimentais. As letras C, D, E, F e G correspondem aos números 6, 7, 4, 8 e 9 indicados na Figura A.16(b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 2: Posteriormente, abrimos a IDE do Arduino, e carregamos o código que consta na seção A.4.3.

Em A0 e A1 temos as portas analógicas que podem ler sinais de entrada de 0 a 5V. Essas portas possuem internamente um conversor analógico-digital (ADC) que realiza a conversão do sinal analógico em um sinal digital que varia de 0 a 1023. O valor lido pela porta analógica é armazenado na memória do Arduino em uma variável do tipo inteiro que pode ser lida e utilizada pelo código do programa Arduino.

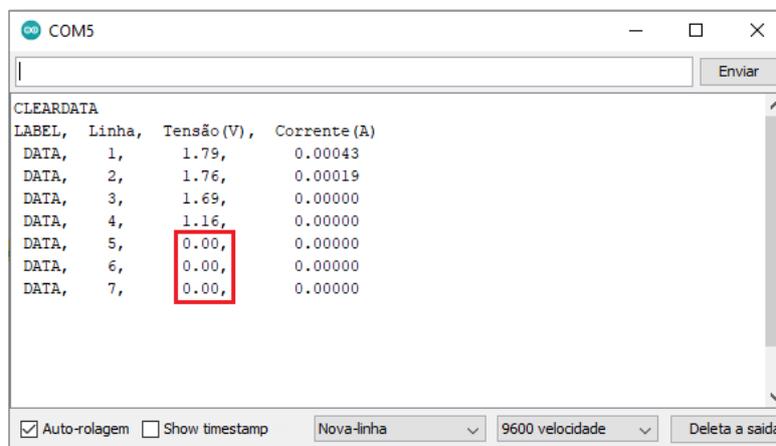
Para realizar a conversão desse valor em um valor de tensão elétrica, é possível utilizar a equação $V_n = \frac{V_s \cdot 5}{1023}$, no qual V_n é a tensão elétrica, V_s é o valor do sinal lido pela

porta analógica A0, 1023 são os valores que as portas analógicas podem assumir e 5V é o sinal de tensão teórico fornecido pela placa Arduino. Neste trabalho, após medirmos com o multímetro o sinal de 4,91V fornecido pelo Arduino, a equação utilizada ficou da seguinte forma: $V_n = \frac{V_s \cdot 4,91}{1023}$.

Conforme consta na seção A.4.3, no algoritmo implementado na plataforma arduino utilizamos $V0$ como o valor do sinal de tensão lido pela porta analógica $A0$ e $V1$ como o valor lido pela porta analógica $A1$, de modo que a tensão elétrica aplicada no LED é o resultado da diferença entre esses sinais ($V0-V1$). Utilizando a lei de Ohm, determinamos o valor da corrente elétrica no LED (I_{led}) dividindo-se o valor da tensão elétrica $V1$, que é a ddp no resistor, pelo valor da resistência R do resistor de 100Ω do circuito.

Passo 3: Em seguida, abrimos o *Monitor serial* da IDE do Arduino e verificamos se ele está imprimindo os dados da tensão e corrente elétrica do LED conforme exemplo apresentado na Figura A.19.

Figura A.19: Print da tela do *Monitor serial* da IDE da plataforma Arduino com os dados experimentais da tensão e da corrente elétrica impressos. No retângulo vermelho, os valores indicam que o potenciômetro foi configurado para que o valor da tensão elétrica seja igual à zero nos terminais do LED.



LABEL	Linha	Tensão (V)	Corrente (A)
DATA	1,	1.79,	0.00043
DATA	2,	1.76,	0.00019
DATA	3,	1.69,	0.00000
DATA	4,	1.16,	0.00000
DATA	5,	0.00,	0.00000
DATA	6,	0.00,	0.00000
DATA	7,	0.00,	0.00000

Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 4: Posteriormente, configuramos a posição do potenciômetro para que o valor da tensão elétrica impressa no *Monitor Serial* seja igual à zero conforme pode ser observado no retângulo vermelho da Figura A.19.

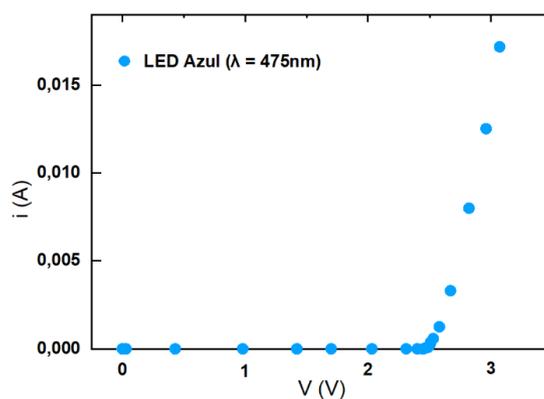
Passo 5: Feito isso, giramos o potenciômetro lentamente com um baixo incremento no sentido em que ocorre o aumento da tensão elétrica nos terminais do LED. Esse valor, junto do valor da corrente elétrica no circuito, é impresso no *Monitor serial*, gerando um par ordenado (V, i).

Passo 6: Em seguida, repetimos esse procedimento dando mais um passo no potenciômetro, coletando e registrando um novo ponto experimental. Esse procedimento deve ser repetido até o momento em que não seja possível incrementar mais algum passo no potenciômetro.

Passo 7: Finalizada a coleta e o registro dos dados na planilha eletrônica, passamos para a análise dos dados. Primeiramente, é construído um gráfico de dispersão da corrente elétrica vs. tensão elétrica (curva característica do LED) conforme mostrado na Figura A.20. A partir da análise visual dessa curva, é feita a seleção dos pontos experimentais que se alinham segundo uma reta. Após a obtenção da equação dessa reta, por extrapolação linear, é realizada uma estimativa da tensão de corte V_c do LED que permitirá a determinação da constante de Planck.

Resultados e Discussões

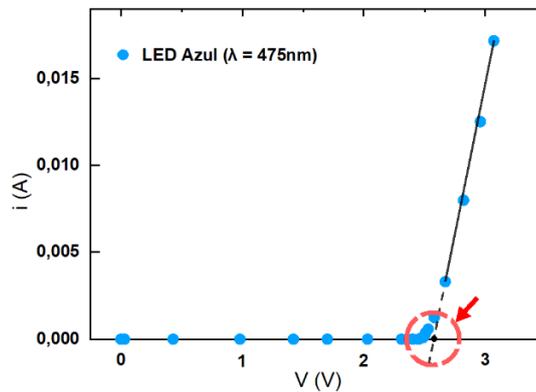
Figura A.20: Gráfico da corrente elétrica (A) vs. tensão elétrica (V) dos dados experimentais coletados com a plataforma Arduino para o LED azul.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 8: Com os pontos experimentais que se ajustam a uma reta já determinados, construímos o gráfico de dispersão mostrado na Figura A.21. Note que o segmento de reta mostrado permite concluir que os quatro últimos pontos experimentais podem ser ajustados segundo uma função de primeiro grau e a linha tracejada colinear a este segmento indica uma intersecção com o eixo horizontal.

