TÓPICOS DE FÍSICA EXPERIMENTAL UTILIZANDO PLATAFORMAS VIRTUAIS

Antônio Augusto Gasch Sousa Chaves
Ruan Victor Sousa Dias dos Santos
Walter Duarte de Araújo Filho

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Antônio Augusto Gasch Sousa Chaves
Ruan Victor Sousa Dias dos Santos
Walter Duarte de Araújo Filho

Tópicos de Física Experimental utilizando plataformas virtuais

1ª ed.

Piracanjuba-GO
Editora Conhecimento Livre
Piracanjuba-GO

1ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Chaves, Antônio Augusto Gasch Sousa
C128T Tópicos de Física Experimental utilizando plataformas virtuais
/ Antônio Augusto Gasch Sousa Chaves. Ruan Victor Sousa Dias dos Santos. Walter Duarte de
Araújo Filho. – Piracanjuba-GO

Editora Conhecimento Livre, 2022

122 f.: il

DOI: 10.37423/2022.edcl421

ISBN: 978-65-5367-043-3

Modo de acesso: World Wide Web

Incluir Bibliografia

1. física 2. ,-experimentação 3. ,-experimentos-virtuais I. Chaves, Antônio Augusto Gasch Sousa II.
Santos, Ruan Victor Sousa Dias dos III. Araújo Filho, Walter Duarte de IV. Título

CDU: 530

<https://doi.org/10.37423/2022.edcl421>

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Corpo Editorial

Dr. João Luís Ribeiro Ulhôa

Dra. Eyde Cristianne Saraiva-Bonatto

MSc. Frederico Celestino Barbosa

MSc. Carlos Eduardo de Oliveira Gontijo

MSc. Plínio Ferreira Pires

Editora Conhecimento Livre

Piracanjuba-GO

2022

10.37423/2022.edcl421

PREFÁCIO

A essência da Física está intimamente ligada aos fenômenos da natureza. A capacidade de observação, da formalização das ideias aliadas à Matemática, desempenha um papel fundamental na interpretação do mundo real que nos cerca.

Desse modo, a experimentação induz um papel importante no arcabouço da materialidade dos conceitos, e do vínculo da teoria com a realidade objetiva.

Neste trabalho somos convidados a acompanhar de perto as atividades experimentais envolvendo a Eletricidade, Ondulatória e Física Moderna, realizadas em *plataformas de simulações virtuais PhET-Colorado* sob a minha orientação e supervisão, desenvolvida pelos alunos do Curso de Licenciatura em Física da Universidade do Estado da Bahia. Ao todo são 07(sete) Relatórios experimentais que tratam dos seguintes temas: Lei de Coulomb, Capacitores e Dielétricos, Circuitos Elétricos, Experimento de Young, Modelos Atômicos, Teoria do Corpo Negro, e Efeito Fotoelétrico.

Com muita competência, originalidade e objetividade, os autores transmitem de forma clara os conceitos físicos envolvidos aliados ao formalismo matemático, o que torna a leitura aprazível, e menos árida.

Desse modo, o trabalho ora apresentado, pode servir de modelo para os alunos dos cursos envolvidos com atividades experimentais de Física, o que certamente subsidiará uma incrementação importante na qualidade da produção de textos científicos.

Walter Araújo Filho

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	8
2 PRINCÍPIOS DA LEI DE COULOMB	9
3 MATERIAIS E MÉTODOS	10
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	11
5 CONCLUSÃO.....	18
6 REFERÊNCIAS	20
CAPACITORES E DIELETRICOS.....	21
1 INTRODUÇÃO.....	22
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1 CAPACITÂNCIA E CAPACITORES.....	22
2.2 CIRCUITO DE CAPACITORES.....	25
2.2.1 CAPACITORES EM SÉRIE	25
2.2.2 CAPACITORES EM PARALELO.....	27
2.2.3 DIELETRICOS	29
3 OBJETIVOS	31
4 MATERIAIS E MÉTODOS	31
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1 ÁREA DAS PLACAS.....	32
5.2 DISTÂNCIA ENTRE AS PLACAS	34
5.3 DIELETRICOS	37
5.3 ASSOCIAÇÃO DE CAPACITORES	39
6 CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS	43
CIRCUITOS ELÉTRICOS.....	44
1 INTRODUÇÃO.....	45
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	45
2.1 CORRENTE ELÉTRICA	45

2.2 PRIMEIRA LEI DE OHM	48
2.3 CIRCUITO ELÉTRICO DE CORRENTE CONTÍNUA	49
2.3.1 RESISTORES EM SÉRIE	49
2.3.2 RESISTORES EM PARALELO.....	50
2.3.3 POTÊNCIA EM CIRCUITOS ELÉTRICOS	51
2.3.4 LEIS DE KIRCHHOF PARA CIRCUITOS ELÉTRICOS	52
3 OBJETIVOS	53
4 MATERIAIS E MÉTODOS	53
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.1 RESISTORES EM SÉRIE E PARALELO	54
5.2 POTÊNCIA EM CIRCUITOS ELÉTRICOS	57
5.3 ATIVIDADE PROPOSTA	59
6 CONCLUSÃO.....	62
REFERÊNCIAS	63
O EXPERIMENTO DE YOUNG	64
1 INTRODUÇÃO.....	65
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	66
3 OBJETIVOS	71
4 MATERIAIS E MÉTODOS	71
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
6 CONCLUSÃO.....	75
REFERÊNCIAS	77
MODELOS ATÔMICOS: ÁTOMOS DE THOMSON E RUTHERFORD	78
1 INTRODUÇÃO.....	79
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	80
2.1 ESPECTROS ATÔMICOS	80
2.2 O EXPERIMENTO DE RUTHERFORD	81
2.3 CONSIDERAÇÕES DA FÍSICA CLÁSSICA.....	84
3 OBJETIVOS	85

4 MATERIAIS E MÉTODOS	85
RESULTADOS E DISCUSSÃO	86
5.1 O ÁTOMO BOLO DE PASSAS	86
5.2 O ÁTOMO DE RUTHERFORD	87
6 CONCLUSÃO	90
REFERÊNCIAS	91
A RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO	92
1 INTRODUÇÃO	93
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	95
2.2 CORPO NEGRO	95
2.2 A EQUAÇÃO DE RAYLEIGH-JEANS	96
2.3 A LEI DE PLANCK	98
3 OBJETIVOS	100
4 MATERIAIS E MÉTODOS	100
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	100
6 CONCLUSÃO	103
REFERÊNCIAS	105
EFEITO FOTOELÉTRICO	106
1 INTRODUÇÃO	107
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	108
3 OBJETIVOS	111
4 MATERIAIS E MÉTODOS	111
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	112
6 CONCLUSÃO	118
REFERÊNCIAS	119

FORÇA ELÉTRICA: LEI DE COULOMB

Resumo: O presente trabalho tem como principal objetivo determinar a constante de permissividade elétrica (ϵ_0) no vácuo, através da relação proporcional entre a Força Eletrostática e as variáveis/grandezas manipuláveis fazendo uso da simulação "Lei de Coulomb", disponível plataforma virtual *PhET*. O experimento foi composto em duas etapas, onde a primeira foi a interação e obtenção dos dados do experimento na plataforma. Já o segundo momento consistiu na análise dos dados, onde os resultados encontrados ficaram muito próximos dos valores teóricos devido a operacionalização do experimento ter um caráter virtual o que minimizou os possíveis erros experimentais.

Palavras-chaves: Lei de Coulomb, Permissividade Elétrica, Física Moderna.

1 INTRODUÇÃO

Desde a sua gênese, o *homo sapiens sapiens* pode presenciar, temer, se admirar, ou ponderar sobre as manifestações dos fenômenos elétricos. Os relâmpagos, por exemplo, eram vistos com respeito e sobressalto por nossos antepassados, numa época em que, muitas vezes, eram associados a seres divinos. Atualmente, após a evolução da ciência, sabe-se que tais fenômenos nada mais são que deslocamento de carga elétrica.

Independentemente de ações antrópicas, os fenômenos elétricos podem ser observados em uma noite de tempestade com muitos raios. No próprio corpo humano, também se pode observar a eletricidade, tal como os impulsos elétricos responsáveis pelas transmissões de informações em nosso sistema nervoso.

Séculos de desenvolvimento levam a 1785, quando Charles Coulomb, tendo engendrado a balança de torção, a utilizou para averiguar valores de forças elétricas entre objetos carregados [1]. Esse feito o permitiu expressar a lei que viria a ser batizada em sua menção:

"A força de atração entre cargas elétricas é proporcional ao produto de suas cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa [2]"

De forma análoga às forças gravitacionais, as forças elétricas são atuantes em corpos que não estão em contato mútuo. Para os dois casos, há um campo, o campo de força, que é capaz de influenciar corpos - de grande massa e eletrizados, respectivamente.

Nas redondezas de um corpo qualquer de massa considerável, as propriedades do espaço são alteradas. Assim, um corpo externo, ao ser aproximado para a região, será submetido a uma força [3]. Dessa forma, pode-se entender que um corpo qualquer, nesse sistema, estará interagindo não com o corpo massivo, mas sim com o campo.

Hewitt (2010), afirma que o campo desempenha o papel de um intermediário na força entre os corpos. Da mesma forma como o espaço ao redor de um planeta ou de outros corpos massivos estão preenchidos por um campo gravitacional, o espaço ao redor de cada corpo eletricamente carregado está também preenchido por um campo elétrico - uma aura energética que se estende pelo espaço.

Essa concepção direciona para a compreensão do comportamento das cargas em movimento e das forças entre corpos isolados, estacionários e eletrizados. Como uma perturbação do campo, esse movimento das cargas é transmitido aos corpos vizinhos que estejam eletrizados. Em outras palavras,

esses corpos eletrizados, quando acelerados, originam perturbações que se propagam com a rapidez da luz [3].

Assim, Hewitt (2010) prossegue: "O campo elétrico é uma espécie de armazém de estocagem de energia, e a energia pode ser transportada a grandes distâncias por um campo elétrico. A energia que se propaga com um campo elétrico pode ser direcionada e guiada através de fios metálicos. Ou pode também estar atrelada a um campo magnético, sendo transportada através do vácuo." [3].

2 PRINCÍPIOS DA LEI DE COULOMB

A Lei de Coulomb estabelece a relação entre a força elétrica de duas partículas em razão da distância que há entre elas, ou seja, descreve a interação eletrostática que há entre as partículas eletricamente carregadas. Em, 1785, de maneira experimental, Charles Augustin de Coulomb deduziu a seguinte relação [4]:

$$\vec{F}_e = k_e \frac{|q_1| |q_2|}{r_{1,2}^2} \hat{r}_{1,2} \quad (1.1)$$

Onde k_e é a constante de proporcionalidade, q_1 e q_2 as magnitudes das cargas elétricas das partículas e r o módulo da distância que as separa.

E com base nos experimentos, foi percebido que:

- Cargas que apresentavam o mesmo sinal, se repelem;
- Cargas de sinal contrário se atraem

A lei de Coulomb também pode ser utilizada para objetos de maiores dimensões para quais o modelo de partículas pode ser aplicado [1].

A força elétrica, como a gravitacional, diminui com o inverso do quadrado da distância entre os corpos interagentes. A mais importante diferença entre as forças elétrica e gravitacional é que as elétricas podem ser atrativas ou repulsivas, enquanto as forças gravitacionais são apenas atrativas [3].

No entanto, a Lei de Coulomb apresenta certas limitações [2].

- A distribuição das cargas deve ser esfericamente simétrica
- As cargas devem ser pontuais
- As cargas devem estar em repouso em relação a outra.

A constante k_e recebeu assim o nome de Constante de Coulomb e tem o seu valor, no SI:

$$k_e = 8,987551792 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

Há também outra constante associada à Constante de Coulomb que é a Constante de permissividade elétrica (ϵ_0), dada pela seguinte fórmula [1]:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4k_e\pi} \quad (1.2)$$

Atualmente, o valor para ϵ_0 é de:

$$\epsilon_0 = 8,854187817 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do experimento, fez-se uso da plataforma de simulações virtuais PhET Colorado - Lei de Coulomb [5]:

Figura 1: Tela de início do experimento.

Fonte: print screen da Plataforma de simulações virtuais PhET Colorado - Lei de Coulomb.

Após a familiarização com o ambiente virtual, seguiu-se o desenvolvimento do mesmo baseado em um roteiro experimental que acompanha o link.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do ambiente virtual, foi verificado que é possível manipular algumas grandezas: distância entre as partículas elétricas (d), magnitude da carga q_1 , e magnitude da carga q_2 . Ao alterar esses valores, o programa exibe a força elétrica que atua sobre as cargas:

Figura 2: (A) Exibição dos valores das forças elétricas atuantes em cada partícula; (B) Régua virtual em *cm* onde é possível variar a distância das cargas; (C) Painel para alterar os valores das cargas de cada partícula. Fonte: *print screen* da Plataforma de simulações virtuais *PhET Colorado* - Lei de Coulomb.

Nesse primeiro momento, fez-se o estudo sobre as alterações dos valores das distâncias. Ao manipular o *applet*, verificou-se que quanto maior a distância entre as cargas, menor é a força elétrica que atua sobre elas.

Assim, mantendo os mesmos valores para as cargas, foi feita a alteração das distâncias e os dados foram tabelados:

Tabela 1: Tabela com as variações das distâncias.

$q_1 (\mu C)$	$q_2 (\mu C)$	$d (m)$	$F_e (N)$
2	-4	0,02	179,751
2	-4	0,03	79,889
2	-4	0,04	44,938
2	-4	0,05	28,760
2	-4	0,06	19,972
2	-4	0,07	14,674
2	-4	0,08	11,234
2	-4	0,09	8,877
2	-4	0,1	7,190

Percebendo que, ao se dobrar a distância entre elas, sem alterar os valores para as car-gas ($q_1=2 \mu C$ e $q_2= -4 \mu C$) a força elétrica é diminuída quatro vezes. Assim, foi elaborado um gráfico para se estudar a dependência da Força Elétrica (F_e) com a distância (d) foi o se-guinte:

Figura 3: Gráfico da força elétrica versus distância ($F_e \times d$).

Fonte: autoria própria.

O gráfico sugere uma relação do tipo:

$$F_e \propto a d^b \quad (3.1)$$

Para determinar a e b , o gráfico fada força x distância foi linearizado utilizando o programa *MS Excel* e *Originlab* [6] obteve-se a equação da curva com os seguintes parâmetros:

Tabela 2: Tabela adaptada com base nos dados no Originlab v9.0

		a		b	
		Valor	Erro	Valor	Erro
F(N)	0,72	1,65x10 ⁻⁶		-2	6,08x10 ⁻⁶

Assim, a equação pode ser reescrita como:

$$F_e \propto d^{-2} \quad (3.2)$$

Agora, fixando o valor da distância em 0,1 m, e o valor da carga $q_2 = -4 \mu C$. A variação foi feita sobre o valor de q_1 . Os valores foram observados e colocados na seguinte tabela:

Tabela 3: Tabela com as variações dos valores de q_1 .

$q_1 (\mu C)$	$q_2 (\mu C)$	$d (m)$	$F_e (N)$
2	-4	0,1	7,19
3	-4	0,1	10,785
4	-4	0,1	14,38
5	-4	0,1	17,9750
6	-4	0,1	21,57
7	-4	0,1	25,165
8	-4	0,1	28,76
9	-4	0,1	32,355
10	-4	0,1	35,95

E com os dados, o seguinte gráfico $F_e(N) \times q_1(\mu C)$ referente a eles foi obtido:

Figura 4: Gráfico com a relação $F_e \times q_1$.

Fonte: autoria própria.

Percebe-se então que há uma relação linear. Onde se pode inferir que:

$$F_e \propto q_1 \quad (3.3)$$

O mesmo foi feito para a carga q_2 . Fixando o valor de q_1 em $2 \mu C$ e a distância em $0,1 \text{ m}$. Os seguintes valores foram obtidos:

Tabela 4: Tabela com as variações dos valores de q_2 .

$q_1(\mu C)$	$q_2(\mu)$	$d(m)$	$F_e(N)$
2	-2	0,1	3,595
2	-3	0,1	5,393
2	-4	0,1	7,190
2	-5	0,1	8,988
2	-6	0,1	10,785
2	-7	0,1	12,583
2	-8	0,1	14,380
2	-9	0,1	16,178
2	-10	0,1	17,975

Com os dados da tabela3, o seguinte gráfico $F_e \times q_2$ foi obtido:

Figura 5: Gráfico obtido com os valores para $F_e \times q_2$. Fonte: autoria própria.

