

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS – CAMPUS PALMAS**

JANAÍNA DE SOUSA MORAIS

**ESTUDO DAS LEIS ASSOCIADAS À RADIAÇÃO TÉRMICA EMITIDA POR
CORPOS NEGROS REAIS POR MEIO DE PESQUISA DE REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA E PESQUISA EXPERIMENTAL**

Palmas - TO

2021

JANAÍNA DE SOUSA MORAIS

**ESTUDO DAS LEIS ASSOCIADAS À RADIAÇÃO TÉRMICA EMITIDA POR
CORPOS NEGROS REAIS POR MEIO DE PESQUISA DE REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA E PESQUISA EXPERIMENTAL**

Trabalho de Curso submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciências e Tecnologia do Tocantins – Campus
Palmas como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do Grau de Licenciada em Física.
Orientador: Prof. Me. Ademar Paulo Junior

Palmas – TO
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

M828e Morais, Janaina
 ESTUDO DAS LEIS ASSOCIADAS À RADIAÇÃO TÉRMICA
 EMITIDA POR CORPOS NEGROS REAIS POR MEIO DE PESQUISA
 DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E PESQUISA EXPERIMENTAL /
 Janaina Morais. – Palmas, TO, 2021.
 41 f. : il. color.

 Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) – Instituto
 Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Palmas,
 Palmas, TO, 2021.

 Orientador: Me. Ademar Paulo Junior

 1. RADIAÇÃO TÉRMICA. 2. CORPOS NEGROS REAIS. 3. LEI DE
 STEFAN-BOLTZMANN. I. Paulo Junior, Ademar. II. Título.

CDD 530

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).



Ministério da Educação
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins
Campus Palmas

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: ESTUDO DAS LEIS ASSOCIADAS À RADIAÇÃO TÉRMICA EMITIDA POR CORPOS NEGROS REAIS POR MEIO DE PESQUISA DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E PESQUISA EXPERIMENTAL

AUTOR: JANAÍNA DE SOUSA MORAIS

ORIENTADOR(A): PROF. ME. ADEMAR PAULO JUNIOR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Palmas, como parte das exigências para a conclusão do curso de Licenciatura em Física.

Aprovado em 05/02/2021.

Prof. Me. Ademar Paulo Junior
IFTO - Orientador

Prof.ª Dr.ª Adriana Lopes Leal
IFTO - Coorientadora

Prof. Dr. Weimar Silva Castilho
IFTO - Membro



Documento assinado eletronicamente por **Ademar Paulo Junior, Servidor**, em 05/02/2021, às 19:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Weimar Silva Castilho, Servidor**, em 05/02/2021, às 19:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Adriana Lopes Leal, Gerente**, em 05/02/2021, às 19:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ifto.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_area=acesso_externo=0, informando o código verificador 1209147 e o código CRC A325ED1C.

Quadra 310 Sul, Ló 5, s/n, esquina com a Avenida NS 10 - Plano Diretor Sul — CEP 77.021-090
Palmas/TO — (63) 3236-4000
portal.ifto.edu.br — reitoria@ifto.edu.br

Dedico este trabalho a todos os alunos e professores que tenham o interesse ou dificuldades no ensino de radiação térmica, bem como a radiação dos corpos negros. Espero que este trabalho possa servir de norte para toda a comunidade que esteja interessada em entender e estudar sobre o tema.

RESUMO

A radiação térmica de corpos negros é um tema estudado desde o século XIX. Kirchhoff, foi um dos primeiros estudiosos desse tipo de objeto, trazendo a ideia de que um corpo negro é um absorvedor perfeito. Este trabalho visa mostrar por meio de revisão bibliográfica e de forma experimental objetos que se comportam aproximadamente como um corpo negro, vendo se os mesmos atendem a lei de Stefan-Boltzmann. Foram desenvolvidos 3 experimentos, sendo um da lâmpada incandescente em que seu filamento apresenta comportamento semelhante à de um corpo negro, outro do cubo de Leslie com 4 faces diferentes em sua estrutura física, por último o experimento do forno, no qual o próprio se comporta como um corpo negro. Esses experimentos serviram de auxílio para a compreensão teórica da radiação térmica, corpos negros reais e ideais e se os mesmos se relacionavam com a lei de Stefan-Boltzmann. Mediante os experimentos realizados e resultados encontrados, verificou-se que a teoria acerca da temática comprova que os corpos reais a uma dada temperatura obedecem à lei de Stefan-Boltzmann.

Palavras-chave: Radiação térmica, Corpos negros ideais, Corpos negros reais, Lei de Stefan-Boltzmann.

ABSTRACT

Thermal radiation from black bodies has been a topic studied since the 19th century. Kirchhoff, was one of the first scholars of this type of objects, bringing the idea that a black body is a perfect absorber. This work aims to show by a bibliography review and experimentally objects that behave approximately like a black body, seeing if they meet the Stefan-Boltzmann law. Three experiments were developed, one of the incandescent lamp in which its filament has a behavior similar to that of a black body, another of Leslie's cube with 4 different faces in its physical structure, lastly the kiln experiment, in which the behavior itself behaves like a black body. These experiments served as an aid to the theoretical understanding of thermal radiation, real and ideal black bodies and whether they were related to Stefan-Boltzmann's law. Through the experiments carried out and the results found, it was found that the theory about the theme proves that the real bodies at a given temperature obey the Stefan-Boltzmann law.

Keywords: Thermal radiation, Real bodies, Stefan-Boltzmann's Law.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	07
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	09
2.1	Corpo negro e radiação de corpo negro.....	16
2.1.1	Lei de Kirchhoff.....	16
2.1.2	Equação de Rayleigh-Jeans.....	18
2.1.3	Lei de Stefan-Boltzmann.....	19
2.1.4	Lei de Wien.....	21
2.1.5	Lei de Planck.....	23
2.1.6	Obtenção da Lei de Wien a partir da Lei de Planck.....	24
2.1.7	Obtenção da Lei de Stefan-Boltzmann a partir da Lei de Planck.....	26
3	METODOLOGIA.....	28
4	EXPERIMENTOS.....	30
4.1	Experimento da Lâmpada	30
4.2	Experimento do cubo de Leslie.....	36
4.3	Experimento do Forno.....	39
5	CONCLUSÕES.....	41
	REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história da humanidade vários estudiosos se perguntaram sobre o que compunha a matéria, do que seria formada todas as coisas. Para esses questionamentos houve as mais diversas explicações. Os primeiros estudiosos do atomismo foram Leucipo de Mileto (460-370 a.C.) e Demócrito de Abdera (470-380 a.C.) que acreditavam que os átomos não podiam ser vistos por olhos humanos, e que suas diferenças de tamanho e formatos que davam origem às mais variadas coisas (PIRES, 2008).

Nesse contexto Pires (2008) destaca a ideia de Aristóteles de Estagira (384-322 a.C.) com sua visão atomística diferenciada, acreditando que o universo não poderia ser regido a coisas tão minúsculas como os átomos que se deslocavam aleatoriamente. Para ele não existia coincidência, para tudo havia um motivo e suas ideias em relação à formação da matéria foram levadas com tanta confiança por séculos, deixando a ideia de átomo em descrédito.

As ideias atomísticas foram trazidas de volta com a descoberta de escritos gregos que influenciaram cientistas da época como Galileu Galilei, René Descartes, Isaac Newton, dentre outros (PEDUZZI, 2008). E mesmo com as ideias sobre a átomos e formação da matéria estarem mais consolidadas a partir dos novos estudos, haviam situações que não eram explicadas, como a emissão de radiação térmica que alguns corpos apresentavam, corpos os quais, mais tarde, foram chamados de corpos negros.

Os corpos negros são objetos de estudos idealizados, que absorvem toda a radiação incidida sobre eles e depois a reemitem totalmente (EISBERG E RESNICK, 1988). Os cientistas Josef Stefan (1835 - 1893) e Ludwig Boltzmann (1844 - 1906) descobriram uma relação entre a potência irradiada por unidade de área e a temperatura de um corpo negro, essa relação ficou conhecida como a lei de Stefan-Boltzmann, segundo Tipler (2010).

No estudo realizado no presente trabalho é abordado de forma teórica e experimental sobre o comportamento dos corpos negros. Todos os corpos em uma dada temperatura emitem radiação térmica, a diferenciação entre os corpos negros e reais são seus comportamentos quando aquecidos. Para a Ciência, o estudo do espectro de um corpo negro foi de grande importância até para a compreensão na formação do universo, assim como resolver problemas que havia na Física da época, como a catástrofe do ultravioleta.

Este trabalho teve como intuito demonstrar que a lei de Stefan-Boltzmann é válida. Além disso, apresentar uma relação entre os conceitos teóricos de corpo negro, com as práticas experimentais propostas. Mostrando aos leitores de forma mais explícita como pode ser um corpo negro na realidade, e de como as leis que regem a radiação de corpo negro podem ser aplicadas a esses experimentos, tendo em vista a especificidade de cada um. Segundo Séré (2003, p. 30) “a experimentação é como uma forma de favorecer o estabelecimento de um elo entre o mundo dos objetos, o mundo dos conceitos, leis e teorias e o das linguagens simbólicas.”

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. No primeiro são apresentados uma introdução ao assunto, uma breve revisão bibliográfica e os objetivos do estudo. No segundo capítulo é apresentada a fundamentação teórica, na qual são abordados os principais assuntos envolvidos no estudo. No terceiro capítulo é apresentada a metodologia utilizada no trabalho. No quarto capítulo são apresentados os resultados e discussões acerca dos experimentos realizados. No quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões gerais do estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A espécie humana é curiosa, naturalmente foram sendo criados saberes em diversos locais e épocas, sobre os mais variados temas, começando pelos essenciais para a sobrevivência. Na evolução da História, os humanos buscam entender e explicar os fenômenos a sua volta elaborando teorias, inicialmente fundamentadas na observação e nas suas crenças, e mais recentemente, com a ajuda da Ciência, utilizando o método científico.

Os primeiros estudiosos das teorias atomísticas foram Leucipo de Mileto e Demócrito de Abdera, que tinham uma visão mecanicista da natureza (PIRES, 2008). Esse tipo de visão destaca que o universo é composto por átomos, os quais não podem ser vistos pelos olhos humanos. Para eles, os átomos se diferenciavam em tamanho, formato e arranjos geométricos, essas diferenças eram o que davam origem às coisas. Para essa teoria, a composição dos átomos seria a mesma.

Com o surgimento dessas ideias de composição da matéria, diversos pensadores, filósofos, profetas, escribas, sacerdotes, e cientistas se propuseram a estudar sobre o tema e, em seguida, expõe sua visão em relatos explicativos (AZEVEDO, 2013). Um deles, Thales de Mileto (640-562 a.C), acreditava que tudo vinha da água, pois sem ela não existiria a vida, alegando que é a substância universal (BAIONI, 1996). Para Anaxímenes (585-528 a.C.) tudo era formado pelo ar, que tinha vários graus, os quais definiam as formas e composições da matéria (PEDUZZI, 2008). Já Empédocles de Agrigento (492-432 a.C.) acreditava que a natureza não poderia ser explicada por apenas um elemento, mas sim a combinação de todos (OKI, 2002).

Dos filósofos gregos, um dos mais famosos é Aristóteles de Estagira (384-322 a.C.), que tinha uma visão de constituição da matéria diferente dos atomistas, e não acreditava que o mundo seria regido por coisas pequenas, que se deslocavam aleatoriamente ou por coincidências. Para Aristóteles, o mundo era organizado e para tudo existia um motivo. Ele considerava a natureza como algo confuso, um sistema vivo que se regulasse por si só (PIRES, 2008).

