



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

MARIA EDUARDA FELICIANO FERREIRA

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CONSTANTE DE PLANCK POR MEIO DE
DIODO EMISSOR DE LUZ (LED)**

**ARARUNA, PB
JULHO DE 2022**

MARIA EDUARDA FELICIANO FERREIRA

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CONSTANTE DE PLANCK POR MEIO DE
DIODO EMISSOR DE LUZ (LED)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Área de concentração: Física.

Orientador: Prof. Dr. Mário César Soares Xavier.

**ARARUNA, PB
JULHO DE 2022**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

F383d Ferreira, Maria Eduarda Feliciano.

Determinação experimental da constante de planck por meio de diodo emissor de luz (led) [manuscrito] / Maria Eduarda Feliciano Ferreira. - 2022.

31 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, 2022.

"Orientação : Prof. Dr. Mário César Soares Xavier , Coordenação do Curso de Licenciatura em Física - CCTS."

1. Física. 2. Luz. 3. Radiação. I. Título

21. ed. CDD 530

MARIA EDUARDA FELICIANO FERREIRA

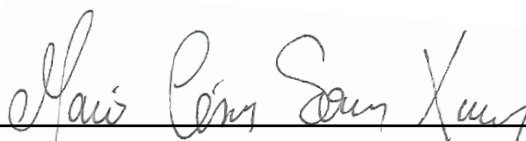
**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CONSTANTE DE PLANCK POR MEIO DE
DIODO EMISSOR DE LUZ (LED)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Física da Universidade
Estadual da Paraíba, como requisito parcial à
obtenção do título de Licenciado em Física.

Área de concentração: Física.

Aprovada em: 22/07/2022


BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Mário César Soares Xavier (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. José Jamilton Rodrigues dos Santos
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof.ª Dra. Thais Akemi Tokubo Sanomiya
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

*Dedico este trabalho a Deus e as minhas Tias-
Avós, Odaci Correia e Valdira Correia.*

AGRADECIMENTOS

A Deus e Nossa Senhora, por cuidar de mim em todos os momentos e por ter me dado forças para superar todas dificuldades.

Aos meus pais, Everaldo Euflosino e Dalva Maria, pelo amor, incentivo e por não medirem esforços para que eu me tornasse quem sou.

Aos meus familiares, por todos incentivos e compreensão pela minha ausência.

Aos meus amigos, Janiele Soares, Tassy Rocha, Gabriel Urbano e Samuel Avelar por dividirem comigo todos os momentos durante o curso e por contribuírem para meu crescimento.

Ao meu namorado, Acson Clementino, por sempre incentivar, apoiar e ajudar nos momentos mais difícil.

Aos meus companheiros de casa, Joab Custódio e Cassiane Lucena, pela parceria e por dividir a vida comigo.

Aos meus amigos de turma, Francisco Daniel, Lukas Kennedy, Josenildo Moreira, Davi Sousa, Geilson Nascimento, Venilson Rodrigues.

Ao grupo fotônica e seus membros, em especial, Maria Eduarda, Josenaldo Ribeiro, Jansen Felix e Joedson Anderson, pelo apoio, surpresas e bons momentos.

A todos meus professores, que me proporcionaram uma base de conhecimento para que pudesse chegar até aqui, em especial, Thiago da Silva, Aline Faustino, David Figueiredo, Mário César Soares, José Jamilton, Valdecir Júnior e Thaís Sanomiya.

Ao meu orientador, Dr. Prof. César Soares pelo apoio, incentivo pela oportunidade de participar do grupo Fotônica.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para execução deste trabalho.

RESUMO

Até no final do século XVIII, aceitavam que já tinha quase todas as respostas na física, pois a mecânica newtoniana dava conta da maioria dos problemas. Na mesma época já existiam problemas da radiação de um corpo negro, e físicos como Boltzmann, Josef Stefan, Rayleigh e Jeans, tentaram criar modelos, porém, esses modelos não davam conta de explicar a radiação em toda a faixa espectral. Por volta do final do século XIX, com novas descobertas dos raios catódicos, estruturas subatômicas e luz, foi possível a construção do modelo atômico moderno, além de novos ambientes que ajudaram a resolver os problemas da época. O físico Hertz foi o primeiro a observar o efeito fotoelétrico, onde causava intriga nos físicos da época por conta da ejeção de elétrons de uma placa metálica com determinadas frequências de luz, independente de sua intensidade. Mais tarde, Einstein ampliou o conceito de quantização que foi proposto por Max Planck, resolvendo o problema, com isso, Planck e Einstein ganharam o prêmio nobel de física. Este trabalho visa determinar um constante de Planck através de meios experimentais com o uso do diodo emissor de luz (LED) e comparar os dados obtidos com os teóricos.

Palavras chave: Corpo Negro. Constante de Planck. Catástrofe do Ultravioleta.

ABSTRACT

Until the end of the 18th century, they already accepted all the answers in physics, as Newtonian mechanics could handle most problems. At the same time, blackbody radiance problems already existed, and physicists such as Boltzmann, Josef Stefan, Rayleigh and Jeans, tried models, however, these models could not explain the radiance in the entire spectral range. Around the end of the 19th century, with new discoveries of cathode rays, subatomic structures and light, it was possible to build the modern model, in addition to new environments that helped to solve the problems of the time. Physicist Hertz was the first to observe the photoelectric effect, which caused intrigue in physicists at the time due to the ejection of electrons from a metal plate independent of light frequencies, its intensity. Later, Einstein extended the concept of quantization that was proposed by Max Planck, solving the problem, with that, Planck and Einstein won the Nobel Prize in Physics. This work aims to determine a Planck constant through experimental means with the use of light emitting diodes (LED) and compare the data obtained with the theoretical ones.

keywords: Black Body. Planck's Constant. Ultraviolet Catastrophe.

LISTA DE FIGURAS

1	Cavidade com uma pequena entrada que se comportar como um corpo negro. . .	11
2	Radiância espectral de um corpo negro em função da frequência e temperatura.	12
3	Catástrofe do Ultravioleta	14
4	Comparação da intensidade espectral	15
5	Arranjo experimental para a determinação do potencial de corte V_0	16
6	Tipos de Diodo (Tipo P e Tipo N)	17
7	Difusão dos elétrons e lacunas entre os Tipos P e N	17
8	Representação esquemática de diagramas de banda.	18
9	Aparato Experimental	21
10	Painel de LEDs	21
11	Gráfico $i \times V$	24
12	Gráfico $i \times V$ para comparação	25
13	Gráfico $V_0 \times f$	27
14	Gráfico $V_0 \times f$ para comparação	28

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1	Max Planck	10
2.2	Radiação de corpo negro	10
2.3	Efeito Fotoelétrico	15
2.4	Dispositivos Semicondutores	16
2.4.1	Diodos	16
2.4.2	LED	17
3	METODOLOGIA	20
3.1	Procedimento Experimental	21
4	RESULTADO E DISCUSSÃO	23
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
	REFERÊNCIAS	30

1 INTRODUÇÃO

No final do século XIX, os físicos acreditavam que já haviam descoberto quase tudo sobre a Física. A mecânica newtoniana dava conta de lidar com boa parte dos problemas do dia a dia, e outras teorias andavam bem desenvolvidas. Restavam algumas falhas, ou fenômenos mal explicados, porém era de se esperar que, refinando algumas das teorias já existentes, esses falhas seriam sanadas.