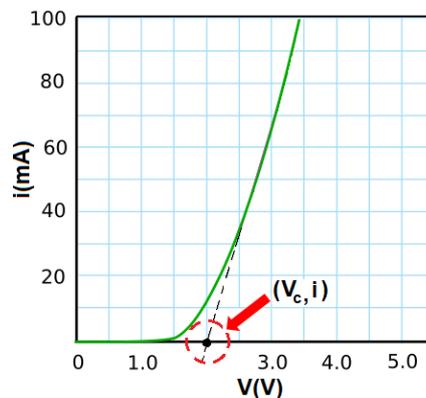
Figura A.21: Gráfico da corrente elétrica i vs. tensão elétrica V para o LED azul. Por meio de uma análise visual o segmento de reta ajusta os dados que visualmente sugerem estar mais alinhados de acordo com uma reta. A linha tracejada indica a extrapolação linear e no interior do círculo vermelho está o ponto de intersecção da reta com o eixo V .



Fonte: Elaborado pelo autor.

A extrapolação deve ser realizada pelo fato de o material semiconductor não ser ideal, isto é, não são apenas os buracos que irão “conduzir”, mas sim outros elementos, levando ao surgimento de um “joelho contínuo” e não uma curva com descontinuidade tal qual a teórica conforme pode ser verificado na Figura A.22. O valor de V na intersecção é a tensão de corte V_c do LED, ou seja, a mínima tensão elétrica necessária para que o LED comece a emitir fótons.

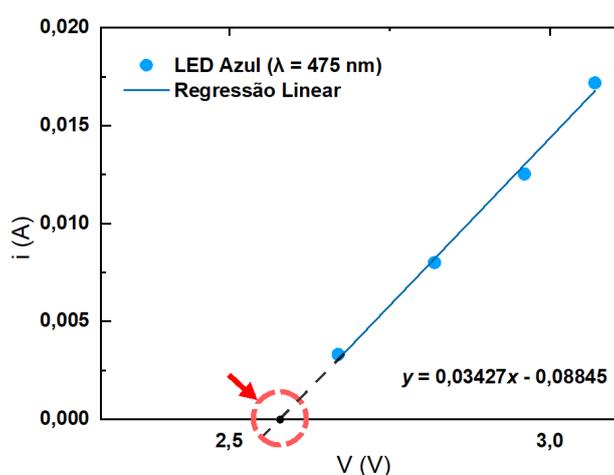
Figura A.22: Curva característica teórica do LED. A seta vermelha indica o ponto de intersecção da reta extrapolada (linha tracejada) com o eixo da tensão elétrica V .



Fonte: Adaptado de “<http://lednique.com/current-voltage-relationships/resistance-of-an-led/>”. Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

Passo 9: Utilizando a ferramenta “*adicionar linha de tendência*” da planilha eletrônica determinamos a função que se ajusta a esses pontos e extrapolamos a reta (linha tracejada) até obter sua intersecção com o eixo V conforme pode ser observado na Figura A.23. Nesta função a variável y é a corrente elétrica i e a variável x é a tensão elétrica V .

Figura A.23: Gráfico de dispersão de $i(\text{A})$ vs. $V(\text{V})$ dos dados experimentais que visualmente sugerem estar alinhados de acordo com uma reta. Através do método da regressão linear obtivemos a equação da reta que melhor ajusta os dados. Nesta equação, y é a variável da corrente elétrica i e x é a variável da tensão elétrica V aplicada no LED. A linha tracejada indica a extrapolação linear e no interior do círculo em vermelho está o ponto de intersecção da reta com o eixo V .

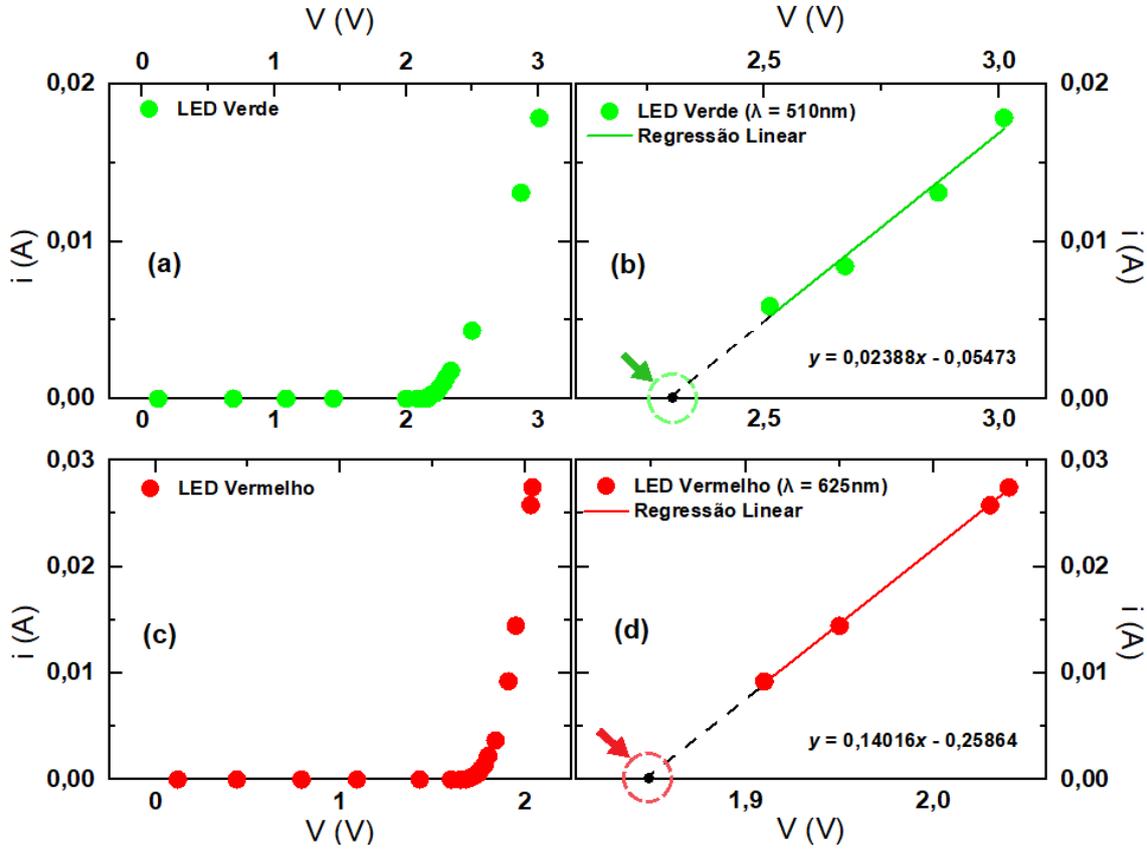


Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 10: Em seguida determinamos a intersecção com o eixo horizontal ($y = 0$) obtendo, assim, o valor de V_c para o LED azul. Com essa informação, utilizamos a equação $h = \left| \frac{\lambda e V_c}{c} \right|$ para determinarmos a constante de Planck. Após isso, repetimos esse mesmo procedimento experimental realizado para os LEDs verde e vermelho.