A filosofia de Aristóteles sobre o atomismo baseia-se mais em contradizer a existência do vazio, o qual o mesmo acreditava ser um absurdo. Sua teoria para a filosofia da natureza era baseada em 7 hipóteses: I) a Terra é o centro do universo; II) tudo é constituído pelos quatro elementos, sendo eles: água, terra, ar e fogo; e III) tudo no universo tende ir para o seu lugar natural (levando em consideração a ideia dos elementos), sendo que o elemento terra tende estar no centro do universo, a água em cima da terra, o ar acima da água, e o fogo sobre o ar; IV)

movimento natural e forçado; V) os corpos celestes eram compostos por um quinto elemento chamado éter, que ficaria acima do elemento fogo; VI) as leis que regiam o movimento dos corpos celestes eram diferentes para a Terra; VII) não existia o vácuo. Por anos, sua filosofia natural prevaleceu, como sendo algo irrefutável, mesmo que outros filósofos tivessem tentado testar suas teorias, sua ideia de movimento foi algo que perdurou por 15 séculos (LIMA, 2014).

Existiu um filósofo do século IV a.C. chamado Epicuro de Samos (341 - 270 a.C.), que defendia a mesma ideia de Leucipo e Demócrito da formação da matéria, porém seu diferencial foi atribuir uma especificidade, o peso. Isso viria a explicar os movimentos dos átomos, pois com seu peso eles tenderiam a ir para baixo. O questionamento que surge com isso é: “onde seria o embaixo?”. Epicuro definiu que o embaixo seria na direção abaixo dos nossos pés (PORTO, 2013).

O atomismo foi deixado de lado por séculos, devido à aceitação das ideias aristotélicas, as quais não reconheciam o atomismo (PEDUZZI, 2008). O resgate das ideias do atomismo ocorreu com o descobrimento dos escritos gregos, que serviu de inspiração para novos cientistas, como Pierre Gassendi, Galileo Galilei, Robert Boyle, Christian Huygens, Isaac Newton e René Descartes, os quais se destacaram no Renascimento, iniciado em meados do século XIV.

Os experimentos que os cientistas da época começaram a fazer, trouxeram a ideia do atomismo novamente. Um deles foi o experimento de Boyle e Mariotte, por volta do século XVII, que queria verificar a relação da pressão e volume de um gás em uma reação isotérmica através de um arranjo que variava a pressão em um barômetro de Torricelli. Em 1785, Lavoisier introduz a lei das massas, que em uma dada reação mesmo com a dissociação dos reagentes a massa permanecia a mesma. Joseph Louis Proust (1754-1826), no ano de 1799, estabelece as leis das proporções definidas, que relacionava as reações entre os componentes de um dado sistema em que os mesmos reagem conforme a proporção das massas (LIMA, 2014). Nessa época, o estudo da estrutura da matéria ganhava força à medida que mais estudos eram conduzidos na área.

Seguindo o afirmado por Proust, em 1803, o físico John Dalton (1766-1844) afirmou a existência de átomos químicos, o mesmo acreditava que cada átomo correspondia a um elemento químico, que eram esféricos. Dalton postulou a lei das proporções múltiplas, no qual dois ou mais elementos interagem para formar outro mantendo uma relação de proporção. Essas leis levantavam questionamentos sobre a formação da matéria, pois se fossem comprovadas, acabariam por afirmar a natureza da matéria, que seria formada por átomos (PEDUZZI, 2008).

Dalton escreveu em 1808, “Um novo sistema de filosofia química” em que descrevia suas ideias atomísticas, onde os átomos eram indivisíveis e indestrutíveis. De acordo com Dalton, átomos de um mesmo elemento seriam iguais, para átomos de elementos diferentes, seriam diferentes em peso e tamanho. O mesmo se refere aos átomos como partículas últimas, o que remete ao conceito de átomo, do grego a = não e tomo = divisão, assim átomos = indivisível. Ele também desenvolveu uma notação para os átomos químicos, afirmando que tinham peso e, a partir disso, criou uma relação de peso com os elementos químicos, atribuindo valores unitários. O mesmo também desenvolveu uma notação bastante engenhosa para os compostos químicos, trabalhando com a simbologia de um círculo para cada elemento químico ele atribui um círculo diferente. Por exemplo, para o hidrogênio era um círculo com um ponto central, o mesmo acontecia para os demais elementos, então os compostos seriam a união dessas esferas, segundo Peduzzi (2008).

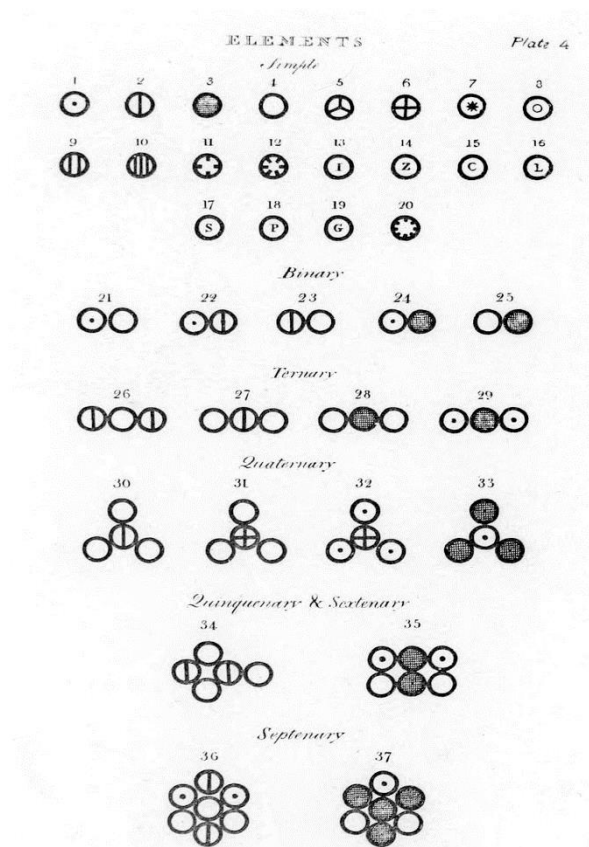


Imagem 1: representação dos átomos de Dalton

Fonte: <https://archive.org/details/newssystemofchemi01daltuoft/page/n237/mode/2up>

Mesmo que a ideia do átomo parecesse consolidada, havia coisas que a teoria de Dalton sobre o átomo não poderia explicar. Uma das incoerências, era a fórmula da água, em que Dalton não atribui pesos relativos aos átomos, somente pesos unitários, a base dessa ideia foi o hidrogênio. O problema surgiu na tentativa de complementar a ideia dos pesos relativos, dessa

forma ele disse que quando se conhece apenas um dos compostos de dois elementos químicos, por exemplo, J e K, sua fórmula molecular seria JK, no caso da água ficaria HO, o que consistia em uma incoerência, uma vez que sabemos ser H₂O. Mais tarde, Amedeo Avogadro observou que isso poderia ser visto de uma forma diferente, considerando-se que os átomos não seriam as menores partículas das substâncias, mas que poderiam ser formados por aglomerados de átomos, que ele chamou de moléculas (LIMA,2014).

Não gostando muito da forma que Dalton deu aos átomos, o físico sueco Jöns Jakob Berzelius (1779 - 1848) criou uma nova notação, a qual eram usadas as iniciais maiúsculas do elemento em latim, para elementos com mesmas iniciais acrescentava a segunda letra, sendo ela minúscula (PEDUZZI,2008). Dmitri Ivanovich Mendeleev (1834 - 1907), construiu uma tabela atômica com os elementos químicos que já se conhecia, e conseguiu prever novos elementos por meio das propriedades, pois os mesmos se agrupavam na mesma parte da tabela (LIMA,2014).

Série	Grupo I - R ² O	Grupo II - RO	Grupo III - R ² O ³	Grupo IV RH ⁴ RO ²	Grupo V RH ³ R ² O ⁵	Grupo VI RH ² RO ³	Grupo VII RH R ² O ⁷	Grupo VIII - RO ⁴
1	H=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27,3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	
4	K=39	Ca=40	- = 44	Ti=48	V=51	Sr=52	Mn=55	Fe=56 Co=59 Ni=59 Cu=63
5	(Cu=63)	Zn=65	- =68	- =72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=85	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	- =100	Ru=104 Rh=104 Pb=106 Ag=108
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	- - - -
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140	-	-	-	
9	(-)	-	-	-	-	-	-	
10	-	-	?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184	-	Os=195 Ir=197 Pt=198 Au=199
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	-	-	
12	-	-	-	Th=231	-	U=240	-	- - - -

Imagem 2: tabela periódica de Dmitri Ivanovich Mendeleev, publicada em 1869.

Fonte: TOLENTINO et al. (1997, p. 111).

Mais uma observação que fez voltar a ideia da estrutura da matéria foi o movimento browniano, observado pelo botânico Robert Brown (1773-1858) em 1827. Ele estava observando grãos de pólen se movimentando de forma desordenada e começou a se perguntar se o pólen tinha vida. Entretanto, logo em seguida ele próprio refuta tal ideia, ao fazer experimentos com grãos que tinham mais de um século, e o mesmo movimento acontecia. Esse

mesmo movimento foi falado por Tito Lucrécio (94-50 a.C.) em sua obra *De rerum natura*, em que ele descreve o movimento browniano da forma como um grão de pólen, porém usando partículas de pó, um exemplo errado, já que os movimentos se davam pelas correntes de ar presentes no sistema (PEDUZZI,2008).

Louis Georges Gouy (1854-1926), um físico francês, observou que o movimento browniano se dava de forma mais rápida quando as partículas eram menores. Em seguida, o geofísico Felix Maria Exner (1876 - 1930) demonstrou experimentalmente que o movimento resultava da temperatura e do tamanho das partículas. Posteriormente, em 1905, isso foi matematizado pelo físico Albert Einstein (1879-1955), em sua tese de doutorado, onde ele afirma que o movimento decorria das colisões das partículas de pólen com as moléculas do fluido. (LIMA,2014).

Com o avanço dos experimentos do século XIX, foram descobertas as partículas subatômicas das quais era constituído o átomo. Foi com o experimento de Michael Faraday (1791-1867), no qual ele observou uma mistura de NaCl e verificou que as quantidades de íons de Na^+ e Cl^- que eram produzidas no eletrodo eram diretamente proporcionais ao que passava pelo outro eletrodo, resultado observado em diferentes medições com diferentes elementos. Então, ele conclui que os átomos poderiam ser constituídos por partículas ainda menores que fossem carregadas eletricamente, o que fazia acontecer tal fenômeno em seu experimento. Mais tarde, ele chegou a medir a razão carga-massa para o hidrogênio, dando a essas partículas carregadas o nome de íons (LIMA,2014).

Na mesma época, o físico William Crookes (1832 - 1919) desenvolveu um aparato de vidro transparente, que ficou conhecido como tubo de raios catódicos. Era um tubo que apresentava dois eletrodos, um positivo chamado ânodo e um negativo chamado cátodo, que quando submetidos a uma alta tensão o cátodo apresentava um feixe luminescente que atravessavam o tubo e, esses raios foram denominados raios catódicos (HEWITT, 2015).

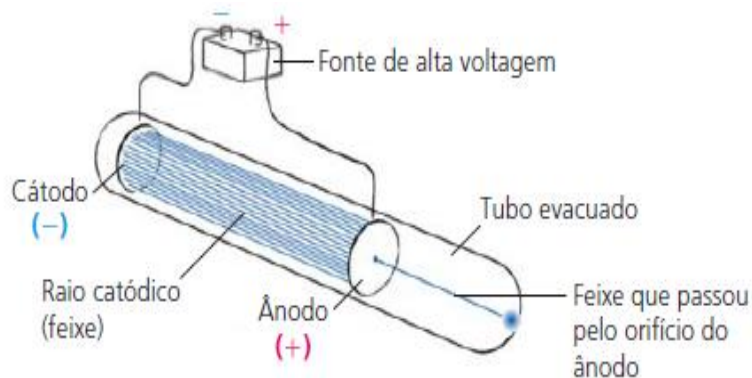


Imagem 3: tubo de raios catódicos

Fonte: HEWITT, Paul.(2015, p. 605)

Esse equipamento serviu tanto para descoberta do elétron, como por sua razão carga-massa, bem como de suas propriedades. Durante este período, ocorreu a descoberta dos raios X e dos isótopos, isso possibilitou diversos avanços na concepção e no conhecimento nessa temática (LIMA,2014).

