



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE EDUCAÇÃO E SAÚDE
UNIDADE ACADÊMICA DE FÍSICA E MATEMÁTICA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

LUÍS GOMES DE NEGREIROS NETO

**A FÍSICA DAS RADIAÇÕES: UMA ABORDAGEM SOBRE SUAS APLICAÇÕES
NA MEDICINA**

CUITÉ – PB

2021

LUÍS GOMES DE NEGREIROS NETO

**A FÍSICA DAS RADIAÇÕES: UMA ABORDAGEM SOBRE SUAS APLICAÇÕES
NA MEDICINA**

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Cuité, como exigência parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Ferreira de Medeiros

CUITÉ – PB

2021

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA NA FONTE
Responsabilidade Rosana Amâncio Pereira – CRB 15 – 791

N385f Negreiros Neto, Luís Gomes de.

A física das radiações: uma abordagem sobre suas aplicações na medicina. / Luís Gomes de Negreiros Neto. – Cuité: CES, 2021.

79 fl.

Monografia (Curso de Licenciatura em Física) – Centro de Educação e Saúde / UFCG, 2021.

Orientador: Dr. Fábio Ferreira de Medeiros.

1. Física. 2. Natureza. 3. Radiações. 4. Medicina nuclear. 5. Salvamos vidas. I. Título.

LUÍS GOMES DE NEGREIROS NETO

**A FÍSICA DAS RADIAÇÕES: UMA ABORDAGEM SOBRE SUAS APLICAÇÕES
NA MEDICINA**

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Cuité, como exigência parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Aprovado em: 09 / 03 / 2021

BANCA EXAMINADRA

Prof. Dr. Fábio Ferreira de Medeiros – UFCG
(Orientador)

Prof. Dr. Nilton Ferreira Frazão – UFCG
(Examinador Interno)

Prof. Dr. Joseclécio Dutra Dantas – UFCG
(Examinador Interno)

CUITÉ – PB
2021

“Se consegui enxergar mais longe, foi porque me apoiei sobre os ombros de gigantes.”

(Isaac Newton)

AGRADECIMENTOS

A mim mesmo que apesar de querer desistir a todo instante, apesar dos momentos de estresse, das incertezas e noites em claro, continuei até o fim.

A Maria Ingrid, por me incentivar a entrar no curso, sempre está presente em todos os momentos, por escutar minhas reclamações todo período, acreditar em mim e sempre me apoiar. Saiba que foi graças a você que eu nunca desisti e cheguei até aqui, obrigado por tudo.

A José Ferreira da Cruz Júnior, Juninho (In memoriam), por ser um amigo incrível, tenho orgulho por ter te conhecido, fostes um irmão para mim, o qual tenho como exemplo. Também à sua irmã Daiana Cruz, uma pessoa extraordinária, sempre alegre, obrigado por fazer parte dessa história e compartilhar alguns momentos durante o período que estava no curso de Química.

Aos excelentes mestres que o curso de Física me proporcionou, em especial aos docentes da Física: Joseclécio Dutra, por sua didática impecável e sua calma; Nilton Frazão, por sua dedicação e organização; João Batista, por seu conhecimento e consideração com os alunos; por fim, ao meu professor orientador Fábio Ferreira de Medeiros, por sua dedicação, paciência e atenção, não apenas durante a construção deste trabalho, mas do primeiro dia que estive na universidade até hoje. Muito obrigado a todos, são profissionais que merecem toda minha admiração e respeito, pois além de professores, foram amigos, conselheiros, exemplos de seres humanos.

A todos que recepcionaram a turma de 2015, e com o passar dos anos foram criados laços de amizade. Hoje sou grato por ter vocês como amigos(as), por compartilhar experiências, conselhos, estarem sempre presente, por me ajudarem. Obrigado Rosane Valência, Mariza Fernandes (sem mundial), Raquel Almeida, Kauê Brito, Deibson Costa e a todos que fizeram do início da minha caminhada no curso de Física um momento único, vocês me ajudaram a chegar até aqui.

Aos meus colegas e amigos que conheci ao longo do curso, principalmente aos da turma de 2015, os quais sempre me ajudaram durante o curso, foram inúmeras noites de estudo e encontros na própria universidade, e apesar de todas as dificuldades, conseguimos continuar e chegar ao final. A epígrafe presente neste trabalho eu dedico a vocês: Damião Franceilton, Ruam Adelmo, Reinaldo Freire, Nallyson William, Randson Henrique, Laedson Luan e Rafael de lima. Aos demais amigos que adquiri durante os anos em que estive na universidade: Helymarckson

Batista, Isaac Ferreira, Ysak (Anaqueli), Ronayde Emanuel, Hugo Rafael e Pablo Martins. Obrigado por todo apoio e consideração, vocês fazem parte de uma família que o CES me proporcionou.

Aos demais colegas de turma, Raline Araújo, Max Wendell, Valdilson Noberto, obrigado por fazerem parte dessa caminhada e por cada momento compartilhado durante os anos de curso.

A todos que tive o prazer de conhecer, mesmo sendo de cursos distintos: Ticiany Marques, Vanessa Araújo, Natham Cândido, Jamille Silva, Clara Sousa, Igor Rafael, Maria da Paz, Anailde Felix e Nayana Rocha. Ao professor Paulo Cruz, o qual fui seu aluno durante o ensino médio e pude retornar como estagiário em suas turmas, tenho como um amigo e um exemplo de profissional. Ao professor Jabes, com quem tive a oportunidade de trabalhar em projetos vinculados à universidade, assim como as etapas finais dos estágios. Agradeço a todos por ajudarem de forma direta e indiretamente.

Então, chegando ao final desta jornada, só tenho a agradecer a todos que estiveram comigo e me apoiaram. Quando nem eu mesmo acreditava em mim, vocês acreditaram, em momentos difíceis eu tive com quem contar. Um obrigado parece tão pouco em troca do que fizeram por mim, eu dividiria a nota deste TCC com vocês, mas preciso de uma nota acima de 7,0 para ser aprovado, então, posso apenas agradecer por tudo, obrigado.

RESUMO

É muito comum ouvirmos falar que a Física se encontra em fenômenos ligados à natureza e que, apesar de estarmos em constante ligação com estes fenômenos, eles passam despercebidos aos nossos olhos, muitas das vezes nem reconhecemos sua presença em certas situações. Isso acontece frequentemente, em maior parte por não conhecermos os vastos ramos em que a Física pode atuar, pois em nosso meio acadêmico, seja durante o ensino médio ou a graduação em um curso de licenciatura em Física, pouco se trabalha com a ideia de que ela influencia diretamente em grande parte de diversas áreas do conhecimento; em particular, a Medicina. Com isso, o reconhecimento sobre a Física dentro da Medicina acaba se perdendo em meio ao formalismo acadêmico. A partir dessa constatação, este trabalho busca mostrar algumas utilizações das radiações na área médica que só foram possíveis graças ao desenvolvimento e o conhecimento da Física. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo mostrar como se deu o início do uso das radiações na Medicina, através de uma descrição clara e sucinta de todo o processo evolutivo por trás das aplicações das radiações, principalmente, no tratamento médico de doenças cancerígenas, além do desenvolvimento e o avanço tecnológico. Para a elaboração desta obra, foi realizada uma revisão bibliográfica com consultas de livros, artigos e revistas. Portanto, a Física deu uma significativa e fundamental contribuição no desenvolvimento da Medicina Nuclear, e como resultado, salvamos vidas.

Palavras-Chave: Física, natureza, radiações, Medicina Nuclear, salvamos vidas.

ABSTRACT

It is very common to hear that Physics is found in phenomena linked to nature and that, despite being in constant connection with these phenomena, they go unnoticed by our eyes, many times we do not even recognize their presence in certain situations. This happens frequently, mostly because we do not know the vast fields in which Physics can act, because in our academic environment, whether during high school or graduation in a degree course in Physics, little is worked with the idea that it directly influences a large part of several areas of knowledge; in particular, Medicine. As a result, the recognition of Physics within Medicine ends up being lost amid academic formalism. From that observation, this work seeks to show some uses of radiation in the medical field that were only possible thanks to the development and knowledge of Physics. Therefore, this work aims to show how the use of radiation in Medicine started, through a clear and succinct description of the entire evolutionary process behind the applications of radiation, mainly in the medical treatment of cancerous diseases, in addition to development and technological advancement. For the elaboration of this work, a bibliographic review was carried out with consultations of books, articles and magazines. Therefore, Physics has made a significant and fundamental contribution to the development of Nuclear Medicine, and as a result, we have saved lives.

Key words: Physics, nature, radiation, nuclear medicine, saved lives.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	3
2.	UMA BREVE HISTÓRIA DA RADIOATIVIDADE.....	6
3.	FUNDAMENTOS DA RADIAÇÃO	9
3.1.	ESTRUTURA DO ÁTOMO	10
3.2.	TIPOS DE RADIAÇÃO	11
3.3.	ISÓTOPOS.....	16
3.3.1.	ISÓTOPOS RADIOATIVOS OU RADIOISÓTOPOS	17
3.4.	DESINTEGRAÇÃO NUCLEAR.....	19
3.4.1.	DECAIMENTO NUCLEAR	20
3.4.2.	DECAIMENTO SUCESSIVO.....	21
3.4.2.1.	MEIA-VIDA FÍSICA E MEIA-VIDA BIOLÓGICA.....	22
3.4.2.2.	MEIA-VIDA EFETIVA (T_E) E VIDA MÉDIA t	24
3.5.	TIPOS DE DECAIMENTO	26
3.5.1.	DECAIMENTO ALFA.....	26
3.5.2.	DECAIMENTO BETA E CAPTURA DE ELÉTRONS	28
3.5.3.	DECAIMENTO GAMA.....	30
3.6.	IONIZAÇÃO E INTERAÇÃO COM A MATÉRIA	32
3.6.1.	RADIAÇÃO DIRETAMENTE IONIZANTE	34
3.6.2.	RADIAÇÃO INDIRETAMENTE IONIZANTE: FÓTONS.....	36
3.6.3.	RADIAÇÃO INDIRETAMENTE IONIZANTE: NÊUTRONS	41
4.	EFEITOS BIOLÓGICOS E APLICAÇÕES DA RADIAÇÃO	42
4.1.	APLICAÇÕES MÉDICAS PARA O TRATAMENTO DO CANCÊR	43
4.1.1.	A FÍSICA APLICADA AO DIAGNÓSTICO POR IMAGENS	44
4.1.1.1.	RADIOGRAFIA	45
4.1.1.2.	FLUOROSCOPIA.....	48
4.1.1.3.	TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA.....	49

4.2. A FÍSICA APLICADA À RADIOTERAPIA.....	51
4.2.1. TELETERAPIA	54
4.2.2. BRAQUITERAPIA	55
4.3. QUIMIOTERAPIA	57
4.4. A FÍSICA APLICADA À MEDICINA NUCLEAR, DIAGNÓSTICO E TERAPIA (PET, SPECT).....	58
5. OUTRAS APLICAÇÕES DA RADIAÇÃO IONIZANTE	60
5.1. FINALIDADE DAS APLICAÇÕES	60
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	65

1. INTRODUÇÃO

Durante toda a evolução, desde a sua origem, o ser humano buscou entender o funcionamento do mundo e dos fenômenos que regem o Universo. Desde acontecimentos do cotidiano, como o simples cair de uma maçã de uma árvore, quando então Isaac Newton em um “lampejo de revelação” compreendeu que os fenômenos terrestres se conectavam com aqueles observados no céu através da gravitação, até os acontecimentos mais complexos do Cosmos. Tais fenômenos sempre instigaram a curiosidade de filósofos, observadores e estudiosos, desde a Antiguidade.

Um desses fenômenos intrigantes foi/é a origem de toda matéria e de que ela é constituída. A partir desse questionamento, após anos de teorias e descobertas, a humanidade conseguiu estudar a matéria em um nível que, em determinado momento da história, foi considerado o mais elementar, os átomos. Em consequência, novos horizontes se estenderam e novas ideias surgiram. Algumas ocorridas por acaso, durante observações que consistiam em propósitos distintos, como por exemplo, a descoberta de que ondas eletromagnéticas de alta intensidade poderiam ser utilizadas para esquentar alimentos, o que deu origem ao forno de micro-ondas. Com a radioatividade e a descobertas dos raios X não foi diferente, que se trataram de descobertas que aconteceram ao acaso, mas que causaram grandes revoluções no meio acadêmico, e um novo entendimento sobre as propriedades dos átomos.

A radioatividade pode ser entendida como a propriedade que átomos instáveis possuem de emitir energia espontaneamente para o meio, seja em forma de ondas eletromagnéticas, seja em forma de corpúsculos, até que se tornem estáveis por meio de desintegrações nucleares.

Inicialmente, a radioatividade foi utilizada e comercializada livremente em grande escala por empresas, desde a produção de cremes de beleza, chicletes e até a comercialização de chapas fotográficas em meio a avenidas movimentadas. Diante da falta de conhecimento sobre os danos que a radioatividade poderia trazer para o indivíduo que a manipulasse sem a devida proteção, houve um enorme surto de câncer e uma drástica redução na expectativa de vida, principalmente, dos cientistas e dos profissionais de saúde que, ao realizar radiografias em seus pacientes, eram expostos a alta dose de radiação diariamente (TERINI; MACHADO, 2017).

Ao longo dos anos, a radioatividade começou a ser compreendida de forma mais detalhada, o que possibilitou o desenvolvimento de equipamentos que

proporcionavam uma maior proteção. E com isso, a radioatividade se destacou, principalmente, como ferramenta de auxílio para os médicos examinarem seus pacientes, dando origem à inserção do Físico em procedimentos médicos e ao início da Medicina Nuclear. Apesar de ser um ramo de grande impacto e apresentar uma evolução lenta, porém constante, muitos desconhecem os profissionais e os métodos por trás de cada intervenção médica. Nota-se até mesmo que entre os alunos de graduação em Física existe pouco ou nenhum conhecimento sobre o papel do Físico na Medicina, além de não haver divulgação de áreas afins em eventos nas Universidades. Fatos como estes impedem a ampliação da visão do estudante sobre as diversas áreas que a Física pode contribuir.

Diante das observações citadas, este trabalho foi elaborado com o objetivo mostrar a importância das radiações na melhoria da qualidade de vida, através de uma abordagem clara de todo o processo evolutivo por trás das aplicações das radiações, principalmente, no tratamento médico de doenças cancerígenas, além do desenvolvimento e a evolução de equipamentos que fazem uso dessas radiações. Buscou-se reunir o máximo possível de informações, sem a necessidade de equações de difícil entendimento, tentando expressar da forma mais clara possível a importância e todo o desenvolvimento tecnológico que circunda as radiações, desde a sua descoberta até os dias atuais. A metodologia utilizada consistiu em uma revisão bibliográfica por meio da pesquisa em livros, revistas e artigos eletrônicos relacionados ao tema, que abordam desde o contexto histórico à diferentes aplicações. A estrutura do trabalho é descrita a seguir.

