



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

RONISSON ALVES DE SOUZA

**UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ACERCA DA EVOLUÇÃO DO PENSAMENTO
CIENTÍFICO ACERCA DO CONCEITO DA NATUREZA DA LUZ COM ÊNFASE
ÀS RADIAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS NÃO-IONIZANTES**

Palmas-TO

2017



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

RONISSON ALVES DE SOUZA

**UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ACERCA DA EVOLUÇÃO DO PENSAMENTO
CIENTÍFICO ACERCA DO CONCEITO DA NATUREZA DA LUZ COM ÊNFASE
ÀS RADIAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS NÃO-IONIZANTES**

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.

Orientador: Prof. Me Ademar Paulo Junior.

Área de concentração: Física II, Física III; Física IV, Física da Radiação; História da Física;

Palmas-TO

2017

Alves de Souza, Ronisson

Uma revisão bibliográfica acerca da evolução do pensamento científico acerca do conceito da natureza da luz com ênfase às radiações eletromagnéticas não-ionizantes / Ronisson Alves de Souza. – Palmas, 2017

79 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Licenciatura em Física) – Instituto Federal de Educação do Tocantins, Campus Palmas, 2017.

Orientador(a): Prof. Me Ademar Paulo Junior

1. Ondas 2. A Natureza da Luz 3. Ondas Eletromagnéticas
4. Radiações Eletromagnéticas I. Título

Pôr no lugar desta página a FOLHA DE APROVAÇÃO

A minha família, que me inspirou e me incentivou aos primeiros passos ao conhecimento, ..., e a todos que de alguma forma ou doutra contribuíram para o meu crescimento, sucesso ... e conclusão do Curso de Licenciatura em Física.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a **DEUS** por sua infinita graça e misericórdia por nós.

Agradeço a todos os professores do IFTO, Campus Palmas, que durante esse tempo de graduação estiveram em contato comigo compartilhando seus conhecimentos e também paciência, compreensão, atenção ... e amizade. Em especial àqueles que acabaram estreitando laços de amizade comigo, a saber: Prof. Me Ademar Paulo Júnior, pela generosidade e paciência em me orientar na escrita deste trabalho; a Prof.^a a Dra. Claudia Pegado; ao Prof. Dr. Weimar S. Castilho, que muito me incentivou; ao Prof. Me Rodrigo Teixeira; a Doutoranda Nádia Vilela; a Prof.^a Dra. Adriana Lopes Leal; a Prof.^a Dra. Tâmara Machado; ao Doutorando Giuliano Guimarães; ao Prof. Me Tiago Castro; ao Prof. Me Magno de Azevedo; ao Prof. Me Francisco Romero; ao Técnico e Me Serafim e tantos outros que me acompanharam não só academicamente, mas também pessoalmente.

Agradeço também a todos os Servidores Técnicos Administrativos do IFTO, Campus Palmas, pela atenção, compreensão, ... e principalmente pela generosidade.

Agradeço ainda, em especial, aos amigos: Aurea Santos, Bruno Sousa, Matheus Santos, Luiz Gustavo, Antônio Carlos, Tiago do Nascimento, Victor Santos, etc., que de alguma forma ou doutra me ajudaram durante todos esses anos de graduação, ora na resolução das listas de exercícios, ora nos trabalhos acadêmicos, ora nas demais atividades ligadas à Física e também à vida.

“Nenhum pesquisador desenvolve seus trabalhos a partir do nada - não existe o ‘grande gênio’ capaz de criar novas ideias sem ter, antes, estudado os pensadores anteriores.”

Roberto de Andrade Martins

RESUMO

Neste trabalho expõe-se com base num estudo bibliográfico (revisão) uma contextualização histórica e científica sobre “RADIAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS NÃO-IONIZANTES” a partir da evolução do pensamento científico acerca do conceito da natureza da luz. O mesmo se desenvolve desde a classificação ondulatória (ondas) cuja importância se faz necessário para compreendermos o comportamento e as principais características das ondas eletromagnéticas; da natureza da luz; das ondas eletromagnéticas (quanto a sua produção, velocidade de propagação, características gerais, ...); e das radiações eletromagnéticas não-ionizantes (quanto as suas características, aos tipos de radiações descobertas desde o século XVIII até o início do século XX, a sua classificação não-ionizante ou ionizante) região que constitui o Espectro Eletromagnético. No presente trabalho, falaremos também sobre os aspectos (ou modelos) da natureza da luz, neste caso das radiações eletromagnéticas, que segundo os referenciais adotados para a escrita deste trabalho de conclusão de curso apresentam um comportamento ora ondulatório, ora partícula é o que chamamos de dualidade onda-partícula. Além desses conceitos ou fundamentos, aborda-se também os efeitos biológicos causados nos seres vivos pelas radiações eletromagnéticas não-ionizantes, principalmente nos seres humanos, uma vez que essas radiações são constituídas por campos elétrico e magnético perpendiculares entre si e à velocidade de propagação. E por último, apresenta-se a importância deste trabalho para o Ensino de Física considerando que quase todas radiações apresentadas no Espectro Eletromagnético foram descobertas em estudos e/ou pesquisas aplicadas com fins tecnológicos, em alguns casos na Óptica, usada nos estudos de microscopia; na Astronomia, na caracterização dos astros luminosos por meio do Espectro Eletromagnético; no Eletromagnetismo Clássico, as rádios frequências usadas nas telecomunicações, ... e na Física da Radiação, usada na saúde.

Palavras-chave: Ondas; A Natureza da Luz; Radiações Eletromagnéticas; Ondas Eletromagnéticas; Radiações Não-Ionizantes e Ionizantes; Espectro Eletromagnético.

ABSTRACT

In this work, a historical and scientific contextualization on "NON-IONIZING ELECTROMAGNETIC RADIATIONS" is based on a bibliographical study (revision), based on the evolution of scientific thinking about the concept of the nature of light. The same one develops from the wave classification (waves) whose importance is necessary to understand the behavior and the main characteristics of the electromagnetic waves; the nature of light; of electromagnetic waves (as to their production, propagation velocity, general characteristics, ...); and non-ionizing electromagnetic radiation (as to their characteristics, the types of radiation discovered since the eighteenth century to the beginning of the twentieth century, their non-ionizing or ionizing classification) region that constitutes the Electromagnetic Spectrum. In the present work, we will also discuss the aspects (or models) of the nature of light, in this case of electromagnetic radiations, which according to the references adopted for the writing of this work of conclusion of course have a behavior sometimes wave, sometimes a particle is what we call of wave-particle duality. In addition to these concepts or fundamentals, the biological effects caused by non-ionizing electromagnetic radiation on living beings, especially in humans, are also discussed, since these radiation are made up of electric and magnetic fields perpendicular to each other and at the speed of propagation. Finally, it is presented the importance of this work for Physics Teaching, considering that almost all the radiations presented in the Electromagnetic Spectrum were discovered in studies and / or applied research for technological purposes, in some cases in Optics, used in microscopy studies; in Astronomy, in the characterization of the luminous stars through the Electromagnetic Spectrum; in Classical Electromagnetism, the radios frequencies used in telecommunications, ... and in Radiation Physics, used in health.

Keywords: Waves; The Nature of Light; Electromagnetic Radiations; Electromagnetic waves; Non-Ionizing and Ionizing Radiations; Electromagnetic Spectrum.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ondas sobre a superfície da água provocadas por uma perturbação no meio.....	16
Figura 2 - Propagação de uma onda eletromagnética	17
Figura 3 - Onda transversal numa corda com uma das extremidades fixas	18
Figura 4 - Onda longitudinal numa mola <i>Slinky</i> com uma das extremidades fixas.....	18
Figura 5 - Interferência produzida pela superposição da duas ondas em fase se propagando na superfície da água	20
Figura 6 - Configuração de uma interferência construtiva.....	21
Figura 7 - Configuração de uma interferência destrutiva.....	21
Figura 8 - Interferência construtiva e destrutiva de ondas transversais e longitudinais	21
Figura 9 - Onda estacionária resultante da interferência ou superposição de duas ondas em diferentes instantes de tempo.....	22
Figura 10 - Onda estacionária resultante da interferência ou superposição de duas ondas incidente e refletida.....	23
Figura 11 - Oscilador de Heinrich Hertz (1857 - 1894) para produção de ondas eletromagnéticas	24
Figura 12 - Onda harmônica (simples)	25
Figura 13 - Christiaan Huygens (1629-1695).....	31
Figura 14 - Sir Isaac Newton (1643-1727).....	32
Figura 15 - Thomas Young (1773-1829)	33
Figura 16 - Augustin Fresnel (1788-1827).....	34
Figura 17 - James C. Maxwell (1831-1879).....	35
Figura 18 - Heinrich Hertz (1857-1894)	36
Figura 19 - Efeito fotoelétrico	37
Figura 20 - Max Planck (1858-1947).....	38
Figura 21 - Albert Einstein (1879-1955).....	39
Figura 22 - Louis de Broglie (1892-1987)	40
Figura 23 - Clinton J. Davisson (1881-1958) e Lester H. Germer (1896-1971).....	41
Figura 24 - Geração de onda eletromagnética a partir de um condutor conduzindo corrente variável no tempo.....	43
Figura 25 - Polarização da onda eletromagnética no plano XYZ.....	48
Figura 26 - Representação do espectro	50
Figura 27 - Modelo ondulatório e corpuscular para a radiação eletromagnética	51

Figura 28 - Radiações não-ionizantes	53
Figura 29 - Representação atômica.....	55
Figura 30 - Interação das radiações ionizantes com a matéria, em função da sua energia e do número atômico do alvo	56
Figura 31 - Radiações não-ionizantes conforme a classificação eletromagnética.....	57
Figura 32 - Guglielmo Marconi (1874-1937) e o seu Transmissor radiotelegráfico.....	59
Figura 33 - Roberto Landell de Moura (1861-1928)	60
Figura 34 - Transmissor de ondas hertzianas de Landell.....	60
Figura 35 - Percy Lebaron Spencer (1894-1970)	61
Figura 36 - Configuração de um corpúsculo de água na presença do campo elétrico.....	62
Figura 37 - Willian Herschel (1738-1822).....	63
Figura 38 - Aparato utilizado por Willian Herschel na detecção do infravermelho.....	63
Figura 39 - Esquema de René Descartes.....	65
Figura 40 - Esquema de Robert Boyle	65
Figura 41 - Experimento de Newton utilizando um prisma	66
Figura 42 - Faixa visível percebida pelo olho (humano)	66
Figura 43 - Johann Ritter (1776-1810)	67
Figura 44 - Bandas fotoquímicas e ou fotobiológicas do espectro ultravioleta em relação a “absorvidade” pela estratosfera terrestre.....	69

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 ONDAS	16
2.1 Conceitos Iniciais	16
2.2 Tipos de onda	17
<i>2.2.1 Ondas transversais e longitudinais</i>	<i>18</i>
2.3 Movimento ondulatório	18
<i>2.3.1 Velocidade de propagação de uma onda</i>	<i>19</i>
2.4 Interferência.....	19
2.5 Ondas estacionárias	22
2.6 Oscilador harmônico simples e equação da onda	25
3 A NATUREZA DA LUZ.....	28
3.1 A natureza da luz até o século XVII.....	28
3.2 A natureza da luz a partir do século XVII até o início do século XX.....	29
4 RADIAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS NÃO-IONIZANTES	42
4.1 Ondas Eletromagnéticas	42
<i>4.1.1 Velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas.....</i>	<i>44</i>
<i>4.1.2 Características gerais das ondas eletromagnéticas</i>	<i>45</i>
4.2 Radiação Eletromagnética	48
4.3 Radiações Não-Ionizantes e Ionizantes	52
4.4 O Espectro Eletromagnético.....	56
<i>4.4.1 Caracterização de cada faixa não-ionizante do espectro eletromagnético.....</i>	<i>58</i>
4.5 Efeitos Biológicos das Radiações Não-Ionizantes	70
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

1 INTRODUÇÃO

É de consenso que a Física, principalmente a Física Clássica, tem se tornado uma das maiores áreas científicas desde os séculos passados ao atual. Dentre tantos outros fatores importantes, a Física Clássica desenvolveu-se crescentemente por inúmeros estudos, pesquisas, hipóteses, ideias de Óptica, Astronomia e do Eletromagnetismo, a esses campos de estudo da Física, tivemos um marco histórico quanto a questão da natureza da luz pela comunidade filosófica e científica daquela época, desde as civilizações antigas, como os hebreus (SILVA, 2010a e 2010b), até início do século XVII.

Contudo, as ideias anteriormente apresentadas, até o século XVII, tinham pouca relevância e/ou argumentos para melhores explicações sobre a natureza da luz. Esta passou a ganhar força no transcorrer do século XVII ao século XIX, destacando-se as recém descobertas científicas para os fenômenos Ópticos da luz no meio material estudados por René Descartes (1596-1650); Christiaan Huygens (1629-1695), que propôs que a natureza da luz possui um modelo ondulatório; e Sir Isaac Newton (1643-1727), que apresentou um modelo corpuscular para a natureza da luz.

Não obstante, entre os dois modelos apresentados anteriormente, ondulatório e corpuscular, surgiram várias divergências, todavia, essas só foram resolvidas a partir das recém descobertas dos fenômenos Ópticos de interferência e de difração. O modelo corpuscular de Newton que tinha prevalecido após a morte de Huygens não foi mais utilizado a partir dos estudos feitos por Thomas Young (1773-1829) (LARIOS, 2016; LIMA, 2012; SILVA, 2010b), Augustin Fresnel (1788-1827), A. H. Louis Fizeau (1819-1896) (ARAGUÃO, 2006; ROCHA, 2011) e J. Bernard Foucault (1819-1868) (ARAGUÃO, 2006; LARIOS, 2016; MÁXIMO, 2010).

Paralelamente aos estudos da Óptica cresciam também as pesquisas acerca dos fenômenos eletromagnéticos, que aos poucos foram introduzindo corpo às equações fundamentais da teoria eletromagnética clássica. Foi nesse campo que destacam-se as grandes contribuições de, James Clerk Maxwell (1831-1879), até meados do século XIX. Ele demonstrou que a luz era, sem sombra de dúvidas, uma onda eletromagnética, ou seja, a luz possuía um caráter ondulatório como proposto por Huygens, porém com embasamento na teoria eletromagnética.

Como os resultados obtidos por Maxwell eram embasados em estudos teóricos, coube, então, ao cientista H. R. Hertz (1857-1894) entre os anos de 1886 a 1887 confirmá-la experimentalmente através de um circuito oscilante montado por ele próprio em seu

laboratório. Hertz além de confirmar as previsões teóricas de Maxwell, o qual afirmou ser a natureza da luz ondas eletromagnéticas, também as produziu em seu laboratório e bem como as detectou na região de rádio frequência.

Hertz também deu outra grande contribuição aos estudos da Física que foi a descoberta do efeito fotoelétrico, que posteriormente foi usado para reincorporar o modelo corpuscular de Newton à natureza (aspecto físico) da luz (NUSSENZVEIG, 1998), só que com novos fundamentos, esses desenvolvidos por Albert Einstein (1879-1955) com base na teoria da radiação de corpo negro de Max Planck (1858-1947). A partir dessas descobertas pode-se adotar novos aspectos para a natureza da luz, porém, substituindo a questão corpuscular por partículas portando energia quantizada segundo o concebido por Einstein em 1905.

Surgiu dessa forma, o “fóton” de luz, que nos designa um “quantum” de radiação eletromagnética para qualquer comprimento de onda (ROCHA, 2011). Foi a partir desse conceito de “fóton”, que a luz veio a ser interpretada como sendo um pacote de energia, que ao interagir com a matéria, apresenta um modelo dual ora partícula, ora onda (GREF, 2007). A esse modelo dual foi dado o nome de dualidade onda-partícula (GREF, 2007) segundo as pesquisas desenvolvidas pelo cientista Louis de Broglie (1892-1987) em 1924. Mas por se tratar de estudos teóricos coube aos pesquisadores C. J. Davisson (1881-1958) e L. H. Germer (1896-1971), em 1927, comprova-los experimentalmente através de difração de elétrons em cristais de níquel (Ni), os elétrons experimentados apresentaram propriedades tanto de partículas como de ondas (ROCHA, 2011).

Na medida em que os estudos citados até então iam avançando gradativamente a respeito da natureza da luz, surgiam também paralelamente pesquisas relacionadas a Teoria Eletromagnética Clássica tendo como base as teorias de Maxwell e os estudos e experimentos de Hertz sobre as ondas eletromagnéticas. Com isso, a Física Clássica desenvolveu-se largamente com as descobertas dos fenômenos eletromagnéticos observados, também por Maxwell, a partir do espectro visível da luz, como por exemplo, as ondas de rádio (CARVALHO, 2017; HEWITT, 2011) descobertas por Hertz e aplicadas por G. Marconi (1874-1937) (ROCHA, 2011), as micro-ondas desenvolvidas na Segunda Guerra Mundial e estudadas e aplicadas por P. L. Spencer (1894-1970) (ALMEIDA, 2016) em forno micro-ondas, as radiações infravermelhas descobertas por Willian Herschel (1738-1822) (GUIMARÃES, 2013; OLIVEIRA, 2014; SANTOS, 2006, apud MALDAGUE & MOORE, 2001; TORRES, et al., 2013), a luz visível observada por Newton (MARTINS, 2015; ROCHA, 2011; TORRES et al., 2013) e as radiações ultravioletas que foram descobertas por

Johann Ritter (1776-1810). Neste trabalho aborda-se somente as radiações eletromagnéticas não-ionizantes partindo da evolução do pensamento científico acerca do conceito da natureza da luz.

Esses fenômenos ou elementos da luz, todos constituídos por campos eletromagnéticos, consoante à teoria eletromagnética, foram incorporados ao que conhecemos, hoje, por Espectro Eletromagnético (CARVALHO, 2017; CHESMAN, 2004; GUIMARÃES, 2013; HALLIDAY, 2011; TORRES et al. 2013; outros) ou Arco-Íris de Maxwell (CHESMAN, 2004; HALLIDAY, 2011).

É com base nessa contextualização histórica e teórica - motivação deste trabalho - sobre a natureza da luz até às ondas eletromagnéticas fundamentadas nos referencias aqui adotados para a escrita deste trabalho, que o mesmo se desenvolve, na “perspectiva” - no objetivo - de se fazer uma revisão bibliográfica sobre as “Radiações Eletromagnéticas” (BISCUOLA, 2013; EISBERG, 1979; OKUNO, 1982; TAUHATA et al., 2014), em particular as classificadas como “Não-Ionizantes” (CEONI, 2010; OKUNO, 2013; PADILHA, 2011; SCUDELER, 2005).

Este trabalho se desenvolve desde a classificação ondulatória (**2 ONDAS**), cuja importância se faz relevante à compreensão das ondas eletromagnéticas, uma vez que, estas são caracterizadas conforme a literatura como sendo ondas transversais (HEWITT, 2009; OKUNO, 1982) ou ainda ondas estacionárias (ALONSO, 1972; ...); a natureza da luz (**3 A NATUREZA DA LUZ**) também contextualizada neste capítulo (**1 INTRODUÇÃO**); até as radiações eletromagnéticas não-ionizantes componentes do Espectro Eletromagnético (**4 RADIAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS NÃO-IONIZANTES**). Essas radiações apresentam, consoante os referencias estudados, um aspecto de dualidade onda-partícula, ou seja, ora se comportam como onda, ora se comportam como partícula.

Ainda no antepenúltimo capítulo ou seção (4) são apresentados conceitos quanto a diferença entre as radiações não-ionizantes das classificadas como ionizantes (CARVALHO, 2017; CEONI, 2010; OKUNO, 2013; PADILHA, 2011; YOSHIMURA, 2010) e, também os efeitos multiversos no funcionamento biológico dos seres vivos causados pelas radiações não-ionizantes (ANGUERA, 2012; CARVALHO, 2013; OKUNO, 1982; TAUHATA et al., 2014).

Apresenta-se no penúltimo capítulo deste trabalho (**5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**), além das considerações e todo o trabalho, a importância deste para o Ensino de Física considerando que quase todas radiações apresentadas no Espectro Eletromagnético foram descobertas em estudos e/ou pesquisas aplicadas com fins tecnológicos, em alguns casos na Óptica, usada nos estudos de microscopia; na Astronomia, na caracterização dos

astros luminosos por meio do Espectro Eletromagnético; no Eletromagnetismo Clássico, as rádios frequências usadas nas telecomunicações, ... e na Física da Radiação, usada na saúde. Dessa forma, este trabalho expõe uma revisão textual adotando vários referenciais - quase 60 - para discorrer sobre o assunto radiações eletromagnéticas não-ionizantes quanto a sua parte histórica, quanto a sua classificação como não-ionizante, quanto à algumas aplicações e quanto aos seus efeitos biológicos.