As novas descobertas dos raios catódicos, e conseqüentemente a descoberta dos elétrons e estruturas subatômica, e da radiação, perto do fim do século XIX, contribuíram para estabelecer no modelo moderno do átomo. No meio de tantas descobertas científicas no início do século XIX, ainda foi implementada um estudo da radiação do corpo negro, que determinou resultados importantes para o desenvolvimento inicial da mecânica quântica. Em 1900, o físico teórico alemão Max Planck resolveu o problema do corpo negro, formulando uma constante em que a energia era distribuída em pequenas unidades isoladas, em forma de pacotes, e desenvolveu uma constante para isso, que denominou de h , cujo valor é $6,62 \times 10^{-34}$ Js, proveniente da curva de intensidade, usando os métodos estatísticos do físico austríaco Ludwig Eduard Boltzmann.

Um corpo quando aquecido emite luz, como um carvão em brasa ou um metal saindo de uma forja. Notamos, inicialmente, uma cor alaranjada e a medida que esquentamos mais, a intensidade luminosa aumenta e a cor tenderá ao branco. Assim é de se esperar uma relação direta da intensidade da luz com a temperatura, mas essa relação simplista resultou na **Catástrofe do ultravioleta**, onde a energia radiada era infinita para baixos comprimentos de ondas, ou seja, na faixa do ultravioleta.

No decorrer deste trabalho será abordado um pouco da história e relações matemáticas (e físicas) que se desdobraram a partir do problema da radiação de corpo negro. Será demonstrando como obter experimentalmente a constante de Planck com a utilização de instrumentos relativamente simples, como um multímetro e diodo emissor de luz, em inglês *Light Emitting Diode* (LED), na faixa de frequência visível, com comprimento de onda bem determinado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Max Planck

Max Karl Ernst Ludwing Planck (Kiel - Alemanha, 1858), ao terminar o ensino médio, com 16 anos, Max perguntou ao físico Johann von Jolly se deveria seguir a carreira de cientista. Mas o amigo da família o desmotivou: "neste campo, quase tudo já está descoberto, e tudo o que resta é preencher alguns buracos. Que tal música? Afinal, ele brilhara como soprano no coro infantil, tocava bem piano e órgão." (GOMES, 2016). Planck respondeu que não queria descobrir coisas novas, apenas compreender os fundamentos conhecidos do assunto.

No decorrer de seu doutorado desfrutou aulas com Helmholtz e Kirchhoff. Até mesmo contato com esses dois grandes cientistas, continuava em dúvida de continuar sua carreira musical ou a científica.

Por volta do ano de 1887, por seqüentemente da morte de Gustav Kirchhoff, Max Planck continuou para a Universidade de Berlim e foi nomeado professor de Física Teórica, e reitor em 1913.

As grandes dificuldades da física, durante o final do século XIX, é a explicação das leis que conduzia a emissão de radiação dos corpos negros. Tais corpos com alto coeficiente de absorção de radiações; por causa disso, apresentam negros para a visão humana.

No ano de 1899, após investigar as radiações eletromagnéticas, descobriu uma nova constante fundamental, no qual foi batizada em sua homenagem como Constante de Planck. Um ano depois, descobriu a lei da radiação térmica, chamada Lei de Planck da Radiação. Essa foi a base da teoria quântica, que surgiu dez anos depois com a colaboração de Albert Einstein e Niels Bohr.

Por consequência das suas pesquisas e trabalhos, teve o nascimento da Física Quântica, no ano de 1918 ganhou o Nobel de Física.

2.2 Radiação de corpo negro

Por volta de 1900, físico alemão Max Planck, nos seus estudos sobre o problema da radiação emitida por um corpo aquecido, apontou que a energia dos átomos não poderia ser absorvida, ou emitida, para qualquer valor contínuo de energia, mas apenas em pacotes discretos, ou quantas, de energia. Este resultado marcou o início de uma nova evolução na física, sendo considerado nascimento da Física Quântica.

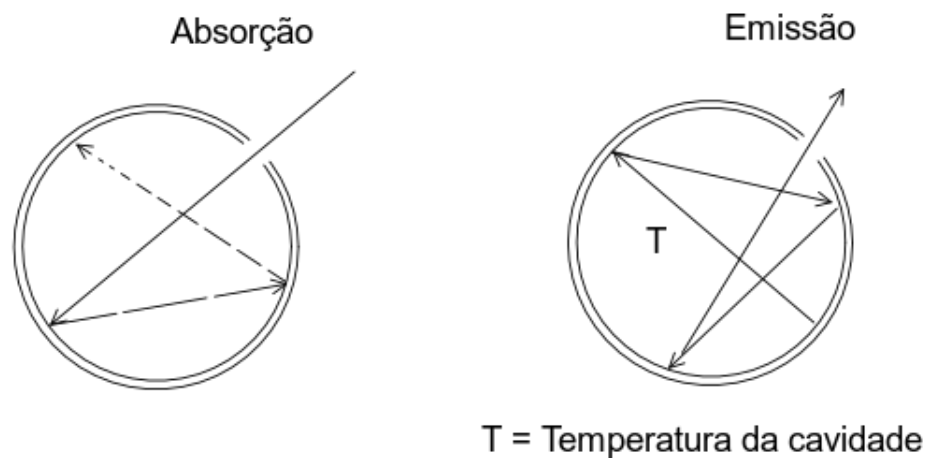
A radiação emitida por corpos aquecidos é chamando de Radiação Térmica. O corpo em estado condensado (sólido ou líquido) emite um espectro contínuo de radiação. A temperatura normal, um corpo não pode ser visto por emissão, mas por reflexo de luz. Porém, em elevadas temperaturas, os corpos podem emitir espectro na faixa do visível, apesar que mais de 90% estejam na região infravermelho do espectro eletromagnético.

O espectro da radiação térmica emitida por um corpo aquecido depende da sua composição.

No entanto, é possível idealizar um corpo aquecido que emite espectro térmico de caráter universal. Trata-se do Corpo Negro, que são corpos cuja superfície absorve toda a radiação térmica incidente sobre eles. Todos os corpos negros que estão na mesma temperatura emitem radiação térmica do mesmo espectro.

Um corpo negro pode ser representado, por uma cavidade no qual é dotada de uma pequena entrada, como é representada na Figura 1. Praticamente toda radiação vinda do exterior entra na cavidade, e muito dificilmente conseguirá sair dela, e termina sendo absorvida. Logo após ser absorver toda a radiação, a entrada da cavidade passa a emitir radiação térmica, equivalente a toda energia absorvida, conhecido como espectro de corpo negro.

Figura 1: Cavidade com uma pequena entrada que se comportar como um corpo negro.



Fonte: Autoria própria

O parâmetro utilizado para descrever a distribuição espectral da radiação de um corpo negro é dada pela temperatura absoluta T e a radiância R_T , que descreve a energia total radiada pelo objeto por unidade de área e tempo e é definida por:

$$R_T = \int_0^{\infty} R_T(\nu) d\nu \quad (1)$$

Onde $R_T(\nu)$ é a radiância por unidade de intervalo de frequência $d\nu$, chamado de radiância espectral de um corpo negro, estabelecendo de forma que $R_T(\nu)d\nu$ seja a energia emitida por unidade de área e tempo com frequência no intervalo entre ν e $\nu + d\nu$.