O que é possível perceber também uma relação linear:

$$F_e \propto -q_2 \quad (3.4)$$

Então, com os dados obtidos, a equação que relaciona a força elétrica com os valores das cargas e a distância entre elas será:

$$F_e \propto \frac{|q_1| |q_2|}{d^2} \quad (3.5)$$

Assim,

$$F_e \propto \frac{|q_1| |q_2|}{d^2} \Rightarrow F_e = k_e \frac{|q_1| |q_2|}{d^2} \quad (3.6)$$

Deixando a constante de proporcionalidade isolada,

$$k_e = \frac{d^2}{|q_1| |q_2|} \quad (3.7)$$

Substituindo os valores da tabela 1 na Eq. (3.7), o valor obtido para k_e foi:

$$k_e = 9,9875$$

Com o cálculo do desvio e com a respectiva unidade, o valor de k_e é dado por:

$$k_e = (9,9875 \pm 0,0001) \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

De acordo com a literatura, o campo elétrico pode ser afetado pelo meio. A constante física que descreve como um campo afeta e é afetado por um meio é denominada permissividade elétrica (ϵ).

Para o experimento, a permissividade elétrica é a do vácuo (ϵ_0), assim:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \Rightarrow \epsilon_0 = \frac{1}{4k\pi} \quad (3.8)$$

De posse do valor de k obtido experimentalmente, é possível determinar o ϵ_0 . Substituindo o valor de K na Eq. (3.9):

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4 \cdot 9,9875 \pi} = 8,8542 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}$$

Com base no ϵ_0 teórico, o erro percentual foi calculado com base na seguinte equação:

$$\text{Erro}\% = \frac{\epsilon_{0\text{valor experimental}}}{\epsilon_{0\text{valor teórico}}} \times 100 \quad (3.9)$$

O erro percentual encontrado foi de 0%. Por se tratar de um experimento virtual, os valores estão coerentes com os apresentados na literatura o que permite um acerto de 100%.

Deste modo, o experimento foi também aplicado a escalas inferiores, à níveis atômicos. Para isso, usando como base o átomo de Hidrogênio, utilizou-se da opção “Escala Atômica” no *applet* para tal análise.

Figura 6: Experimento da Lei de Coulomb na opção escala atômica.

Fonte: print screen da plataforma de simulações virtuais PhET Colorado - Lei de Coulomb.

Como é sabido, o átomo de hidrogênio é constituído por um próton e um elétron. Essas partículas, segundo o que é definido pelo Raio de Bohr (raio de órbita de ordem 1) e é definida como [7]:

$$a_0 = \epsilon_0 \frac{h^2}{\pi m e^2}$$

Onde ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo, h a constante de Planck, m a massa do elétron e e a carga do elétron. Essa constante vale:

$$a_0 = 5,3 \times 10^{-11} \text{ m}$$

$$d = a_0 = 5,3 \times 10^{-11}$$

$$q_1 = q_2 = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Como já foi dado, a força elétrica entre próton e elétron é calculada:

$$F = k \frac{p \cdot e}{d^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F = 9 \cdot 10^9 \frac{(1,602 \times 10^{-11})^2}{(5,3 \times 10^{-11})^2}$$

$$\therefore F = 9,12 \times 10^{-8} \text{ N} \quad (3.10)$$

É possível fazer um estudo comparativo com a força gravitacional. Sabendo que:

$$F_G = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (3.11)$$

A massa do próton é $m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, a massa do elétron é $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ e considerando a distância a_0 , substituindo na Eq. (3.12), temos:

$$F_G = 6,67 \times 10^{-11} \frac{1,67 \times 10^{-27} 9,1 \times 10^{-31}}{(5,3 \times 10^{-11})^2}$$

$$\therefore F_G = 3,6 \times 10^{-47} \text{ N}$$

Logo, é possível obter a ordem da razão entre elas:

$$\frac{F_e}{F_G} \equiv 10^{39} \quad (3.12)$$

Assim, é possível perceber que no domínio atômico, a força gravitacional pode ser desprezada.

5 CONCLUSÃO

Destarte, com o desenvolvimento do experimento virtual, pôde-se verificar a sua corroboração com o enunciado da Lei de Du Fay, o qual expressa que a força elétrica pode ser atrativa: quando as cargas de sinais diferentes são utilizadas, ou pode ser repulsiva: quando se usa cargas com o mesmo sinal. Foi possível também, através do uso da Lei de Coulomb, determinar a constante de permissividade elétrica do vácuo. Além disso, realizou-se o estudo comparativo entre a força elétrica e a força

gravitacional entre um próton e um elétron, levando-se em consideração a semelhança matemática das equações e a magnitude dessas forças.

6 REFERÊNCIAS

- [1] SERWAY J Raymond A; JEWETT. Princípios de física: eletromagnetismo. São Paulo: edi-tora. 2011.
- [2] HELERBROCK R. Charles Coulomb; Acesso em: 09/04/2021.
<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/charles-coulomb.htm>.
- [3] HEWITT PG. Física Conceitual. 12º. Porto Alegre: Bookman; 2010.
- [4] COULOMB C. Histoire de l'academie royale des sciences. Premier et second memoire sur l'electricite et le magnetisme, ed by AR des Sciences, Paris, France: L'Imprimerie Royale. 1785:569–611.
- [5] PhET. Lei de Coulomb; Acesso em: 08/04/2021.https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/coulombs-law.
- [6] Originlab. OriginPro 9.0. Origin Lab Corporation Northampton, MA; 2013.
- [7] SEARS FW, Zemansky MW, Young HD, Freedman RA. Física IV: Ótica e física moderna. Pearson Education do Brasil São Paulo; 2004.

CAPACITORES E DIELÉTRICOS

Resumo: O presente trabalho tem como principal objetivo fazer o estudo experimental dos capacitores de placas paralelas utilizando o ambiente de simulação virtual *PhET*. Desse modo, foi possível determinar a relação que há entre a capacitância com a distância entre as placas, bem como a capacitância com a área das placas. Verificou-se ainda, a influência de um dielétrico nos valores quantitativos da capacitância. Os resultados experimentais atestam com o que foi visto na teoria.

Palavras-chaves: capacitância, capacitores de placas paralelas, dielétricos.

1 INTRODUÇÃO

Desde a descoberta da carga elétrica, na antiga Grécia, ao longo do tempo, os cientistas vêm procurando uma forma de armazená-la para que possa ser utilizada em um outro momento. De fato, produzimos a energia elétrica em larga escala, mas só temos como armazená-la em quantidades pequenas.

Em 1746, o físico Pieter van Musschenbroek (1692-1761), na cidade holandesa de Leyden, montou um dispositivo que conseguia, por um certo tempo, armazenar carga elétrica. Tal dispositivo ficou conhecido como garrafa de Leyden [1].

E com base no princípio da garrafa de Leyden, com o intuito de armazenar energia elétrica, dispositivos chamados capacitores foram criados [2]. O mais simples desses dispositivos é constituído de duas placas condutoras separadas por uma pequena distância, sem se tocarem [2], ou seja, um capacitor é um sistema constituído por dois condutores separados por um isolante (ou imersos no vácuo) [3].

Dessa forma, é importante assimilar que capacitância é uma capacidade. Para isso, pode-se evocar conceitos semelhantes a partir da palavra-chave semelhante: capacidade. A capacidade de uma caixa é o volume de material que pode ser posto nela. A capacidade de calor de um objeto é a quantidade de energia que ele pode armazenar por unidade de variação de temperatura. Assim, a capacitância (ou a capacidade eletrostática) de um capacitor é "a quantidade de carga que o capacitor pode armazenar por unidade de diferença de potencial"[4].

Os capacitores são encontrados na maioria dos circuitos eletrônicos: células fotovoltaicas, desfibriladores e grandes lasers, por exemplo. A energia que é armazenada em um capacitor advém do trabalho que é necessário para carregá-lo. Tal energia está armazenada no campo elétrico que se cria entre suas placas, pois o campo elétrico é uma espécie de armazém de estocagem de energia [2].

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CAPACITÂNCIA E CAPACITORES

De modo geral, os dispositivos eletrônicos portáteis dos quais temos contato diariamente nos últimos tempos, contém um ou mais capacitores e, atualmente, a vida parece até inimaginável sem a utilização desses aparelhos. Logo, o estudo de tais componentes se faz relevante. O potencial (V) de um dado condutor isolado devido a sua carga, é proporcional a essa carga (Q) e depende da forma e tamanho do condutor. Assim, quanto maior é a área superficial de um condutor, mais carga ele pode armazenar.

Por exemplo, se o potencial é escolhido como zero no infinito, o potencial de um condutor esférico de raio R e carga Q será dado por [5]:

$$V = k \frac{Q}{R} \quad (2.1)$$

Um capacitor é um dispositivo que consiste em dois condutores, um com carga Q e outro com carga $-Q$. A razão da carga pela diferença de potencial entre dois capacitores é denominada capacitância C , que é dada pela equação [5]:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.2)$$

Logo, a capacitância se torna uma medida da capacidade de armazenamento de carga.

Para fazer a relação do campo elétrico entre as placas de um capacitor à carga Q de uma das placas, faz-se uso da Lei de Gauss. Supondo a seguinte Figura:

Figura 1: Superfície gaussiana sobre o capacitor de placas paralelas.

Fonte: (HALLIDAY, D. et al, 2000).

Desse modo, temos:

$$\epsilon_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = Q \quad (2.3)$$

Onde Q é a carga envolvida por uma superfície gaussiana e $\oint \vec{E} \cdot d\vec{A}$ é o fluxo elétrico que atravessa a superfície gaussiana.

Para a Figura (1), temos a seguinte solução:

$$Q = \epsilon_0 E A \quad (2.4)$$

onde A é a área da parte da superfície gaussiana através da qual existe um fluxo [6].

Para o cálculo da tensão (V), a diferença de potencial entre as placas de um capacitor relaciona-se com o campo elétrico. Através da equação, obtém-se a relação [6]:

$$V - V_0 = - \int_{s_0}^s \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (2.5)$$

Para o trajeto onde coincide com a linha de campo elétrico, da placa negativa à placa positiva, os vetores $\vec{E}$ e $d\vec{s}$ tem sentidos opostos, assim:

$$\vec{E} \cdot d\vec{s} = -Eds \quad (2.6)$$

Desse modo, a integral da EQ (2.5) pode ser reescrita como:

$$V = \int_{-}^{+} Eds \quad (2.7)$$

Onde V é uma simplificação para $(V - V_0)$ e os sinais do limite de integração estão indicando a trajetória que começa na placa negativa e termina na positiva.

Para o cálculo da capacitância em placas paralelas, supondo que a placa da Figura apresente uma extensão de tal modo que se possa desprezar o efeito das bordas e supor que o campo elétrico é constante em toda região entre as placas. De acordo com a EQ (2.7) temos que:

$$V = \int_{-}^{+} Eds = E \int_0^d ds = Ed \quad (2.8)$$

Ao se optar por uma superfície gaussiana que envolve apenas a carga q da placa positiva (Figura 1), de acordo com a EQ (3.4) o total de cargas acumuladas na placa é dado pela seguinte equação:

$$Q = \epsilon_0 E A,$$

Assim, de acordo com a EQ (2.2):

$$C = \frac{Q}{V} \Rightarrow Q = CV \quad (2.9)$$

Substituindo As EQ (2.4) e EQ (2.8) na EQ (2.9):

$$\epsilon_0 E A = C E d$$

$$\epsilon_0 A = C d \quad (2.10)$$

Portanto, se Q é dado em *Coulomb*, V em *Volt*, C será expresso em *Farad (F)*. No caso de um sistema formado por duas placas paralelas de área A , de um material condutor, separadas por uma distância d , a capacitância é calculada pela relação [7]:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (2.11)$$

Sendo ϵ_0 , uma característica do meio entre as placas (normalmente no vácuo). A permissividade elétrica no vácuo ϵ_0 é $8,854187817 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$.

A EQ. (3.11) mostra que a capacitância depende apenas de fatores geométricos: a área das placas (A) e a distância entre elas (d).

2.2 CIRCUITO DE CAPACITORES

2.2.1 CAPACITORES EM SÉRIE

Dois capacitores são conectados em série por meio de um fio condutor. Inicialmente, ambos os capacitores não estão carregados.

Quando uma diferença de potencial V_{ab} é aplicada, os capacitores ficam carregados:

Figura 2: Capacitores ligados em série.

Fonte: (YOUNG & FREEDMAN, 2009).

Conforme a Figura 2, as diferenças de potencial entre os pontos (a e c), (c e b) e a e b podem ser escritas da seguinte forma:

$$V_{ac} = V_1 = \frac{Q}{C_1}; V_{cb} = V_2 = \frac{Q}{C_2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{ab} = V_1 + V_2 = Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)$$

Assim,

$$\frac{V}{Q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (2.12)$$

Desse modo, pode-se determinar a capacitância equivalente (C_{eq}). Para essa combinação em série, essa capacitância é definida como um único capacitor para o qual a carga Q será a mesma que a da combinação para uma mesma diferença de potencial V . Portanto, a combinação de capacitores em um circuito pode ser substituído por um capacitor equivalente com capacitância C_{eq} :

Figura 3: Circuito com o capacitor equivalente para a combinação em série.

Fonte: (YOUNG & FREEDMAN, 2009).

Assim, para os capacitores que estão ligados em série, o capacitor equivalente é dado por:

$$C_{eq} = \frac{Q}{V} \Rightarrow \frac{1}{C_{eq}} = \frac{V}{Q} \quad (2.13)$$

Substituindo na Eq. (2.12):

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (2.14)$$

De modo que, para uma quantidade n de capacitores em série, temos:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_n \frac{1}{C_n} \quad (2.15)$$

Nota-se, portanto, que para os capacitores em série a capacitância equivalente é sempre menor do que qualquer uma das capacitâncias individuais.

2.2.2 CAPACITORES EM PARALELO

Dois capacitores estão ligados em paralelo conforme a seguinte Figura:

Figura 4: Circuito com capacitores em paralelo.

Fonte: (YOUNG & FREEDMAN, 2009).

Nesse caso, as placas superiores dos capacitores são conectadas por um fio condutor, o que constitui uma superfície equipotencial. Da mesma forma que as placas inferiores, que também apresentam uma superfície equipotencial. Assim, a diferença de potencial em uma ligação de capacitores em paralelo é dada por $V_{ab} = V$. Como as cargas Q_1 e Q_2 não são necessariamente iguais, as cargas são dadas por:

$$Q_1 = C_1 V \text{ e } Q_2 = C_2 V$$

A carga total será:

$$Q = Q_1 + Q_2 = (C_1 + C_2) V$$

$$\therefore \frac{Q}{V} = C_1 + C_2 \quad (2.16)$$

Assim, a capacitância equivalente para capacitores em paralelo C_{eq} , é dada por:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 \quad (2.17)$$

Então, para n capacitores combinados em paralelo, temos:

$$C_{eq} = \sum_n C_n \quad (2.18)$$

Logo, a capacitância equivalente em uma combinação em paralelo é sempre maior do que qualquer capacitância individual [3].

Figura 5: Esquema de um circuito com o capacitor equivalente referente ao circuito da Figura 4.

Fonte: (YOUNG & FREEDMAN, 2009).

2.2.3 DIELÉTRICOS

Para o estudo da capacitância, é necessário verificar o que acontece quando um material dielétrico (um material isolante, seja isopor, borracha, madeira seca, vidro...) é introduzido entre as placas de um capacitor de placas paralelas.

Fazer uso de um dielétrico sólido entre as placas de um capacitor possui, basicamente, três objetivos [3]:

- Resolução de problemas para manter a separação de grandes placas metálicas;
- Aumentar a diferença de potencial máxima entre as placas;
- a capacitância de um capacitor com dimensões fixas, quando existe um dielétrico entre as placas, é maior que a capacitância do mesmo capacitor quando há vácuo entre as placas.

Para tanto, se faz necessário compreender o funcionamento do campo elétrico não mais no vácuo, mas na presença de um meio material. A polarização das moléculas é o fundamento principal para esse fenômeno [6, 4].

Com a inserção do dielétrico entre as placas do capacitor carregado, as moléculas polarizadas tendem a se alinhar em paralelo com as linhas de campo. As placas determinam um campo elétrico $\vec{E}_0$. Há uma homogeneidade geral da carga pela extensão do dielétrico, mas, nas extremidades, dispõe-se uma camada de carga negativa em uma, e uma camada de carga positiva na outra. Tais camadas de carga podem ser modeladas como placas paralelas carregadas. Entretanto, essas camadas são dispostas de forma contrária às placas do capacitor, de maneira que a polaridade é oposta à das

verdadeiras placas, o que faz com que as camadas determinem um campo elétrico induzido $\vec{E}_{ind}$ de direção oposta ao $\vec{E}_0$, cancelando parcialmente o campo elétrico devido às placas verdadeiras.

