



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
FACULDADE DE FÍSICA**

WAGNER HENRY CABRAL PINTO

**FÍSICA MÉDICA E SUAS APLICAÇÕES:
UMA ABORDAGEM PARA O ENSINO MÉDIO**

**Belém
2019**

WAGNER HENRY CABRAL PINTO

**FÍSICA MÉDICA E SUAS APLICAÇÕES:
UMA ABORDAGEM PARA O ENSINO MÉDIO.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como pré-requisito de obtenção do título de Licenciatura em Física da Universidade Federal do Pará, submetida à aprovação da banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Aprovado em Belém - PÁ, _____ / _____ / 2019.

BANCA EXAMINADORA:

Orientador; Prof. Dr. Rubens Silva
(FACFIS – ICEN – UFPA)

Examinador 1:

Examinador 2:

DEDICATÓRIA

Agradeço ao ETERNO, pois sem a sua ajuda, a sua direção e o seu agir eu não teria capacidade para estar aqui, por se fazer presente em todos os momentos, por me ter dotado de saúde, sabedoria e disposição para alcançar mais uma vitória em minha vida. Aos meus pais que sempre me mostraram o caminho certo a seguir e do quando a educação, o ensino e a aprendizagem são fundamentais na formação do cidadão. A minha namorada Ana Vitória Dias que me auxiliou na estrutura para a finalização deste trabalho, além de ter me dado todo o apoio durante essa trajetória, pois foi fundamental para o término da mesma. A instituição de ensino, UFPA, que me abriu as portas com a oportunidade de desenvolver esta disciplina e aos membros do corpo docente envolvidos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por nunca me desamparar nos momentos difíceis, pela força que me foi dada para continuar nessa jornada terrena. Aos meus familiares, meu pai ROGÉRIO DE OLIVEIRA PINTO e minha mãe MARILDILENE DANTAS CABRAL, por tudo que já fizeram por mim nessa vida, pelos conselhos e pela educação que foi sendo moldada desde a infância.

Outrossim, agradeço aos meus avós, Raimundo e Maria, exemplos de força e perseverança, por serem os patriarcas dessa família e terem criados seus filhos e netos no caminho da educação e ao meu irmão Alan Bruno.

Minha namorada, ANA VITÓRIA DIAS LIMA, que esteve ao meu lado durante a minha vida acadêmica, sempre me dando forças. Amiga e companheira. Ao meu orientador, professor doutor, RUBENS SILVA, cujo seu auxílio nesse trabalho de conclusão de curso, foram imprescindíveis para a conclusão do mesmo.

A minha instituição de ensino, UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ (UFPA), a qual me proporciono experiência e conhecimento acadêmico, resultando em um amadurecimento não só intelectual, mas também como pessoa.

Aos meus colegas de turma e ao grupo PET-FÍSICA, o qual foi de suma importância para a minha formação acadêmica, proporcionando amadurecimento e experiência como futuro professor, durante o programa PUA. A todos aqueles, que de forma direta e indiretamente, me ajudaram durante a minha jornada acadêmica. Só tenho a agradecer por todos vocês, um abraço de:

WAGNER HENRY CABRAL
PINTO

LISTA DE IMAGENS

Figura	1	-	Tubo	de	raios		
					catódicos.....	12	
Figura 2	-	Fotografia do laboratório de Röntgen na Universidade de Würzburg, 1895.....	12				
Figura 3	-	Primeira radiografia da história, sendo a mão esquerda de Anna Berth Ludwig Roentgen, com tempo de exposição de aproximadamente 15 minutos, obtida no dia 22 de dezembro de 1895.....	13				
Figura 4	-	propagação de uma onda em uma corda: não há transporte de matéria, mas, sim, de energia.....	15				
Figura 5	-	ondas eletromagnéticas de rádio saindo de uma torre de transmissão até a chegada em residências.....	16				
Figura 6	-	perfil de uma onda periódica unidimensional.....	16				
Figura 7	-	órbita circular de um elétron em torno do núcleo.....	20				
Figura 8	-	salto dos elétrons, o quantum.....	21				
Figura	9	-	salto	dos	elétrons,	o	
			fóton.....				22
Figura	10	-	Possíveis	transições	de	um	elétron, até n=6.....
							24
Figura 11	-	Radiações Ionizante, são as que possuem energia suficiente para ionizar, ou seja, para arrancar elétrons da camada do átomo. Ex: alfa, beta, gama e raios X.....	25				
Figura 12	-	o poder de penetração de diferentes tipos de radiação.....	26				
Figura 13	-	Espectro eletromagnético, é uma escala de radiações.....	27				

Figura 14 - O efeito fotoelétrico ocorre quando uma placa metálica é exposta a uma radiação eletromagnética de frequência alta, por exemplo, um feixe de luz, e este arranca elétrons da placa metálica.....	39
Figura 15 - gráfico da energia cinética em função da frequência.....	31
Figura 16 - O Efeito Compton.....	32
Figura 17 - As imagens obtidas quando o corpo é atravessado por raios X são chamadas de radiografias.....	34
Figura 18 - partes internas de um tubo de raio X refrigerado com óleo.....	35
Figura 19 - Emissão de radiação infravermelha.....	36
Figura 20 - Emissão de RX característicos.....	36
Figura 21 - Emissão RX por freamento.....	37
Figura 22 - Radiografia simples de tórax.....	38
Figura 23 - efeito fotoelétrico.....	39
Figura 24 - Efeito Compton.....	40
Figura 25 - Grade Antidifusora.....	41
Figura 26 - A radiação de baixa energia não contribui para a formação da imagem e é nociva ao paciente, então é utilizada na radiologia diagnóstica, um filtro de alumínio afim de atenuar a passagem desses raios.....	41

- Figura 27 - densidade radiográfica, é o grau de enegrecimento da imagem, ela é responsável pelo escurecimento dos exames. Quanto maior for a densidade, mais escura será a imagem.....42
- Figura 28 - Radiografia de tórax mostrando um tumor no pulmão esquerdo.....42
- Figura 29 - Assim são os dentes de uma pessoa aos 7 anos (acima) e aos 30.....43
- Figura 30 - Primeiro tomógrafo para o estudo do crânio.....44
- Figura 31 - essa absorção diferenciada nos tecidos do paciente pode ser gravada em um filme ou um sistema de detectores.....45
- Figura 32 - Embora radiografias laterais ou oblíquas ajudem na visualização, o problema da superposição ainda persiste.....46
- Figura 33 - feixe de radiação único, 1 corte demorava cerca de 3 a 5 minutos, o estudo da região inteira podia chegar a levar horas.....48
- Figura 34 - O feixe de RX passou a ser laminar (forma de leque) suficiente para cobrir o conjunto de detectores.....48
- Figura 35 - 2º geração: Rotação de 180º e Feixe em leque por uma única fonte – 10º de abertura.....49
- Figura 36 - 3º geração, aumento no número de detectores – até 960, redução do tempo de exame – 2 a 10 s / corte, rotação de 360º, o feixe é largo e cobre todo o objeto de estudo.....50
- Figura 37 - 4º geração de tomógrafos, um conjunto de detectores distribuídos ao longo dos 360º, ocupando assim todo o anel.....50
- Figura 38 - Tomografia computadorizada de crânio, onde foi encontrado um cisto aracnoide no diagnóstico.....51

Figura 39 - tomografia computadorizada de tórax.....	52
Figura 40 - Dose elevada de radiação.....	52

RESUMO

O presente trabalho aborda a importância da física aplicada na área da medicina para a sociedade, haja vista que é importante saber que este ramo da ciência está presente em diversas situações do contexto social: desde um simples raio-x até exames mais modernos e complexos utilizando como exemplo a medicina nuclear para o tratamento de câncer. Assim, este trabalho intitulado Física médica e suas aplicações: uma abordagem para o ensino médio, foi alicerçado nos pressupostos de Sampaio e Calçada (2005), Chaves et al (2005), Carron e Guimarães (2002), Nersissian (2012) dentre outros autores. Diante disso, utilizou-se como método o levantamento de caráter bibliográfico, uma vez que não fora necessário ir a campo. Após a revisão das leituras compreendeu-se a necessidade de tal estudo tendo em vista as relações didáticas da física no cotidiano, tendo em vista que a disseminação de tal conhecimento sobre o que é a física médica, soluciona a questão norteadora de como tal vertente pode ser observada no dia-a-dia pelos estudantes de ensino médio?

Palavras – chave: Física Médica. Radiações. Ensino de Física. Aplicações Tecnológicas.

ABSTRACT

This paper discusses the importance of applied physics in the area of medicine for society, considering that it is important to know that this branch of science is present in various situations of the social context: from a simple x-ray to more modern and complex exams using as an example nuclear medicine for cancer treatment. Thus, this paper entitled Medical Physics and its applications: an approach to high school, was based on the assumptions of Sampaio and Calçada (2005), Chaves et al (2005), Carron and Guimarães (2002), Nersissian (2012) among others. authors. Therefore, the bibliographic survey was used as a method, since it was not necessary to go to the field. After reviewing the readings, it was understood the need for such study in view of the didactic relationships of physics in everyday life, given that the dissemination of such knowledge about what is medical physics, solves the guiding question of how such a strand can be observed on a daily basis by high school students?

Keywords: Medical Physics. Radiations Physics teaching. Technological applications.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	11
I SEÇÃO	12
1.1. Uma breve história da física médica.....	12
1.2. A Descoberta da Radiação-X	12
II SEÇÃO	15
2.1. Recapitulando a ondulatória	15
2.2. Recapitulando a física moderna.....	19
2.3. O átomo de Bohr	19
2.4. Estudo das radiações.....	25
2.5. Momento linear do fóton	28
2.6. Efeito fotoelétrico	29
2.7. Efeito Compton	32
III SEÇÃO	35
3.1. Aplicação da Física à Medicina.....	35
3.2. Tomografia computadorizada.....	44
CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
REFERÊNCIAS	55

INTRODUÇÃO

O estudo da física é resultante das dificuldades de compreensão acerca dos fenômenos da natureza, tendo um caráter questionável, investigável e explicável, a ciência é movida por questionamentos como “Por que o céu é azul?”, “Como é realizado o Raio X?”, “Onde eu vou usar a física na minha vida?” “Pra que eu tenho que aprender física?”. Tais dúvidas perduram a realidade do contexto escolar e diante deste entrave, criaram-se diversos questionamentos que norteiam a presente pesquisa, a nível de exemplo: Como a Física Médica pode ser observada no dia-a-dia pelos estudantes do ensino médio?

Diante da perspectiva de desinformação, observa-se que tal problema está associado ao fato de predominar-se o conhecimento parcial do assunto com um foco descontextualizado, fazendo com que as dúvidas acerca da disciplina de física, para os alunos, resultem somente em resoluções matemáticas de problemas da área, transformando o estudo da física em um “bicho de sete cabeças”. O que torna o aprendizado intrigante, massivo e repetitivo.

Assim, a presente pesquisa tem por objetivo responder tais questionamentos, outrora apresentados, e demonstrar aos discentes de ensino médio o quanto a ciência afeta as questões humanas diretamente, os benefícios produzidos pela ciência com foco na física médica, os quais já transformaram por completo a existência humana. A importância da Física Médica para a sociedade, seus principais desenvolvimentos, desafios e perspectivas enfrentadas atualmente.

Durante os estudos no ensino fundamental e médio, assim como ao decorrer da vida acadêmica e perante a experiência em sala de aula, é notório um grande distanciamento dos conteúdos de física no cotidiano dos alunos, afetando diretamente e de forma negativa, o aprendizado. Pode-se afirmar que especificamente na área da física moderna e na ondulatória.

Destarte, o presente trabalho é subdividido em duas seções, juntamente as considerações iniciais e finais e as referências bibliográficas. Sendo a primeira seção destinado a historicidade da física médica e seu desenvolvimento. Em segundo plano, trata-se de conceitos-chaves da Física para compreensão acerca da aplicação direta da física na medicina, utilizando alguns procedimentos médico como a radiografia e a tomografia computadorizada para exemplificar a existência da disciplina no cotidiano do aluno.

I SEÇÃO

1.1. Uma breve história da física médica

Não é de hoje que a física contribui no ramo da medicina. Por conta disso, não é à toa que atualmente exista um ramo de estudo denominado física médica. A presente vertente teve início com a grande descoberta dos raios X, a qual foi realizada pelo alemão Wilhelm Roentgen (1845 - 1923), na universidade de Wuzburg (Alemanha) em 1895.

Tal descoberta, é considerada o marco na medicina moderna, a qual foi de suma importância, pois assim, passou a ser possível a visualização do interior do corpo humana, sem que houvesse intervenções invasivas (exames realizados com um mínimo dano à integridade física do paciente).

De acordo com a Revista Brasileira de Ensino de Física (1998), ainda tratando do percurso histórico deste âmbito, em 1895, Roentgen expôs o quanto era importante para a medicina os raios X ao apresentar a primeira radiografia de uma mão humana, para ser mais exato, de sua esposa. Ao passar dos anos, a radiografia foi sendo melhorada e bastante utilizada na medicina, como exemplo, para fins diagnósticos. Devido essa descoberta, Roentgen foi agraciado com o prêmio Nobel da física, no ano de 1901.

Por causa do uso intensivo e rápido das radiações, a física médica é frequentemente associada à aplicação dessas radiações em medicina. Porém, é importante destacar que a física médica está presente nas terapias, diagnósticos médicos preventivos, desde um simples exame de raio x até exames mais complexos.

1.2. A Descoberta da Radiação-X

A RBEF (1998) também nos conta que Roentgen ganhou o Prêmio Nobel da física, em 1901, devido a descoberta de tal radiação. Apesar de serem quase 60 trabalhos publicados, apenas três artigos foram dedicados aos raios X. Os raios recém descobertos, que não eram vistos, Roentgen chamou por “X-strahlen” – “raios-X” (“X” pois eram de natureza não conhecida), além disso contribuíram para um avanço na evolução de outras Ciências, a mais beneficiada, com certeza, foi a Medicina, onde foi possível desenvolver diferentes aplicações nas suas mais variadas especialidades.

Em 1895, numa sala escura, Roentgen usando um tubo de raios catódicos (um tubo de Hittorf, Lenard ou Crookes) (ver figura 1) em alta voltagem, cujo vácuo era adequadamente

eficiente, acelerou os elétrons emitidos em um filamento no interior do tubo, verificou a existência de fluorescência num ecrã (é uma superfície esticada, feita com tecido ou vidro, utilizada para projetar uma imagem sem impedir a passagem de luz) que continha cristais um composto químico capaz de emitir uma Luminescência verde, quando submetido a uma radiação ultravioleta, colocados a uma distância do equipamento, em seguida colocando entre o tubo e o ecrã vários objetos, que deveriam ser opacos aos raios catódicos, manifestando-se, sempre, fluorescência. Esse princípio é bem semelhante ao usado nas antigas TV de tubos.

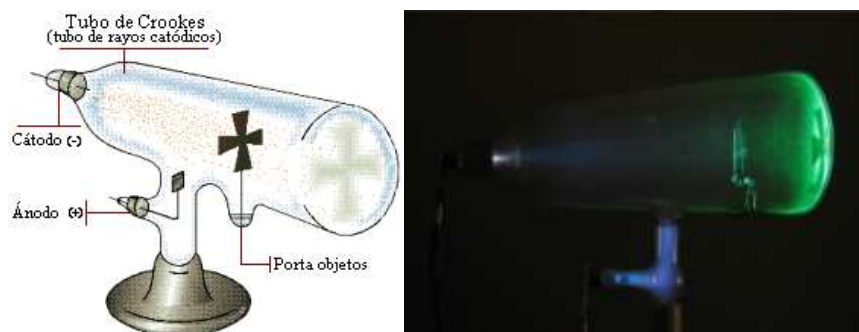


Figura 1: Tubo de raios catódicos.

Fonte: https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Crookes_tube-in_use-lateral_view-2_prPNr%C2%B009.jpg. Acesso: nov. 2019.