No capítulo II, partimos das primeiras observações da radioatividade, em 1895 por Roentgen, seguido dos estudos do cientista francês Henri Becquerel, que levaram a descoberta dos raios X, em 1896; e das contribuições de outros pesquisadores da época como, Pierre Curie e Marie Curie, Ernest Rutherford e Frederick Soddy, sobre as características dos átomos que emitiam radiação e a descoberta dos elementos rádio e polônio nos anos seguintes.

No capítulo III, o mais extenso, é mostrado como surgiu o conceito de átomo e das partículas que o constitui; além da evolução do entendimento sobre o átomo e sua estrutura, chegando à teoria dos quarks. Após uma breve introdução sobre o átomo, é abordado em um contexto geral, de forma clara e concisa, os tipos de radiações. Tais radiações foram descritas em uma seção que pretendeu trazer para o leitor uma abordagem das características individuais que cada radiação possui. Em

seguida, é abordado o processo pelo qual o átomo passa para poder atingir a estabilidade, denominado de desintegração nuclear. Este por sua vez foi descrito e organizado em subseções de acordo com sua natureza e o tipo de instabilidade, além do intervalo de tempo necessário para que ocorra cada desintegração, ou meia-vida. Ao final do capítulo, especifica-se como ocorre a interação dessas radiações com um meio material, levando em consideração tanto as radiações ionizantes que agem de forma direta, quanto indiretamente.

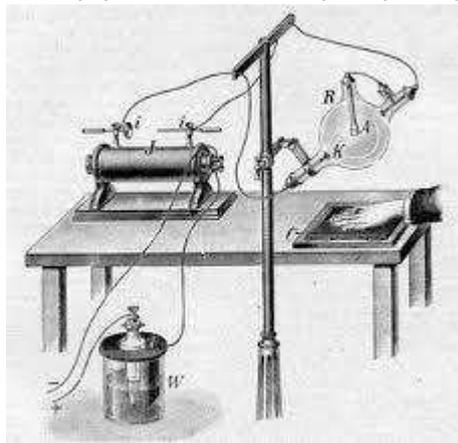
O capítulo IV consiste em uma explicação minuciosa sobre algumas aplicações da radiação ionizante na Medicina, como nos métodos de diagnóstico por imagens e nos tratamentos de tumores através da radioterapia, onde são mostradas as particularidades de cada procedimento.

No penúltimo capítulo, o capítulo V, é dada a continuação às aplicações das radiações, porém, voltadas para áreas industriais, agrícolas, geológicas, entre outras. Por fim, o capítulo VI é reservado para as contribuições finais deste trabalho.

2. UMA BREVE HISTÓRIA DA RADIOATIVIDADE

A descoberta e o estudo dos materiais com características radioativas teve início em 1895, através dos trabalhos realizados pelo físico alemão Wilhelm Conrad Roentgen (1845 – 1923) (TENIRI; MACHADO, 2017). Inicialmente, Roentgen buscava detectar alguma radiação eletromagnética, a qual foi prevista por Heinrich Rudolf Hertz (1857 – 1923), durante os experimentos com raios catódicos¹ (OKUNO; YOSHIMURA, 2010). No experimento (figura 1), os raios catódicos iluminavam uma superfície que continha uma camada de material fosforescente acondicionado em uma câmara escura. Após o início do experimento, Roentgen observou que uma placa contendo tetracianoplatino de bário ($\text{Ba}[\text{Pt}(\text{CN})_4]4\text{H}_2\text{O}$) reagiu com propriedades fluorescentes em uma das faces, levando a conclusão de que algo atravessava a câmara escura, causando a fluorescência² na face da placa.

Figura 1: Primeiro equipamento utilizado para produção dos raios X.



Fonte: <http://www.fazano.pro.br/port147.html>. Acesso em: 27/02/2021.

Roentgen pressupôs que o efeito deveria ser causado pela passagem de algum tipo de radiação, mas desconhecia sua natureza. Ele acreditou não se tratar de nenhuma das radiações conhecidas até então, como a luz visível e os raios ultravioletas, ou seja, poderia haver algo novo. Portanto, os raios emitidos pelo tetracianoplatino de bário se tratavam de uma forma desconhecida de emissão de energia. Após vários experimentos realizados em seu laboratório, Roentgen observou algumas propriedades características desse tipo de radiação, como por exemplo, que

¹ Feixes de elétrons produzidos quando uma diferença de potencial elevada é estabelecida entre dois eletrodos localizados no interior de um recipiente fechado contendo gás rarefeito.

² Fenômeno pelo qual uma substância emite luz quando exposta a radiações do tipo ultravioleta, raios catódicos ou raios X.

os raios emitidos se propagavam em linha reta e tinham a capacidade de penetrar em diferentes materiais, com diferentes espessuras, produzindo fluorescência, porém poderiam ser absorvidos por metais. Por não conseguir identificar a natureza de tais raios, Roentgen os denominou de raios X.

Diante do trabalho de Roentgen, outros cientistas da época também começaram a investigar as propriedades e utilizações dos raios X. As principais hipóteses que surgiram na época, sobre a natureza dos raios eram: poderiam ser ondas eletromagnéticas transversais com curto comprimento de onda, análoga à radiação ultravioleta; poderiam ser ondas eletromagnéticas longitudinais (hipótese sugerida pelo próprio Roentgen); pulsos não periódicos de radiação eletromagnética, hipótese proposta por Stokes; ou poderiam, enfim, ser tratados como corpúsculos, que por sua vez seriam formados por nêutrons (SCAFF, 1997). O matemático Henri Poincaré (1854 - 1912) foi um dos pesquisadores que propôs uma explicação para a emissão dos raios X e a fluorescência do tubo de raios catódicos (TERINI; MACHADO, 2017). Poincaré conjecturou que poderia existir uma relação entre a emissão dos raios e a fluorescência observada no tubo:

Portanto, é o tubo que emite os raios de Roentgen, e ele se torna fluorescente ao emití-los. Podemos nos perguntar se todos os corpos que possuem fluorescência suficientemente intensa não emitiriam os raios X de Roentgen, além de raios luminosos, seja qual for a causa de sua fluorescência. Nesse caso, o fenômeno não estaria associado a uma causa elétrica. Isso não é muito provável, mas é possível, e sem dúvidas é fácil de verificar (MARTINS, 2004).

Tal hipótese foi denominada de conjectura de Poincaré, a qual foi testada e apesar de não haver confirmação de uma relação entre os raios de Roentgen e a fluorescência no tubo, a conjectura de Poincaré serviu como guia para a descoberta de vários outros fenômenos não conhecidos na época, por exemplo, servindo como base para os trabalhos de Henri Becquerel (1852 – 1908) com o urânio.

Em 1896, o cientista francês Henri Becquerel, ao estudar a relação entre substâncias fosforescentes que absorviam luz para depois a reemitirem, observou que alguns sais compostos por sulfato de urânio e potássio ($K_2(UO_2(SO_4)_2)$) emitiam um tipo de radiação que impressionava chapas fotográficas. Tal experimento era realizado com o sal de urânio sob uma placa fotográfica inserida em uma caixa escura e exposta à luz solar durante vários dias. Em consequência da exposição, após o filme ser revelado, Becquerel observou que a posição do mineral era marcada por manchas escuras. Depois da realização do experimento, Becquerel notou que tal característica

do mineral independia da exposição à luz do sol, o que o levou a acreditar que tal material possuía características específicas e que as manchas encontradas sob a chapa fotográfica eram resultadas da emissão espontânea de raios pelo sal de urânio. Essa observação fez com que vários historiadores da ciência concedessem a Becquerel o título de descobridor da radioatividade, considerando-a propriedade exclusiva do urânio, por não ter utilizado outras substâncias que poderiam emitir raios semelhantes (SOUSA, 2015).

No final do século XIX, Pierre Curie (1859 – 1906) e Marie Curie (1867-1934) começaram a estudar a radiação descrita por Becquerel, como raios X e raios de urânio. Após estudos experimentais, Pierre Curie e Marie Curie descobriram outros elementos com características semelhantes aos sais de urânio que emitiam o mesmo tipo de radiação, chamada de radioatividade. Porém, diferente de Becquerel, o casal Curie utilizava métodos e equipamentos elétricos para estudar os raios X, como por exemplo, o eletroscópio para detectar a emissão de radiação ionizante no ar e o eletrômetro, que servia para medir a intensidade da corrente. Dessa forma, podendo estabelecer relações diretas entre intensidade da corrente e quantidade de radiação emitida. Após a realização de suas pesquisas, utilizando grandes quantidades de substâncias compostas de urânio, em 1898, conseguiu-se comprovar que, substâncias com maior quantidade de urânio emitiam mais radiação do que substâncias com menos; concluindo assim inicialmente, que a emissão da radiação dependia da quantidade de átomos de urânio, e não da estrutura das substâncias. As propriedades comprovadas, por Marie Curie, a respeito de substâncias contendo átomos de urânio em sua composição foram ganhando novas características e afinidades, quando ela identificou um fenômeno, no qual as emissões de algumas substâncias eram mais fortes do que a do urânio puro, reformulando a ideia de que a radiação era proporcional à quantidade de urânio nas substâncias, como é o exemplo do tório, que emitia radiação com intensidade semelhante à do urânio. O fenômeno observado por Marie Curie nas substâncias já havia sido descrito por ela durante os estudos com o urânio, o qual era descrito como radioatividade (SCAFF, 1997).

Durante o período em que trabalhava em seu doutorado, Marie Curie e seu marido constataram que a *pechblenda*³ emitia radiação mais forte que qualquer

³ Descoberta por Antoine Henri Becquerel, a **pechblenda** (U_3O_8) é uma variedade impura de uraninita (U_3O_8). Dela é retirado o urânio, que é extraído do minério, purificado e concentrado sob a forma de um sal de cor amarela.

substância conhecida. Após realizar o processo de refino e tratamento da pechblenda, foi possível isolar um novo elemento químico (400 vezes mais radioativo que o urânio), denominado por Marie Curie, como polônio. Em seguida, realizando um processo semelhante ao realizado para a extração do polônio, Pierre e Marie conseguiram isolar outro elemento a partir da pechblenda, o rádio; tais descobertas lhes concederam um prêmio Nobel de Física em 1903, juntamente com Becquerel, sobre os trabalhos e descobertas relacionados à radioatividade. Oito anos depois, Marie Curie ganhou individualmente outro prêmio Nobel, desta vez em Química, pela descoberta do polônio e do rádio.

Os estudos sobre os raios X foram ganhando cada vez mais importância, com a investigação das suas propriedades. Dentre elas podemos destacar o estudo realizado pelo físico francês George Sagnac (1869 – 1928) sobre raios secundários, que possuíam características semelhantes aos raios X, apesar de serem menos penetrantes e poderem ser emitidos por um material atingido pelos raios X. Tais raios eram facilmente absorvidos ao atingir a matéria, além de produzirem radiação ionizante mais forte. Algumas décadas depois, tomando como base os trabalhos desenvolvidos por George Sagnac, pesquisadores como Ernest Rutherford (1871 – 1937) e Frederick Soddy (1877 – 1956) buscaram esclarecer diversas características da radioatividade e dos elementos radioativos, com a proposta que a radioatividade seria um processo de desintegração atômica.

Segundo Scaff Malagutti (1997), a radioatividade é a transformação espontânea do núcleo atômico de um nuclídeo⁴ para outro. Cada núcleo, em processo de transformação, emite um ou mais tipos de radiações cuja natureza ou naturezas são características das transformações ou do núcleo “pai”. Em certos casos, o resultante ou o nuclídeo “filho” também é radioativo. A mudança de um núcleo (pai) para outro (filho) é chamada de “desintegração” ou “transmutação”, que será tratado com mais detalhes no capítulo 3, onde abordará os princípios e características de cada tipo de radiação.

3. FUNDAMENTOS DA RADIAÇÃO

A radiação é uma forma de energia emitida por um núcleo atômico, que pode ser em forma de partículas ou de ondas eletromagnéticas. Sejam elas corpusculares ou

⁴ É um átomo caracterizado por um número atômico e um número de massa.

ondulatórias, são caracterizadas como energia em trânsito proveniente do núcleo de átomos instáveis, podendo se propagar através do espaço ou da matéria. Consideram-se radiações corpusculares, quando constituídas de partículas atômicas, tais como as partículas α , elétrons, prótons e nêutrons, que formam um feixe de partículas que se movimenta em alta velocidade (para as partículas α , prótons e nêutrons, a velocidade é de cerca de 20.000 km/s; para os elétrons, cerca de 285.000 km/s), onde a energia de cada partícula pode ser descrita como o produto da massa pela velocidade da luz ao quadrado ($E = mc^2$), sabendo que as partículas possuem uma determinada massa m característica. Já as ondas eletromagnéticas, de acordo com sua frequência, podem ser caracterizadas como: micro-ondas, luz visível, radiação infravermelha, ultravioleta ou gama, etc., também chamadas de radiações ondulatórias. Diferente da radiação corpuscular, a radiação eletromagnética é capaz de se propagar no espaço com velocidade de aproximadamente 300.000 km/s; além de ser composta por campos elétricos e magnéticos variáveis que oscilam em planos perpendiculares entre si.

Entretanto, ambas as radiações corpusculares e as eletromagnéticas servem para solucionar problemas envolvendo reflexão, difração, etc., podendo ser estudadas satisfatoriamente pelo modelo ondulatório (SCAFF, 1997). Porém, para a produção ou espalhamento dos raios X, tais radiações são tratadas e aplicadas como partículas ou pacotes de energia eletromagnética, denominadas de “quanta” ou fótons, onde esses fótons apresentam uma energia variante que é dependente da frequência de tal radiação (ou do seu comprimento de onda). Dessa forma, a energia dos quanta é dada pelo produto da constante de Planck (h) pela velocidade da luz (c), divididos pelo comprimento de onda (λ):

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

A relação acima foi desenvolvida por Max Planck, em 1901, para o estudo da energia quantizada, a qual varia em quantidades denominadas “pacotes de energia”.

3.1. ESTRUTURA DO ÁTOMO

O primeiro conceito de átomo foi idealizado a partir do fato que, se uma substância qualquer fosse dividida de modo indefinido, aproximando-se da menor quantidade de matéria, obteríamos o que podemos denominar de matéria elementar.