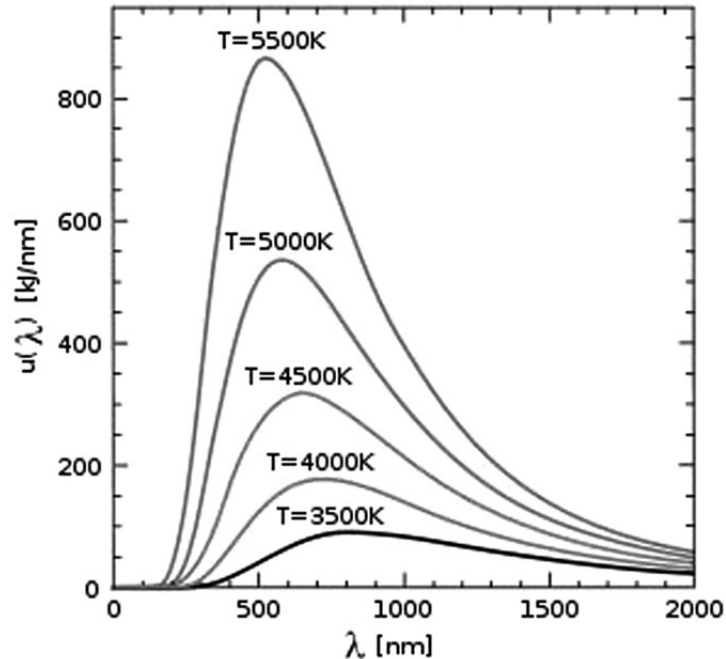
No ano de 1879, Josef Stefan utilizando argumentos empíricos, que mais tarde, Ludwig Boltzmann utilizando esses mesmos argumentos, apresentou a teoria no qual expõe que a radiância seja proporcional a quarta potência da temperatura, defina por

$$R_T = \sigma T^4 \quad (2)$$

No qual, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2 \text{ K}^4$ é chamada de Constante de Stefan-Boltzmann. A

Equação 2 é conhecida como Lei de Stefan-Boltzmann. A Figura 2 mostra a radiância espectral $R_T(\nu)$ de um corpo negro para diferentes temperaturas, os resultados foram obtidos experimentalmente por Lummer e Pringsheim por volta de 1899.

Figura 2: Radiância espectral de um corpo negro em função da frequência e temperatura.



Fonte: (YANG; WEI, 2016)

A Figura 2 mostra que o espectro se desloca para as frequências máximas $\nu_{máx}$. A medida que a temperatura aumenta, este comportamento fica linear, isto é

$$\nu_{máx} \propto T \quad (3)$$

Isso já tinha demonstrado por Wilhelm Wien em 1893, utilizando esse argumento da termodinâmica e com isso ficou conhecido como a Lei do Deslocamento de Wien.

A distribuição espectral da radiação do corpo negro pode ser caracterizada em termos de comprimento de onda λ . A radiância R_T na Equação 1, pode ser rescrita na seguinte forma:

$$R_T = \int_0^{\infty} R_T(\nu) d\nu = \int_0^{\infty} R_T(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

A integral $R_T(\lambda)$ representa a radiância espectral distribuída em comprimento de onda. Transformando integração em ν em outra integração sobre λ , usando a seguinte regra:

$$R_T = \int_0^{\infty} R_T(\nu) d\nu = \int_{-\infty}^0 R_T(\nu) \frac{d\nu}{d\lambda} d\lambda = - \int_0^{\infty} R_T(\nu) \frac{d\nu}{d\lambda} d\lambda \quad (5)$$

Percebe que o limite de integração é trocado para acomodar a relação inversa entre ν e λ dada, por

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (6)$$

Verificando as últimas integrais das Equações 4 e 5, e derivando a Equação 6, obtemos:

$$R_T(\lambda) = -R_T(\nu) \frac{d\nu}{d\lambda} = \frac{c}{\lambda^2} R_T(\nu) \quad (7)$$

Percebe-se a dependência de $R_T(\lambda)$ com λ , não é mesma dependência de $R_T(\nu)$ com ν .

A Lei do deslocamento de Wien, dada pela Equação 3, pode ser reescrita se considerarmos que $\nu_{máx} = c/\lambda_{máx}$, dessa forma

$$\lambda_{máx} \propto \frac{1}{T} \quad (8)$$

Agora os valores de λ para máximos de radiância, diminuem com o aumento da temperatura. A constante de Wien, foi determinada experimentalmente, e vale

$$\lambda_{máx} T = 2,898 \times 10^{-3} mK \quad (9)$$

No início do século XX, Rayleigh e Jeans, utilizando a teoria clássica para estudar a densidade de energia radiada por um corpo negro, formularam sua lei, conhecida como Lei de Rayleigh-Jeans. Rayleigh e Jeans decidiram partir da ideia de que a intensidade de energia irradiada surge da oscilação do campo eletromagnético, assim, é demonstrado que:

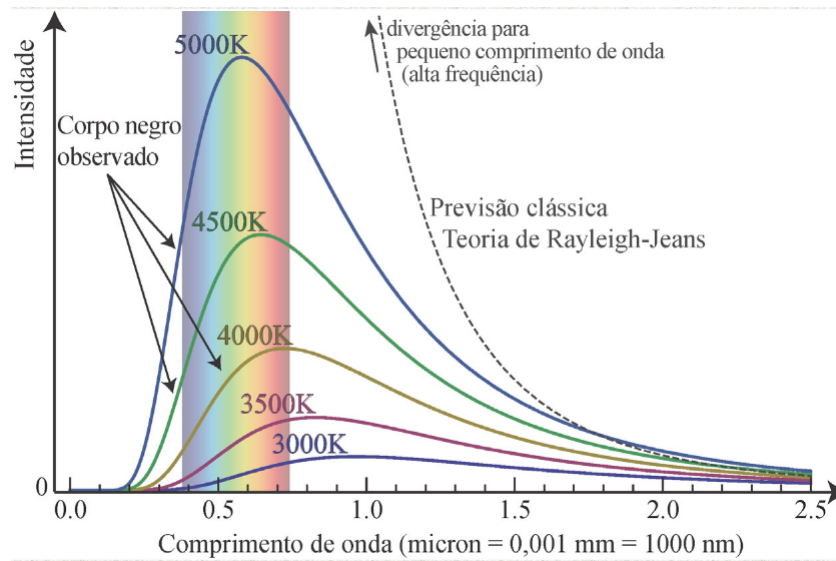
$$I \propto T\lambda^{-4} \quad (10)$$

A lei de Rayleigh-Jeans, tinha como objetivo descrever o comportamento da radiação espectral em todos os comprimentos de onda em qualquer temperatura, sendo dada pela seguinte expressão:

$$\rho_T(\nu) = \frac{8\pi kT}{\lambda^4} \quad (11)$$

A Figura 3 mostra o comportamento da Equação 11 em comparação com os resultados obtidos experimentalmente, e podemos notar claramente uma divergência significativa. A Equação 11 dava conta de explicar os resultados experimentais apenas para baixas frequências, ou seja, altos comprimentos de onda. A medida que a frequência aumenta, a previsão clássica tende ao infinito.

Figura 3: Catástrofe do Ultravioleta



Fonte:(CAMPOS, 2017)

A tendência ao infinito para altas frequências na teoria de Rayleigh-Jeans, é conhecida como **Catástrofe do Ultravioleta**. Os resultados experimentais mostra que, a densidade de energia vai a zero para altas frequências, como se observa na Figura 3.