Portanto, para o capacitor carregado e desconectado de uma bateria, a introdução de um dielétrico faz com que o campo elétrico e a tensão entre as placas sejam reduzidos. Conforme Serway & Jewett [4], "A carga nas placas é armazenada em uma diferença de potencial menor para que a capacitância possa aumentar".

Michael Faraday foi o primeiro a desenvolver pesquisas a respeito. Em 1837, desenvolveu um equipamento para tal investigação, e constatou que a capacitância era multiplicada por um fator $\mathcal{K}$, onde a definiu como constante dielétrica do material [6].

Em consonância, ao utilizar um voltímetro ideal antes e após a inserção de um dielétrico que preenche o espaço entre as placas, espera-se que a diferença de potencial elétrico caia na forma:

$$V = \frac{V_0}{\mathcal{K}} \quad (2.19)$$

Então a Capacitância será:

$$C = \frac{Q_0}{V} = \frac{\frac{Q_0}{V_0}}{\mathcal{K}} = \mathcal{K} \frac{Q_0}{V_0} \quad (2.20)$$

Todavia, se o dielétrico for introduzido enquanto a diferença de potencial é mantida constante por uma bateria, um aumento de carga na forma $Q=\mathcal{K}Q_0$ é esperado, enquanto a tensão no capacitor continuará a mesma. A carga adicional será transferida dos fios conectores e a capacitância aumentará por um fator k [4]. Mais explicitamente:

$$C = \frac{Q}{V} = \mathcal{K} \frac{Q_0}{V}$$

$$C = \mathcal{K} C_0$$

Alguns valores de $\mathcal{K}$ (constante dielétrica do material) estão presentes na seguinte ta-bela:

Tabela 1: Tabela com os valores das constantes dielétricas para diferentes materiais. Adaptada de: (YOUNG & FREEDMAN, 2009).

Material	$\mathcal{K}$
Vácuo	1
Ar (1 atm.)	1,00059
Ar (100 atm.)	1,0548
Teflon®	2,1
Vidro	5 - 10

3 OBJETIVOS

Determinar experimentalmente a relação entre a capacitância de placas paralelas com a distância entre elas e suas áreas, observar e comentar a influência de um material dielétrico nos valores da capacitância, bem como testar e descrever o comportamento de capacitores que se relacionam em um mesmo sistema.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do experimento, fez-se uso do ambiente de simulações virtuais *PhET* Colorado, onde há duas versões da simulação [8]: 1.6.19v e 2.02v, ilustradas nas Figuras 7 e 8, respectivamente.

Figura 7: tela de início do experimento (Versão 1.6.19).

Fonte: print screen da Plataforma de simulações virtuais PhET Colorado – Capacitor Lab.

A segunda versão apresenta outras opções [9]:

Figura 8: tela de início do experimento (Versão 2.02).

Fonte: *print screen* da Plataforma de simulações virtuais *PhET Colorado – Capacitor Lab*.

A princípio, fez-se um estudo teórico relativo ao experimento. Desse modo, foi iniciado o teste dos recursos disponíveis no ambiente virtual. Com base de um roteiro experimental estruturado, se deu a operacionalização do experimento. Além disso, foram utilizadas as bi-bliotecas *NumPy*, *Matplotlib* e *SciPy* na linguagem de programação *Python*, através do *sof-tware Spyder* [10, 11, 12, 13, 14], para uma elaboração mais aperfeiçoada dos gráficos, e estudo dos parâmetros.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ÁREA DAS PLACAS

Primeiramente, foi verificado quais parâmetros poderiam ser alterados. Desse modo, verificou-se que é possível fazer alterações na distância entre as placas (d) e na área de cada placa (A). Ainda tinha a possibilidade de alterar uma pequena chave, onde há um contato com uma bateria com a tensão máxima de $\pm 1,5V$. O ambiente disponibilizava a visualização gráfica das magnitudes da Capacitância (F), das cargas elétricas das placas (C) e a energia (J). Tam-bém era possível utilizar um voltímetro a fim de verificar o valor da tensão entre as placas.

Assim, nesse primeiro momento, carregou-se o capacitor utilizando a tensão de $+1,5 V$ da bateria. Foi fixado o tamanho da área das placas e a distância entre elas.

Os seguintes dados foram obtidos e colocados na seguinte tabela:

Tabela 2: Tabela com os valores obtidos com o experimento.

Diferença de potencial (V)	+1,5
Distância (mm)	6,0
Área (mm ²)	100,0
Capacitância (pF)	0,3

Foi percebido que há um aumento de carga de 0.22pC para placas de área 100mm² com uma distância de 6,0mm entre elas. Ao desconectar da bateria (alterando a chave), as cargas ainda ficam presentes nas placas.

Figura 9: A.1) e A.2) Caixas de seleção para exibição de valores; B) Voltímetro; C) Bateria $\pm 1,5V$; D.1) e D.2) Chaves seletoras; E) Placas paralelas do capacitor; F) Setas para variação da separação e da área das placas (Versão 1.6.19).

Fonte: *print screen* da Plataforma de simulações virtuais *PhET Colorado* – Capacitor Lab.

Ao reconectar com a bateria e alterar o valor para $-1,5 V$, percebeu-se que há alteração no sentido da linha do campo elétrico, ou seja, o sinal das cargas das placas se inverte.

Voltando para $+1,5 V$, o valor da distância entre as placas foi fixado, ao passo em que se variava a área das mesmas. Foram obtidos os seguintes resultados na Tabela 3.

Tabela 3: Tabela da Capacitância em função da área das placas (A) mantendo a distância (d) constante.

$d(mm)$	6,0						
$A (mm^2)$	100	150	200	250	300	350	400
$C (pF)$	0,15	0,22	0,30	0,37	0,44	0,52	0,59

A partir dos dados, elaborou-se a representação gráfica da capacitância em função da área das placas.

Figura 10: Gráfico da Capacitância versus Área (pF × mm²).

Fonte: autoria própria.

Onde percebe-se que há uma relação do tipo:

$$C \propto A \quad (5.1)$$

5.2 DISTÂNCIA ENTRE AS PLACAS

Agora, foi fixado um valor para a área das placas. Variou-se os valores da distância entre elas e os resultados obtidos foram tabelados:

Tabela 4: Tabela da capacitância em função da distância, mantendo a área das placas (A) constante.

$A(mm^2)$	100,0								
$d(mm)$	10	9	8	7	6	5	4	3	2
$C(pF)$	0,09	0,1	0,11	0,13	0,15	0,18	0,22	0,3	0,44

E o seguinte gráfico foi obtido:

Figura 11: Gráfico da Capacitância versus distância (pF $\times$ mm).

Fonte: autoria própria.

Com base no gráfico obtido, percebeu-se uma relação do tipo:

$$C \propto \frac{1}{d^\alpha} \quad (5.2)$$

Com o Auxílio da linguagem de programação Python no programa Spyder [10, 11, 12, 13, 14], foi feito o estudo dos parâmetros de linearização da curva onde o valor de α na Eq. (5.2) foi de 0,985. Percebendo essa relação, a Tabela 5 foi obtida:

Tabela 5: Tabela com as variações para 1/d.

$A(mm^2)$	100,0								
1/d (mm)	0,100	0,111	0,125	0,142	0,167	0,200	0,250	0,333	0,500
C (pF)	0,09	0,1	0,11	0,13	0,15	0,18	0,22	0,3	0,44

Com os dados tabelados, o seguinte gráfico foi obtido:

Figura 12: Gráfico da Capacitância versus 1/d (pF × mm⁻¹).

Fonte: autoria própria.

Percebe-se que para 1/d a relação é linear. Assim, relacionando as equações obtidas a partir dos gráficos, temos:

$$C \propto \frac{A}{d} \Rightarrow C = k \frac{A}{d} \quad (5.3)$$

Deixando em termos da constante de proporcionalidade:

$$k = C \frac{d}{A} \quad (5.4)$$

Com base nos dados do experimento, o valor para k foi obtido:

$$\begin{aligned} k &= (8,88 \pm 0,06) \frac{pF}{m} = \\ &= (8,88 \pm 0,06) \times 10^{-12} \frac{Nm^2}{C^2} \end{aligned}$$

Que é o valor da permissividade elétrica no vácuo, onde o valor teórico é de $\epsilon_0 = 8,8541878176 \times 10^{-12} \frac{Nm^2}{C^2}$.

Desse modo, baseado no ϵ_0 teórico, o erro percentual foi calculado.

$$Erro\% = \frac{\epsilon_{0_{valor\ experimental}}}{\epsilon_{0_{valor\ teórico}}} \times 100 \quad (5.5)$$

O erro percentual encontrado foi de 0,29%.

5.3 DIELÉTRICOS

Fazendo uso da versão 2.02 da simulação [9]. Seleciona-se a aba dielétrico,

Figura 13: (A) Aba de seleção para o modo Dielétrico; (B) Bloco representativo do dielétrico; (C) Painel de alterações do tipo do material do dielétrico e valores da constante dielétrica.

Fonte: print screen da Plataforma de simulações virtuais PhET Colorado – Capacitor Lab.

Fixando a tensão da bateria em 1,5V, a distância entre as placas e a área das placas, fo-ram encontrados os dados representados na tabela 6, que contempla os dados sem a inserção do dielétrico e os dados com a inserção do dielétrico.

Tabela 6: Tabela com os valores sem a inserção do dielétrico. Onde, K é a constante dielétrica.

Sem o dielétrico		Com o dielétrico
$d(mm)$	10	10
$A (mm^2)$	100	100
K	-	5
$C_0 (pF)$	0,089	0,443
$Q_0 (pC)$	0,133	0,664
$E_0 (pJ)$	0,1	0,498

É possível observar que os valores da capacitância (C), carga (Q) e da energia capacitava (E) são maiores na presença do material dielétrico.

5.3 ASSOCIAÇÃO DE CAPACITORES

Foi selecionada a aba "capacitores múltiplos" no ambiente virtual [9].

Figura 14: A) aba de seleção para o modo Capacitores múltiplos; B) Painel de seleção para o tipo de circuito que será utilizado.

Fonte: print screen da Plataforma de simulações virtuais PhET Colorado – Capacitor Lab.

Inicialmente, foi escolhida a opção "2 em paralelo" e fixados dois capacitores com capacitâncias conhecidas de 0,1 pF e 0,2 pF.

Com o uso da Eq. (3.18), é possível determinar a capacitância do capacitor equivalente. Assim,

$$C_{eq} = \sum_{n=2} C_n \Rightarrow C_1 + C_2 = 0,3 \text{ pF}$$

O aplicativo proporciona a opção de exibir a capacitância resultante da associação, corroborando com o valor teórico obtido anteriormente.

Em um outro momento, a opção "2 em série" foi selecionada.

Figura 15: Circuito com capacitores ligados em série.

Fonte: print screen da Plataforma de simulações virtuais PhET Colorado – Capacitor Lab.

Usando os mesmos valores das capacitâncias anteriores, foi calculada a capacitância resultante para uma associação em série a partir da equação (3.15).

$$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_{n=2} \frac{1}{C_n} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = 0,07 \text{ pF}$$

Novamente, os valores teóricos coincidiram com os valores experimentais.

Em seguida, a opção "2 em série + 1 em paralelo" foi selecionada:

Figura 16: Simulação para uma combinação mista de capacitores.

Fonte: print screen da Plataforma de simulações virtuais PhET Colorado – Capacitor Lab.

Foram escolhidos 3 capacitores com capacitâncias representadas na tabela 8.

Tabela 8: Tabela com os valores das capacitâncias individuais para o circuito misto de capacitores.

C_1 (pF)	0,1
C_2 (pF)	0,2
C_3 (pF)	0,3

Para encontrar um capacitor equivalente para esse circuito, primeiramente se verifica o capacitor equivalente para os capacitores em série, utilizando a Eq. (3.15), temos:

$$\frac{1}{C'_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = 0,07$$

Feito isso, agora se tem um circuito com dois capacitores em paralelo. Assim, para de-terminar a capacitância equivalente:

$$C_{eq} = C'_{eq} + C_3 = 0,37 \text{ pF}$$

Verifica-se que é o mesmo resultado exibido quando a opção "exibir a capacitância to-tal" é selecionada.

6 CONCLUSÃO

Conclui-se então que há uma relação da capacitância com os valores das áreas das placas, bem como com a distância em que elas se encontram. Além de fazer o estudo sobre os capacitores de placas paralelas, foi possível determinar de forma experimental o valor da permissividade elétrica no vácuo ϵ_0 com um erro percentual de 0,29%. Verificou-se também a influência de um dielétrico entre as placas de um capacitor, e através do experimento, percebeu-se a relação de proporcionalidade da constante dielétrica. Também foi feito o estudo experimental sobre as diferentes combinações de capacitores em um circuito. Para cada tipo (em série, paralelo e misto) os valores obtidos para a capacitância equivalente em cada um dos casos, com base na teoria, foram idênticos aos valores exibidos de forma experimental.

REFERÊNCIAS

- [1] CALÇADA CS, Sampaio JL. Universo da física. Editora Atual, 2a Edição. 2005.
- [2] HEWITT PG. Física Conceitual. 12ª. Porto Alegre: Bookman; 2010.
- [3] YOUNG HD, FREEDMAN III R. Física III: Eletromagnetismo. Tradução Sônia Midori Ya-mamoto. 12ª edição. Editora Pearson. São Paulo; 2009.
- [4] SERWAY RA, JEWETT J. Princípios de física: eletromagnetismo. São Paulo: Cengage Learning. 2014.
- [5] TIPLER PA, Mosca G. Física para cientistas e engenheiros. Livros Técnicos e Científicos; 2009.
- [6] HALLIDAY D, Resnick R, Walker J. Fundamentos de Física: Eletromagnetismo. Vol. 3 . Grupo Gen-LTC; 2000.
- [7] NUSSENZVEIG HM. Curso de física básica: Eletromagnetismo (vol. 3). vol. 3. Editora Blücher; 2015.
- [8] PhET. Laboratório do Capacitor: Básico; Acesso em: 30/04/2021. https://phet.colorado.edu/sims/html/capacitor-lab-basics/latest/capacitor-lab-basics_pt_BR.html.
- [9] PhET. Laboratório do Capacitor Versão 2.02; Acesso em: 03/05/2021. https://phet.colorado.edu/sims/cheerj/capacitor-lab/latest/capacitor-lab.html?Simulation=capacitor-lab&locale=pt_BRL.
- [10] Van ROSSUM G, Drake Jr FL. Python tutorial. Centrum door Wickenden Informatica Amsterdam, The Netherlands; 1995.
- [11] HARRIS CR, MILLMAN KJ, van der Walt SJ, Gommers R, Virtanen P, Cournapeau D, et al. Array programming with NumPy. Nature.2020 Sep;585(7825):357–362. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>.
- [12] HUNTER JD. Matplotlib: A 2D graphics environment. Computing in Science & Engineering. 2007;9(3):90–95.
- [13] VIRTANEN P, Gommers R, Oliphant TE, Haberland M, Reddy T, Cournapeau D, et al. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. Nature Methods. 2020; 17:261– 272.
- [14] RAYBAUT P. Spyder-documentation. Available online at: python hosted org. 2009.

CIRCUITOS ELÉTRICOS

Resumo: O presente trabalho tem como principal objetivo fazer o estudo experimental da primeira lei de Ohm em circuitos elétricos com resistores combinados de diferentes maneiras (série e pa-ralelo), fazendo uso do ambiente de simulação virtual PhET. Assim, com base em um roteiro de estudos, foi possível demonstrar a primeira Lei de Ohm, e ainda desenvolver uma análise sobre a potência dissipada nos componentes dos circuitos. Os resultados, obtidos de forma experimental, corroboram com os resultados apresentados na teoria.

Palavras-chaves: Resistores; Circuito; Simulação.

1 INTRODUÇÃO

Fenômenos elétricos naturais são conhecidos de longa data. Os relâmpagos eram vistos com respeito e temor por nossos antepassados, que muitas vezes os associavam a seres divi-nos. Após o desenvolvimento científico, até mesmo o senso comum foi dominado pela noção de que tais fenômenos resultam de meros deslocamentos de carga elétrica. Na Grécia antiga, o processo básico de eletrização já era conhecido. Tales de Mileto (640 - 546 a.C.), em seus escritos, relatou que era possível atrair pequenos pedaços de palha com um pedaço de âmbar (resina sólida fossilizada de origem vegetal) que havia sido atritado com um tecido. A palavra eletricidade se origina do vocábulo *eléctron*, que em grego significa âmbar [1]. Na natureza, Os fenômenos elétricos podem ser observados, como antecipado, em uma noite de tem-pestade com muitos raios. Também se pode constatar a eletricidade no próprio corpo hu-mano, tal como os impulsos elétricos responsáveis pelas transmissões de informações em nosso sistema nervoso.