De acordo com Leucipo de Mileto, seria uma partícula indivisível, a qual foi denominada de *atomon*, partícula esta constituinte de toda matéria. Após inúmeros experimentos ao longo de anos, hoje sabemos que os átomos são constituídos de um núcleo contendo prótons e nêutrons, e de elétrons que orbitam ao redor do núcleo; e que por sua vez, prótons e nêutrons são formados por partículas ainda menores, denominadas de quarks (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

A primeira partícula subatômica foi proposta teoricamente em 1874, denominada de elétron, por George Johnstone Stoney em 1891, derrubando a teoria proposta por Leucipo de Mileto de que a partícula elementar da matéria, que até então seria o átomo, fosse uma partícula indivisível. Seis anos depois, o físico Joseph John Thomson (1856 – 1940) mediu a razão da carga do elétron (e) pela massa (m), por meio do experimento da gota de óleo (OKUNO; YOSHIMURA, 2010), descobrindo a primeira partícula elementar. Em 1919, Ernest Rutherford (1871 – 1937) e alguns de seus discípulos denominaram as partículas positivas que constituem o núcleo do átomo de prótons, tais partículas apresentavam cargas positivas e massa 1.840 vezes maior que a massa do elétron; e de nêutron que também constitui o núcleo dos átomos e tem massa aproximadamente igual a massa do próton. Murray Gell-Mann (1929 – 2019) e George Zweig (1937) propuseram, independentemente, a existência dos quarks em 1963.

Em 1964, nasceu o modelo dos quarks. A partir daí algumas das partículas até então conhecidas na época deixaram de ser consideradas elementares⁵. Porém tais partículas possuem constituintes elementares, ou seja, são constituídas por quarks. Por exemplo, os prótons e os nêutrons, assim como todos os mésons e bárions, não são elementares, porém são constituídos de quarks. Os elétrons, múons e também os neutrinos não são constituídos por quarks, entretanto, são consideradas partículas elementares (TIPLER, PAUL A.; LLEWELLYN, 2008).

3.2. TIPOS DE RADIAÇÃO

Como citado no início do capítulo, as radiações são classificadas em dois tipos; as corpusculares, constituídas de partículas α , partículas β (elétrons, pósitrons), prótons e nêutrons, e as eletromagnéticas que abrangem os raios de micro-ondas, luz visível, radiação infravermelha, ultravioleta e raios gama, por exemplo. Além das

⁵ Uma partícula elementar ou partícula fundamental é uma partícula que não possui nenhuma subestrutura.

características que diferem as radiações corpusculares e eletromagnéticas, existem características específicas em cada processo de decaimento nuclear, relacionadas a: velocidade, massa das partículas e capacidade de penetração dos raios em materiais, por exemplo.

De acordo com Scaff Malagutti (1997), a radiação constituída de partícula α , são estruturalmente equivalentes aos núcleos de hélio, que consistem em dois prótons e dois nêutrons, e possuem massa de aproximadamente 4u (unidades de massa atômica). Os prótons e os nêutrons, ao serem ejetados, podem facilmente colidir com elétrons de um meio qualquer, dissipando sua energia durante a colisão, principalmente por dois mecanismos: ionização e excitação de elétrons. Devido à massa e à energia relativamente alta em comparação a outras formas de radiação nuclear, as partículas α possuem maior facilidade em transferir sua energia para o meio, porém sua capacidade de penetração é bem menor (em consequência da facilidade em interagir com os átomos do meio), em comparação às partículas β e raios γ (L'ANNUNZIATA, 2007a). Entretanto, se a energia fornecida pela partícula alfa não for suficiente para que um elétron seja ejetado, os átomos do meio material absorvem uma certa quantidade da energia e são excitados a um estado de energia mais alto. Dependendo do material que absorverá a energia, os átomos que o compõe retornam imediatamente a um estado fundamental, dissipando a energia absorvida, emitindo fótons de luz visível.

Por sua vez, a radiação beta (β) ocorre devido à emissão de um elétron (ou um pósitron) pelo núcleo de um átomo instável ou radionuclídeo em decaimento, que possui excesso de nêutrons ou prótons. Núcleos que possuem um excesso de nêutrons podem alcançar a estabilidade pela conversão de um nêutron em um próton e uma partícula β^- (beta negativa) acompanhada de um antineutrino ($\bar{\nu}$) (SCAFF, 1997). De forma análoga, um núcleo que possui excesso de prótons, alcança a estabilidade através da conversão de um próton em um nêutron e uma partícula β^+ (beta positiva) acompanhada de um neutrino (ν). Ambas partículas β^- e β^+ possuem massa de repouso idênticas a de um elétron atômico, além de spin e unidade de carga iguais (porém a partícula β^+ apresenta carga elétrica positiva). O neutrino e antineutrino têm propriedades semelhantes entre si, com exceção do spin. Dessa forma, é comum usar a palavra "neutrino" para simplificar as referências para ambas as partículas (ASTRONOO, 2015).

Já que a partícula beta possui uma massa muito pequena (aproximadamente $9,11 \times 10^{-31}$ kg), sendo cerca de 7360 vezes menor que a massa de uma partícula alfa, sua velocidade é relativamente alta (de até 95% da velocidade da Luz) em comparação com uma partícula alfa de energia equivalente. Por ter maior velocidade, e menor massa, apresenta uma capacidade de penetração maior, porém menor poder de deposição de energia, já que interage pouco com os átomos do meio. A partícula beta pode interagir com a matéria através dos mesmos métodos das partículas alfas, porém existe um terceiro mecanismo de interação que distingue a partícula beta: a dissipação de energia radioativa via produção de Bremsstrahlung⁶ (radiação de freamento) (L'ANNUNZIATA, 2007b). Durante a interação, as partículas betas podem colidir com o elétron orbital dos átomos que compõem o meio material ou apenas aproximar-se dele, desacelerando. A cada colisão ou aproximação com os átomos ou elétrons do material, o elétron incidente perde uma parte da sua energia emitindo um fóton. A dispersão de energia ocorre durante as colisões porque a massa da partícula beta é equivalente à de um elétron, sendo possível transmitir grande parte de sua energia cinética para os elétrons do meio, diferente da partícula alfa, que dissipa sua energia ao passar pela matéria ao interagir com elétrons atômicos.

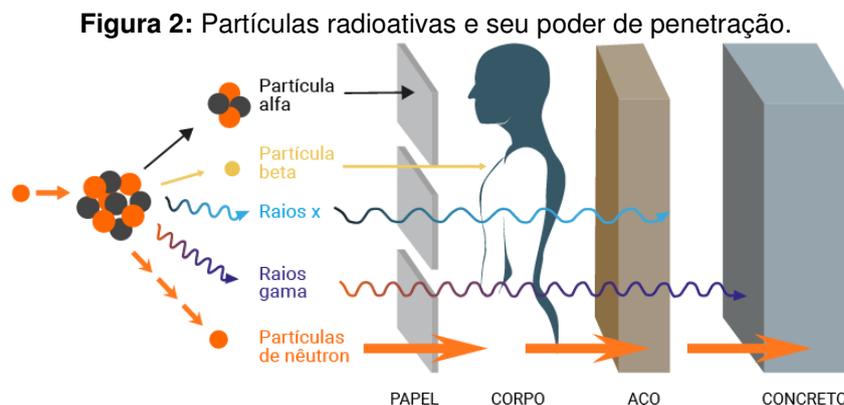
Em algumas situações, após as partículas serem ejetadas durante o processo de decaimento, o átomo atinge um estado de estabilidade, porém, em muitos casos, o núcleo filho (núcleo atômico resultante da decomposição) contém uma certa quantidade de energia e permanece instável. Os núcleos formados, em tais estados instáveis, podem emitir o excesso de energia na forma de fótons, chamados de “raios γ ” (raios gama), os quais apesar de se originarem no núcleo atômico, são de natureza eletromagnética, como a luz, micro-ondas, etc., (SCAFF, 1997). Assim como os raios X, não possuem carga ou massa, sendo que os raios X se originam fora dos núcleos atômicos e possuem poder de penetração menor que os raios gama e uma frequência extremamente alta, maior que a da radiação ultravioleta. Os raios gama, dentre os tipos de radiação, são aqueles que têm maior frequência e menor comprimento de onda, o que dificulta a interação com os átomos do meio, lhe permitindo alta

⁶ Radiação produzida quando um elétron passa próximo ao núcleo de um átomo e acaba sendo atraído pelo mesmo e desviando de sua trajetória original. Com isto, o elétron perde uma parte de sua energia cinética original, emitindo parte dela como fótons de radiação, de alta e baixa energia e comprimento de onda diferentes, dependendo do nível de profundidade atingida pelo elétron do metal alvo.

capacidade de penetração, podendo percorrer grandes distâncias no ar e atravessar diversos tipos de materiais.

De acordo com a Comissão Reguladora Nuclear - NRC (2020), entre as radiações eletromagnéticas existentes, os raios X e raios gama são provavelmente os tipos de radiações mais familiares porque são amplamente utilizados em tratamentos médicos. Esses raios são como a luz solar, exceto por eles terem mais energia, podendo variar a quantidade de energia, de muito baixas (aproximadamente 90 microsievets⁷), como nas radiografias dentárias, aos níveis muito altos (em torno de $10^6 Ci$ ou $10^{16} Bq$)⁸, utilizados nos irradiadores para esterilizar equipamentos médicos.

Como descrito anteriormente, tanto as radiações corpusculares, quanto as radiações eletromagnéticas possuem características específicas que as diferem uma das outras, como: possuir poder de interação alto, percorrer grandes distâncias, penetrar diversos tipos de materiais, dependendo de sua massa e energia, entre outras características que podem ser atribuídas. Na figura 2, pode ser observado como cada radiação se comporta durante a interação com determinados meios materiais. A espessura do meio absorvedor capaz de barrar a partícula incidente está ligada diretamente com sua energia inicial, caracterizando o que é descrito como alcance da partícula no meio (SCAFF, 1997).



Fonte: <https://radioprotecaonapratca.com.br/2017/12/04/radiacao-entenda-de-uma-vez-por-todas/>. Acesso em: 30/03/2020

⁷ O sievert é a unidade usada para dar uma avaliação do impacto da radiação ionizante sobre os seres humanos. É a unidade do Sistema Internacional da dose equivalente e dose eficaz, e que leva em conta os efeitos biológicos em tecidos vivos, produzidos pela radiação absorvida.

⁸ A unidade de atividade é o Curie (Ci) e é definida como a quantidade de material radioativo em que se desintegram $3,7 \times 10^{10}$ átomos por segundo. A unidade de atividade no Sistema Internacional (SI) é o becquerel (Bq). É a quantidade de material radiativo em que um átomo se transforma por segundo. É definido como: $1 Bq = 1s^{-1}$, ou seja, um becquerel corresponde a uma desintegração nuclear por segundo.

As partículas alfa, por serem as de maior massa e possuírem uma carga maior (pois carregam dois prótons), ao interagirem com uma simples molécula do ar, perdem em média 33,85 eV de energia, não obtendo alcance maior que 18 cm ao serem emitidas no ar (mesmo sendo emitidas com grande quantidade de energia) (DEYLLLOT, 2014). Isto, em determinadas condições específicas, já que não é possível estabelecer uma expressão matemática que estabeleça com precisão o alcance das partículas α no ar em condições normais de temperatura e pressão. Entretanto, pode-se chegar a cálculos de aproximação através da seguinte expressão:

$$R_{\text{ar}} = (0,005E + 0,285)E^{3/2}$$

onde (R_{ar}) é o alcance das partículas no ar, dado em centímetros e, (E) a energia das partículas em MeV.

De forma análoga, existe um método para calcular aproximadamente o alcance das partículas em outros materiais, através da expressão:

$$R = 3,2 \times 10^{-4} \cdot A^{1/2} \cdot \left(\frac{1}{\rho}\right) \cdot R_{\text{ar}}$$

sendo R o alcance da partícula no meio, A é o número de massa dos átomos que constituem o meio material e R_{ar} o alcance da partícula no ar. Devido a sua alta interação com a matéria, as partículas alfa podem ser barradas por uma simples folha de papel.

Por sua vez, a partícula beta tem maior alcance que as partículas alfa, chegando a pouco mais de 12 metros no ar (com uma energia equivalente a mesma de uma partícula alfa que percorre apenas 18 cm), sendo possível usar uma quantidade relativamente pequena de blindagem para detê-los (como uma fina camada de alumínio com alguns milímetros de espessura) (NRC, 2020). Embora a radiação beta consiga penetrar no tecido humano, não possui energia suficiente para travessar ou atingir algum órgão interno; no entanto, é utilizada em diagnósticos por imagem ou na terapia do câncer, desde que as partículas beta sejam injetadas no corpo, ou o material radioativo em um tumor.

Por sua vez, os raios X são fótons com energia entre 100 eV e 100 keV, enquanto que raios gama são fótons com energias acima de 100 keV, tornando-os extremamente penetrantes. Os fótons de raios X e gama podem atravessar facilmente

o corpo humano e diversos outros tipos de materiais mais densos e espessos que os descritos para as radiações alfa e beta (INPE, 1990). De acordo com o Instituto Nacional do Câncer (INCA, 2000), diversos materiais podem ser utilizados em blindagem, contanto que seja empregada a espessura suficiente para atenuar a intensidade da radiação aos limites autorizados. Por exemplo, para fótons com uma energia de 0,662 MeV, utiliza-se uma barreira de concreto com aproximadamente 35 cm de espessura ou 0,64 cm de chumbo. Devido à atenuação dos raios, blindagem com materiais densos como concreto, areia, folhas de ouro ou placas de chumbo, são utilizadas para evitar a exposição de órgãos internos sensíveis ou de pessoas que possam estar trabalhando em ambientes próximos a esse tipo de radiação.

Apesar das características próprias de cada radiação que as distinguem uma das outras, todas se originam em átomos, sendo emitidas a partir dos núcleos e/ou dos elétrons que os circundam, desde que os mesmos contenham quantidades mensuráveis de um ou mais radionuclídeos, passando a ser um material instável ou um material radioativo. Existem muitos materiais radioativos de ocorrência natural, porém, fontes artificiais são produzidas constantemente, através da introdução de um nêutron extra nos átomos do material inicialmente estável, tornando-os isótopos radioativos ou radioisótopos, com diversas finalidades no meio industrial.

3.3. ISÓTOPOS

Os isótopos são caracterizados como duas ou mais espécies de átomos de um elemento químico com o mesmo número atômico e posição na tabela periódica, apresentando comportamento químico quase idêntico, mas com massas atômicas e propriedades físicas diferentes, com todo elemento químico possuindo um ou mais isótopos. Um átomo é primeiro identificado e rotulado de acordo com o número de prótons em seu núcleo, descrito pelo símbolo Z . A grande importância do número atômico deriva da observação de que todos os átomos com o mesmo número atômico têm propriedades químicas quase, se não precisamente, idênticas (GREGORY F. HERZOG, 2020). Por sua vez, uma grande quantidade de átomos com o mesmo número atômico constitui uma amostra de um elemento. Uma barra de urânio puro, por exemplo, consistiria inteiramente de átomos com número atômico 92. Para alguns elementos com isótopos radioativos, como o ^{131}I (iodo-131), ^{51}Cr (cromo-51), ^{201}Tl (tálio-201) e vários outros, o termo *nuclídeo* é usado para descrevê-los, já que as

propriedades nucleares dos átomos desses elementos são mais relevantes, do que as propriedades químicas.