Max Planck apresentou uma ideia considerada revolucionária. Ele apontou que a Lei de Rayleigh-Jeans não corrigia a curva espectral em toda a faixa de comprimento de onda, porque Rayleigh e Jeans afirmava que os osciladores irradiavam toda quantidade de energia. Planck impôs um controle, que os osciladores só poderiam emitir determinadas quantidade de energia, mais exatamente, em quantias inteiras de $h\nu$, onde h é a constante de Planck, e ν é a frequência da radiação emitida. Essa teoria é conhecida como quantização da energia, dada por

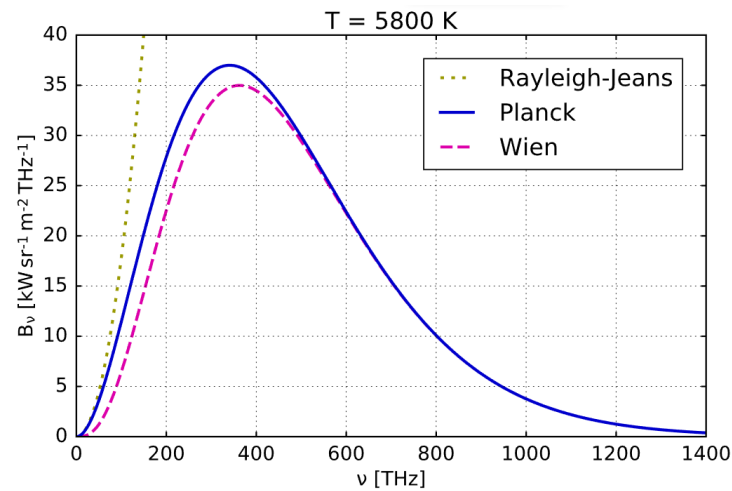
$$E = nh\nu \quad (12)$$

Tendo conhecimento das teorias de Wien e Rayleigh-Jeans, Max Planck notou que os dois resultados são aceitáveis para diferentes faixas de frequência, tendo embasamento das teorias junto ao controle imposto pela Equação 12, Max Planck obteve uma expressão que corrigia completamente a curva espectral da radiação de corpo negro, dada pela Equação abaixo:

$$\rho_T(\lambda) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (13)$$

A Figura 5 abaixo compara os resultados obtidos através das expressões de Wien, Rayleigh-Jeans e Planck, onde notamos claramente que, para baixas frequências a Lei de Rayleigh-Jeans explica satisfatoriamente. Já para altas frequências podemos utilizar como uma boa aproximação a Lei de Wien. E por fim, a Lei de Planck, dando conta dos resultados obtidos experimentalmente para toda faixa de frequência.

Figura 4: Comparação da intensidade espectral



Fonte: (LAGE, 2020)

A nova teoria para explicar a radiação de corpo negro de Max Planck e seu ansatz sobre a quantização de energia deu início a uma nova era na física, sendo o início da Física quântica.

2.3 Efeito Fotoelétrico

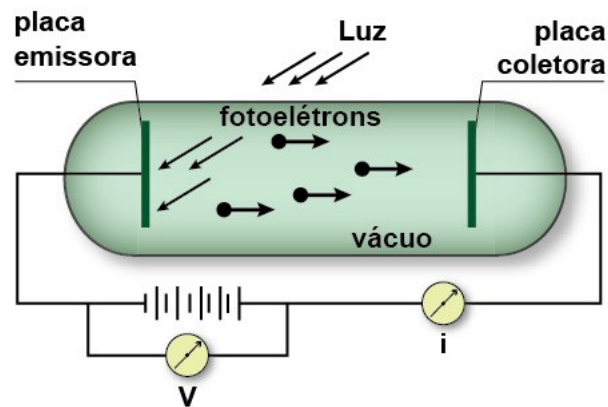
Por volta do ano 1886, o físico alemão Heinrich Rudolf Hertz, foi o primeiro observar o efeito fotoelétrico, pois, descobriu que a incidência da luz ultravioleta em chapas metálicas facilitava a produção de faíscas. Podemos observar o efeito fotoelétrico quando uma superfície metálica ou semicondutora é iluminada com luz em frequências específicas. Nesta situação, os elétrons ligados aos átomos são promovidos a elétrons livres, capazes de conduzir corrente elétrica, podendo até ser arrancado da chapa metálica se a luz tiver uma frequência grande o suficiente.

A radiação com frequência abaixo de um certo valor mínimo não promove elétrons livre, não importa a intensidade da luz. Por volta do ano 1905, o físico alemão Albert Einstein que ampliou a proposta de Max Planck a radiação de corpo negro, dado na equação 12, para qualquer fóton, sendo que em um feixe de luz, quanto mais intenso, maior o número de fótons nele presente. Quando um feixe incide sobre uma superfície metálica, há uma certa probabilidade dos elétrons interagir com o fóton incidido. Se a energia $h\nu$ do fóton for maior que a energia de ligação do elétron, então este é libertado absorvendo toda energia do fóton incidente. Para que o elétron seja arrancado da placa, é necessário que a energia absorvida seja maior que a função trabalho ϕ , de tal forma que a energia cinética (K) do elétron a ser arrancado, será a energia do fóton menos a função trabalho:

$$K = h\nu - \phi \quad (14)$$

Podemos determinar ϕ com o seguinte arranjo experimental:

Figura 5: Arranjo experimental para a determinação do potencial de corte V_0



Fonte:(WADE, 2018)

Nessa situação, temos a placa emissora, que recebe fótons com energia $h\nu$, e por conta disso emite fótons-elétrons para a placa coletora. Se V for inicialmente nulo, então todos os fótons-elétrons emitido chegará até a placa coletora, porém, a medida que aumentamos V , o campo gerado entre a placa coletora e emissora aumenta, freando os fótons-elétrons. Quando não há mais incidência de fótons-elétrons na placa coletora, ou seja, corrente nula, teremos atingido o potencial de corte V_0 . Neste caso, temos a seguinte relação entre a função trabalho ϕ e o potencial de corte:

$$eV_0 = h\nu - \phi \quad (15)$$

Igualando as equações 14 e 16, temos:

$$K = eV_0 \quad (16)$$

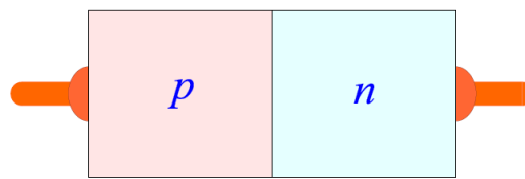
Max Planck e Albert Einstein ganhou mais tarde o premio Nobel de Física por suas descobertas relacionadas á quantização da luz.

2.4 Dispositivos Semicondutores

2.4.1 Diodos

Segundo Newton (2011), os diodos semicondutores, ou mesmo diodos, são peças eletrônicas obtidos a partir de uma ligação de materiais semicondutores do tipo P, e do tipo N. O diodo semicondutor pode comporta-se como condutor ou um isolante, dependendo da forma como a tensão é aplicado em seus terminais.

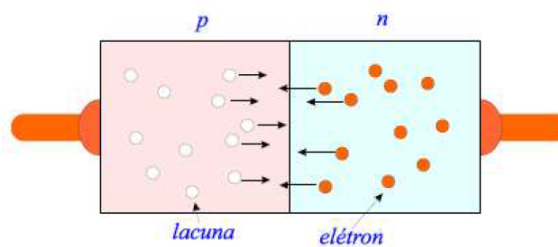
Figura 6: Tipos de Diodo (Tipo P e Tipo N)



Fonte: (BOTELHO; FERRONATO, s.d.)

Após a junção dos diodos do tipo P e tipo N, alguns elétrons livres se difundem do semicondutor tipo N para o semicondutor tipo P. De forma análoga, as lacunas existentes no semicondutor tipo P difundem para o semicondutor tipo N.

Figura 7: Difusão dos elétrons e lacunas entre os Tipos P e N



Fonte: (BOTELHO; FERRONATO, s.d.)

Os diodos são capazes de ser utilizados em diversas aplicações, as mais conhecidas são a conversão de corrente alternada em corrente contínua.

Entretanto, o diodo pode ser empregado para outras finalidades além da retificação. Existem diodos de uso especial utilizado para regulação de tensão (diodos Zener), sintonia eletrônica em receptores de rádio e TV (varicaps), geração de rádio frequência (diodos túnel) e produção de luz (LEDs). (DIDÁTICA, s.d.).