A Figura A.24 mostra os resultados obtidos para os LEDs verde e vermelho. Em (a) temos o gráfico dos dados experimentais obtidos para o LED verde. Em (b) tem-se o gráfico da reta que melhor se ajusta aos dados experimentais para o mesmo LED. Em (c) e (d) temos a situação correspondente para o LED vermelho. Os resultados experimentais para os três LEDs utilizados estão compilados na Tabela A.2.

Figura A.24: Em (a) e (b) temos os gráficos dos dados experimentais e da regressão linear obtidos para o LED verde. Em (c) e (d) temos os gráficos dos dados experimentais e da regressão linear obtidos para o LED vermelho. As linhas tracejadas em (b) e (d) indicam as extrapolações lineares e os círculos as intersecções das retas com os eixos de tensões elétricas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela A.2 a seguir é possível notar os dados experimentais obtidos para a tensão de corte V_c dos LEDs azul, verde e vermelho, além dos resultados da constante de Planck e seus erros experimentais relativos para cada caso.

Tabela A.2: Dados experimentais obtidos para a tensão de corte V_c dos LEDs azul, verde e vermelho, resultados da constante de Planck, e erros experimentais relativos.

LED	$\lambda (\times 10^{-9})$	$V_c (V)$	$h (\times 10^{-34} J \cdot s)$	Erro (%)
Azul	475	2,58	6,54	1,36
Verde	510	2,29	6,23	4,68
Vermelho	625	1,85	6,17	5,99
$\bar{h} (\times 10^{-34} J \cdot s)$			6,31	
$Erro \bar{h} (\%)$			5,01	

O valor médio \bar{h} obtido para a constante de Planck foi de $6,31 \times 10^{-34} J \cdot s$ e o seu erro relativo de 5,01%. Através da análise dos resultados experimentais apresentados da constante de Planck para cada um dos LEDs utilizados, é possível notar nitidamente um maior erro relativo para os LEDs verde (4,68%) e vermelho (5,99%) em relação ao valor obtido para o LED azul (1,36%).

Embora o erro experimental encontrado para o LED verde seja aproximadamente 3,44 vezes superior ao erro encontrado para o LED azul, e o erro encontrado para o LED vermelho seja algo em torno de 4,4 vezes superior em relação ao mesmo LED, os resultados apresentados são satisfatórios se comparados com os encontrados na literatura para esse mesmo modelo de experimento (CAVALCANTE & HAAG, 2005; OLIVEIRA, 2019).

Os diferentes erros obtidos podem estar relacionados à sensibilidade do experimento, pois caso houvesse um menor incremento na tensão elétrica seria possível coletar mais pontos experimentais e conseqüentemente obter uma estimativa melhor para a equação da reta que melhor ajusta esses pontos. Um resultado melhor obtido para o LED azul pode ter sido proveniente do fato da sua tensão de corte V_c ser superior aos obtidos para os LEDs verde e vermelho, de modo a contribuir para uma redução da relação sinal-ruído do sistema.

Embora não tenha sido algo observado em nossos resultados, o possível uso de LEDs que se utilizem do processo de fluorescência (ver seção A.4.1) é um fator que deve ser levado em consideração. Além dos detalhes anteriormente citados, saber exatamente qual é a frequência predominante do espectro de emissão de luz do LED é fundamental para assegurar melhores resultados. Uma possibilidade para se obter essa informação é tendo-se acesso ao *datasheet* elaborado pelo fabricante do LED ou realizar algum experimento de espectrometria.

Em relação ao registro dos dados na planilha eletrônica, é possível automatizar tal processo usando, por exemplo, o *software* PLX-DAQ que permite que os dados sejam transferidos automaticamente e em tempo real da plataforma Arduino para o *Microsoft Excel*. Com esse procedimento, além de agilizar a análise dos dados e obtenção dos resultados experimentais, os alunos poderão visualizar em tempo real a geração de um gráfico da curva característica do LED.

Considerando-se o fato deste ser um experimento de cunho pedagógico, de baixo-custo e fácil aquisição dos materiais, podemos concluir que os resultados obtidos são satisfatórios, permitindo que este seja aplicado em um contexto de sala de aula do Ensino Médio. Desse modo, poderá contribuir para o processo de ensino-aprendizagem de física Moderna e Contemporânea nas escolas de nível médio em um contexto de experimentação, além de possibilitar aos alunos o contato com uma tecnologia acessível que envolve conhecimentos de eletrônica e programação.

A.4.2 Questionário da Aula 3 – Atividade 2 (sugestão de gabarito)

a) O que é a constante de Planck?

A constante de Planck é uma constante fundamental da física utilizada para determinar a quantização de energia. Ela está relacionada com a quantidade de energia contida em um quanta (ou pacote) de radiação e a frequência dessa radiação. A sua descoberta foi fundamental para o nascimento da Mecânica Quântica.

b) O que é um Corpo Negro? Por que o seu estudo foi importante para o desenvolvimento da Mecânica Quântica?

O Corpo Negro é um absorvedor e emissor ideal de energia. Utilizando-se a Física Clássica não foi possível obter a curva teórica que descreve o espectro de radiação eletromagnética emitido por um Corpo Negro. Somente com o surgimento da Física Quântica foi possível obter satisfatoriamente essa curva.

c) Qual a importância da constante de Planck para o nascimento da Mecânica Quântica?

A descoberta dessa constante fundamental da física permitiu obter de modo satisfatório a curva teórica que descreve o espectro de radiação eletromagnética emitido por um Corpo Negro.

d) Sabe-se que o comprimento de onda do raio-X é menor que o comprimento de onda da micro-onda a Energia de radiação ε de Planck é dada pela seguinte equação:

$$\varepsilon = hf = \frac{hc}{\lambda},$$

no qual ε é a energia de radiação, h , é a constante de Planck, cujo valor é $6,63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$, f , é a frequência da luz irradiada em s^{-1} , c é a velocidade da luz no vácuo ($\approx 3,0 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), e λ é o comprimento de onda da luz irradiada em m .