A principal característica dos isótopos é que não podem ser separados quimicamente (daí a atribuição de nuclídeos), já que possuem a mesma estrutura eletrônica e sofrem as mesmas reações químicas durante o processo de separação. Por exemplo, o urânio natural, para ser usado em um reator ou na fabricação de uma bomba atômica, deve ser enriquecido, ou seja, ter aumentada a concentração de ^{235}U , que é físsil, em relação à concentração do ^{238}U , utilizando um método que não seja químico, como por exemplo a ultra centrífuga, que considera a diferença na massa de somente três nêutrons (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

De todos os 118 elementos químicos observados até o ano de 2019, são considerados naturais 92 desses elementos, ou seja, podem ser encontrados facilmente na natureza, sem necessidade de procedimentos químicos ou alteração na sua estrutura eletrônica para obtê-lo. Os restantes dos elementos conhecidos são criados artificialmente através de alguma intervenção. Desses elementos, não possuem isótopos estáveis, os elementos de número igual a 43 (o tecnécio, cujo símbolo é Tc), 61 (o promécio, representado pelo símbolo Pm) e maiores ou iguais a 83, iniciando com: bismuto (Bi), polônio (Po), astato (At), radônio (Rn), frâncio (Fr), rádio (Ra); além dos elementos presentes na série dos actínídeos, os quais são do sétimo período – do actínio (Ac) ao laurêncio (Lr). Dos elementos naturais, 66 possuem mais de um isótopo estável; o estanho, por exemplo, possui 10 isótopos estáveis. Hoje em dia, uma quantidade imensa de radioisótopos de quase todos os elementos pode ser e é produzido artificialmente e possuem importantes aplicações, principalmente na Medicina (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

3.3.1. ISÓTOPOS RADIOATIVOS OU RADIOISÓTOPOS

Isótopo radioativo, também chamado radioisótopo, radionuclídeo ou nuclídeo radioativo, é qualquer uma das várias espécies do mesmo elemento químico com diferentes massas, cujos núcleos são instáveis e dissipam o excesso de energia ao emitir espontaneamente radiação na forma de raios alfa, beta e gama (BRITANNICA et al., 2020). Todos os elementos químicos conhecidos possuem no mínimo um isótopo radioativo. O hidrogênio por exemplo, o elemento mais leve da tabela periódica, possui três isótopos, onde apenas o trítio, representado por ^3H , é um

radioisótopo, sendo o ^1H (Prótio) e o ^2H (deutério) estáveis. De acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica (International Atomic Energy Agency - IAEA, 2016) existem 254 isótopos estáveis, porém, mais de 3.000 radioisótopos conhecidos, dos quais apenas cerca de 84 são vistos na natureza, sendo o restante produzido artificialmente em reatores e aceleradores de partículas. Cada isótopo radioativo "pai" acaba decaindo em uma ou no máximo algumas "filhas" isotópicas estáveis específicas para esse pai.

O uso de radioisótopos é bastante eficaz nas ciências radiofarmacêuticas, aplicações industriais, rastreamento ambiental e estudos biológicos, tendo muitas aplicações úteis. Na Medicina, por exemplo, o cobalto-60 é amplamente utilizado como fonte de radiação para impedir o desenvolvimento do câncer. As meias-vidas mais curtas dos radioisótopos são usadas na Medicina porque se deterioram rapidamente, tornando-as adequadas para diagnóstico e terapias paliativas. A Organização Mundial de Saúde (OMS) e a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) foram responsáveis por coordenar um programa de pesquisa sobre rastreadores radioativos em doenças cardiovasculares, que mapeava possíveis pistas para esse problema de saúde generalizado (OMS, 2020). O iodo-131 provou ser eficaz no tratamento do hipertireoidismo, como também o carbono-14, isótopo radioativo medicamente importante, que é usado em testes respiratórios para detectar a bactéria causadora de úlcera *Helicobacter pylori*.

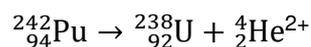
Os isótopos radioativos desempenham um papel fundamental em vários procedimentos na Medicina moderna. Atualmente, há uma necessidade crescente nos métodos de produção de isótopos utilizados em diagnósticos e terapias. O isótopo médico mais utilizado em todo o mundo, $^{99\text{m}}\text{Tc}$, é usado em tomografia computadorizada de emissão de fóton único (Single Photon Emission Computed Tomography – SPECT) para aplicações de diagnóstico. Há também considerável interesse nas aplicações terapêuticas para isótopos como ^{131}I , ^{90}Y , ^{153}Sm , ^{186}Re e ^{177}Lu ; e os chamados pares combinados, onde um isótopo adequado para imagiologia e diagnóstico (como $^{99\text{m}}\text{Tc}$) é usado pela primeira vez, seguido por um segundo isótopo (como ^{186}Re), que fornece doses de radiação terapêutica altamente direcionada, diretamente para as células cancerígenas (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

3.4. DESINTEGRAÇÃO NUCLEAR

A desintegração ocorre quando o núcleo atômico é muito ativo, em consequência do excesso de partículas ou de cargas, ou quando os núcleos de um átomo apresentam números de prótons iguais e número diferente de nêutrons, caracterizando um radioisótopo ou isótopo radioativo.

Toda desintegração radioativa envolve a emissão de uma partícula β ou de uma partícula α do núcleo do átomo que se desintegra. Em algumas ocasiões, as emissões anteriores são seguidas por emissão de uma partícula γ . Esta emissão ocasiona a modificação do núcleo original e, portanto, o número de átomos do elemento que se desintegra (denominado de núcleo pai) é reduzido e, conseqüentemente, aumenta o número de átomos do elemento resultante (núcleo filho) (SCAFF, 1997). No caso do hidrogênio, por exemplo, que possui três isótopos que podem ocorrer naturalmente, são eles: o ^1H conhecido como prótio (possui um próton no núcleo), ^2H chamado de deutério, contendo um próton e um nêutron no núcleo, e o trítio ^3H , com um próton e dois nêutrons. O trítio, por sua vez, é um radioisótopo, ou seja, o trítio apresenta uma instabilidade em seu núcleo, que pode se tornar estável após a emissão de uma partícula β^- (elétron). Dessa forma o núcleo atômico tende a buscar a estabilidade emitindo partículas para o meio em que se encontra (FERNÁNDEZ-VAREA; LEITÓN; EZPELETA, 2011).

Um dos processos que pode ocorrer para que o núcleo atômico com excesso de energia se torne estável é a emissão de um núcleo de hélio, que é constituído por dois prótons e dois nêutrons. Agora, considerando a conservação da energia e levando em conta que a massa é equivalente à energia e que são intercambiáveis (OKUNO; YOSHIMURA, 2010, p. 75); e aplicando essa ideia à emissão de partículas α pelo núcleo do Pu-242, o decaimento α pode ser descrito como:



Nesse caso o núcleo pai, Pu-242 desintegrou-se dando origem ao núcleo filho, U-238 e a emissão de uma partícula α . Para o decaimento alfa ocorrer, a massa nuclear do núcleo pai deve exceder a soma entre a massa do núcleo filho e da partícula α . Processo semelhante ocorre para desintegrações por partículas β e γ , seguindo o princípio da conservação da energia, e que energia e massa são equivalentes.

3.4.1. DECAIMENTO NUCLEAR

O processo de desintegração de um elemento radioativo é um fenômeno probabilístico. Inicialmente, suponha-se que em um instante inicial $t_0 = 0$, tenha-se uma quantidade inicial de N_0 átomos radioativos. Em geral, utiliza-se λ (lambda) como um parâmetro relacionado à probabilidade que algum dos elementos se desintegre em um certo intervalo de tempo característico (de cada elemento), denominada constante de desintegração do elemento; assim, em um instante de tempo $t > t_0$, espera-se obter N átomos radioativos (SCAFF, 1997). O número provável que se desintegrará por unidade de tempo será o produto entre λ e N , ou de mesmo modo por unidade de tempo, já que cada desintegração reduz o número N . Portanto, a taxa de variação é proporcional ao número de átomos e, é representada pela equação

$$\frac{-dN}{dt} = \lambda N \quad (1)$$

onde o sinal negativo representa o decaimento do número N de átomos com relação ao tempo. Dessa forma, o desenvolvimento dos cálculos para vários átomos de uma dada substância radioativa é realizado através da separação e integração das variáveis que compõem uma equação diferencial ordinária (EDO). Por meio da eq. (1), realizando separação de variáveis e a integração, respectivamente;

$$\begin{aligned} \frac{dN}{N} &= -\lambda dt \\ \int_{N_0}^N \frac{dN'}{N'} &= -\lambda \int_{t_0}^t dt' \\ \ln(N) - \ln(N_0) &= -\lambda t \\ \ln\left(\frac{N}{N_0}\right) &= -\lambda t \end{aligned}$$

aplicando a base neperiana na expressão encontrada;

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \therefore N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

onde N_0 e N são os números de átomos no instante inicial e em um certo instante posterior, respectivamente; λ é a constante de desintegração e t , o tempo decorrido.

Esta relação foi estabelecida experimentalmente por Rutherford e Frederick Soddy e representa a lei fundamental do decaimento radioativo; e, posteriormente, foi deduzida por Ergon von Schweidler, em 1905, a partir de considerações estatísticas.

3.4.2. DECAIMENTO SUCESSIVO

A lei do decaimento pode ser estendida a casos mais complexos, em que um núcleo inicialmente radioativo (núcleo pai), desintegra-se em um nuclídeo filho, que mesmo após a desintegração, ainda continua instável e, conseqüentemente, desintegra-se em outro nuclídeo (núcleo neto), e assim por diante até atingir a estabilidade.

O U-238, por exemplo, é uma substância radioativa e apresenta instabilidade no núcleo de seu átomo; e, portanto, sofre o decaimento radioativo, emitindo uma partícula α , transmutando em outro elemento químico, o Th-234. Entretanto o Th-234 também é um elemento instável; logo, o mesmo sofrerá uma decaimento, emitindo uma partícula β , transmutando em Pa-234, que ainda assim é radioativo; e, conseqüentemente, desintegrar-se-á também (OKUNO; YOSHIMURA, 2010). A figura 3 representa o processo de desintegração que continuará até que seja formado o elemento Pb-206, que possui um núcleo estável e não se desintegrará.

Figura 3: Série de decaimento radioativo do urânio 238.



Fonte: https://radioprotecaonapratica.com.br/wp-content/uploads/sites/11/2017/11/decaimento_radioativo.png. Acesso em: 16/04/2020

Como consequência, todas as substâncias encontradas na natureza contêm quantidades variáveis de U-238 e Th-232. Esse processo de desintegração constitui o que se chama série radioativa. Muitos núcleos encontrados na natureza pertencem a uma das três séries que começam com um núcleo pai de meia-vida muito longa e

estendem-se por um conjunto de gerações de núcleos que vão decaindo até alcançar a estabilidade. As três séries naturais começam com U-238, U-235 e Th-232, estes possuem meia vida de $4,47 \times 10^9$ anos, $7,04 \times 10^8$ anos e $1,41 \times 10^{10}$ anos, respectivamente (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

É importante destacar que, no processo de decaimento radioativo, os núcleos de qualquer amostra se desintegram gradualmente, ao longo de intervalos de tempo muito variados que dependem da substância radioativa. Dessa forma, torna-se impossível prever qual núcleo irá decompor-se no próximo instante de tempo, pois todos têm a mesma probabilidade de decair, levando-se em conta que o decaimento radioativo é um processo estatístico ou aleatório com base em leis quânticas.

3.4.2.1. MEIA-VIDA FÍSICA E MEIA-VIDA BIOLÓGICA

Após ressaltar os princípios básicos sobre os processos de desintegração e as características de penetração dos raios emitidos pelos radioisótopos, é importante abordar o tempo decorrente para que tais processos e seus efeitos ocorram, mais especificamente, o intervalo de tempo subsequente para que a metade dos núcleos atômicos de uma amostra radioativa decaia, ao qual é denominado como meia-vida. Existem quatro tipos de meias-vidas (meia-vida física, meia-vida biológica, meia-vida efetiva e meia-vida média) importantes quando se estuda materiais radioativos, principalmente, ao considerar o uso de drogas radioativas para fins diagnósticos e terapêuticos (AUGUSTYN et al., 2020).

Em particular, em Farmacologia, define-se meia-vida física como o período de tempo necessário para reduzir o nível de radioatividade de uma fonte para exatamente a metade do seu valor original devido unicamente ao decaimento radioativo. O intervalo de meia-vida pode ser considerado ilimitado, podendo existir isótopos com meia-vida de bilhões de anos, como o K-40 que apresenta meia-vida de $1,28 \times 10^9$ anos, ou de apenas algumas horas, como por exemplo o I-123, um radioisótopo produzido em ciclotron que apresenta meia-vida de apenas 13,2 horas (INPE, 2018a). A maioria das unidades não são muito úteis para estudos diagnósticos ou terapêuticos, porém, isótopos sintéticos podem variar sua meia-vida em apenas alguns segundos, como o Rb-82 que possui meia-vida de 75 segundos. Outro radioisótopo sintético bastante utilizado na Medicina Nuclear para fins diagnósticos, é

o Tc-99m, possuindo meia-vida física de 6 horas, extraído de um gerador de tecnécio, contendo Mo-99, que decai para Tc-99m (CARVALHO; OLIVEIRA, 2017).

A meia-vida física é representada como $T_{1/2}$, podendo ser entendida como equivalente ao intervalo de tempo necessário para que o número de desintegrações por segundo de um isótopo radioativo caia pela metade, dada pela expressão (2), quando $N = N_0/2$, sendo então, $t = T_{1/2}$. Logo:

$$\begin{aligned}\frac{N_0}{2} &= N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \\ \frac{1}{2} &= e^{-\lambda T_{1/2}} \\ 2 &= e^{\lambda T_{1/2}}\end{aligned}$$

aplicando a função ln obtemos;

$$\begin{aligned}\ln(2) &= \lambda T_{1/2} \\ T_{1/2} &= \frac{0,693}{\lambda}\end{aligned}\tag{3}$$

Assim, o tempo de meia-vida física é expressado através da relação entre um valor constante dividido pela constante de radioatividade, como mostra a equação (3), lembrando que a constante de decaimento é uma característica própria de cada radionuclídeo.

Na Medicina Nuclear, a questão é mais complexa pois deve ser considerada a meia-vida biológica, que depende da distribuição do material dentro do corpo e dos efeitos das substâncias radioativas em um determinado intervalo de tempo, considerando que tal substância será inserida no interior do paciente. Dessa forma é necessário conhecer o tempo para que essa substância química, que foi introduzida em um organismo vivo, passe por uma metabolização e metade desta substância seja eliminada sem causar complicações ao paciente (ou o mínimo possível de efeitos colaterais) e de forma natural pelo organismo. Tal parâmetro é utilizado em processos farmacocinéticos e é denotado por $t_{1/2}(T_B)$, conhecido como meia-vida biológica.