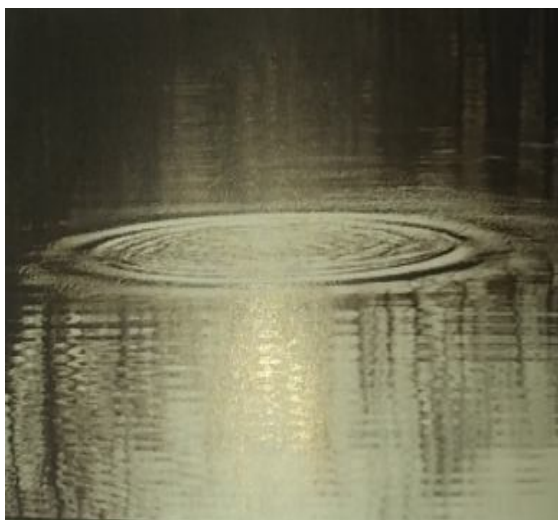
2 ONDAS

Este capítulo tem por finalidade mostrar alguns tópicos relevantes sobre ondas e algumas de suas propriedades e/ou características. Para isso, utilizou-se referenciais teóricos, neste caso, livros didáticos tanto os voltados para o Ensino Médio (BARRETO FILHO, 2013; HEWITT, 2009; MÁXIMO, 2010) quanto os voltados para o Ensino Superior (ALONSO, 1972; HALLYDAY, 2006, 2011; HEWITT, 2009; NUSSENZVEIG, 2002; OKUNO, 1982; SERWAY, 2009; TIPLER, 2000; YOUNG, 2008).

2.1 Conceitos Iniciais

Uma onda, segundo Nussenzveig (2002) “é qualquer sinal que se transmite de um ponto a outro de um meio, com velocidade definida” (p. 98). Hewitt (2009) ainda a conceitua como sendo qualquer coisa que oscile pra frente e pra trás, como por exemplo, um balanço; pra lá e pra cá; de um lado para o outro, no caso de um pêndulo; para dentro e para fora ou para cima e para baixo, no caso de uma perturbação provocada por um corpo ao cair sobre a superfície da água (Figura 1).

Figura 1 - Ondas sobre a superfície da água provocadas por uma perturbação no meio



Fonte: Hewitt (2009).

Assim, uma onda, de modo geral, “é uma perturbação periódica de alguma grandeza física que se propaga em um meio material ou no espaço [transportando, de alguma forma, energia]” (BARRETO FILHO, 2013, p. 204, grifos nosso).

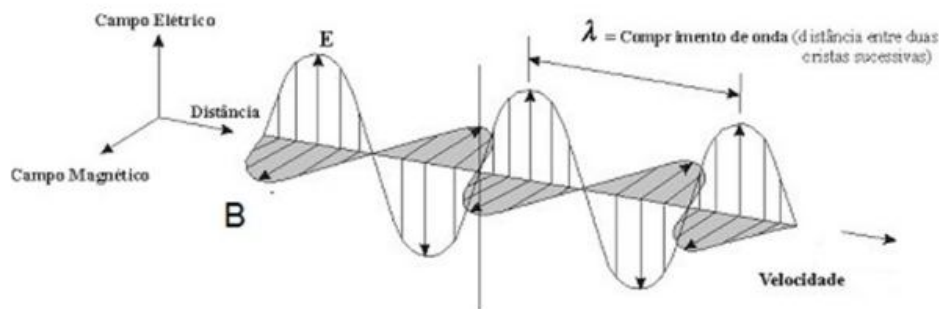
2.2 Tipos de onda

Em geral, na literatura, as ondas são classificadas em dois tipos¹, de acordo com seu meio de propagação, a saber: as Ondas Mecânicas, essas ondas são as mais conhecidas pois as encontramos constantemente no nosso dia a dia, como por exemplo, as ondas do mar, as ondas sonoras e as ondas sísmicas, essas ondas são governadas pelas leis newtonianas e existem apenas em um meio material, como a água, o ar ou as rochas; e as “Ondas Eletromagnéticas”, estas são menos conhecidas pela sociedade, no entanto, são as mais utilizadas no meio tecnológico, como por exemplo, as ondas de radiofrequência, a luz visível, a radiação infravermelha, a radiação ultravioleta, os raios X e os raios gama. Esses tipos de ondas não necessitam de um meio material para propagarem-se.

Há um caso muito interessante no espaço, que são as ondas luminosas provenientes das estrelas, elas atravessam o vácuo do espaço para chegar até nós na terra. Todas essas ondas, especialmente as eletromagnéticas, propagam-se com a mesma velocidade $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ (HALLYDAY, 2006, 2011) no vácuo.

Okuno (1982) também descreve as ondas eletromagnéticas como sendo uma radiação eletromagnética, formada por vetores campos elétricos ($\vec{E}$) e campos magnéticos ($\vec{B}$) oscilantes no tempo e no espaço e, cuja propagação se dá com velocidade constante (c) no vácuo (Figura 2). São exemplos deste tipo de onda, as ondas de rádio, ondas luminosas (luz), raios infravermelhos, raios ultravioleta, raios X e raios gama, que, segundo o contexto científico da Física, são nomenclaturas típicas do Espectro Eletromagnético.

Figura 2 - Propagação de uma onda eletromagnética



Fonte: < <http://slideplayer.com.br/slide/10126908/>>.

¹ Hallyday (2006, 2011) as classifica em três: Ondas Mecânicas, Ondas Eletromagnéticas e Ondas Gravitacionais, mas para o presente trabalho iremos abordar somente as duas primeiras, principalmente as Ondas Eletromagnéticas.

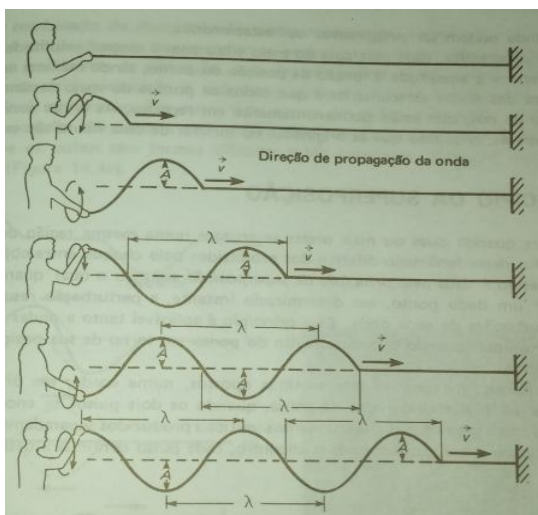
Como se pôde observar, na Figura 2, os campos elétrico e magnético são sempre perpendiculares um em relação ao outro e em relação à direção do movimento de onda - direção de propagação da onda (HEWITT, 2009, p. 290).

2.2.1 Ondas transversais e longitudinais

“Analisando a relação entre a direção da perturbação e a da propagação, as ondas podem ser classificadas em *transversais e longitudinais*” (OKUNO, 1982, p. 206, grifos do autor).

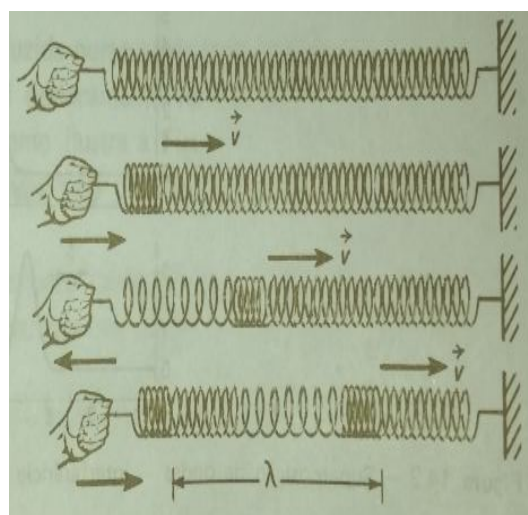
As ondas transversais ilustradas na Figura 3 possuem oscilações diferentes das ondas longitudinais, Figura 4. As ondas transversais segundo Hewitt (2009), possuem a direção das oscilações perpendicular à direção de propagação da onda, em um movimento lateral em ângulos retos.

Figura 3 - Onda transversal numa corda com uma das extremidades fixas



Fonte: Okuno (1982).

Figura 4 - Onda longitudinal numa mola Slinky com uma das extremidades fixas



Fonte: Okuno (1982).

As Ondas eletromagnéticas, conforme Okuno (1982), são consideradas como sendo ondas transversais, porque o movimento oscilatório daquelas se dá pelos campos elétrico e magnético em direções perpendicular à direção de propagação da onda. Já as longitudinais possuem direção de propagação paralela a direção da vibração produzida pela fonte (OKUNO, 1982), como por exemplo, as ondas sonoras nos fluídos, ...

2.3 Movimento ondulatório

A oscilação produzida pelas fontes (artificiais ou naturais) dão origem aos movimentos ondulatórios (BARRETO FILHO, 2013). Nesse caso, os meios possuem forças restauradoras que tendem a retornar o material ao seu estado normal (ou fundamental) de equilíbrio após cessar as forças externas (OKUNO, 1982).

2.3.1 Velocidade de propagação de uma onda

A velocidade de propagação de uma onda num meio (ou material), nada mais é que, a velocidade com que os pulsos da onda se propagam naquele meio (MÁXIMO, 2010). Essa propagação, segundo Okuno (1982), “depende, em geral, das características de elasticidade e da densidade do meio” (p. 213). Matematicamente, a velocidade de propagação de uma onda, é dada pelo produto da frequência (f) e do comprimento de onda (λ), logo a velocidade de propagação de uma onda é:

$$v = \lambda f \quad (1)$$

Onde a frequência é dada pelo o inverso do período, ou seja:

$$f = 1/T \quad (2)$$

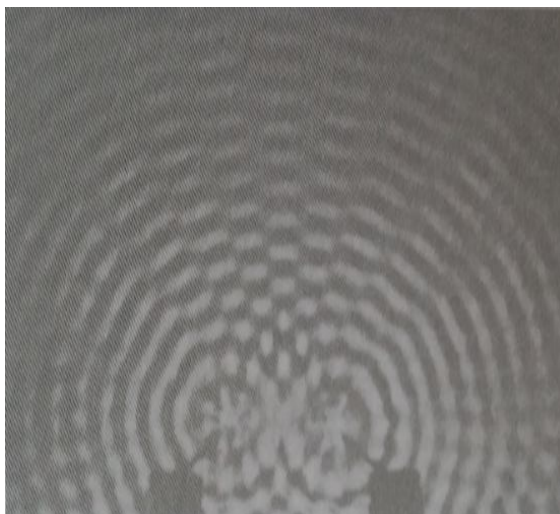
Para Máximo (2010), “o comprimento de onda λ é a distância que cada onda percorre durante um período T ” (p. 262), este é o tempo necessário para um corpo realizar um movimento periódico completo, como por exemplo, o movimento oscilatório realizado por um relógio de pêndulo. O período é dado pelo o inverso da f :

$$T = 1/f \quad (3)$$

2.4 Interferência

Uma característica importante do movimento ondulatório é o da interferência (ALONSO, 1972; HEWITT, 2009). Segundo Okuno (1982), “quando duas ou mais ondas passam por um dado ponto, em determinado instante, a perturbação resultante é a soma algébrica das perturbações de cada onda” (p. 208). Esse fenômeno denominamos de superposição de duas ou mais ondas.

Figura 5 - Interferência produzida pela superposição da duas ondas em fase se propagando na superfície da água

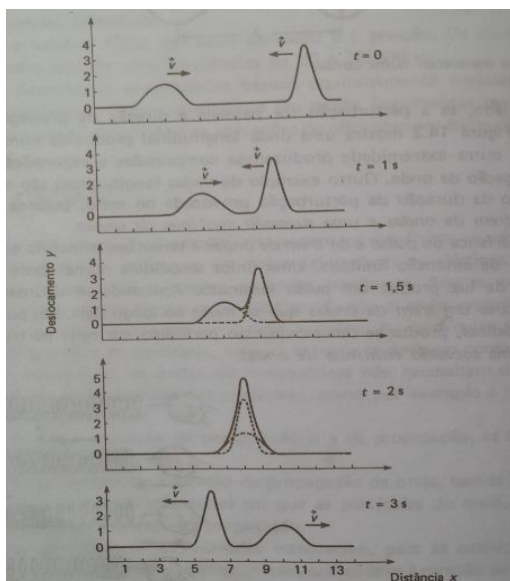


Fonte: Máximo (2010).

A Figura 5 ilustra um exemplo de interferência entre ondas mecânicas. Nesse aspecto, ressalta-se que a interferência se subdivide em construtiva e destrutiva.

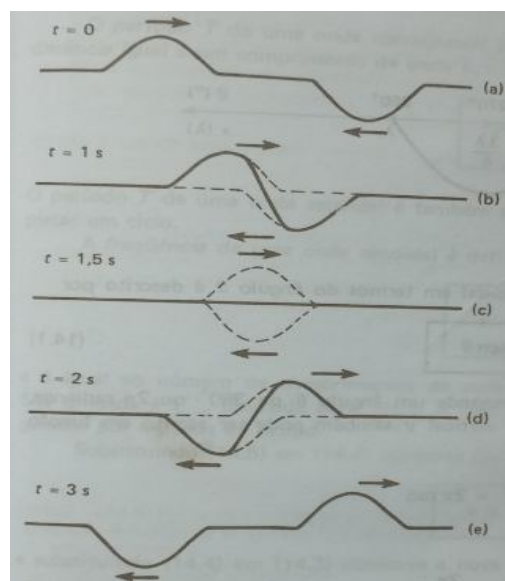
A interferência construtiva ocorre (ou surge) “quando o pulso resultante da superposição é maior que qualquer de seus componentes” (OKUNO, 1982, p. 209). Por outro lado, se um dos pulsos for invertido com relação ao outro, durante a superposição eles iram se anular. Essa interferência é chamada de destrutiva (OKUNO, 1982). Na Figura 6 temos um processo de interferência construtiva, enquanto que na Figura 7 temos um processo de interferência destrutiva.

Figura 6 - Configuração de uma interferência construtiva



Fonte: Okuno (1982).

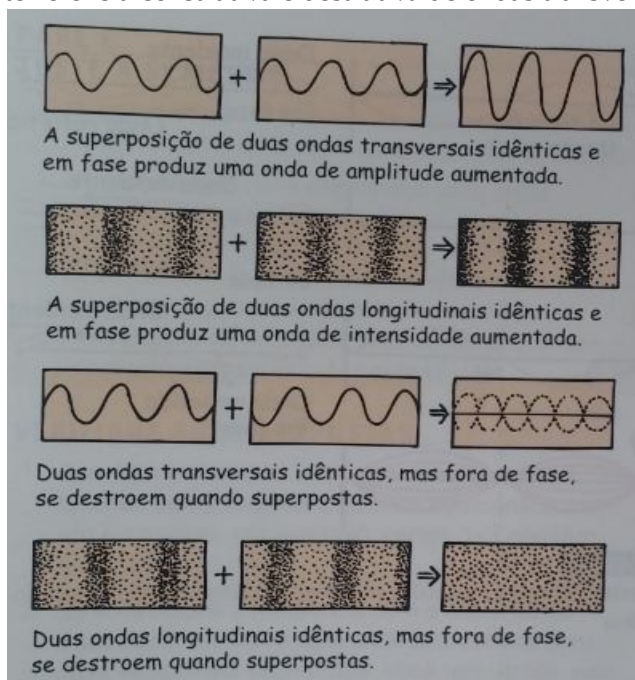
Figura 7 - Configuração de uma interferência destrutiva



Fonte: Okuno (1982).

Na figura (8) abaixo, são mostrados resultados de interferências de ondas transversais idênticas e em fase; ondas longitudinais com a mesma forma e tamanho e em fase; ondas transversais idênticas geometricamente, contudo fora de fase; e ondas longitudinais com o mesmo tamanho e com a mesma forma, contudo fora de fase (HEWITT, 2009).

Figura 8 - Interferência construtiva e destrutiva de ondas transversais e longitudinais



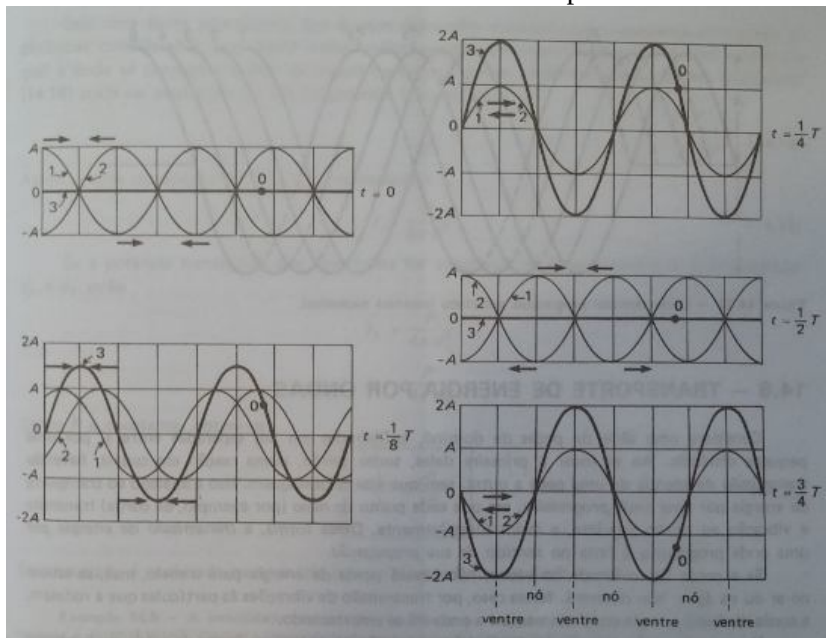
Fonte: Hewitt (2009).

2.5 Ondas estacionárias

A interferência possui uma característica interessante que é a constituição de “ondas estacionárias” (ALONSO, 1972; BARRETO FILHO, 2013; HALLYDAY, 2006, 2011; HEWITT, 2009; NUSSENZVEIG, 2002; OKUNO, 1982; SERWAY, 2009; TIPLER, 2000; YOUNG, 2008).

Ondas desse tipo se formam a partir de uma superposição (soma algébrica) produzida por duas ondas idênticas e com sentidos contrários, geralmente quando as ondas se encontram confinadas no espaço, por exemplo, ondas produzidas numa corda com uma das extremidades fixas. Ou ainda, segundo os fundamentos da mecânica, essas ondas se combinam consoante o princípio da interferência, a qual provoca uma forma de vibração estacionária, gerando, assim, uma onda estacionária (TIPLER, 2000). Esta pode ser, ainda, formada por “um padrão de oscilação que resulta de duas ondas que se propagam em sentidos opostos” (SERWAY, 2009, p. 483).

Figura 9 - Onda estacionária resultante da interferência ou superposição de duas ondas em diferentes instantes de tempo



Fonte: Okuno (1982).

A Figura 9 mostra três ondas senoidais, onde a onda 3 é formada pela interferência ou superposição das ondas 1 e 2, sendo estas as componentes incidente e refletida, as quais resultam na onda 3. Os instantes t mostrados na figura são: $t = 0$, $(1/8)T$,

$(1/4)T$, $(1/2)T$ e $(3/4)T$. Quando $t = T$, a forma da onda resultante, 3, retorna ao seu estado inicial, $t = 0$ (OKUNO, 1982). Matematicamente, ondas estacionárias são equacionadas, segundo o princípio da superposição ou da interferência, por:

$$y(x, t) = 2A \sin kx \cos \omega t \quad (4)$$

Em que o número de ondas k é a quantidade de comprimento de onda por unidade de distância $k = 1/\lambda$, ou:

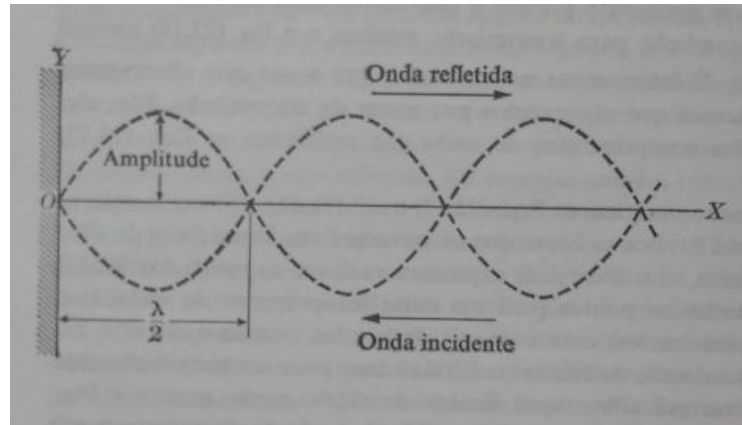
$$k = 2\pi/\lambda \quad (5)$$

e ωt é a função horária angular do Movimento Circular Uniforme (MCU, $\varphi = \varphi_0 + \omega t$ quando $\varphi_0 = 0$). Para $\varphi = 2\pi \text{ rad}$ e $t = T$ para uma volta completa, temos que a frequência angular ω , é dada pelo quociente da distância 2π e o (inverso do) período T :

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T \quad (6)$$

A equação (4) nos dá a soma algébrica ou superposição das ondas incidentes: $y = A_0 \sin(\omega t + kx)$, se propagando para a esquerda; e refletida: $y = A'_0 \sin(\omega t - kx)$, se propagando para a direita (ALONSO, 1972; HALLYDAY, 2006, 2011; NUSSENZVEIG, 2002; SERWAY, 2009; TIPLER, 2000; YOUNG, 2008).