Desse modo, analisando-se a equação acima, o que se pode afirmar sobre a energia de uma onda eletromagnética e o seu comprimento de onda? A energia do raio-X é maior ou menor que a energia de uma micro-onda?

Pode-se afirmar que a energia de uma onda eletromagnética é inversamente proporcional ao seu comprimento de onda. Desse modo, a energia do raio-X é maior que a energia da micro-onda.

- e) O que você entende por tensão de corte do LED? Por que ela é importante nesse experimento para se determinar a constante de Planck?

A tensão de corte do LED, V_c , é a mínima tensão necessária aplicada no LED para que este comece a emitir luz (fóton). Ela é importante nesse experimento, pois, através da determinação do seu valor e usando a equação $E = |eV_c| = hf$, no qual E é a energia do fóton emitido pelo LED, e é a carga do elétron, e f é a frequência da luz emitida, é possível obter experimentalmente o valor da constante de Planck h .

- f) Entre a atividade realizada com o simulador e a atividade realizada com a plataforma Arduino, qual situação o fez aprender mais? O simulador? A plataforma Arduino? Ou o conjunto simulador-plataforma Arduino? Por quê?
-
-
-
-

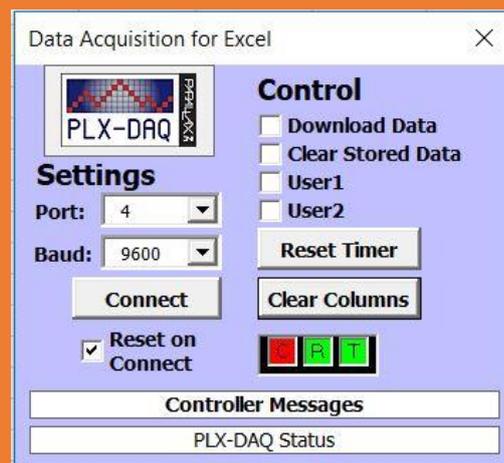
A.4.3 Implantação do Algoritmo no Arduino e como utilizar o *software* PLX-DAQ para a transferência automática de dados para o *Microsoft Excel*

A seguir, tem-se o algoritmo a ser implementado na plataforma Arduino para a realização da coleta dos dados experimentais relacionados à aula 2. Cada linha de comando possui um comentário com a finalidade de facilitar o entendimento do código. Essas linhas podem ser utilizadas para comunicar o Arduino com a planilha Excel por meio do *software* PLX-DAQ.

Para utilizar o PLX-DAQ com o Arduino, siga os seguintes passos:

1. Baixe o PLX-DAQ no site da empresa Parallax (<https://www.parallax.com/plxdaq>) e instale-o no seu computador;
2. Conecte o cabo do Arduino ao seu computador através da porta USB;
3. Abra o *software* PLX-DAQ e na janela da interface do *Data Acquisition for Excel* (Aquisição de Dados para o Excel) conforme pode ser observado na Figura A.25, e na guia de seleção *Port* (Porta de comunicação) selecione a porta serial (porta COM) que está sendo utilizada pelo Arduino. Na guia de seleção *Baud* selecione o valor de 9600 para a taxa de transferência de dados.

Figura A.25: Janela da interface do *Data Acquisition for Excel* do PLX-DAQ.



4. Clique em *Connect* (conectar) e se iniciará a transferência em tempo real dos dados coletados pelo Arduino para a planilha do Excel. A partir disso, será possível plotar um gráfico em tempo real.

Algoritmo a ser implementado no Arduino

```
// double: função que permite armazenar um número real com dupla precisão
double sinal_0; // Armazena a variável sinal_0
double sinal_1; // Armazena a variável sinal_1
double V0; // Armazena a variável V0
double V1; // Armazena a variável V1
double V_led; // Armazena a variável V_led
double I_led; // Armazena a variável I_led
int Linha = 0; // Armazena a variável Linha como um número inteiro

// void setup: configura a porta serial para comunicação com o computador
void setup() {

    Serial.begin(9600); /* configura a porta serial para comunicação com o
computador com uma velocidade de transferência de dados de 9600 bits por segundo*/
    Serial.println("CLEARDATA"); // Limpa os dados da planilha Excel
    Serial.println("LABEL, Linha, V(V), i(A)"); /* cria uma coluna na planilha
do Excel com os nomes de Linha, V(V) e i(A) */
    pinMode(INPUT, A0); // Configura a porta analógica A0 como entrada
    pinMode(INPUT, A1); // Configura a porta analógica A1 como entrada

}

/* void loop: instruções que serão executadas repetidamente */
void loop() {

    sinal_0 = analogRead(A0); /* Lê o sinal analógico A0 e armazena na variável
sinal_0 */
    V0 = (sinal_0*4.91/1023); /* Converte o valor armazenado na variável sinal_0
para um valor de tensão e armazena-o na variável V0 */
```

```
sinal_1 = analogRead(A1); /* Lê o sinal analógico A0 e armazena na variável
sinal_0 */
V1 = (sinal_1*4.91/1023); /* Converte o valor armazenado na variável sinal_1
para um valor de tensão e armazena-o na variável V1 */
V_led = (V0-V1); /* Calcula o valor da tensão aplicada no LED e armazena-o
na variável V_led */
I_led = (V1)/100; /* Calcula a corrente elétrica do resistor ( a mesma do LED) e
armazena na variável I_led */
Linha++; // Incrementa 1 no valor da variável Linha

Serial.print(" DATA, "); // Cria uma legenda para as variáveis impressas
Serial.print(Linha); // Imprime o valor da variável Linha
Serial.print(", "); // Separa em uma coluna o valor da variável Linha
Serial.print(V_led); // Imprime o valor da variável V_led
Serial.print(", "); // Separa em uma coluna o valor da variável V_led
Serial.println(I_led, 5); /* Imprime no monitor serial o valor da variável I_led
com 5 casas decimais */

delay(5000); /* Gera um tempo de espera de 5000 milissegundos (5 segundos)
antes de repetir a execução do programa*/

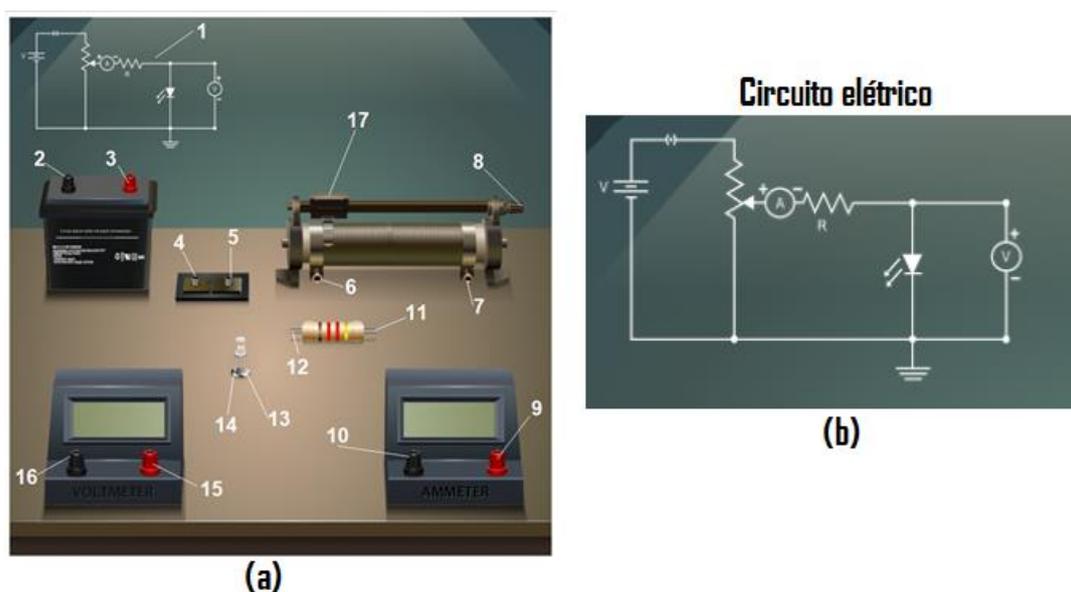
}
```