Em 1896, o físico Pieter Zeeman (1865 - 1943) conseguiu evidências de que existiam partículas atômicas, e que elas seriam carregadas. Ele realizou um experimento em que observava as linhas espectrais que um átomo emitia quando colocado na presença de um campo magnético, percebendo que elas se dividiam em três linhas sendo olhadas perpendicularmente ao campo aplicado. Tal efeito se dava pela relação da carga e massa, das cargas que eram responsáveis pela emissão do espectro. Um ano depois dessa descoberta, Joseph John Thomson (1856 - 1940), conseguiu medir a razão entre a carga e massa, utilizando o aparato de Crookes, em um arranjo mais sofisticado. Ao medir essa relação, na verdade, Thomson havia descoberto o elétron (TIPLER,2010).

Mesmo com essas observações, Thomson não acreditava que poderia ser o elétron. Segundo Lima (2014), ele fez uma comparação entre a razão carga-massa (e/m) do elétron com a do átomo de hidrogênio. Ele observou que essa partícula era mil vezes menor que um átomo de hidrogênio. Mais tarde, voltou a analisar as partículas emitidas pelo efeito fotoelétrico, juntamente com seus alunos, percebendo que eram os próprios elétrons, mas ainda não conseguia acreditar que pudesse ser tal partícula.

Com este crescente estudo utilizando os raios catódicos, os cientistas começaram a analisar que havia uma pequena luz fraca, atrás do catodo. O físico Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864 - 1928), foi um dos estudiosos dessas luzes, que passaram a ser chamadas de raios canais. Ao aplicarem um campo externo nos raios canais, eles observaram que elas se comportavam como partículas positivas na presença de um campo magnético e que a intensidade do campo usado era bem maior que a do experimento de Thomson na descoberta do elétron. Isso os levou a pensar que essa partícula era maior que o elétron. Eles também perceberam que a intensidade do campo variava conforme a natureza do gás. A explicação encontrada para tal fenômeno, foi a de que com a intensidade do campo aplicado, essas moléculas de gases perdiam elétrons, e estas partículas foram denominadas íons positivos por Wien em 1898 (LIMA,2014).

Robert Andrews Millikan (1868 -1953), a partir de 1906, começa a utilizar um aparato, com o objetivo de medir a carga elementar do elétron.

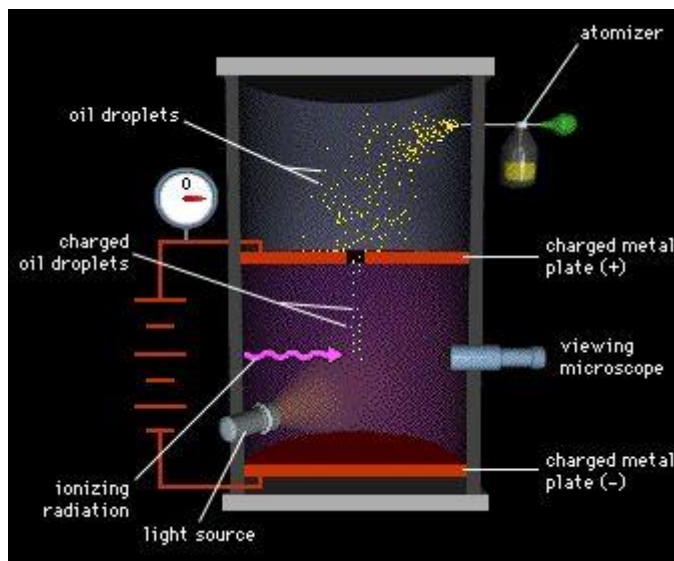


Imagem 4: aparato usado por Millikan

Fonte: <http://mectelefone.blogspot.com/2011/03/experimento-de-millikan.html>

O aparato utilizado por Millikan foi uma câmara de Wilson, que funcionava a partir do vapor d'água. Inicialmente ele observava o comportamento de gotículas de água carregadas lançadas na câmara, sob a ação de forças: atrito, gravidade e elétrica, sendo a elétrica produzida pelas placas de metal dispostas dentro da câmara. Porém, Millikan não conseguiu amostragem aceitável devido a um problema: a evaporação da água. Para solucionar isso substituiu a água por uma substância menos volátil, o óleo. O motivo para utilizar tal substância é que ele não evapora facilmente, o que possibilitou melhores medições. Ele coletou aproximadamente 10000 amostras, um trabalho de 3 anos, e obteve o valor de aproximadamente $1,59 \times 10^{-19} \text{ C}$ para a carga do elétron (MACETI, 2011). As conclusões deste trabalho estão profundamente ligadas à razão e/m encontrada por Thomson em seu trabalho com raios catódicos.

Em paralelo a isso, nesse período aconteciam várias descobertas na área da Física e o meio científico estava eufórico. Aconteceu a descoberta da radioatividade, segundo Lima (2014), foram Henri Becquerel (1852 - 1908), Pierre Curie (1859 - 1906) e Marie Curie (1867 - 1934) os descobridores, em seus estudos com sais de Urânio. Depois dessa descoberta extraordinária, Marie continuou a estudar sobre essa nova descoberta, quando analisava uma pedra de pechblenda (rocha de uranita, onde se extrai o urânio), e verificou uma atividade radioativa. Foi a descoberta do elemento polônio, e mais tarde, o rádio (PEDUZZI, 2008).

Mesmo com os avanços, a Física clássica não conseguia explicar alguns fenômenos da época. Peduzzi (2008), fala sobre alguns marcos do século XX em que a Física não tinha suficiência para explicar situações que envolviam a estrutura da matéria. Um dos fenômenos, era o espectro da radiação do corpo negro. Na teoria clássica, a radiação emitida por um corpo

negro crescia infinitamente com o aumento da temperatura, ideia que foi posteriormente invalidada por não condizer com o comportamento real de emissão de radiação do corpo negro, a Física clássica explicava emissões satisfatoriamente apenas em baixas temperaturas. A busca pela compreensão das leis de corpos negros acarretou no surgimento de uma nova área da física, a Mecânica Quântica.

2.1 Corpo Negro e Radiação de Corpo Negro

Qualquer objeto, em uma dada temperatura, libera radiação eletromagnética. Isso acontece, pois a radiação eletromagnética, é devida à aceleração de cargas elétricas. É conhecido que a temperatura é o nível de agitação das moléculas, as quais se movimentam de forma aleatória, variando o sentido e direção ao se moverem. Assim, além de possuir energia cinética, nesse cenário há também a aceleração, essas moléculas possuem cargas elétricas que, por consequência, emitem radiação eletromagnética quando aceleradas (EISBERG E RESNICK, 1988). Essa situação acontece em todo o corpo, portanto todos emitem radiação eletromagnética por meio desse processo e ela é nomeada como radiação térmica. Tipler (2010) afirma que foi com o estudo da radiação térmica emitida por corpos opacos que surgiram pistas da natureza quântica da radiação.

Um dos estudiosos desse tipo de radiação, Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858 - 1947), cientista alemão, notou, em 1900, a inconsistência na física clássica. Ele almejava a criação de um aço melhorado, mas não conseguia fazer muitos testes pela alta temperatura. Em seu estudo, se deparou com o problema que os termômetros comuns não suportavam tal temperatura, para resolver isso foi utilizada a espectroscopia, mas não se conhecia o espectro da radiação emitida por esses sólidos (PEDUZZI, 2008).

Segundo Peduzzi (2008), Newton também falou sobre a radiação térmica em sua obra Óptica, onde afirmou que os corpos negros absorvem a radiação com mais intensidade. Essa mesma radiação quando absorvida é reemitida pelo corpo na forma de radiação térmica. Mas o conceito de Newton era diferente do conceito de Kirchhoff em relação a radiação, enquanto Newton se restringia somente a luz, Kirchhoff era mais amplo, englobava todo tipo de radiação térmica.

2.1.1 Lei de Kirchhoff

O cientista Gustav R. Kirchhoff (1824 - 1887) estudou um objeto que emitia um espectro de radiação parecido com os que Planck estava se propondo a estudar. Kirchhoff já havia apresentado o termo “corpo negro” em 1860, quando definiu como um absorvedor perfeito, por

consequência também seria um emissor perfeito, pois toda radiação que fosse incidida sobre este corpo seria absorvida e toda reemitida (ROBERT, 1979).

Kirchhoff alegava que os corpos recebem e emitem radiação térmica. Para a quantidade que o corpo absorve tem-se a capacidade de absorção (a), e para os raios que ele emite tem-se a capacidade de emissão (e), sendo que a razão entre as duas seria a mesma para qualquer corpo submetido à mesma temperatura e mesmo comprimento de onda. Sobre a emissão de radiação, Kirchhoff chegou à conclusão que o espectro dependia somente do comprimento de onda emitido pelo corpo a uma dada temperatura.

Sabemos hoje que os corpos negros à temperatura ambiente fazem emissão de radiação infravermelha, que muda conforme a variação da temperatura em centenas de graus Celsius. Corpos negros emitem radiação em comprimentos de onda que não são visíveis, sendo muito maiores que o da luz visível (TIPLER, 2010). Mais especificamente, em temperaturas moderadas, por convenção definida como abaixo dos 600°C, a radiação térmica não é visível. Assim, na faixa de 600 e 700°C, os corpos negros aquecidos começam a emitir luz própria, eles brilham em algumas cores (PEDUZZI, 2008).

Uma boa aproximação de um corpo negro é uma caixa com uma pequena abertura que permita que a luz entre por um orifício, e seu interior deve ser totalmente revestido por um material condutor térmico. Essa luminosidade que entra na caixa atua como a luz que um corpo negro emite, sendo o referencial o ar dentro da caixa, conforme se pode ver na figura 5:

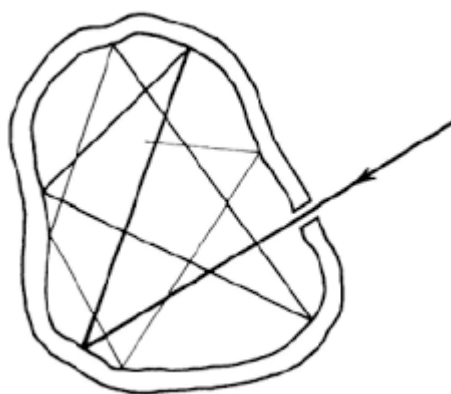


Imagem 5: radiação de cavidade

Fonte: <https://cutt.ly/6g67fm5>

Como o buraco de entrada da luz é muito pequeno, as chances de sua saída sobre o local de entrada são baixas. Além disso, ao considerar a área do buraco e comparar com a superfície interna da caixa, essa pequena quantidade de radiação perdida pode ser desconsiderada. Assim,

ela será rebatida nas paredes da caixa até que toda a radiação térmica seja totalmente absorvida, como consequência haverá um aquecimento dessa caixa que entrará em equilíbrio termodinâmico quando toda a radiação for absorvida. Segundo Kirchhoff a radiação emitida não depende do material, da forma e nem do tamanho, mas da frequência da radiação e da temperatura absoluta (PEDUZZI, 2008).

2.1.2 Equação De Rayleigh-Jeans

A Lei de Rayleigh-Jeans foi apresentada no século XIX, explicando o espectro da radiação eletromagnética de todos os comprimentos de onda de um corpo negro a uma certa temperatura. A equação explicava muito bem os dados experimentais para baixas frequências, porém a lei previa que quando se aumentava a temperatura também aumentava a frequência. Nessa lei havia 2 implicações agravantes, a primeira era que ela não conservava a energia, contrariando o princípio de conservação de energia na Física, a outra era que com essa emissão infinita de energia, a radiação seria letal para nossa sobrevivência. Pegando como exemplo um palito de fósforo, se o acendêssemos ele ficaria emitindo radiação infinita e provavelmente morreríamos devido a radiação de alta energia. Assim, a densidade de energia, $u(\lambda)$, da radiação no corpo negro de comprimento de onda λ é dada por:

$$u(\lambda) = \frac{8\pi k_B T}{\lambda^4} \quad (1)$$

sendo que k_B é a constante de Boltzmann que vale $1,38 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$, e T a temperatura do corpo em Kelvin.