Foi então que Röntgen, começou a “brincar” em seu laboratório (veja figura 2) ao expor diversos materiais à radiação, a fim de observar o poder de penetração dos raios, quando testava a capacidade do chumbo para bloquear a nova radiação, Röntgen, ao colocar a sua mão verificou a projeção dos ossos da sua mão no ecrã fluorescente. Nesta projeção, os ossos apareciam como sombras mais escuras do que os tecidos envolventes, permitindo que Röntgen fosse o primeiro a ter uma visão radioscópica dos seus próprios ossos.

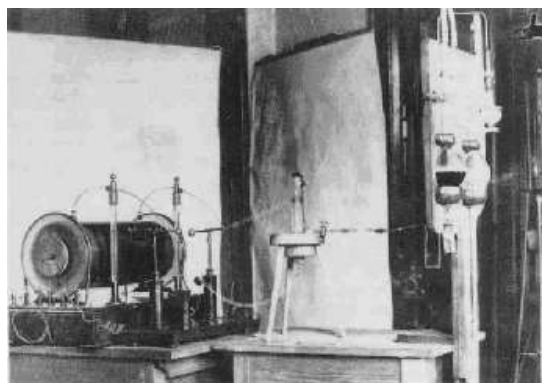


Figura 2: Fotografia do laboratório de Röntgen na Universidade de Würzburg, 1895.

Fonte: <https://moonmentum.com/blog/archivo/multimedia/wilhelm-conrad-rontgen/>. Acesso: nov. 2019

Com o intuito de gravar as imagens que visualizava no ecrã fluorescente, Röntgen, sabendo que os raios catódicos impressionavam placas fotográficas, tentou aplicar o mesmo processo de registo aos raios-X. Para tal, segundo a Revista Brasileira de Ensino de Física (1998), substituiu o ecrã por uma placa fotográfica e, após a sua revelação por processos convencionais de fotografia, obteve o registo da imagem de objetos que colocou entre o tubo de descarga e a placa fotográfica. A revelação da placa produziu um registo permanente, capaz de comprovar os seus estudos.

Foi desta forma que Röntgen realizou a primeira fotografia obtida por raio-X, isto é, uma radiografia da mão da sua mulher, Anna Bertha Ludwig (1839- 1919). Esta foi a primeira radiografia anatómica de um ser humano, na qual eram visíveis, com grande detalhe, os ossos da sua mão, bem como o anel que possuía no momento da exposição ao raio X (ver figura 3).



Figura 3: Primeira radiografia da história, sendo a mão esquerda de Anna Berth Ludwig Roentgen, com tempo de exposição de aproximadamente 15 minutos, obtida no dia 22 de dezembro de 1895. Fonte: <http://www.novomilenio.inf.br/santos/h0446.htm>. Acesso: nov. 2019.

II SEÇÃO

2.1. Recapitulando a ondulatória

Este tópico de discussão será iniciado com um breve exemplo tendo em vista a contextualização do assunto: Você já deve ter visto em algum filme antigo de faroeste uma cena em que um trem se aproxima de uma cidade, e então, o índio, para perceber melhor a chegada do trem, aproxima seu ouvido ao trilho, fazendo com que escute o barulho do trem, mesmo estando bem distante. Isso pode ser explicado pelo princípio básico de propagação de onda, discutido por Carron e Guimarães (2000), em que os autores afirmam que isso pode vir a ocorrer por causa da energia propagando-se tanto pelo solo, quanto pelo ar, mas sem arrastar o meio em que se propaga.

Isso também pode ser observado no exemplo de quando atira-se uma pedra na água e é possível observar os objetos que flutuam serem atingidos pela oscilação. Outro exemplo disso é quando o celular recebe uma mensagem via WhatsApp. Todos esses fenômenos referem-se a ondas, haja vista que a principal característica das ondas é o transporte de energia sem envolver o transporte de matéria.

Diante dos contextos situacionais criados, trataremos nesta seção acerca dos primeiros passos no que se refere ao estudo das ondas: a classificação, ondas periódicas, suas características básicas, amplitude, frequência, período e comprimento de onda. Tendo em vista que tais conceitos são importantíssimos para o desenvolvimento do estudo.

Neste item de discussão utilizaremos como referencial majoritário os estudos de Carron e Guimarães (2000) visando tratar o conceito de onda para posteriormente compreender radiações eletromagnéticas. Para iniciarmos tal estudo, cria-se uma questão problema exemplificada pelos autores. Segundo eles:

“Consideremos uma corda bem longa, esticada. Uma perturbação provocada em uma de suas extremidades chega até a outra, sem que a corda, na sua totalidade, tenha se movido. Se colocarmos uma fita em um ponto qualquer entre os extremos, veremos que, com a passagem da oscilação a fita subirá e descenderá, sem ser transportada pela onda.” (CARRON e GUIMARÃES, p. 196, 2000).

A partir do exemplo, é possível constar que essa é a principal característica da propagação ondulatória, o transporte de energia sem que ocorra o transporte de matéria. Tal exemplo pode ser observado na figura abaixo.

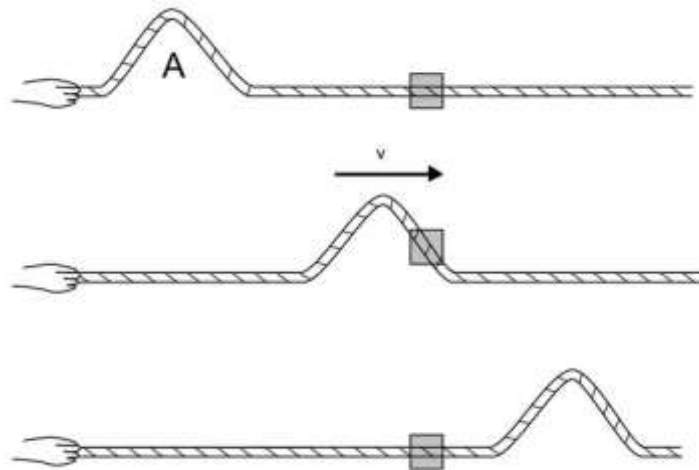


Figura 4: propagação de uma onda em uma corda: não há transporte de matéria, mas, sim, de energia.
 Fonte: <http://educacao.globo.com/fisica/assunto/ondas-e-luz/ondas.html>. Acesso em: nov. 2019.

O elemento que provoca uma onda é denominado fonte. Sabendo disso, é possível classificar as ondas de acordo com a sua origem (natureza de vibração), direção da vibração e com os graus de liberdade para a propagação. Ainda na perspectiva dos autores, em relação à origem da vibração, a onda pode ser classificada como sendo onda mecânica ou onda eletromagnética.

Ondas mecânicas são produzidas por uma perturbação no meio material, como, por exemplo, a vibração de uma corda de violão, ondas em molas, uma onda na superfície e interior dos líquidos, sólidos (terremotos) e gases (som no ar) e etc. Tais ondas, transportam vibrações mecânicas, ou seja, as partículas materiais estão vibrando, também devemos ressaltar que as ondas mecânicas necessitam obrigatoriamente de um meio para se propagar.

Segundo Carron e Guimarães (2000), Ondas Eletromagnéticas são vibrações de um campo elétrico e magnético originados por cargas elétricas oscilantes que se propagam. Considerando também o fato de que a onda eletromagnética não necessita de um meio para se propagar, propagando-se inclusive, no vácuo. É o caso das ondas de rádio (ver figura 5), micro-ondas, luz visível, raios X e outras.

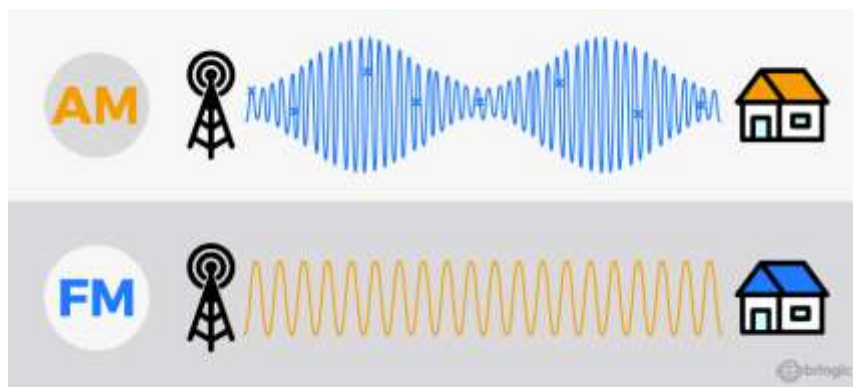


Figura 5: ondas eletromagnéticas de rádio saindo de uma torre de transmissão até a chegada em residências.
 Fonte: <https://www.portalamirt.com.br/amirt/entenda-como-e-feita-a-migracao-da-radio-am-para-fm/>. Acesso: nov. 2019.

Ainda sob a perspectiva de Carron e Guimarães (2000),

“As ondas eletromagnéticas são sempre ondas transversais e obedecem às características das ondas em geral, com exceção do fato de se propagarem no vácuo, onde todas as ondas eletromagnéticas têm a mesma velocidade, $c = 300.000 \text{ km/s}$. Portanto, A luz pode se propagar no vácuo pois é uma onda eletromagnética, porém, o som só se propaga em meios materiais, pois é uma vibração na matéria.(p. 197)”

Das ondas em geral, as periódicas apresentam especial interesse, seja pela facilidade de descrição, seja pelas aplicações práticas. Então, para o melhor entendimento, analisaremos as ondas periódicas unidimensionais (figura 6).

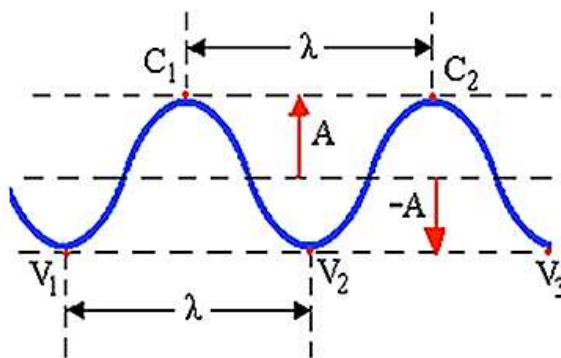


Figura 6: perfil de uma onda periódica unidimensional.
 Fonte: <https://alunosonline.uol.com.br/fisica/ondas-periodicas.html>. Acesso: nov. 2019

Logo, podemos destacar os elementos de uma onda periódica segundo Carron e Guimarães (2000) a partir de alguns exemplos abaixo:

Amplitude da onda (A): algumas vezes, as ondas de água sobre o oceano têm alguns metros de altura, mas em uma bacia, são pequenas. Por amplitude de uma onda entendemos a altura de sua crista em relação ao nível médio, estando relacionada com a energia transportada pela onda.

Frequência (f): É o número de oscilações executadas por qualquer ponto da corda, por unidade de tempo. Supondo que você esteja numa canoa amarrada a um cais e que as ondas elevem e abaixem a canoa rapidamente. A frequência é o número de ondas que passam pela canoa a cada segundo.

Período (T): Corresponde ao tempo, de uma oscilação completa de qualquer ponto da corda. Os pontos, C_1 e C_2 são denominados de cristas e os pontos V_1 e V_2 são chamados de vale. O período de uma onda periódica é o inverso da frequência, sendo assim:

$$T = \frac{1}{f}$$

No sistema internacional (S.I), a unidade de período é o segundo (s) e da frequência é o hertz (Hz). A frequência de uma onda é a frequência da fonte a produziu, não variando, portanto, durante sua propagação.

Comprimento de onda (λ). O comprimento de onda é a distância entre duas cristas ou dois vales consecutivos. As ondas periódicas, são periódicas no tempo e no espaço, como não transportam matéria em seu movimento, é previsível que as ondas se desloquem com velocidade contínua, logo estas devem ter um deslocamento que valide a expressão:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Podemos fazer que, $\Delta s = \lambda$ e que $\Delta t = T$. Sendo assim:

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

Onde, $T = \frac{1}{f}$. Logo:

$$v = \frac{\lambda}{\frac{1}{f}}$$

Portanto,

$$v = \lambda \cdot f$$

Essa é a equação fundamental da Ondulatória, já que é válida para todos os tipos de onda. A velocidade de propagação é característica do meio. Para ondas de mesmo tipo, num mesmo meio, teremos mesma velocidade, então, se o meio mudar, muda também a velocidade da onda. Portanto, esses foram os conceitos, leis e teorias que necessitávamos para dar prosseguimento em nosso estudo. Tudo que foi visto será de suma importância para entendermos, por exemplo, o que é um raio-x e quais as suas características. Portanto, agora que temos uma noção do que é a ondulatório, devemos seguir para o segundo capítulo, onde estudaremos a física moderna.

2.2. Recapitulando a física moderna

Segundo Carron e Guimarães (2000),

“Durante os últimos anos dos séculos XIX e os primeiros do século XX foram cheios de observação de novos fenômenos e indagações nos vários ramos da física, os quais botaram em prova a mais poderosa e concreta teoria que tínhamos, a mecânica clássica. Nessa época, muitos cientistas, entre elas Lord Kelvin, achavam que a física como ciência, era “uma pintura que estava em fase final de acabamento e dependeria de apenas mais alguns retoques”, porém ainda estávamos longe dessa “fase de polimento”.”(CARRON e GUIMARÃES, 2000. p. 302).

Diante disso, alguns fenômenos não evidenciados com precisão, a exemplo dos aspectos teóricos do eletromagnetismo, contrataram tal ideia. Prova disso foi a apresentação de Einstein em 1905, num periódico científico, propondo com postulados simples um esclarecimento para a questão do eletromagnetismo. Outros físicos da época também haviam feito tentativas nesse sentido, mas a formulação de Einstein destacou-se pela simplicidade.

“No entanto, restavam muitas perguntas no mundo do infinitamente pequeno, muitas dúvidas no mundo microscópico, a estrutura do átomo, como exemplo. Aprimorando os trabalhos de Rutherford, Niels Borhr (1885-1962) propôs, em 1913 um modelo atômico quantizado, elucidando questões sobre a natureza da matéria. (CARRON e GUIMARÃES, 2000. P.302)”

2.3. O átomo de Bohr

Introduziremos este tópico de discussão utilizando o exemplo de Carron e Guimarães (2000) acerca do estudo da estrutura atômica.

“Imagine uma caixa fechada cujo conteúdo é desconhecido. Tentando investigar o seu interior, mas sem abri-la, efetuam-se alguns disparos contra a caixa. Alguns projéteis se desviam mais, outros menos, alguns voltam. A partir do espalhamento sofrido pelos projéteis pode-se ter uma idéia do conteúdo. Essa foi a idéia do físico Ernest Rutherford, que usou as partículas α como projéteis. A radioatividade revelou-se uma poderosa munição para se investigar o átomo, tanto no sentido figurado como no literal.” (CARRON e GUIMARÃES, 2000. p.306).

Os autores utilizam-se do exemplo para que, de forma didática, o aluno possa compreender a estrutura do átomo a partir da utilização de um contexto imaginético em que os mesmos comparam a estrutura do átomo com um objeto, e sua respectiva estrutura com elementos existentes dentro da caixa.

Em 1991, segundo Carron e Guimarães (2000), as experiências de Rutherford sobre a estrutura do átomo apontaram para um modelo atômico semelhante ao sistema solar que, por isso, às vezes é chamado de modelo “planetário” do átomo. O modelo de Rutherford mostrava o átomo formado por uma região central muito pequena, denominada de núcleo, circundada por elétrons. Os elétrons movimentam-se em torno do núcleo em órbitas cujos diâmetros são da ordem de 10^{-10} m. Esse modelo esbarrou em algumas contradições da Física Clássica pelo menos em dois aspectos, segundo eles:

“Uma carga elétrica acelerada deveria irradiar energia eletromagnética continuamente; cedendo continuamente energia, os elétrons atingiriam o núcleo após certo tempo, assim o sistema entraria em colapso. A estimativa mais otimista da duração desse tempo era de 1 milionésimo de segundo.” Variando-se o raio da órbita de um elétron, seria possível obter uma infinidade de frequências, embora os experimentos realizados com o átomo de hidrogênio apresentassem um espectro de emissão com somente algumas linhas bem-definidas.” (CARRON e GUIMARÃES, 2000. p. 307).