MATERIAL DO ESTUDANTE

A.5 ROTEIRO DA AULA 2: ATIVIDADE 1 - DETERMINANDO A CONSTANTE DE PLANCK COM UM SIMULADOR VIRTUAL

Nesta atividade apresentamos um simulador virtual¹⁰ para determinar a constante de Planck. Este simulador consiste em um circuito elétrico cujos componentes e esquematização podem ser observados nas Figuras A.26(a) e (b). Para que a atividade seja executada corretamente, oriente os alunos para seguirem as orientações do(a) professor(a).

Figura A.26: (a) *Print* da tela do simulador virtual para se determinar a constante de Planck. (b) Circuito elétrico a ser montado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir, tem-se a descrição dos componentes do circuito elétrico ilustrados na Figura A.26(a).

1. Circuito a ser montado;
2. Polo negativo da bateria;
3. Polo positivo da bateria;
4. Entrada do sinal positivo do conector;

¹⁰ O simulador virtual está disponível no seguinte endereço eletrônico: http://mpv-au.vlabs.ac.in/modern-physics/Determination_of_Plancks_Constant/experiment.html.

5. Saída do sinal negativo do conector;
6. Entrada do sinal positivo do reostato;
7. Entrada do sinal negativo do reostato;
8. Saída do sinal positivo do reostato;
9. Entrada do sinal positivo do amperímetro;
10. Saída do sinal positivo do amperímetro;
11. Entrada do sinal no resistor;
12. Saída do sinal no resistor;
13. Terminal positivo do LED;
14. Terminal negativo do LED;
15. Terminal positivo do voltímetro;
16. Terminal negativo do voltímetro;
17. Cursor do reostato.

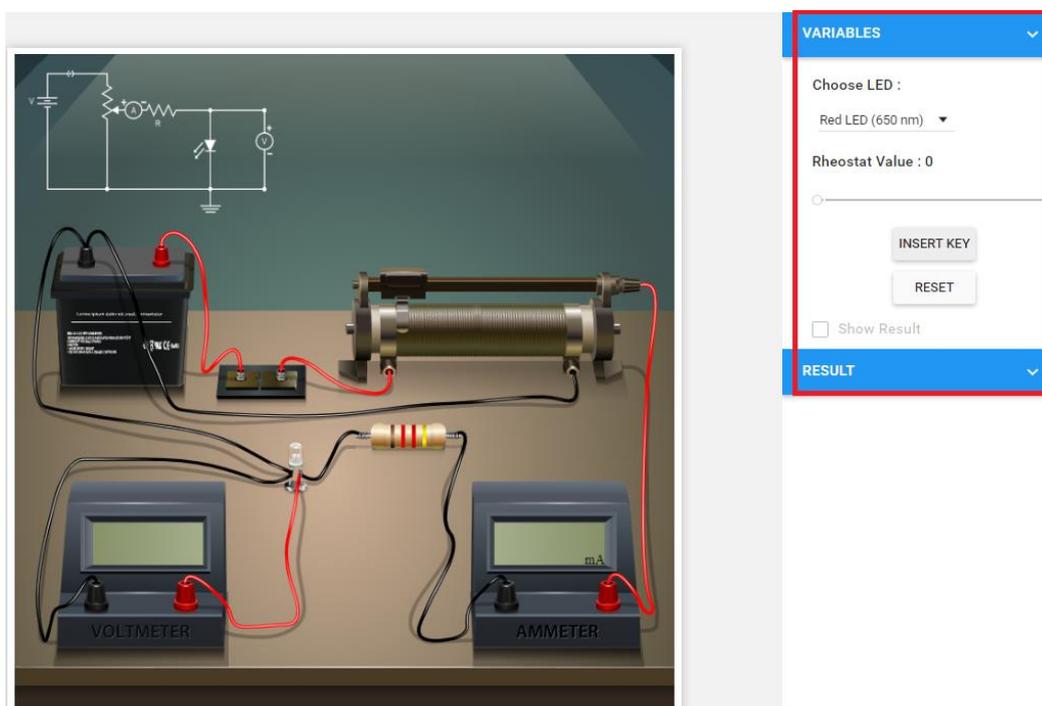
Esse experimento tem como objetivo a obtenção da tensão de corte V_c do LED. A partir dessa e de outras informações que posteriormente serão apresentadas, será possível determinar a constante de Planck. Um passo a passo de como utilizar o simulador virtual para coletar os dados experimentais foi apresentado a seguir.

Passo 1: Acesse o seguinte endereço eletrônico: http://mpv-au.vlabs.ac.in/modern-physics/Determination_of_Plancks_Constant/experiment.html. Ao acessá-lo, você encontrará o simulador ilustrado na Figura A.26(a).