O físico alemão George Simon Ohm, estabeleceu a ideia de resistência elétrica publi-cando suas observações em seu trabalho. Através da análise matemática do circuito galvâ-nico, ele apresentou os fundamentos da teoria dos circuitos elétricos [1].

Após realizar diversas experiências medindo as velocidades escalar de deriva das car-gas e analisando o valor da corrente em alguns condutores, percebeu-se então que, para mui-tos materiais, a razão entre a tensão e corrente se manteve constante.

A relação entre a diferença de potencial, corrente e resistência está resumida no enun-ciado conhecido como a 1ª Lei de Ohm [2], assim:

$$\textit{Corrente} = \frac{\textit{Tensão}}{\textit{Resistência}}$$

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CORRENTE ELÉTRICA

A corrente elétrica (i) em um condutor é definida por [3]:

$$i \equiv \frac{dq}{dt} \tag{2.1}$$

Onde dq é a carga que passa através de uma seção transversal de um condutor em um determinado instante dt .

A unidade do Sistema Internacional para corrente é o Ampere (A), onde:

$$1A = 1 \frac{C}{s}$$

A corrente média em um condutor está relacionada com o movimento dos portadores de carga de acordo com a seguinte equação [4]:

$$i_{méd} = n q v_b A \quad (2.2)$$

Onde n é a densidade dos portadores de carga, q é a quantidade de carga, A é a área de seção transversal do condutor e v_b é a velocidade escalar de deriva que é uma velocidade média das partículas ao longo de um segmento.

Em termos de velocidade escalar, a velocidade escalar de deriva dos elétrons em um fio condutor, está relacionada ao campo elétrico do fio. Logo, se o campo for aumentado, a força elétrica nos elétrons será mais forte e a velocidade escalar de deriva aumenta. Então, para um campo uniforme em um condutor de seção transversal uniforme, a diferença de potencial ao longo desse condutor é proporcional ao campo elétrico. Logo, é possível verificar de maneira experimental que em um metal, à temperatura constante, a densidade de corrente J é direta-mente proporcional ao campo elétrico E . Assim [2]:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.3)$$

Onde σ é uma constante denominada condutividade.

Normalmente, os metais que apresentam uma alta condutividade são denominados de bons metais, por apresentarem a maior parte ou senão todas as propriedades metálicas como: brilho e ductibilidade, além das propriedades químicas, como a valência positiva por exemplo [5].

Quanto a condutividade: quanto maior for a condutividade de um dado material (σ), menor deverá ser a intensidade do campo elétrico (E) para criar uma mesma intensidade de corrente (J). No Sistema Internacional de Unidades (S.I) $[\sigma] = (A/m^2)/(V/m)$, ou $(A/V)/m$, o que é equivalente à Siemens por metro (S/m).

O inverso da condutividade é denominado de resistividade (ρ). Assim, pode-se escrever:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2.4)$$

Substituindo na Eq. (2.3):

$$\vec{E} = \rho \vec{J} \quad (2.5)$$

ρ é uma característica específica de cada substância. A resistividade de um material depende, entre outras coisas, da temperatura. De modo geral, a resistência dos metais aumenta com a temperatura. Isso é por conta do aumento de colisões entre os elétrons livres devido ao aumento da temperatura [6].

Tabela 1: Tabela com diferentes resistividades.

Materiais Condutores	Resistividade $\rho \left(\frac{m}{s}\right)$
Ag	$1,58 \cdot 10^{-8}$
Cu	$1,67 \cdot 10^{-8}$
Al	$2,65 \cdot 10^{-8}$
W	$5,60 \cdot 10^{-8}$
Fe	$9,71 \cdot 10^{-8}$
Semicondutores	
C (grafite)	$(3 \sim 60) \cdot 10^{-5}$
Ge	$(1 \sim 500) \cdot 10^{-3}$
Si	$0,1 \sim 60$
Isolantes	
Vidro	10^{10} a 10^{14}
Borracha	10^{13}

2.2 PRIMEIRA LEI DE OHM

Com base na Eq. (2.5). Considerando um trecho dl de um fio condutor de seção trans-versal S sobre o qual uma densidade de corrente J é longitudinal e homogeneia. A diferença de potencial (d.d.p) dV entre as secções a e b pode ser calculada a partir da seguinte integração:

$$V_b - V_a = \int_a^b E dl \equiv dV = E dl \quad (2.6)$$

Pois E é uniforme e paralelo a dl .

Por definição, a intensidade da corrente que atravessa o trecho do fio é dada por:

$$i = \int_S \vec{j} \cdot \hat{n} dS = J S = \sigma E S \quad (2.7)$$

Substituindo a Eq. (2.7) na Eq. (2.6), temos:

$$dV = \frac{i}{\sigma S} dl \quad (2.8)$$

Assim, se o fio tem secção constante, quando uma diferença de potencial (ΔV) for aplicada nas extremidades de um condutor metálico, a corrente no condutor será proporcional à tensão aplicada, ou seja, $i \propto \Delta V$ [4].

Tal proporcionalidade pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\Delta V = R i \Rightarrow R = \frac{\Delta V}{i} \quad (2.9)$$

Onde R é a resistência do condutor. A Eq. (2.9) é conhecida como a 1ª Lei de Ohm. Onde, em unidades no SI, R é expresso em ohm (Ω), V (outra notação para a diferença de potencial) em Volts (V) e i em ampere (A). Portanto, a Primeira Lei de Ohm mostra que, quando uma diferença de potencial de 1V é aplicada através de um circuito que possui resistência de 1Ω , uma corrente de 1A será produzida.

2.3 CIRCUITO ELÉTRICO DE CORRENTE CONTÍNUA

2.3.1 RESISTORES EM SÉRIE

Quando os resistores estão ligados em série, como na seguinte Figura:

Figura 1: R1, R2 e R3 combinados em série.

Fonte: (YOUNG & FREEDMAN, 2009).

A corrente (i) deve ser a mesma através de todos os resistores [7]. Utilizando a Eq. (2.9), para cada resistor temos:

$$V_{ax} = iR_1$$

$$V_{xy} = iR_2$$

$$V_{yb} = iR_3$$

A diferença de potencial (d.d.p) entre os pontos a e b é dada através da soma das diferenças de potencial através de cada resistor. Então:

$$V_{ab} = V_{ax} + V_{xy} + V_{yb} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{ab} = i (R_1 + R_2 + R_3) \quad (2.10)$$

Portanto,

$$\frac{V_{ab}}{i} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (2.11)$$

Como $\frac{V_{ab}}{i} = R_{eq}$ em que R_{eq} é a resistência equivalente. Temos então, para o circuito com resistores em série, que a resistência equivalente é dada por:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (2.12)$$

ainda, de modo geral:

$$R_{eq} = \sum_{n=1}^m R_n \quad (2.13)$$

2.3.2 RESISTORES EM PARALELO

Considerando a seguinte Figura com os resistores ligados em paralelo,

Figura 2: R1, R2 e R3 combinados em paralelo.

Fonte: (YOUNG & FREEDMAN, 2009).

A corrente em cada resistor não precisa ser a mesma. Porém, a diferença de potencial nos terminais de cada resistor, deve ser a mesma iguais à V_{ab} . Utilizando a Eq. (2.9), as correntes que passam para cada resistor da Figura 2, são dadas por:

$$i_1 = \frac{V_{ab}}{R_1}, \quad i_2 = \frac{V_{ab}}{R_2}$$

$$i_3 = \frac{V_{ab}}{R_3}$$

A corrente total i , deve ser igual a soma das correntes que passam em cada resistor.

Assim,

$$i = i_1 + i_2 + i_3 \quad (2.14)$$

Substituindo,

$$i = V_{ab} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{i}{V_{ab}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (2.15)$$

Sabendo que $\frac{V_{ab}}{i} = R_{eq}$ a Eq. (2.15) pode ser reescrita como:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (2.16)$$

Assim, para um circuito com m resistores combinados em paralelo,

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{n=1}^m \frac{1}{R_n} \quad (2.17)$$

2.3.3 POTÊNCIA EM CIRCUITOS ELÉTRICOS

Considerando que uma quantidade de carga q passa através do circuito, há uma variação na energia potencial que equivale a qV_{ab} . Normalmente, isso acontece com uma bateria que converte energia química em elétrica e transfere a energia elétrica para o circuito. Assim, qV_{ab} pode representar tanto a energia fornecida ao elemento quanto a energia extraída desse elemento do circuito.

Quando a corrente através do circuito é i , então, considerando um intervalo de tempo dt , temos uma quantidade de carga $dq = idt$, como foi expressado na Eq. (2.1). Desse modo, a variação de energia potencial para essa quantidade de carga é dada por:

$$V_{ab} dq = V_{ab} i \quad (2.18)$$

Dividindo a Eq. (2.18) por dt , obtêm-se a taxa em que a energia é transferida. Essa taxa de tempo da transferência de energia é a potência, então [7]:

$$P = V_{ab} i \quad (2.19)$$

Onde P é a potência, e sua unidade é o watt.

Figura 3: A potência P fornecida ao elemento de circuito entre os pontos a e b .

Fonte: (YOUNG & FREEDMAN, 2009).

Com isso, comparando as Eq. (2.9) com a Eq. (2.19), as seguintes relações podem ser obtidas:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (2.20)$$

$$P = R i^2 \quad (2.21)$$

$$P = i V \quad (2.22)$$

2.3.4 LEIS DE KIRCHHOF PARA CIRCUITOS ELÉTRICOS

Desenvolvidas pelo físico alemão Gustav Robert Kirchhof (1824-1887), as Leis ajudam a resolver problemas de circuitos elétricos mais complexos, onde há diversos elementos combinados, como mais de uma fonte de resistores estando tanto em série quanto paralelo [7]. As Leis de Kirchhof são:

(i) Lei dos nós: A soma algébrica de todas as correntes que entram em um nó, é igual a zero:

$$\sum i = 0 \quad (2.23)$$

(ii) Lei das malhas: A soma algébrica de todas as diferenças de potencial através de uma malha é igual a zero:

$$\sum V = 0 \quad (2.24)$$

A seguir um exemplo de circuito que não pode ser reduzido a combinação mais simples envolvendo apenas resistores:

Figura 4: exemplo de um circuito mais complexo.

Fonte: (YOUNG & FREEDMAN, 2009).

3 OBJETIVOS

Determinar experimentalmente as resistências equivalentes em diferentes combinações de resistores. Descrever o comportamento de resistores que se relacionam em um mesmo circuito.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do experimento, fez-se uso da plataforma de simulações virtuais PhET Colorado [8].

Figura 5: tela de início do experimento.

Fonte: print screen da Plataforma Virtual PhET Colorado – Circuito DC Lab.

Em um primeiro momento, fez-se um estudo teórico relativo ao experimento. Desse modo, foi iniciado o teste dos recursos disponíveis no ambiente virtual.

Com base de um roteiro experimental estruturado por questões norteadoras, iniciou-se o desenvolvimento do experimento no ambiente virtual.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 RESISTORES EM SÉRIE E PARALELO

Figura 6: (a) Caixa de itens para compor o circuito; (b) tipo de visualização do circuito; (c) botões para zoom in e zoom out; (d) ambiente para construir o circuito (circuito exemplo); (e) Caixa de seleção para exibição de etiquetas e valores; (f) instrumentos virtuais de aferição; (g) painel avançado.

Fonte: print screen da Plataforma Virtual PhET Colorado – Circuito DC Lab.

Primeiramente, identificou-se quais as ferramentas estavam disponíveis para o uso. Desse modo, verificou-se que o programa dispõe de diversos itens que podem compor o circuito. Ainda são disponibilizados aparelhos virtuais para aferência de valores da diferença de potencial (V) e da corrente (A).

Então, criou-se um circuito com um resistor em série e dois em paralelo, ambos ligados a uma bateria. Os valores dos resistores são de 10Ω e a bateria 9 V, conforme a Figura 5:

Figura 7: Circuito com combinações de resistores em série e paralelo.

Fonte: print screen da Plataforma Virtual PhET Colorado – Circuito DC Lab.

Em seguida, utilizando as Eq. (2.13) e Eq. (2.17), a resistência equivalente foi encontrada: $R_{eq} = 15\Omega$.

Com isso a corrente do circuito foi calculada:

$$V = R i \Rightarrow i = \frac{9}{15} \quad (5.1)$$

$$\therefore i = 0,6 A \quad (5.2)$$

Assim, a diferença de potencial (V) foi encontrada para cada resistor, como apresentado na Tabela 2:

Tabela 2: Valores das diferenças de potencial para cada resistor.

Resistores	Diferença de potencial (V)
R_1	6,0
R_2	3,0
R_3	3,0

Com o auxílio do voltímetro virtual, verificou-se os valores das diferenças de potencial em cada extremidade dos resistores (Figura 8). Os valores obtidos corroboram com os resultados calculados anteriormente.

Figura 8: Valores das diferenças de potencial para cada resistor: a) R_1 ; b) R_2 ; c) R_3 ; d) conjunto dos resistores associados em paralelo R_2 e R_3 .

Fonte: print screen da Plataforma Virtual PhET Colorado – Circuito DC Lab.

Feito isso, verificou-se também o valor da corrente para cada resistor. De maneira análoga, e já de posse do valor da corrente total do circuito ($i = 0,6\text{ A}$) dada pela Eq. (5.2). Assim, utilizando da Eq. (5.1) a corrente para cada resistor foi calculada e seus valores foram dispostos na Tabela 3. Ademais, com auxílio de um amperímetro digital (ferramenta virtual disponível na simulação), as correntes foram verificadas conforme apresentado na Figura 9:

Tabela 3: Valores das correntes para cada resistor.

Resistores	Corrente i (A)
R_1	0,6
R_2	0,3
R_3	0,3

Figura 9: Valores das correntes que passam pelos resistores: a) R1; b) R2 e R3.

Fonte: print screen da Plataforma Virtual PhET Colorado – Circuito DC Lab.

5.2 POTÊNCIA EM CIRCUITOS ELÉTRICOS

Em um segundo momento, com o intuito de se fazer um estudo sobre a potência em um circuito elétrico, o seguinte esquema de circuito foi proposto conforme a Figura 10.

Figura 10: Circuito composto por: (a) uma lâmpada; três resistores: (b)R1, (c)R2, (d)R3;(d) uma bateria; (e) um interruptor.

Fonte: print screen da Plataforma Virtual PhET Colorado – Circuito DC Lab.

Utilizando a Eq. (2.9), a corrente encontrada para o circuito da Figura 10 foi de $i = 0,17\text{A}$. Com isso, utilizando a Eq. (2.21), a potência em cada resistor foi encontrada e tabelada:

Tabela 4: Calores das potências para cada resistor do circuito.

Resistores	$P\text{ (W)}$
Lâmpada	2,89
R_1	0,289
R_2	0,072
R_3	0,072

Em seguida, foi proposto o seguinte circuito (Figura 11):

Figura 11: circuito 3 proposto.

Fonte: print screen da Plataforma Virtual PhET Colorado – Circuito DC Lab.

Então, com base nas equações já utilizadas, fez-se os procedimentos análogos aos circuitos anteriores, onde encontrou-se a resistência equivalente:

$$\begin{aligned}
 R_{eq} &= \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)^{-1} + \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \right)^{-1} \\
 &\quad + R_6 \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \therefore R_{eq} = 12\ \Omega
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

E conforme a 1ª Lei de Ohm, o valor da corrente é dado por:

$$V = R i \Rightarrow i = \frac{V}{R}$$

$$i = \frac{20}{10} \approx 1,67 \text{ A} \quad (5.4)$$

Com o auxílio do amperímetro virtual, os valores teórico e experimental foram equivalentes:

Figura 12: circuito 3 proposto com o amperímetro virtual.

Fonte: print screen da Plataforma Virtual PhET Colorado – Circuito DC Lab.

Com os valores da corrente e da tensão, pode-se calcular a potência:

$$P = R i^2 = 12 \cdot (1,67)^2 = 33,4 \text{ W} \quad (5.5)$$

5.3 ATIVIDADE PROPOSTA

De modo livre, um circuito foi desenvolvido no simulador (Figura 13):

Figura 13: Circuito projetado referente a atividade proposta.

Fonte: print screen da Plataforma Virtual PhET Colorado – Circuito DC Lab.