O radioisótopo, ligado a um composto farmacológico para ser utilizado como traçador⁹, é denominado radiofármaco, sendo útil para transportar a substância

⁹ Radiofármaco que pode ser usado para explorar o mecanismo das reações químicas traçando o caminho que o radioisótopo segue a partir da reação com as células ou substâncias presentes no corpo.

radioativa para o órgão ou tecido a ser diagnosticado ou tratado (ONCOGUIA, 2014). Como por exemplo o tálio-201, utilizado no estudo de doenças cardíacas e como detector de alguns tipos de câncer ou o I-123 ou I-131, usado para estudo de captação e cintilografia da tireoide. Ambos radioisótopos apresentam meia-vida biológica relativamente curta e sem ocorrência de danos ao paciente (cerca de 10 dias para o tálio-201 e, 5 a 40 dias para o iodo-131 em pacientes com hipertireoidismo) (INCA, 2018b).

3.4.2.2. MEIA-VIDA EFETIVA (T_E) E VIDA MÉDIA (\bar{t})

A composição da meia-vida física do radioisótopo com a meia-vida biológica (que depende da biodistribuição) e chamada de meia-vida efetiva (T_E) ou apenas meia-vida. Pode ser caracterizado como o tempo que uma substância radioativa permanecerá reduzida à metade da dose inicialmente aplicada, quando uma certa dose de radiação é recebida por um órgão e nele existe alguma substância radioativa, ou seja:

$$\lambda_E = \lambda_F + \lambda_B$$

onde $\lambda_E = 0,693/T_E$, $\lambda_F = 0,693/T_{1/2}$, $\lambda_B = 0,693/T_B$;

$$\begin{aligned} \frac{0,693}{T_E} &= \frac{0,693}{T_{1/2}} + \frac{0,693}{T_B} \\ T_E &= \frac{T_{1/2} \cdot T_B}{T_{1/2} + T_B} \end{aligned} \quad (4)$$

nota-se através da eq. (4), que a meia-vida efetiva (T_E) é sempre menor que a meia-vida física ou biológica.

De acordo com a *Consultants In Nuclear Medicine* (MCN, 2016), há casos especiais que ajudam a esclarecer o conceito sobre meia-vida efetiva, são elas: Se $T_{1/2} \gg T_B$, $T_E \sim T_B$; se $T_B \gg T_{1/2}$, então $T_E \sim T_{1/2}$; se $T_B = T_{1/2}$, então $T_E = 1/2T_B = 1/2T_{1/2}$. Para o primeiro caso por exemplo, o estudo do xenônio-133 (^{133}Xe) para ventilação pulmonar, apresenta $T_{1/2} = 5,3$ dias e $T_B = 15$ segundos. O estudo termina em alguns minutos, considerando que o tempo de meia-vida física é muito maior comparado com a meia-vida biológica. No segundo caso, onde $T_B \gg T_{1/2}$, por exemplo durante a realização de uma tomografia computadorizada (Tc-SC), a meia-vida física

é de 6 horas, e a única meia-vida importante já que T_B é infinitamente grande. Por fim, para Tc-MAA (Albumina Tc-99m-macroagregada) para imagiologia, é descrito o último caso especial, onde $T_{1/2} = 6$ horas, e $T_B = 6$ horas; dessa forma, a meia-vida efetiva é igual a 3 horas. Casos que não são os descritos, é necessário resolver matematicamente a meia-vida desejada (MEDICINE, 2016).

Além da meia-vida, também pode-se determinar a expectativa média de vida ou a vida média (\bar{t}) dos átomos de uma substância radioativa. A vida média é descrita como a propriedade cinética radioativa que caracteriza o tempo necessário para que um grupo de isótopos leva para desintegrar-se (SCAFF, 1997). É representado, teoricamente, como a soma das idades dos isótopos na substância, dividido pelo número total de átomos, ou seja;

$$\bar{t} = \frac{\int_{N_0}^0 t dN}{\int_{N_0}^0 dN} \quad (5)$$

mas, através da expressão (2), note que:

$$\begin{aligned} N &= N_0 e^{-\lambda t} \\ -\lambda t &= \ln\left(\frac{N}{N_0}\right) \\ t &= -\frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{N}{N_0}\right) \end{aligned}$$

A partir da expressão encontrada para a variável de tempo (t), a equação (5) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \bar{t} &= -\frac{1}{\lambda} \frac{\int_{N_0}^0 \ln\left(\frac{N}{N_0}\right) dN}{\int_{N_0}^0 dN} \\ \bar{t} &= -\frac{1}{\lambda} \frac{\int_{N_0}^0 \ln\left(\frac{N}{N_0}\right) dN}{-N_0} \\ \bar{t} &= \frac{1}{\lambda N_0} \left[\int_{N_0}^0 \ln(N) dN - \int_{N_0}^0 \ln(N_0) dN \right] \\ \bar{t} &= \frac{1}{\lambda N_0} \left[\int_{N_0}^0 \ln(N) dN - \ln(N_0) \int_{N_0}^0 dN \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{t} &= \frac{1}{\lambda N_0} \left\{ [N \ln(N) - N]_{N_0}^0 - [\ln(N_0) N]_{N_0}^0 \right\} \\ \bar{t} &= \frac{1}{\lambda N_0} [-N_0 \ln(N_0) + N_0 + \ln(N_0) N_0] \\ \bar{t} &= \frac{1}{\lambda N_0} [N_0] \quad \therefore \quad \bar{t} = \frac{1}{\lambda}\end{aligned}\quad (6)$$

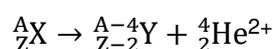
Através da expressão final, nota-se que a vida média (\bar{t}) está naturalmente relacionada à constante de decaimento, sendo inversamente proporcional. Por meio da eq. (3), nota-se que a meia-vida $T_{1/2}$ é descrita em função de um valor constante e a constante de decaimento (λ), e assim como a eq. (6), ambas são quantidades proporcionais, de tal forma que a meia-vida $T_{1/2}$ pode ser escrita em função da vida média (\bar{t}) como, $T_{1/2} = 0,693\bar{t}$. Assim o decaimento e a atividade radioativa diminuem na mesma proporção e com a mesma meia-vida do número de núcleos radioativos.

3.5. TIPOS DE DECAIMENTO

Um núcleo instável se decompõe espontaneamente, ou se desintegra, em uma configuração mais estável, porém este processo ocorre apenas de algumas maneiras específicas, emitindo certas partículas ou certas formas de energia eletromagnética, onde cada emissão possui um decaimento característico. As formas mais comuns de decaimento radioativo espontâneo são por meio das partículas α , partículas β e raios gama γ , que será abordado a seguir.

3.5.1. DECAIMENTO ALFA

A partícula α é uma das que são emitidas espontaneamente dos núcleos de átomos radioativos, principalmente os pesados, com número atômico $Z \geq 83$. Existem cerca de 400 radionuclídeos, naturais e artificiais, emissores espontâneos de partículas α (OKUNO; YOSHIMURA, 2010). De modo geral, núcleos com números atômicos muito altos decaem por emissão α , sendo possível descrever uma desintegração por emissão α da seguinte forma:



Considerando que X é o elemento inicial, denominado de núcleo pai; após o decaimento, transmuta em outro elemento, chamado de filho (representado pelo Y) que acompanha uma partícula alfa, obedecendo a conservação do número atômico, do número de massa e da energia total. Pela equação relativística de energia, $E = [m(Z, A) - m(Z - 2, A - 4) - m_\alpha]c^2 > 0$, onde $m(Z, A)$ é a massa do núcleo (de número de massa A e número atômico Z) e c é a velocidade da luz no vácuo, sendo que essa energia se transforma em energia cinética adquirida pelo núcleo emitido, que é a própria partícula α . Dessa forma pode ser definido a energia de desintegração Q , ou Q da relação nuclear, como:

$$Q = [M_X - (M_Y + M_\alpha)]c^2 \quad (7)$$

onde M_X é a massa do núcleo do átomo pai; M_Y , a massa do núcleo do átomo filho; M_α , a massa da partícula α e c , a velocidade da luz.

Um exemplo é o decaimento do isótopo de rádio, Ra-226 (elemento pai), para um radônio, Rn-222 (elemento filho) mais uma partícula α :



Após a reação de transmutação (8), o processo de decaimento alfa apresenta uma energia de desintegração (Q), igual a 4,871 MeV e uma meia-vida física ($T_{1/2}$) de $1,602 \times 10^3$ anos. Dado o valor Q total do processo, a partícula α carrega energia cinética de 4,784 MeV e o núcleo de radônio recua com energia cinética de apenas 0,087 MeV, obedecendo a equação (7) (SCAFF, 1997). Outra possibilidade durante o decaimento, ocorre quando a partícula α é ejetada com parte da energia cinética, porém o núcleo filho ainda se encontra em um estado excitado, possuindo também parte da energia Q . Nesse caso, o estado nuclear excitado decai com a emissão de um fóton, denominado de raios gama, para um estado de menor energia. O Rn-222, também é instável, e como possui número atômico $Z \geq 83$, decai com a emissão de partícula α . Os valores típicos de energia durante o decaimento alfa estão entre aproximadamente 3 e 10 MeV, que são energias não relativísticas (BRITANNICA; RASMUSSEN; STEINBERG, 2020a).

Um marco na Física Moderna, moldando os desenvolvimentos que levaram à Mecânica Quântica e que estabeleceu uma relação entre energia e tempo de decaimento dos isótopos, foi a formulação da lei empírica de Geiger-Nuttall (QI et al.,

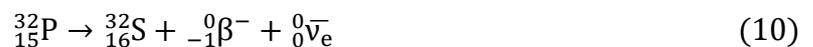
2014). A lei Geiger-Nuttall estabelece uma relação inversa entre a meia-vida física e a energia total disponível para o processo, estabelecendo que isótopos com meias-vidas curtas emitem partículas α mais energéticas que isótopos com meias-vidas mais longas. Esta regra foi formulada por Hans Geiger (1882 – 1945) e John Mitchell Nuttall (1890 – 1958), em 1911, antes do desenvolvimento da formulação teórica (GEIGER; NUTTALL, 1911). A lei pode ser expressada, matematicamente, como:

$$\log_{10} T_{1/2} = A Q_{\alpha}^{-1/2} + B \quad (9)$$

onde Q_{α} é a energia total da partícula alfa no processo de decaimento; A e B são os coeficientes que são determinados ajustando os dados experimentais para cada cadeia isotópica.

3.5.2. DECAIMENTO BETA E CAPTURA DE ELÉTRONS

Para o decaimento β , os processos citados anteriormente neste capítulo, como radiação β^{-} , radiação β^{+} e captura de elétrons, podem ser adequadamente tratados juntos, já que todos eles são consequências de processos pelos quais nêutrons e prótons podem se transformar uns nos outros por interações fracas. Diferentemente do decaimento alfa, os elétrons (ou pósitrons) emitidos no decaimento β^{-} e β^{+} não exibem espectros de energia discretos e nítidos, mas têm distribuições de energia eletrônica que variam de zero até a liberação máxima de energia, Q_{β} (BRITANNICA; RASMUSSEN; STEINBERG, 2020a). Outra característica relacionada ao decaimento por emissão de partículas betas, descrito por Enrico Fermi (1901 – 1954), foi a ideia de um elétron¹⁰ ser emitido do núcleo do átomo, onde só se encontram prótons e nêutrons. A primeira teoria quantitativa da taxa de decaimento beta foi dada por Fermi em 1934; e os fundamentos dessa teoria formam a base da teoria moderna (OKUNO; YOSHIMURA, 2010). No processo mais simples de decaimento beta, um nêutron livre se decompõe em um próton (p), um elétron (e^{-}) e um antineutrino ($\bar{\nu}_e$), como por exemplo o decaimento do ^{32}P (fósforo-32), que pode ser descrito como:



¹⁰ Nesses casos, a massa do elétron torna-se desprezível e será representada como ${}^0\beta$ nas relações (10) e (11).

Especificamente no caso (10), após o processo de decaimento ocorre a liberação da energia de desintegração, igual a 1,71MeV, sendo que essa energia é compartilhada entre a partícula β^- e o antineutrino. As partículas β^- são emitidas em um espectro contínuo de energia, variando de zero até um valor máximo que está na faixa entre 0,005 e 3,5 MeV (BRAGA; RODRIGUES, 2019).

Análogo a emissão de partículas β^- , o decaimento de partículas β^+ , ocorre quando no interior do núcleo, um próton transforma-se em um nêutron, mais um pósitron (e^+) e um neutrino (ν), sendo os dois últimos ejetados do núcleo. Em ambos os casos, não há mudança no número de massa A do núcleo pai e do núcleo filho, já que as partículas ejetadas do núcleo não possuem massa significativa, porém o número atômico Z do núcleo filho aumenta em relação ao núcleo pai no decaimento β^- (considerando a mudança $n \rightarrow p$). Já no decaimento β^+ , ocorre uma diminuição do número atômico do núcleo pai quando um próton se torna um nêutron. Um exemplo típico de decaimento β^+ é o ^{13}N (Nitrogênio-13):



Assim como na emissão de partículas β^- , as partículas β^+ também são emitidas com um espectro contínuo de energia, porém com variação bem menor, entre 0,3 e 1,4 MeV. No caso (11), especificamente, a energia compartilhada entre o neutrino e o pósitron é igual a 1,198 MeV. Devido à conservação da carga, esse tipo de decaimento envolve a liberação de uma partícula carregada chamada “pósitron” que se parece e age como um elétron, mas tem uma carga positiva. Como as interações dessa partícula com outros tecidos são facilmente identificáveis, algumas técnicas de imagem médica envolvem a injeção intencional em pacientes, de um elemento que decai por emissão de pósitrons e, em seguida, monitora onde os pósitrons são emitidos (KHAN ACADEMY, 2015).

Outra situação semelhante ao decaimento por emissão de partículas β^+ , é a captura de elétron que ocorre quando há excesso de prótons no núcleo, porém não há energia suficiente para emitir um pósitron. Nesse caso, um dos elétrons orbitais é capturado por um próton do núcleo, criando um nêutron e um neutrino é emitido. Ao alterar o número de prótons, a captura de elétrons transforma o nuclídeo em um novo elemento. Uma vez que um dos elétrons da camada inferior é capturado (camadas K ou L), a substituição do elétron por um elétron de um estado de energia superior libera

um raio-x característico (de fluorescência) (ARPANSA, 2017). Essas capturas acabam sendo difíceis, pois os elétrons orbitam o núcleo a distâncias relativamente grandes e, mesmo no caso dos elétrons mais internos da camada K, são raras as interações onde as forças fracas conseguem realizar a captura e transformam o elétron. No entanto, a captura de elétrons é mais econômica em energia do que a emissão de pósitrons, seu concorrente. A criação de um pósitron requer 511 keV, caso a energia liberada no decaimento for menor, não é permitida a criação, sendo assim, abaixo desse limite de energia, a captura de elétrons se torna o único processo disponível para reduzir o excesso de prótons (FERNÁNDEZ-VAREA; LEITÓN; EZPELETA, 2011).