Essas contradições levaram a concepção atômica para outra direção. Em 1913, o físico dinamarquês Niels Bohr, que já trabalhara sob orientação de Rutherford, publicou novas idéias, procurando esclarecer essas contradições.

A primeira hipótese de Bohr foi que o elétron tem órbita circular em torno núcleo, que tem carga $+e$ (1 próton), sob a ação da força elétrica que pode ser expressa pela lei de coulomb (veja figura 7):

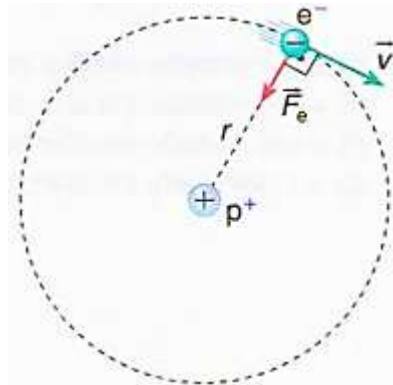


Figura 7: órbita circular de um elétron em torno do núcleo.

Fonte: https://www.if.ufrgs.br/~betz/iq_XX_A/modBohr/aModBohrFrame.htm. Acesso: nov. 2019.

$$F_e = k \frac{e^2}{r^2} \quad (2.1)$$

A seguir, Bohr fez sua primeira hipótese revolucionária, o 1º postulado de Bohr:

“O raio da trajetória não pode ter qualquer valor, isto é, somente certas órbitas são possíveis. Essas órbitas são chamadas estados estacionários e enquanto está nessas órbitas, o elétron não emite energia.”

Bohr utilizou as equações da Física Clássica para expressar a energia em cada órbita. A força elétrica desempenha o papel da força centrípeta. Portanto, sendo m a massa do elétron:

$$\begin{aligned} F_e &= F_c \\ k \frac{e^2}{r^2} &= \frac{mv^2}{r} \\ mv^2 &= k \frac{e^2}{r} \end{aligned} \quad (2.2)$$

A energia cinética do elétron é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Logo,

$$E_c = \frac{ke^2}{2r} \quad (2.3)$$

A energia potencial do elétron é dada por:

$$E_p = -\frac{ke^2}{r} \quad (2.4)$$

Assim, a energia total é:

$$\begin{aligned} E &= E_c + E_p \\ E &= \frac{ke^2}{2r} - \frac{ke^2}{r} \\ E &= -\frac{ke^2}{2r} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Como a energia total é negativa e r aparece no denominador, vemos que, quanto mais longe o elétron estiver do núcleo, maior será a energia total. Em seguida, Bohr admitiu que o elétron só emite energia quando passa de uma órbita possível para outra órbita mais interna (veja figura 8). Sendo E_i a energia na órbita inicial e E_f a energia na órbita final, durante o salto o elétron emite um fóton de energia E e frequência f tais que:

$$E = E_i - E_f = hf$$

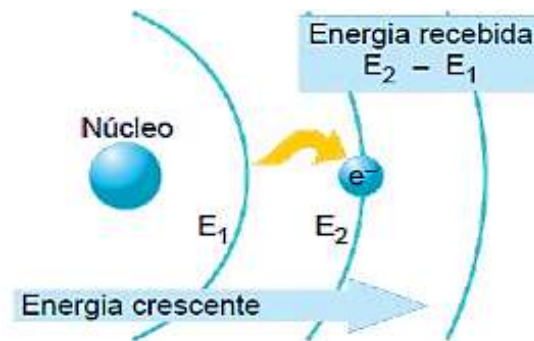


Figura 8: salto dos elétrons, *o quantum*.

Fonte: <https://medium.com/@easyquimica/de-onde-vem-a-cor-29c7af5d38c0>. Acesso: nov. 2019

Os elétrons podem saltar de um nível para o outro mais externo, desde que absorva uma quantidade bem definida de energia (quantum de energia). Ao voltar ao nível mais interno, o elétron emite um quantum de energia, uma forma de luz de cor bem definida ou outra radiação eletromagnética (fóton) (ver figura 9).

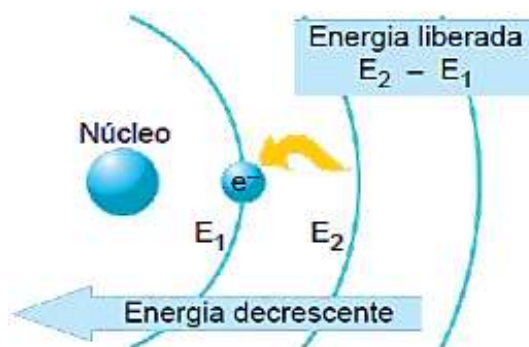


Figura 9: salto dos elétrons, o fóton.

Fonte: <https://medium.com/@easyquimica/de-onde-vem-a-cor-29c7af5d38c0>. Acesso: nov. 2019.

2º Postulado de Bohr:

O momento angular do elétron pode assumir apenas valores múltiplos inteiros da constante de Planck dividida por 2π .

Em outras palavras, o momento angular é quantizado, podendo assumir apenas valores iguais a $nh/2\pi$, onde n é um número inteiro ($n = 1, 2, 3, \dots$). Portanto, de acordo com a hipótese de quantização do momento angular, temos:

$$L = mrv = n \frac{h}{2\pi}$$

Dessa igualdade, obtemos:

$$v = \frac{nh}{mr(2\pi)}$$

Substituindo essa expressão de v na equação (2.2), teremos a equação para os raios quantizados das órbitas de Bohr para o hidrogênio:

$$r_n = \frac{h^2}{4\pi^2 m k e^2} \cdot n^2 \quad (2.6)$$

Substituindo (2.6) em (2.5), a equação para a energia total do elétron:

$$E_n = -\frac{2\pi^2 m k^2 e^4}{h^2} \left(\frac{1}{n^2} \right) \quad (2.7)$$

Substituindo os valores das constantes, usando como unidade de energia o elétron-volt, o modelo de Bohr permite mostrar que a energia de ligação referente ao nível n de energia é dada por:

$$E_n = (-13,6) \left(\frac{1}{n^2} \right) eV \quad (2.8)$$

Onde, para o estado fundamental, temos $n = 1$; logo $E_1 = -13,6 eV$. Para ter o elétron separado do átomo, devemos ter $n \rightarrow \infty$, e o átomo estará ionizado. Nesse caso, $E = 0$, ou seja, não há energia de ligação.

Quando um elétron muda de um estado estacionário para outro, de energia diferente, há em correspondência a emissão de um fóton, cuja frequência pode ser obtida por:

$$f = \frac{E_{inicial} - E_{final}}{h}$$

O fóton é emitido quando $E_{inicial} > E_{final}$; em caso contrário, ele é absorvido; essa hipótese explica tanto o espectro de emissão quanto o de absorção, pois ambos são descontínuos. A energia referente a uma transição genérica do nível n_1 para o nível n_2 é expressa por:

$$\Delta E_{1,2} = -13,6 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

Observe que, se $n_2 > n_1$, temos $\Delta E_{1,2} < 0$, que corresponde à absorção de energia. Em caso contrário, temos a emissão de um fóton, cuja energia é:

$$\Delta E_{1,2} = h \cdot f$$

Onde, a constante h na expressão acima do átomo de Bohr é a mesma usada por Planck em seu trabalho sobre a radiação do corpo negro. É importante ressaltar que, as possíveis transições de um elétron quando há mudança em seu nível de energia, até $n = 6$, são conhecidas. Cada família de transições é uma série (veja figura 10). A série de Balmer refere-se à região do visível do espectro.

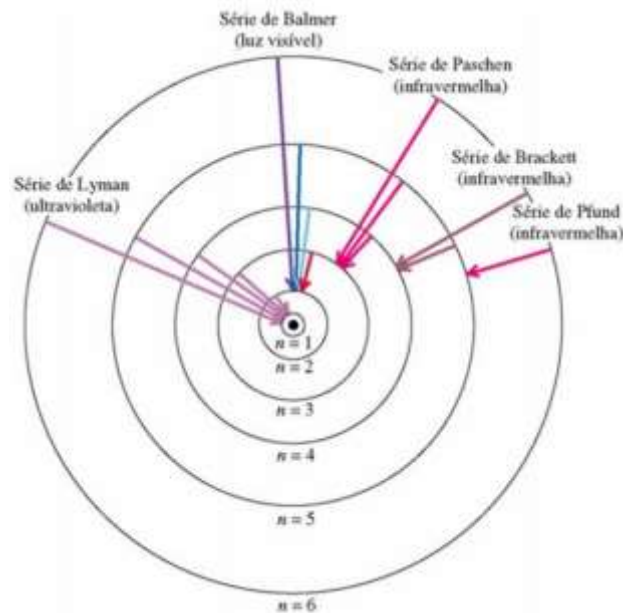


Figura 10: Possíveis transições de um elétron, até $n = 6$.

Fonte: <http://professor.ufabc.edu.br/~joseantonio.souza/wp-content/uploads/2015/02/Introdu%C3%A7%C3%A3o-F%C3%ADsica-Moderna-2014.pdf>. Acesso: nov.2019.

2.4. Estudo das radiações

Em 1898, o casal Pierre e Marie Curie obteve êxito em separar 1g de uma substância radioativa desconhecida, a partir de 1 tonelada de minério, essa substância ficou conhecida como polônio, em homenagem a Marie Curie, que era polonesa. Por seu trabalho, o casal Curie recebeu, com Becquerel, o prêmio Nobel da Física de 1903. Mais tarde em 1911, Marie Curie recebe o prêmio Nobel de Química pela descoberta de outro elemento radioativo, o rádio.

A radioatividade revelou-se uma das sementes mais férteis da Física Nuclear, tanto no campo experimental como nas formulações teóricas. Dentro do mundo do átomo, outro misterioso e minúsculo mundo começava a se revelar: as regiões nucleares, envolvendo energias de ligação milhões de vezes maiores. Uma região cuja comparação com o tamanho do átomo era a “mosquinha dentro da catedral”. Com esse conhecimento, o ser humano começou a explorar as energias liberadas nos processos nucleares com engenhosos dispositivos.

Classificação das Radiações:

- Radiação Ionizante

Em nosso dia a dia, estamos sendo bombardeados radiações, como exemplo pelo sol, que emite radiação ultravioleta, infravermelha e a própria luz visível. As radiações ionizantes, são as radiações que possuem energia suficiente para ionizar, ou seja, para arrancar elétrons da camada do átomo e de moléculas, dessa forma alterando sua estrutura.

As radiações ionizantes mais conhecidas são os raios X, usados em exames médicos, como por exemplo, no diagnóstico por imagem e no tratamento. Assim como temos as radiações alfa, beta e gama, quais são outros tipos de radiações ionizantes (ver Figura 11).

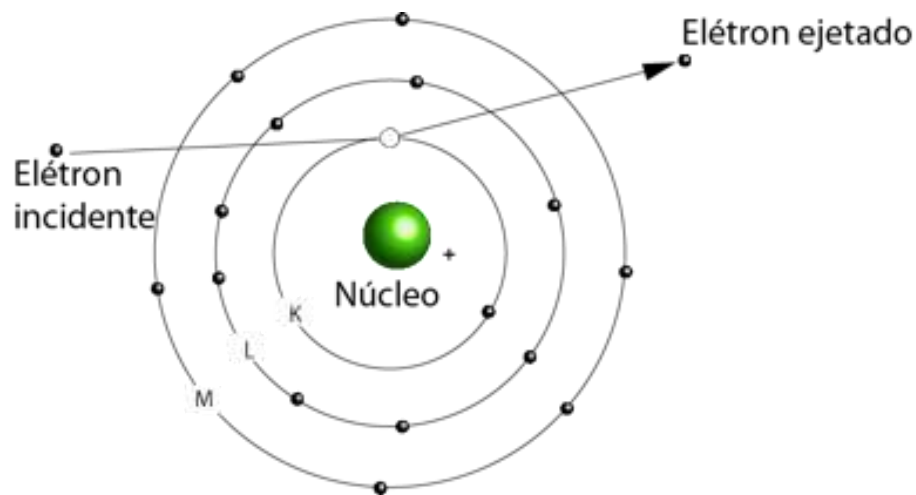


Figura 11: Radiações Ionizante, são as que possuem energia suficiente para ionizar, ou seja, para arrancar elétrons da camada do átomo. Ex: alfa, beta, gama e raios X.

Fonte: <http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/index.php/medicina-nuclear/principios-fisicos-em-radiologia-mn/interacao-da-radiacao-ionizante-com-a-materia>. Acesso: nov. 2019.

Como já foi dito, cada radiação vai penetrar conforme for seu tipo e energia. Como veremos abaixo, as partículas alfa são as que tem o menor poder de penetração, podendo ser facilmente bloqueadas por uma folha de papel, já as partículas beta conseguem atravessar uma folha de papel, porém são bloqueadas por alguns milímetros de alumínio, enquanto isso, a radiação que tem o maior poder de penetração é a radiação gama, sendo bloqueada apenas por materiais mais densos, como por exemplo, chumbo (veja figura 12).

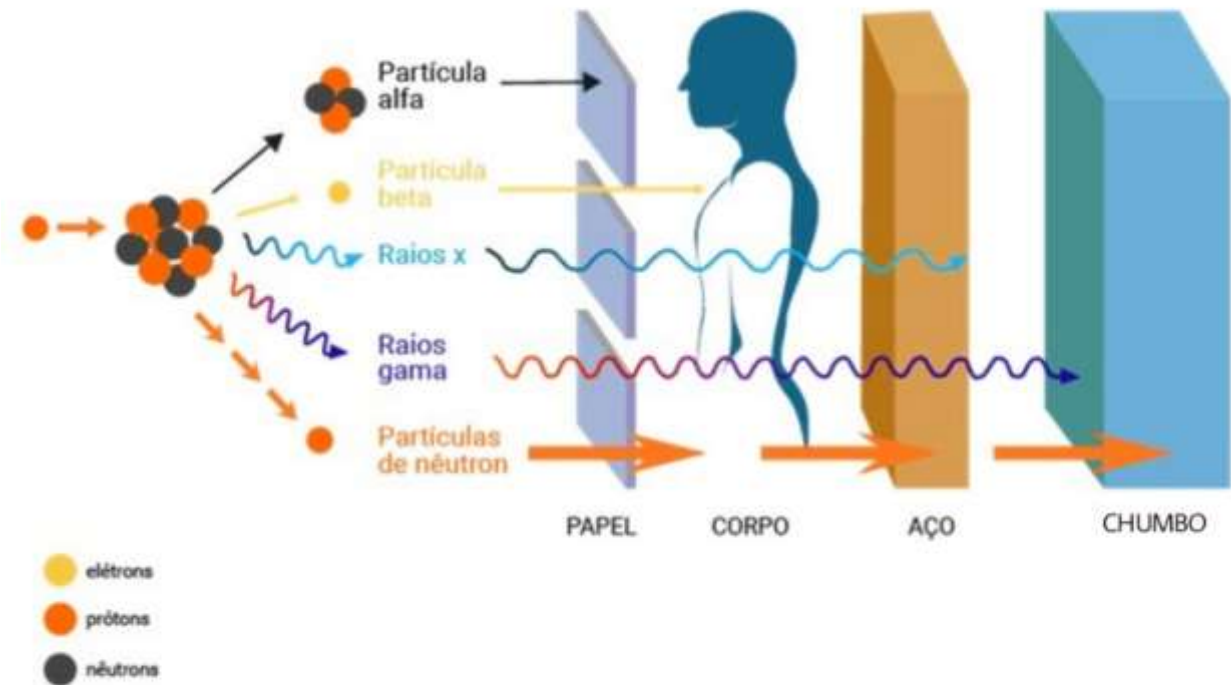


Figura 12: o poder de penetração de diferentes tipos de radiação.