Após a montagem do circuito, a resistência equivalente foi calculada,

$$R_{eq} = R_{lamp} + R'$$

$$R_{eq} = 100 + \left(\frac{1}{150} + \frac{1}{160} \right)^{-1}$$

$$R_{eq} = 177,42 \, \Omega$$

Então, pela 1ª Lei de Ohm, temos que o valor da corrente para esse circuito será:

$$i = \frac{V}{R_{eq}} = \frac{100}{177,42} \approx 0,56 \, A \quad (5.6)$$

O mesmo valor apresentado no amperímetro virtual. Para o cálculo da potência total no circuito, utilizando os valores já calculados, temos:

$$P_t = R_{eq} i^2 = 177,42 \cdot 0,56^2 \approx 55,64 \, W \quad (5.7)$$

Um outro circuito foi montado no simulador, composto por lâmpadas com mesmo valor de resistência (10Ω), um interruptor e uma bateria com uma tensão de 15V , conforme a Figura 14.

Figura 14: a) Circuito com o interruptor aberto; b) Circuito com o interruptor fechado.

Fonte: print screen da Plataforma Virtual PhET Colorado – Circuito DC Lab.

Com os valores, a resistência equivalente para o circuito acima foi calculada:

$$R_{eq} = \left(\frac{R'}{2} \right) + 2R = \frac{5R}{2} = 25 \, \Omega \quad (5.8)$$

Então, a intensidade de corrente no circuito será:

$$i = \frac{V}{R_{eq}} = \frac{15}{25} = 0,6 \text{ A} \quad (5.9)$$

Com isso, o valor da potência total será:

$$P_t = R i^2 = 25 \cdot (0,6)^2 = 9 \text{ W} \quad (5.10)$$

Calculando a potência para cada Lâmpada, obtemos:

Tabela 5: Valores das potências em cada lâmpada do circuito

Lâmpadas	$P \text{ (W)}$
L_1	0,9
L_2	0,9
L_3	3,6
L_4	3,6

As lâmpadas L_1 e L_2 estão combinadas em paralelo. Como a corrente é dividida, a potência dessas lâmpadas será menor quando comparada com as lâmpadas ligadas em série (L_3 e L_4). Nota-se que, na Figura 14.b) que a intensidade dos raios de luz nas lâmpadas em série é maior (linhas amarelas), conforme se verifica ao analisar os valores das potências. Assim, como esse exemplo real:

Figura 15: Circuitos reais com lâmpadas combinadas em um circuito paralelo (acima) e em um circuito em série (abaixo).

Fonte: (YOUNG & FREEDMAN, 2009).

Percebe-se então, que a intensidade do brilho de cada lâmpada altera a depender do tipo de combinação em um circuito.

6 CONCLUSÃO

Conclui-se que há uma relação entre a potência dissipada em um circuito com os outros valores eletrodinâmicos presentes. O estudo também permitiu fazer o uso da 1ª lei de Ohm de forma experimental em um ambiente virtual, onde para cada tipo de combinação de resistores nos circuitos, os valores encontrados de forma teórica (corrente, tensão), coincidiram com valores obtidos experimentalmente.

REFERÊNCIAS

- [1] MOURA CS. Física para o ensino médio: gravitação, eletromagnetismo e física moderna. EDIPUCRS; 2018.
- [2] GUALTER JB, NEWTON V, HELOU R. Tópicos de Física 3. São Paulo, Saraiva; 2001.
- [3] SERWAY RA, JEWETT J. Princípios de física: eletromagnetismo. São Paulo: Cengage Learning. 2014.
- [4] HEWITT PG. Física Conceitual. 12ª. Porto Alegre: Bookman; 2010.
- [5] EISBERG RM, Lerner LS, Montejunas PR, Soares ODD. Física: fundamentos e aplicações. McGraw-Hill; 1983.
- [6] HALLIDAY D, Resnick R, Walker J. Fundamentos de Física: Eletromagnetismo. Vol. 3. Grupo GenLTC; 2000.
- [7] YOUNG HD, FREEDMAN III R. Física III: Eletromagnetismo. Tradução Sônia Midori Yama-moto. 12ª edição. Editora Pearson. São Paulo; 2009.
- [8] PhET. Kit para Montar Circuito DC - Lab Virtual; Available from: https://phet.colorado.edu/sims/html/circuit-construction-kitdc-virtual-lab/latest/circuit-construction-kit-dc-virtual-lab_pt_BR.html.

O EXPERIMENTO DE YOUNG

Resumo: O presente trabalho tem como principal objetivo fazer o estudo experimental a respeito do comportamento ondulatório da luz ao ser incidida sobre duas fendas próximas entre si, através do ambiente de simulação virtual the Physics Classroom. Desse modo, com base em um roteiro de atividades, foi possível determinar uma expressão para o comprimento de onda da luz incidente. Ao utilizar a expressão encontrada para calcular o comprimento de onda de cada luz monocromática disposta no ambiente, verificou-se que os resultados estão em conformidade com o experimento original e com os valores teóricos.

Palavras-chaves: Dupla fenda; Difração; Interferência; Simulação.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da óptica física clássica levou a comunidade científica ao entendimento de que a luz é uma onda eletromagnética (consequentemente, transversal), mas essa não foi uma conquista trivial. Diversos cientistas e filósofos buscaram, há muito, estudar os fenômenos ópticos. O porquê de enxergarmos as coisas era uma dúvida inicial para a qual filósofos como Platão buscavam respostas.

Na antiguidade, para os filósofos como Demócrito (460 - 357 a.C.), o feixe luminoso era proveniente dos objetos e, assim, penetrava nos olhos a fim de formar as imagens. Essa ideia era pautada na teoria corpuscular da luz que prevalecia nessa época [1]. Já, Platão (428 - 348 a.C.), entendia que era possível enxergar por conta da existência de raios emanados dos olhos e raios emanados dos corpos luminosos, e com esse encontro, era possível ter a sensação de visão [1].

Aristóteles (384 - 322 a.C.), por sua vez, já trazia a ideia da existência de um meio. Para ele, a luz era consequência de uma atividade em um determinado meio.

Por compreender a natureza vibratória do som, Aristóteles acreditava que, da mesma forma que a voz humana põe em movimento o ar ambiente, o que, consequentemente, faz com que algum elemento interno do ouvido se agite, o objeto luminoso vibra, movimentando um meio diferente, que ele definiu como diáfano [1].

Esse caráter filosófico sobre o que seria a luz, perdurou até o século XVII, quando o desenvolvimento do caráter científico ganha forma com trabalhos de René Descartes, Pierre de Fermat, Isaac Newton, Christian Huygens, Augustin Fresnel, Thomas Young, e outros.

Já durante esse período, se tinha conhecimento de cinco fenômenos básicos na óptica: reflexão, refração, difração, interferência e polarização. Os fenômenos de difração e interferência, que são fenômenos de caráter ondulatório, são atualmente estudados pela chamada Óptica Física [1].

Somente a partir do período entre 1801 e 1803 que a teoria ondulatória é colocada em uma base experimental sólida. Foi durante esse período que Thomas Young conseguiu avaliar o comprimento da luz [1]. Utilizando-se de um experimento, Young fez passar um feixe luminoso através de dois orifícios construídos com um alfinete em um papel grosso, e com isso, obteve uma Figura de interferência luminosa projetada em um anteparo.

Young foi estimulado a fazer tal investigação a partir de observações relacionadas à interferência de ondas de água, nas quais percebia que existia regiões onde as ondas eram mais intensas e em outras onde não apareciam as ondas [1].

Assim, para Young, as faixas escuras e claras projetadas no anteparo evidenciavam um padrão de interferência, destrutivo e construtivo.

Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo encontrar as variáveis associadas ao comprimento de onda e, para isso, fez-se uso de um laboratório virtual [2].

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O experimento de Young se desenvolve a partir do fenômeno de interferência de ondas. Isso acontece quando a onda resultante em qualquer ponto em um dado instante é determinada pelo princípio da superposição.

Os efeitos da interferência tornam-se mais facilmente compreendidos quando ondas senoidais são combinadas. A Figura (1) mostra duas fontes idênticas monocromáticas, S_1 e S_2 , que estão em fase:

Figura 1: Duas fontes de ondas coerentes.

Fonte: YOUNG HD, FREEDMAN, 2016.

Supondo que elas tenham a mesma polarização, pela Figura (1) apresentada, vê-se que a distância de S_1 até a é igual à distância de S_2 até esse mesmo ponto. Assim, as fontes levam o mesmo instante para se deslocar até o ponto a , o que mostra que as ondas estão em fase. Desse modo, as duas ondas se somam e a amplitude total no ponto a será o dobro da amplitude de cada onda individual [3]. No ponto b acontece o mesmo.

Percebe-se que a distância de S_2 à b é dois comprimentos de onda maior que a distância de S_1 até o mesmo ponto, de tal modo que uma crista de uma onda coincide com a crista da outra onda, resultando em uma interferência construtiva no ponto b .

Figura 2: Condições para interferência construtiva.

Fonte: YOUNG HD, FREEDMAN, 2016.

Porém, no ponto c, percebe-se que não há um encontro de cristas (ou vales) das ondas provenientes das fontes S1 e S2, ou seja, elas chegam com uma diferença de fase ocasionando uma interferência destrutiva:

Figura 3: Condições para a interferência destrutiva.

Fonte: YOUNG HD, FREEDMAN, 2016.

Então, considerando que o caminho da onda proveniente da fonte S1 é dado por r_1 , e o caminho da onda proveniente da fonte S2 é r_2 , percebe-se que a diferença dos caminhos entre as ondas pode ser dada por um múltiplo inteiro do comprimento de onda (no caso de interferência construtiva):

$$r_2 - r_1 = m\lambda \quad (2.1)$$

Para o caso de interferência destrutiva, essa diferença é dada por um múltiplo semi-inteiro do comprimento de onda:

$$r_2 - r_1 = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (2.2)$$

Onde m é um número real do conjunto dos números inteiros. No caso da luz, quando em um ponto há uma interferência construtiva, o ponto será iluminado e apresentará uma área mais clara:

Figura 4: Interferência construtiva (fonte de luz).

Fonte: HEWITT PG, 2010.

Já em um caso onde há interferência destrutiva, temos:

Figura 5: Interferência destrutiva (fonte de luz).

Fonte: HEWITT PG, 2010.

Então, procurando investigar de maneira quantitativa essa interferência proveniente de uma fonte luminosa, o cientista Thomas Young, propõe o seguinte experimento:

Figura 6: Pequeno esquema semelhante ao experimento feito por Thomas Young nos anos de 1800

Fonte: HEWITT PG, 2010.

A luz proveniente da fonte monocromática incide sobre um anteparo com duas fendas (da ordem de $1 \mu\text{m}$) separadas por uma certa distância ($10 \sim 100 \mu\text{m}$), projetando em uma tela um padrão de interferência.

Então, pode-se utilizar a Figura (7) para analisar a geometria dos raios provenientes das fendas.

Figura 7: Geometria real (vista lateral).

Fonte: YOUNG HD, FREEDMAN, 2016.

Porém, em situações reais, a distância R é muito maior que a distância entre as fendas (d), de tal modo que se pode considerar os raios paralelos, o que implica que a diferença entre os caminhos é dada por:

$$r_2 - r_1 = d \sin \theta \quad (2.3)$$

Sabendo que, essa diferença de caminho foi dada pelas Eq. (2.1) e Eq. (2.2), a depender do caso, temos:

Para a interferência construtiva:

$$d \sin \theta = m\lambda \quad (2.4)$$

E para a interferência destrutiva, temos:

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (2.5)$$

Onde $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ Logo, a Figura formada na tela mostra uma sucessão de pontos com áreas mais brilhantes e outras mais escuras (franjas de interferência).

Pode-se encontrar uma expressão que associe a distância entre as franjas de interferência com o comprimento de onda da luz monocromática incidente [3, 5].

Figura 8: franjas de interferência.

Fonte: HEWITT PG, 2010.

Considerando que y é a distância medida a partir do centro da Figura de interferência até o centro da franja brilhante de ordem m , temos:

$$y = R \tan \theta \quad (2.6)$$

Mas, como y é uma distância muito menor que R , o valor de θ é muito pequeno.

Assim, pode-se considerar que $\tan \theta \approx \sin \theta$.

Então,

$$y = R \sin \theta \quad (2.7)$$

Com isso, as Eq. (2.4) e Eq. (2.5) podem ser aplicadas na Eq. (2.7) para que ela possa ser reescrita da seguinte forma (para a interferência construtiva):

$$y = R \frac{m\lambda}{d} \quad (2.8)$$

Desse modo, essa experiência fornece uma medida direta do comprimento de onda λ . Esse experimento desenvolvido por Young foi o primeiro a obter uma medida direta do comprimento de onda da luz.

Figura 9: Espectro eletromagnético.

Fonte: SERWAY RA, JEWETT J, 2002.

3 OBJETIVOS

Determinar experimentalmente o comprimento de onda de três luzes monocromáticas utilizando o ambiente de simulação virtual do *the Physics Classroom* [2].

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do experimento, fez-se uso da plataforma de simulações virtuais *the Physics Classroom* [2].

Figura 10: Tela de início do experimento (vista superior).

Fonte: The Physics Classroom. Young's Experiment – Interactive. Acesso em: 02/06/2021.

O simulador ainda dispõe de local onde se pode responder a um pequeno teste, em que se pede para determinar o valor do comprimento de onda de cada laser utilizado:

Figura 11: Questionário interativo presente no próprio simulador virtual. Fonte: The Physics Classroom. Young's Experiment – Interactive. Acesso em: 02/06/2021.

Então, fazendo uso de um roteiro experimental estruturado por questões acerca do assunto, iniciou-se o desenvolvimento do experimento no ambiente virtual.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, verificou-se a relação que há entre a distância entre as franjas de interferência e a distância do dispositivo de fenda dupla até a tela. Então, as seguintes imagens foram obtidas:

Figura 12: Tela de projeção das franjas de interferência mais afastada.

Fonte: The Physics Classroom. Young's Experiment – Interactive. Acesso em: 02/06/2021.

Figura 13: Tela de projeção das franjas de interferência mais próximas.

Fonte: The Physics Classroom. Young's Experiment – Interactive. Acesso em: 02/06/2021.

Nota-se que a relação entre a distância (D) do dispositivo de fenda dupla à tela pela distância entre as franjas de interferência (y) é diretamente proporcional, ou seja:

$$D \propto y \quad (5.1)$$

Posteriormente, verificou-se ainda a relação que há entre o comprimento de onda com a distância de uma franja à outra. Então, alterou-se a cor utilizada no laser (assim alterando o comprimento de onda λ). Mantendo a distância até a tela e a distância entre fendas constante, o seguinte resultado foi obtido:

Figura 14: Franjas de interferência para cada comprimento de onda utilizado.

Fonte: The Physics Classroom. Young's Experiment – Interactive. Acesso em: 02/06/2021.

Assim, comparando com a Figura (9), percebe-se que a relação entre o comprimento de onda (λ) com a distância entre os pontos de interferência (y) é do tipo:

$$\lambda \propto y \quad (5.2)$$

Ao alterar a distância de separação entre as fendas (d) e relacionar com a distância entre os pontos de interferência (y), percebeu-se a seguinte relação:

$$d \propto \frac{1}{y} \quad (5.3)$$

Considerando um padrão de interferência construtiva, combinando as Eq. (5.1), Eq. (5.2) e Eq. (5.3), pode-se obter a seguinte expressão:

$$\lambda \propto d \frac{y}{D} \quad (5.4)$$

A constante de proporcionalidade, está associada a m , que é um fator relacionado às franjas de interferência. Logo,

$$m\lambda = d \frac{y}{D} \Rightarrow \lambda = d \frac{y}{mD} \quad (5.5)$$

Onde, λ é o comprimento de onda, y a distância de separação dos pontos de interferência, d a distância de separação das fendas e D a distância até a tela.

Com isso, mantendo d e y constantes, utilizando a Eq. (5.5), e considerando que, apesar do experimento ser virtual, o que minimiza os erros percentuais, a régua utilizada apresenta um erro de medida; Os valores para os comprimentos de onda foram obtidos e expressos na Tabela 1:

Tabela 1: Valores dos comprimentos de onda obtidos.

m = + 1				
Laser	y (m)	D (m)	d (m)	λ (nm)
Vermelho	10^{-2}	3,7	$2,5 \times 10^{-4}$	$(675 \pm 0,5)$
Verde	10^{-2}	4,5	$2,5 \times 10^{-4}$	$(555 \pm 0,5)$
Azul	10^{-2}	5,25	$2,5 \times 10^{-4}$	$(480 \pm 0,5)$

E os valores encontrados foram utilizados para responder ao questionário interativo, onde as respostas foram precisas:

Figura 15: Questionário virtual proposto no ambiente de simulação.

Fonte: The Physics Classroom. Young's Experiment – Interactive. Acesso em: 02/06/2021.