Quando parte para verificação experimental da fórmula de Rayleigh-Jeans, ao se tratar de grandes comprimentos de onda verificava-se que a equação era razoável, entretanto para pequenos valores isso não acontecia. Isso se dava pois ela previa que $u(\lambda)$ tenderia para o infinito, mas experimentalmente não haviam medições que comprovasse esse comportamento e isso foi chamado de “catástrofe do ultravioleta” (TIPLER, 2010)

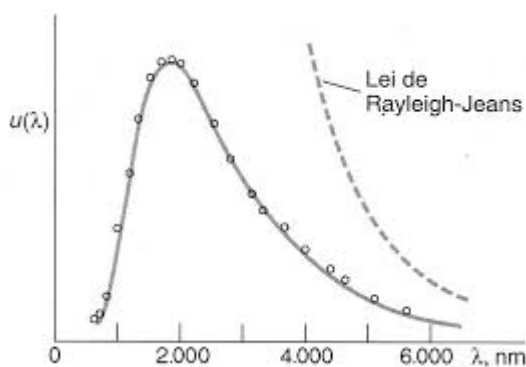


Imagem 6: A curva contínua com os pontos é resultante do que os dados experimentais previam e a curva pontilhada é o que a Lei de Rayleigh-Jeans previa.

Fonte: <https://cutt.ly/thdYnWU>

Esse pensamento para produção da equação está baseado em argumentos da Física clássica. John W. S. Rayleigh (1842-1919) obteve pela primeira vez o quarto grau da dependência do comprimento de onda em 1900. Uma derivação mais completa, a qual incluía uma constante de proporcionalidade, foi apresentada por Rayleigh e Sir James Jeans (1877 - 1946), em 1905, que agregava medidas experimentais para comprimentos de onda (PEDUZZI, 2008).

2.1.3 Lei De Stefan-Boltzmann

Para determinar matematicamente como funciona a absorção da radiação por um corpo negro, Joseph Stefan (1835 - 1893), em 1879, propõe uma relação empírica que relaciona a potência irradiada por unidade de área e a sua temperatura (TIPLER, 2010). Sua lei é dada por

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

Sendo σ , a constante de Stefan com valor $5,6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$, T é a temperatura absoluta do corpo e R é a potência irradiada por unidade de área de um corpo negro.

Cinco anos mais tarde, um aluno de Stefan deduziu matematicamente a equação (2), usando das aplicações da termodinâmica. Esse aluno foi Ludwig Boltzmann (1844-1906) e essa equação ficou conhecida como Lei de Stefan-Boltzmann.

Como Tipler (2010) evidencia, a lei de Stefan-Boltzmann, que relaciona a potência por unidade de área está relacionada à temperatura, não possuindo relação com outras características do corpo, como cor ou material que é feito. Então, à medida que a temperatura aumenta, maior será R , uma vez que a temperatura é elevada à quarta potência. Essa lei tem

grande notoriedade na compreensão e na determinação do equilíbrio térmico, o que é imprescindível quando se trata de corpos negros.

Levando em consideração os corpos negros reais, são aqueles que se aproximam ao comportamento de um corpo negro ideal, os quais irradiam energia, mas com uma intensidade menor que os corpos negros ideais e mais lentamente, uma vez que eles dependem das características do corpo, como a cor, material. Isso implica que na equação 2, apresentará um fator que será multiplicado no lado direito da equação, sendo ele a emissividade (ϵ), que varia de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de zero o corpo apresenta as características de um bom refletor, mais próximo de 1 será um bom absorvedor, no caso dos corpos negros ideais a emissividade é igual a 1. O filamento de uma lâmpada incandescente seria um exemplo perfeito de um corpo real, pois quando aquecido apresenta um comportamento semelhante ao de um corpo negro ideal (HAAG E CAVALCANTE, 2005).

Dessa forma a equação (2), será dada por:

$$R = \epsilon \sigma T^4 \quad (3)$$

Quando se trabalha com corpos reais na prática experimental, eles se encontram em contato com o ambiente externo e trocam calor com esse meio. Sem fontes de radiação sobre ele, o próprio estará à temperatura ambiente. À medida que a radiação incide sobre ele, ela é absorvida parcialmente, já que é um corpo real e a reemite aumentando a temperatura do corpo, seguindo a lei de Stefan.

$$R = \epsilon_T \sigma T'^4, \text{ sendo } T'^4 = T^4 - T_0^4$$

$$R = \epsilon_T \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (4)$$

em que T_0 é a temperatura ambiente, desta forma a temperatura absoluta é a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura final.

Sabendo que R é a intensidade de radiação, e intensidade é dada pela equação

$$R = \frac{P}{A} = \frac{\text{energia/tempo}}{\text{área}} \quad (5)$$

No qual R equivale a intensidade de radiação, A é a área do corpo e P a potência, que se dá pela variação da energia com relação ao tempo. Substituindo a eq. (5) em eq. (4), temos:

$$\frac{P}{A} = \epsilon_T \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (6)$$

Sabendo-se que $P = \frac{dU_R}{dt}$, em que U_R é a energia irradiada pelo corpo real, a equação (6) ficará:

$$\frac{\frac{dU_R}{dt}}{A} = \varepsilon_T \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (7)$$

Isolando $\frac{dU_R}{dt}$, temos:

$$\frac{dU_R}{dt} = \varepsilon_T \sigma A (T^4 - T_0^4) \quad (8)$$

A fonte de energia para o filamento da lâmpada é a energia elétrica, e como a lâmpada está absorvendo energia em temperatura ambiente, devemos subtrair essa energia, por isso temos T_0 sendo subtraído na parte direita da equação (8).

2.1.4 Lei De Wien

O físico alemão Wilhelm Wien, que desenvolveu importantes trabalhos sobre a radiação eletromagnética de um corpo negro, constatou que quanto maior for a temperatura, mais energia será emitida por um corpo por unidade de tempo e por unidade de área (EISBERG E RESNICK, 1988). Com esse aumento de temperatura ocasionou uma mudança nos comprimentos de onda no espectro de emissão daquele corpo, fazendo com que o produto da temperatura e do comprimento de onda em que a emissão de radiação é máxima fosse igual a uma constante.

$$\lambda T = b \text{ (constante)}$$

sendo λ o comprimento de onda e T a temperatura absoluta do corpo.

Mas sua conclusão era válida somente para as frequências máximas em que a intensidade de energia também seria máxima, em temperaturas diferentes. Nesse contexto a frequência depende da temperatura, ou seja, quanto maior a temperatura, maior será a frequência, gerando picos de emissão, que será o λ_{Max} , que corresponde ao comprimento de onda no ponto de maior emissão de radiação.

$$\lambda_{Max} T = b = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m.K} \quad (9)$$

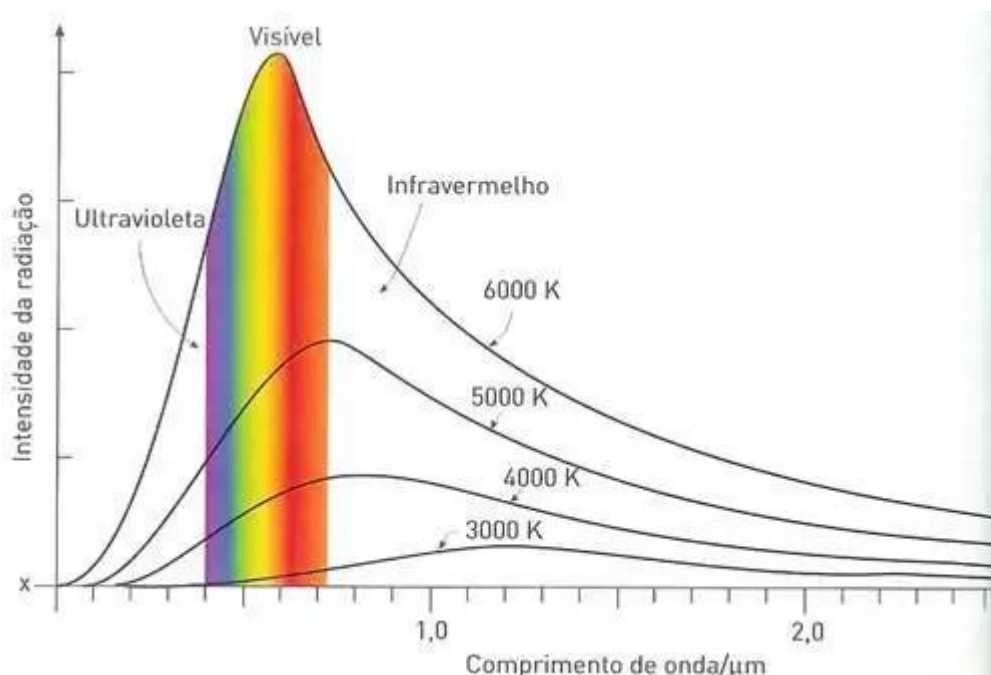


Imagem 7: exemplificação gráfica de como funciona a lei de Wien.

Fonte: <https://www.estudopratico.com.br/energia-irradiada-lei-do-deslocamento-e-irradiacao-termica/>

Observando as curvas, Wien notou algumas propriedades interessantes, que relacionam a temperatura com o comprimento de onda correspondente à emissão máxima do corpo, as quais são inversamente proporcionais.

Um exemplo bem prático de como podemos aplicar o espectro da imagem 7 são as estrelas. As estrelas que apresentam uma cor mais azulada são as mais quentes, pois a temperatura a qual se encontram está no pico de emissão da luz azul, enquanto que as estrelas vermelhas são mais frias conforme mostra a imagem 8.

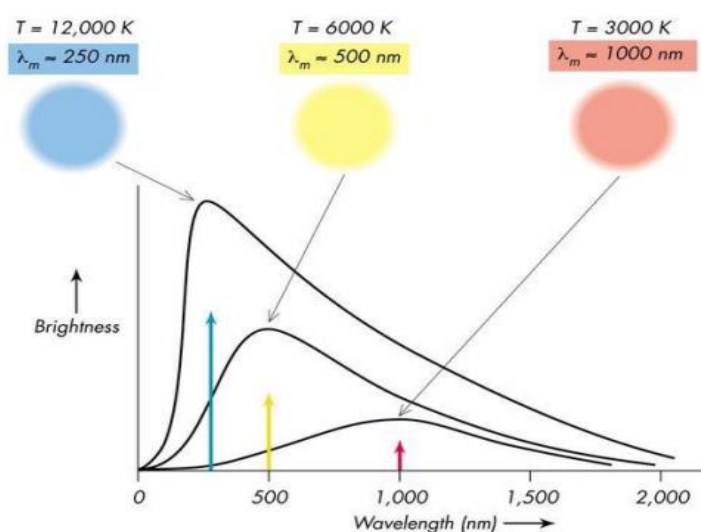


Imagem 8: ilustração da temperatura das estrelas conforme sua cor.

Fonte: http://www.mat.uc.pt/~delfos/A_Lei_de_Plank.pdf

Note que o Sol, está com o pico de emissão aproximadamente no verde, apresentando uma temperatura de aproximadamente 5778 K.

2.1.5 Lei De Planck

Max Planck, um físico alemão, conhecido como o pai da Mecânica Quântica. Foi reconhecido em 1918 com um prêmio Nobel pela sua teoria dos quanta de energia. Esse estudo foi necessário pois nessa época havia uma inconsistência nas teorias que explicavam o comportamento de um corpo negro para altas temperaturas. O referencial teórico não concordava com os resultados experimentais, conforme evidencia Davicovich (2015)

As teorias anteriores não conseguiam explicar porque, ao aumentar a temperatura, a cor correspondente ao máximo do espectro migrava do vermelho para o violeta, implicando por exemplo que as estrelas vermelhas têm temperaturas menores que as mais azuladas [...]

Planck e outros cientistas estudavam a catástrofe do ultravioleta. Em 1900, ele anuncia que após algumas considerações pôde encontrar uma equação que descreve a função $u(\lambda)$, e que os resultados encontrados com essa equação iriam de encontro aos resultados experimentais. Além de explicar os dados encontrados, Planck queria mostrar o sentido físico que aquela equação tinha, assim ele propôs a quantização da energia.