Fonte: <https://radioprotecaonapratca.com.br/efeitos-da-radiacao-no-corpo-humano/>. Acesso: nov. 2019

- Radiação não-ionizante

São radiações que não possuem energia suficiente para arrancar elétrons da camada do átomo, tendo menor energia do que as radiações ionizantes, geralmente seu efeito é a geração de calor ou luz. Como exemplo de radiação não ionizante, temos: Televisão, rádio, micro-ondas, ultravioleta, infravermelho, luz, etc (ver figura 13).

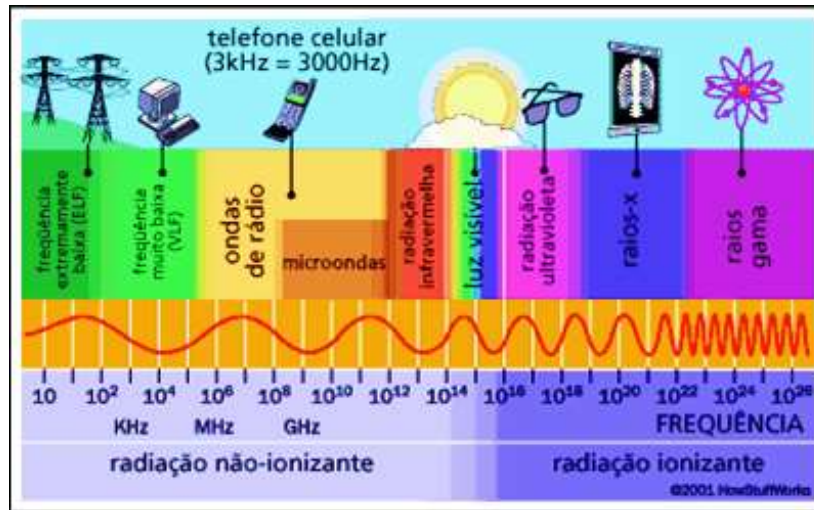


Figura 13: Espectro eletromagnético, é uma escala de radiações.

Fonte: <https://www.direcaoivre.com/ondas-eletromagneticas-o-que-e/>. Acesso: nov. 2019.

2.5. Momento linear do fóton

Na perspectiva de Sampaio e Calçada (2005), o fóton não existe em repouso e, portanto, não tem massa de repouso. Porém, como possui energia, podemos atribuir a ele uma massa dada pela equação de Einstein:

$$E = mc^2$$

$$m = \frac{E}{c^2}$$

Como a energia do fóton é dada por,

$$E = h \cdot f$$

Temos que,

$$m = \frac{hf}{c^2}$$

A quantidade de movimento de uma partícula de massa m e de velocidade v é dada por:

$$p = mv = \frac{hf}{c^2} c$$

$$p = \frac{hf}{c}$$

$$p = \frac{E}{C}$$

Como,

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Obtemos,

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Em 1924, o físico francês Louis De Broglie propôs que as partículas materiais em movimento também poderiam se comportar como ondas. Sugeriu então, que poderíamos atribuir a uma partícula um comprimento de onda dado pela mesma equação que vale para o fóton.

Einstein também utilizou a constante de Planck ao explicar o efeito fotoelétrico, com o qual foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física, Trabalhando em diferentes teorias, cada um deles chegou ao mesmo *quantum* de ação da energia na natureza, corroborando a idéia da quantização. Esses foram os primeiros passos de uma nova teoria que estava surgindo, a Mecânica Quântica.

2.6. Efeito fotoelétrico

Segundo Carron e Guimarães (2000), o efeito fotoelétrico consiste no fato de que metais, quando banhados por energia radiante, chegam a emitir elétrons. As células fotoelétricas, são amplamente utilizadas hoje no controle de portas de elevador, em aparatos de segurança, na cronometragem etc.

Os autores também afirmam que, a explicação correta para o efeito fotoelétrico foi proposta por Einstein, (prêmio Nobel de Física de 1921): a energia chega aos elétrons em “pacotes” e não continuamente, como se pensava na visão ondulatória clássica. Cada “pacote” é um *quantum* de energia, O modelo elaborado por Einstein passou a ser conhecido como teoria dos *quanta*. Os *quanta* de energia radiante foram batizados de fótons, pacotes mínimos de energia das ondas eletromagnéticas.

Segundo Carron e Guimarães (2000), no efeito fotoelétrico, os fótons interagem com a matéria como se fossem partículas, mas a propagação deles no espaço tem um comportamento ondulatório (veja figura 14).

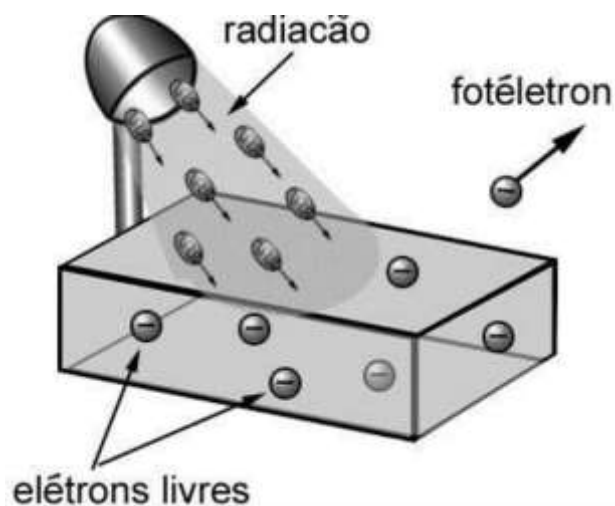


Figura 14: O efeito fotoelétrico ocorre quando uma placa metálica é exposta a uma radiação eletromagnética de frequência alta, por exemplo, um feixe de luz, e este arranca elétrons da placa metálica.

Fonte: <https://aminoapps.com/c/tudo-sobre-ciencia/page/blog/o-efeito-fotoeletrico/>. Acesso: nov. 2019.

A energia de cada fóton é dada por:

$$E = hf$$

Onde, nessa expressão,

E → É a energia do Fóton

f → É a frequência do fóton

h → É a constante de Planck, que no sistema internacional (SI) vale $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.

Segundo Sampaio e Calçada (2005), cada elétron ligado a um metal interage com o núcleo por uma força atrativa; assim, ele precisa receber uma quantidade mínima de energia para ser extraído. Se a energia de cada fóton não supera a quantidade mínima, o efeito não acontece. O elétron só é extraído quando a energia de cada fóton supera o valor mínimo exigido. Esse raciocínio explica porque o efeito fotoelétrico não depende da distância da fonte de energia radiante ao metal, mas sim da frequência da radiação incidente.

Ainda sob a visão dos autores, a energia mínima para se extrair um elétron da placa metálica é chamada de **função trabalho** (w) e depende do tipo de metal que se está utilizando. Demonstrou também que a velocidade com que os elétrons são ejetados não depende da quantidade de fótons emitidos, e sim da frequência que esses fótons possuem. Sendo E_f a energia do fóton, E_c a energia cinética adquirida pelo elétron e W o trabalho realizado para “arrancar” o elétron, temos:

$$E_f = E_c + w \quad (2.8.1)$$

A energia do fóton é dada por:

$$E_f = h \cdot f \quad (2.8.2)$$

No efeito foto elétrico a velocidade adquirida pelo elétron é muito menor do que a da luz, sendo assim, podemos utilizar a equação clássica para a energia cinética:

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (2.8.3)$$

Portanto, substituindo as equações (2.8.2) e (2.8.3) em (2.8.1), teremos:

$$hf = \frac{1}{2} mv^2 + w$$

O trabalho mínimo necessário para “arrancar um elétron é chamado de função trabalho e será representado por W_0 . Neste caso, a energia cinética terá seu valor máximo ($E_{c_{\text{máx}}}$):

$$hf = E_{c_{\text{máx}}} + W_0 \quad (2.8.4)$$

Se a frequência for a de corte, teremos energia cinética nula:

$$hf_c = W_0 \quad (2.8.5)$$

Da equação (2.8.4), tiramos:

$$E_{c_{m\acute{a}x}} = hf - W_0 \quad (2.8.6)$$

Portanto, se fizermos um gráfico da energia cinética do elétron extraído, em função da frequência do fóton incidente, devemos obter uma semi-reta de coeficiente angular h , como h é uma constante universal, para todos os metais, as semi-retas devem ter a mesma inclinação, ou seja, elas são paralelas (ver figura 15).

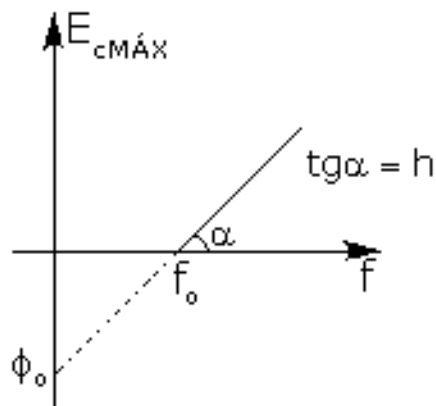


Figura 15: gráfico da energia cinética em função da frequência.
Fonte: <https://www.docsity.com/pt/fisica-moderna-/>. Acesso: nov. 2019.

A frequência mínima do fóton incidente necessária para produzir o efeito fotoelétrico é f_0 . Portanto, para frequências menores que f_0 , o efeito não ocorre. Além disso, observe que, a tangente do ângulo α é numericamente igual a constante de Planck ($tg\alpha \stackrel{N}{=} h$).

2.7. Efeito Compton

Silva e Freire Jr. (2014) narram que em 1923 o físico norte-americano Arthur H. Compton usou o modelo dos fótons para explicar os resultados dos seus experimentos de espalhamento de raios X por alvos de grafita. Outro autor que também contribuiu com a fala de Silva e Freire Jr. (2014) é Silva (2014) ao criar uma situação problema que explique o choque entre um raio X com um elétron. Segundo ele,

“O que acontece quando um fóton de raio X se choca com um elétron em um pedaço de grafita? Imaginem uma mesa de sinuca, onde há duas bolas colidindo,

semelhantemente, o fóton de raio X é espalhado em uma direção enquanto o elétron em outra direção. (SILVA, 2014).”

Compton consegue explicar a natureza corpuscular da radiação experimentalmente em 1923. Em experimento realizado por Compton, um fóton de raios X colide com um elétron em repouso. Após a colisão o fóton e o elétron se movem em direções distintas (veja figura 16).

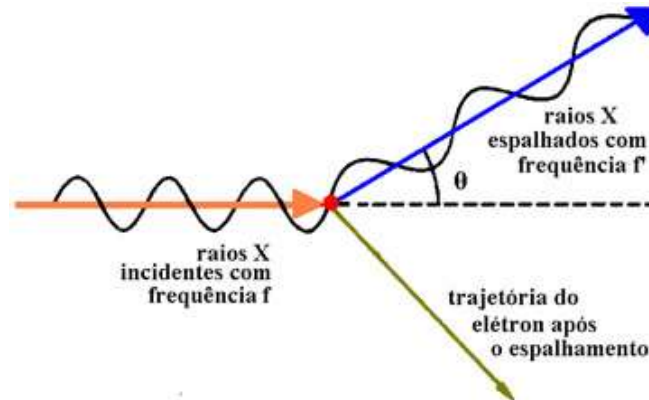


Figura 16: O Efeito Compton.

Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/efeito-compton.htm>. Acesso: nov. 2019.

O fenômeno de espalhamento de um fóton por um elétron no qual o fóton tem uma frequência menor que fóton incidente é chamado de efeito Compton. Compton desenvolveu a teoria do espalhamento de raios X, se baseando nas seguintes hipóteses:

- O espalhamento pode ser interpretado como uma colisão entre um fóton de raio X e um elétron do material alvo;
- Como a energia de um fóton de raio X é muito maior que as energias cinéticas e potenciais de um elétron na matéria, podemos desprezar estas energias e considerar o elétron como livre e inicialmente em repouso;
- A energia e o momentum linear são conservados na colisão;

De acordo com a lei de conservação da energia,

$$hf = hf' + E_c$$

Onde,

hf → Energia do fóton incidente.

hf' → Energia do fóton espalhado.

E_c → Energia cinética do elétron espalhado.

Compton observou que, o fóton espalhado tem uma frequência f' que é menor que a frequência f do fóton incidente, uma indicação de que o fóton perde energia na colisão, logo o comprimento de onda dos raios X espalhados é maior que o comprimento de onda dos raios X incidentes. Além disso, o cientista descobriu que a diferença entre as duas frequências depende do ângulo θ entre a trajetória do fóton incidente e o fóton espalhado.

De acordo com lei de conservação do momento linear,

$$\begin{array}{ccccc} \text{Momento do} & & \text{Momento do} & & \text{Momento do} \\ \text{fóton incidente} & = & \text{fóton espalhado} & + & \text{elétron espalhado} \end{array}$$

Como já vimos anteriormente, o módulo do momento é:

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Compton mostrou que a diferença entre o comprimento de onda do fóton espalhado e o comprimento de onda do fóton incidente estão relacionados ao ângulo de espalhamento através da equação:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos\theta)$$

Onde,

$m \rightarrow$ massa do elétron.

$\frac{h}{mc} \rightarrow$ comprimento de onda de Compton do elétron.

Portanto, o efeito fotoelétrico e o efeito Compton constituem provas categóricas de que a luz pode exigir características corpusculares atribuídas a pacotes de energia conhecidos como fótons. No efeito Compton, o elétron é espalhado porque absorve parte do momento do fóton.

III SEÇÃO

3.1. Aplicação da Física à Medicina

Uma aplicação muito importante dos raios X é no diagnóstico médico. Com o desenvolvimento das radiografias, tornou-se possível diagnosticar pequenas anormalidades nos tecidos, como as fraturas ósseas (Ver figura 17). Radiografias de cavidades, como os pulmões, são particularmente eficientes, pois o ar é bem mais transparente que os tecidos biológicos, permitindo um alto contraste. Em vista disso, pouco depois de serem descobertos, os raios X se transformaram no mais importante meio de diagnóstico por imagem da tuberculose.



Figura 17: As imagens obtidas quando o corpo é atravessado por raios X são chamadas de radiografias. Fonte: <https://br.depositphotos.com/stock-photos/bra%C3%A7o-raio-x.html>. Acesso: nov. 2019.

Análise de um tubo radiológico

A formação de um tubo de RX é dada por uma cápsula a vácuo, constituída de metal ou vidro, a finalidade do vácuo é evitar que os elétrons colidam com as moléculas de gás durante o caminho do catodo para o anodo, garantindo, portanto, um isolamento elétrico eficaz. A cápsula é revestida por uma cúpula, a qual tem a função de isolá-la do ambiente externo. Segundo Nersissian (2012), a cúpula é coberta inteiramente por uma camada chumbo, deixando apenas em aberto uma janela utilizada para a saída dos raios X, esse revestimento em chumbo tem como finalidade bloquear outros raios X que foram emitidos em outras direções, pois eles são emitidos

em várias direções depois de sua formação no anodo. Por essa janela saem os fótons de raios X que são chamados de feixe útil.

Durante a produção desse feixe é gerado bastante calor, devido a isso faz-se necessário o uso de um sistema de resfriamento dentro da cúpula, tal resfriamento pode ser realizado através de óleo, água ou ar. O óleo atua como isolante térmico, para não deixar acontecer um superaquecimento, porém quando ocorre um grande aquecimento do óleo, há na cúpula uma parede com capacidade de dilatação (Veja figura 18).