O processo de captura de elétrons passaria despercebido se não fosse a reestruturação pela qual o núcleo e as camadas eletrônicas passam. Os elétrons são geralmente capturados da camada mais interna K, deixando espaços vazios na camada da qual foi retirado. Um átomo com uma lacuna em sua estrutura de elétrons se reorganiza, emitindo raios X no processo ou elétrons de Auger¹¹. Essa captura também pode deixar o núcleo em um estado excitado, em uma energia superior ao seu estado fundamental, fazendo com que ele libere raios gama de desexcitação (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

3.5.3. DECAIMENTO GAMA

Um terceiro tipo de decaimento que geralmente acompanha o decaimento alfa ou beta em forma de fótons que não possuem massa ou carga, emitidos de núcleos atômicos instáveis, é chamado de radiação gama γ . O decaimento alfa ou beta pode simplesmente prosseguir diretamente para o estado fundamental do núcleo filho sem emissão gama, mas o decaimento pode resultar total ou parcialmente em estados de energia mais altos (estados excitados) do filho (BRITANNICA; RASMUSSEN; STEINBERG, 2020b). Neste último caso, o decaimento gama pode ocorrer à medida que os estados excitados se transformam em estados de energia mais baixa do mesmo núcleo, ou seja, a energia $h\nu$ corresponde à diferença de energia entre dois

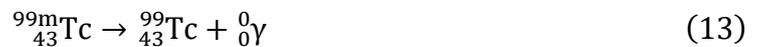
¹¹ É o fenômeno em que a transição de um elétron da camada superior para uma camada inferior do átomo promove a emissão de um segundo elétron, sendo um processo de desexcitação atômica, que compete com a emissão de fóton.

níveis de energia nuclear. Neste caso, o núcleo não sofre transmutação e, em geral, seu estado final é o fundamental, que pode ser descrito como:



onde ${}^A_ZX^*$, indica o núcleo no estado excitado. O tempo de decaimento gama está, normalmente em um intervalo de 10^{-15} s a 10^{-9} s. Após o decaimento, o núcleo torna-se estável.

Há uma grande variedade de taxas de meia-vida para o processo de emissão gama. Os mais comuns e utilizados para fins medicinais são aqueles que a meia-vida de emissão gama excede cerca de um nano segundo. As transições para os níveis mais baixos de energia, de alguns núcleos que demoram segundos, horas ou mesmo dias para decair por emissão gama, são chamadas transições isoméricas; e o nível excitado de energia, metaestável (OKUNO; YOSHIMURA, 2010). O tecnécio 99m , é um exemplo de elemento que apresenta um nível de energia excitado ou um elemento metaestável (a letra m presente no elemento significa metaestável). A transição isomérica do ${}^{99m}\text{Tc}$ para o estado fundamental é:



Após o decaimento, o tecnécio atinge o estado fundamental, deixando de ser um elemento metaestável. Outra alternativa à emissão gama, ocorre quando um núcleo excitado passa para um estado de energia mais baixo ao ejetar um elétron da nuvem em torno do núcleo. Essa ejeção de elétron orbital é conhecida como conversão interna e dá origem a um elétron energético e, frequentemente, a um raio-X, e a nuvem atômica preenche o orbital vazio do elétron ejetado. A razão de conversão interna para a emissão gama alternativa é chamada de coeficiente de conversão interna (STARK, 2020).

Existem diversas aplicações para os raios gama. Na Medicina, por exemplo, os raios gama são utilizados em técnicas de imagens de tomografia por emissão de pósitrons (PET), em radioterapia para tratar tumores cancerígenos (STARK, 2020). Outras aplicações para os raios gama, são varredura PET, levantamentos aéreos de emissões de raios gama da superfície (utilizado para mapeamento geológico, a exploração mineral e a identificação de contaminação ambiental), por

exemplo. Algumas aplicações das radiações abordadas até o momento, serão trabalhadas mais especificamente no próximo capítulo.

3.6. IONIZAÇÃO E INTERAÇÃO COM A MATÉRIA

A ionização em química e física é caracterizada como qualquer processo pelo qual átomos ou moléculas eletricamente neutros são convertidos em átomos ou moléculas eletricamente carregados (íons) ou apenas excitados. Quando radiações (corpúsculares e eletromagnéticas), interagindo em um meio, transferem aos elétrons do meio energia suficiente para removê-los do átomo, causando ionização, estas são denominadas radiações ionizantes (cada tipo de radiação possui uma ionização específica) (SCAFF, 1997). As partículas como os fótons de energia elevada de raios X e gama, por exemplo, podem atuar sobre os elétrons orbitais, produzindo ionização ou simples excitação. Em contrapartida, partículas energéticas neutras, como nêutrons e neutrinos, não causam ionização e se tornam mais penetrantes, já que sofrem pouca interação com o meio. A ionização, em geral, ocorre sempre que partículas carregadas com energia suficiente ou energia radiante viajam através de um meio. Por exemplo, partículas alfa e elétrons de materiais radioativos causam ionização extensa ao longo de seus caminhos (LOTHA; YOUNG, 1998). Lembrando que cada tipo de radiação produz ionizações diferentes, que envolvem os números de pares de íons que são formados por unidade de comprimento de percurso da partícula, assim denominada de ionização específica ou poder ionizante.

As radiações eletromagnéticas, como raios X ou raios gama, produzem menos ionizações que as radiações corpúsculares, como as que emitem partículas α ou β ao interagir com um meio. De modo geral, pode-se dizer que as ionizações produzidas no mesmo meio pelas radiações α , β e γ ou X, estão entre si como 10.000, 100 e 1, respectivamente. De forma inversa, caracteriza-se o poder de penetração no meio, ou seja, quando maior o poder de ionização, menor o alcance das partículas. A espessura do meio absorvedor capaz de barrar a partícula incidente relaciona-se diretamente com sua energia inicial e constitui o alcance da partícula no meio considerado (SCAFF, 1997). Por exemplo, as partículas α , dada a sua alta ionização específica, a distância percorrida por elas em um dado meio é pequena, já que é considerada uma partícula pesada, por possuir dois prótons e dois nêutrons, o que facilita a interação com os átomos que constituem o material, diferentemente dos fótons emitidos que

constituem os raios γ e raios X, por não possuir massa ou carga os fótons acabam dificultando a interação com os átomos do meio, se comparados com as partículas α .

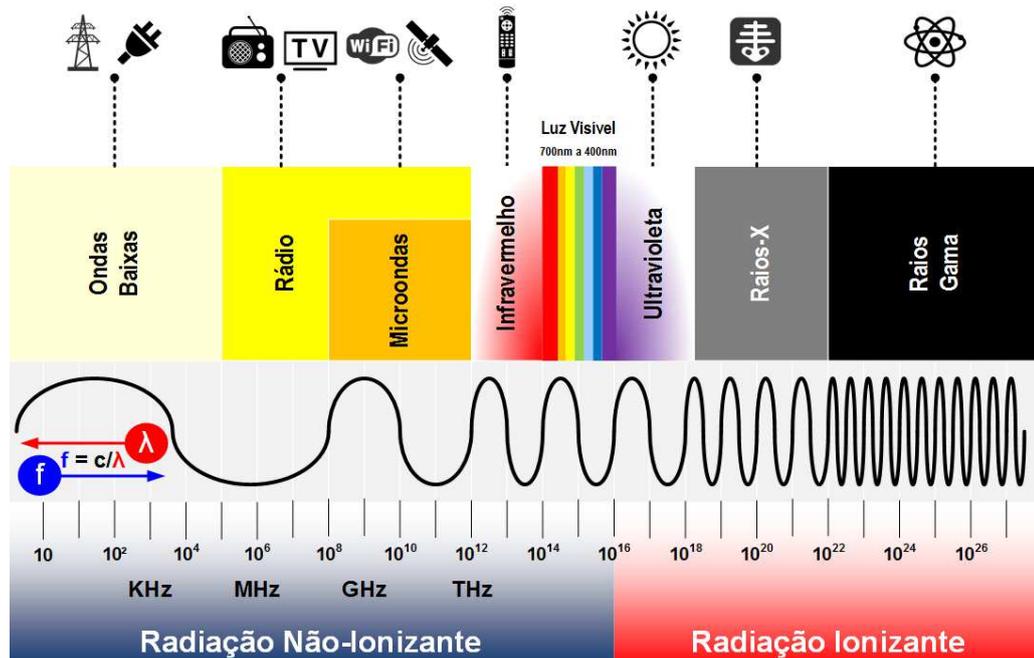
O poder ionizante δ é aproximadamente proporcional ao quadrado da carga da partícula e inversamente proporcional à sua velocidade:

$$\delta \propto \frac{Q^2}{V}$$

Outra medida também utilizada é a transferência linear de energia (Linear Energy Transfer – LET), que é associada à energia cedida ao meio por unidade de percurso da partícula. Após conhecer a energia média necessária para produzir uma ionização em um determinado meio, ou seja, conhecendo a ionização específica, pode-se conhecer também a transferência linear de energia. A ionização específica inerente à radiação X e raios γ é consideravelmente menor do que nas radiações corpusculares. Por exemplo, para iguais energias, a ionização específica da radiação X é cerca de 100 vezes menor do que das partículas α (LIMA, 1999). Os elétrons energéticos resultantes da absorção da energia radiante e da passagem das partículas carregadas, por sua vez, podem causar ionização adicional, denominada ionização secundária.

A ionização e excitação são as principais maneiras pelas quais as radiações citadas até o momento transferem sua energia para a matéria durante as colisões em um conjunto de interações que dependem da energia e massa atribuída a cada partícula relacionadas ao tipo de radiação que está sendo emitida; além do comprimento de onda, de acordo com o espectro eletromagnético, e com a sua capacidade de interagir com a matéria, sendo subdivididas em dois grupos: radiações ionizantes e radiações não ionizantes. Estas últimas possuem energia insuficiente para ionizar um átomo, abrangendo o espectro eletromagnético com frequência igual ou menor ao ultravioleta, como ilustra a figura 4.

Figura 4: Ilustração do espectro eletromagnético e grupos de radiação.



Fonte: <https://3.bp.blogspot.com/-sXqLk5k4KY/VyVAWSSyhDI/AAAAAAAAAFXw/w8i-YRVHIGACRgGk3hS8SqqzM1dQbKnYwCLCB/s400/LabCisco-EEM.png>. Acesso em: 23/09/2020.

Dessa forma, serão abordados apenas as radiações com frequência acima de 3×10^{16} Hz, que podem ionizar átomos ou moléculas de um meio, seja de forma direta ou indiretamente.

3.6.1. RADIAÇÃO DIRETAMENTE IONIZANTE

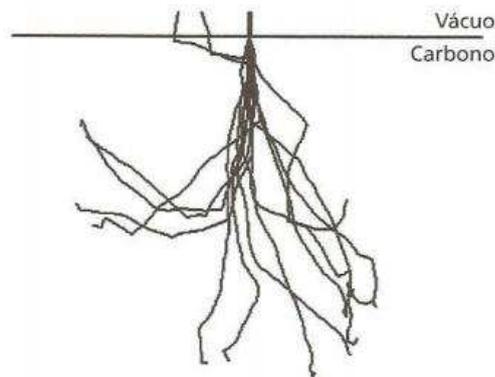
Como abordado no decorrer do capítulo, radiação é definida como a emissão de energia de átomos instáveis, seja por princípios ondulatórios ou corpusculares. A radiação ionizante é aquela cuja energia é superior à energia de ligação dos elétrons de um átomo com o seu núcleo. São radiações que possuem energia suficiente para arrancar elétrons de suas órbitas. Ao interagir com a matéria biológica, a radiação desencadeia ionizações, resultando em alterações nas estruturas das células (CNEN, 2019).

A radiação diretamente ionizante é dividida em dois tipos, as partículas carregadas rápidas pesadas e as partículas carregadas rápidas leves. Partículas α ejetadas de radioisótopos e prótons decorrentes de radiação cósmica ou aceleradores de partículas, são exemplos de radiação ionizante constituídas de partículas carregadas pesadas. Estas possuem massa de repouso superior à do elétron ($m_e c^2 = 511 \text{keV}$) e energia cinética maior que a energia de ligação dos elétrons aos átomos que constituem o meio que sofrem as colisões, onde a transferência de energia

cinética ocorre quase que contínua, até que alcance os níveis de energia térmica (em torno de 0,025 eV, em temperatura ambiente) (OKUNO; YOSHIMURA, 2010). Em cada colisão, valem as leis de conservação da energia e do momento, e a partícula tem uma trajetória praticamente retilínea no meio, pois sua massa é, em geral, muito superior à do elétron com o qual colide. Como resultado da passagem das partículas carregadas pesadas no meio, parte da energia cinética é transferida para a nuvem eletrônica, causando a ejeção de elétrons; e assim, produzindo uma radiação secundária constituída essencialmente de elétrons que estão ligados aos átomos do meio (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

Já as partículas consideradas carregadas rápidas leves abrangem apenas elétrons e pósitrons que possuem energia cinética maior que a energia de ligação entre os elétrons da nuvem eletrônica e os átomos que constituem o meio. Como o elétron e o pósitron apresentam comportamentos semelhantes (exceto por aniquilação do pósitron), serão tratados ambos como elétrons. As interações são semelhantes às de partículas pesadas, ou seja, interagem com os elétrons da nuvem eletrônica dos átomos que constituem os meios. Mas há duas diferenças básicas: as colisões entre partículas de mesma massa (elétron incidente e elétron do meio) e a velocidade elevada dos elétrons, implica que devemos dar tratamento relativístico ao seu movimento (LIMA, 1999). Por se tratar de partículas de mesma massa e altas velocidades, as colisões podem resultar em grandes perdas de energia e mudanças bruscas na trajetória do elétron em uma única colisão, resultando em trajetórias desordenadas, como ilustrado na figura 5.

Figura 5: Trajetória de elétrons com 100 keV de energia cinética, incidentes em carbono.



Fonte: <http://www.guycox.com/emtutor/monte.htm>. Acesso em: 25/09/2020.