Tipler (2010) afirma que Planck, para solucionar esse problema do espectro de radiação, encontrou primeiro uma equação de forma empírica que se adequava aos dados experimentais, e só depois, uma forma clássica de modificar os cálculos para chegar na equação. Para tanto, houve uma quebra de paradigma necessária, que foi apresentado para a Sociedade Germânica de Física. Planck propõe que a energia não é uma variável contínua, ele a considerava uma grandeza discreta, isso implica que não é infinitamente divisível, na verdade é a quantidade elementar ε de energia multiplicada por um número inteiro, ou seja, só poderia existir em quantidades discretas de energia, ou como ele descrevia "pacotes de energia" que ficou conhecido como quantum (DAVIDOVICH, 2015). Assim, temos que

$$\begin{aligned} E &= n\varepsilon \\ E &= nhf \\ n &= 0, 1, 2, 3 \dots \end{aligned}$$

onde h é a constante de Planck, f é a frequência da radiação e n é um número inteiro.

Depois da formulação da hipótese do fenômeno da quantização, Planck e outros cientistas do período se negavam em reconhecer tal feito, pois havia uma resistência em se

separar das ideias da Física clássica, o que atrasou o seu prestígio. Segundo Tipler (2010), Planck caracteriza seu feito como “ato de desespero”, pois ele se considerava pacato e avesso a aventuras numa tentativa de não romper os paradigmas.

Einstein se nutriu da descoberta feita por Planck sobre a quantização da energia para avançar em seus estudos do efeito fotoelétrico. Tal efeito consiste na emissão de elétrons de um determinado material ao incidir sobre ele radiação. A relação entre as ideias de Planck e a nova descoberta de Einstein se deu no momento em que foi constatado que a quantização era uma característica intrínseca da energia luminosa (TIPLER, 2010).

A lei de Planck para radiação de corpo negro, trata da distribuição espectral da densidade de energia em função do comprimento de onda e da temperatura do corpo negro e é dada por

$$u(\lambda) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{(e^{hc/\lambda KT} - 1)} \quad (10)$$

em que λ , é o comprimento de onda da radiação emitida, T a temperatura e $u(\lambda)$ é a densidade de energia. As constantes $h = 6,626 \times 10^{-34}$ J·s, $c = 2,998 \times 10^8$ m/s e $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K são, respectivamente, a constante de Planck, e a velocidade da luz no vácuo e a constante de Boltzmann.

Desse modo, a equação (10) corrige as divergências que haviam sobre as leis da radiação, como por exemplo a lei de Rayleigh-Jeans que gerava a catástrofe no ultravioleta para altas frequências. Nesse contexto é mostrado que a radiação de frequência ultravioleta só pode ser emitida a partir de uma quantidade mínima de energia. Para menores temperaturas não existe energia necessária para induzir as oscilações de altas frequências, nesse cenário temos uma adequação dos resultados teóricos com os experimentais, o que valida a hipótese (TIPLER, 2010).

A equação de Planck contribuiu de forma significativa para as leis da radiação, no caso da lei de Rayleigh-Jeans ocorreu a correção para as altas frequências. As demais leis, a de Wien e Stefan-Boltzmann podem ser obtidas matematicamente a partir da lei de Planck, como será demonstrado a seguir.

2.1.6 Obtenção da lei de Wien a partir da lei de Planck

Sabendo-se que a lei de Wien depende de um comprimento de onda no valor máximo de $u(\lambda)$ se tomarmos a derivada da equação (10) em relação a λ , no ponto de máximo, temos:

$$\frac{\partial u}{\partial \lambda} = 0$$

e, portanto, temos:

$$u(\lambda)\partial\lambda = \frac{-5(8\pi hc)}{e^{hc/\lambda KT} - 1} + \frac{(8\pi hc)\lambda^{-5}(hc/KT\lambda^2)e^{hc/\lambda KT}}{(e^{hc/\lambda KT} - 1)^2} = 0$$

assim temos:

$$\frac{5(8\pi hc)}{e^{hc/\lambda KT} - 1} = \frac{(8\pi hc)\lambda^{-5}(hc/KT\lambda^2)e^{hc/\lambda KT}}{(e^{hc/\lambda KT} - 1)^2}$$

notamos que alguns termos se cancelam, assim:

$$5 = \frac{hc}{\lambda KT} \frac{(e^{hc/\lambda KT})}{(e^{hc/\lambda KT} - 1)} \quad (11)$$

fazendo-se a mudança de variável, $x = \frac{hc}{\lambda KT}$, temos:

$$5(e^x - 1) = xe^x \quad (12)$$

isolando x do lado direito da eq. 7

$$x = \frac{5(e^x - 1)}{e^x} \quad (13)$$

a eq. 13 não tem solução analítica, assim para se obter a solução, utilizando-se o software *wxMaxima* temos que:

$$x = 4,9651,$$

e como $x = \frac{hc}{\lambda KT}$ temos:

$$\frac{hc}{\lambda KT} = 4,9651$$

e, por fim, temos que

$$\lambda T = \frac{hc}{4,9651K} \quad .$$

Logo:

$$\lambda T = 2,8978 \times 10^{-3} mK \quad (14)$$

que é a lei de Wien dada pela equação (14).

2.1.7 Obtenção da lei de Stefan-Boltzmann a partir da lei de Planck

A lei de Stefan-Boltzmann fala “a densidade total de energia de um corpo negro é proporcional a T^4 ” (TIPLER, 2010, p. 86), dessa forma quando se integra a lei de Planck para todos os comprimentos de onda, ou seja, de $\lambda = 0$ até $\lambda \rightarrow \infty$, obtemos a lei de Stefan-Boltzmann.

Partindo-se da equação da lei de Planck, e integrando-a para o comprimento de onda, temos que a densidade total de energia (U), é dada por:

$$U = \int_0^{\infty} u(\lambda) d\lambda$$

temos:

$$U = \int_0^{\infty} \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{(e^{hc/\lambda KT} - 1)} d\lambda \quad (15)$$

De início, será feita uma mudança de variável

$$x = \frac{hc}{\lambda KT} \text{ e } dx = -\frac{hc}{\lambda^2 KT} d\lambda$$

que substituindo na equação 15, resulta em:

$$\begin{aligned} U &= 8\pi hc \int_0^{\infty} \frac{(\frac{KT}{hc})^3 x^3}{(e^x - 1)} dx \\ U &= 8\pi hc \int_0^{\infty} \frac{(\frac{KT}{hc})^4 x^3}{(e^x - 1)} dx, \\ U &= 8\pi hc \left(\frac{KT}{hc}\right)^4 \int_0^{\infty} \frac{x^3}{(e^x - 1)} dx \quad (16) \end{aligned}$$

a equação 16 é uma integral imprópria e tomando-se seu valor tabelado de $\frac{\pi^4}{15}$, de acordo com

Tipler (2010), temos:

$$U = 8\pi hc \left(\frac{KT}{hc}\right)^4 \left(\frac{\pi^4}{15}\right)$$

$$U = \frac{8\pi^5 K^4 T^4}{15h^3 c^3} \quad (17)$$

como π , K , h e c são valores conhecidos, pode-se realizar esta operação e obteremos o valor da constante de Stefan, tal que:

$$\sigma = \frac{8\pi^5 K^4}{15h^3 c^3}$$

$$\sigma = 5,6705 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^2}$$

e, desse modo, a equação (17) resultará em

$$U = \sigma T^4 \quad (18)$$

sendo essa a lei de Stefan-Boltzmann, dada anteriormente pela equação (2).

3 METODOLOGIA

Sob o ponto de vista dos procedimentos essa pesquisa pode ser classificada como uma pesquisa bibliográfica, definida por Gil (2008) como aquela em que é fundada a partir de materiais previamente criados, como artigos, revistas e livros. Além disso, ela pode ser classificada como experimental, que segundo Lakatos e Marconi (2003) consiste em analisar o que poderá ocorrer ou não em situações controladas. Quanto à classificação por abordagem, temos que essa pesquisa se enquadra como qualitativa e quantitativa. Qualitativa uma vez que é abordada a teoria e quantitativa por meio das medidas experimentais, com o emprego de técnicas estatísticas no tratamento de dados (RICHARDSON, 2012).

A natureza desta pesquisa pode ser classificada como aplicada, de acordo com Gil (2008, p. 27) uma pesquisa aplicada é aquela que visa “o interesse na aplicação, utilização e consequências práticas dos conhecimentos”. Pela perspectiva dos objetivos essa pesquisa pode ser classificada como explicativa, estabelecida por Gil (2008) sendo aquela que trabalha com o entendimento da realidade, explicando a razão das coisas.

A pesquisa bibliográfica realizada neste trabalho teve como base livros, revistas, artigos, dissertações e teses acerca do tema proposto, radiação térmica, corpo negro e lei de Stefan-Boltzmann. Desse modo, a pesquisa bibliográfica foi crucial para a escolha dos experimentos realizados, tendo em vista a análise de cada um e como serviria para ser uma ponte entre a teoria com os resultados experimentais.

Este trabalho consiste em 3 práticas experimentais, que visam a verificação da lei de Stefan-Boltzmann para a emissão de radiação térmica por um corpo negro real.

O primeiro experimento realizado foi utilizando uma lâmpada incandescente, na qual seu filamento comporta-se aproximadamente como um corpo negro. O procedimento foi dividido em duas etapas, uma vez que não poderemos medir a temperatura diretamente no filamento, sendo que nesta primeira etapa, medimos a resistência da lâmpada a temperatura ambiente por meio da aplicação de pequenos valores de tensão para que o filamento não aquecesse e obedecesse a lei de Ohm. Na segunda etapa, foi feita a coleta de dados da emissão de radiação térmica utilizando uma termopilha e, com isso, obtivemos os dados de tensão na termopilha e a temperatura calculada do filamento por meio da medida de sua resistência (tensão e corrente elétrica).

O segundo experimento foi o do cubo de Leslie, que apresenta quatro faces com características específicas, sendo elas branca, preta, espelhada e fosca. Desse modo, o objetivo desse experimento era a de verificar a emissividade de cada face quando esquentada. Foi utilizado água para aquecer o cubo e quando era aquecido cada face emitia radiação, e essa

radiação foi medida por meio da termopilha em cada face do cubo. Assim realizando a coleta de dados e construindo gráficos para a análise da emissividade.

O terceiro e último experimento, foi o do forno elétrico que consiste em uma caixa de metal com uma resistência dentro que emitia radiação, a qual passava por um pequeno orifício em uma de suas faces e, com isso, era medida a radiação térmica por meio da termopilha, durante seu aquecimento e resfriamento, assim como sua temperatura. Com os dados obtidos, foram feitos os gráficos da curva de aquecimento e resfriamento para poder ser discutida as características das curvas.

4 EXPERIMENTOS (RESULTADOS E DISCUSSÕES)

4.1 Experimento da lâmpada

Este experimento consiste na verificação da potência irradiada pelo corpo a uma dada temperatura. Os passos adotados para essa prática experimental foi primeiro medir a resistência à temperatura ambiente, e o segundo medir a temperatura do filamento da lâmpada por meio da radiação emitida por ele. Foi montado o circuito da imagem 9, e o arranjo experimental é mostrado na imagem 10.

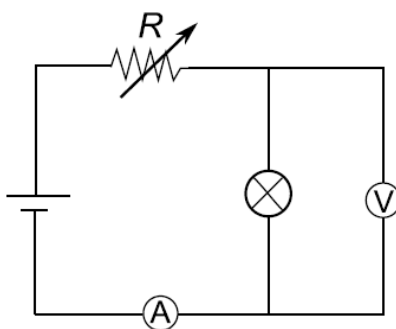


Imagem 9: circuito montado para a primeira parte experimental.

Fonte: PAULO, Ademar.(2017, p.2).

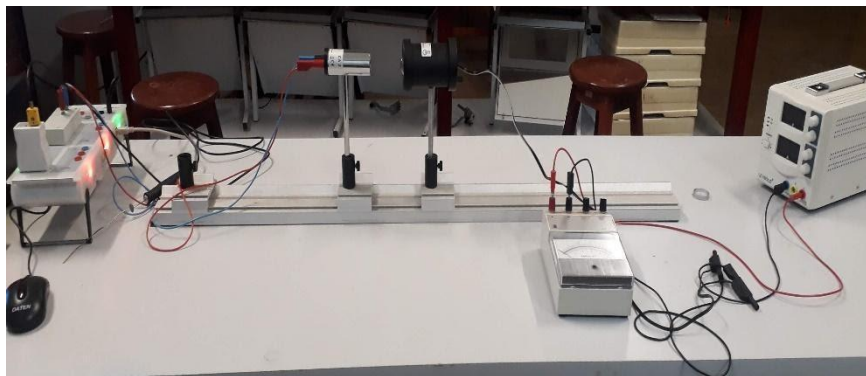


Imagem 10: fotografia do arranjo montado em laboratório.