Figura 10 - Onda estacionária resultante da interferência ou superposição de duas ondas incidente e refletida

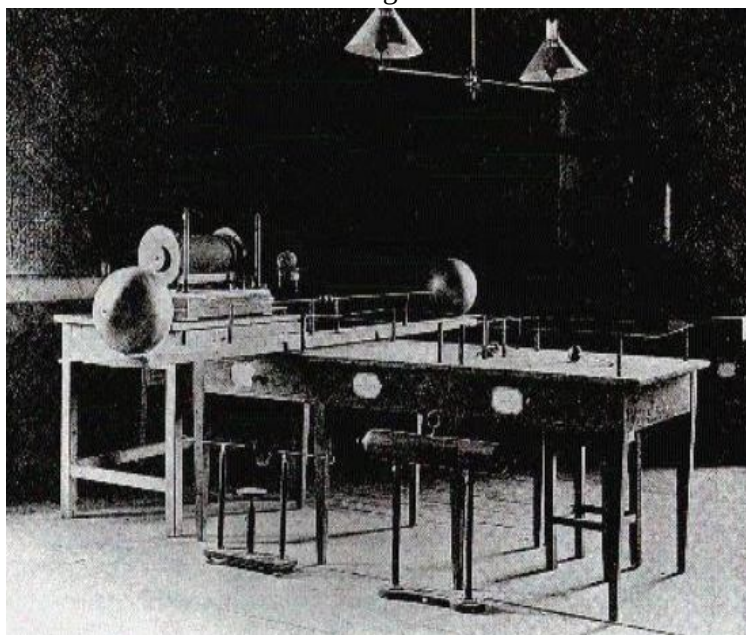


Fonte: Alonso (1972).

Além das ondas estacionárias, de um modo geral, há também as ondas estacionárias eletromagnéticas.

Alonso (1972) nos diz que essas ondas foram descobertas quase no final do século XIX, após as previsões de James C. Maxwell (1831-1879) sobre ondas eletromagnéticas e a velocidade de propagação dessas², por Heinrich Hertz através de experiências de interferência acerca da oscilação de ondas eletromagnéticas, usando para isso, um aparato experimental o qual é conhecido por “Oscilador de Hertz” (Figura 11).

Figura 11 - Oscilador de Heinrich Hertz (1857 - 1894) para produção de ondas eletromagnéticas



Fonte: Lima (2012).

Com essa verificação, Hertz, entre os anos de 1887 a 1888, detectou as ondas eletromagnéticas estacionárias na região de radiofrequências ao emitir pulsos eletromagnéticos no seu oscilador. Isso se deu à medida que Hertz estudava experimentalmente o valor de propagação das ondas eletromagnéticas, c .

Uma representação matemática que caracteriza as ondas estacionárias eletromagnéticas é:

$$E = 2E_0 \sin kx \sin \omega t \quad (7)$$

² $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \approx 3 \times 10^8 m.s^{-1}$, que equivale a velocidade da luz no vácuo (ALONSO, 1972).

para o campo elétrico resultante, e para o campo magnético resultante, temos:

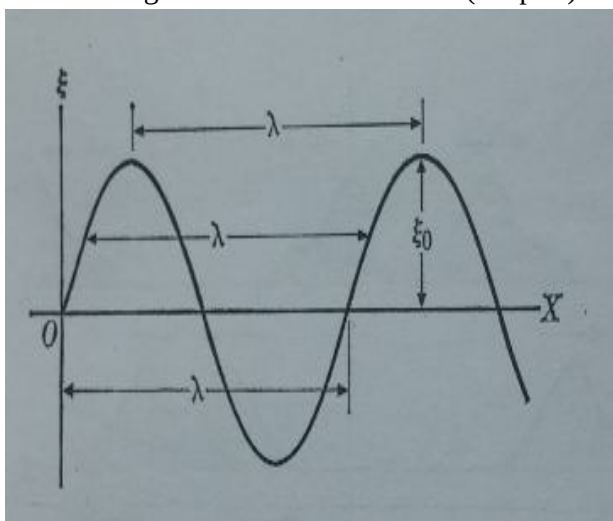
$$B = 2B_0 \cos kx \cos \omega t \quad (8)$$

onde $B_0 = E_0 k / \omega = E_0 / c$ são as amplitudes máximas dos campos elétrico (E) e campos magnéticos (B). As expressões equivalem a condição de ondas senoidais numa corda, com uma das extremidades presas (ALONSO, 1972).

2.6 Oscilador harmônico simples e equação da onda

Segundo Okuno (1982), uma oscilação harmônica “pode ser produzida numa corda longa movendo-se uma de suas extremidades para cima e para baixo, com igual deslocamento vertical” (p. 209), configurando, assim, ondas periódicas após algumas oscilações da corda. Essa configuração adquirida pela corda é representada algebricamente por uma função seno, que é chamada de função senoidal³. A Figura 12 nos mostra o comportamento de uma onda harmônica (simples).

Figura 12 - Onda harmônica (simples)



Fonte: Alonso (1972).

Young (2008), nos complementa que, “quando uma onda senoidal se propaga em um meio, cada partícula do meio executa um movimento harmônico simples com a mesma frequência” (p. 216). Esse tipo de onda é tido nos mais variados campos de estudo da Física,

³ (ALONSO, 1972; HALLYDAY, 2006, 2011; NUSSENZVEIG, 2002; OKUNO, 1982; SERWAY, 2009; TIPLER, 2000; YOUNG, 2008).

desde a Física Clássica, até à Mecânica Quântica. Além disso, Nussenzveig (2002) nos dá alguns exemplos de sistemas que utilizam ou que descrevem ondas senoidais, a saber: pêndulos, cordas de instrumentos musicais, diapásões, a corrente elétrica alternada (CA), oscilações da corrente em circuitos elétricos, outros.

Alguns conceitos matemáticos são necessários para ilustrar ou mostrar a função de onda, que descreve a posição de qualquer partícula em movimento oscilatório no meio em relação ao instante de tempo t ou do espaço-tempo (x, t) . Considerando-se ondas senoidais para as quais qualquer partícula executa um movimento ondulatório em torno de seu ponto de equilíbrio (YOUNG, 2008), a função senoidal ou harmônica é representada por:

$$y(x, t) = A \cos 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \quad (9)$$

para um deslocamento no sentido positivo do eixo x , neste caso na horizontal (HALLYDAY, 2006, 2011; NUSSENZVEIG, 2002; YOUNG, 2008). E

$$y(x, t) = A \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \quad (10)$$

No caso da partícula deslocar-se na vertical (ALONSO, 1972; OKUNO, 1982; SERWAY, 2009; TIPLER, 2000).

Substituindo λ definido pela equação (5) e T , definido por (6), nas equações (9) e (10), teremos, portanto:

$$y(x, t) = A \cos(kx - \omega t) \quad (11)$$

para um deslocamento horizontal, e

$$y(x, t) = A \sin(kx - \omega t) \quad (12)$$

para um deslocamento vertical. (ALONSO, 1972; HALLYDAY, 2006, 2011; OKUNO, 1982; SERWAY, 2009; TIPLER, 2000).

Segundo Hallyday (2006, 2011), quando uma onda percorre qualquer ponto de uma corda esticada, esse se moverá de forma perpendicular à direção de propagação da onda. Aplicando-se a Segunda lei de Newton para um elemento infinitesimal em movimento

oscilatório, podemos definir a equação diferencial, conhecida como equação de onda e que é dada por

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (13)$$

Sendo também representada pelos demais autores (ALONSO, 1972; HALLYDAY, 2006, 2011; NUSSENZVEIG, 2002; SERWAY, 2009; TIPLER, 2000; YOUNG, 2008). Essa é também chamada de “*equação diferencial do movimento ondulatório*” (ALONSO, 1972, p. 244, grifos do autor).

3 A NATUREZA DA LUZ

Esta seção tem por finalidade mostrar um pouco do percurso histórico da luz, quanto a sua natureza, se onda ou se partícula. A primeira foi abordada por alguns cientistas (Michael Faraday (1791-1867), Wilhelm E. Weber (1804-1891), R. Kohlrausch (1809-1858) James C. Maxwell (1831-1879), Heinrich R. Hertz (1857-1894)) como sendo um modelo eletromagnético (da luz), enquanto a segunda foi tida por outros cientistas (Isaac Newton (1643-1727), Albert Einstein (1879-1955)), como um modelo corpuscular (da luz).

Indaga-se que, é de suma relevância sabermos o aspecto físico da luz, neste caso, a sua natureza, para uma melhor compreensão de seu estudo na forma como fora definida por Maxwell, a natureza da luz possui um caráter ondulatório, dado por uma oscilação eletromagnética. Essas previsões foram posteriormente, confirmadas por Hertz na realização de seus experimentos sobre radiofrequência. Nesse estudo, as Ondas Eletromagnéticas - também chamadas de Radiações Eletromagnéticas - apresenta dentro de todo seu espectro eletromagnético comportamento dual, ou seja, ora onda, ora partícula.

3.1 A natureza da luz até o século XVII

Segundo Silva (2010a; 2010b), a luz era comparada antigamente, por algumas civilizações, a divindades. "Para os antigos hebreus, quem a fez foi **Deus**⁴, como é visto nas primeiras páginas do livro do Gênesis. [...] Somente com os Gregos, a luz passa a não mais ser vista sob esse aspecto, e ganha uma característica mais objetiva [...]." (SILVA, 2010a, p. 181; 2010b, p. 46, grifo nosso)

Barreto Filho (2013) e Larios (2016), nos mostra que os estudos ou hipóteses da filosofia grega sobre a natureza da luz, em relação a formação de imagem (SILVA, 2010a; 2010b), teve início nas escolas pitagórico-platonistas, em que "os seguidores de Pitágoras explicavam a visão supondo que o objeto emitia partículas que entravam no olho" (ARAGÃO, 2006, p. 85-86). Por outro lado, os defensores das ideias de Platão, "atribuíam a visão a uma interação tripla entre os raios emitidos pelo sol, o objeto e o olho" (ARAGÃO, 2006, p. 86). Essas ideias se embasavam na intuição da luz ser composta por partículas (SILVA, 2010a; 2010b).

⁴ "E fez Deus os dois grandes luminares: o luminar maior para governar o dia [- o sol], e o luminar menor para governar a noite [- a lua]; e fez as estrelas. E Deus os pôs a expansão dos céus para alumiar a terra, [...] e para fazer separação entre a luz e as trevas. E viu Deus que era bom" (Gênesis 1.16-18, grifos nosso).

Não só os pitagórico-platonistas, anteriormente citados, como também os filósofos atomistas, Leucipo (480-420 a.C.) e Demócrito (460-370 a.C.), “que entendiam [ser] a luz como átomos que se deslocavam no vazio, onde a visão era dada pelo fluxo de partículas emitidas pelo objeto e assimiladas pelos olhos, *uma formação de imagem totalmente sensorial*” (LARIOS, 2016, p. 17, grifos nosso). Em relação a esse tipo de formação (de imagem), Silva (2010a; 2010b) nos complementa que, “os objetos emitiam átomos, que formavam uma imagem dos objetos, percebida, posteriormente, pelos órgãos da visão para formar, por fim, a imagem” (p. 182 apud García et al., 2007).

Neste percurso histórico, pode-se citar ainda as ideias de Aristóteles (384-322 a.C.) (LARIOS, 2016; ROCHA, 2011; SILVA, 2010a; 2010b), que acreditava que a luz fosse gerada de uma atividade num dado meio, que segundo SILVA (2010a) era chamado de éter. Aristóteles comparava a luz à natureza vibratória do som emitido pela boca no ar ou sobre um dado corpo ou objeto, “cuja vibração provocaria o movimento de humores presentes nos olhos” (SILVA, 2010a, p. 182-183 apud ROCHA, 2002).

Por volta de 1038 o físico e matemático árabe Al-Hazen “escreveu a primeira obra sobre óptica, depois de Ptolomeu, com alguns progressos em relação a este, sendo a única obra árabe sobre óptica” (ARAGÃO, 2006, p. 86). Al-Hazen acreditava que o olho humano enxergava o corpo ou objeto de modo diferente conforme a incidência dos raios de luz sobre os olhos, rejeitando, assim, a concepção visual proposta pelos gregos.

Além das hipóteses apresentadas pelos filósofos gregos e árabes, também merecem ser citadas as contribuições de Leonardo da Vinci (1452-1519) (MÁXIMO, 2010). Segundo Máximo (2010), Da Vinci acreditava na possibilidade de haver uma certa semelhança entre a reflexão da luz e o fenômeno do eco, que hipoteticamente, a luz, assim como o som, poderia ser um tipo de movimento ondulatório. Ou seja, possuindo os mesmos estados característicos de uma onda (ondulatória).

Perceba que nessa época, o que predominava era a questão de enxergar os objetos devido a incidência das ondas de luz, que nesse aspecto são ondas luminosas, sobre os nossos olhos, que no mesmo instante da percepção da luz visualizava-se as formas dos objetos; princípios da ótica humana (visão).

3.2 A natureza da luz a partir do século XVII até o início do século XX

Em contrapartida às ideias anteriormente apresentadas, até o século XVII, havia-se pouca relevância ou argumentos para explicar com clareza a natureza (ou os aspectos

físicos) da luz. Esta, por vez, ganhou força no decorrer do século XVII ao século XIX com as descobertas científicas sobre os fenômenos ópticos da luz no meio material.

Os autores Larios (2016), Lima (2012), Rocha (2011) e Silva (2010b), ..., nos afirmam que, algumas dessas descobertas devem-se ao filósofo francês René Descartes (1596-1650), que afirmara ser a natureza da luz um problema científico a sustentando como sendo uma tendência natural ao movimento ou pressão e que se propaga com velocidade infinita (SILVA, 2010b apud BASSALO, 1986; PIETROCOLA, 1993). Lima (2012), ainda nos fala que Descartes

formulou uma hipótese mecânica para explicar todo o universo, baseada nos turbilhões de um éter, que transmitiria os movimentos, acoplando mecanicamente os corpos celestes. Segundo ele, a luz seria uma pressão estática produzida pelo éter ou ar sutil e transmitida instantaneamente até o observador, entrando via nervo ótico. A pressão do éter estimularia o nervo ótico, que a transmitiria ao cérebro, onde seria interpretada pela alma. De acordo com Descartes, qualquer centro de turbilhão no universo emite luz, haja um astro nele ou não. Isso explicaria a luz proveniente do Sol [...] Descartes relança, portanto, a ideia aristotélica da luz como perturbação de um meio (p. 46).

Houve um grande embate sobre a natureza da luz, se onda ou partícula. Acerca dela ser onda, o holandês Christiaan Huygens (1629-1695) (Figura 13), ao reforçar “a hipótese ondulatória, proposta anteriormente por Hooke⁵” (SILVA, 2010b, p. 51), propôs o **Modelo ondulatório da luz** afirmando que, “a natureza da luz não seria material, mas estaria relacionada às perturbações do meio entre a fonte de luz e o observador” (BARRETO FILHO, 2013, p. 207).

⁵ Hooke afirmara que a “emissão da luz por parte de um corpo luminoso, constituía um movimento vibratório rápido, [...] e como resultado cada partícula enviava pulsações que se expandem rapidamente e com igual velocidade, em todas as direções” (ARAGÃO, 2006, p. 88).

Figura 13 - Christiaan Huygens (1629-1695)



Fonte: <http://www.wikiwand.com/pt/Christiaan_Huygens>.

Em relação ao caráter de partícula, destacam-se as hipóteses do físico inglês Isaac Newton (Figura 14), que a caracterizou em termos de um **Modelo corpuscular**. Durante o século XVIII, Newton se tornou um dos grandes estudiosos da Física Clássica a dar evidências sobre a natureza da luz ao estudar assuntos relacionados à Óptica.

Newton afirmou “ser a luz constituída por partícula[s] que, ao ser[em] emitida[s] por uma fonte luminosa, se propaga[m] no espaço com grande velocidade e em linha reta” (BARRETO FILHO, 2013, p. 206, grifos nosso). Para ele, a luz era, segundo Lima (2012, p. 51), um “fluxo de corpúsculos, baseando-se no fato de ser parcialmente refletida e parcialmente refratada, por um sistema de ajustes de reflexão e ajustes de refração. Tais ajustes eram causados [...] pela vibração dos corpúsculos ao serem ejetados pela força emissora” (BARRETO FILHO, 2013; MÁXIMO, 2010; LARIOS, 2016; LIMA, 2012; ROCHA, 2011; TIPLER, 2013; outros).

Figura 14 - Sir Isaac Newton (1643-1727)



Fonte: <<https://www.britannica.com/biography/Isaac-Newton>>.

No entanto, existe controvérsias de que os modelos corpusculares e ondulatórios concentram-se em dois grandes fenômenos, o da difração⁶ e o da interferência. Newton, devido ao seu grande mérito e autoridade adquirida na comunidade científica ao publicar seu “Livro *Principias*”, contribuiu fortemente para que fosse tida uma interpretação mecânica da luz baseada em corpúsculos.

Com a morte de Huygens, as ideias do modelo ondulatório ficaram, praticamente, esquecidas durante o século XVIII (SILVA, 2010b). Na metade do século XVIII, com o crescente desenvolvimento da Óptica, Leonard Euler (1707-1783), ao desenvolver seus trabalhos físico-matemáticos, constatou que o modelo corpuscular proposto por Newton apresentava problemas quanto a massa, volume, força dos corpos para refletir e refratar, conceito de inflexão, etc., estimulando o ressurgimento do modelo ondulatório da luz consoante a teoria proposta por Huygens (LARIOS, 2016, apud MOURA, 2015).

Nesse aspecto, o cientista inglês

Thomas Young (1773-1829) no ano de 1801 demonstrou que ondas de luz possuem superposição, interferindo uma na outra, o experimento que Young usou é muito famoso e conhecido como “experimento da dupla fenda de Young”⁷, onde a luz

⁶ O fenômeno da difração fora estudado por Thomas Young em 1803, esse fenômeno é uma característica que as ondas luminosas possuem ao contornar obstáculos ao longo de sua trajetória ou ao formarem imagens ao passarem por um ou mais orifícios ou fendas quando interrompidas por estes. “A difração foi considerada [...] como uma evidência conclusiva a favor da teoria ondulatória” (ARAGÃO, 2006, p. 89) de Christiaan Huygens.

⁷ “Esta experiência permitiu conhecer-se que a interferência em óptica, se dá basicamente no princípio da sobreposição linear de campos eletromagnéticos, o que concorreu para confirmar a teoria ondulatória [da luz]” (ARAGÃO, 2006, p. 92).

solar passa por um pequeno orifício de uma chapa opaca, incidindo em outra placa com dois orifícios, assim a luz passava pela segunda placa gerando uma rede de difração (LARIOS, 2016, p. 19).

Figura 15 - Thomas Young (1773-1829)



Fonte: <<https://cientistadigital.wordpress.com/2012/05/19/minha-trajetoria-de-vidathomas-young/>>.

A experiência do Dr. Thomas Young, segundo Silva (2010b), deu uma desestruturada no modelo corpuscular de Newton, ao provar que uma partícula não sofre interferência. Com isso, os experimentos realizados por Young, o levaram a concluir que,

se a luz fosse constituída por corpúsculos emitidos pelos corpos luminosos deveria depender da fonte de luz. E se a velocidade da luz dependesse da fonte luminosa, a luz sofreria diferentes refrações conforme a fonte que a emitisse, mas isso não ocorre, concluindo então que a velocidade de uma onda depende do meio de propagação (LIMA 2012, p. 73 apud FRANCO, 2012).

Além de Leonard Euler e Thomas Young, também tivemos as contribuições do cientista e engenheiro Augustin Fresnel (1788-1827) (Figura 16), que definiu a irradiação da luz como de vibrações de um fluido infinitamente sutil. Fresnel generalizou o princípio de Huygens passando a contestar a teoria corpuscular de Newton (LIMA, 2012). Tipler (2013) nos complementa que Fresnel realizou experimentos envolvendo os fenômenos da interferência e da difração, além disso, incorporou uma base matemática para a teoria ondulatória.

Figura 16 - Augustin Fresnel (1788-1827)



Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Augustin-Jean_Fresnel>.

Consoante às observações feitas por Euler, Young e Fresnel sobre o modelo ondulatório da luz, o modelo corpuscular, que Newton havia proposto foi refutado (LARIOS, 2016; LIMA, 2012) por haver conclusões incertas quanto aos seus resultados experimentais (MÁXIMO, 2010). Newton afirmara que a velocidade da luz na água (ou num meio mais denso) era maior do que no ar, essa refutação foi, experimentalmente, descoberta pelos físicos franceses Armand H. Louis Fizeau⁸ (1819-1896) (ARAGÃO, 2006; ROCHA, 2011) e Jean Bernard Foucault (1819-1868) (ARAGÃO, 2006; LARIOS, 2016; MÁXIMO, 2010), que entre os anos de 1849 a 1850, “em experiências distintas, mediram a velocidade da luz no ar e na água, e acharam que *a velocidade da luz era, na água, menor do que no ar*”, confirmando, mais uma vez, as previsões da teoria ondulatória [da luz]” (ROCHA, 2011, p. 242, grifos nosso). Colocando, de tal modo, a teoria corpuscular de Newton na penumbra por algum tempo.

Em estudos paralelos ao de Óptica,

desenvolvia-se o ramo da Eletricidade. Desde as últimas décadas do Século XVIII, a Eletricidade despertou grande interesse nos pesquisadores. A analogia com a Teoria da Gravitação Universal proposta por Isaac Newton sugeria que a interação elétrica decaísse com o quadrado da distância à fonte. [...] Em 1819, o dinamarquês Christian Oersted observou que uma carga elétrica em movimento gerava campo magnético e, em 1831, o inglês Michel Faraday revelava que um fluxo magnético

⁸ “Fizeau tinha-se dedicado anteriormente ao estudo da fotografia do Sol, das interferências luminosas, entre outros domínios da ciência” (ARAGÃO, 2006, p. 92).