6 CONCLUSÃO

Ainda que no século XVII já fosse possível observar alguns dos fenômenos luminosos que poderiam ser explicados por uma abordagem ondulatória, foi a partir da demonstração de Young, que explicitou a interferência sofrida pela luz monocromática ao sofrer uma difração, que a comunidade científica foi levada a considerar a luz como onda, dadas as sólidas evidências. Reeditando o experimento de Young utilizando uma ferramenta virtual, analisou-se a relação entre o comprimento de onda de uma luz monocromática e a distância entre as fendas sobre as quais ela incide, a distância do anteparo das

fendas até a tela onde a luz é projetada e as distâncias entre o centro de dois pontos sucessivos de interferência construtiva. Dessa forma, foi encontrada uma equação para o comprimento de onda que corrobora com aquela demonstrada por Thomas Young em seu experimento original. Os valores encontrados para cada um dos três comprimentos de onda do experimento virtual indicam que este está em conformidade com a literatura.

REFERÊNCIAS

- [1] ROCHA JF. Origens e evolução das ideias da física. SciELO-EDUFBA; 2002.
- [2] The Physics Classroom. Young's Experiment - Interactive; Acesso em: 02/06/2021. <https://www.physicsclassroom.com/Physics-Interactive/Light-and-Color/Youngs-Experiment/>.
- [3] YOUNG HD, FREEDMAN III R. Física IV: ÓTICA E FÍSICA MODERNA. Tradução Sônia Mi-dori Yamamoto. 12ª edição. Editora Pearson. São Paulo; 2016.
- [4] HEWITT PG. Física Conceitual. 12º. Porto Alegre: Bookman; 2010.
- [5] SERWAY RA, JEWETT J. Princípios de física: óptica e física moderna. São Paulo: Cengage Learning. 2014.
- [6] SERWAY RA, JEWETT J. Principles of Physics: A Calculus-based Text. Fort Worth: Har-court College Pub. 2002.

MODELOS ATÔMICOS: ÁTOMOS DE THOMSON E RUTHERFORD

Resumo: O presente trabalho tem como principal objetivo realizar o estudo experimental comparativo dos modelos atômicos propostos por J.J. Thomson e Ernest Rutherford, utilizando a plataforma virtual PhET "Espalhamento de Rutherford". Assim, utilizando-se um roteiro de estudos, foi possível fazer um estudo comparativo entre os dois modelos, e ainda fazer uma análise sobre a relação dos números de prótons e da energia cinética das partículas incidentes com o ângulo de deflexão das suas trajetórias. Os resultados, obtidos de forma experimental, corroboram com os resultados que foram expostos de forma teórica.

Palavras-chaves: Modelos atômicos, Thomson, Rutherford.

1 INTRODUÇÃO

A busca por uma teoria coerente com as observações experimentais para a estrutura do átomo foi uma odisseia que exemplifica como boa parte da Física foi construída e reconstruída nos últimos dois séculos.

Se um modelo tomava o átomo como uma esfera indivisível, os resultados experimentais de Joseph John Thomson e a consequente descoberta do elétron levam a outro, dessa vez considerando o átomo disposto de cargas elétricas positivas contínuas incrustadas por cargas negativas.

Se esse novo modelo considerava o átomo como disposto de cargas elétricas positivas contínuas incrustadas por cargas negativas, as observações experimentais de Hans Geiger, Ernest Marsden e Ernest Rutherford surgem apontando a necessidade de um outro, dada a incapacidade do anterior em explicar uma fração considerável do espalhamento das partículas alfa por átomos. E, assim, esse processo se repete, seja relativo à estrutura atômica ou por outras importantes concepções [1, 2, 3, 4, 5].

Mas então como se desenrolou a empreitada experimental supervisionada por Rutherford? Ainda que não soubessem, à época, que uma partícula alfa era equivalente a um núcleo de átomo de hélio $+2$, os supervisionados de Rutherford decidiram verificar o comportamento de átomos radioativos ao serem direcionados a uma fina camada de metal. Ao dispor de um microscópio que pode ser utilizado para verificar as colisões ao redor dessa camada metálica (Figura 1), eles pretendiam expressar a probabilidade de que partículas *alfa* (α) desviem para cada direção.

Segundo o modelo atômico de Thomson, a interação entre essas partículas e os átomos seria resultante da força de Coulomb produzida por conta da presença de cargas positivas e negativas nesses últimos. Entretanto, a massa do elétron é de ordem entre 10^3 e 10^4 vezes menor do que a massa de *alfa*, de forma que essa interação não seria o suficiente para provocar grandes deflexões.

Naturalmente, a distribuição uniforme da carga positiva também não deveria provocar deflexões em graus elevados, visto que as contribuições colombianas seriam muito semelhantes em pontos diferentes e de direções opostas, obtendo-se então uma contribuição quase nula, oriunda dos cancelamentos esperados. Além disso, o átomo não era visto como sólido; esperava-se que as partículas *alfa* pudessem o atravessar.

Após essas considerações, pode-se entender facilmente a surpresa de Rutherford ao constatar o seguinte: ainda que a maior parte das partículas *alfa* não tenha sofrido grandes deflexões, uma

parcela delas desviou para direções diferentes, e uma porção ainda menor chegou a defletir em 180° (ou seja, retornou na direção de emissão). É desse contexto que surge o seu clássico depoimento:

"Foi a coisa mais incrível que jamais me aconteceu em toda a minha vida. Era quase tão incrível como se disparasse um obus de 15 polegadas contra um lenço de papel e ele fosse defletido para trás, atingindo você." [5, 4].

Mas ele foi além: "Refletindo, percebi que esse retro espalhamento deveria ser produzido por uma única colisão, e fazendo as contas vi que seria impossível obter qualquer coisa dessa ordem de grandeza, exceto num sistema em que a maior parte da massa do átomo estivesse concentrada num núcleo diminuto. Foi então que tive a ideia de um átomo com a carga (positiva) e massa concentradas numa minúscula região central" [4].

A partir dessa concepção e da sua coerência com os experimentos e cálculos, estabeleceu-se o modelo atômico de Rutherford - também chamado de "modelo planetário do átomo". Entretanto, assim como os anteriores, o seu modelo viria a ser criticado e "aprimorado" futuramente, a partir de novas observações [1, 3, 5].

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ESPECTROS ATÔMICOS

No início do século XX, tinha-se uma grande quantidade de dados a respeito da emissão de luz por um gás. A luz emitida pelos átomos desses gases, quando excitados, após passar por um espectroscópio, apresenta um conjunto discreto de linhas de diferentes cores espaçada entre elas. A distância entre esses espaçamentos e as intensidades eram características de cada elemento [6].

Johann Jakob Balmer, em 1885, determinou que o comprimento de onda λ das linhas no espectro visível do hidrogênio podiam ser descritas através da seguinte equação:

$$\lambda = (364,6 \text{ nm}) \frac{m^2}{m^2 - 4}$$

Onde, $m=3,4,5\cdots$

Desse modo, J. Balmer sugeriu que tal expressão pudesse ser um caso especial e que deveria existir uma outra expressão que pudesse ser aplicada aos espectros de outros elementos. Então, Johannes Rydberg e Walter Ritz determinam a seguinte expressão [6]:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left[\frac{1}{(n_2)^2} - \frac{1}{(n_1)^2} \right]$$

Onde n_1 e n_2 são números inteiros, $n_1 > n_2$, e R é a constante de Rydberg, que varia de acordo com o elemento.

Diversas tentativas foram feitas para construir um modelo atômico que levasse à essas expressões. Entre diversos modelos, um dos mais conhecidos é o proposto por J. J. Thomson. No modelo atômico proposto por Thomson, o átomo é uma esfera positiva uniformemente eletrificada, e dentro dessa esfera há um número de corpúsculos distribuídos numa série de anéis paralelos à carga positiva e os elétrons negativos estavam dispostos sobre o átomo inteiro. Uma analogia feita é que esse modelo seria como um pudim composto por um átomo positivamente carregado e com as cargas negativas espalhadas dentro desse pudim, como ameixas.

Com base nesse modelo, o campo elétrico dentro desse átomo deveria ser muito pequeno, e a força sobre uma partícula alfa que adentre o átomo deveria ser muito fraca.

2.2 O EXPERIMENTO DE RUTHERFORD

Tendo escavado um bloco de chumbo, colocou-se uma fonte de rádio ou radônio nesse bloco, de forma a permitir que o material radioativo fosse emitido por uma abertura estreita dessa caixa em direção a uma fina folha de ouro. Uma tela de sulfeto de zinco circundava essa folha para que, com o auxílio de um microscópio, fosse possível observar as partículas alfa colididas nessa tela fluorescente [2, 4].

Figura 1: "O espalhamento ocasional de partículas alfa em grandes ângulos, por átomos de ouro, fez Rutherford descobrir o núcleo pequeno e de muita massa existente nos centros atômicos"

Fonte: HEWITT, 2010.

Com a observação de grandes desvios, o modelo de Thomson apresentava incoerências com esse experimento, e um novo modelo deveria ser proposto. Rutherford supôs que a carga positiva estivesse distribuída por uma esfera (da ordem de $10^{-10}m$) e que essa carga estivesse concentrada em um volume muito menor. Desse modo, ela atuaria como uma carga puntiforme para pequenas distâncias. Assim, o espalhamento constatado com o experimento poderia acontecer apresentando ângulos bem maiores.

Rutherford chamou essa concentração de cargas positivas de núcleo. Então, comparando os dois modelos:

Figura 2: a) Modelo de Thomson: partícula α com pequeno ângulo de espalhamento; b) Modelo de Rutherford: uma partícula α pode ser espalhada por um grande ângulo (fora de escala).

Fonte: SERWAY & JEWETT, 2014.

Figura 3: "Espalhamento ou dispersão de Rutherford. O núcleo é considerado uma carga pontual Q situada na origem O . Quando está a uma distância r do núcleo, a partícula α sofre uma força de repulsão de $\frac{kq_{\alpha}Q}{r^2}$. A partícula α descreve uma trajetória hiperbólica que tem como assíntota inicial uma reta paralela à reta OB , que faz um ângulo θ com a reta COA . Usando as equações de mecânica

clássica, é possível encontrar uma relação entre o parâmetro de impacto b e o ângulo de espalhamento θ " Fonte: adaptado de TIPLER, 2014.

Com base na Figura 3 (adaptada [4]), o parâmetro de impacto b possui com θ a seguinte relação:

$$b = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_0 Q}{m_\alpha v^2} \right) \cot \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (2.1)$$

Para obter o número total de partículas dispersas por segundo, multiplica-se $\pi b^2 I_0$ pelo número de núcleos da folha de metal (nesse caso, ouro). Sendo n o número de núcleos por unidade de volume:

$$n = \frac{\rho N_A}{M} \quad (2.2)$$

Considerando t como a espessura da folha de ouro e A como a área de seção reta do feixe, calcula-se o número total de núcleos como nAt . Assim, para um ângulo de espalhamento maior do que θ , $\pi b^2 I_0 n t A$ é o número total de partículas por segundo.

Para a obtenção da fração de partículas espalhadas dessa forma, é necessário dividir essa expressão pelo número de partículas incidentes por segundo. Com isso, essa fração f será:

$$f = \pi b^2 n t \quad (2.3)$$

Tendo o desenvolvimento anterior ratificado pelos seus resultados experimentais e considerando o seu modelo nuclear, Rutherford pôde apresentar uma expressão que relaciona o número de partículas α (ΔN) e o ângulo de espalhamento θ . ΔN depende ainda do número atômico dos átomos do alvo (Z), além da carga elementar e , da espessura t da folha de metal ($_{79}\text{Au}$), por exemplo), da intensidade I_0 do feixe incidente, da energia cinética E_k dessas partículas e da geometria do detector. Assim:

$$\Delta N = \left(\frac{I_0 A_{ci} n t}{r^2} \right) \left(\frac{k Z e^2}{2 E_k} \right) \frac{1}{\sin^4 \left(\frac{\theta}{2} \right)} \quad (2.4)$$

Conforme Tipler (adaptado) [4]: A equação 2.4 pode ser usada para calcular teoricamente o número ΔN de partículas que serão observadas na tela do cintilômetro de acordo com o modelo nuclear de Rutherford.

Figura 4: "Número de partículas α espalhadas por unidade de área em função do ângulo de espalhamento θ . A curva é proporcional à função $\sin^{-4}\theta/2$. Os pontos experimentais foram obtidos por Geiger e Marsden usando partículas α de 7,7 MeV.

Fonte: R.D. Evans, *The Atomic Nucleus*, New York, McGraw-Hill, 1955.

2.3 CONSIDERAÇÕES DA FÍSICA CLÁSSICA

Após a nova proposta de modelo atômico feita por Rutherford, alguns questionamentos foram feitos. Dentre eles, houve um a respeito da atração que poderia existir entre o elétron e o núcleo positivamente carregado. O que impediria esse elétron de "cair" em direção ao núcleo? Rutherford sugeriu que os elétrons estivessem girando em órbitas em torno do núcleo, semelhante ao sistema solar [1].

No entanto, com base na teoria eletromagnética clássica, qualquer carga elétrica em aceleração irradia ondas eletromagnéticas. Assim, um elétron que estivesse orbitando dessa forma, proposta por Rutherford, teria sempre uma aceleração centrípeta. Logo, deveria emitir radiação o tempo todo. Com isso, a energia de um elétron orbitando diminuiria, tornando a sua órbita cada vez menor, levando-o a se chocar com o núcleo [1].

Figura 5: Comportamento previsto com base nas propostas do modelo atômico de Rutherford.

Fonte: SERWAY & JEWETT, 2014.

Então, de acordo com a física clássica:

- Um elétron em órbita apresenta aceleração, logo emite ondas eletromagnéticas;
- Considerando a emissão, o elétron perderá energia e irá descrever um movimento de espiral em direção ao núcleo;
- A velocidade angular do elétron aumentaria conforme sua órbita diminuísse, causando aumento da frequência das ondas irradiadas.

Porém, percebe-se que, na verdade, os átomos são estáveis e só emitem luz (em frequências específicas) quando excitados.

3 OBJETIVOS

Fazer um estudo experimental qualitativo, em ambiente virtual, comparando os modelos atômicos de J.J. Thomson e Ernest Rutherford.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do experimento, fez-se uso da plataforma de simulações virtuais *PhET* [7].

Figura 6: tela de início do experimento (seleção do modelo atômico).

Fonte: *print screen* da Plataforma de simulação virtual *PhET* Colorado – Espalhamento de Rutherford.

Antes de iniciar os procedimentos experimentais, foi feito um estudo teórico sobre o tema. Com base em um roteiro experimental, iniciou-se o desenvolvimento do experimento no ambiente virtual.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 O ÁTOMO BOLO DE PASSAS

Selecionando a opção bolo de passas, a seguinte tela é apresentada:

Figura 7: Simulação para o Átomo de bolo de passas: a) folha de ouro e emissor de partícula alfa; b) Modelo do átomo de bolo de passas; c) seletor de energia para as partículas alfa.

Fonte: *print screen* da Plataforma de simulação virtual *PhET* Colorado – Espalhamento de Rutherford.

Percebe-se que o átomo está disperso com uma cor avermelhada, indicando a carga po-sitiva. É possível notar os pequenos pontos distribuídos de maneira uniforme sobre a man-cha. Esses pontos representam os elétrons.

Assim, se ativou o emissor da partícula alfa e foi observado a trajetória aparente das partículas alfa.

Figura 8: Emissor de partículas alfa acionado e trajetória das partículas alfa.

Fonte: print screen da Plataforma de simulação virtual PhET Colorado – Espalhamento de Rutherford.

Nota-se que não há deflexão perceptível na trajetória das partículas. Isso se deve à baixa magnitude do campo elétrico dentro desse tipo de átomo, já que a carga positiva e negativa está distribuída de maneira uniforme.

5.2 O ÁTOMO DE RUTHERFORD

Utilizando-se a opção "Átomo de Rutherford" no simulador, a seguinte tela é apresentada:

Figura 9: Ambiente de simulação para o Átomo de Rutherford: a) Seleção do tipo de visualização; b) emissor de partícula alfa; c) demonstração do experimento; d) seletor de energia da partícula alfa; e) painel dos parâmetros do átomo utilizado.

Fonte: print screen da Plataforma de simulação virtual PhET Colorado – Espalhamento de Rutherford.

Em um primeiro momento, fez-se o estudo utilizando o átomo de ouro ($^{79}_{196}\text{Au}$). Ao acionar o emissor de partículas alfa, as seguintes trajetórias foram mostradas Figura 10.

Figura 10: trajetória da partícula alfa (vista atômica).

Fonte: print screen da Plataforma de simulação virtual PhET Colorado – Espalhamento de Rutherford.

Percebe-se que há deflexões da partícula alfa em regiões próximas ao núcleo (simbolizado por um ponto amarelo nesse tipo de visualização). Ao alterar para o modo "vista nuclear", as trajetórias apresentadas foram aquelas explicitadas na Figura 11.