Fonte: Acervo dos autores.

Nessa primeira parte experimental, foi coletada a resistência à temperatura ambiente, utilizando uma lâmpada incandescente, multímetro e um reostato. Esse experimento foi dividido em 2 etapas, a primeira tinha como objetivo medir a resistência à temperatura ambiente, somente com o multímetro. A segunda etapa experimental consistia em passar diferentes correntes pela lâmpada para se medir a tensão e, com esses dados, podemos encontrar o valor de R_0 que é a resistência quando a temperatura está a 0K, sendo importante para o cálculo da temperatura absoluta do filamento da lâmpada.

O circuito da imagem 9, consiste de um reostato que ficou ajustado em 100Ω , dois multímetros e uma fonte de tensão contínua. Como o filamento a baixas temperaturas atende à

lei de Ohm, a corrente irá variar até 200mA, para que o filamento não aqueça muito. A temperatura ambiente medida com o sensor de temperatura, foi de 25,3°C.

Começamos a coleta dos dados medindo a resistência da lâmpada à temperatura ambiente com um multímetro, foi encontrado o valor de $0,02\Omega$. Em seguida, ajustamos a corrente para 20mA, anotando o valor encontrado de tensão, fizemos até o valor de 140mA de corrente, que estão mostrados na tabela 1.

i (mA)	V _{mult} (V)
0,02	0,0035
0,04	0,0068
0,06	0,0101
0,08	0,0134
0,1	0,0167
0,12	0,0204
0,14	0,0237

Tabela 1 - Dados da corrente e tensão.

A partir da tabela, podemos notar o aumento gradual da tensão à medida que aumentamos a corrente, o mesmo pode ser visto no gráfico 1 da tensão aplicada à lâmpada pela corrente que a percorre, construída a partir dos dados da tabela 1, que corresponde ao esperado pela Lei de Ohm para um resistor.

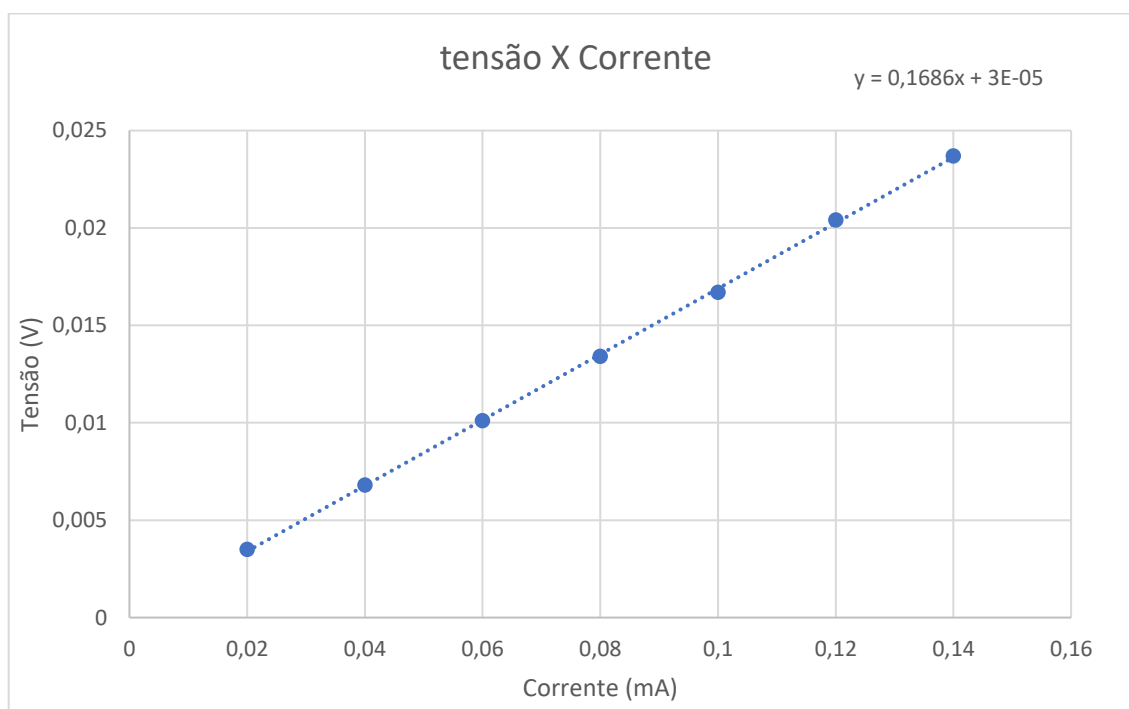


Gráfico 1 – Gráfico da tensão pela corrente, construído com os dados da tabela 1.

Como pode ser observado, o gráfico 1 corresponde a uma curva linear, pois os dados coletados são proporcionais, ou seja, à medida que a corrente aumenta, a tensão também aumenta, conforme esperado pela lei de Ohm. Com a construção do gráfico, podemos determinar a resistência à temperatura ambiente, que equivale ao coeficiente angular da curva, com valor de $0,168\Omega$. Observa-se uma diferença em relação ao valor medido pelo multímetro uma vez que, pelo método gráfico obtivemos várias medidas para determinar a tensão diminuindo a incerteza experimental.

Para se encontrar o valor da resistência no zero absoluto, utilizamos a expressão empírica, conforme Haag e Cavalcante (2005), sendo ela expressa abaixo:

$$R(T_c) = R_0(1 + a_c + b_c T_c^2) \quad (19)$$

na qual $R(T_c)$ é a resistência medida a uma temperatura T_c que em nosso caso foi a ambiente medida em $25,3^\circ\text{C}$, R_0 é a resistência no zero absoluto, e as constantes valem respectivamente, $a_c = 4,82 \times 10^{-3}\text{C}^{-1}$ e $b_c = 6,76 \times 10^{-7}\text{C}^{-1}$. Com todos esses dados conseguimos calcular o R_0 , seu valor foi de $0,15\Omega$.

Na segunda parte do experimento o circuito montado não era muito diferente do primeiro, como podemos ver na imagem 11, e consistia da fonte de tensão, microvoltímetro, amperímetro, lâmpada e termopilha.

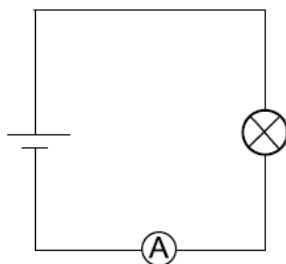


Imagem 11: circuito montado para a segunda parte experimental.
Fonte: PAULO, Ademar. (2017, p.2).

A termopilha é um dispositivo usado para detectar a radiação térmica emitida pela lâmpada, gerando uma tensão a partir da radiação que chega a ela. Para a leitura dos dados utilizamos o programa *CASSY Lab 2*. A termopilha foi colocada a uma distância de $10,0\text{cm}$ do soquete da lâmpada e a fonte de tensão foi ajustada para $1,0\text{V}$ para se iniciar a coleta dos dados, sempre respeitando o tempo de estabilização da termopilha. Em seguida, variou-se a tensão na fonte a cada $0,5\text{V}$ e registrou-se os valores de corrente e tensão na termopilha.

Com os dados coletados montamos a tabela abaixo, os valores encontrados e os calculados.

V fonte (V)	I lamp (A)	R (Ω)	V ter (mV)	T (K)
1,0	1,8	0,56	0,43	800,12
1,5	2,14	0,70	0,64	972,83
2,0	2,41	0,83	1,00	1120,36
2,5	2,7	0,93	1,48	1227,12
3,0	2,99	1,00	2,05	1311,38
3,5	3,25	1,08	2,71	1390,05
4,0	3,51	1,14	3,48	1456,03
4,5	3,73	1,21	4,30	1525,40
5,0	3,95	1,27	5,38	1586,21
5,5	4,18	1,32	6,32	1636,79
6,0	4,37	1,37	7,38	1694,08

Tabela 2 – Dados coletados na segunda parte experimental, apresenta os valores da tensão na fonte, corrente que percorre o filamento, a resistência, a tensão coletada pela termopilha e a temperatura absoluta.

A resistência $R(T)$ foi calculada pela lei de Ohm, e a temperatura foi calculada pela equação de Haag e Cavalcante (2005) dada por

$$T = 273 + \frac{1}{2b} \left[\sqrt{a^2 + 4b \left(\frac{R(T)}{R_0} - 1 \right)} - a \right] \quad (20)$$

que é obtida resolvendo-se a equação (19) para T.

Para analisar a validade da Lei de Stefan-Boltzmann, Guimarães (1999) afirma que pode se fazer a regressão log-log ($R \times T$) graficamente, a qual nos dará uma reta, podendo ser mais fácil a interpretação. No caso do nosso experimento, será uma regressão log-log ($V \times T$), uma vez que $V \propto R$, em que V é a tensão na termopilha. Podemos afirmar isso, pois a energia fornecida para o filamento da lâmpada é a energia elétrica, que o faz aquecer, e esse aquecimento o faz emitir radiação que é detectada pela termopilha. Desse modo, a tensão na termopilha é proporcional à tensão na lâmpada, que por sua vez é proporcional à radiação que chega nela. Sabendo disso, na equação (8) temos que:

$$V \propto R = \varepsilon_T \sigma A (T^4 - T_0^4) \quad (21)$$

sendo V a tensão na termopilha.

Chamaremos $\varepsilon_T \sigma A$ de α , assim a equação (21) ficará:

$$V \propto \alpha(T^4 - T_0^4) \quad (22)$$

Desta maneira, quando aplicado o logaritmo nos 2 lados da equação (22), temos:

$$\log(V) = \log[\alpha(T^4 - T_0^4)]$$

$$\log(V) = \log \alpha + \log(T^4 - T_0^4) \quad (23)$$

na segunda parte da equação, temos:

$$(T^4 - T_0^4), \text{ como } T_0 \ll T$$

em números, para efeito comparativo, temos $T_0 = 296,46 \text{ K}$, pegando três dados de temperatura da tabela 2, um do início, meio e fim, sendo os valores respectivamente: 3955K, 9827K e 10916K. De forma aproximada, vemos que o primeiro valor é 13 vezes maior que T_0 , o valor do meio é 33 vezes maior que T_0 e por sua vez 10926K sendo 36 vezes maior que T_0 . Assim é válida a ideia expressa de que T_0 é muito menor que T , podendo assim ser desconsiderado. Desse modo a equação (23), fica:

$$\log(V) = \log \alpha + \log(T^4)$$

$$\log V = \log \alpha + 4 \log T \quad (24)$$

podemos dizer que $\log \alpha = \beta$

$$\log V = 4 \log T + \beta \quad (25)$$

o coeficiente angular da equação (25) é 4. O esperado para que a lei de Stefan seja válida é que o coeficiente angular do gráfico obtido com os dados da tabela 2, deve ser próximo a 4, dadas as devidas incertezas experimentais.

Primeiro foi feito o gráfico da tensão na termopilha pela temperatura da lâmpada, para vermos como se comportam os dados coletados, se seria como mostra a lei.