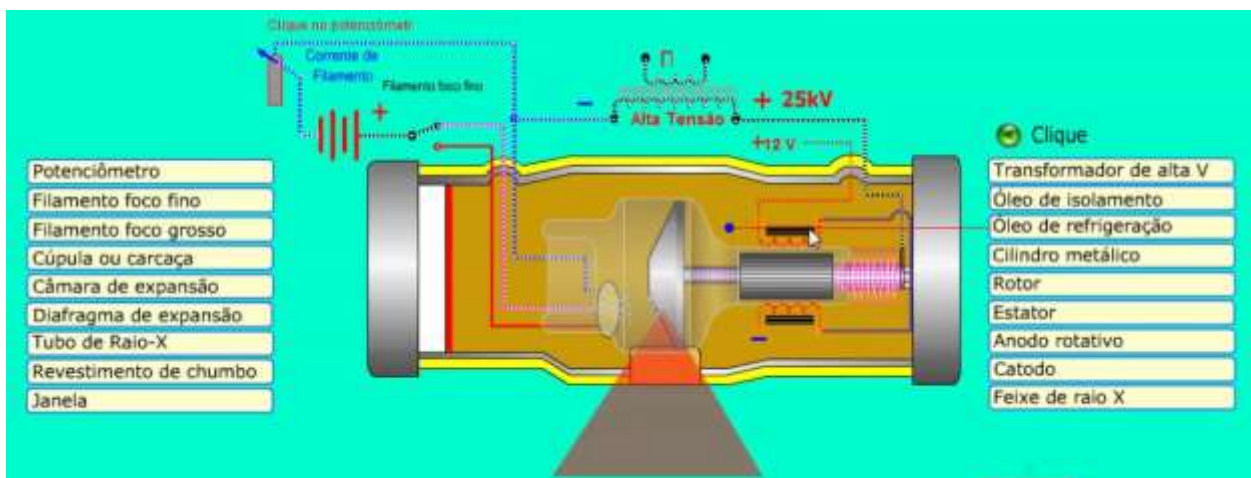


Figura 18: partes internas de um tubo de raio X refrigerado com óleo.
Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=hiEXCAj4kQI>. Acesso: nov. 2019.

Mas, como o raio-x é de fato produzido? Nersissian (2012) também afirma que tal radiação é produzida quando ocorre o bombardeamento de um material metálico de alto número atômico (tungstênio), resultando na produção de radiação X por freamento ou ionizações. Ou seja, quando os elétrons saem do catodo eles irão colidir em uma área no anodo, chamada de ponto focal, essas interações são trocas de energia cinética dos elétrons para os átomos do material do anodo. Essa energia de movimento, é convertida para o anodo na forma de energia térmica, ou seja, calor ou ainda em forma de energia eletromagnética, como radiação infravermelha ou raios X, estes últimos podem ser radiação característica ou de freamento.

Produção de calor

Inicialmente, observa-se que quando há a ocorrência da interação nas camadas mais externas do átomo, a energia cinética é convertida em radiação infravermelha. Haja vista que essa

energia faz com que o elétron salte para uma camada mais energética, contudo, imediatamente o elétron retorna ao estado fundamental liberando assim, radiação infravermelha (ver figura 19).

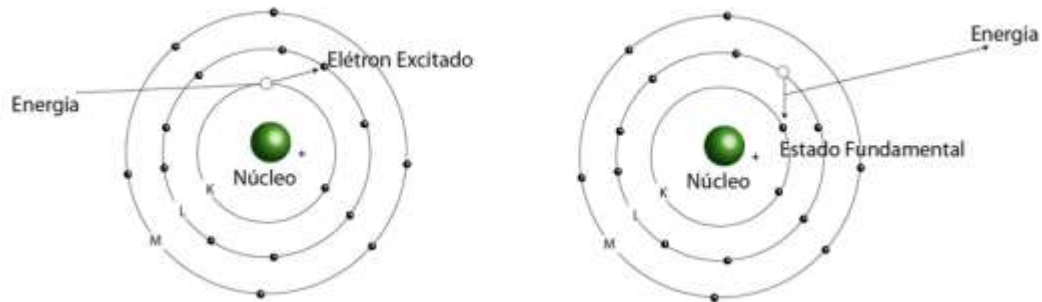


Figura 19: Emissão de radiação infravermelha

Fonte: <https://medium.com/@easyquimica/de-onde-vem-a-cor-29c7a>. Acesso: nov. 2019

Ainda sob a perspectiva de Nersissian (2012), quando os elétrons colidem com o alvo, aproximadamente 99% das suas energias cinéticas são convertidas em forma de calor e apenas 1% é utilizada na produção de raios X. Tal calor intenso dificulta a quantidade de fótons de raios X a serem produzidos em um dado intervalo de tempo sem que o alvo seja destruído.

Raio x característico

Quando a interação ocorre nas camadas mais internas do átomo, se o valor da energia transferida for igual a da energia que mantém o elétron nesta camada, ele será ejetado da sua camada fazendo com que fique um buraco, essa vacância que sobrou é ocupada por um elétron de uma camada de maior nível energético, durante esse processo é liberado energia em forma de raios X característico (veja figura 20).

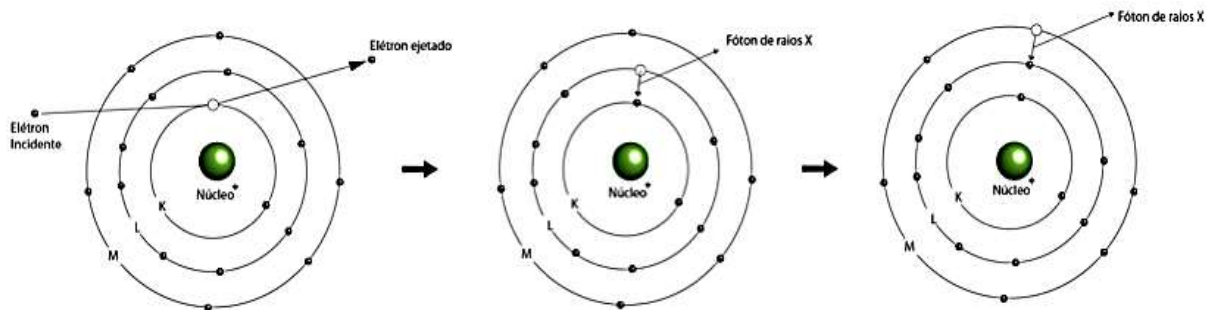


Figura 20: Emissão de RX característicos.

Fonte: <https://medium.com/@easyquimica/de-onde-vem-a-cor-29c7>. Acesso: nov. 2019.

Portanto, o raio X característico é produzido por energias específicas, ou seja, quando a energia transferida for igual a diferença entre a energia na orbita inicial e a energia na orbita final. Geralmente o material utilizado no anodo do tubo de raios X é o tungstênio, produzindo assim, os raios característicos de tungstênio.

Raios x de freamento

Quando a interação dos elétrons ocorre com o núcleo do átomo, a energia cinética do elétron é convertida em energia eletromagnética, na forma do que chamamos de raio X de freamento (*bremstrahlung*). Segundo Nersissian (2012), quando o elétron incidente se aproxima do núcleo que contém prótons, o elétron é atraído pelo próton, devido uma força de atração entre eles, fazendo que o elétron perca velocidade e assim mudança em seu trajeto. Durante o procedimento, a energia cinética perdida é convertida em RX de freamento e o elétron segue seu novo trajeto, ao final o valor da energia é igual a diferença entre a energia incidente e a energia cinética perdida (ver figura 21).

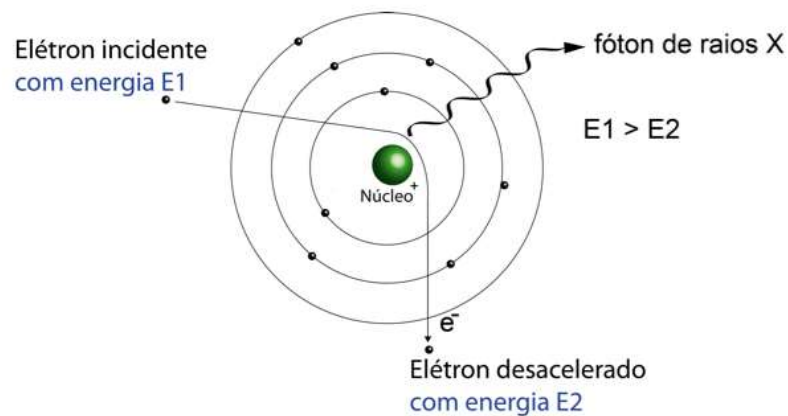


Figura 21: Emissão RX por freamento.

Fonte: <http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/index.php/radiologia-convencional/tecnologia-e-funcionamento-dos-equipamentosrx/tubo-de-raios-x/interacoes-no-anodo>. Acesso: nov. 2019.

A energia de RX de freamento varia de zero até a energia de pico, ou seja, a energia máxima que pode ser produzida, essa energia vai depender da tensão escolhida no painel de controle a qual será aplicada ao tubo de raios X. A energia cinética perdida é proporcional à distância de interação do elétron com o próton, que está preso ao núcleo do átomo. Pois, a força

de atração é inversamente proporcional ao quadrado da distância que separam essas partículas, então quanto menor for a distância, maior será a força de atração, causando assim, uma alteração no de trajeto do elétron consequentemente maior perda de energia, produzindo RX de freamento com altíssimas energias.

Interação com a Matéria

A interação da radiação com a matéria ocorre de forma probabilística por meio de cinco processos diferentes, sendo que na faixa dos raios X nos interessa apenas dois deles: o efeito fotoelétrico e o espalhamento Compton.

O efeito fotoelétrico, por sua vez, é de grande importância, ganhando destaque por ser encarregado pela produção das imagens, Talvez você se pergunte: Como assim? Para esclarecer, façamos as seguintes perguntas. Qual a aparência de nosso osso em uma imagem radiológica? Já observou que ele se apresenta mais claro que os outros tecidos em sua volta? Por qual motivo a imagem do pulmão é “preta” e do osso é “branca”? (Ver figura 22). O encarregado disso é o efeito fotoelétrico, vamos entender como isso acontece.



Figura 22: Radiografia simples de tórax

Fonte: <https://www.saudebemestar.pt/pt/imagiologia/radiografia-de-torax/>. Acesso: nov. 2019.

Quando ocorre a interação do fóton incidente com o átomo, o fóton é totalmente absorvido, deixando de existir, ele transfere toda sua energia a um elétron muito preso ao núcleo, que sai do átomo. Este elétron é chamado de fotoelétrico. Logo, o buraco que é deixado pelo

fotoelétron será ocupado por um elétron de uma camada acima, produzindo a radiação característica (veja figura 23).

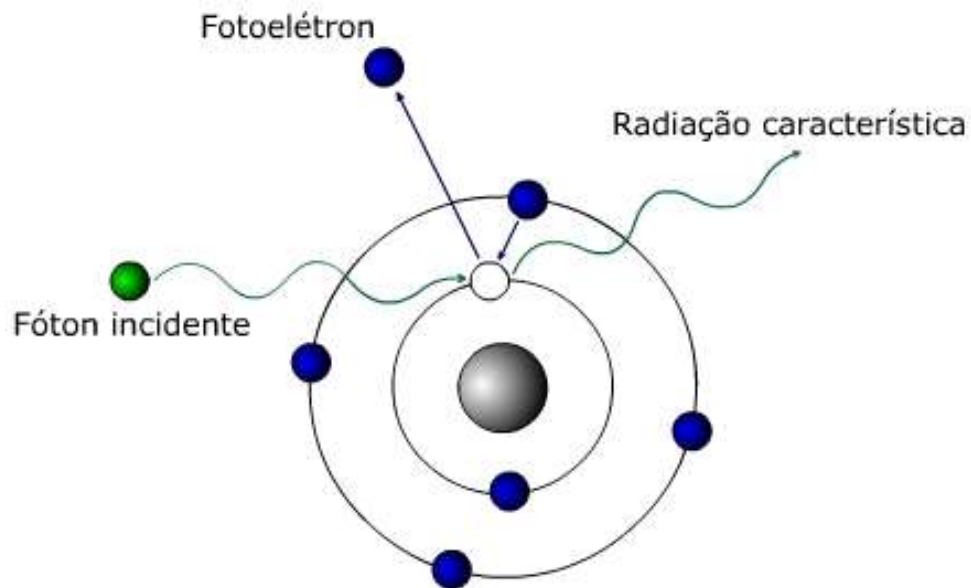


Figura 23: efeito fotoelétrico

Fonte: <http://abraham-radiologia.blogspot.com/2012/06/interacao-das-radiacoes.html>. Acesso: nov. 2019.

É importante destacar que, o efeito fotoelétrico é diretamente proporcional ao cubo do n° atômico do material absorvedor, interagindo com mais facilidade com materiais de alto número atômico. Devido a isso, na imagem radiográfica, o osso tem cor “branca”, pois tem maior número atômico, e o pulmão tem cor “preta” por ter menor número atômico. Além disso, osso é mais denso dificultando a passagem da radiação, assim o filme é pouco irradiado onde tem osso, ficando com a cor “branca”. Ao contrário do que acontece com o pulmão, o qual é menos denso, assim a uma facilidade na passagem da radiação, fazendo que no filme fique com uma cor escura.

Se por um lado o efeito fotoelétrico é tão almejado, por outro lado, adoraríamos que o espalhamento Compton não fosse realizado, pois acaba prejudicando a imagem radiográfica, fazendo com que fique borrada e diminuindo o contraste da imagem. Durante processo, um fóton de raios X ao colidir com um elétron pouco preso à camada, transfere parte da sua energia ao elétron após a colisão o fóton e o elétron se movem em direções distintas (veja figura 24).

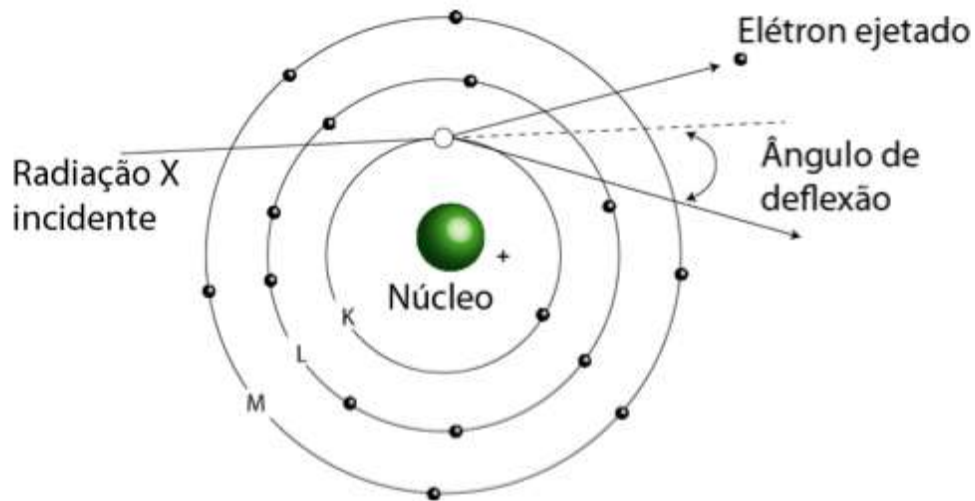


Figura 24: Efeito Compton

Fonte: <http://abrahamo-radiologia.blogspot.com/2012/06/interacao-das-radiacoes.html>. Acesso: nov. 2019.

Grade Antidifusora (Buck)

Também chamadas de Buck, as grades são utilizadas para barrar a radiação secundária melhorando o contraste da imagem (ver figura 25).

Radiação Primária – É a radiação emitida pelo aparelho no momento da realização do exame radiográfico. Possui pequeno comprimento de onda e grande poder de penetração, sendo direcionada pelos ângulos verticais e horizontais do aparelho. Os profissionais não devem se preocupar com a radiação primária, pois eles não ficarão entre o aparelho e o paciente durante o exame.

Radiação Secundária – A radiação primária atinge o paciente e ao interagir com ele pode emitir radiação ionizante originada desta interação, e esta radiação é chamada radiação secundária. Com esta radiação os profissionais devem estar atentos com relação à proteção, pois estarão expostos, caso não se tomem medidas preventivas.