Passo 2: Com a tela do simulador aberta no monitor do computador, posicione o ponteiro do mouse sobre os itens 2 a 17 ilustrados na Figura A.26(a). Note que o ponteiro se transforma em uma pequena mão . Ao clicar e manter pressionado o botão esquerdo do mouse sobre cada conector, verifique que é possível arrastar um fio condutor e que ao fazer isso uma seta verde  aparece no local em que o fio deverá ser conectado.

Passo 3: Monte no simulador o circuito elétrico da Figura A.26(b). Caso tenha dúvidas de como montar o circuito, execute a montagem conforme é ilustrado na Figura A.27.

Figura A.27: Montagem do circuito elétrico da Figura A.26(b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 4: Conforme pode ser notado na Figura A.27, no interior do retângulo vermelho situado na parte lateral superior do *print* da tela do simulador, abaixo de **Choose LED** (tradução do inglês: selecionar LED), clique com o botão esquerdo do mouse e selecione **Blue LED (LED Azul)**.

Passo 5: Clique com o botão esquerdo do mouse em **INSERT KEY** e note que o voltímetro e o amperímetro ligaram no simulador.

Passo 6: Na barra deslizante localizada abaixo de **Rheostat Value** (tradução do inglês: Valor do Reostato), deslize a barra até o ponto em que no mostrador do amperímetro apareça um valor acima de zero, porém bem próximo de zero.

Passo 7: Faça a leitura do valor da tensão elétrica que aparece no mostrador do voltímetro. Essa tensão é chamada de tensão de corte, V_c . Anote esse valor na Tabela A.3. Realize o mesmo procedimento para os LEDs *green* e *red* (verde e vermelho).

Tabela A.3: Dados experimentais obtidos para a tensão de corte V_c dos LEDs azul, verde e vermelho e valores determinados para a constante de Planck.

LED	$\lambda (\times 10^{-9} m)$	$V_c (V)$	$h (\times 10^{-34} J \cdot s)$
Azul	475		
Verde	510		
Vermelho	625		
		Média \bar{h}	
		Erro \bar{h} (%)	

Passo 8: Por meio da Equação A.3, determine o valor da constante de Planck, h . Nessa equação, λ , é o comprimento de onda da luz emitida pelo LED em metros (Tabela A.3), c é a velocidade da luz, cujo valor é de $3 \times 10^8 m/s$, e e é a carga do elétron, $-1,6 \times 10^{-19} C$.

$$h = \left| \frac{\lambda e V_c}{c} \right| \quad (A.3)$$

Passo 9: Através dos valores anotados na Tabela A.3 e da Equação A.4, obtenha o valor médio para a constante de Planck, \bar{h} , e anote-o na Tabela A.3.

$$\bar{h} = \frac{(h_{azul} + h_{verde} + h_{vermelho})}{3} \quad (A.4)$$

Passo 10: Utilizando o valor médio obtido para a constante de Planck, \bar{h} , e com base no valor da constante de Planck h encontrado na literatura, $6,626 \times 10^{-34} J \cdot s$, use a Equação A.5 para determinar o erro percentual experimental e anote-o na Tabela A.3.

$$Erro(\%) = \left| \frac{(h - \bar{h})}{\bar{h}} \right| \times 100\% \quad (A.5)$$

A.5.1 Questionário da Aula 2 – Atividade 1

a) O que é a constante de Planck?

b) O que é um Corpo Negro? Por que o seu estudo foi importante para o desenvolvimento da Mecânica Quântica?

c) Qual a importância da constante de Planck para o nascimento da Mecânica Quântica?

d) Sabe-se que o comprimento de onda do raio-X é menor que o comprimento de onda da micro-onda a Energia de radiação ε de Planck é dada pela seguinte equação:

$$\varepsilon = hf = \frac{hc}{\lambda},$$

no qual ε é a energia de radiação, h , é a constante de Planck, cujo valor é $6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, f , é a frequência da luz irradiada em s^{-1} , c é a velocidade da luz no vácuo ($\approx 3,0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), e λ é o comprimento de onda da luz irradiada em m .

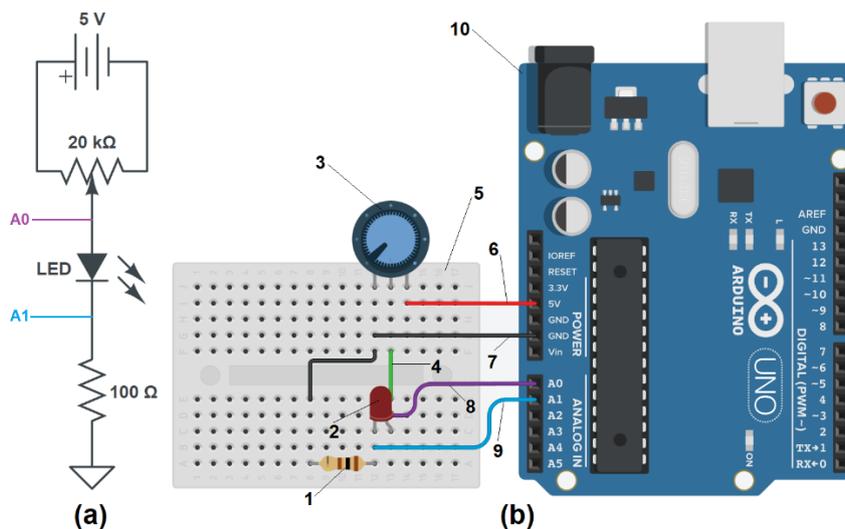
Desse modo, analisando-se a equação acima, o que se pode afirmar sobre a energia de uma onda eletromagnética e o seu comprimento de onda? A energia do raio-X é maior ou menor que a energia de uma micro-onda?

e) O que você entende por tensão de corte do LED? Por que ela é importante nesse experimento para se determinar a constante de Planck?

A.6 ROTEIRO DA AULA 3: ATIVIDADE 2 - DETERMINANDO A CONSTANTE DE PLANCK UTILIZANDO LED E A PLATAFORMA ARDUINO PARA A COLETA DE DADOS

Nesta atividade apresentamos a seguir o experimento onde utilizamos a plataforma Arduino para a aquisição dos dados experimentais e, em seguida, determinar a constante de Planck por meio das curvas características de LEDs. A esquematização e montagem do circuito elétrico em conjunto com o Arduino são apresentados na Figura A.28. Para que a atividade seja executada corretamente, oriente os alunos para seguirem as orientações do(a) professor(a).

Figura A.28: (a) Esquematização do circuito elétrico para se determinar a constante de Planck por meio de LED. (b) Montagem do circuito elétrico em conjunto com a plataforma Arduino.



Fonte: Elaborado pelo autor.