Figura 11: Trajetória das partículas alfa (vista nuclear).

Fonte: *print screen* da Plataforma de simulação virtual *PhET Colorado* – Espalhamento de Rutherford. Ao aumentar o número de prótons, consequentemente alterando o valor da carga positiva do átomo, as trajetórias apresentam uma maior deflexão:

Figura 12: Trajetória das partículas alfa na presença de uma carga positiva maior.

Fonte: *print screen* da Plataforma de simulação virtual *PhET Colorado* – Espalhamento de Rutherford.

Então, se percebe que há uma relação de proporcionalidade direta entre a quantidade de carga positiva do átomo com o ângulo de deflexão θ .

Outro fator analisado foi a energia cinética das partículas alfa. Colocando os valores no mínimo, as trajetórias obtidas estão apresentadas na Figura 13.

Figura 13: Trajetória das partículas alfa na presença de uma carga positiva maior.

Fonte: print screen da Plataforma de simulação virtual PhET Colorado – Espalhamento de Rutherford.

Essas trajetórias foram bem diferentes para o valor máximo de energia cinética. Logo, há uma relação inversa entre o ângulo de deflexão com a energia cinética.

6 CONCLUSÃO

Após apontar as incoerências da simulação do experimento de Geiger-Marsden que se utiliza do modelo atômico de Thomson com que foi observado no século passado, se pôde observar, com a realização do experimento virtual, a incoerência do modelo de Thomson na tentativa de explicar a natureza atômica e ao mesmo tempo verificar as considerações de Ernest Rutherford acerca do espalhamento de partículas alfa quando atravessava a folha de ouro, reforçando a existência de um núcleo denso positivamente carregado. Foi possível estabelecer uma relação de proporcionalidade direta entre a quantidade de carga positiva do átomo com o ângulo de deflexão θ , além de uma relação inversa entre o ângulo de deflexão com a quantidade de energia cinética, em concordância com o esperado, levando Rutherford a propor o modelo atômico planetário.

REFERÊNCIAS

- [1] SERWAY RA, JEWETT J. Princípios de física: óptica e física moderna. São Paulo: Cengage Learning. 2014.
- [2] HEWITT PG. Física Conceitual. 12º. Porto Alegre: Bookman; 2010.
- [3] NUSSENZVEIG HM. Curso de física básica: Ótica, relatividade, física quântica, 2º ed. vol. 4. Editora Blücher; 2014.
- [4] TIPLER P, Llewellyn RA. Física moderna 6º ed. Livros Técnicos e Científicos; 2014.
- [5] LOOS P. O Modelo Atômico de Rutherford; Acesso em: 20/06/2021. Ciência Todo Dia. YouTube. <https://youtu.be/VPIjleaaLfc>.
- [6] TIPLER PA, MOSCA G. Física para cientistas e engenheiros. Vol. 3: física moderna: mecânica quântica, relatividade, e a estrutura da matéria. Grupo GenLTC; 2000.
- [7] PhET. Espalhamento de Rutherford; Acesso em: 21/06/2021. https://phet.colorado.edu/sims/html/rutherford-scattering/latest/rutherford-scattering_pt_BR.html.

A RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO

Resumo: O presente trabalho tem como principal objetivo realizar o estudo experimental a respeito da radiação do corpo negro e determinar a relação estabelecida pela Lei de deslocamento de Wien. Em um primeiro momento, tem-se uma abordagem teórica acerca do processo de desenvolvimento e compreensão das relações que há entre a emissão de radiação eletromagnética por um corpo e a temperatura. Com o auxílio de um roteiro com questões norteadoras, desenvolveu-se o experimento e conseguiu-se verificar que a temperatura e o comprimento de onda no ponto de altura máxima possuem uma relação inversamente proporcional, e que resulta em uma constante. O resultado experimental encontrado está coerente com os apresentados nas bibliografias, apresentando um erro percentual menor que 0,001%.

Palavras-chaves: Quanta, Corpo negro, Max Planck, Catástrofe Ultravioleta.

1 INTRODUÇÃO

Em uma obra chamada “O mundo dos Quanta”, John Polkinghorne detalha que a conhecida revolução quântica se iniciou, ainda de forma indireta, por volta dos anos 1900, a partir dos trabalhos desenvolvidos por Lord Rayleigh (1842 - 1919) e James Jeans (1877 - 1946), quando os mesmos estudaram a respeito da possibilidade de encontrar uma equação que pudesse prever com precisão a quantidade de energia que um corpo incandescente iria irradiar [1].

Os corpos, quando são aquecidos, emitem uma radiação térmica que, de modo geral, apresenta uma distribuição de espectro contínuo de frequências, principalmente na região do infravermelho (citar Studart artigo). Na verdade, Rayleigh e Jeans estavam tentando resolver um problema chamado "corpo negro". Essa denominação é dada a um objeto ao qual se absorve toda a energia que incide sobre ele [1].

A temperatura de um corpo é determinada pela energia cinética média dos átomos que o compõe, a absorção de energia implica no aumento de temperatura do objeto. Mas os átomos, por sua vez, contêm partículas carregadas (elétrons) que são aceleradas pelas oscilações. Com base na teoria eletromagnética, os átomos emitem radiação e consequentemente têm as suas energias cinéticas diminuídas, então a temperatura também diminui [2]. A radiação térmica são ondas eletromagnéticas geradas pelas oscilações das partículas. Essa radiação térmica não pode ser visualmente observada; a maior parte está concentrada em comprimentos de onda muito maiores que os da luz visível.

Quando um corpo é aquecido, aumentando assim a radiação térmica, a energia irradiada se estende a comprimentos de onda cada vez menores. Entre as temperaturas de $600\sim 700^{\circ}\text{C}$, há energia suficiente para que o objeto aquecido brilhe emitindo uma luz de tom avermelhado. Em temperaturas maiores, o objeto começa a apresentar uma cor mais clara, chegando até a cor branca [2]. Para o Sol, por exemplo, que apresenta uma temperatura superficial de aproximadamente 6000 K , o espectro compreende toda região do visível, comprimentos maiores (na região do infravermelho) e menores (ultravioleta) [3].

William Ritchie (1790 - 1837), em 1833, verificou a proporcionalidade entre emissão e absorção total em dois corpos radiantes, A e B . Fazendo uso de um termômetro apropriado, ele encontrou a seguinte relação:

$$\frac{e_A}{a_A} = \frac{e_B}{a_B} \quad (1.1)$$

Onde e é potência emissiva (a taxa de variação de uma quantidade de energia radiante, por exemplo), e a é a absortividade, que seria a fração da energia incidente sobre a superfície que é absorvida .

Figura 1: Aparato experimental de radiação e absorção.

Fonte: E. Ducretet & Cie Paris, France, 1871-1889. Science Museum Group.

Supondo que um dos corpos da Eq. (1.1) apresente um $a_N=1$, diz-se, então, que um dos corpos (N) consegue absorver toda a radiação que incide sobre ele. Eis que N é denominado corpo negro. Portanto, a Eq. (1.1) para um corpo negro pode ser reescrita como:

$$e_N = \frac{e_A}{a_A}, \text{ tal que } e_N > e_A \quad (1.2)$$

Desse modo, o corpo negro apresenta uma potência emissiva muito maior do que a de qualquer outro corpo. Percebe-se que esse objeto seria ideal; no entanto, não pode ser construído. Mas pode-se fazer uma boa aproximação, utilizando-se de uma caixa oca com um pequeno orifício, onde qualquer radiação que entre nele irá rebater entre as paredes internas até ser absorvida, conforme a Figura 2:

Figura 2: Esquema de um corpo negro com uma cavidade. A probabilidade de que um raio que entra na cavidade torne a sair pelo furo antes de ser absorvido pelas paredes é muito baixa.

Fonte: Adaptado de TIPLER, 2014.

A caixa possui as paredes internas constituídas por um material refletor e está revestida por um excelente material isolante. Dessa forma, toda a radiação incidente é absorvida pelo corpo.

Era desse modo que os oleiros antigos conseguiam determinar a temperatura interna das estufas que utilizavam. Por volta dos anos de 1792, Josiah Wedgwood, um porcelanista famoso, percebeu que todos os corpos se tornavam vermelhos à mesma temperatura [4].

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.2 CORPO NEGRO

Em 1879, Josef Stefan (1835 - 1893), um físico e matemático austro-esloveno, conseguiu determinar uma relação entre a potência por unidade de área irradiada por um corpo negro e a temperatura. A partir de dados experimentais, Stefan concluiu que a energia total é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta. Após cinco anos, Ludwig Boltzmann chegou aos mesmos resultados a partir das leis termodinâmicas. Então, a relação estabelecida foi:

$$R = \sigma T^4 \quad (2.1)$$

Onde R é a potência irradiada por unidade de área, T a temperatura absoluta e $\sigma = 5,6705 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ é a constante de Stefan. A equação 2.1 é conhecida como Lei de Stefan Boltzmann.

Em 1896, Wilhelm Wien, em conjunto com outros pesquisadores, montara um experimento para observar a distribuição de cor da radiação que escapava de um buraco em uma das pontas de um

cilindro oco, medindo do ponto próximo ao infravermelho até o violeta. As observações mostraram que o valor do comprimento de onda $\lambda_{m\acute{a}x}$, para o qual a radiância espectral é máxima, é inversamente proporcional ao valor da temperatura T .

Figura 3: Gráfico da função de distribuição espectral $R(\lambda)$ para várias temperaturas.

Fonte: TIPLER, 2014.

Desse modo, a seguinte relação foi descrita por Wien:

Ou ainda,

$$\lambda_{m\acute{a}x} T = \text{constante} \quad (2.2)$$

Onde essa constante tem o valor de $2,898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$. A Eq (2.2) é conhecida como a lei de deslocamento de Wien.

2.2 A EQUAÇÃO DE RAYLEIGH-JEANS

Para se calcular a distribuição espectral de um corpo negro ($R(\lambda)$), necessita-se de-terminar a densidade de energia das ondas eletromagnéticas do interior de uma cavidade. Considerando a Figura 2, percebe-se o seu pequeno orifício, cujo curto tamanho faz com que a probabilidade de que um raio entre na cavidade e torne a sair pelo furo antes de ser absor-vida pela parede seja muito pequena. Assim, a potência irradiada para fora da cavidade é proporcional à densidade total de energia U no interior da cavidade, de tal modo que [2]:

$$R = \frac{1}{4} U c \quad (2.3)$$

Considerando que $u(\lambda)d\lambda$ seja uma fração da energia por unidade de volume, no interior da cavidade na faixa de comprimentos de onda no intervalo de λ a $\lambda+d\lambda$, a seguinte relação é estabelecida:

$$R(\lambda) = \frac{1}{4} U(\lambda)c \quad (2.4)$$

O resultado de tal relação é que o número de modos de oscilação por unidades de volume ($n(\lambda)$) não depende da forma da cavidade e é dado por:

$$n(\lambda) = 8\pi\lambda^{-4} \quad (2.5)$$

Com base na teoria clássica, a energia média de oscilação é igual a kBT , a mesma para oscilador harmônico unidimensional. A distribuição espectral da densidade de energia é dada por:

$$u(\lambda) = k_B T n(\lambda) = 9k_B \pi \lambda T \lambda^{-4} \quad (2.6)$$

Tal relação, demonstrada pela primeira vez por Lord Rayleigh, é conhecida como lei de Rayleigh-Jeans [2].

Lord Rayleigh e James Jeans recorriam às mesmas afirmativas teóricas clássicas, do mesmo modo como Maxwell fez com a teoria cinética dos gases. A Equação de Rayleigh-Jeans demonstrou funcionar perfeitamente para baixas frequências, mas na região de alta frequência os resultados não eram compatíveis com a realidade. Isso mostrou que a teoria clássica previa uma intensidade infinita para a região do ultravioleta [4, 2]:

$$\int_0^{\infty} u(\lambda) \lambda \rightarrow \infty \quad (2.7)$$

Tal resultado ficou conhecido como a catástrofe ultravioleta.

A catástrofe ultravioleta tornou-se um paradoxo para a física clássica. Caso Rayleigh e Jean estivessem corretos, seria muito perigoso sentar diante de uma lareira [4].

2.3 A LEI DE PLANCK

Em 1900, Max Planck anunciou que havia conseguido obter uma função $u(\lambda)$ que estava de acordo com os resultados experimentais [2].

Considerando que a energia média de um oscilador harmônico simples unidimensional pode ser calculada a partir da função distribuição de energia, obtida pela distribuição de Maxwell-Boltzmann,

$$f(E) = A e^{-\frac{E}{k_B T}} \quad (2.8)$$

Onde A é uma constante e $f(E)$ é a fração de osciladores com energia compreendida entre E e $E+dE$. A energia média é dada por:

$$\bar{E} = \int_0^{\infty} E f(E) dE = \int_0^{\infty} E A e^{-\frac{E}{k_B T}} dE \quad (2.9)$$

Calculando o valor da integral, obtém-se: $E=k_B T$, que é o mesmo resultado clássico usado por Rayleigh e Jeans.

Planck percebeu que podia obter uma função empírica que usou para calcular a energia média supondo que a energia das cargas oscilantes da radiação emitida era uma variável discreta, ou seja, uma variável capaz de assumir apenas valores $0, \epsilon, 2\epsilon, \dots, n\epsilon$, em que n é um número inteiro [2].

Assim, Planck supôs que a energia era dada por:

$$E_n = n \epsilon = n h f \quad (2.10)$$

Onde n é um número inteiro positivo, e h é a constante de Planck. Assim, a função de distribuição de Maxwell-Boltzmann da Eq. (2.8) se torna:

$$f_n = A e^{-\frac{E_n}{k_B T}} = A e^{-\frac{n\epsilon}{k_B T}} \quad (2.11)$$

Em que a constante A é determinada pela constante de normalização segundo a qual a soma de todas as frações f_n deve ser igual a 1, desse modo:

$$\sum_{n=0}^{\infty} E_n f_n = \sum_{n=0}^n E_n A e^{-\frac{E_n}{k_B T}} \quad (2.12)$$

Os somatórios resultam em:

$$\bar{E} = \frac{hc}{\lambda \left(e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1 \right)} \quad (2.13)$$

Multiplicando a Eq. (2.13) pela Eq. (2.5), obtém-se a função distribuição da densidade de energia no interior da cavidade:

$$u(\lambda) = \frac{8\pi h c \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \quad (2.14)$$

Eq. (2.14) é denominada Lei de Planck. Para valores muito grandes de λ , podemos usar a aproximação $e^x \approx 1+x$ com $x = hc/\lambda k_B T$ para a Eq. (2.14). Nesse caso, temos:

$$e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1 \approx \frac{hc}{\lambda k_B T}$$

e, portanto,

$$u(\lambda) \rightarrow 8\pi \lambda^{-4} k_B T,$$

que é a mesma fórmula proposta por Rayleigh-Jeans.

Quando $\lambda \rightarrow 0$, a lei de Planck permite calcular o valor que aparece na lei de deslocamento de Wien.

O valor da constante de Planck (h), pode ser determinado ajustando a função pela Eq.(2.14) aos resultados experimentais. Atualmente, o valor aceito é:

$$\begin{aligned} h &= 6,626 (10^{-34}) J s \\ &= 4,136 (10^{-15}) eV s \end{aligned}$$

Planck tentou conciliar sua lei com os princípios da física clássica, porém não obteve sucesso.

3 OBJETIVOS

Fazer um estudo experimental qualitativo, em ambiente virtual, sobre a radiação do corpo negro.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do experimento, fez-se uso da plataforma de simulações virtuais *PhET* [5].

Figura 4: tela de início do experimento.

Fonte: print screen da plataforma de simulação virtual PhET Colorado – Radiação do Corpo Negro. Antes de iniciar os procedimentos experimentais, fez-se um estudo teórico relativo ao experimento. Após isso, com base em um roteiro experimental estruturado por questões norteadoras, iniciou-se o desenvolvimento do experimento no ambiente virtual.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao acessar a simulação, é possível manipular algumas variáveis. Dentre elas, a temperatura. Verifica-se então os valores do comprimento de onda no pico do gráfico para as temperaturas referentes:

Figura 5: Ambiente de simulação com os valores referentes a temperatura de 300 K, que representa a Terra. Fonte: *print screen* da plataforma de simulação virtual *PhET* Colorado – Radiação do Corpo Negro.

Essas alterações de temperatura foram feitas para os outros pontos e os valores foram tabelados. Relacionando a temperatura com a intensidade eletromagnética, os seguintes valores foram obtidos:

Tabela 1: Tabela relacionando os dados Temperatura X Intensidade eletromagnética.