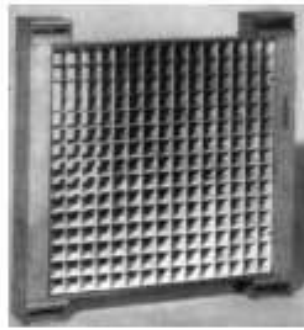


Figura 25: Grade Antidifusora

Fonte: <http://clickgratis.blog.br/radiologia/553593/equipamentos-radiologicos-parte-viii.html>. Acesso: nov. 2019.

Ainda segundo Nersissian (2012), a grade é composta de lâminas de material com alto poder de atenuação, porém, entre as lâminas, há um material de baixo poder de atenuação para não barrar a radiação primária, mesmo assim cerca de 40% da radiação primária é atenuada.

Filtros

Segundo Sousa (2017), os filtros servem para absorver os fótons de baixa energia, permitindo apenas que fótons de alta energia passem para formar a imagem, com isso aumentando a energia média dos fótons, tornando o feixe mais monoenergético, ou seja, para o aumento da sua energia efetiva e, conseqüentemente, aumento do seu poder de penetração, esses filtros são geralmente feitos de cobre ou alumínio. Portanto, o objetivo principal é filtrar a radiação de mais baixa energia, reduzindo a dose de radiação no paciente (ver figura 26).

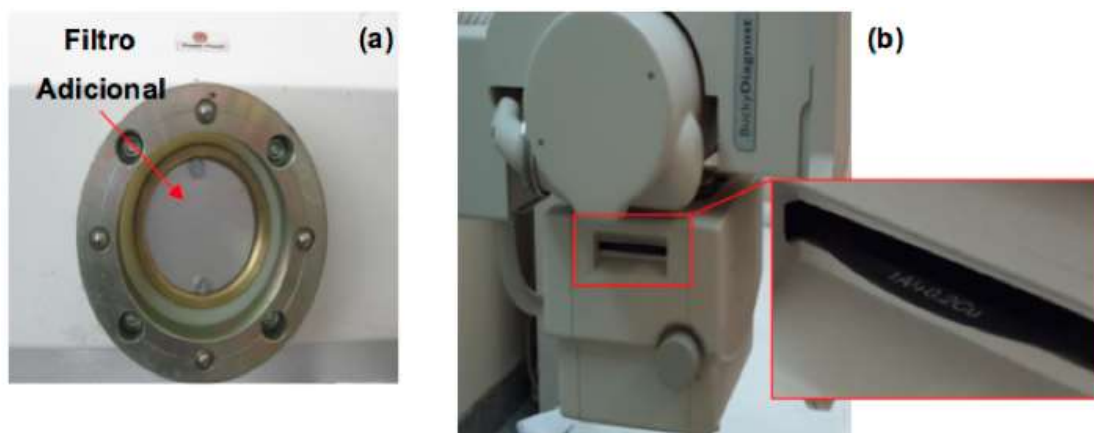


Figura 26: A radiação de baixa energia não contribui para a formação da imagem e é nociva ao paciente, então é utilizada na radiologia diagnóstica, um filtro de alumínio afim de atenuar a passagem desses raios.

Fonte: <http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/index.php/101-radiologia-convencional?start=48>. Acesso: nov. 2019.

Logo, por um lado se houver pouca filtragem, pouca radiação não conseguira atravessar o corpo do paciente, por outro lado, se a filtragem for muito elevada a imagem perde a qualidade. Sendo assim, faz-se necessário um balanço da quantidade de filtragem.

Imagens radiográficas



Figura 27: densidade radiográfica, é o grau de enegrecimento da imagem, ela é responsável pelo escurecimento dos exames. Quanto maior for a densidade, mais escura será a imagem.

Fonte: <https://helioprint.com.br/blog/qualidade-de-imagem-radiografica/>. Acesso: nov. 2019

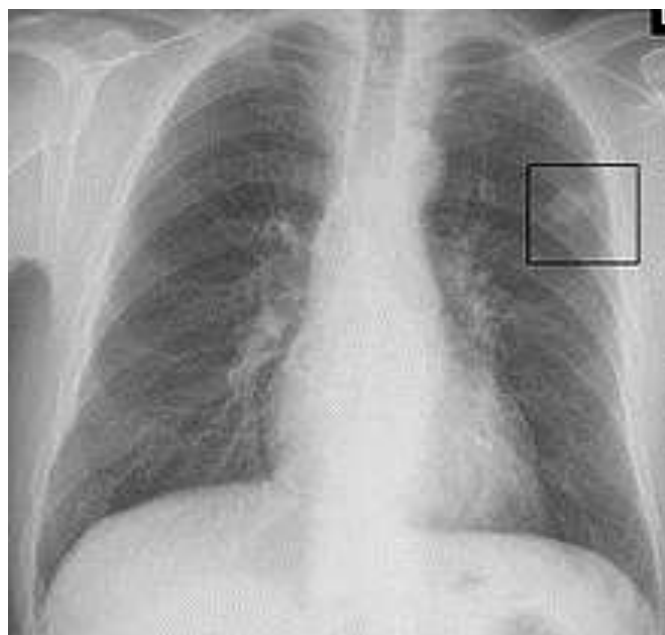


Figura 28: Radiografia de tórax mostrando um tumor no pulmão esquerdo.

Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/N%C3%B3dulo_pulmonar_solit%C3%A1rio. Acesso: nov. 2019.

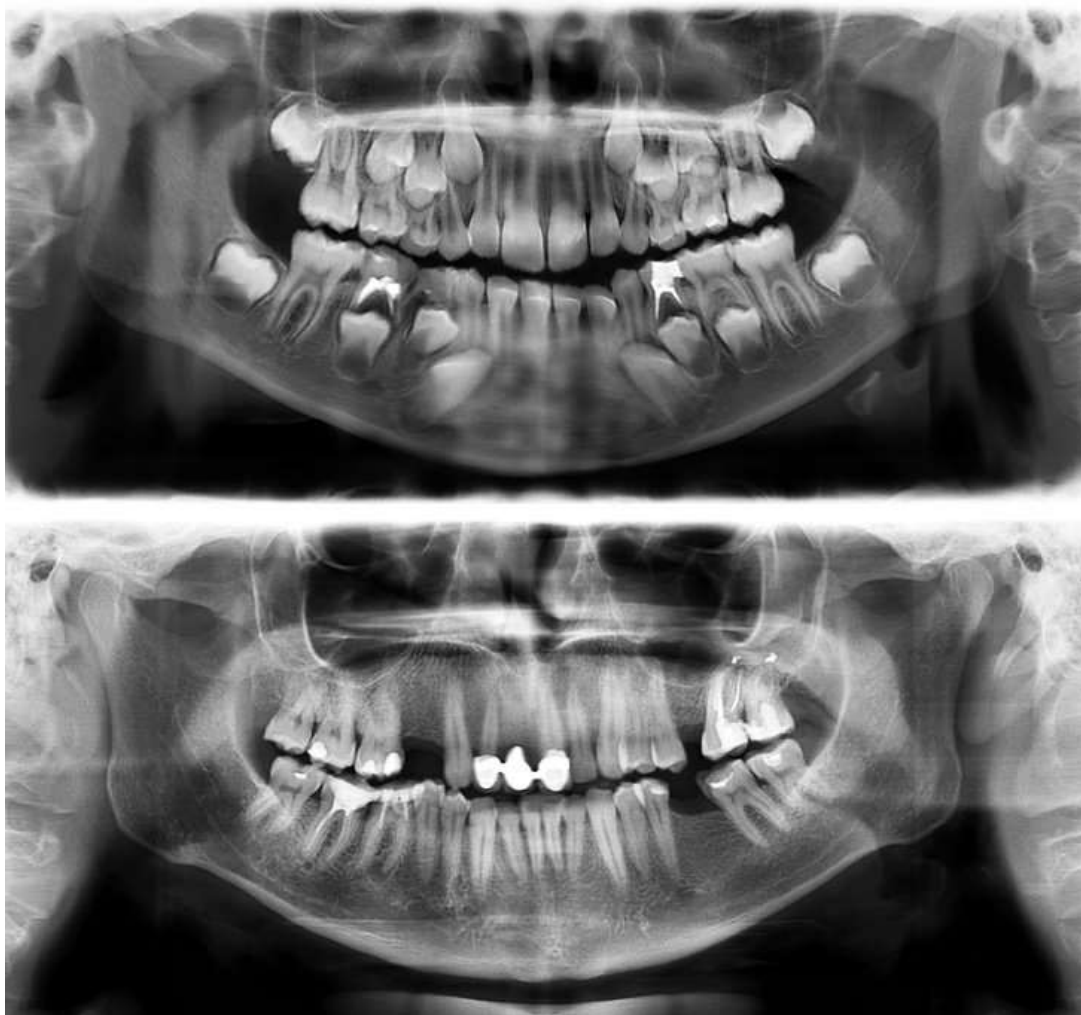


Figura 29: Assim são os dentes de uma pessoa aos 7 anos (acima) e aos 30.
Fonte: <http://portaldaradiologia.com/?p=68>. Acesso: nov. 2019.

3.2. Tomografia computadorizada

Segundo Sousa (2017), a tomografia computadorizada (TC) como método de diagnóstico por meio de imagens surgiu no ano de 1971, quando foram realizadas as primeiras imagens de crânio, os exames duravam horas para finalizar. No entanto, essa tecnologia só foi apresentada à sociedade científica no ano de 1972 por Godfrey Hounsfield, que desenvolveu esta técnica de obtenção de imagens (veja imagem 30).

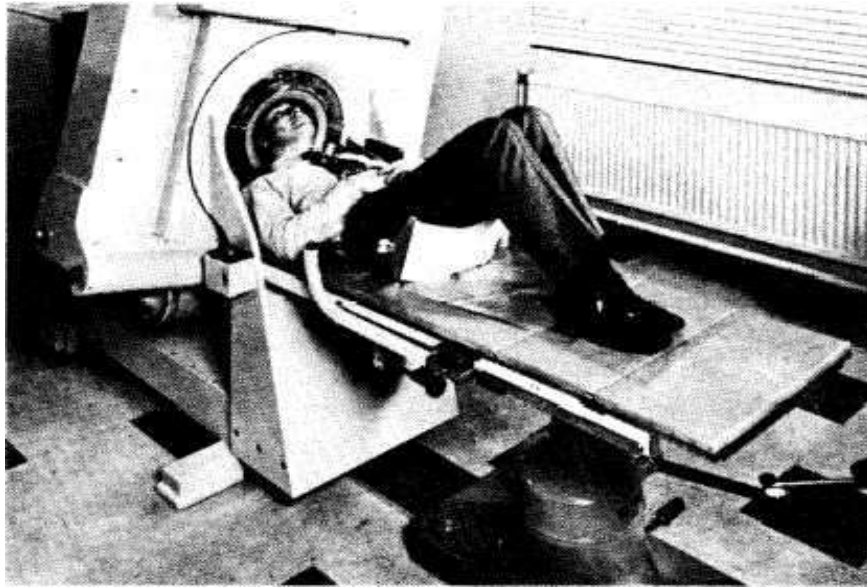


Figura 30: Primeiro tomógrafo para o estudo do crânio.

Fonte: <https://www.timetoast.com/timelines/historia-de-la-tomografia>. Acesso: nov. 2019.

Na verdade, os princípios físicos da tomografia computadorizada são os mesmos da radiográfica convencional. Para a obtenção de imagens ainda são utilizados os raios-x semelhantemente como na radiografia, os raios X passam através do corpo do paciente, sendo absorvidos pelos diferentes tipos de tecidos. Na radiografia convencional o feixe de raios-x é piramidal e a imagem obtida é uma imagem de projeção, porém na TC o feixe é emitido por uma pequena fenda e tem a forma de leque (ver figura 31).

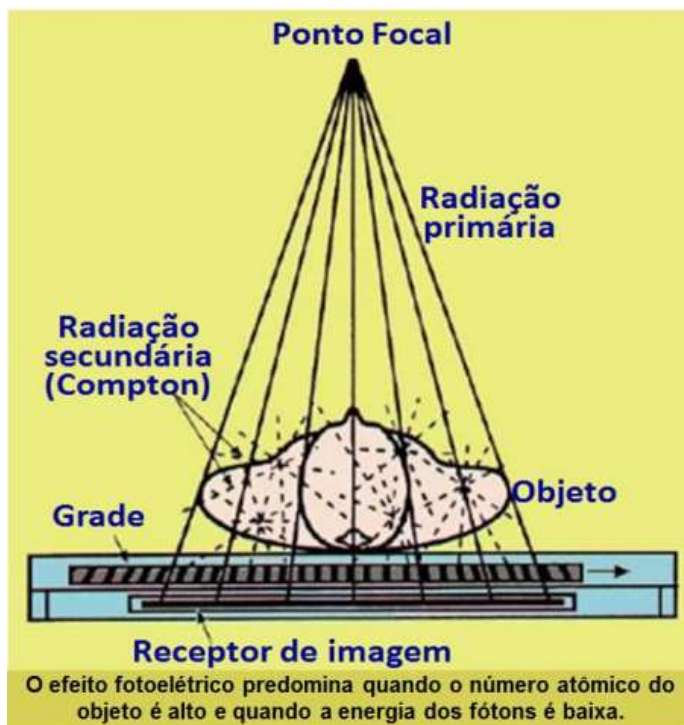


Figura 31: essa absorção diferenciada nos tecidos do paciente pode ser gravada em um filme ou um sistema de detectores Fonte: <http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/index.php/radiologia-convencional/tecnologia-e-funcionamento-dos-equipamentosrx/tubo-de-raios-x/interacoes-no-anodo>. Acesso: nov. 2019.

O autor também afirma que o maior problema da radiografia consiste na superposição de estruturas no filme ou no sensor, o que dificulta ou às vezes torna impossível o diagnóstico através dessas imagens, principalmente de detalhes. Isso é notável quando estruturas diferem pouco entre si, em termo de densidade, como no caso de alguns tumores e seus tecidos adjacentes (veja figura 32).

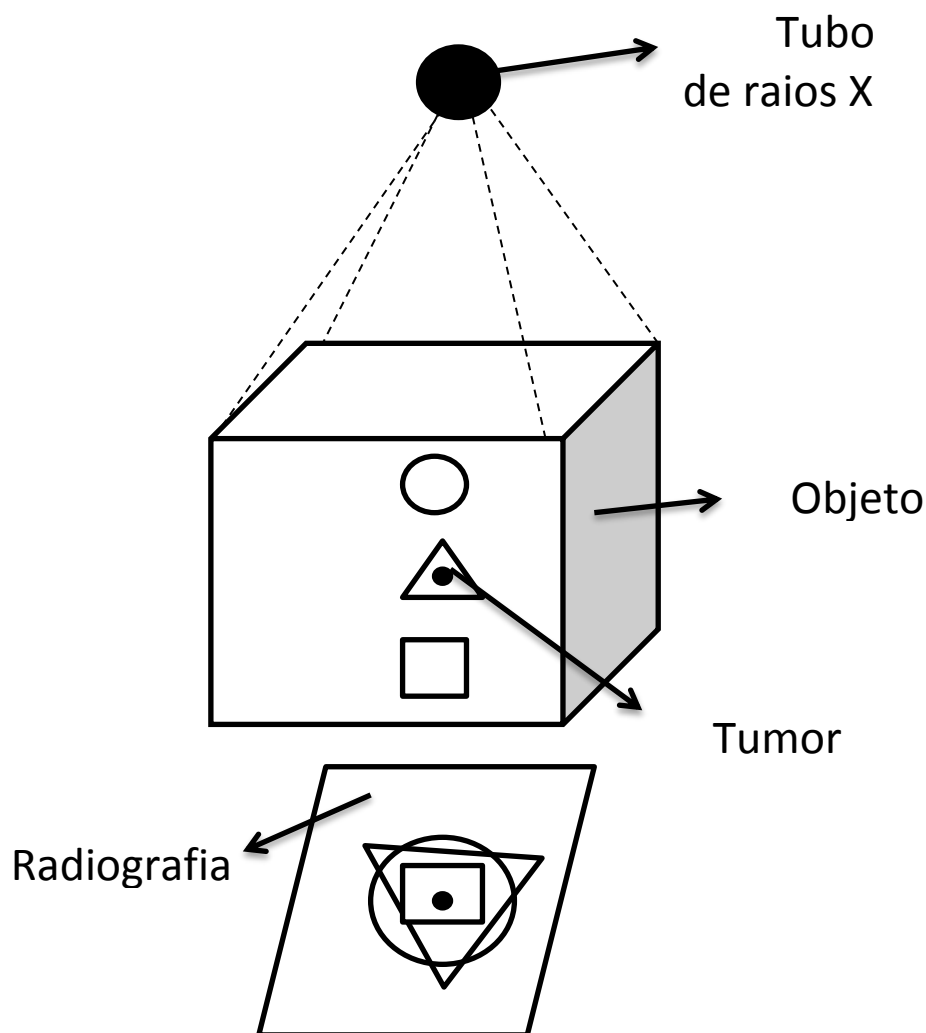


Figura 32: Embora radiografias laterais ou oblíquas ajudem na visualização, o problema da superposição ainda persiste. Fonte: https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod05/m_s01.html. Acesso: nov. 2019.