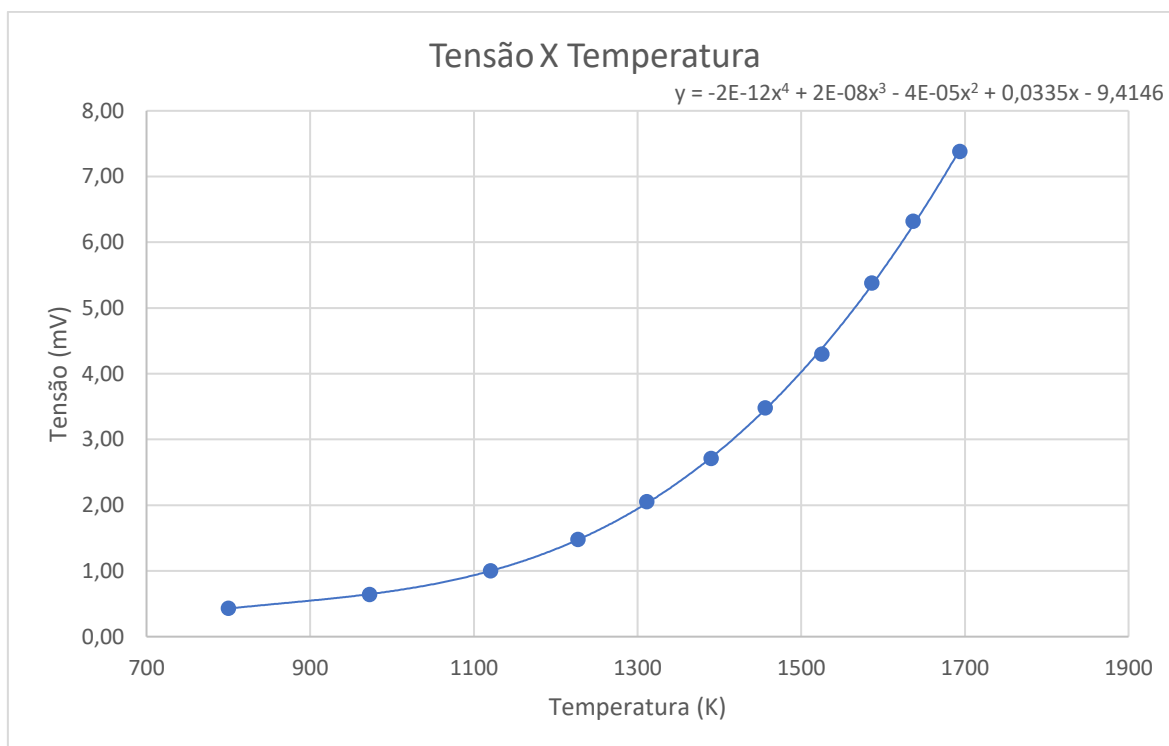


Gráfico 2 – gráfico da tensão pela temperatura absoluta calculada na tabela 2.

Podemos notar que a curva apresentada é polinomial de ordem 4, com a linha de tendência passando por todos os pontos. A lei de Stefan-Boltzmann afirma que a intensidade irradiada de um corpo é proporcional a temperatura elevada a quarta potência, que por sua vez é uma equação polinomial de grau 4, tendo o mesmo comportamento da curva apresentada no gráfico 2. No caso do gráfico 2 temos a tensão pela temperatura, sendo a tensão o equivalente a intensidade de energia irradiada pelo corpo, pois a energia atuante nesse processo é vinda da diferença de potência aplicada no sistema, assim a energia emitida pelo corpo equivale a potência elétrica dissipada no mesmo (CAVALCANTE E HAAG, 2005).

Conforme citado por Guimarães (1999), se quisermos fazer uma verificação da lei podemos plotar um gráfico log-log de $V \times T$, veremos uma reta. Levando em consideração essa afirmativa, foi construído um gráfico log-log.

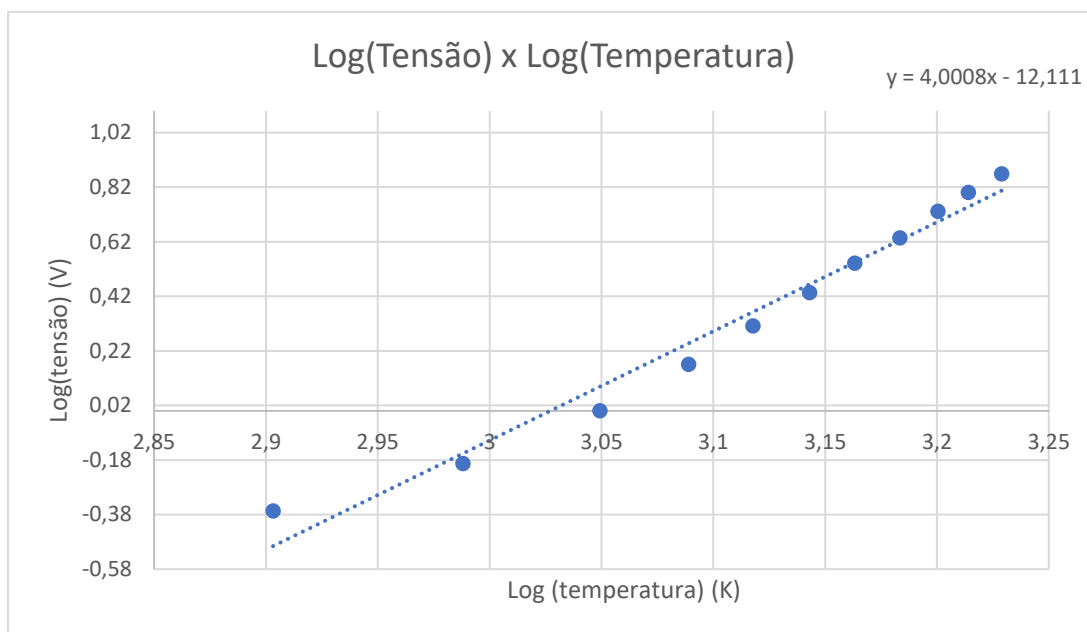


Gráfico 3 – Gráfico da aplicação da propriedade log-log nos valores da tensão e temperatura absoluta, para a análise da validade da Lei de Stefan-Boltzmann.

Com base nos dados da tabela 2, fizemos um ajuste log-log do gráfico da tensão na termopilha em função da temperatura e obtivemos a função de ajuste dada por $V = 4,00T - 12,11$. Isso nos mostra que o coeficiente angular da equação de ajuste é de 4,0008 que apresenta um erro de 0,02% em relação ao valor esperado pela lei de Stefan e dado pela equação (25).

4.2 Experimento do Cubo de Leslie

O experimento tem como objetivo a compreensão da emissão de radiação térmica pelas superfícies do cubo de Leslie, a relação entre potência irradiada e a temperatura, bem como entender como se dá o processo para a verificação das leis da radiação.

O cubo de Leslie apresenta 4 faces feitas de alumínio, sendo elas: branca, preta, fosca e espelhada, com cada uma apresentando características diferentes (VERONEZ, 2016). As faces, preta e branca foram somente pintadas, enquanto a face espelhada passou por um processo de polimento, e a face fosca por nenhum tipo de processo.

Em um primeiro momento foi montado o aparato utilizado no experimento, que pode ser visualizado na imagem 12, que contava com o cubo de Leslie e a termopilha para medir a radiação térmica.



Imagem 12: arranjo experimental do cubo de Leslie.
Fonte: Acervo dos autores.

Foram aquecidos 900ml de água até que entrasse em ebulição, para que pudéssemos analisar a emissão da radiação térmica de cada face do cubo quando aquecido pela água. Neste processo, esperamos a água entrar em equilíbrio térmico com as faces do cubo, para começar a medir a radiação térmica, através da termopilha, emitida por cada face.

Antes de começar a coleta de dados foi medida a temperatura ambiente, cujo valor foi de 23,3°C. Assim, os dados obtidos pelo experimento, à medida em que o cubo entrava em equilíbrio térmico com o meio, estão dispostos na tabela 3.

Face preta		Face branca		Face espelhada		Face fosca	
TEM (°C)	V (mV)	TEM (°C)	V (mV)	TEM (°C)	V (mV)	TEM (°C)	V (mV)
83,8	3,37	84,9	3,18	83,2	0,11	82,3	0,38
80,5	3,04	80,2	2,91	80	0,12	78,5	0,35
77,1	2,7	77,2	2,73	76,9	0,09	76	0,33
74,9	2,69	75,4	2,59	74,7	0,1	74	0,31
72,5	2,53	72,9	2,4	72,5	0,09	70,4	0,29
69,1	2,34	70,3	2,26	69,5	0,09	68,9	0,27
66,6	2,23	67,7	2,12	67,6	0,08	64,6	0,25
64	1,91	65,5	1,97	64,6	0,07	61,8	0,25
62,4	1,91	62	1,8	62	0,08	60	0,23
59,9	1,78	60	1,71	59,3	0,06	57,7	0,22
57,8	1,69	58,4	1,63	57,7	0,06	56,7	0,2
56,7	1,6	57	1,54	56,7	0,05	55,3	0,22
54,8	1,52	55,1	1,46	55	0,1	53,4	0,22
53	1,43	53,6	1,38	53,3	0,12	52,6	0,2
52,8	1,36	52,6	1,33	52,8	0,07	52,1	0,19

Tabela 3 – dados da temperatura e tensão coletados durante a prática experimental, tendo os valores de cada face.

Ao analisar a tabela 3 é notável nos dados das faces preta e branca, que à medida que a temperatura, cai também a tensão enquanto que nos dados das faces foscas e espelhadas, apesar da queda de temperatura, a tensão sofre pequenas oscilações, sendo que ambas apresentam um valor pequeno de tensão, quando comparado às faces preta e branca.

Com os dados apresentados de cada face, podemos verificar que as faces branca e preta apresentam um comportamento semelhante, com relação aos dados. Na face fosca e espelhada vemos um comportamento semelhante entre si, porém apresenta um comportamento diferenciado da face branca e preta, no qual temos quedas significativas de tensão à medida que a temperatura diminui.

Os dados apresentados serviram de base para a construção do gráfico da tensão na termopilha pela diferença de temperatura elevada à quarta potência, conforme já apresentamos em experimentos anteriores, pois a mesma obedece à Lei de Stefan-Boltzmann.

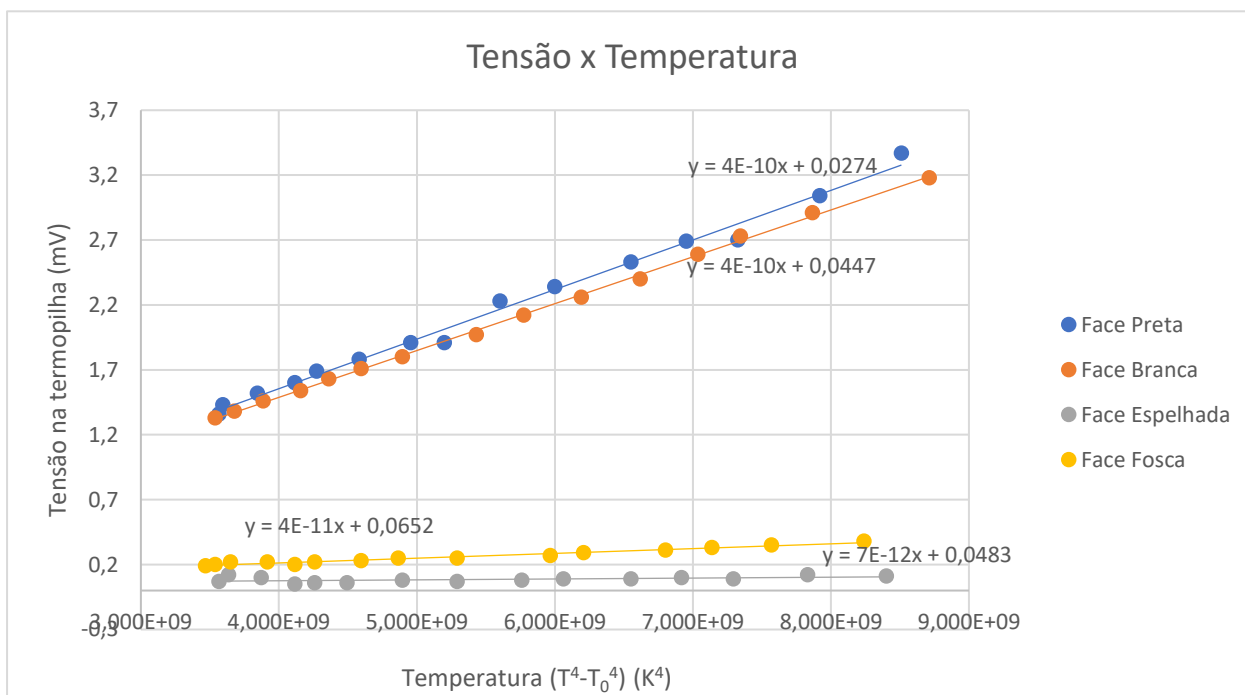


Gráfico 4 – feito a partir da tabela 3, tendo uma curva para cada face do cubo, afim de analisar a emissividade.