⁹ Segundo Aragão (2006, p. 93), foi verificado por Foucault em 1850, que os estudos realizados por esse cientista foram de suma importância para a unificação da teoria ondulatória da luz naquela época.

variável gerava um campo elétrico. Aos poucos, foram nascendo as equações fundamentais do eletromagnetismo (SILVA, 2007, p. 156).

Até meados do século XIX, as investigações sobre a natureza da luz, se onda ou se partícula, avançaram de maneira qualitativa e quantitativa de modo que, Maxwell demonstrou, por meio da teoria eletromagnética, que a luz era, sem sombra de dúvidas, uma onda eletromagnética¹⁰.

Figura 17 - James C. Maxwell (1831-1879)



Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell>.

Conforme as fundamentações apontadas por Maxwell,

as ondas eletromagnéticas são [perturbações] que se [propagam] no meio. São geradas a partir de oscilações nos campos elétricos e magnéticos. Os campos elétricos e magnéticos obedecem aos princípios da superposição. Sendo assim, seus vetores cruzam-se e criam os fenômenos da refração¹¹ e difração. Uma onda eletromagnética pode interagir com a matéria e, em particular, interagir com átomos e moléculas que as absorvem, podendo os mesmos emitir ondas em outra parte do espectro. Assim, como qualquer fenômeno ondulatório, as ondas eletromagnéticas podem interferir entre si. Sendo a luz uma oscilação, ela não é afetada pela estática elétrica ou campos magnéticos de outra onda eletromagnética no vácuo. Maxwell afirmava então, que perturbações eletromagnéticas geradas numa dada região deveriam propagar-se pelo espaço à velocidade da luz, exibindo também o caráter ondulatório típico da propagação luminosa. (LIMA, 2012, p. 78-79)

¹⁰ (ARAGÃO, 2006; CHESMAN, 2004; LARIOS, 2016; LIMA, 2012; NUSSENZVEIG, 1998; ROCHA, 2011; SILVA, 2007; SILVA, 2010b; TIPLER, 2013; YOUNG, 2009).

¹¹ Refração é um fenômeno óptico em que a luz é transmitida de um meio para outro diferente daquele, sofrendo mudança na sua propagação.

Os resultados obtidos por Maxwell não eram tão condizentes assim, até serem confirmados experimentalmente, pelo físico alemão Heinrich Hertz (1857-1894)¹², que conseguiu comprovar que a luz é, uma onda eletromagnética, por meio de sua produção e detecção.

Figura 18 - Heinrich Hertz (1857-1894)



Fonte: <<http://electricidadgenesisbiof2.blogspot.com.br/2013/03/breve-cronologia-de-la-electricidad.html>>.

Em seus experimentos, Hertz não só buscava dar evidências ao caráter ondulatório de as ondas eletromagnéticas como o proposto por Maxwell para a natureza da luz, como também buscava evidenciar suas características quanto a sua propagação, velocidade, frequências, comprimentos de onda, etc., através de sua produção e detecção. No entanto, em seus estudos, Hertz acabou evidenciando também que além de as ondas eletromagnéticas possuírem um caráter ondulatório, as mesmas mostraram possuir um caráter corpuscular, que segundo a literatura fora chamado por ele de **Efeito fotoelétrico**¹³ (ALONSO, 2015; ARAGÃO, 2006; CHESMAN, 2004; EISBERG, 1979; NUSSENZVEIG, 1998; ROCHA, 2011; TIPLER, 2010; YOUNG, 2009; outros), este efeito veio contribuir posteriormente com o ressurgimento da teoria corpuscular da natureza da luz (NUSSENZVEIG, 1998).

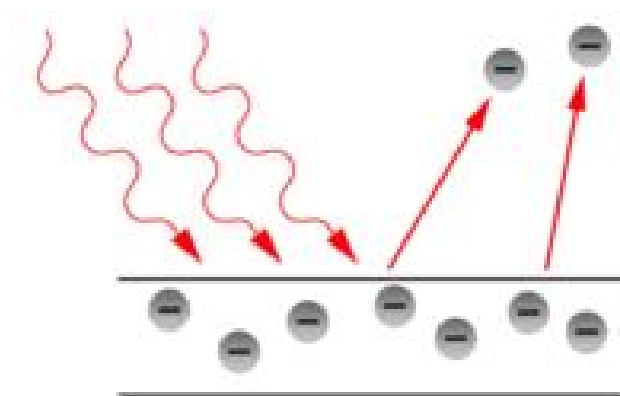
O efeito fotoelétrico de acordo com Alonso (2015), Hewitt (2011), ... é produzido ou gerado pela retirada de elétrons da superfície metálica dos eletrodos ao serem atingidos(as) pelas radiações eletromagnéticas como mostra a Figura 19. Estas radiações, por vez, são

¹² (ALONSO, 2015; LARIOS, 2016 apud SILVA, 2007b; LIMA, 2012; NUSSENZVEIG, 1998; ROCHA, 2011; SILVA, 2010b; YOUNG, 2009).

¹³ Segundo Tipler (2010), Hertz chegou a interromper suas análises (ou verificações) experimentais para poder se dedicar por quase um semestre a sua mais nova descoberta “o efeito fotoelétrico”.

geradas pelos campos elétricos e magnéticos, que oscilam e se propagam com a velocidade da luz (c), constante no vácuo (OKUNO, 1982). Alguns autores (ALONSO, 2015; EISBERG, 1979; NUSSENZVEIG, 1998; ROCHA, 2011; outros) nos falam que, o efeito fotoelétrico só é facilmente percebido quando incidimos radiação ultravioleta sobre as superfícies metálicas dos eletrodos. Isso foi verificado experimentalmente pelo físico alemão Philipp Eduard Anton von Lenard (1862-1947) (CHESMAN, 2004; EISBERG, 1979; NUSSENZVEIG, 1998; TIPLER, 2010; YOUNG, 2009), que era aluno de Hertz. P. Lenard, em 1900, comprovou "que a luz ultravioleta facilita a descarga ao fazer com que elétrons sejam emitidos da superfície do catodo" (EISBERG, 1979, p. 51).

Figura 19 - Efeito fotoelétrico



Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_fotoel%C3%A9trico>.

Em 1900, surge novas questões para o fenômeno de incandescência dos corpos aquecidos, os “quanta” de Max Planck (1858-1947), este ao determinar a energia de um quantum de luz E , dado pelo produto da frequência f vezes uma constante h de proporcionalidade (hoje conhecida como constante de Planck), ou seja:

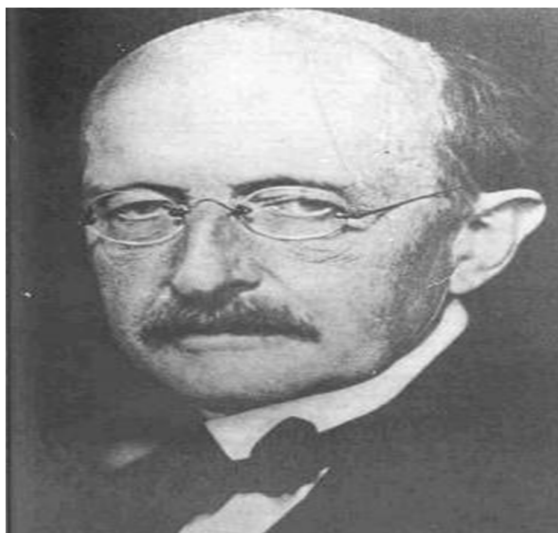
$$E = hf \quad (14)$$

Verificou-se então que a emissão e a absorção das radiações através dos “quanta” de energia, possuem a mesma explicação para a situação de a energia não ser uniformemente distribuída na onda mas sim concentrada em partículas de conteúdo finito. Isso, culminou ao abandono de linhas de pensamento sobre a teoria eletromagnética quanto a sua distribuição contínua de

energia radiante, resultando numa aproximação à teoria corpuscular de Newton (ARAGÃO, 2006).

Esse fenômeno observado por Planck colocou em pleno declínio os estudos realizados anteriormente para o modelo ondulatório da luz, “levando a Física, chamada clássica, a uma profunda [...]” (ROCHA, 2011, p. 243) estagnação de suas linhas de pesquisas.

Figura 20 - Max Planck (1858-1947)



Fonte: <<http://www.angelfire.com/folk/infidel/MaxPlanck.html>>.

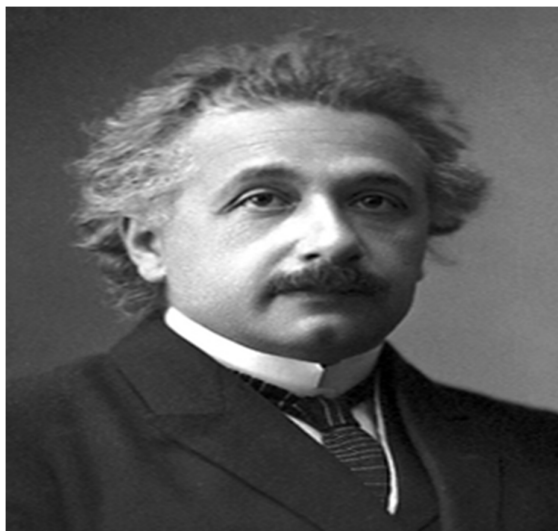
Em 1905, o físico alemão Albert Einstein (1879-1955), para explicar ou fundamentar o efeito fotoelétrico, utilizou-se das hipóteses de Max Planck sobre a radiação do corpo negro¹⁴ “propondo uma nova teoria corpuscular, segundo a qual a luz seria constituída por glóbulos ou ‘partículas’ de energia (ou *quanta* de energia)”¹⁵ (ROCHA, 2011, p. 243, grifo do autor).¹⁶ “Segundo Einstein, *a quantização da energia usada por Planck no problema do corpo negro era, na verdade, uma característica universal da luz*” (TIPLER, 2010, p. 81, grifos do autor).

¹⁴ “Porém o estudo sobre a radiação de corpo negro se iniciou por Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) em 1859, ele considerou que o corpo negro ideal é uma cavidade com um pequeno orifício, por onde seria emitido radiação eletromagnética” (LARIOS, 2016, p. 21).

¹⁵ “Essa hipótese, que propunha um caráter corpuscular para a natureza da luz, foi verificada experimentalmente pelo físico americano Robert Millikan (1868-1953)” (BARRETO FILHO, 2013, p. 207). Que segundo Silva (2010b), tais hipóteses levantadas por Albert Einstein, quanto a adoção da teoria corpuscular de Newton para explicar o efeito fotoelétrico descoberto por Hertz, foram submetidas, em 1916, a análises experimentais pelo físico Robert Millikan.

¹⁶ (ALONSO, 2015; ARAGÃO, 2006; BARRETO FILHO, 2013; CHESMAN, 2004; EISBERG, 1979; NUSSENZVEIG, 1998; ROCHA, 2011; TIPLER, 2010, 2013; SILVA, 2010b; YOUNG, 2009; outros).

Figura 21 - Albert Einstein (1879-1955)



Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein>.

Como foi dito anteriormente, Planck restringiu seus estudos de quantização de energia aos estudos de elétrons nas camadas de um corpo negro. Ele acreditava na hipótese de a energia eletromagnética, no espaço, possuir o mesmo espalhamento (propagação) das ondas mecânicas, estas, ao se espalharem sobre a superfície da água. Ao contrário de Planck, Einstein idealizou que a energia radiante estivesse quantizada em pacotes concentrados, que mais tarde vieram a ser chamados **fótons** (EISBERG, 1979).

Hoje, a palavra fóton é usada para designar um “quantum” de radiação eletromagnética para qualquer comprimento de onda (ROCHA, 2011). Nesse aspecto, a luz pode ser interpretada como sendo um pacote de energia que, ao interagir com a matéria, apresenta dois aspectos: o de partícula (GREF, 2007), que é o mesmo do efeito fotoelétrico, explicado por Einstein (ROCHA, 2011); e o de onda (GREF, 2007), “quando se trata, por exemplo, da experiência da dupla fenda de Young, produzindo um fenômeno de interferência” (ROCHA, 2011, p. 244). Esses dois modelos, partícula¹⁷ ou onda, fazem parte do Modelo Quântico de luz, que, por vez, recebem o nome de dualidade onda-partícula (GREF, 2007).

¹⁷ Arthur H. Compton (1892-1962) em 1923, “confirmou a natureza corpuscular da luz, a partir de estudos com raios X. Compton observou que na interação do feixe de raios X com a matéria, gerava transferência de energia para os elétrons e ocorria o espalhamento, havendo então uma diminuição da energia do fóton de raios X e da sua frequência, e consequentemente aumento do comprimento de onda” (LIMA, 2012, p. 98). Compton, ao interpretar os dados obtidos experimentalmente por Einstein, em 1905, postulou “que o feixe de raio X era um conjunto de fóton, cada um com energia [$E = hf$], e que esses fótons colidiam com os elétrons livres do material da mesma forma que bolas de bilhar, enfatizando assim, a natureza corpuscular da luz” (LIMA, 2012, p. 98, grifos nosso).

A dualidade onda-partícula foi estudada pelo físico francês Louis de Broglie (1892-1987) (Figura 22), por volta de 1924. Em seus estudos, de Broglie alongou esse fundamento da dualidade dos corpúsculos luminosos para os corpúsculos materiais.

Para Broglie, a coexistência do fóton e da onda eletromagnética é apenas um caso particular do dualismo geral onda-partícula, em que a onda eletromagnética não é mais do que a onda do fóton. Broglie defendia que a dualidade onda-partícula existia tanto na mecânica como na óptica (fóton), ou seja, as partículas também tinham caráter ondulatório (ARAGÃO, 2006, p. 94).

A hipótese de de Broglie foi confirmada em 1927, por meio de experimentos envolvendo a difração de elétrons¹⁸ realizada pelos cientistas Clinton J. Davisson (1881-1958) e Lester H. Germer (1896-1971), essa experiência é semelhante ao experimento de difração de raios X em cristais¹⁹ (ROCHA, 2011).

Figura 22 - Louis de Broglie (1892-1987)

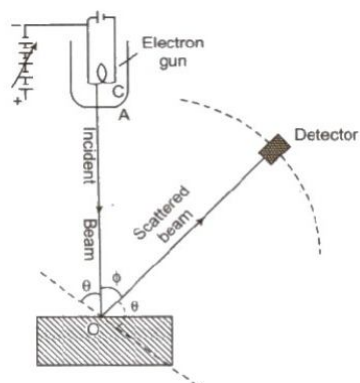


Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Louis_de_Broglie>.

¹⁸ Vide Hewitt (2011, p. 350-351), Rocha (2011, p. 244-246).

¹⁹ Vide Young (v. 4, 2009, p. 124-126), Nussenzveig (v. 4, 1998, p. 122-128).

Figura 23 - Clinton J. Davisson (1881-1958) e Lester H. Germer (1896-1971)



(a) - Aparato experimental



(b) - Físicos Davisson-Gemer

Fonte: <<https://schools.aglasem.com/51462>>.

Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Lester_Germer>.

Os físicos C. Davisson e L. Germer, Figura 23(b), por meio da experiência a qual realizaram, Figura 23(a), comprovaram “que os elétrons apresentam propriedades corpusculares (de partículas) e propriedades ondulatórias” (ROCHA, 2011, p. 329).

4 RADIAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS NÃO-IONIZANTES

4.1 Ondas Eletromagnéticas

Como foi mencionado anteriormente na Seção 3, por vários anos filósofos e cientistas da física argumentaram sobre a natureza da luz, se onda segundo a propositura de Huygens, confirmada experimentalmente anos depois por Young, ou se partícula como o proposto por Newton, modelo posteriormente retomado por Albert Einstein para explicar o fenômeno do efeito fotoelétrico, que consiste na liberação de fótons.

Só por volta de 1863 a 1864 que Maxwell, apoiado nas leis experimentais de Coulomb, Ampère e Faraday e de seus próprios conceitos teóricos (conhecidos, hoje, por *equações de Maxwell*²⁰) (MÁXIMO, 2010), previu teoricamente a luz possuir uma natureza ondulatória de caráter eletromagnético. Maxwell também experimentou para suas hipóteses que o espectro visível, como também as demais radiações eletromagnéticas, são ondas constituídas por campos elétricos e magnéticos, que se irradiam no meio independentemente da interação com a matéria.

Anos mais tarde, após o falecimento de Maxwell (em 5 de novembro de 1879, Cambridge)²¹, coube a Hertz entre os anos de 1886 a 1887 comprová-las experimentalmente por meio de seus estudos de radiofrequência em circuitos oscilantes. Hertz se fundamentou em resultados experimentais que ele mesmo obtivera em 1887, afirmando a existência das ondas eletromagnéticas preditas anteriormente por Maxwell através de sua produção e detecção (NUSSENZVEIG, 1997). E concluiu que:

*As experiências descritas me parecem em alto grau adequadas para remover as dúvidas sobre a identidade entre a luz, a radiação térmica e as ondas eletromagnéticas*²²

Hoje, as ondas eletromagnéticas (hertzianas) exercem um papel fundamental em nosso dia a dia, seja na ciência, seja na tecnologia, seja em qualquer meio que as utilize.

Segundo Guimarães (2013), as ondas eletromagnéticas são, praticamente constituídas por, um campo magnético perpendicular a um campo elétrico. Ainda pode-se

²⁰ Há teorias que expressam as Equações de Maxwell como uma generalização das leis de Gauss para o campos elétrico e magnético, da lei de indução de Faraday e da lei de Ampère.

²¹ Fonte: <<http://www.portalsaofrancisco.com.br/biografias/james-clerk-maxwell>>.

²² (NUSSENZVEIG, 1997, p. 298; ROCHA, 2011, p. 264).

afirmar que o distúrbio formado pela propagação de campos elétrico e magnético, chama-se onda eletromagnética (Máximo, 2010).

Como as ondas eletromagnéticas são geradas?

Com base na fundamentações de Máximo (2010), pode-se dizer que

[...] se um campo magnético, existente em uma certa região do espaço, sofrer variação no decorrer do tempo, esta variação faz aparecer, nesta região, um campo elétrico induzido. Este fato constitui um dos princípios básicos do Eletromagnetismo e fica claro, então, que um campo elétrico pode ser produzido não só por cargas elétricas em repouso [...], mas também por um campo magnético variável.

[...]

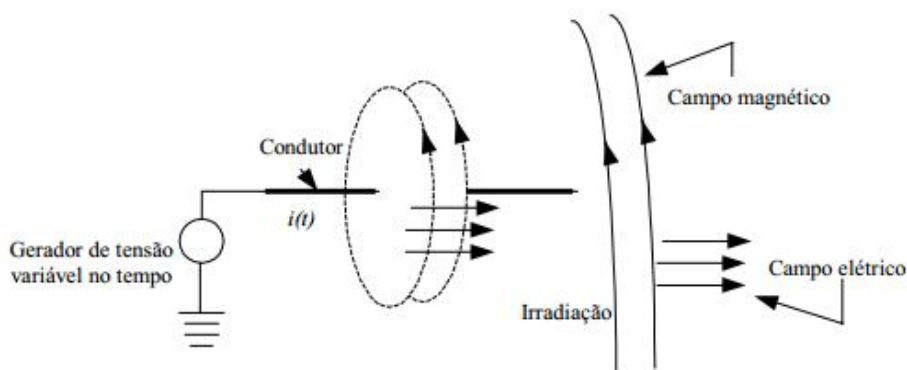
Analisando os fatos que acabamos de descrever, Maxwell teve a ideia de que, talvez, o fenômeno inverso fosse verdadeiro. Em outras palavras, lançou a hipótese de que *um campo elétrico variável pudesse dar origem a um campo magnético* [através do processo da indução].

[...]

Portanto, de acordo com as ideias lançadas por Maxwell, um campo magnético [pode] ser produzido não só por uma corrente elétrica (cargas elétricas em movimento), como também por um campo elétrico variável (p. 290-291, grifos do autor; grifos nosso).

Nesse caso, o fenômeno é autossustentado, ou seja, a onda se propaga (NUSSENZVEIG, 1997).

Figura 24 - Geração de onda eletromagnética a partir de um condutor conduzindo corrente variável no tempo



Fonte: Scudeler (2005).

A partir da Figura 24, subentende-se que as ondas eletromagnéticas se baseiam numa superposição de variação temporal dos campos elétrico e magnético perpendiculares entre si e à velocidade de propagação da onda. De modo que, para produzirmos uma onda eletromagnética faz-se necessário obtermos uma variação temporal dos campos elétrico e

magnético (CHESMAN, 2004). Essa variação temporal dos campos elétrico e magnético, Maxwell a denominou de “corrente de deslocamento” (ROCHA, 2011), que “equivale” ao movimento de cargas, mas não há movimento de cargas. Por exemplo, em um capacitor não há elétrons atravessando o dielétrico e, no entanto, a “corrente passa” pelo capacitor até que ele se carregue totalmente.

Perceba que ao falarmos, de um modo geral, em cargas se movimentando, referimo-nos a elétrons livres em movimento acelerado em um condutor, que neste caso é dado pela perturbação produzida pela corrente elétrica variável no tempo se deslocando após ser submetido a uma diferença de potencial (ddp), passando de um estado de repouso a outro sobre efeitos eletromagnéticos, que é recorrente aos efeitos da indução eletromagnética conforme seja um ímã ou um circuito oscilante (NUSSENZVEIG, 1997).