Cada diodo tem o seu próprio comportamento para qual foi desenvolvido, e as principais características que devem ser observadas são: capacidade de condução de corrente direta, tensão reserva, máxima potência de trabalho e a corrente de surto direto. (LUQUETA, s.d., p. 33).

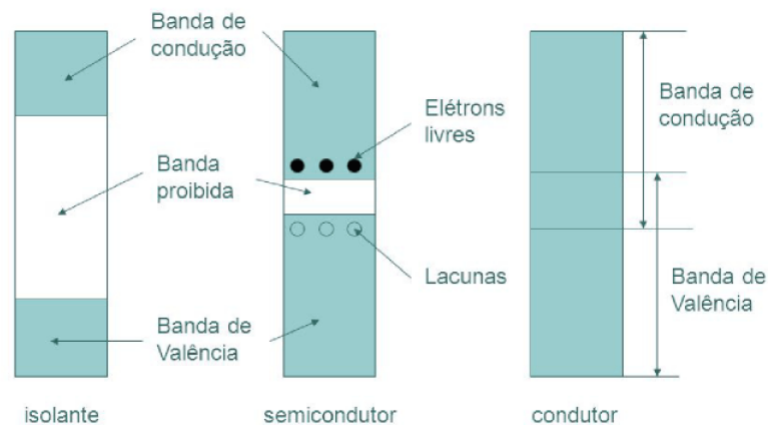
2.4.2 LED

Desde o seu desenvolvimento no ano 1963 (UNICAMP, 2004) o diodo emissor de luz, ou LED, não tinha encontrado tanta empregabilidade como atualmente, presente em telas de TV, iluminação residencial, monitor de computador, entre outros equipamentos.

O comprimento de onda da luz emitida pelo "Conjunto Constante de Planck por Luminescência", aparato utilizado no experimento realizado, depende do semicondutor

utilizado e das impurezas de dopagem associada a ligação. O comprimento de onda depende de E_g , ou energia gap, da ligação, onde as radiações emitidas podem variar do infravermelho ao ultravioleta. A energia eletromagnética depende da energia do Gap, ou seja, quantidade de energia necessária do elétron efetuar a sua transição da Banda de Valência (BV) para Banda Condução (BC) como demonstra a Figura 8. A luz emitida de um LED não é monocromática como dos LASERS, no entanto, a seu comprimento espectral da banda de emissão é considerável estreita e a intensidade luminosa alta se comprando com lâmpadas.

Figura 8: Representação esquemática de diagramas de banda.



Fonte: (VIELZA, 2016)

Para que os elétrons possam transpor a barreira de potencial entre BV e BC a tensão mínima de agitação desses elétrons deve ser dada por (ZANATA, 2013):

$$V_0 = \frac{E_g}{e} \quad (17)$$

Quase toda energia dos elétrons é transformada em fótons, desse forma, podemos entender que $E_g = E_{fóton}$, conhecendo essa expressão podemos relacionar a energia com a sua frequência, $E_{fóton} = h\nu$, assim concluímos a Equação 18 para explicar o comportamento da emissão nos LEDs

$$h\nu = eV_0 \quad (18)$$

Onde ν corresponde a frequência, V_0 é a tensão emitida do LED, e é a carga elementar do elétron e h a constante de Planck.

Por meio da emissão de fótons dos LEDs, e sabendo as relações entre a tensão, comprimento de onda e a constante de Planck, podemos utilizar o aparato "Conjunto Constante de Planck por luminescência" para determinar a constante de Planck, dada pela seguinte equação

$$h = \frac{V_0 e \lambda}{c} \quad (19)$$

Com posse dos conhecimentos desenvolvidos durante fundamentação teórica, podemos iniciar o desenvolvimento da metodologia, onde será demonstrado o procedimento experimental para determinação da constante de Planck.

3 METODOLOGIA

O entendimento dos fenômenos que envolvem a mecânica quântica consiste em um tema bastante complexo para agir exclusivamente com procedimento matemático, que não permita relacionar de forma direta aos conceitos da mecânica quântica. Para conseguir introduzir estas ideias de forma mais coerente é necessário conectarmos o tratamento matemático a observação experimental, conforme Greca, Moreira e Herscovitz (2001).

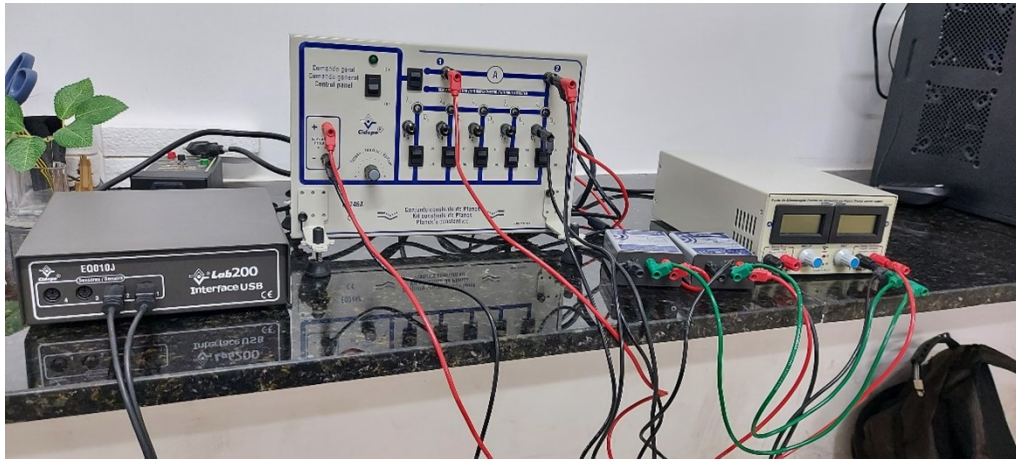
Acreditamos que uma solução possível seja, sobretudo em cursos introdutórios, salientar diretamente as características quânticas dos sistemas ao invés de buscar analogias clássicas que reforçam as concepções clássicas dos estudantes, e usufruir das inúmeras experiências com uma ou poucas partículas, disponíveis hoje em dia, em geral, conceitualmente simples, para que os estudantes possam familiarizar com a percepção quântica (GRECA; MOREIRA; HERSCOVITZ, 2001).

Existem muitos experimentos que facilitam a compreensão da mecânica quântica, temos o experimento Conjunto Constante de Planck por Luminescência, onde determinamos a constante de Planck utilizando LEDs. O experimento apresentado neste trabalho foi realizado no Laboratório de Ótica e Física Moderna da Universidade Estadual da Paraíba, Campus VIII em Araruna-PB.

Os materiais necessários para realizar o experimento foram: 01 conjunto constante de Planck por luminescência, 04 cabo flexível preto 1 m; 04 cabo flexível vermelho 1 m; 02 cabo flexível verde de 0,5 m; 01 sensor de tensão -5 a 5 V, e cabo; 01 sensor de corrente -20 a +20 A, e cabo; 02 interface com fonte de alimentação; 01 cabo de força; 01 cabo USB 2.0; software CidepeLab V6.

No experimento, foi utilizado um equipamento em que é denominado "painel de LEDs", para determinar experimentalmente a constante de Planck. No painel de LEDs possuem um circuito especificamente montado, contendo vários LEDs nas cores vermelha, laranja, amarela, verde e azul, além de conter um potenciômetro de ajuste das tensões utilizado no experimento. Contém também bornes para a introdução das pontas de provas do instrumento de medição. Para a medição, foi utilizado um amperímetro e um voltímetro, ambos ligados a uma interface que faz a conexão entre os instrumentos de medição e o computador, onde está instalado o software da Cidepe, a fim de armazenar os dados coletados.