A Diferença entre o método da radiografia anterior e a TC é superar as dificuldades existentes por esse método, minimizando a superposição de estruturas, tendo excelente contraste nas imagens e a capacidade de distinguir estruturas de densidades muito próximas. Enquanto as

técnicas radiológicas convencionais produzem imagens somadas de um objeto, varredores tomográficos giram para dividir um objeto e organizá-lo em seções de imagens paralelas e espacialmente consecutivas (cortes axiais). O processo, que era originalmente totalmente mecânico, foi melhorado graças as novas tecnologias. Atualmente, a alta qualidade das imagens é o resultado dos complexos sistemas computacionais.

Simplificadamente, na perspectiva de Sousa (2017), a tomografia é gerada a partir de um tubo de raios X (cabecote) e um detector de fótons montado no lado diametralmente oposto, como o cabecote e o detector estão conectados mecanicamente, eles se movem de forma síncrona. Quando o conjunto cabecote-detector faz uma translação ou rotação em um ângulo de 360° em torno da região do corpo a ser estudado, as estruturas internas do corpo atenuam o feixe de raios X de acordo com a densidade e número atômico de cada tecido, como na radiografia convencional as características das imagens vão depender dos fótons absorvidos pelo objeto em estudo.

Dessa forma, os detectores de fótons da TC transformam os fótons emitidos em sinal analógico, (quanto mais Rx chegar, maior será a DDP ou voltagem que cada detector fornece ao computador) e posteriormente digital (o computador converte os valores de voltagem, contínuos em unidades digitais) assim, as informações obtidas são processadas utilizando técnicas matemáticas.

Até aqui, já percebemos o quanto a física e a matemática caminham lado a lado à melhoria de nossa vida, facilitando o estudo do corpo humano sem a utilização de métodos invasivos. Porém, é de suma importância ressaltar o avanço tecnológico e da maneira que esse avanço influencia nos exames tomográficos.

A primeira geração de tomógrafos, foi apresentado por Hounsfield em 1972, as imagens dos equipamentos de 1º geração eram formadas a partir do sinal de obtido no detector, como já foi mencionado acima. Cerca de 160 exposições eram realizadas ao longo de uma única direção, o que caracterizamos como sendo, varredura linear.

Após completar esta varredura, o conjunto tubo-detector fazia um movimento de rotação de 1° e uma nova varredura linear iniciava-se, o procedimento era repetido até completar uma rotação de 180° (ver figura 33).

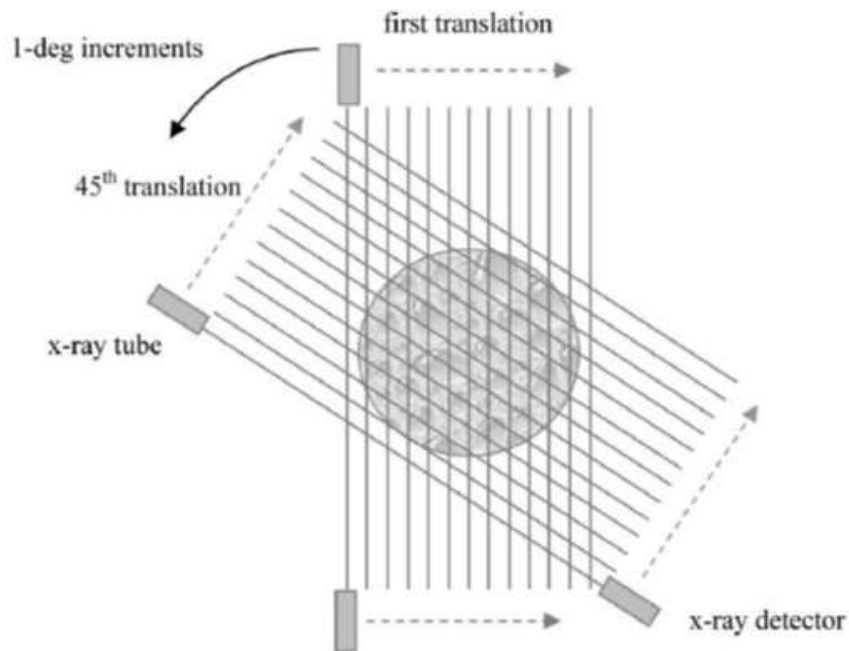


Figura 33: feixe de radiação único, 1 corte demorava cerca de 3 a 5 minutos, o estudo da região inteira podia chegar a levar horas. Fonte: <https://www.oocities.org/tomografiademadeira/geracoes.html>. Acesso: dez. 2019.

Na segunda geração, ao invés de um único detector, um conjunto de detectores colocava-se do outro lado do tubo de raio X, de forma que o feixe de raio X formava um leque e não apenas uma linha única de aquisição de dados (veja figura 34).

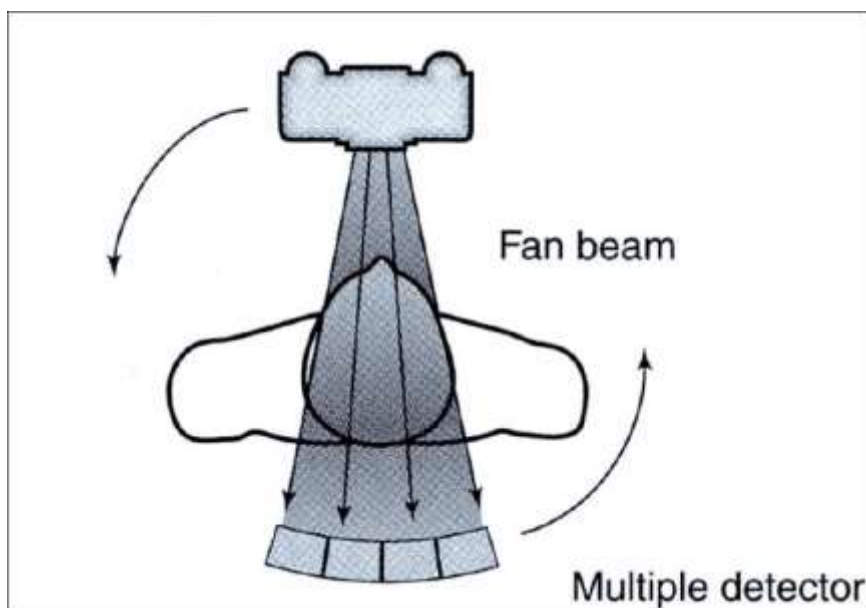


Figura 34: O feixe de RX passou a ser laminar (forma de leque) suficiente para cobrir o conjunto de detectores. Fonte: <https://www.oocities.org/tomografiademadeira/geracoes.html>. Acesso: dez. 2019.

Aumentou-se o número de detectores, algo em torno de 20 a 40, o qual dependia do fabricante. Por isso houve uma redução drástica no tempo do exame, de 20s a 3 min o corte. O primeiro tomógrafo de segunda geração foi lançado em 1974 pela firma americana OHIO NUCLEAR (Ver figura 35).

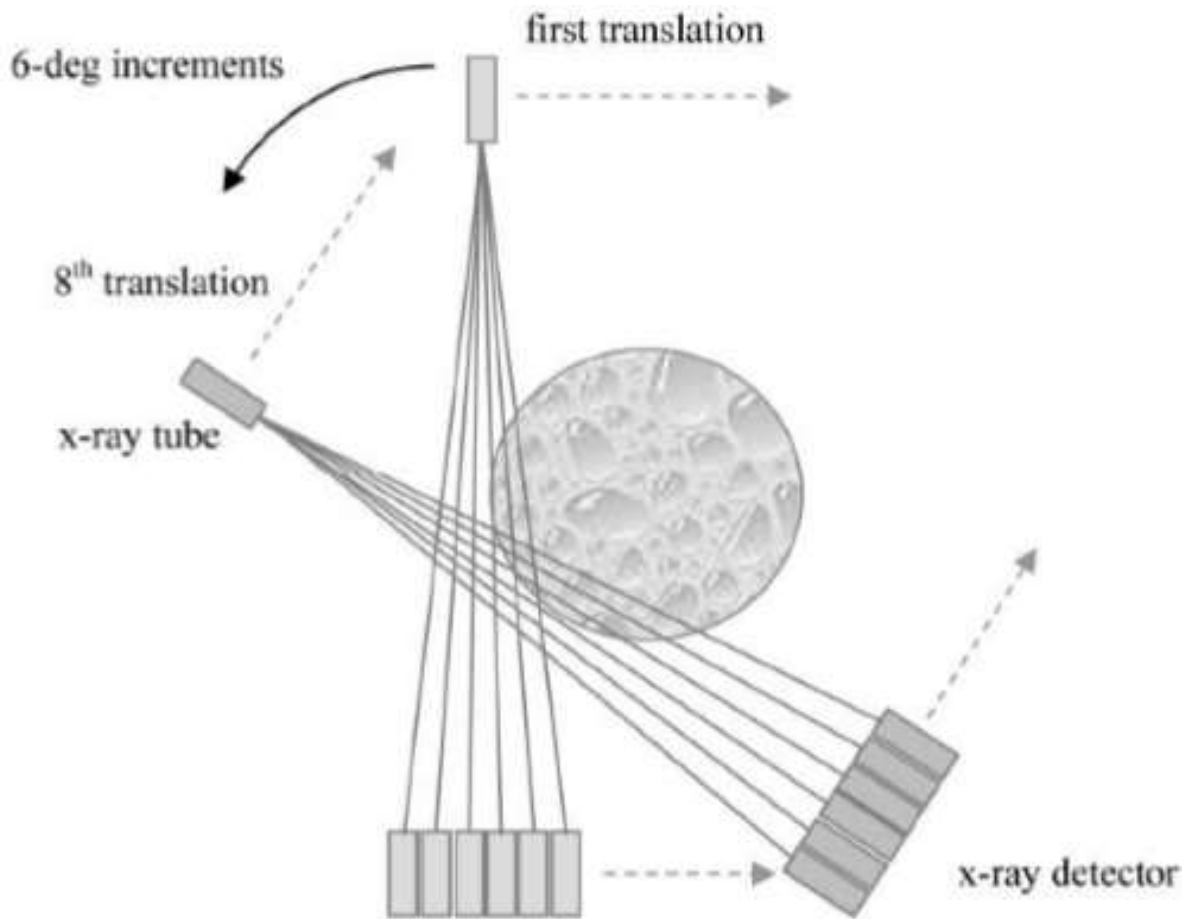


Figura 35: 2ª geração: Rotação de 180° e Feixe em leque por uma única fonte – 10° de abertura. Fonte: <https://www.oocities.org/tomografiademadeira/geracoes.html>. Acesso: dez. 2019.

Na terceira geração, o movimento de translação foi eliminado, ou seja, eliminou-se a varredura linear, mantendo-se apenas o movimento de rotação. A partir de então, os tubos mudaram do procedimento de varredura a cada grau e passaram a realizar movimentos de 360° não contínuos. O feixe de raio X foi ampliado graças às novas tecnologias do tubo de raio X e o grande aumento no número de detectores, mudando-se completamente a geometria de varredura. O tempo de duração do exame tornou-se bem mais rápido e a qualidade da imagem sofreu uma melhora bastante significativa (veja figura 36).

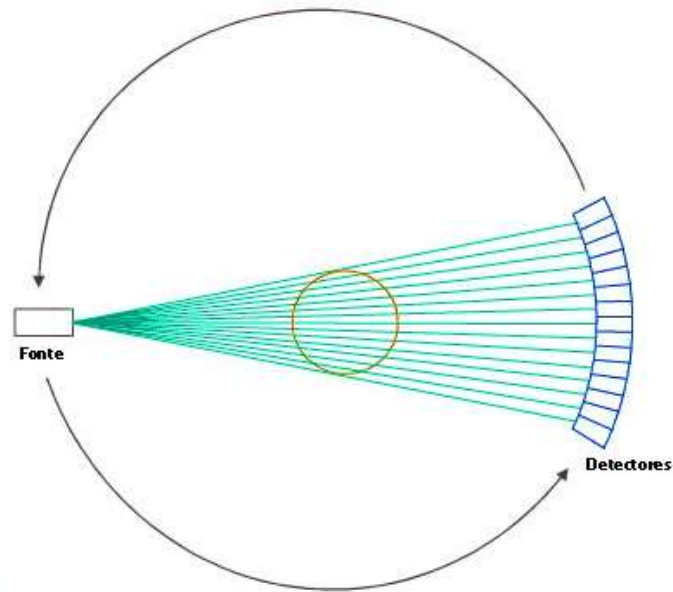


Figura 36: 3ª geração, aumento no número de detectores – até 960, redução do tempo de exame – 2 a 10 s / corte, rotação de 360°, o feixe é largo e cobre todo o objeto de estudo. Fonte: <https://www.oocities.org/tomografiademadeira/geracoes.html>. Acesso: dez. 2019.

Já na quarta geração, o equipamento consiste em múltiplos detectores fixos que formam um anel em torno do objeto. O tubo de raios-X move-se em torno do objeto em 360°, emitindo um feixe de raios X cuja geometria é descrita como de um grande leque. Cerca de 300 a 1000 detectores recolhem os dados que são gravados durante a rotação. O tempo de escaneamento de um giro em 360° é de aproximadamente de 1 segundo (ver figura 37).

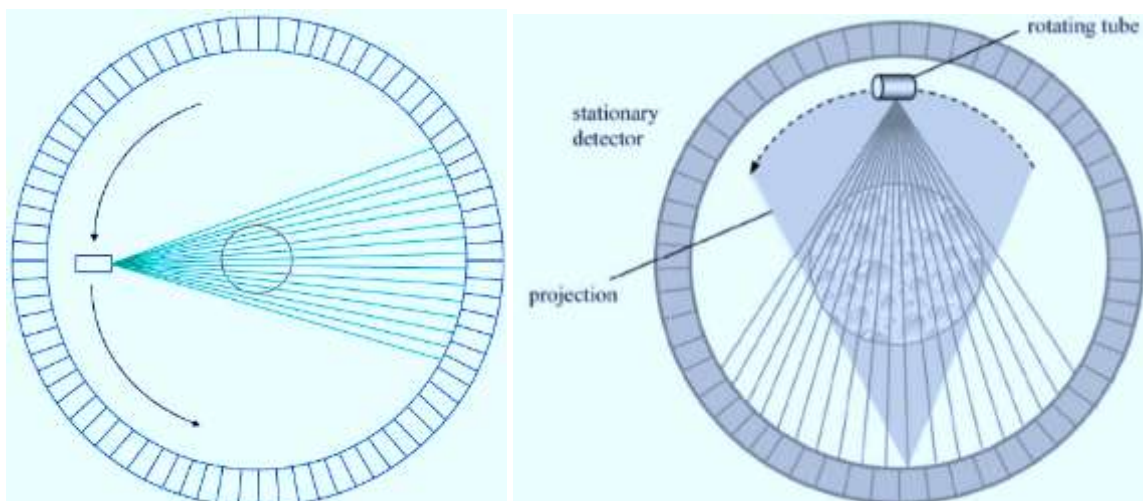


Figura 37: 4ª geração de tomógrafos, um conjunto de detectores distribuídos ao longo dos 360°, ocupando assim todo o anel. Fonte: <https://www.oocities.org/tomografiademadeira/geracoes.html>. Acesso: dez. 2019.