Ambiente	Temperatura (K)	Intensidade ($\frac{W}{m^2}$)
Terra	300	$4,59 \cdot 10^2$
Lâmpada	3000	$4,59 \cdot 10^6$
Sol	5800	$6,42 \cdot 10^7$
Sirius A	9900	$5,45 \cdot 10^8$

Percebe-se que há uma relação do tipo:

$$T \propto I \quad (5.1)$$

Onde T é a temperatura e I a intensidade eletromagnética.

Também foi feita a relação entre a temperatura e a densidade de potência espectral (De). Os dados obtidos foram explicitados na tabela 2.

Tabela 2: Valores obtidos para Densidade de Potência espectral para cada temperatura.

Temperatura (K)	D_e (MW/W/m ² /μm)
300	$3 \cdot 10^{-5}$
3000	3,13
5800	84,46
9900	1223,71

A partir da tabela 2, percebe-se a relação do tipo:

$$T \propto D \quad (5.2)$$

De modo análogo, os valores obtidos para temperatura e comprimento de onda no pico λ foram tabelados:

Tabela 3: Valores de comprimento de onda no pico para cada temperatura.

Temperatura (K)	λ no pico (μm)
300	9,659
3000	0,966
5800	0,500
9900	0,293

A partir da tabela 3, percebe-se a seguinte relação:

$$\lambda_p \propto \frac{1}{T} \quad (5.3)$$

Onde, para os valores obtidos da relação temperatura e comprimento de onda no pico, fazendo o produto entre as grandezas, chega-se a uma constante. Os valores para tal constante foram anotados na terceira coluna da tabela 4.

Tabela 4: Valores das constantes obtidas a partir do produto $T \cdot \lambda_p$.

Temperatura (K)	λ no pico (μm)	$T \cdot \lambda_p$ (K · m)
300	9,659	$2,897 \cdot 10^{-3}$
3000	0,966	$2,898 \cdot 10^{-3}$
5800	0,500	$2,900 \cdot 10^{-3}$
9900	0,293	$2,007 \cdot 10^{-3}$

Essa relação é conhecida como lei de deslocamento de Wien. Com os dados experimentais, o valor dessa constante foi:

$$w = (2,899 \pm 0,001) \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{m} \quad (5.4)$$

Quando comparado ao valor encontrado por Wien, o erro percentual encontrado não foi significativo, com valores abaixo de 0,001%.

6 CONCLUSÃO

Conclui-se que há uma relação entre a temperatura de um corpo negro com o comprimento de onda no ponto de máximo. O estudo também permitiu estabelecer a relação que foi proposta pela Lei de deslocamento de Wien, de forma que foi possível calcular a constante, que apresentou o seguinte valor experimental $w = (2,899 \pm 0,001) \cdot 10^{-3} \text{ K m}$, o qual, quando comparado aos valores encontrados na bibliografia, apresentou um erro percentual inferior a 0,001%. Apesar do estudo ser baseado em

uma simulação virtual (o que, a princípio, pode criar expectativas de um erro percentual nulo), os instrumentos que permitem fazer a análise sobre os valores apresentam um limite dimensional. Logo, o valor do erro apresentado pode estar associado ao fator da melhor precisão, bem como à leitura de cada experimentador.

REFERÊNCIAS

- [1] ROCHA JF. Origens e evolução das ideias da física. SciELO-EDUFBA; 2002.
- [2] TIPLER P, Llewellyn RA. Física moderna 6ª ed. Livros Técnicos e Científicos; 2014.
- [3] HEWITT PG. Física Conceitual. 12ª. Porto Alegre: Bookman; 2010.
- [4] McEvoy JP, Zarate O. Introducing quantum theory: A graphic guide. Icon Books Ltd; 2014.
- [5] PhET. Radiação do Corpo Negro; Acesso em:21/06/2021.https://phet.colorado.edu/sims/html/blackbody-spectrum/latest/blackbody-spectrum_pt.html.

EFEITO FOTOELÉTRICO

Resumo: O presente trabalho tem como principal objetivo realizar o estudo experimental sobre o efeito fotoelétrico, utilizando uma simulação disponível na plataforma virtual PhET. Assim, utilizando-se um roteiro de estudos, estruturado por questões norteado-ras, foi possível determinar a constante de Planck com um erro percentual de 0,03%. Os resultados, obtidos experimentalmente, corroboram com aqueles que foram expos-tos de forma teórica.

Palavras-chaves: Fóton, Efeito fotoelétrico, Energia de repouso.

1 INTRODUÇÃO

Após séculos de debates entre filósofos e físicos acerca da natureza da luz, James Clerk Maxwell, na segunda metade do século XIX, consegue, a partir das famosas "Equações de Maxwell", "prever" o comportamento ondulatório da luz. Assim, nos anos seguintes, com a consolidação da luz como onda, parte da comunidade científica pode ter desconsiderado essa discussão como passível de ser estendida. Entretanto, entre década de 1880 e década de 1900, os experimentos com raios catódicos de Philipp E. A. Von Lenard (que viria a ser um defensor do nazismo [1]) abriram o caminho para a observação de um novo efeito que demonstraria o comportamento corpuscular da luz, como indicado por Heinrich R. Hertz (1857 - 1894). Esse fenômeno, atualmente conhecido como "efeito fotoelétrico", consiste na retirada de elétrons da superfície de um metal após emitir sobre ela um feixe de radiações eletromagnéticas.

Enquanto Max Planck estava ainda desenvolvendo argumentos sobre o problema com a radiação do corpo negro, Philipp Lenard (1862 - 1947), cientista alemão, desenvolvia um experimento no qual direcionava feixes de raios catódicos para lâminas de metal.

Figura 1: O efeito foto elétrico.

Fonte: SERWAY & JEWETT, 2014.

Apesar desse efeito ter sido detectado também por Heinrich Hertz, dez anos adiante, Lenard estava com condições de medir certas propriedades desses "fotoelétrons" utilizando um circuito elétrico simples [3].

Os elétrons ejetados são produzidos após incidir sobre o metal uma radiação eletromagnética, e esses elétrons são recebidos por uma outra placa coletora. Então, a corrente fotoelétrica é medida pelo dispositivo com o auxílio de um amperímetro. O potencial elétrico entre a pala emissora e a receptora pode variar e exercer forte efeito na corrente que é medida.

Há um grande número de aplicações do efeito fotoelétrico: os óculos de visão noturna, células fotovoltaicas e os sensores de controle remoto são exemplos [2].

Em 1905, Albert Einstein (1879 - 1955), em seu artigo sobre o quantum de luz¹, consegue explicar esse fenômeno de forma teórica, trabalho que o fez ganhar o prêmio Nobel de Física em 1921 [3]. Com isso, o presente trabalho investiga o desenvolvimento experimental sobre o efeito fotoelétrico com o objetivo de obter as relações teóricas acerca do fenômeno.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Einstein propôs que a quantização da energia, usada por Max Planck, fosse uma característica universal da luz, de forma que a luz seria constituída por quanta (pacotes) isolados de energia hf (com f sendo a frequência e h a constante de Planck).

Figura 2: Experiência testando a consistência do efeito fotoelétrico com o modelo ondulatório da luz.

Fonte: SERWAY & JEWETT, 2014.

Quando um fóton chega à superfície do cátodo, toda a sua energia é transferida para um elétron. O cátodo iluminado emite fotoelétrons com várias energias cinéticas.

Caso o campo elétrico aponte na direção do cátodo, os elétrons são acelerados na direção do ânodo, porém, ao inverter a direção do campo elétrico, pode-se evitar que os elétrons com um valor energético menor alcancem o ânodo.

Figura 3: Campo elétrico com a direção invertida para o experimento testando o efeito fotoelétrico.

Fonte: SERWAY & JEWETT, 2014.

Pode-se determinar a energia cinética máxima $K_{m\acute{a}x}$ dos elétrons emitidos fazendo o potencial relativo ao catodo (V_{AC}), caso seja negativo o suficiente para que a corrente pare. Isso acontecerá quando:

$$V_{AC} = -V_0 \quad (2.1)$$

Onde V_0 é chamado de potencial de corte.

O elétron que tiver maior energia deixa o catodo com energia cinética:

$$K_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2}m(v_{m\acute{a}x})^2$$

e possui energia cinética igual a zero no anodo. Com base no teorema trabalho energia, obtém-se:

$$\begin{aligned} W &= eV_0 = \Delta K = 0 - K_{m\acute{a}x} \\ K_{m\acute{a}x} &= \frac{1}{2}m(v_{m\acute{a}x})^2 = eV_0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Assim, ao medir o potencial de corte (V_0), pode-se determinar a energia cinética máxima com a qual os elétrons deixam o catodo.

Considerando que ϕ (essa é denominada função trabalho e varia de acordo com o metal. utilizado) é a energia necessária para remover um elétron da superfície, a energia cinética máxima dos elétrons emitidos pelo catodo é dada também por $hf - \phi$ por conta dos efeitos da lei de conservação de energia. Logo,

$$K_{m\acute{a}x} = hf - \phi \quad (2.3)$$

A Eq. (2.3) é chamada "equação do efeito fotoelétrico".

A partir da Eq. (2.3), a inclinação da reta que representa o potencial de corte em função da frequência é igual a $\frac{h}{e}$.

Tabela 1: Funções trabalho para alguns elementos [4].

Elemento	ϕ (eV)	Elemento	ϕ (eV)
Na	2,28	Pt	6,35
C	4,81	Mg	3,68
Cd	4,07	Ni	5,01
Al	4,08	Se	5,11
Ag	4,73	Pb	4,14

A frequência mínima para que o efeito fotoelétrico seja observado e o comprimento de onda máximo correspondente podem ser obtidos a partir da função trabalho fazendo $V_0 = 0$ na Eq. (2.3). Então,

$$\phi = hf_t = \frac{hc}{\lambda_t} \quad (2.4)$$

Os fótons de frequência menor que f_i não têm energia suficiente para ejetar elétrons do metal. Então, a função trabalho do anodo será diferente da função trabalho do cátodo, se os materiais forem diferentes.

3 OBJETIVOS

Fazer um estudo experimental qualitativo, em ambiente virtual, sobre o efeito fotoelétrico, além de determinar o valor da constante de Planck.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do experimento, fez-se uso da plataforma de simulações virtuais *PhET* [5].

Figura 4: tela de início do experimento.

Fonte: print screen da plataforma de simulação virtual do PhET Colorado – Radiação do Corpo Negro.

Antes de iniciar os procedimentos experimentais, fez-se um estudo teórico relativo ao experimento. Após isso, com base em um roteiro experimental estruturado por questões norteadoras, iniciou-se o desenvolvimento do experimento no ambiente virtual.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Percebe-se que é possível variar a intensidade com que se emite a onda eletromagnética sobre o metal ($0 \sim 100\%$), alterar o comprimento dessa onda ($100\text{nm} \sim 850\text{nm}$), o que consequentemente altera a frequência, e pode-se ainda alterar o valor da tensão da fonte ($-8,0\text{V} \sim 8,0\text{V}$).

Figura 5: Experimento do efeito fotoelétrico em funcionamento com os valores selecionados para demonstração.

Fonte: *print screen* da plataforma de simulação virtual do *PhET* Colorado – Radiação do Corpo Negro.

Percebe-se que o ambiente de simulação disponibiliza alguns gráficos para facilitar a compreensão do fenômeno, fazendo relações entre as grandezas: corrente $\times$ tensão da bateria, corrente $\times$ intensidade da luz e energia do elétron com a frequência da luz. Além de dispor da variação de elementos como Na, Zn, Cu, Pt, Ca, Mg, dentre os quais se pode escolher aquele que será o metal para o cátodo ou do anodo (dependendo do valor da tensão).

Ao aumentar o valor da tensão, percebe-se que a velocidade do elétron aumenta, porém, não se percebeu variação no valor da corrente.

Com isso, foi possível manipular a intensidade até encontrar o valor inicial para a corrente. O valor encontrado foi de $i = 0,016 \text{ A}$ para os seguintes comprimentos de onda:

Figura 6: Aumento do número de elétrons. Percebe-se um valor maior para a corrente.

Fonte: *print screen* da plataforma de simulação virtual do *PhET* Colorado – Radiação do Corpo Negro.

A seguir, na tabela 2, tem-se os valores da intensidade (em percentagem) para um dado comprimento de onda.

Tabela 2: valores das intensidades para visualizar o valor da corrente inicial exibida no amperímetro virtual.

λ (nm)	Intensidade %
400	11
450	30
475	60

Assim, o aumento na corrente elétrica só ocorreu após o aumento no número de fótons e o consequente número de elétrons emitidos.

O gráfico constante na Figura 7 foi gerado pelo próprio simulador.

Figura 7: Gráfico gerado no próprio simulador para relacionar Corrente X Intensidade.

Fonte: *print screen* da plataforma de simulação virtual do *PhET* Colorado – Radiação do Corpo Negro.

Com os valores e com o gráfico já disposto no próprio simulador, é possível estabelecer a seguinte relação:

$$i \propto I \quad (5.1)$$

Onde i é o valor da corrente e I será o valor da intensidade da onda eletromagnética.

Percebeu-se também a relação entre a Energia (obtida em eV) e a frequência (medida em Hz). No entanto, utilizando o intervalo visível do espectro eletromagnético, devido às limitações nas unidades apresentadas pelo próprio programa, o valor máximo para energia foi $\approx 1,5eV$ para uma frequência máxima de $0,75 \times 10^{15} Hz$. Com isso, optou-se por fazer uso de comprimentos de onda menores, na região do Ultravioleta. Assim, foi possível obter os valores constantes na tabela 3.

Tabela 3: Valores das frequências e dos comprimentos de onda para cada energia.

$\lambda \text{ (nm)}$	Frequência (10^{15}Hz)	Energia (eV)
546	0,549	0
293	1,049	2
196	1,538	4
146	2,027	6
120	2,500	8
100	3,000	10

Assim, percebe-se a relação 5.2.

$$f \propto E \quad (5.2)$$

Fazendo:

$$\frac{E}{f} = \text{constante} \quad (5.3)$$

Ao substituir os dados da tabela 3 na Eq. (2.3), e sabendo que a função trabalho do sódio é $\phi_{Na}=2,28eV$, os resultados obtidos foram calculados e expressos na tabela 4.

Tabela 4: Resultados da constante encontrados para as frequências e energias correspondentes.

Frequência ($10^{15} Hz$)	Energia (eV)	Constante
1,049	4,28	$\approx 4,18$ $\times 10^{-15}$
1,538	6,28	$\approx 4,10$ $\times 10^{-15}$
2,027	8,28	$\approx 4,03$ $\times 10^{-15}$
2,500	10,28	$\approx 4,11$ $\times 10^{-15}$
3,000	12,28	$4,09 \times 10^{-15}$

A unidade da constante encontrada foi $eV s$, conforme explicitado na relação 5.4.

$$h = \frac{E + \phi}{f} \rightarrow [h] = [e V s] \quad (5.4)$$

A constante h encontrada é a constante de Planck, cujo o valor teórico é:

$$h = 6,626 \times 10^{-34} J s = 4,136 \times 10^{-15} eV s$$

No experimento, o valor da constante de Planck encontrada foi de:

$$h = (4,10 \pm 0,03) 10^{-15} eV s \quad (5.5)$$

Comparando com o valor experimental encontrado, o erro percentual foi de 0,03%.

6 CONCLUSÃO

A observação da emissão de elétrons após a incidência de luz sobre placas metálicas consiste em uma das mais importantes constatações para a Física do fim do século XIX e início do século XX. Através do experimento na plataforma *PhET*, foi possível reeditar virtualmente o experimento, possibilitando assim estabelecer uma relação de proporcionalidade entre a corrente, e a intensidade da luz incidente, bem como uma relação direta entre a frequência, e a energia dessa luz. A partir daí, buscou-se a constante de proporcionalidade dessa última relação. Para as medidas de energia e frequência, o valor encontrado para a constante (originalmente, a constante de Planck) ficou muito próximo do valor teórico com um erro percentual em torno de 0,03%.

REFERÊNCIAS

- [1] SALAS J. Cientistas nazistas deixam de dar nome a duas crateras na Lua; El País. 2020. Disponível em: Acesso em: 14/07/2021.
- [2] SERWAY RA, JEWETT J. Princípios de física: óptica e física moderna. São Paulo: Cen-gage Learning. 2014.
- [3] McEVOY JP, ZARATE O. Introducing quantum theory: A graphic guide. Icon Books Ltd; 2014.
- [4] TIPLER P, Llewellyn RA. Física moderna 6ª ed. Livros Técnicos e Científicos; 2014.
- [5] PhET. Radiação do Corpo Negro; Acesso em: 21/06/2021. https://phet.colorado.edu/sims/html/blackbody-spectrum/latest/blackbody-spectrum_pt.html.