Segundo Young (2009) uma das formas de produzir uma onda eletromagnética, também, é fazer com que uma carga puntiforme oscile formando um “movimento harmônico simples, de maneira que ela possua uma aceleração em quase todos os pontos de sua trajetória” (YOUNG, 2009, p. 379). Portanto, uma carga acelerada nessas condições irradia energia eletromagnética (ALONSO, 1972), que denominamos de ondas eletromagnéticas.

4.1.1 Velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas

Consoante ao contexto científico, Maxwell ao prever o fenômeno das ondas eletromagnéticas para o modelo ondulatório da luz através de suas equações matemáticas – conhecidas como Equações de Maxwell - caracterizou a natureza da luz como sendo eletromagnética (ROCHA, 2011), mas para isso, ele comparou seus resultados aos obtidos por outros cientistas, tais como: Fizeau, em 1849; e Foucault, em 1850, para a velocidade da luz no ar e para os experimentos eletromagnéticos de Friedrich Wilhelm Georg Kolhraush (1840-1910) e Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) (NUSSENZVEIG, 1997; ROCHA 2011). A partir dessa comparação de a luz se propagar como uma onda (transversal), Maxwell pôde afirmar a coexistência de as ondas eletromagnéticas também se propagarem como uma onda transversal no meio obedecendo a mesma relação $v = \lambda f = c$.

Chesman (2004) nos complementa que, Maxwell calculou qualitativamente a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no vácuo utilizando a seguinte equação:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (15)$$

onde $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ e $\mu_0 = 1,25 \times 10^{-6} \text{ H/m}$ são a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética no vácuo, respectivamente. Essas grandezas são “*puramente eletromagnéticas* (força coulombiana entre cargas e força magnética entre correntes)” (NUSSENZVEIG, 1997, p. 270, grifos do autor). Dados os valores das constantes ϵ_0 e μ_0 e os substituindo na Equação 14, resulta em $c \cong 2,99792 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ (BISCUOLA, 2013; NUSSENZVEIG, 1997; YOUNG, 2009). Esse resultado, é válido tanto no vácuo como no ar, coincidindo com a velocidade de propagação da luz no ar. Maxwell concluiu, dessa forma, que a luz visível também é uma onda eletromagnética (BISCUOLA, 2013) e, que também poderia haver radiações eletromagnéticas após a região do espectro visível (ROCHA, 2011).

A velocidade de propagação da onda eletromagnética é dada também pelas suas características ondulatórias, pela a frequência f e pelo comprimento de onda λ , sendo definida por $c = \lambda f$ (BARRETO FILHO, 2013). Essas afirmações só puderam ser comprovadas de fato a partir das experiências eletromagnéticas obtidas por Hertz, que ao usar a relação $v = \lambda f$ averiguou que a velocidade da onda eletromagnética é sem sombra de dúvidas igual à velocidade da luz; confirmando, pois, a previsão teórica de Maxwell (YOUNG, 2009).

4.1.2 Características gerais das ondas eletromagnéticas

Ondas eletromagnéticas possuem aspectos bastante parecidos com os das ondas transversais descritas na Subseção 2.2.1. Barreto Filho (2013) nos ensina que

[numa] onda eletromagnética, os campos elétrico e magnético variam em fase, isto é, quando um se anula, o outro também se anula, e quando um atinge seu ponto máximo, o outro também atinge seu ponto máximo. A onda eletromagnética é classificada também como uma onda transversal, pois os campos elétricos e magnéticos são perpendiculares entre si, bem como em relação à direção de propagação da onda (p. 254).

Machado (2006) nos diz que as ondas eletromagnéticas possuem aspectos fundamentais que as diferenciam das demais ondas mecânicas (transversal, longitudinal e sonora), para o autor, as ondas eletromagnéticas não necessitam, precisamente, de um meio de propagação que as deem suporte. Embora, “alguns aspectos são comuns a todas as ondas,

como a possibilidade de transferir energia de um ponto a outro sem transferência de matéria”²³ (MACHADO, 2006, p. 281).

Descreve-se esse transporte de energia em relação à energia transferida “por unidade de tempo e por unidade de área”, pressupondo uma área perpendicular à direção do deslocamento da onda (YOUNG, 2009), que matematicamente é dado pelo vetor de “Poynting” no vácuo descrito pelo físico inglês John Poynting (1852-1914) e dado pela equação

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \quad (16)$$

Biscuola (2013) nos acrescenta que uma propriedade perceptível das ondas eletromagnéticas é o fato delas não interagirem com os campos elétricos e nem com campos magnéticos presentes no meio por onde transpassam. De modo que, as ondas eletromagnéticas se propagam com a mesma velocidade da luz no vácuo.

Barreto Filho (2013) nos complementa que, a frequência, no caso das ondas eletromagnéticas, “é o tempo necessário para uma oscilação do campo elétrico ou magnético, isto é, o tempo gasto para o valor da intensidade do campo sair de sua intensidade máxima, passar pelo valor nulo, seguir para a intensidade mínima, passar pelo valor nulo novamente e atingir o valor máximo” (p. 255). O “comprimento de onda λ é a distância espacial que separa dois pontos consecutivos de uma onda que têm a mesma configuração espacial” (p. 282), nesse caso encontra-se o número de ondas k . E também o período T , que é o intervalo de tempo que separa dois pontos consecutivos de uma onda com o mesmo afeioamento temporal (MACHADO, 2006).

Além disso, na Seção 2.5 foi mostrado uma representação matemática que caracteriza as ondas eletromagnéticas (estacionárias) (ALONSO, 1972), que nesse caso, descreve-se os campos elétrico e magnético por meio de funções senoidais da posição x ao longo da trajetória da onda e do tempo t (HALLIDAY, 2011). Ou seja, a expressão $E = E_0 \text{sen}(kx - \omega t)$ representa uma função senoidal para o campo elétrico resultante, e a expressão $B = B_0 \text{sen}(kx - \omega t)$ configura uma função senoidal para o campo magnético resultante.

²³ Isso é algo bastante contundente na Física Quântica quanto ao fenômeno do teletransporte (ou do teleporte), e, de acordo com a literatura não há ainda um método de fazer o teletransporte do corpo de um lugar para outro, ou seja, da matéria por completo, e sim da informação - energia/fótons - contida na matéria, fenômeno conhecido por emaranhamento quântico.

Em termos gerais, essas equações são dadas em termos das derivadas parciais, no tempo e no espaço por

$$\frac{\partial E}{\partial x} = kE_0 \cos(kx - \omega t) \quad (17)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\omega B_0 \cos(kx - \omega t) \quad (18)$$

onde E_0 e B_0 são as amplitudes dos campos; a razão entre as amplitudes $E_0/B_0 = c$ nos resulta a velocidade da luz no vácuo (HALLIDAY, 2011).

Não comumente às equações apresentadas acima para o caso senoidal, como também as ondas eletromagnéticas possuem também equações de onda que as descrevem em termos de sua irradiação no vácuo, essas equações são obtidas a partir da generalização das Equações de Maxwell considerando que no vácuo não existe matéria, ou seja, não há densidade superficial de corrente e nem densidade volumétrica de carga:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (19)$$

que é a forma diferencial para a lei de Gauss do campo elétrico, que possui uma lei análoga, no caso magnético, tal que

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (20)$$

Já a lei de Ampère-Maxwell, na forma diferencial nos diz que um campo elétrico variando no tempo induz um campo magnético dado pelo rotacional à esquerda da igualdade:

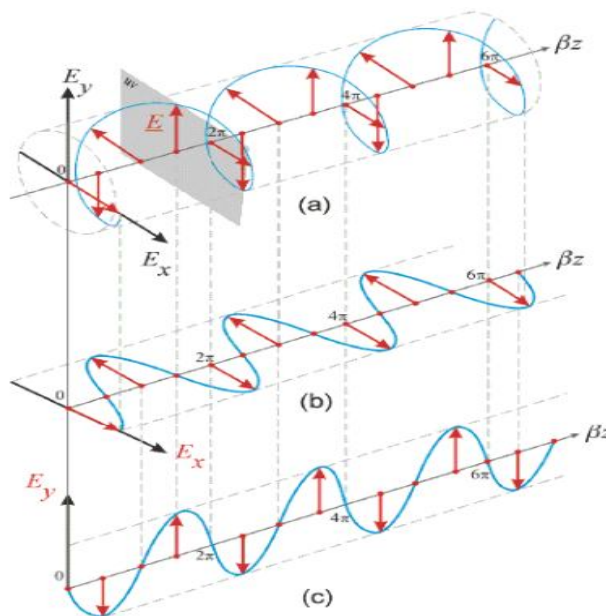
$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (21)$$

Por fim, a lei de Faraday na forma diferencial nos diz que um campo magnético variando no tempo induz um campo elétrico:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (22)$$

Diante do que foi descrito até o momento sobre as características das ondas eletromagnéticas, observa-se também um fenômeno bastante recorrente da Óptica Física, que é a polarização. Esta é a direção do plano onde oscila o campo elétrico relativamente a um plano de referência. Nesse caso, ondas luminosas irradiando-se pelo espaço podem estar polarizadas em qualquer direção (XY ou XYZ) seja na vertical (Figura 25-c) - “o campo elétrico é perpendicular à superfície da terra” (ASSIS, 2012, p. 6) -, seja na horizontal (Figura 25-b) - onde “o campo elétrico é paralelo à superfície da terra” (ASSIS, 2012, p. 6) -, seja circular (ou elíptica) (Figura 25-a) - em que “o campo elétrico é dado pela soma vetorial de duas componentes, de mesma amplitude, polarizadas vertical e horizontalmente e defasadas de 90° no tempo” (ASSIS, 2012, p. 6).

Figura 25 - Polarização da onda eletromagnética no plano XYZ



Fonte: <<https://sites.google.com/site/radioamadorismopy5aal/home/antena/antenas---resumo-angelo-leithold/introducao?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1>>.

4.2 Radiação Eletromagnética

Tauhata et al. (2014) nos explica que esse tipo de radiação²⁴ é formada por vibrações simultânea de campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$, perpendiculares entre si, durante a sua transição, pela movimentação da carga elétrica e do momento magnético da partícula, ao modificar seu

²⁴ “A Radiação é a propagação de energia no espaço por meio da associação dos campos elétricos e magnéticos variáveis no tempo e que são caracterizados pela sua frequência ou comprimento de onda” (PADILHA, 2011, p. 17).

estado de energia, caracterizado pela quantidade de movimento angular em rotação (em torno de um ponto fixo), pelo spin e pela paridade²⁵. Ao irradiarem-se, os campos elétrico e magnético formam as conhecidas radiações eletromagnéticas, que, segundo a autora Okuno (1982) são formadas por vetores $\vec{E}$ e $\vec{B}$ oscilantes e, cuja propagação se dá com velocidade constante c no vácuo.

Um dos problemas que movimentava os estudos da Física no final do século XIX era a radiação de corpo negro. Segundo Biscuola (2013) a superfície de todo corpo, em qualquer temperatura acima do zero absoluto, irradia energia na forma de radiação eletromagnética. Por estar relacionada com a temperatura do corpo que a emite, essa energia a denominamos por “radiação térmica” e, que consoante ao eletromagnetismo clássico de Maxwell, a radiação térmica é emitida por cargas elétricas do corpo, oscilando nas mais variadas frequências perto de sua superfície, devido à agitação térmica.

Essa radiação, por vez, é emitida num espectro, que é formado por diferentes comprimentos de onda emitidos ou absorvidos pela matéria, devido à intensidade da luz. Esse espectro, Figura 26, subdivide-se em: (A) Espectro contínuo, que é produzido por uma fonte que irradia luz em todos os comprimentos de onda da faixa do visível (LEITE, 2012), como por exemplo, a dispersão da luz visível sobre um prisma; (B) Espectro de emissão ou descontínuo, que apresenta níveis definidos e discretos de energia do átomo de cada elemento, o espectro de emissão é formado por linhas claras sobre fundo escuro; e (C) Espectro de absorção constituído por linhas escuras sobre um fundo claro (OKUNO, 1982).

²⁵ Paridade é uma característica simétrica da função de onda quanto a mudança de sinais, par ou ímpar.

Figura 26 - Representação do espectro



Fonte: Leite (2012).

A radiação eletromagnética como o exposto anteriormente é emitida ou absorvida quando o elétron faz uma transição de uma órbita estacionária a outra. Em contrapartida, enquanto a órbita do elétron permanecer a mesma, o átomo não perderá nem receberá energia. Por isso, um elétron ao passar de um nível de energia para outro mais excitado ou não, a energia perdida ou recebida é emitida ou absorvida sob forma de um único fóton de frequência f (OKUNO, 1982).

Nesse caso, o termo fóton nos dá a ideia de quantização de energia (BISCUOLA, 2013), Max Planck, no estudo da radiação de corpo negro, descreveu o fóton como sendo um quantum de luz (ARAGUÃO, 2006), ou seja, a luz pode ser formada por partículas de energia ou “quanta” de energia (ROCHA, 2011). A designação “quanta” é o plural de fótons ou partículas de energia. Segundo esse conceito, a radiação eletromagnética é emitida e irradia-se descontinuamente, em pequenos pulsos de energia, chamados pacotes de energia, quanta ou fótons. Assim, uma onda eletromagnética também apresenta um caráter corpuscular (OKUNO, 1982).

Acerca de a luz possuir um caráter corpuscular, Einstein, em 1905, a idealizou como sendo pacotes de energia eletromagnética, que mais tarde vieram ser chamados de fótons (EISBERG, 1979). “Conforme a teoria de Einstein uma onda eletromagnética transporta energia em pequenos pacotes de energia E , que possuem frequência f e comprimento de onda λ e, utilizando a equação de energia de Max Planck equação 13, podemos determinar a energia de cada fóton (CEONI, 2010) em relação ao seu comprimento de onda, ou seja:

$$E = hf = hc/\lambda \quad (23)$$

onde h ($= 6,64 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$) é a constante (universal) de Planck e f ($= c/\lambda$) é a frequência. Para um melhor esclarecimento acerca do que foi descrito acima, Tauhata et al. (2014) nos explica que

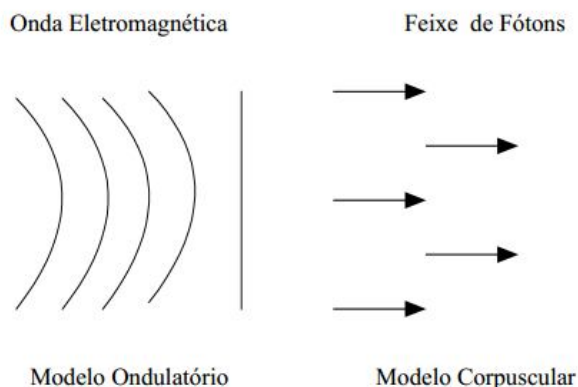
uma partícula, que possui cargas elétrica e magnética (spin), faz uma transição de estado, a sua energia varia de um valor inicial (E_i) para um valor final (E_f), ou seja, libera uma energia $E = E_i - E_f$.

Como os estados inicial (i) e final (f) possuem frequências de rotação de valores $[f_i]$ e $[f_f]$, à transição estará associada a uma *diferença de frequências* $[f = f_i - f_f]$, que constitui a *frequência da transição* de energia (E), expressa quanticamente [pela Equação 14].

Na transição, houve simultaneamente uma mudança nos valores dos campos elétrico ($\vec{E}$) e magnético ($\vec{B}$) associados aos estados inicial e final da partícula. Isto significa que as *diferenças de valores de campos* ($\Delta\vec{E}$) e ($\Delta\vec{B}$) serão simultaneamente carregados pelas *diferenças de energia* (E) e frequência ($[f]$) da transição, ou seja, por uma **onda eletromagnética ou fóton ($E = hf$)** (TAUHATA et al., 2014, p. 15-16, grifos do autor; grifos nosso)

Considerando então que essas radiações eletromagnéticas ora se comportam como onda (conforme a teoria eletromagnética descrita por Maxwell), que é o foco deste trabalho; ora se apresentam como corpúsculos; no entanto, o modelo apresentado na Figura 27 só pôde ser melhor interpretado a partir do modelo dual proposto em 1924 pelo cientista Louis de Broglie (Figura 22), ao combinar as ideias de Einstein com as de Planck (MORGON, 2008), a coincidência da onda eletromagnética e do fóton é apenas um caso especial do dualismo geral onda-partícula, em que a onda eletromagnética não é mais do que uma onda do fóton (ARAGÃO, 2006).

Figura 27 - Modelo ondulatório e corpuscular para a radiação eletromagnética



Fonte: Scudeler (2005).

De Broglie, relaciona partícula com onda, segundo a qual uma onda eletromagnética é emitida e se propaga em forma de pequenos pacotes de energia como o proposto por Einstein. A energia E é obtida a partir da Equação 22 que liga o caráter dual de onda-partícula (OKUNO, 2013 apud OKUNO; YOSHIMURA, 2010; OKUNO et al. 1982).

Isso só ficou evidente em 1927 a partir do experimento realizado pelos cientistas Davisson e Gerner (Figura 24) (MORGON, 2008), os quais concluíram que os elétrons apresentam aspectos tanto de partículas (fótons) quanto de ondas (eletromagnéticas) (ROCHA, 2011).

Dessa forma, podemos inferir que a radiação eletromagnética é um processo de ajuste que ocorre no núcleo ou nas camadas eletrônicas do átomo ou devido a interação de outras radiações ou partículas com o núcleo ou com o átomo (TAUHATA et al., 2014). Esse tipo de radiação constitui atualmente o que conhecemos por **Espectro Eletromagnético**, este constituído pelas ondas de rádio, pela luz visível, pelas micro-ondas, pelos raios infravermelhos, pela radiação ultravioleta (UV), pelos raios X e raios gama (BISCUOLA, 2013; OKUNO, 1982).

4.3 Radiações Não-Ionizantes e Ionizantes

Segundo Scudeler (2005), por meio da Equação 14 podemos especificar dois tipos de radiações: as não-ionizantes e as ionizantes.

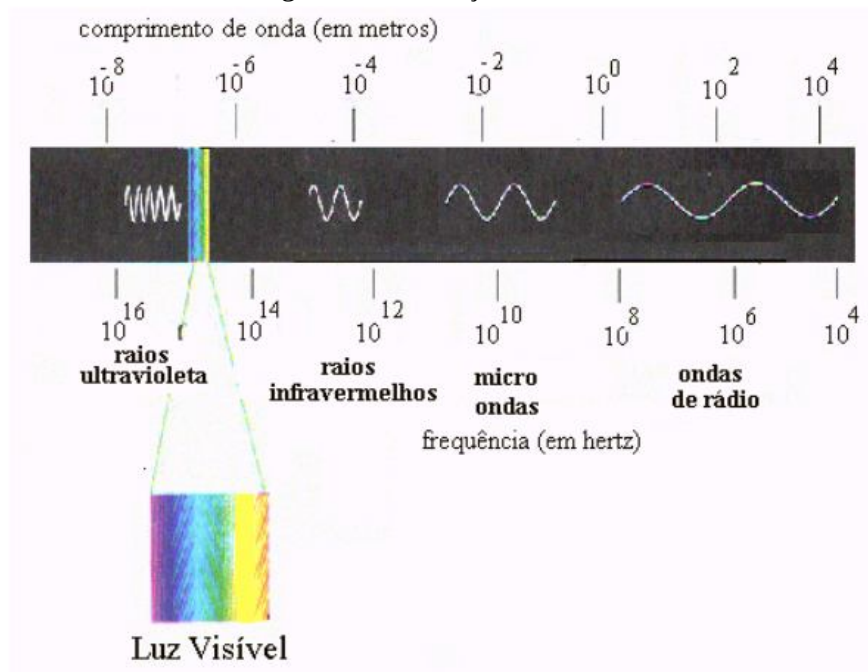
Para os autores Ceoni (2010) e Scudeler (2005 apud SALLES, 2002; SENISE, 2001), as radiações não-ionizantes são as que não produzem ionização, ou seja, ao interagirem com a matéria ou material biológico não possuem energia suficiente para retirar elétrons das moléculas ou átomos.

No que diz respeito a interação da radiação não-ionizante com a matéria ou material biológico, essa radiação produz um aumento expressivo de energia cinética nos átomos que constituem a matéria causando uma excitação ou um aquecimento das partículas (CEONI, 2010). Ou seja, a radiação não-ionizante possui energia o bastante para quebrar barreiras, tais como: moleculares e até ligações químicas (PADILHA, 2011), fenômeno contundente nos fornos micro-ondas.

Os tipos de radiações que caracteriza esse tipo de radiação não-ionizante são: as ondas de radiofrequência, as micro-ondas, as radiações infravermelhas, a luz visível e as radiações ultravioletas (PADILHA, 2011, p. 20 apud PETRUCCI, 2005). A radiação ultravioleta, principalmente as classificadas em UVA e UVB, é considerada não-ionizante por

não possuir energia o bastante para retirar elétrons de principais átomos (ou moléculas) que formam o corpo humano, como por exemplo, o hidrogênio, oxigênio, carbono e o nitrogênio além de penetrarem muito pouco no corpo humano (OKUNO, 2013). Na figura (28) abaixo, observa-se cada faixa das radiações não-ionizantes bem como o seus comprimentos de onda e frequências.

Figura 28 - Radiações não-ionizantes



Fonte: Wells Astete (19--).