Como consequência de trajetórias desordenadas, para um conjunto de elétrons com a mesma energia cinética inicial, a penetração de cada partícula no meio pode

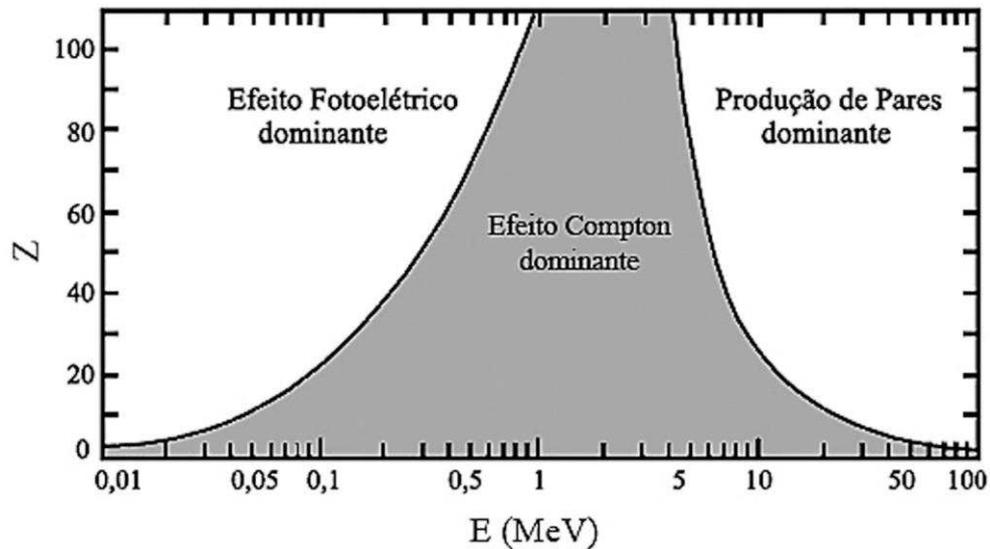
variar muito. Além das interações com elétrons, há interações das partículas carregadas leves com núcleos atômicos, que podem resultar na emissão de raios X, no processo de Bremsstrahlung (freamento). Essa emissão de raios X, resultante da interação de elétrons, é denominada de radiação secundária. Para as interações de pósitron, acrescentam-se os dois fótons procedentes de cada aniquilação dessas partículas com um elétron do meio, com energia de 511 keV ou mais (COSTA, 2011).

3.6.2. RADIAÇÃO INDIRETAMENTE IONIZANTE: FÓTONS

As radiações indiretamente ionizantes incluem os raios gama e X (fótons); além dos nêutrons, os quais interagem com a matéria, originando radiações secundárias, geralmente ionizantes, que perdem energia por colisões com elétrons ou com núcleos atômicos (SILVA, 2016). Os fótons, representados pelos raios γ e X, interagem raramente, durante a passagem pelo material. O processo de interação dos fótons é claramente diferente dos processos de ionização em relação às partículas carregadas, com três processos se destacando no uso das radiações na Medicina, são eles: o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e criação de pares elétron-pósitron.

Para todos estes processos, considera-se que a radiação eletromagnética se comporta como partícula e que cada um desses processos tem uma probabilidade de ocorrência que varia com a energia do fóton, o número atômico e a densidade do meio (OKUNO; YOSHIMURA, 2010). A figura 6 mostra as faixas de energia em MeV (eixo x) e números atômicos (eixo y) em que cada processo mencionado acima predomina, onde altos números atômicos com baixa energia prevalece o efeito fotoelétrico, o mesmo intervalo de Z, porém com altos níveis de energia, a produção de pares é mais relevante.

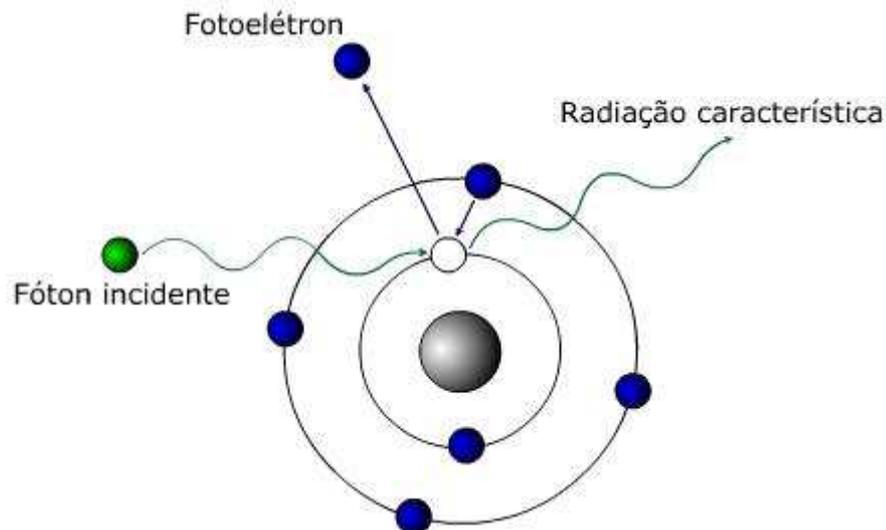
Figura 6: Faixas de predominância em energia e em número atômico, dos três tipos de interação de fótons com a matéria.



Fonte: <https://www.scielo.br/img/revistas/rbef/v39n1//1806-1117-rbef-39-01-e1503-gf01.jpg>. Acesso em: 25/09/2020.

No efeito fotoelétrico envolvendo raios γ e X, apesar de aparentemente o processo ser o mesmo (absorção de um fóton e aquisição de energia cinética por um elétron), para fótons ionizantes, o fenômeno ocorre de forma ligeiramente distinta do efeito fotoelétrico casual produzido pela ação da luz e da radiação UV, cuja explicação se dá por meio dos quanta de luz descritos por Albert Einstein em 1905. O processo com fótons ionizantes, como descrito na figura 7, ocorre no interior do material e com elétrons ligados, pertencentes a camadas atômicas internas e, no processo casual, os elétrons fracamente ligados são ejetados da superfície de materiais, em geral, metais.

Figura 7: Esquema do efeito fotoelétrico com fótons ionizantes.



Fonte: <https://efeitofotoeletricoecompton.webnode.com.br/explica%C3%A7%C3%A3o/>. Aceso em: 26/09/2020.

Os elétrons emitidos em consequência dos fótons ionizantes são conhecidos como fotoelétrons, porém nenhum elétron é emitido se a frequência da radiação for menor do que um certo limiar de frequência¹², que é característico do material irradiado. Caso a frequência da radiação seja maior que o limiar de frequência, o número de fotoelétrons emitidos será de acordo com a intensidade da energia (SILVA, 2016).

A energia cinética dos fotoelétrons cresce com o aumento da frequência da radiação; dessa forma, a energia é dada pelo produto da constante de Planck pela frequência do fóton ($E = hf$). A energia do fóton é transferida inteiramente para um único elétron, provocando a emissão ou ejeção do elétron de sua órbita, em situações que a energia do fóton é maior que a energia de ligação do elétron (SILVA, 2016). A energia máxima adquirida pelo elétron é dada por:

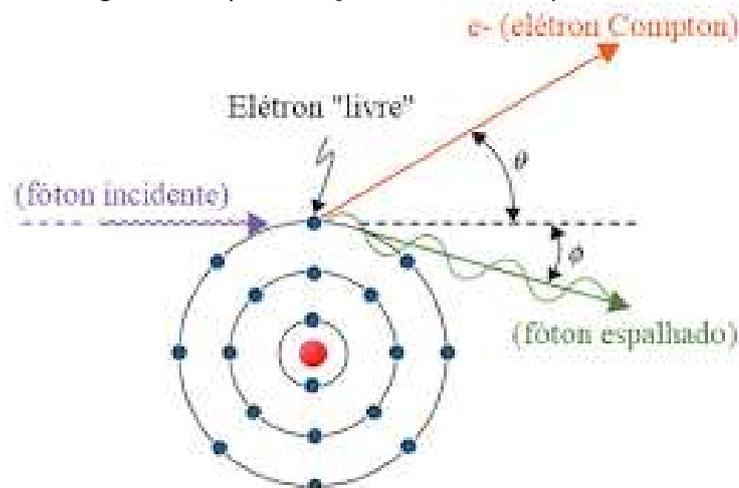
$$E_c = hf - \varphi$$

onde φ é a energia de ligação do elétron, e quanto menor for o φ , menos energia será necessária para arrancar o elétron da sua órbita.

O segundo processo de interação observado na figura 8 é o efeito Compton, ou espalhamento Compton, onde ocorre interações entre fótons e elétrons orbitais dos átomos, sendo que o fóton transfere apenas uma parte da sua energia quando interage com o meio, resultando no aumento do comprimento de onda. O efeito Compton foi observado por Arthur Compton (1892 – 1962) em 1923, o qual recebeu o prêmio Nobel de Física em 1927, por descrever tal efeito, onde o fóton perde parte de sua energia e muda de direção após a colisão, figura 8 (SILVA, 2016).

¹² Energia limiar de fotoemissão ou limiar de frequência corresponde à mínima energia que um fóton deve ter para conseguir arrancar elétrons da amostra, produzindo então uma corrente de fotoemissão.

Figura 8: Representação do efeito Compton.



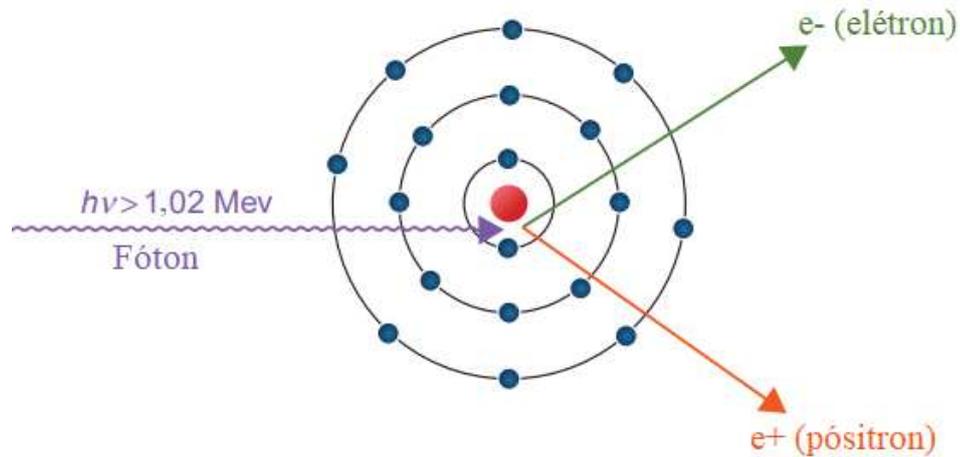
Fonte:

<https://lh3.googleusercontent.com/Dq1VacKggPMhkdhQp6iiTiz1IG1YwPJS4UtrINAbzDwL8exX6767E0pyQ58x8mAVsJC2Vg=s136>. Acesso em: 26/09/2020.

Após a transferência de parte da energia, o elétron fracamente ligado ao átomo é ejetado formando um ângulo θ ; conseqüentemente, o fóton incidente é espalhado em um ângulo ϕ em relação à sua direção inicial, contendo o restante da energia disponível, dada por $hf' = hf - K$, onde K é a energia cinética do elétron. O efeito Compton ocorre em todos os materiais e, predominantemente, com fótons de energia média (100 keV e 1 MeV), quando a energia do fóton incidente é muito maior em comparação com a energia de ligação do elétron (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

Por fim, a produção de pares completa as principais interações de fótons com a matéria. As criações de pares elétron-pósitron ocorrem quando fótons possuindo no mínimo energia igual a 1,02 MeV se aproximam de núcleos de átomos com altos números atômicos. Assim após a interação com o núcleo atômico, o fóton desaparece e da origem a um par elétron-pósitron (figura 9).

Figura 9: Representação da interação do fóton com o núcleo de um átomo no processo de formação de pares elétron-pósitron.



Fonte:

<https://lh3.googleusercontent.com/Dq1VacKggPMhkdhQp6iiTiz1IG1YwPJS4UtrINAbzDwL8exX6767E0pyQ58x8mAVsJC2Vg=s136>. Acesso em: 27/09/2020.

A energia, em excesso, do fóton na interação com o meio é convertida em energia cinética. Após a colisão, as partículas são ejetadas em direções opostas. A distribuição de energia mais provável é que cada partícula adquira metade da energia cinética disponível, embora qualquer distribuição de energia seja possível (FAIZ; HEALTH, 2018). Por exemplo, em casos extremos, é possível que uma das partículas receba toda a energia, ou uma quantidade relativamente maior em comparação com a outra. O processo de produção de pares é um exemplo onde pode ser observado o evento em que a energia é convertida em massa, conforme previsto pela equação de Einstein: $E = mc^2$ (FAIZ; HEALTH, 2018).

Após o aparecimento do par, o pósitron transfere parte de sua energia para o meio e volta a se combinar com um elétron, onde ocorre a desintegração, dando origem a dois fótons. Este processo é bastante utilizado para formação de imagens de tomografias por emissão de pósitrons (PET), onde é inserida uma substância emissora de pósitrons no interior do paciente e, ao encontrar elétrons, ocorre a aniquilação das partículas; em consequência da aniquilação, surgem dois fótons de raios γ , ambos com energia de 511 keV, que logo em seguida serão capturados por detectores e formando assim a imagem. Um feixe de raios γ ou X, ao se propagar através da matéria, sofre redução de intensidade, ou seja, o feixe é atenuado, pois parte de sua energia é absorvida pela matéria através dos efeitos fotoelétricos, Compton e da formação de pares (SILVA, 2016).

3.6.3. RADIAÇÃO INDIRETAMENTE IONIZANTE: NÊUTRONS

A radiação constituída de nêutrons, assim como os fótons, não causa ionização diretamente, porém o nêutron transfere sua energia para partículas carregadas (geralmente para o núcleo), provocando ionização. Dentro da variação de energia dos nêutrons, os nêutrons térmicos se destacam por possuir energia cinética próxima a 0,025 eV, que equivale aproximadamente a energia térmica à temperatura ambiente. Estes, por sua vez, são capturados normalmente por núcleos atômicos, que podem se tornar radioativos (LIMA, 1999).

O processo de interação dos nêutrons se dá por meio da força nuclear forte, que possui curto alcance, e também, participam de diversas reações nucleares, resultando em dois tipos de espalhamento: espalhamentos elásticos ou inelásticos, podendo ser capturados por núcleos. Nos choques elásticos, o nêutron cede parte de sua energia para o núcleo. O chamado núcleo de recuo¹³ pode ser uma radiação ionizante secundária se estiver ionizado e se sua velocidade for suficiente para tal. Já os choques inelásticos apresentam uma mudança da energia interna do núcleo, deixando-o em um estado excitado. A desexcitação desse núcleo pode ocorrer por meio da emissão de ondas eletromagnéticas em forma de radiação gama (que é uma radiação secundária), ou seja, a passagem do nêutron pela matéria pode produzir radiações secundárias. (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

O nêutron apresenta diversas aplicações, por exemplo, o procedimento básico para a obtenção de uma radiografia empregada na inspeção de materiais. Para se obter uma imagem, o material é posicionado em um feixe uniforme de nêutrons, onde o padrão de intensidade transmitido é convertido em imagem mediante uma tela conversora e um meio para o registro da imagem (ZAMBONI, 2007). Dentre as suas principais aplicações, destaca-se a inspeção de materiais ricos em hidrogênio como; borracha, água, sangue, explosivos e materiais radioativos, mesmo que o material esteja envolvido por uma espessa camada de certos tipos de metais. Desta forma, as informações fornecidas pelas técnicas da radiografia com nêutrons complementam aquelas fornecidas pelas convencionais que empregam raios X ou radiação γ (ZAMBONI, 2007). Outras técnicas e procedimentos envolvendo as radiações citadas neste capítulo serão abordadas de forma mais minuciosa no capítulo 4.