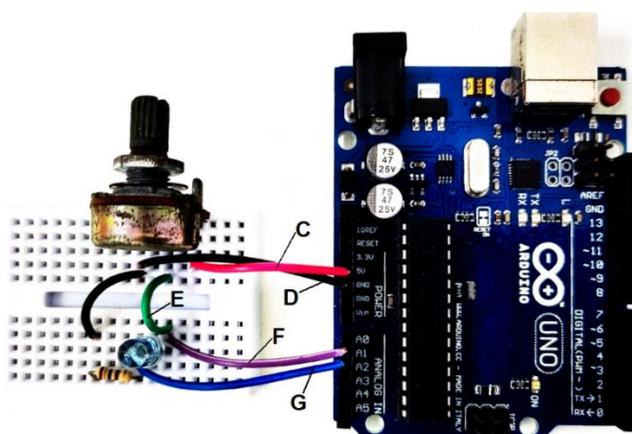
O circuito elétrico montado da Figura A.28(b) é composto pelos componentes a seguir:

1. Resistor de 100Ω ;
2. LED;
3. Potenciômetro de $20\text{ k}\Omega$.

Ainda na Figura 28(b), em 4 temos o fio conectado ao terminal do sinal de tensão elétrica do potenciômetro, em 5 a *protoboard*, em 6 o fio conectado na porta de 5V, em 7 o fio conectado ao aterramento, em 8 o fio conectado à entrada analógica A0, em 9 o fio conectado à entrada analógica A1, e em 10 a plataforma Arduino.

Na Figura A.29, em *A* temos a *protoboard*, em *B* a plataforma Arduino, em *C* o sinal de tensão elétrica de 5V, em *D* o aterramento conectado ao GND do Arduino, em *E* o sinal de tensão elétrica controlado pelo potenciômetro, em *F* o sinal de entrada na porta analógica A0 do Arduino, e em *G* o sinal de entrada na porta analógica A1 do Arduino. A seguir, tem-se uma ilustração da montagem real do circuito na *protoboard* e plataforma Arduino.

Figura A.29: Montagem experimental na *protoboard* do circuito elétrico em conjunto com a plataforma Arduino para a coleta dos dados experimentais. As letras *C*, *D*, *E*, *F* e *G* correspondem aos números 6, 7, 4, 8 e 9 indicados na Figura A.28.

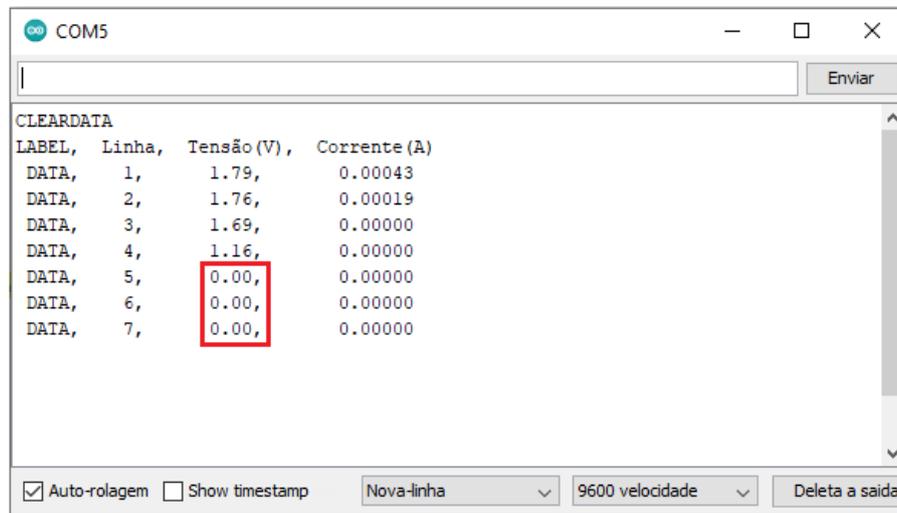


Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir, será mostrado um passo a passo de como utilizar a plataforma Arduino para coletar os dados experimentais e gerar um gráfico da corrente elétrica vs. tensão elétrica do LED. Esse experimento tem como objetivo a construção da curva característica do LED, e a partir da análise visual dessa curva, a obtenção por extrapolação linear da tensão de corte V_c do LED.

Passo 1: Após a montagem do experimento conforme é mostrado na Figura A.29, abra o *Monitor serial* da IDE do Arduino e carregue o código que consta na seção A.4.3. Verifique se os dados da tensão e corrente elétrica do LED estão sendo impressos conforme pode ser observado na Figura A.30.

Figura A.30: Print da tela do *Monitor serial* da IDE da plataforma Arduino com os dados experimentais da tensão e corrente elétrica impressos.



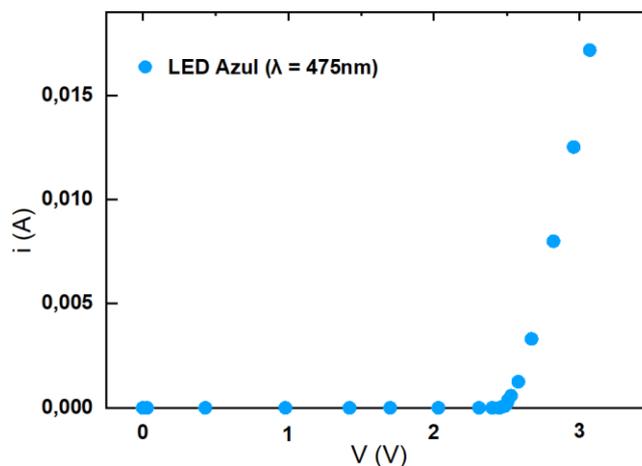
Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 2: Configure a posição do potenciômetro para que o valor da tensão elétrica impresso no *Monitor Serial* seja igual à zero conforme pode ser observado no interior do retângulo vermelho da Figura A.30.

Passo 3: Gire o potenciômetro lentamente e com baixo incremento no sentido em que ocorre o aumento da tensão elétrica nos terminais do LED. Realize a leitura da tensão e corrente elétrica impressa no *Monitor serial*. Anote o valor numa planilha eletrônica e repita o procedimento até o momento em que não seja possível incrementar mais algum passo no potenciômetro.

Passo 4: Utilizando a planilha eletrônica, selecione os dados experimentais e construa um gráfico de dispersão da corrente elétrica i vs. tensão elétrica V conforme pode ser observado na Figura A.31.