Agora as radiações classificadas como ionizantes, para “fins de conhecimento” e “leitura”, são as que possuem energia suficiente para arrancar elétrons dos átomos ou moléculas (CARVALHO, 2017; CEONI, 2010; OKUNO, 2013; PADILHA, 2011; YOSHIMURA, 2010). Por exemplo, a radiação ultravioleta C (UVC), os raios X e os raios gama. Isso ocorre devido ao processo da ionização²⁶ dos átomos, onde

forma-se o par íon²⁷ negativo e íon positivo. O primeiro é o elétron ejetado e o íon positivo é o átomo que perdeu um elétron. Os elétrons estão ligados a átomos por forças elétricas de diferentes valores, dependendo da sua localização. Quanto mais próximo do núcleo, maior é a força de atração entre o elétron e o núcleo, positivamente carregado. [...] A radiação ionizante pode arrancar qualquer elétron de um átomo se tiver energia maior que a de ligação dele ao átomo (OKUNO, 2013, p. 186 apud OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

²⁶ Processo pelo qual o átomo ou molécula cede ou recebe elétrons para constituir íons.

²⁷ Conjunto de átomo(s) eletricamente carregado(s) positivo ou negativamente após ceder ou receber elétron(s).

Segundo Tauhata et al. (2014), a energia das radiações e das grandezas ligadas ao átomo e ao núcleo é geralmente dada em elétron-volt eV , ou seja, $1\text{ MeV} = 10^6\text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-13}\text{ Joule}$. De todo o espectro eletromagnético somente a UVC, os raios X e os raios gama são considerados ionizantes, isto é, possuem energia suficiente para realizar o processo de ionização dos átomos (OKUNO, 2013), ou seja, retirar elétrons de suas órbitas ou camadas eletrônicas.

As radiações ionizantes têm por características, ao contrário das não-ionizantes, a alta frequência e o baixo comprimento de onda (PADILHA, 2011), menores que 200 nm . “Ao atingir um material, a radiação ionizante interage com ele de diversas formas: poderá haver transformações químicas ou nucleares, emissão de novas partículas ou o início de uma cadeia de reações nucleares” (CARVALHO, 2017, p. 28). Para Tauhata et al. (2014), as radiações ionizantes penetram no material, varrendo grandes espessuras antes mesmo de sofrer a primeira interação. Essa penetração depende (ou dependerá) da probabilidade ou secção de choque de interação para cada tipo de evento que possa absorver ou espalhar a radiação incidente.

As principais formas de interação das radiações eletromagnéticas com a matéria ou com o material biológico, excluindo as reações nucleares, são o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de pares (CARVALHO, 2017; TAUHATA, 2014; YOSHIMURA, 2009). Sendo que,

[no] **efeito fotoelétrico**, um fóton [retira] um elétron ligado a um átomo ao se chocar contra ele. É necessário que o fóton tenha energia igual ou maior que a energia de ligação do elétron com o átomo, por isso a emissão de elétrons só ocorre a partir de um dado limiar de energia. Caso o fóton tenha mais energia que esse limiar, o saldo de energia é recuperado como energia cinética do elétron ejetado [recaindo ao seu estado fundamental]. Esse fenômeno ocorre para energias mais baixas do fóton.

[...]

No **efeito Compton**, um fóton e um elétron livre ou fracamente ligado a um átomo se comportam como duas partículas que se chocam; como resultado, temos a modificação na trajetória e na energia de ambos, seguindo as leis de conservação de energia e da quantidade de movimento. Esse fenômeno ocorre para energias intermediárias do fóton (CARVALHO, 2017, p. 28, grifos nosso).

Yoshimura (2009) nos afirma que no efeito Compton existe também a possibilidade de transferir parte da energia $E = hf$ e do momento $\lambda = h/p$ do fóton para o elétron, e nessa situação um fóton com a energia restante é espalhado em outra direção.

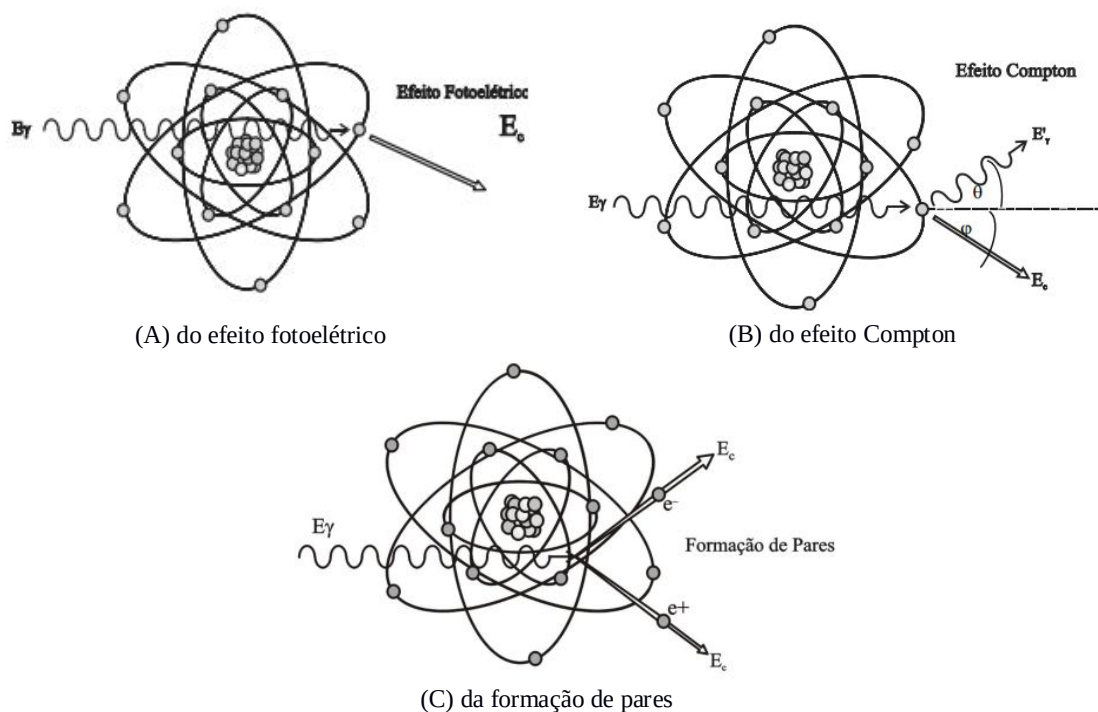
Esse tipo de interação é o que conhecemos por espalhamento Compton coerente

ou efeito Rayleigh (TAUHATA, 2014). O efeito Rayleigh equivale à absorção e re-emissão da radiação pelo átomo, em uma dada direção diferente da direção de incidência (YOSHIMURA, 2009).

Agora, se a energia do fóton for muito alta, ocorre o fenômeno da formação de pares, onde o fóton estingue-se dando aparecimento a um elétron (β^-) e a um pósitron (β^+). A energia mínima do fóton deve equivaler às massas do elétron e do pósitron. Caso o fóton tenha energia maior que o valor mínimo, o excedente em energia será transformado em energia cinética das partículas geradas. A formação de pares deve acontecer nas proximidades de um núcleo, que recua, para que se tenha a preservação da quantidade de movimento (CARVALHO, 2017).

A produção de pares é elucidada fisicamente como sendo a passagem de um elétron em um dado estado de energia total negativa para um outro estado de energia total positiva; a diferença de energia entre os dois estados é a energia do fóton incidente, que é absorvido (YOSHIMURA, 2009). Descrito na seção 4.2. Na Figura 29 temos uma representação atômica da interação da radiações eletromagnéticas com a matéria ou com o material biológico.

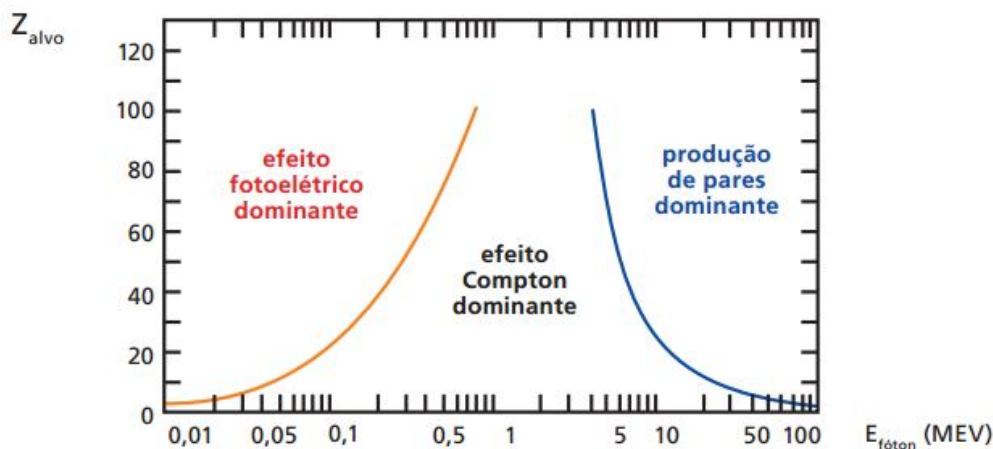
Figura 29 - Representação atômica



Fonte: Tauhata (2014).

A Figura 30 mostra claramente que o efeito Compton possui uma predominância maior se os fótons tiverem energias compreendidas entre algumas centenas de keV e alguns MeV , para números atômicos (Z) baixos; caso contrário o efeito fotoelétrico é o mais evidente para baixas energias e a geração de par(es) para altas energias (YOSHIMURA, 2009).

Figura 30 - Interação das radiações ionizantes com a matéria, em função da sua energia e do número atômico do alvo



Fonte: Carvalho (2017).

Os danos à saúde de indivíduos expostos às radiações ionizantes são conhecidos pela sociedade científica, como os mais contínuos, a leucemia, a catarata e redução da fertilidade (ANGUERA, 2012 apud MORENO e MORENO, 2001).

4.4 O Espectro Eletromagnético

Como vimos anteriormente, a natureza da luz teve um grande embate desde o século XVII ao final do século XIX. E que o físico escocês Maxwell a classificou como sendo uma onda eletromagnética com base em suas teorias do eletromagnetismo e, que 8 (oito) anos após a sua morte, as ondas eletromagnéticas foram verificadas e produzidas experimentalmente pelo físico alemão Hertz (TORRES et al, 2013; YOUNG, 2009), que concluiu ser a luz uma onda eletromagnética.

Esse tipo de onda (ou fóton) é caracterizada como radiação eletromagnética, que forma atualmente o Espectro Eletromagnético ou o Arco-Íris de Maxwell (CHESMAN, 2004; HALLIDAY, 2011). Esse espectro abrange as radiações não-ionizantes (ondas de rádio e TV,

a luz visível, as micro-ondas, a radiação infravermelha e ultravioleta) e as ionizantes (UVC, raios X e os raios gama) (BISCUOLA, 2013; OKUNO, 1982; YOUNG, 2009).

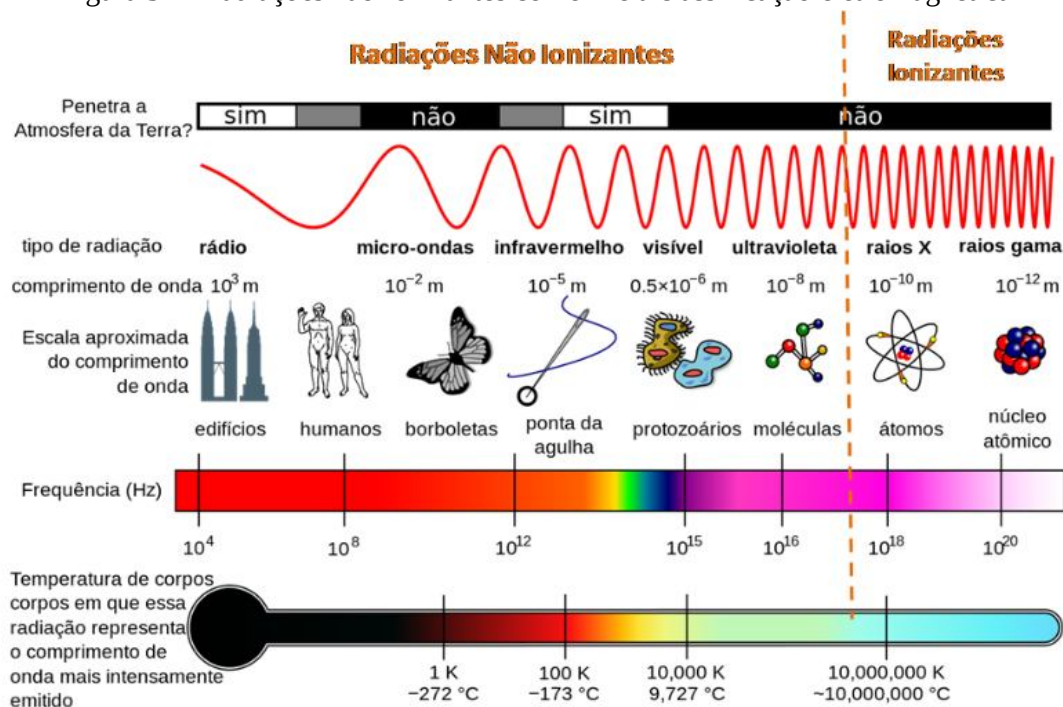
Ressalta-se que no presente trabalho detalhar-se somente as não-ionizantes.

Para os autores Carvalho (2017), Hewitt (2011) e Young (2009), no vácuo as ondas eletromagnéticas se propagam com a mesma velocidade c ($= 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$). Apesar das grandes diferenças nos seus usos e meios de produção, as radiações eletromagnéticas não-ionizantes podem divergir em comprimento de onda e frequência, contudo a relação $c = \lambda f$ no vácuo se mantém para cada uma (YOUNG, 2009).

Hewitt (2011) nos conceitua que as radiações eletromagnéticas

[...] com [frequências] de vários milhares de hertz (kHz), são classificadas como ondas de rádio de baixa [frequência]. Um milhão de hertz (MHz) situa-se no meio da banda de rádio AM. A banda de [frequências] de televisão, VHF (*Very High Frequencies*, [frequências] muito altas), começa em cerca de 50 milhões de hertz (MHz) e a das rádios FM vão de 88 a 108 MHz. Depois vem a banda de [frequências] ultra-altas (UHF, *Ultra High Frequencies*), seguida pela das micro-ondas, além das quais encontramos as ondas infravermelhas, costumeiramente chamadas de “ondas de calor”. Além dessas, se encontram as [frequências] da luz visível, que constituem menos do que 1% [um milionésimo por cento] do espectro eletromagnético medido. [...] [Frequências] ainda mais altas constituem o ultravioleta. [...] (p. 289-290, grifos do autor; grifos nosso).

Figura 31 - Radiações não-ionizantes conforme a classificação eletromagnética



Fonte: <http://www.saudeesegurançanotrabalho.org/radiacoes_nao_ionizantes/>.

O espectro eletromagnético apresentado na Figura 31 nos mostra a classificação das radiações eletromagnéticas não-ionizantes e uma pequena faixa das ionizantes, o comprimento de onda, a frequência de cada radiação eletromagnética, a temperatura de radiação emitida por um corpo (negro) consoante cada região do espectro e a representação das ordens de grandezas dos comprimentos típicos de cada faixa do espectro.

Na subseção abaixo, expõe-se as características, origens e algumas aplicações das radiações eletromagnéticas não-ionizantes, não adentrando na questão das ionizantes (UVC, raios X e raios gama).

4.4.1 Caracterização de cada faixa não-ionizante do espectro eletromagnético

Sabe-se que as radiações eletromagnéticas, em especial as não-ionizantes, cobrem um intervalo muito grande de comprimentos de onda ou de frequências, e podem ser classificadas conforme a sua fonte principal. A classificação usual das radiações eletromagnéticas não-ionizantes contidas no Espectro Eletromagnético são (ALONSO, 1972):

Ondas de rádio

As **ondas de rádio**, são geradas por circuitos elétricos cujas tensões e correntes variam de forma oscilatória, são também aquelas cujo comprimento de onda varia de alguns metros a centenas de quilômetros (GUIMARÃES, 2013). Essas ondas possuem frequências de vários milhares de hertz (*kHz*) (HEWITT, 2011).

Carvalho (2017) nos fala que ondas de radiofrequência são ondas (ou radiações) eletromagnéticas com frequências menores que 10^8 Hz e, são utilizadas no envio de informações telecomunicativas às emissoras de rádio, telefonia e TV.

As ondas de TV são ondas de rádio de pequeno comprimento de onda, entre 1 m e 10 m (f entre 10^8 Hz e 10^7 Hz) e, como aquelas, podem ser produzidas por meio de circuitos elétricos. No Brasil, os canais de TV de 2 a 6 emitem ondas de frequência menores que as da faixa de transmissão de FM em rádio (estas estão compreendidas entre $8,88.10^8 \text{ Hz}$ e $1,08.10^8 \text{ Hz}$). Os demais canais situam-se em frequências maiores que as da faixa FM; tais canais são denominados canais baixos ou altos, de acordo com a posição da faixa de frequência em relação à FM. As faixas situadas acima das de FM são denominadas VHF (*Very High Frequency*) (CARVALHO, 2017, p. 18, grifos do autor)

A energia dos fótons das radiofrequência variam desde quase zero até 10^{-5} eV (ALONSO, 1972). Hertz foi quem produziu as primeiras ondas de rádio, isso em 1887, mas sua utilização nas comunicações a longa distância só pôde ser possível graças ao engenheiro elétrico italiano Guglielmo Marconi (1874-1937) (Figura 32), que, entre os anos de 1894-1896, inventou o telégrafo sem fio.

Marconi transmitiu a primeira mensagem telegráfica através do Canal da Mancha, em 1899, e, em dezembro de 1901, o telégrafo sem fio foi usado para uma transmissão experimental pelo o Atlântico (TORRES et al., 2013).

Figura 32 - Guglielmo Marconi (1874-1937) e o seu Transmissor radiotelegráfico



Fonte: <<http://www.recantodasletras.com.br/trovas/5243548>>.

Rocha (2011) nos fala que antes de Marconi realizar o invento da telegrafia sem fio, nos anos de 1887 e 1894, houve também outros cientistas que contribuíram para o desenvolvimento da telegrafia (ou telefone) sem fio e, um desses cientistas foi o gaúcho, padre, brasileiro Roberto Landell de Moura (1861-1928) (Figura 33), que realizou em 1893 experiências de transmissão de sinais eletromagnéticos, entre a Avenida Paulista e o Alto do Saldanha em São Paulo (SP), a partir de suas próprias invenções (ROCHA, 2011).

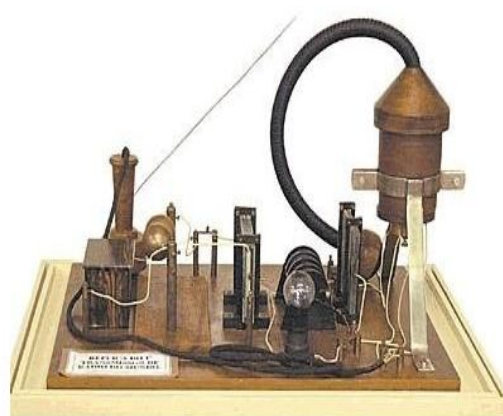
O padre Landell de Moura, teve um de seus inventos, o “transmissor de ondas hertzianas” (Figura 34) patenteado nos Estados Unidos (EUA) (GUIMARÃES, 2013; ROCHA, 2011; ZALTRÃO, 2006), cinco anos depois de Marconi patentear o dele.

Figura 33 - R. Landell de Moura (1861-1928)



Fonte: Zaltrão (2006).

Figura 34 - Transmissor de ondas hertzianas



Fonte: <<http://www.radioemrevista.com/historia/padre-landell-de-moura/>>.

Ondas desse tipo tem sido usualmente aplicadas nas transmissões via rádio, de uso náutico, aeronáutico, ou nas transmissões de rádio AM (amplitude modulada) ou FM (frequência modulada) e também nos canais de transmissão de voz e imagem (TV) (CHESMAN, 2004).

Micro-ondas

As micro-ondas foram primeiramente descobertas (implicitamente) por Maxwell ao estudar as ondas eletromagnéticas, que posteriormente foram obtidas experimentalmente por Hertz em seu laboratório comprovando cientificamente a teoria “*Maxwelliana*”.

Almeida (2016) nos diz que as micro-ondas foram desenvolvidas na Segunda Guerra Mundial, e a primeira aplicação das micro-ondas foi na construção de radares (*Radio Detection And Ranging* - Detecção e Localização por Rádio) nos anos de 1940 e 1950.

As micro-ondas, que são ondas eletromagnéticas, possuem comprimento de ondas λ variando entre 1 mm e 1 m e frequências f entre 10^9 Hz e 10^{12} Hz (BARRETO FILHO, 2013; CARVALHO, 2017), e podem ser geradas através de osciladores em circuitos elétricos (CARVALHO, 2017). As micro-ondas possuem energia dos fótons, que vão - desde 10^{-5} eV até 10^{-3} eV .

Apesar de serem mais eficientes do que as ondas de rádio, as micro-ondas são bastante aplicadas nas telecomunicações (telefonia móvel e TV), nas tecnologias de radares, e também na análise de detalhes finos da estrutura atômica e molecular. A região das micro-

ondas é designada também por UHF (*ultrahigh frequency*: frequências ultraelevadas relativamente à radiofrequência) (ALONSO, 1972).

A pesquisa de sistemas de radar levou à descoberta acidental da aplicação mais utilizada hoje em dia, que são os fornos de micro-ondas. Segundo a literatura, essa descoberta se deu em 1945 quando o engenheiro Percy Spencer [Figura 35], trabalhando com radares, percebeu que uma barra de chocolate havia se derretido em seu bolso (ALMEIDA, 2016, p. 30, grifo nosso).