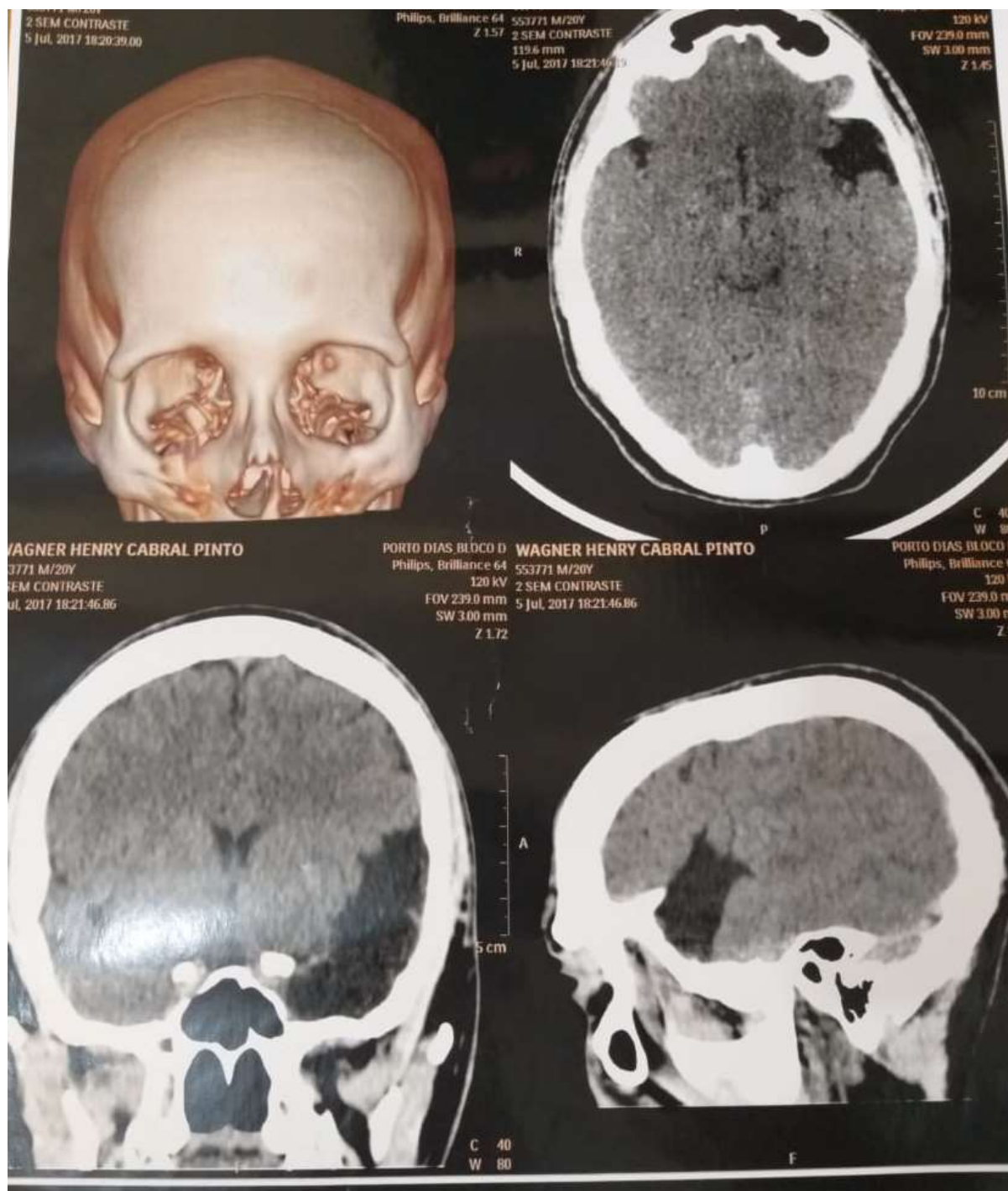
IMAGENS POR TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

Figura 38: Tomografia computadorizada de crânio, onde foi encontrado um cisto aracnoide no diagnóstico. Fonte: própria do autor.

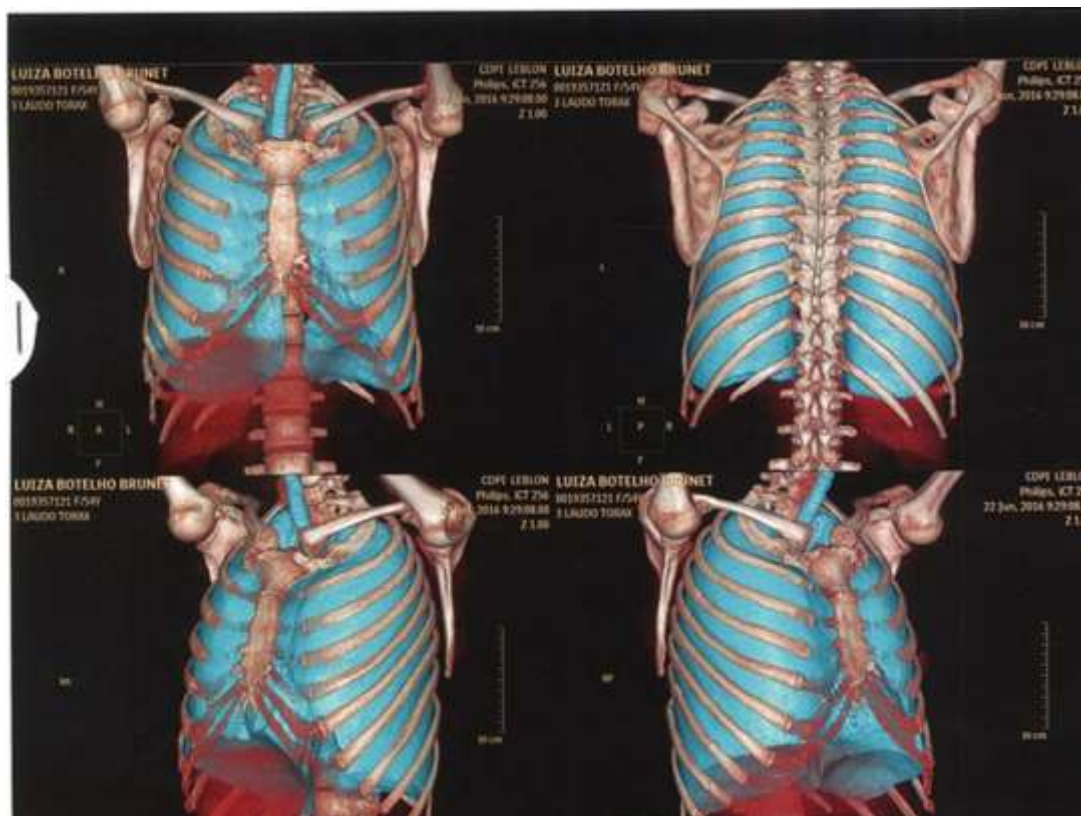


Figura 39: tomografia computadorizada de tórax. Fonte: <https://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/laudo-e-imagens-de-tomografia-mostram-fraturas-em-4-costelas-de-luiza-brunet.ghtml>. Acesso: dez. 2019



Figura 40: Dose elevada de radiação.
Fonte: www.nytimes.com/2010/08/01/health/a1radiation.html.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Alguns estudantes consideram a física como sendo uma disciplina de média importância para a vida social e profissional deles, conforme observado em diálogos realizados ao longo da atuação como estagiário licenciado em física. “Para o que adianta eu estudar e aprender física, se isso não vai me ajudar em nada na minha futura profissão, pois pretendo me formar em direito”. Disse uma aluna do ensino médio em uma de nossas conversas pela escola.

Apesar de diversos estudiosos ao longo do percurso histórico da física terem deixado suas contribuições tanto para o ensino de física no nível superior, quanto no básico. Ainda sim, é possível observar que a aversão no que tange ao ensino-aprendizagem da disciplina vigora no presente contexto escolar.

Espera-se que com esse trabalho que nossos objetivos possam ser alcançados tendo em vista não só a solução de questionamentos do ensino básico, mas também, possam aprender e melhorar o entendimento dos conceitos, fórmulas matemáticas, aplicações e sobre a aplicabilidade da física na medicina, além disso, conhecer sobre algumas contribuições importantes como, no tratamento de câncer, radiologia e a tomografia computadorizada.

Portanto, tal estudo possibilitou uma nova visão, de como a física está presente em nossa vida, de como a física se relaciona com a medicina, seu avanço histórico e tecnológico, como as leis, teorias e aspectos físicos foram fundamentais para o desenvolvimento da física médica.

REFERÊNCIAS

- BERNASIUK, M. E. BARCELAR, A. **Ensino de graduação em física médica: experiência da PUCRS.** RS, Porto Alegre, 2009.
- CARRON, W. GUIMARÃES, O. **Física.** Vol. Único. Editora: Moderna, 2º Ed. 2000.
- CLAUDIA LEITE; EDSON AMARO; MARIA OTADUY. **Física básica da tomografia computadorizada.** Bahia - BRASIL. 2011.
- EDSON A. Et al. **Aspectos Básicos de Tomografia Computadorizada e Ressonância Magnética.** São Paulo, 2001.
- GUALTER, NEWTON, HELOU. **Tópicos de física.** Vol.03, 18º Ed. SP – BRASIL. 2012.
- GUALTER, NEWTON, HELOU. **Tópicos de física.** Vol. 02, 18º Ed. SP – BRASIL. 2012.
- HALLIDAY, DAVID. **Fundamentos de física.** Vol. 4. 8º Ed: Óptica e física moderna. RIO DE JANEIRO – RJ – BRASIL. 2009.
- CUTNELL, J. D. KENNETH, W. J. **Física, Vol. 03, 6º Ed.** Rio de Janeiro – BRASIL. 2006.
- NELSON H. MORGON. **O Comportamento do elétron: uma análise do efeito Compton e da relação de Broglie.** CAMPINAS - SP, BRASIL 2008.
- NERISSIAN, D. Y. **Princípios Físicos em Radiologia.** São Paulo, 2012.
- NERISSIAN, D. Y. **Princípios Físicos em Radiologia. Hipermidia - Tecnologia e funcionamento dos equipamentos,** 2014. Disponível em: <http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/index.php/radiologia-convencional/tecnologia-e-funcionamentodos-equipamentosrx/101-radiologia-convencional?start=60>. Acesso em Novembro de 2019.
- OSWALDO BAFFA, IVAN TORRES PISA. **A área de física médica e suas perspectivas no brasil.** Ribeirão preto - sp – brasil. 2000.
- OLIVEIRA, R. P. **Física médica aplicada ao ensino de física das radiações: um relato de experiência na criação e aplicação de uma sequencia didática para o ensino médio.** Brasília, 2018.
- PANSERA, F. C. PERON, C. **A Inserção de tópicos de física médica no ensino médio regular: uma possibilidade de ampliação do currículo escolar.** RS, Porto Alegre, 2013.
- PAULL A. TIPLER; RALPH A. LLEWLLYN. **Física moderna, 3º Ed.** Rio de Janeiro – BRASIL. 2001.
- PAULO M. P. TORRES, C. A. **Física – Ciência e tecnologia, Vol. 3, 1º Ed.** SÃO PAULO – SP – BRASIL. 2005.

SAMPAIO, J. L. CALÇADA, C. S. **Física**. Vol. Único. 2º Ed. São Paulo, 2005.

SÉRÉ, M. G. **O papel da experimentação no ensino da física**. Cad. Bras. Ens. Fís. Vol.20, 2003.

SILVA, I. OLIVAL F. J. **A Descoberta do efeito Compton: de uma abordagem quântica semiclássica a uma abordagem quântica**. Salvador, BA, BRASIL, 2014.

SOUSA, G. S. **Fundamentos de Produção de Raio-X**. Belém, PA, 2017.

TERINI, R. A. **A historia da física médica na formação do físico médico**. 2018.

TIPLER, P. A. e LLEWELLYN, R. A. **Física Moderna**. 3º Edição. Editora: LTC, 2001.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
FACULDADE DE FÍSICA

ATA DA APRESENTAÇÃO E DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO –
TCC

Ata da sessão de apresentação e defesa de Trabalho de Conclusão de Curso para concessão de grau de Licenciado(a) Pleno(a) em Física, realizado às 10:30h do dia 20 de Dezembro de 2019, no Auditório do Laboratório de Física - Ensino, cuja orientação teve início em 17 de Junho de 2019 sendo intitulada: "**FÍSICA MÉDICA E SUAS APLICAÇÕES: Uma Abordagem para o Ensino Médio**", contendo 55 páginas, que foi apresentado durante 30 minutos pelo(a) discente **Wagner Henry Cabral Pinto**, matrícula Nº **201608140096** diante da banca examinadora aprovada pela Faculdade de Física do Instituto de Ciências Exatas e Naturais da Universidade Federal do Pará, assim constituída: Prof. Dr. *Rubens Silva* (Orientador - UFPA), Prof. MSc. *André Luiz Pereira dos Santos* (MNPEF- UFPA), e Prof. MSc. *Márcio Diego Oliveira Tavares* (MNPEF- UFPA). Em seguida o(a) mesmo(a) foi submetido à arguição, tendo demonstrado conhecimentos no tema objeto da proposta de TCC, favorecendo à banca examinadora apresentar contribuições para melhoras no desenvolvimento e decidir pelo conceito EXCELENTE do mesmo, bem como conceder o prazo máximo de 15 dias para serem efetuadas as modificações sugeridas pela banca, se for o caso, e em seguida a mesma será assinada por todos os membros. Para constar foram lavrados os termos da presente ata que lida e aprovada recebe a assinatura dos integrantes da banca examinadora e do(a) DISCENTE.

ORIENTADOR: *Rubens Silva*

EXAMINADOR 1: *André Luiz Pereira dos Santos*

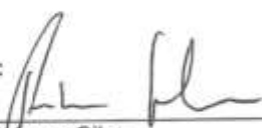
EXAMINADOR 2: *Márcio D. O. Tavares*

DISCENTE: *Wagner Henry C. Pinto*

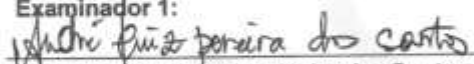
WAGNER HENRY CABRAL PINTO**" FÍSICA MÉDICA E SUAS APLICAÇÕES: Uma Abordagem para o Ensino Médio"**

Monografia apresentada como requisito para obtenção do título de Licenciado Pleno em Física pela Faculdade de Física do Instituto de Ciências Exatas e Naturais da Universidade Federal Pará, submetida à apreciação da banca examinadora composta pelos seguintes membros:

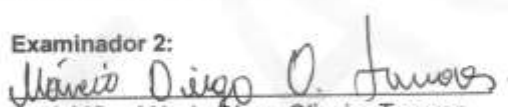
Orientador:


Prof. Dr. Rubens Silva
(FACFIS- ICEN - UFPA)

Examinador 1:


Prof. MSc. André Luiz Pereira dos Santos
(MNPEF- ICEN - UFPA)

Examinador 2:


Prof. MSc. Márcio Diego Oliveira Tavares
(MNPEF- ICEN - UFPA)

Belém, 20 de Dezembro de 2019.