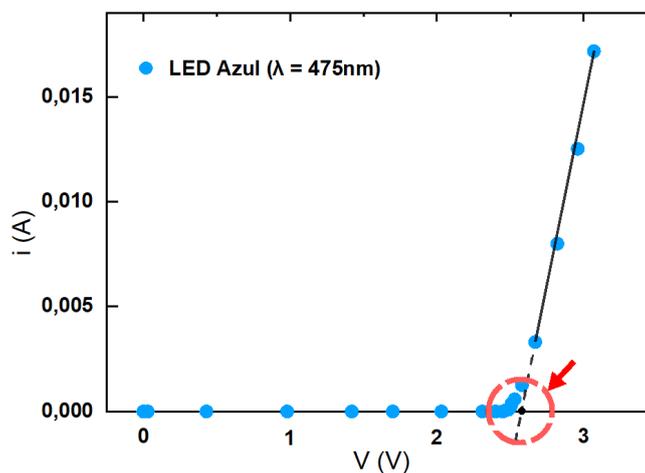
Figura A.31: Gráfico de $i(\text{A})$ vs. $V(\text{V})$ dos dados experimentais coletados com a plataforma Arduino para o LED Azul.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 5: Analise os dados experimentais plotados no gráfico e apenas selecione aqueles que visualmente sugerem estar alinhados de acordo com uma reta. Um exemplo de seleção pode ser observado na Figura A.32. Note que o segmento de reta vermelho ajusta os dados que sugerem estar mais alinhados.

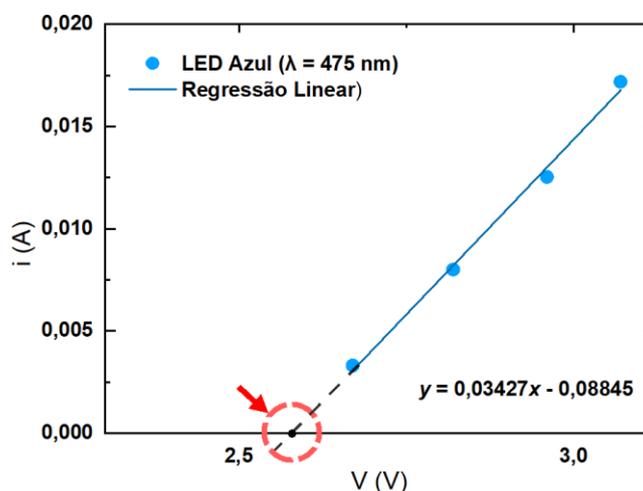
Figura A.32: Gráfico de $i(\text{A})$ vs. $V(\text{V})$ para o LED Azul. Por meio de uma análise visual nota-se que o segmento de reta ajusta os dados que visualmente sugerem estar mais alinhados de acordo com uma reta. A linha tracejada indica a extrapolação linear desse segmento de reta e o interior do círculo em vermelho está o ponto de intersecção da reta com o eixo V .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 6: Após a seleção dos dados experimentais, gere um gráfico de dispersão e obtenha a equação da reta que melhor ajusta os dados selecionados conforme pode ser notado na Figura A.33.

Figura A.33: Gráfico de dispersão de $i(\text{A})$ vs. $V(\text{V})$ dos dados experimentais que visualmente sugerem estar alinhados de acordo com uma reta. Através do método da regressão linear foi obtido a equação da reta que melhor ajusta os dados. Nesta equação, y é a variável da corrente elétrica i e x é a variável da tensão elétrica V aplicada no LED. A linha tracejada indica a extrapolação linear e no interior do círculo em vermelho está o ponto de intersecção da reta com o eixo V .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 7: Na equação da reta obtida no passo anterior e inserida na área do gráfico da Figura A.33, a variável y é a corrente elétrica i e a variável x é a tensão elétrica V . Determine o ponto de intersecção da reta com o eixo x . Nesta situação, o valor da variável x será uma estimativa experimental da tensão de corte V_c do LED ($x=V_c$). Anote na Tabela A.4 o valor da tensão de corte para o LED. Repita o mesmo procedimento experimental para os outros LEDs.

Tabela A.4: Dados experimentais obtidos para a tensão de corte V_c dos LEDs azul, verde e vermelho e valores determinados para a constante de Planck.

LED	$\lambda (\times 10^{-9}\text{m})$	$V_c(\text{V})$	$h (\times 10^{-34}\text{J} \cdot \text{s})$
		Média \bar{h}	
		Erro \bar{h} (%)	

Passo 8: Por meio da Equação A.3, determine o valor da constante de Planck h . Nessa equação, λ , é o comprimento de onda da luz emitida pelo LED em metros (Tabela A.4), c é a velocidade da luz, cujo valor é de $3 \times 10^8 \text{ m/s}$, e e é a carga do elétron, $-1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

$$h = \left| \frac{\lambda e V_c}{c} \right| \quad (\text{A.3})$$

Passo 9: Através dos valores anotados na Tabela A.4 e da Equação A.4, obtenha o valor médio para a constante de Planck, \bar{h} , e anote-o na Tabela A.4.

$$\bar{h} = \frac{(h_{\text{azul}} + h_{\text{verde}} + h_{\text{vermelho}})}{3} \quad (\text{A.4})$$

Passo 10: Utilizando o valor médio obtido para a constante de Planck, \bar{h} , e com base no valor da constante de Planck h encontrado na literatura, $6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, use a Equação A.5 para determinar o erro percentual experimental e anote-o na Tabela A.4.

$$\text{Erro}(\%) = \left| \frac{(h - \bar{h})}{\bar{h}} \right| \times 100\% \quad (\text{A.5})$$

A.6.1 Questionário da Aula 3 – Atividade 2

a) O que é a constante de Planck?

b) O que é um Corpo Negro? Por que o seu estudo foi importante para o desenvolvimento da Mecânica Quântica?

c) Qual a importância da constante de Planck para o nascimento da Mecânica Quântica?

d) Sabe-se que o comprimento de onda do raio-X é menor que o comprimento de onda da micro-onda a Energia de radiação ε de Planck é dada pela seguinte equação:

$$\varepsilon = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

no qual ε é a energia de radiação, h , é a constante de Planck, cujo valor é $6,63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$, f , é a frequência da luz irradiada em s^{-1} , c é a velocidade da luz no vácuo ($\approx 3,0 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), e λ é o comprimento de onda da luz irradiada em m .

Desse modo, analisando-se a equação acima, o que se pode afirmar sobre a energia de uma onda eletromagnética e o seu comprimento de onda? A energia do raio-X é maior ou menor que a energia de uma micro-onda?

e) O que você entende por tensão de corte do LED? Por que ela é importante nesse experimento para se determinar a constante de Planck?

f) Entre a atividade realizada com o simulador e a atividade realizada com a plataforma Arduino, qual situação o fez aprender mais? O simulador? A plataforma Arduino? Ou o conjunto simulador-plataforma Arduino? Por quê?