Figura 9: Aparato Experimental



Fonte: Autoria própria

Figura 10: Pannel de LEDs



Fonte: Autoria própria

A Figura 10 mostra o Pannel de LEDs utilizado no experimento. O Pannel é formado essencialmente por um conjunto de 5 LEDs, denominados de D_i , cada um com comprimento de onda λ_i , onde $i = 1, 2, 3, 4$ e 5 , além de interruptores para cada um dos LEDs. Também há um potenciômetro, utilizado para regular a tensão dos LEDs e bornes para entrada de tensão e conexão dos sensores para medição.

3.1 Procedimento Experimental

Inicialmente, foi desligado todos os interruptores do pannel, em seguida, ligou-se a fonte de alimentação, já ajustada para a tensão de saída de 4 V em corrente contínua, a tomada de 220 V em corrente alternada, da rede do laboratório. Logo após, foi conectados os cabos de alimentação da fonte nos bornes da entrada do pannel de LEDs.

Para ocorrer a emissão de luz dos LEDs, é necessário induzir uma tensão na entrada dos bornes do painel de LEDs. Com isso teremos que encontrar a tensão limiar, ou seja, a tensão necessária para que um determinado LED acenda, através do potenciômetro de ajuste do painel. Vale ressaltar, que durante este processo, os sensores responsáveis pela coleta de dados da tensão e corrente estão coletando os dados e armazenando no software.

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

Após a coleta dos dados referente as tensões e corrente limiaries de cada LED e utilizando o embasamento dado na fundamentação teórica, além de contar com os dados dos comprimentos de onda de cada LED, fornecido pela Cidepe, podemos inferir algumas conclusões. Os dados coletados durante o experimento estão explícitos nas tabelas e gráficos presentes no decorrer desta seção. As tabelas de 1 a 3 nos dão os dados referente aos comprimentos de onda (λ), Tensão limiar (V_0) e corrente (mA)

Tabela 1: Comprimento de onda (λ)

LED	Comprimento de onda (λ)
Vermelho (D1)	645nm
Laranja (D2)	601nm
Amarelo (D3)	583nm
Verde (D4)	568nm
Azul (D5)	470nm

Fonte: Autoria própria

Tabela 2: Tensão

LED	Tensão Limiar (V_0)
Vermelho (D1)	1,85 V
Laranja (D2)	2,02 V
Amarelo (D3)	2,09 V
Verde (D4)	2,16 V
Azul (D5)	2,63 V

Fonte: Autoria própria

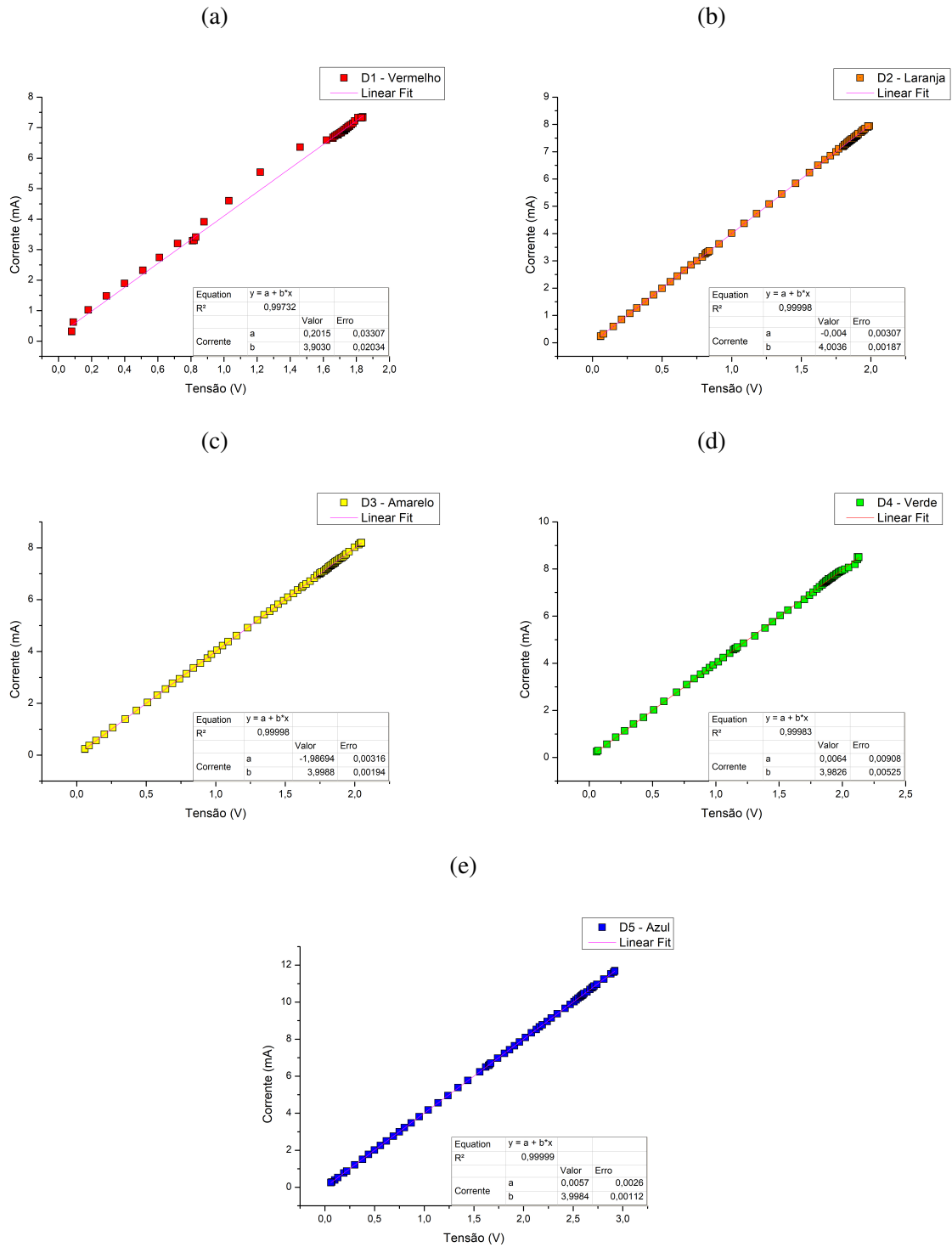
Tabela 3: Corrente

LED	Corrente (mA)
Vermelho (D1)	6,91 mA
Laranja (D2)	8,08 mA
Amarelo (D3)	8,34 mA
Verde (D4)	8,65 mA
Azul (D5)	11,78 mA

Fonte: Autoria própria

Com posse dos dados das tabelas acima, além dos dados coletados pelo software da Cidepe, podemos construir um gráfico relacionando a tensão com a corrente, até o ponto onde atingimos a tensão limiar V_0 , como demonstrado na Figura 11 abaixo:

Figura 11: Gráfico $i \times V$

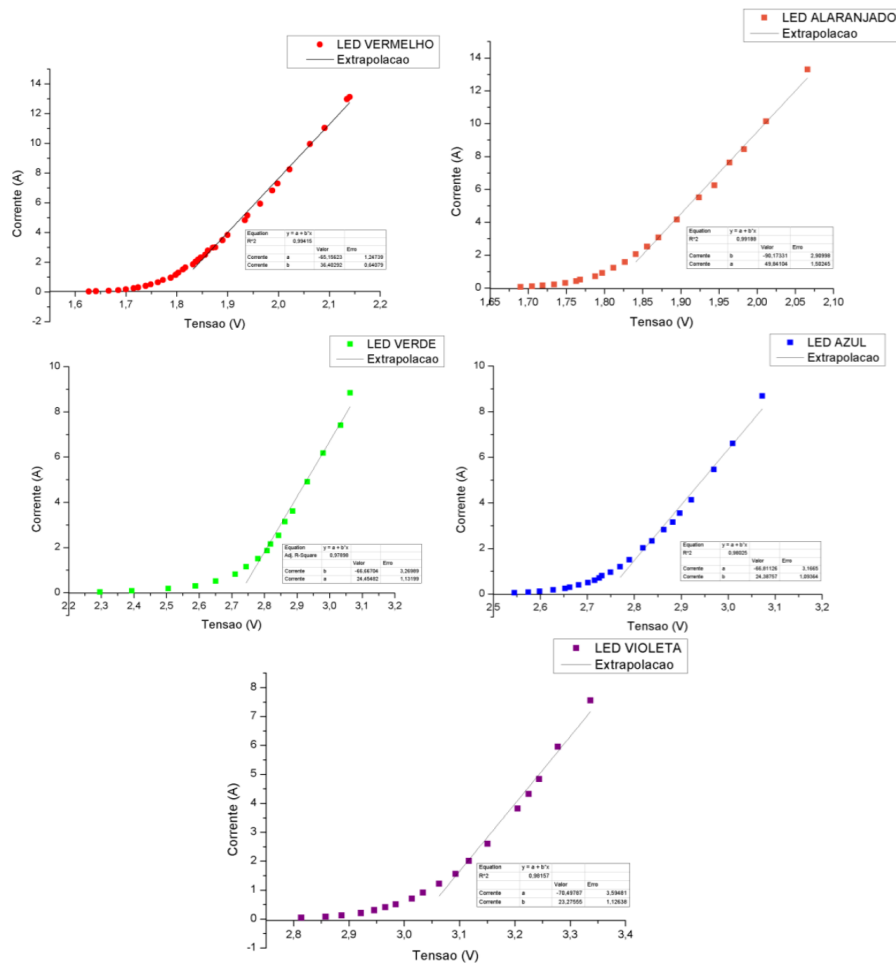


Fonte: Autoria própria

Comparando o resultado aqui obtido com o trabalho de Leite et al. (2018), apresentado nas

Figuras abaixo:

Figura 12: Gráfico $i \times V$ para comparação



Fonte: (LEITE et al., 2018)

Apesar das diferentes cores, e consequentemente diferentes comprimentos de ondas, nota-se que, a partir de uma determinada tensão, os gráficos passa a se comportar de forma linear, da mesma forma que os valores obtidos neste trabalho. A diferença nos gráficos para baixas tensões se da por conta da resolução do multímetro aqui utilizado, além disso, o software da Cidepe, para facilitar a coleta dos dados experimentais, exclui os dados referentes as tensões onde se começa a haver uma transição da banda de valência para a banda de condução.

Utilizando a Equação 19 e a tensão limiar, obtida pelo software da Cidepe, podemos determinar a constante de Planck para todos os cinco LEDs, como demonstrado na Tabela 4 abaixo:

Tabela 4: Constante de Planck para cada LED

LED	Constante de Planck (h)
Vermelho (D1)	$6,39 \times 10^{-34} Js$
Laranja (D2)	$6,47 \times 10^{-34} Js$
Amarelo (D3)	$6,50 \times 10^{-34} Js$
Verde (D4)	$6,54 \times 10^{-34} Js$
Azul (D5)	$6,59 \times 10^{-34} Js$

Fonte: Autoria própria

Após obter todos os valores experimentais, podemos determinar o valor médio da constante de Planck, realizando uma média aritmética simples.

$$h = 6,498 \times 10^{-34} Js$$

Considerando o valor real da constante de Planck, que é $h = 6,62 \times 10^{-34} Js$, podemos calcular o desvio percentual em relação ao valor médio experimental

$$\sigma = \frac{|6,498 \times 10^{-34} - 6,62 \times 10^{-34}|}{6,62 \times 10^{-34}} \cdot 100\% = 1,84\%$$

O desvio percentual em relação ao valor médio experimental foi 1,84%, valor dentro da margem de erro permitido de 0% até 5%, que demonstra que os dados coletados e tratados aqui concordam com o resultado atualmente aceito da constante de Planck. Podemos atribuir como uma das causas por essa diferença o fato da tensão limiar ser observado a olho humano, sendo que poderíamos obter dados mais preciso com a utilização de um sensor fotossensível, além, é claro, da precisão dos equipamentos e confiabilidade do software.

Usando a Equação 6, podemos obter os valores da frequência de cada LED, além de suas respectivas tensões limiares (V_0), descrito na Tabela 5 abaixo:

Tabela 5: Tensão Limiar e frequência por LED

LED	V_0 (V)	f (Hz)
Vermelho (D1)	1,85 V	$4,63 \times 10^{14}$
Laranja (D2)	2,02 V	$4,99 \times 10^{14}$
Amarelo (D3)	2,09 V	$5,14 \times 10^{14}$
Verde (D4)	2,16 V	$5,28 \times 10^{14}$
Azul (D5)	2,63 V	$6,38 \times 10^{14}$

Fonte: Autoria própria

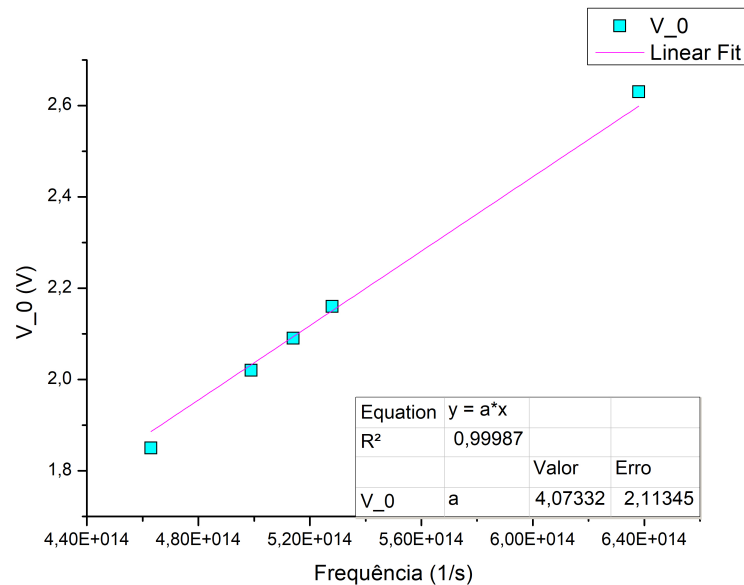
Com os dados obtidos da frequência, podemos construir um gráfico de tensão limiar versus frequência, onde o coeficiente angular deste gráfico é um produto entre a constante de Planck h

e a carga elementar e , como demonstra a Equação 20:

$$V_0 = \frac{hf}{e} \quad (20)$$

Onde podemos observar o gráfico de V_0 versus f na Figura 13 abaixo:

Figura 13: Gráfico $V_0 \times f$



Fonte: Autoria própria

Sendo o coeficiente angular $4,07332 \times 10^{-15} \text{ V/Hz} = h/e$, como podemos observar da Equação 20, assim, multiplicando o coeficiente angular pela carga elementar e , obtemos novamente a constante de Planck, porém agora com uma base de dados mais sólida.