Figura 35 - Percy Lebaron Spencer (1894-1970)

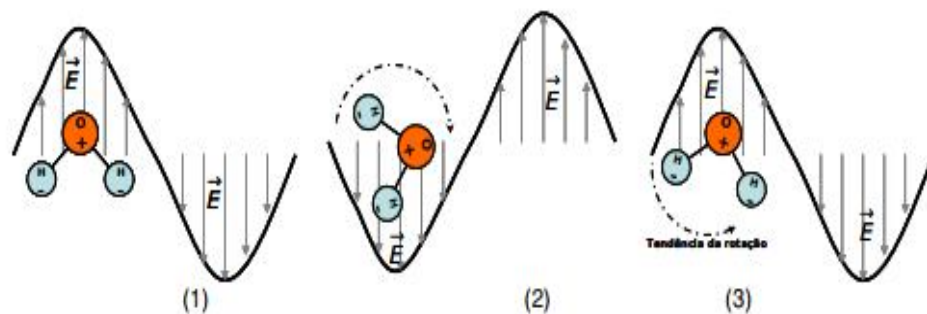


Fonte: < <http://personagens-unai.blogspot.com.br/2012/06/percy-spencer.html>>.

Ao perceber tal efeito, o derretimento da barra de chocolate²⁸, Spencer constatou que as micro-ondas possuem capacidade de aquecer (ou derreter) alimentos, porque a energia das ondas nessa região do espectro eletromagnético (micro-ondas) equivale à energia do movimento rotacional de algumas moléculas dipolares presentes nos alimentos, como por exemplo, água, gorduras e açúcares submetidas a um campo elétrico, Figura 36 (ALMEIDA, 2016 apud MAI, 2008).

²⁸ Isso ocorreu porque a energia das micro-ondas é suficiente para aquecer as moléculas por vibração (ilustrado na Figura 36).

Figura 36 - Configuração de um corpúsculo de água na presença do campo elétrico



Fonte: Bezerra (2012 apud MAI, et al., 2008)

No instante (1) a molécula da água está alinhada com o campo elétrico da onda; No instante (2) o campo inverteu seu sentido e a molécula tende a girar; No instante (3) a onda muda de sentido novamente e a molécula tende a acompanhar o campo. O processo se repete $2,45 \cdot 10^9$ vezes por segundo, acompanhando a frequência da onda (BEZERRA, 2012 apud MAI, et al., 2008). Essa oscilação causa o aumento da energia cinética das moléculas e, consequentemente, um aumento de temperatura.

Assim como as ondas de rádio, as micro-ondas são classificadas como sendo radiações não-ionizantes possuindo efeitos considerados térmicos e, por isso, não mudam a estrutura molecular do material que está sendo irradiado (GUIMARÃES, 2013; TORRES, et al., 2013).

Radiações Infravermelhas

Consoante a teoria científica, a radiação infravermelha foi descoberta em 1800 pelo astrônomo alemão (Friedrich) Willian Herschel (1738-1822) (Figura 37), que também foi o descobridor do planeta Urano (GUIMARÃES, 2013; OLIVEIRA, 2014; SANTOS, 2006, apud MALDAGUE & MOORE, 2001; TORRES, et al., 2013).

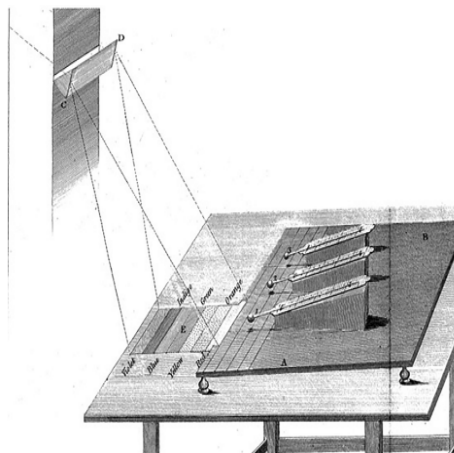
Figura 37 - Willian Herschel (1738-1822)



Fonte:

<http://www.avictorian.com/Herschel_John_Frederick_William.html>.

Figura 38 - Aparato utilizado por Willian Herschel na detecção do infravermelho



Fonte: Oliveira (2014)

No descobrimento das radiações infravermelhas, Willian Herschel partiu do princípio experimental empregado por Isaac Newton no estudo da luz visível, porém usando além do prisma, três termômetros de mercúrio com bulbos na cor preta. Com isso, Willian Herschel mediu a temperatura das várias componentes de cor da luz do sol refratados através do prisma e incididos em um anteparo feito por ele (Figura 38).

Herschel observou um aumento de temperatura da cor violeta para a cor vermelha, no entanto, viu que a temperatura apresentava maior intensidade na região escura, além do vermelho. Com isso, ele pôde comprovar que naquela região existia luz invisível aquecendo os termômetros de mercúrio (SANTOS, 2006). À região denominou de Espectro Termométrico e à radiação de Calor Negro. Anos depois essa região do espectro eletromagnético passou a ser conhecida como sendo Região Infravermelha e a radiação de Radiação Infravermelha (SANTOS, 2006 apud RICHARDS, 2001).

As radiações infravermelhas, que também são radiações eletromagnéticas (não-ionizantes), que são produzidas nas camadas eletrônicas mais externas dos átomos e moléculas (GUIMARÃES, 2013), e possuem

comprimentos de onda maiores do que a da luz visível, de $0.7 \mu m$ a $1 mm$, ou seja, frequências imediatamente inferiores às da luz vermelha (entre $10^{14} Hz$ e $10^{11} Hz$). Em geral, a radiação infravermelha é obtida em vibrações ou rotações de átomos ou moléculas, causando uma mudança na energia interna do objeto que a recebe, e por isso é chamada de radiação de calor. Os corpos celestes emitem radiação infravermelha que complementa as informações obtidas observando sua emissão de luz visível (CARVALHO, 2017, p. 18).

Além dos intervalos citados para esse tipo de radiação (comprimento de onda e frequência), essa radiação (infravermelha) possui energia dos fótons variando desde 10^{-3} eV até $1,6 \text{ eV}$. Ela(s) também se subdivide em três sub-regiões: o infravermelho distante, de 10^{-3} m a $3 \cdot 10^{-5} \text{ m}$; o infravermelho médio, de $3 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ a $3 \cdot 10^{-6} \text{ m}$; e o infravermelho próximo, até cerca de $7,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ (Alonso, 1972). Ao interagirem com a meio biológico, as radiações infravermelhas, colocam as moléculas para vibrarem (movimento oscilatório) provocando aumento de temperatura, calor ou sensação térmica.

Essas radiações (infravermelhas) são facilmente percebidas e aplicadas no nosso meio, como por exemplo, em aparelhos eletrônicos - controle remoto -, fotografias térmicas, termografia médica aplicada em diagnósticos de doenças inflamatórias, espectroscopia por infravermelho utilizadas em laboratórios para a identificação de processos químicos, etc..

Luz visível (ou Radiação visível)

Essa radiação (visível) foi inteirada a partir dos avanços obtidos nas pesquisas experimentais de Óptica, tendo como precursoras a natureza da luz e as cores, que foram idealizadas desde os antigos hebreus até o século XVII - Seção 3.1. Com o descobrimento de

[vários] fenômenos importantes sobre cores [que] estavam sendo estudados antes das pesquisas de Newton - como o arco-íris, as cores produzidas por prismas, os fenômenos coloridos produzidos em reações químicas, anéis e faixas coloridas que surgiram em bolhas de sabão e outras películas finas. Em meados do Século XVII muitos autores estavam propondo teorias para explicar todos esses fenômenos luminosos (MARTINS, 2015, p. 2, grifos nosso)

Dentre esses autores, destacam-se o filósofo René Descartes, que foi um dos mais influentes cientistas e filósofos daquela época. Segundo Martins (2015), Descartes foi o primeiro cientista a utilizar experimentalmente o prisma em seus estudos sobre a luz para observar as cores componentes da luz branca (Figura 39); o filósofo e cientista Robert Boyle (1627-1691), que também introduziu o prisma em seus experimentos para estudar as cores componentes do espectro visível (MARTINS, 2015) (Figura 40); o físico Robert Hooke, que introduziu no contexto científico, em 1665, o seu livro “*Micrographia*” (MARTINS, 2015; ROCHA, 2011), livro este que atribuiu notáveis conceitos e observações às anotações de Newton (MARTINS, 2015) no campo de óptica; e o físico jesuíta italiano Francesco M. Grimaldi (1618-1663), que descobriu e estudou os fenômenos relacionados a difração da luz, em 1665, (ROCHA, 2011; MARTINS, 2015).

Figura 39 - Esquema de René Descartes

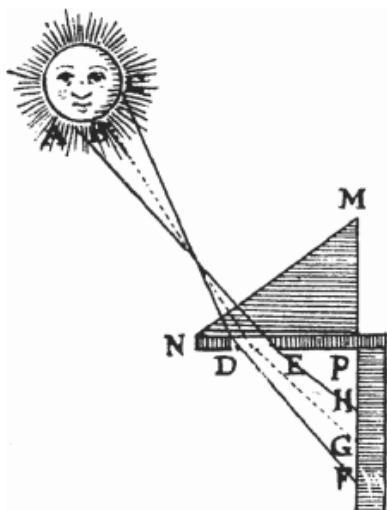
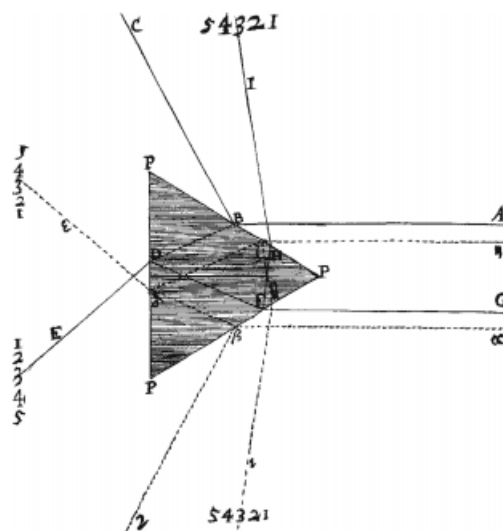


Figura 40 - Esquema de Robert Boyle

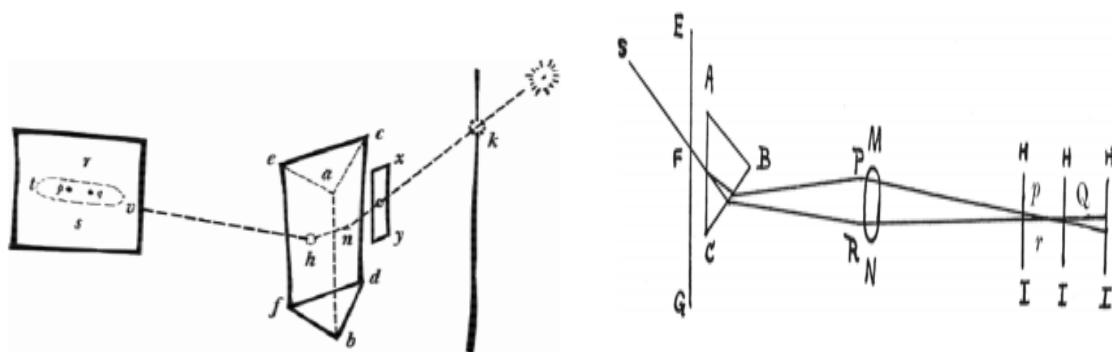


Fonte: Martins (2015).

Através desses intitulados pesquisadores e filósofos da ciência natural: Descartes (1637), Robert Boyle (1664), Robert Hooke (1665), Francesco M. Grimaldi (MARTINS, 2015; ROCHA, 2011), etc., Newton pôde realizar grandes avanços em seus estudos e experimentos sobre o espectro visível desvendando as suas cores componentes.

Consoante a literatura (MARTINS, 2015; ROCHA, 2011; TORRES et al., 2013, outros), Newton ao deixar um raio de luz proveniente do sol, que passara por um pequeno buraco de sua janela, incidir sobre um prisma (retangular) de vidro (Figura 41) detectou as cores da luz solar, a saber: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil e violeta; cores constituintes do espectro visível.

Figura 41 - Experimento de Newton utilizando um prisma



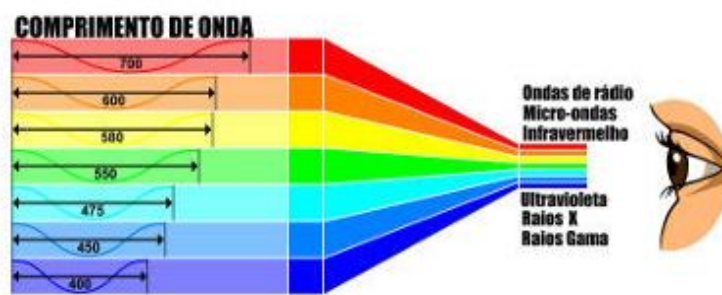
(A) Primeiro experimento de Newton de observação das cores componentes da luz solar

(B) Experimento de recombinação das cores geradas pelo prisma para reproduzir a luz branca

Fonte: Martins (2015).

O espectro da luz visível observado por Newton, é formado por ondas eletromagnéticas que, ao penetrar em nossos olhos, sensibiliza a retina e desencadeia o mecanismo da visão. Essas ondas são originadas por cargas elétricas oscilantes, assim como qualquer outra radiação eletromagnética (TORRES et al., 2013).

Figura 42 - Faixa visível percebida pelo olho (humano)



Fonte: < <http://brasilescola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-espectro-eletromagnetico.htm> >.

Como mostra a figura (42), o espectro de luz visível vai desde a cor vermelha até a cor violeta como as descrições de Newton, sendo facilmente percebida por nossos olhos.

Dentro da faixa visível, a variação de frequência ou de comprimento de onda será percebida como uma variação de cor, indo de $[4.000 \cdot 10^{-10} \text{ m}]$ (violeta) a $[7.000 \cdot 10^{-10} \text{ m}]$ (vermelho) (f entre $7 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ e $4 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$). A sensibilidade do olho não é uniforme para toda a faixa visível, sendo maior para a verde-amarelado e menor para o vermelho e o violeta. Em geral, a luz visível é emitida quando elétrons fazem transições nas camadas externas dos átomos (CARVALHO, 2017, p. 19, grifos nosso).

A luz visível, atualmente, tem sido bastante aplicada nas instrumentações ópticas, desde um microscópio moderno até um simples espelho (TORRES, 2013), e também nas tecnologias a laser (luz amplificada por emissão estimulada de radiação) desenvolvidas pelo físico Theodore Harold Maiman (1927-2007) (TORRES et al., 2013).

Radiações Ultravioleta (UV)

A onda (ou radiação) eletromagnética é comumente classificada por meio do comprimento de onda e da frequência da onda característica de cada energia. A classificação da radiação eletromagnética em função de seu efeito físico (não-ionizante) leva à construção de um espectro eletromagnético que abrange desde as ondas de rádio até as radiações ultravioletas (GOUVÊA et al., 2014 apud CAVALCANTE, 2001). Figura 31.

Consoante a essa classificação, encontra-se as radiações ultravioletas (UV). Para um melhor entendimento do descobrimento desse tipo de radiação (UV), recorre-se as explicações de Gouvêa et al. (2014), que segundo os autores, a

descoberta dessa radiação ocorreu durante a observação do escurecimento dos sais de prata quando expostos à luz do sol. Em 1801, o cientista alemão [Johann] Ritter percebeu que os raios de sol, logo após o limite superior do espectro visível, ou seja, raios invisíveis eram capazes de oxidar haletos de prata. Estes foram chamados de raios desoxidantes (para destacar sua reatividade química) e, posteriormente, denominados de luz ultravioleta no fim do século XIX (GOUVÊA, et al., 2014, p. 337, apud BALL, 2007, grifo nosso).

Figura 43 - Johann Ritter (1776-1810)



Fonte: < https://pl.wikipedia.org/wiki/Johann_Wilhelm_Ritter >.

A radiação descoberta por Johann Ritter²⁹, possui comprimento de onda que variam de 1 nm a 400 nm , com frequências superiores à da luz visível entre 10^{15} Hz e 10^{17} Hz (CARVALHO, 2017; GUIMARÃES, et al., 2013). As radiações ultravioletas são produzidas pela transição eletrônica nas camadas externas dos átomos (CARVALHO, 2017) ou ainda produzidas por átomos e partículas em descargas elétricas (ALONSO, 1972), a qual possui energia dos fótons variando entre 3 eV a $2 \cdot 10^3\text{ eV}$ (ALONSO, 1972).

A maior e a principal fonte emissiva desse tipo de radiação UV, além de outras radiações, é o sol³⁰. No entanto, Carvalho (2017) nos diz que a maior parte dessa radiação emitida pelo o sol é absorvida pelo ozônio (O_3) da atmosfera terrestre (Figura 44). Além do sol, a UV é também emitida por corpos aquecidos a uma temperatura da ordem de 6000 K (Kelvin), que é aproximadamente a temperatura da superfície do sol (GUIMARÃES, et al., 2013).

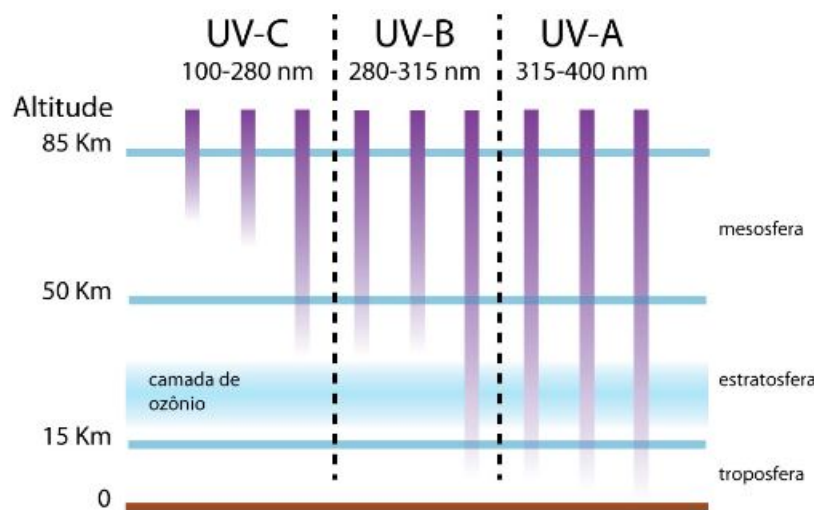
Na década de 1930 (GUIMARÃES, et al., 2013), a radiação UV foi subdividida em três faixas (CRUZ, et al., 2004; GOUVÊA, 2014; GUIMARÃES, et al., 2013; POZZEBON, 2009; TORRES, et al., 2013) fotoquímicas e ou fotobiológicas, a saber: UVA para $315 - 400\text{ nm}$, não absorvida pela atmosfera, ela é apenas atenuada por espalhamento (SILVA, 2008); UVB para $280 - 315\text{ nm}$, ou luz eritematogênica (GUIMARÃES, et al., 2013) é parcialmente absorvida pelo ozônio (O_3) (SILVA, 2008); e UVC para $100 - 280\text{ nm}$, essa radiação também denominada de germicida (GUIMARÃES, et al., 2013) é praticamente toda absorvida pelo ozônio (O_3) na estratosfera (POZZEBON, 2009; SILVA, 2008, apud ROBINSON, 1996). Figura 44.

Ainda sobre a caracterização dessas radiações UVA, UVB e UVC, temos que a radiação UVA possui fótons com energia variando entre $3,10\text{ eV}$ e $3,94\text{ eV}$ possuindo poder de penetração de até 1% (um milionésimo por cento) no tecido subcutâneo do corpo (humano), com aproximadamente $300\text{ }\mu\text{m}$; já a radiação UVB tem fótons com energia variando de $3,94\text{ eV}$ a $4,42\text{ eV}$, possuindo penetração máxima em torno dos $200\text{ }\mu\text{m}$ atingindo a derme com 9,5% (nove por cento e 5 décimos) da sua energia radiante; e a UVC (fótons com energia entre $4,42\text{ eV}$ e $12,42\text{ eV}$), consegue penetrar até a epiderme atingindo $80\text{ }\mu\text{m}$ em profundidade (CEONI, 2010).

²⁹ (COARITI, 2011; CRUZ, et al., 2004; GOUVÊA, et al., 2014; GUEDES, et al., 2009; GUIMARÃES, et al., 2013; POZZEBON, 2009; SILVA, 2008; TORRES, et al., 2013, outros)

³⁰ (ALONSO, 1972; COARITI, 2011; CRUZ, et al., 2004; GOUVÊA, et al., 2014; GUEDES, et al., 2009; GUIMARÃES, et al., 2013; POZZEBON, 2009; SILVA, 2008; TORRES, et al., 2013, outros)

Figura 44 - Bandas fotoquímicas e ou fotobiológicas do espectro ultravioleta em relação a “absorvidade” pela estratosfera terrestre



Fonte: <<http://marcioguidoni.com.br/midia/post/do/action/code/Mg==>>.