No gráfico acima, podemos analisar que duas curvas apresentam comportamento da lei de Stefan-Boltzmann, mesmo que todas apresentem uma relação linear entre tensão e temperatura. As curvas azul e laranja mostram que quanto maior for a temperatura maior será a tensão da termopilha, ou seja, maior será a radiação térmica emitida pelas faces, que nesse caso são as faces preta e branca, sendo assim boas emissoras de radiação térmica, indo de encontro com as ideias de Kirchhoff para a radiação térmica (PEDUZZI, 2008).

Ao verificar as demais curvas, notamos que a tensão não oscila tanto, mesmo que elas apresentem altas temperaturas não emitem radiação como as faces branca e preta, pois não são

corpos negros e nem se assemelham a eles, elas passaram por um processo no qual mudou suas estruturas físicas, para que as mesmas tivessem a aparência espelhada e fosca, levando-as a não ser boas emissoras de radiação (VERONEZ, 2016).

4.3 Experimento do forno

O experimento do forno consistia em medir a radiação térmica emitida por ele, o forno era uma caixa metálica com uma resistência por dentro quando aquecida emite radiação, essa sendo medida pelo orifício de saída onde se encontrava a termopilha. Foram feitas coletas de dados à medida que sua temperatura aumentava e depois com ele esfriando na faixa de 50°C a 450°C. Com os dados coletados foi feita uma representação gráfica da intensidade irradiada pela temperatura absoluta, para a verificação da lei de Stefan-Boltzmann.

Antes de iniciar a coleta de dados experimentais, medimos a temperatura ambiente e a temperatura do forno dadas, respectivamente, por 23,1 °C e 24,5 °C.

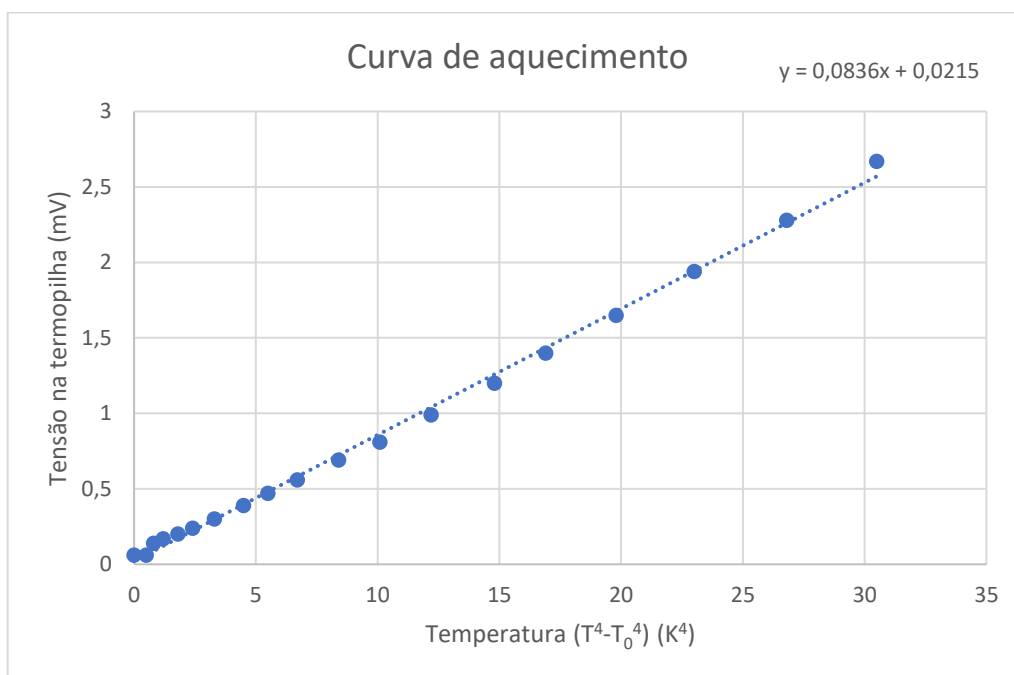


Gráfico 5 – curva de aquecimento do forno.

O gráfico 5, foi plotado com os dados da tensão e temperatura ($T^4 - T_0^4$), sendo a tensão o equivalente a energia emitida pelo corpo, conforme demonstrado na equação (21). Ao analisar a curva apresentada, notamos a proporcionalidade da tensão e temperatura, quanto maior for a temperatura maior será a tensão, e mais radiação o forno estará emitindo. A lei de Stefan-Boltzmann nos fornece que a potência irradiada por um corpo aumenta em proporção a temperatura elevada a quarta potência, desse modo o experimento nos confirma o apresentado pela lei.

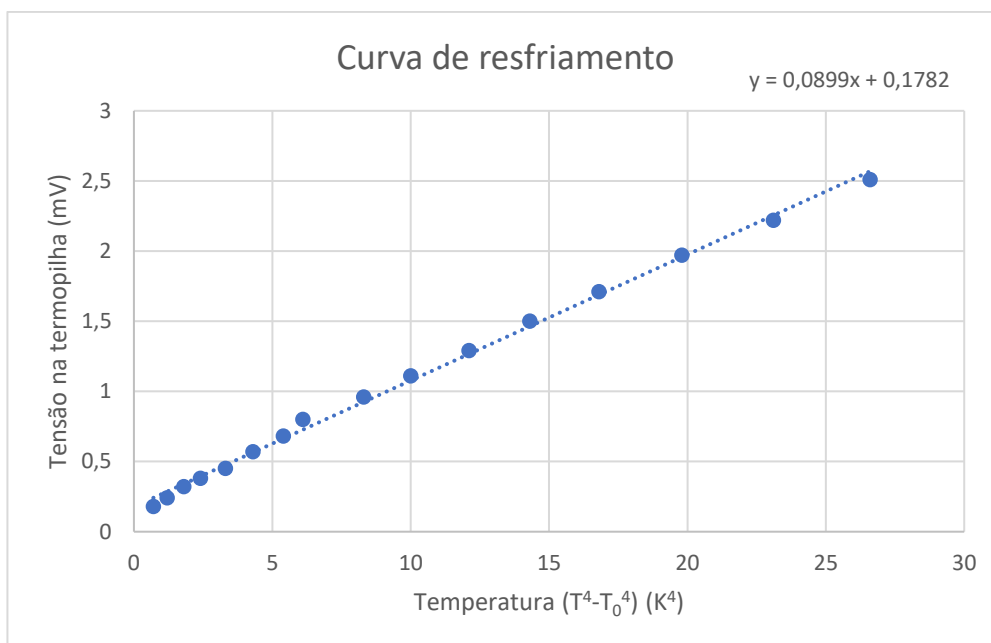


Gráfico 6 – curva de resfriamento.

No gráfico 6 vemos a curva de resfriamento do forno. Nele é possível analisar que, mesmo alguns pontos estando fora da linha de tendência traçada, a mesma se mostra linear. Do mesmo modo, como ocorre no gráfico 5, o corpo está emitindo radiação, a diferença é que o forno está esfriando, e nesse caso a intensidade de radiação diminui conforme a temperatura também diminui, por isso os coeficientes angulares são próximos, sendo o da curva de aquecimento de 0,0836 e o da curva de resfriamento de 0,0899, embora seja dois processos diferentes, se comportam de forma semelhante.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, procurou-se observar por meio dos experimentos a validade da lei de Stefan-Boltzmann. Os experimentos permitiram a obtenção de dados e com isso a análise deles por meio de equipamentos como a termopilha e software, como o *Cassy Lab*.

Os resultados encontrados com os 3 experimentos realizados, foram de extrema importância para a compreensão de radiação térmica emitida por corpos reais que se aproximam de corpos negros. No experimento da lâmpada, foram obtidos resultados satisfatórios, como pudemos analisar nos gráficos 3 e 4, em que o seu coeficiente angular está próximo do valor 4, indo de encontro ao afirmado na lei de Stefan-Boltzmann.

Nos 2 últimos experimentos foram analisados sua emissividade de dois objetos, um forno elétrico e um cubo de Leslie enquanto suas temperaturas variavam. Para o cubo de Leslie foi analisada a emissividade de cada face do cubo e, de acordo com o gráfico 4, é notável que duas curvas se destacam em crescimento, ou seja, na emissão de radiação térmica à medida que a mesma esquenta, e são as faces que mais se aproximam de um corpo negro sendo elas a face branca e preta.

Já no experimento do forno, foi analisada a curva de aquecimento e resfriamento as quais apresentam certa similaridade, com seus coeficientes bem próximos, podemos afirmar que se trata de um mesmo comportamento, mas em processos diferentes. Com isso podemos dizer que o comportamento analisado está de acordo com a lei de Stefan-Boltzmann, pois apresenta uma proporcionalidade entre a tensão e a temperatura, ou seja, mesmo que ele esteja esquentando ou esfriando ele emite radiação o que muda é somente sua intensidade, conforme sua temperatura.

Desse modo, com experimentos realizados vemos que corpos reais a uma dada temperatura obedecem a lei de Stefan-Boltzmann, mesmo que sejam corpos reais eles se aproximam experimentalmente dos corpos negros. A importância do entendimento do comportamento dos experimentos realizados possibilita fazer uma ponte entre os conceitos de radiação térmica, corpos reais e ainda aprofundar nas leis da radiação, como a lei de Stefan-Boltzmann, podendo assim auxiliar alunos e professores na compreensão acerca do conteúdo.

REFERÊNCIAS

- AZEVÊDO, Eliane S. Breves considerações na convergência ciência e religião. **Caderno CRH**, v. 26, n. 69, p. 469-476, 2013.
- BAIONI, José Eduardo Marques. Hegel intérprete de Tales de Mileto. **Revista Hypnos**, n. 2, 1997.
- CAVALCANTE, Marisa Almeida; HAAG, Rafael. Corpo negro e determinação experimental da constante de Planck. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 3, p. 343-348, 2005.
- DAVIDOVICH, Luiz. Os quanta de luz e a ótica quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 4, p. 4205-1-4205-12, 2015.
- EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. Física Quântica, Editora **Campus**, Rio de Janeiro, 1988.
- GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. Editora Atlas SA, 2008.
- GUIMARÃES, P. S. Radiação do corpo negro. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 21, n. 2, p. 291-297, jun. 1999.
- HEWITT, Paul. **Física Conceitual-12**. Bookman Editora, 2015.
- LIMA, F.M.S. A evolução do atomismo e os primeiros modelos atômicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, p. 1-47, 2014.
- MACETI, H. et al. Robert Millikan e a medida da carga elementar: 100 anos da publicação do trabalho que mudou a física. **Caderno de Física da UEFS**, Vitória, v. 9, n. 1-2, p. 85-92, 2011
- MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed.-São Paulo: Atlas, 2003.
- OKI, Maria da Conceição Marinho. O conceito de elemento da antiguidade à modernidade. **Química Nova na Escola**, v. 16, p. 21-25, 2002.
- PEDUZZI, Luiz OQ. Do átomo grego ao átomo de Bohr. **Florianópolis: Departamento de Física/UFSC**, 2008
- PIRES, Antônio ST. **Evolução das Ideais da Física**. Editora Livraria da Física, 2008.
- PORTO, C. M. O atomismo grego e a formação do pensamento físico moderno. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 4, p. 1-11, 2013.
- RICHARDSON, Roberto Jarry et al. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. São Paulo: Atlas, 1985.

SÉRÉ, Marie-Geneviève; COELHO, Suzana Maria; NUNES, Antônio Dias. O papel da experimentação no ensino da física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 20, n. 1, p. 30-42, 2003.

TIPLER, Paul.; LLEWELLYN, Ralph. **Física Moderna**. 5ª edição. Editora LTC, 2010.

VERONEZ, Wanderley Marcílio et al. **Experimentos sobre absorção e emissão de radiação térmica e visível com adaptação do Cubo de Leslie**. 2016.