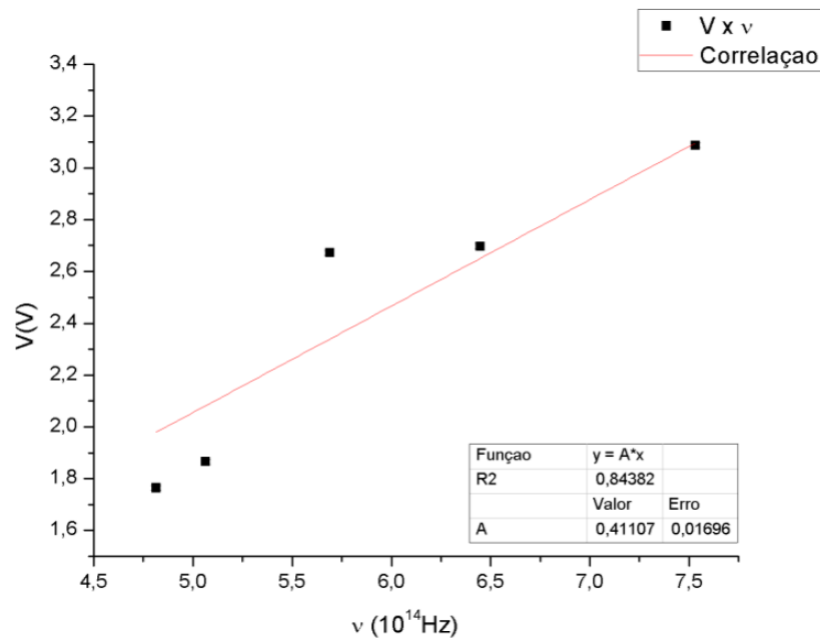
$$h = 6,53 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

Calculando novamente o erro percentual para esse novo valor obtido, temos:

$$\sigma = \frac{|6,53 \times 10^{-34} - 6,62 \times 10^{-34}|}{6,62 \times 10^{-34}} \cdot 100\% = 1,36\%$$

O desvio percentual em relação ao valor médio experimental foi 1,36%. Onde, novamente, a causa do erro pode ter sido por fatores humanos e/ou imprecisão nos equipamento e software utilizado, sendo que, utilizando essa abordagem, os erros experimentais se evidenciam, diferente da média aritmética utilizada anteriormente, justificando um maior erro percentual.

Podemos novamente comparar os resultados encontrados aqui com o trabalho de Leite et al. (2018), que a partir dos dados de tensões limiars e comprimentos de ondas obtidos dos LEDs utilizado pelo mesmo, foi capaz de plotar o gráfico abaixo:

Figura 14: Gráfico $V_0 \times f$ para comparação

Fonte: (LEITE et al., 2018)

Notamos na Figura 14 que o valor encontrado para o coeficiente angular foi de $4,1107 \times 10^{-15}$ V/Hz, inserindo na Equação 20 nos fornece para a constante de Planck o valor de $h = 6,6 \times 10^{-34}$ Js. Além disso, também podemos comparar nosso resultado com os resultados obtidos por Moura et al. (2011) cujo valor foi de $h = 6,4 \times 10^{-34}$ Js, Abreu e Peralta (s.d.) com um valor de $h = 6,6 \times 10^{-34}$ Js e Artuso e Satz (2001) que obtiveram um valor de $h = 5,9 \times 10^{-34}$ Js.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio da base de precisão dos resultados e as discussões desenvolvidas ao longo deste trabalho, podemos concluir que os equipamentos aqui propostos para determinar a constante de Planck experimentalmente, com ajuda do software da Cidepe, são capazes de trazer resultados muito próximos do valor da constante de Planck atualmente aceita.

A proposta deste trabalho, não é inovar, mas encontrar outros meios experimentais para determinar a constante de Planck, como neste trabalho, que foi realizado através da tensão mínima da emissão de luz do LED, pela frequência e o coeficiente angular do gráfico de tensão versus frequência. Todos os resultados estão de acordo dentro da margem de erro.

REFERÊNCIAS

- ABREU, Maria da Conceição; PERALTA, Luis. **No Ano da Luz: medir a constante de Planck com díodos LED**. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc33_4/246-EEQ-6011.pdf>. Acesso em: 15 de julho de 2022.
- ARTUSO, Carolina; SATZ, Alejandro. Determinación de la constante de Planck utilizando leds. **Laboratorio**, v. 5, 2001.
- BOTELHO, Guilherme Lima; FERRONATO, Jéferson. **Diodo Semicondutor**. [S.l.: s.n.].
- CAMPOS, Érick Thomas de Sousa. **Luminosidade, cores e fotometria**. [S.l.: s.n.], 2017.
- DIDÁTICA, Eletrônica. **Diodo**. Disponível em: <<http://www.eletronicadidatica.com.br/componentes/diodo/diodo.htm>>. Acesso em: 23 de junho de 2022.
- FRAZÃO, Dilva. **Max Planck: Físico alemão**. Jan. 2020. Disponível em: <https://www.ebiografia.com/max_planck/>. Acesso em: 29 de junho de 2022.
- GOMES, Alaíne. **Max Planck (1858 - 1947)**. Abr. 2016. Disponível em: <<https://www3.unicentro.br/petfisica/2016/04/11/max-planck-1858-1947/>>. Acesso em: 11 de junho de 2022.
- GRECA, Ileana Maria; MOREIRA, Marco Antonio; HERSCOVITZ, Victoria E. Uma proposta para o ensino de Mecânica Quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 23, p. 444–457, 2001.
- LAGE, Eduardo. A fórmula de Planck. **Revista de Ciência Elementar**, Casa das Ciências, v. 8, n. 4, 2020.
- LEITE, Ibson José Maciel et al. **Experimentos de física moderna para a determinação da constante de Planck utilizando Arduino e Visual Basic: uma alternativa na formação e na prática docente**. [S.l.]: Universidade Federal de Alagoas, 2018.
- LUQUETA, Gerson Roberto. **Curso Básico de Eletrônica Analógica**. Disponível em: <http://www.netsoft.inf.br/aulas/EAC_Curso_Eletronica_Aplicada/7.3_Apostila_eletronica.pdf>. Acesso em: 25 de junho de 2022.
- MOURA, Silio Lima et al. **Constante de Planck: Uma Nova Visão para o Ensino Médio**. 2011. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc33_4/246-EEQ-6011.pdf>. Acesso em: 15 de julho de 2022.
- NEWTON, C Braga. **Como funcionam os LEDs**. 2011. Disponível em: <<https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/4076-art553>>. Acesso em: 26 de junho de 2022.

RAMOS, Daniel Alex. **Teoria Quântica: a constante de Planck e o quantum**. Disponível em: <<https://www.coladaweb.com/fisica/ondas/max-planck-e-o-quantum>>. Acesso em: 25 de junho de 2022.

SANTOS, C.A. dos. **Física Moderna - Efeito Fotoelétrico**. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod03/m_s02.html>. Acesso em: 23 de junho de 2022.

UNICAMP. **Laboratório de Iluminação - LED**. 2004. Disponível em: <<http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/dicasemail/led/dica36.htm>>. Acesso em: 26 de junho de 2022.

VIELZA, DE LA CRUZ Yoandris. **Evolução da superfície de Fermi do $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$: estados locais de Wannier/Hartree-Fock**. 2016. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.

WADE, Elton. **Capítulo 3 - Efeito Fotoelétrico**. Jan. 2018. Disponível em: <<https://medium.com/@eltonwade/cap%C3%ADtulo-3-efeito-fotoel%C3%A9trico-3de7f9fd9416>>. Acesso em: 23 de julho de 2022.

YANG, Xin; WEI, Bing. Exact research on the theory of the blackbody thermal radiation. **Scientific Reports**, Nature Publishing Group, v. 6, n. 1, p. 1–5, 2016.

ZANATA. **Constante de Plank**. 2013. Disponível em: <http://www.ifsc.usp.br/~lavfis/images/BDApostilas/ApConstantePlanck/CtePlanck_1.pdf>. Acesso em: 22 de junho de 2022.