A UVA possui baixa ação eritematosa, porém ela provoca pigmentação da pele após uma ou duas horas exposto a luz solar (CRUZ et al., 2004), principal fonte emissora desse tipo de radiação. É também conhecida como luz negra (GUIMARÃES, et al., 2013) é responsável por provocar o envelhecimento precoce (BARRETO FILHO, 2013) da pele. A radiação UVB causa “eritema de graus variados, conforme a quantidade de energia recebida, o tempo de exposição e a sensibilidade da pele. [...] Participam na estimulação de produção de vitamina D pelo organismo” (CRUZ, et al., 2004, p. 1451). Causa também a vermelhidão da pele e cânceres cutâneos (BARRETO FILHO, 2013).

As duas classificações do espectro da UV, ou seja, UVA e UVB são consideradas radiações não-ionizantes por não possuírem energia suficiente para provocar ou causar um processo de ionização, ou seja, “os elétrons não são arrancados do átomo, mas levados a um nível energético maior” (GUIMARÃES et al., 2013); ocasiona apenas efeitos somáticos na pessoa que sofreu a irradiação (POZZEBON, 2009). Todavia, a UVC apresenta maior índice energético (BARRETO FILHO, 2013) em comparação a UVA e a UVB, por isso, são tidas (pela literatura) como sendo radiações ionizantes. São altamente cancerígenas a pele humana (CRUZ et al., 2004).

A radiação ultravioleta absorvida pela pele humana torna possível a geração de vitamina D no nosso corpo auxiliando na retenção de cálcio dos alimentos. Essa radiação

também provoca o escurecimento da pele, ou seja, hiperpigmentação causada pelo excesso de melanina.

A exposição prolongada à radiação ultravioleta, porém, pode provocar “vermelhidão” da pele e câncer de pele dos tipos carcinomas (basocelulares, “originado das células da camada basal, é o mais frequente e com o menor potencial de malignidade [, seu] crescimento é lento e muito raramente se dissemina à distância” (CEONI, 2010, p. 48, grifo nosso); e os espinocelulares, “originado das células da camada espinhosa, tem crescimento mais rápido e as lesões maiores podem enviar metástases à distância [, também] conhecido como carcinoma epidermóide, é bem menos frequente que o basocelular” (CEONI, 2010, p. 50, grifo nosso)) e o melanoma, “originado das células que produzem o pigmento da pele (melanócitos), é o câncer de pele mais perigoso” (CEONI, 2010, p. 51).

A radiações ultravioletas têm a capacidade bactericida e de controlar microrganismos em alimentos. É por esse motivo que elas são aplicadas na esterilização de instrumentos em ambientes cirúrgicos, sistemas de ar-condicionado, alimentos e dentre outros por meio de lâmpadas especiais (CARVALHO, 2017).

4.5 Efeitos Biológicos das Radiações Não-Ionizantes

Não muito diferente das radiações ionizantes, as não-ionizantes, apesar de possuírem baixa energia, também causam efeitos multiversos no funcionamento biológico dos seres vivos. Segundo Carvalho (2013), ela induz a formação de correntes elétricas e de campos elétrico e magnético no interior do corpo. Essas radiações, geralmente, são emissões de energia que variam até 10 eV e comprimento de onda maior que 200 nm (VIEGAS, 20--).

Pesquisas de efeitos biológicos da radiação não-ionizante têm demonstrado que tais radiações podem produzir alterações estruturais e funcionais nos organismos irradiados, sendo essas alterações devidas não apenas ao aquecimento mas também a uma interação direta da energia com o sistema biológico (ANGUERA, 2012, p. 8 apud LAMPARELLI, et al., 1998)

Sobre isso, Carvalho (2013) nos fala que dependendo da intensidade da frequência e do comprimento de onda de as ondas eletromagnéticas, estas podem causar morbidades (biológicas) nas células musculares e nervosas do corpo. Habitualmente as radiações não-ionizantes (radiofrequências, radiação infravermelha, luz visível e a radiação ultravioleta) podem causar efeitos térmicos e não térmicos (CARVALHO, 2013, apud OMS, 2012; OMS, 2007; DIAS & SIQUEIRA, 2002).

Os efeitos classificados como “térmicos” são os que “surgem diretamente do aquecimento dos tecidos, como resultado da absorção de parte da energia transportada pela onda eletromagnética” (BUSSINGER, 20--, p. 12), que decorre da movimentação de dipolos de água e de íons resolutos no tecido do corpo (CARVALHO, 2013). Como por exemplo, “a predisposição ao surgimento de cataratas e as queimaduras teciduais internas e externas” (ANGUERA, 2012, p. 9 apud BERNHART, 1992; BRONZIO, 1995 apud SALLES, 1997). Em contrapartida, os considerados como efeitos não térmicos são os que provém “da interação direta de campos eletromagnéticos com as moléculas que formam o tecido [biológico] sem estar relacionados com o calor, podendo também gerar danos no organismo” (BUSSINGER, 20--, p. 12, grifo nosso) dos seres vivos, como por exemplo, a região das radiofrequências (ondas de rádio e micro-ondas, principalmente estas últimas).

Este grupo inclui fenômenos variados - como estresse oxidativo, desorganização da cromatina e prejuízo do reparo do DNA [Ácido Desoxirribonucleico] - que podem gerar quadros clínicos díspares: desde sintomas simples, como uma cefaleia, até quadros clínicos graves e complexos, a exemplo do desenvolvimento de neoplasias malignas (CARVALHO, 2013, p. 7, apud BALBANI & KRAWCZYK, 2009; DIAS & SIQUEIRA, 2002).

Esses efeitos térmicos e não térmicos são causados devida a longa ou a curta exposição às radiações (eletromagnéticas) não-ionizantes. Além desses, temos também os “efeitos de curta exposição”, que são facilmente identificados num curto período de tempo devido à pouca exposição à radiação (OKUNO, 1982); e os “efeitos de longa exposição”, que são os considerados crônicos com intervalo de tempo maior (OKUNO, 1982) do que os de curta exposição, como por exemplo, câncer de pele (TAUHATA, et al., 2014).

Okuno (1982) classifica os efeitos de longa exposição em: “Genéticos” - ou “Hereditários” (TAUHATA et al., 2014) -, que consistem nas mutações das células reprodutoras, o seu desenvolvimento se dá através da exposição dos órgãos reprodutores à radiação, não afetando o indivíduo que a sofreu e sim sua progênie; e “Somáticos”, que afeta diretamente a pessoa que se expôs a radiação (não-ionizante).

Dentre os efeitos somáticos causados no indivíduo, temos: o aumento na incidência de câncer; anormalidade no desenvolvimento genético; o desencadeamento da catarata; a redução da vida média (OKUNO, 1982). Portanto, como mencionado ao longo desta seção, as radiações não-ionizantes contidas no Espectro Eletromagnético (ou Arco-Íris de Maxwell) causam uma série de efeitos mórbidos e/ou epidemiológicos aos seres vivos, principalmente a nossa saúde.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Segundo o exposto neste trabalho, observou-se que a evolução do conhecimento científico sobre as “radiações eletromagnéticas”, principalmente as classificadas como “não-ionizantes”, partiu de uma concepção filosófica e hipotética sobre a “natureza da luz” se onda ou se partícula e, que posteriormente essa foi ganhando novas ideias e fundamentações a partir de novos estudos da Física, principalmente no campo da Óptica, da Astronomia e do Eletromagnetismo; início do século XVII até o final do século XIX - iniciando o século XX.

E com base no contexto científico e histórico analisado “UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ACERCA DA EVOLUÇÃO DO PENSAMENTO CIENTÍFICO ACERCA DO CONCEITO DA NATUREZA DA LUZ COM ÊNFASE ÀS RADIAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS NÃO-IONIZANTES”, título deste trabalho, que o mesmo traz relevantes pontos sobre a contextualização dos pensamentos científicos e teóricos obtidos até o final do século XIX sobre a natureza da luz, até o estabelecimento da “Teoria Eletromagnética Clássica” de Maxwell. Que predisse que a natureza da luz possui um caráter ondulatório eletromagnético. Este confirmado por Hertz. Maxwell não só previu teoricamente aquele caráter, como também afirmou que as demais radiações eletromagnéticas além do visível têm o mesmo caráter ondulatório eletromagnético, denominado de ondas eletromagnéticas.

A análise do contexto histórico da natureza da luz até as ondas eletromagnéticas, também denominadas radiações eletromagnéticas, é sem dúvidas fundamental para que os estudos possam ter melhores embasamento do contexto científico. Além da abordagem histórica e científica, é necessário também abordar algumas aplicações das radiações eletromagnéticas não-ionizantes no nosso cotidiano. Considerando que quase todas foram descobertas em estudos e/ou pesquisas aplicadas com fins tecnológicos, em alguns casos na Óptica, usada nos estudos de microscopia; na Astronomia, na caracterização dos astros luminosos por meio do Espectro Eletromagnético; no Eletromagnetismo Clássico, as rádios frequências usadas nas telecomunicações, ... e na Física da Radiação, usada na saúde.

Essa revisão por ter um caráter histórico e científico (conceitual) contribui para o Ensino de Física perfazendo o processo evolutivo das radiações eletromagnéticas (não-ionizantes) a partir do contexto histórico e científico da “natureza da luz”, e também expondo um contexto conceitual sobre a mesmas. Neste caso, afirma-se que é de suma importância fazermos um estudo completo acerca da teoria de determinado campo ou área de estudo, consolidando um ensino e uma aprendizagem melhor no que se diz respeito ao Ensino de

Física. Tornando o mesmo de mais fácil assimilação (quantos aos conceitos físicos). Portanto, a presente revisão foi, sem sombra de dúvidas, importante para nós devido ao seu caráter histórico e científico que a Física nos apresenta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Lucas Rodrigues de, 1989. **Modelagem de Fornos de Micro-ondas Industriais no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia. Orientador: Antonio Carlos Delaiba.

ALONSO, Marcelo. **Física: Um curso universitário**; coordenador [da tradução] Giorgio Moscati. São Paulo: Editora Blucher, 1972.

_____. **Física: um curso universitário**, v. 2 Campos e ondas; tradução Ivan C. Nascimento, Curt E. Hennies. – 2. ed. brasileira. - São Paulo: Blucher, 2015.

ANGUERA, Maria das Graças. **Exposição à radiação não-ionizante por equipamentos terapêuticos de micro-ondas e morbidade referida em fisioterapeutas**. -- São Paulo, 2012. Tese (Doutorado) -- Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo. Programa de Medicina Preventiva. Orientador: Reinaldo José Gianini.

ARAGÃO, Maria José. **História da Física**. - Rio de Janeiro: Interciência, 2006. 224p.

ASSIS, Mauro S.. **Introdução à Propagação das Ondas Radioelétricas**. In: ENCOM 2012 - Encontro Anual do Iecom em Comunicações, Redes e Criptografia, 2012, Campina Grande. ENCOM 2012. Campina Grande: Instituto para Estudos Avançados em Comunicações - Iecom, 2012.

BARRETO FILHO, Benigno. **Física aula por aula: eletromagnetismo, ondulatória, física moderna: 3.º ano**. - 2. ed. - São Paulo: FTD, 2013.

BEZERRA, A. F.. **Carvão ativado de endocarpo de coco da baía produzido em forno micro-ondas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Orientador: Emerson Freitas Jaguaribe.

BISCUOLA, Gualter José et al. **Física 3**. 2. ed. – São Paulo: Saraiva, 2013.

BUSSINGER, B. **Efeitos biológicos da telefonia celular**. 20---. Disponível em: <<http://www2.inca.gov.br/wps/wcm/connect/f482f5004eb6938089a99bf11fae00ee/artigo.pdf?MOD=AJPERES>> Acesso em 22 de ago. 2017.

CARVALHO, Cláudio Viveiros de. Câmara dos Deputados: Consultoria Legislativa. **Radiação Eletromagnética e Saúde**. 2013. Disponível em: <http://www2.camara.leg.br/a-camara/documentos-e-pesquisa/estudos-e-notas-tecnicas/areas-da-conle/tema19/2013_5819.pdf> Acesso em 22 de ago. 2017.

CARVALHO, Regina Pinto de. **Aplicações da energia nuclear na saúde** [livro eletrônico]. - São Paulo: SBPC; Viena: IAEA, 2017. 1 livro digital.: il.

CEONI, Francisco Carlos. **Radiações ultravioleta e suas implicações na saúde humana no contexto da divulgação Científica**. Monografia - Universidade de São Paulo. São Paulo,

2010. Física Licenciatura. Orientador: Profa. Dra. Emiko Okuno. 122p.

CHESMAN, Carlos. **Física moderna: experimental e aplicada**. - 2. ed. - São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004.

COARITI, Jaime Rodriguez. **Análise dos efeitos da radiação solar ultravioleta em populações habitantes a diferentes altitudes**. 2011. Dissertação (Mestrado em Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Orientador: Marcelo de Paula Corrêa.

CRUZ, Vanda Maria Fogaça Rosa da; et al.. **Protetor Solar: Como se usa e como se deve usar**. In: IV Encontro Americano de Pós-Graduação, 2004, São José dos Campos. Anais de Trabalhos Completos - VIII INIC / IV EPG. São José dos Campos: UNIVAP, 2004. v. 1. p. 1451-1454.

EISBERG, Robert. **Física quântica**; tradução d Paulo Costa Ribeiro, Enio Frota da Silveira de Marta Feijó Barroso. - Rio de Janeiro: Elsevier, 1979 - 29.^a reimpressão.

GOUVÊA, M. M.; et al.. **Aplicação da radiação ultravioleta como forma de contribuição para a química verde e construção de um reator fotoquímico alternativo e de baixo custo, para pré- tratamento de amostras**. Química Nova (Impresso) **JCR**, v. 37, p. 337-343, 2014.

GRAF. Grupo de Reelaboração do Ensino de Física. Física 2: Física Térmica/Óptica/GRAF – 5. ed. 4. reimpr. - São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2007.

GUEDES, Andréa Madalena Maciel; et al.. **Tecnologia de ultravioleta para preservação de alimentos**. Boletim do Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos (Impresso) **JCR**, v. 27, p. 59-70, 2009.

GUIMARÃES, Osvaldo et al. **Física**. – 1. ed. – São Paulo: Ática, 2013.

HALLYDAY, David, 1916 - **Fundamentos de física, v.2: gravitação, ondas e termodinâmica**; tradução Flávio Menezes de Aguiar, José Wellington Rocha Tabosa. - Rio de Janeiro: LTC, 2006.

_____ - **Fundamentos de física, volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica**; tradução e revisão técnica Ronaldo Sérgio de Biasi. - [Reimpr.]. - Rio de Janeiro: LTC, 2011.

_____ - **Fundamentos de física**, volume 4: óptica e física moderna; tradução e revisão técnica Ronaldo Sérgio de Biasi. - [Reimpr.]. - Rio de Janeiro: LTC, 2011. 4v.

HEWITT, Paul G. **Fundamentos de física conceitual**; tradução Trieste Ricci. Porto Alegre: Bookman, 2009. 440p.

_____. **Física conceitual**; tradução: Trieste Freire Ricci; revisão técnica: Maria Helena Gravina. – 11. ed. - Porto Alegre: Bookman, 2011. Xxiv, 744p.: il, color.; 28cm.

LARIOS, G. S. **Subsídios históricos para o ensino de Dualidade Onda-Partícula**:

Opiniões e perspectivas sobre a Física Moderna e um ensino contextualizado. - Birigui, 2016. 64 f. Trabalho de conclusão de curso (Licenciatura em Física) - Instituto Federal de São Paulo, Câmpus Birigui.

LEITE, D.O.; PRADO, R. J.. **Espectroscopia no Infravermelho: uma Apresentação para o Ensino Médio.** Revista Brasileira de Ensino de Física (Impresso) **JCR**, v. 34, p. 2504, 2012.

LIMA, Débora da Conceição. **Evolução histórica do conceito físico da luz.** - JI-Paraná, 2012. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Licenciatura Plena em Física). – Universidade Federal de Rondônia, Campus de JI-Paraná.

MACHADO, Kleber Daum. **Teoria do eletromagnetismo.** Ponta Grossa: Editora UEPG, 2006. v.; il.

MARTINS, Roberto de Andrade; SILVA, Cibelle Celestino . **As pesquisas de Newton sobre a luz: Uma visão histórica.** Revista Brasileira de Ensino de Física (Online) **JCR**, v. 37, p. 4202-1-4202-32, 2015.

MÁXIMO, Antônio. **Curso de Física**, volume 2. São Paulo: Scipione, 2010.

MORGON, Nelson H.. **O comportamento do elétron: uma análise do efeito compton e da relação de Broglie.** Química Nova (Impresso) **JCR**, v. 31, p. 1869-1874, 2008.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física básica** - vol. 2. - 4ª edição rev. - São Paulo: Blucher, 2002.

_____. **Curso de Física básica** - vol. 4 - 1ª edição. - São Paulo: Blucher, 1998.

OLIVEIRA, R. A.; SILVA, A. P. B. . **William Herschel, os raios invisíveis e as primeiras ideias sobre radiação infravermelha.** Revista Brasileira de Ensino de Física (Online) **JCR**, v. 36, p. 1-11, 2014.

OKUNO, Emico. **Física para ciências biológicas e biomédicas.** - São Paulo: Harper & Row do Brasil, 1982.

_____. Efeitos biológicos das radiações ionizantes: acidente radiológico de Goiânia. Estudos Avançados (USP. Impresso), v. 27, p. 185-200, 2013.

PADILHA, F. C.. **Radiação não ionizantes estudo de causas e efeitos diretos e indiretos no ser humano.** 2011. Monografia. (Aperfeiçoamento/Especialização em ENGENHARIA DE SEGURANÇA DO TRABALHO) - Universidade Alto Vale do Rio do Peixe. Orientador: Antonio Pedro Tessaro.

POZZEBON, P. H. B.; RODRIGUES, N. V.. **Radiação ultravioleta em trabalhadores da construção civil: problemas e soluções.** Disciplinarum Scientia. Série Ciências Naturais e Tecnológicas, v. 10, p. 15-26, 2009.

ROCHA, José Fernando M. (org.). **Origens e evolução das ideias da física.** - Salvador: EDUFBA, 2011. 374p.; il.

SANTOS, Laerte dos. **Termografia infravermelha em subestações de alta tensão desabrigadas**. -- Itajubá, (MG): [s.n], 2006. 129 p.: il. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Itajubá. Orientador: Edson da Costa Bortoni.

SCUDELER, Fatima Claret Sêda Ribeiro. **Interação das ondas eletromagnéticas com o material biológico**. 2005. 0 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) - Instituto Nacional de Telecomunicações, Fundação Instituto Nacional de Telecomunicações. Orientador: Mauricio Silveira.

SERWAY, Raymond A. **Princípios de física: movimento ondulatório e termodinâmica**; tradução Leonardo Freire de Mello, Tânia M. V. Freire de Mello; revisão técnica André Koch Torres Assis. São Paulo: Cengage Learning, 2009.

SILVA, B. V. C. **Discutindo Modelos de Visão Utilizando da História da Ciência**. Holos (Natal. Online), v. 3, p.180, 2010a.

_____. **Controvérsias sobre a natureza da luz: uma aplicação didática**. - Natal, RN, 2010b. 180 f.: il. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Naturais e Matemática.

SILVA, Fabio W. O. **A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 29, n. 1, p. 149-159, (2007). Disponível em: < <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/060207.pdf> > Acesso em 08 de set. 2017.

SILVA, Francisco Raimundo. **Estudo da radiação ultravioleta na Cidade de Natal - RN**. – Natal, RN, 2008. 74 f. : il. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Orientador: George Santos Marinho.

TIPLER, PAUL A. **Física: mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica** - volume. - 4ª edição; tradução Horacio Macedo. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

TIPLER, PAUL Allen, 1933 - **Física: moderna**; tradução e revisão técnica Ronaldo Sérgio de Biasi. - Rio de Janeiro: LTC, 2010.

_____. **Física para cientistas e engenheiros**, volume 3: física moderna: mecânica quântica, relatividade e a estrutura da matéria; tradução e revisão técnica Márcia Russman Gallas. - [Reimpr.]. - Rio de Janeiro: LTC, 2013. il. - (Física para cientistas e engenheiros; v. 3).

TORRES, Carlos Magno A. et al.. **Física: ciência e tecnologia**. - 3. ed. - São Paulo: Moderna, 2013.

VIEGAS, M. F., et al.. **Medidas da Radiação Não-Ionizante na Cidade de São José dos Campos, SP**. 20---. Disponível em: < <http://www.bibl.ita.br/xiencita/Artigos/Fund12.pdf> > Acesso em 22 de ago. 2017.

YOSHIMURA, E. M.. **Física das Radiações: interação da radiação com a matéria**.

Revista Brasileira de Física Médica (Online), v. 3, p. 57-67, 2009.

YOUNG, Hugh D. **Física II: Termodinâmica e Ondas**; [colaborador A. Lewis Ford]; tradução Cláudia Santana Martins; revisão técnica Adir Moysés Luiz. - 12. ed. - São Paulo: Addison Wesley, 2008.

_____. **Física III: eletromagnetismo**; [colaborador A. Lewis Ford]; tradução Sonia Midori Yamamoto; revisão técnica Adir Moysés Luiz. - São Paulo: Addison Wesley, 2009.

_____. **Física IV: ótica e física moderna**; [colaborador A. Lewis Ford]; tradução Cláudia Martins; revisão técnica Adir Moysés Luiz. - São Paulo: Addison Wesley, 2009.

ZALTRÃO, Cláudia Josiani dos Santos. **Resgate da memória científica nacional: a obra do Padre Roberto Landell de Moura**. 2006. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Gestão da Informação) - Universidade Federal do Paraná. Orientador: Jose Simao de Paula Pinto.