¹³ Fenômeno que ocorre quando um nêutron colide com o núcleo de um átomo resultando na liberação de uma pequena quantidade de energia, que por sua vez é compartilhada entre uma partícula beta e o neutrino

4. EFEITOS BIOLÓGICOS E APLICAÇÕES DA RADIAÇÃO

Até o momento, foi abordado muito sobre as radiações e seus efeitos quanto a interação com a matéria, desde o efeito fotoelétrico, efeito Compton, até produção de pares. Também foi destacado os tipos de radiações, suas origens e o que podem causar ao interagir com os átomos que constituem a matéria, sendo capazes de quebrar ligações químicas, arrancar elétrons de átomos do meio que incidem e transformá-los em íons. Visto que partículas carregadas, como elétrons, podem interagir diretamente com elétrons dos átomos (por colisão), fazendo-os serem ejetados; ou núcleos que ficam excitados ao serem bombardeados por nêutrons e sofrem decaimento emitindo radioatividade. Raios X e gama interagem através dos efeitos fotoelétrico, Compton e/ou produção de pares, onde os elétrons absorvem energia e passam para um nível excitado ou é ejetado do átomo. Todo tipo de exposição excessiva a essas radiações como: luz solar, raios X, gama, etc., trazem graves lesões ao tecido, podendo até levar a sua destruição. Os efeitos podem ser desde uma simples queimadura até o câncer (TODESCATTO, 2016).

A exposição às radiações, sejam elas para fins medicinais, tais como as utilizadas nos exames de imagens, tratamento de tumores, ou até mesmo as exposições naturais como a absorção de raios solares no dia a dia, ou de forma artificial para bronzeamento, têm sido alvo de constantes debates sobre os riscos e benefícios proporcionados pela exposição aos tipos de radiação. Isso deve-se ao risco que essas radiações trazem à saúde, malefícios causados pelo uso incorreto ou excessivo que podem causar desde vermelhidão e eritemas na pele, até danos irreversíveis nas moléculas de DNA. De acordo com Okuno (2010), a exposição frequente à radiação pode ocasionar um grande número de danos simultâneos em células dos tecidos, ou ainda, a quebra das hélices (fitas) do DNA que são ligadas entre si por meio de bases nitrogenadas e pontes de hidrogênio (que também podem ser quebradas), até mesmo a indução à formação de aberrações estruturais nos cromossomos.

Por se tratar de algo extremamente complexo e delicado, pesquisadores procuram estabelecer doses efetivamente seguras (com o mínimo de riscos) e algumas leis vigentes adotam normas para a proteção tanto dos usuários quando para os trabalhadores que fazem uso de radiações ionizantes. Por exemplo, nos Estados Unidos, a exposição anual máxima às radiações de todas as fontes, exceto

a radiação natural é de 2 a 5mSv de acordo com as leis vigentes, para os que trabalham com radiações ionizantes, a exposição máxima permitida é de 50mSv por ano (LIMA, 1999). Estudos mostram que não existem doses de radiação ionizante seguras, e que as doses só são permitidas se os benefícios forem maiores que os malefícios (TODESCATTO, 2016). As radiações ionizantes podem trazer graves problemas para a saúde quando utilizadas de maneira inadequada e imprópria; entretanto, traz vários benefícios à humanidade, desde que manuseada corretamente, principalmente, para fins médicos como: imagens para diagnósticos e tratamentos de doenças.

Na radioterapia, o uso das radiações ionizantes para tratamento de tumores é justificável, uma vez que uma doença fatal como o câncer não tratado leva o paciente a morte rapidamente. Nos tratamentos radioterápicos com radiações ionizantes, dependendo do local e tipo de tumor, são utilizados radioisótopos que emitem radiação diretamente no tumor e tem um tempo de meia vida muito curto em relação aos isótopos naturais (LIMA, 2008). A Medicina Nuclear utiliza radiofármacos compostos por radioisótopos produzidos em laboratório, nas suas aplicações. Esses têm como objetivo emitir energias e tipo de radiação com um tempo específico para cada tipo de tumor, além de possuírem características parecidas com as substâncias existentes no local estudado e, só assim, são administradas no paciente e o tratamento é iniciado. Este capítulo fornece uma breve visão geral dos princípios da radioterapia e procedimentos de produção de imagens. Os tópicos a serem discutidos incluem os aspectos físicos de como as imagens são formadas e sua individualidade na interação com órgãos, tecidos e fluidos; bem como, os tratamentos e funcionamento da radioterapia (teleterapia e braquiterapia) e quimioterapia.

4.1. APLICAÇÕES MÉDICAS PARA O TRATAMENTO DO CÂNCER

Embora venha sendo estudado desde a antiguidade, alguns dos avanços mais significativos na compreensão dos cientistas sobre o câncer começaram a ser feitos a partir dos meados do século XX (COSTA, 2019). Esses avanços levaram a grandes melhorias durante toda a etapa de tratamento de pacientes diagnosticados com a doença, como por exemplo, no desenvolvimento de métodos para diagnóstico com

alta precisão, cirurgias seletivas, radioterapias, medicamentos quimioterápicos e terapias direcionadas¹⁴.

Os avanços nos tratamentos conseguiram provocar uma diminuição nas mortes por câncer, principalmente em países desenvolvidos. Entretanto, o câncer continua sendo umas das principais causas de doença e morte em todo o mundo. Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS, 2017), a cada ano, cerca de 8,8 milhões de pessoas morrem de câncer, a maioria em países de baixa e média renda. Em 2017, apenas no Brasil foram registrados mais de 215 mil óbitos, abrangendo homens e mulheres de todas as idades; já para os anos de 2021 e 2022, o Instituto Nacional do Câncer (INCA) estima que devem ser registrados aproximadamente cerca de 625 mil novos casos da doença, o câncer de pele será o mais incidente com 177 mil casos, seguido pelos cânceres de mama e próstata com 66 mil ocorrências cada. (INCA, 2019a). Apesar do alto número, cerca de 30% a 50% dos cânceres registrados podem ser prevenidos e/ou controlados através de planejamentos baseados em evidências que envolvam prevenção, detecção precoce e tratamento, já que muitos cânceres têm alta chance de cura definitiva, caso for detectado em seu estado inicial e tratado de forma correta.

O câncer pode responder melhor a um tratamento que se torna mais eficaz em situações que a doença é localizada em estágio inicial. Isso resulta em uma maior probabilidade de sobrevivência, além de menor morbidade¹⁵ e um tratamento com menor custo. Segundo a Organização Pan-Americana de Saúde (OPAS, 2018), o diagnóstico correto do câncer é essencial para um tratamento adequado e eficaz, pois a partir do grau e estágio que se encontra o câncer é estabelecido uma classificação e estadiamento¹⁶ que ajudam a prever o comportamento de um tumor, e assim, auxiliando na abordagem mais apropriada ao tratamento, seja por meio de cirurgia, radioterapia, quimioterapia ou transplante de medula óssea.

4.1.1. A FÍSICA APLICADA AO DIAGNÓSTICO POR IMAGENS

Imagens médicas são aquelas obtidas por todo e qualquer processo físico que permite a obtenção e a visualização de dados que contribuam para o diagnóstico de

¹⁴ Tratamento que surgiu através do melhor entendimento da ação dos genes, das proteínas e de outras moléculas presentes nas células tumorais, criando o conceito da terapia personalizada.

¹⁵ Conjunto de causas capazes de produzir uma doença.

¹⁶ Método utilizado para avaliar o grau de disseminação de um câncer.

problemas de saúde (TERINI; MACHADO, 2017). Tais imagens, para a obtenção de informação, necessitam de alguma forma de energia para serem produzidas. Geralmente, essa energia é transportada por meio de ondas eletromagnéticas que penetram nos tecidos a serem examinados.

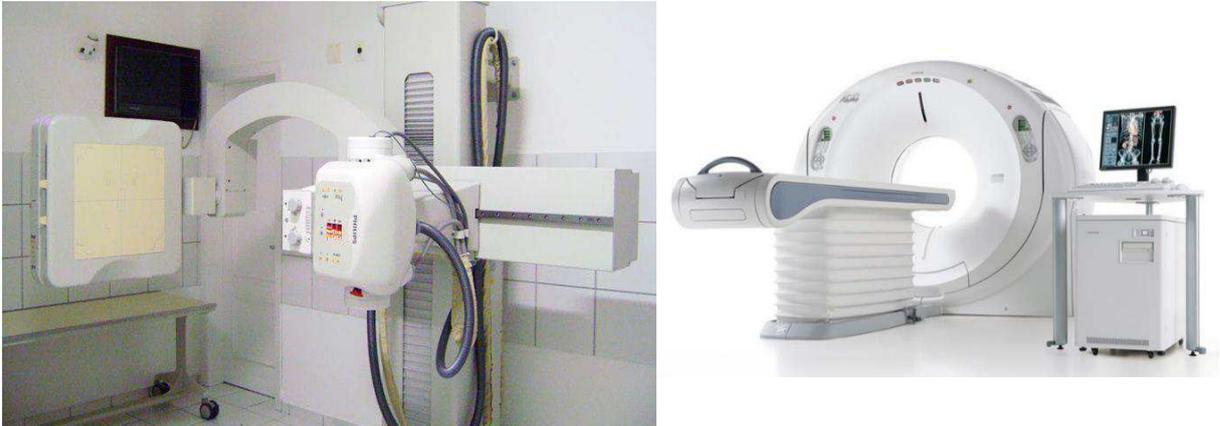
A luz visível possui a capacidade de penetrar alguns milímetros (de acordo com o comprimento de onda) nos tecidos, sendo bastante utilizada para a obtenção de imagens em áreas como: dermatologia, gastroenterologia, obstetrícia (endoscopia), etc. Em geral, a luz visível é utilizada em todas as imagens diagnósticas de qualquer procedimento realizado que necessite de luz para serem observadas em qualquer mídia, seja por meio de filmes ou monitores (TERINI; MACHADO, 2017). Porém, em departamentos clínicos de radiologia, para obter imagens médicas em radiografia geral, mamografia ou tomografia computadorizada, por exemplo, utilizam-se raios X. Para imagens por ressonância magnética e imagens obtidas em Medicina Nuclear, são utilizados radiofrequência e raios gama, respectivamente.

Na radiologia, as ondas eletromagnéticas de alta frequência são utilizadas para diagnósticos e tratamentos de doenças. A radiologia originalmente envolvia o uso de raios X no diagnóstico de doenças. Além do uso de raios X, também raios gama e outras formas de radiação ionizante no tratamento de doenças. Em anos recentes, a radiologia também passou a adotar o diagnóstico por método de varredura de órgãos, com o uso de isótopos radioativos e também com radiação não ionizante, como ondas de ultrassom e ressonância magnética nuclear (AUGUSTYN; HIGGINS; PALLARDY, 2010). Da mesma forma, o escopo da radioterapia foi estendido para incluir, no tratamento do câncer, agentes como hormônios e drogas quimioterápicas.

4.1.1.1. RADIOGRAFIA

No fenômeno observado por Roentgen, só foi possível obter imagens de ossos no interior do corpo humano por meio da radiação, graças ao efeito da atenuação dos raios X emitidos. Essa é a base para a formação de imagens em radiografias conhecidas atualmente. Os raios X, portanto, são captados para produção da imagem, seja diretamente por um filme fotossensível no interior de um chassi fotográfico, no caso da radiografia simples, seja por detectores que quantificam a intensidade radiológica recebida e a transmitem para um processador que formará a imagem posteriormente (tomografia computadorizada) (figura 10) (TERINI; MACHADO, 2017).

Figura 10: Equipamento hospitalar emissor de raios X para radiografia convencional e um equipamento para TC (Tomografia Computadorizada).



Fonte: <https://radiologia.blog.br/images/radiologia-digital-3.jpg>. Acesso em: 14/11/2020.

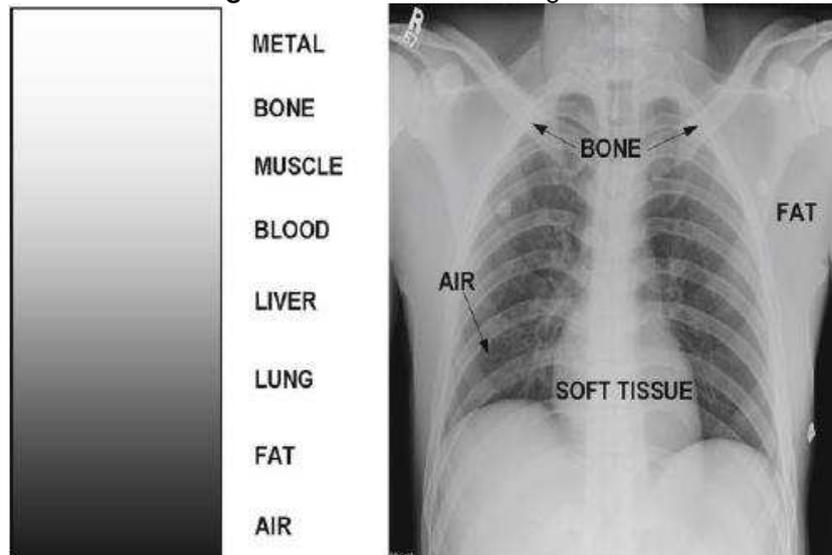
A tensão aplicada no tubo de raios X pode variar na faixa entre 40 e 150 kV. As correntes no tubo são de várias dezenas de miliamperes (mA) e os tempos de exposição, de fração de segundo. Em uma radiografia convencional um pulso de raios X ($< 0,5$ s) é emitido, filtrado por folhas de alumínio (Al) ou cobre (Cu), para minimizar a quantidade de fótons de baixa energia que tem funcionalidade para a formação da imagem, porém que causam aumento da dose. Após o feixe incidir no corpo do paciente, interage com os tecidos por absorção (efeito fotoelétrico) ou espalhamento (Rayleigh ou Compton) e sai com espectro modificado, alcançando, em partes, o detector (TERINI; MACHADO, 2017).

A atenuação pode ser entendida como a diminuição na intensidade da radiação emitida ao passar por um determinado meio, variando de acordo com a densidade do mesmo, resultando em diferentes tons de cinza para cada tipo de material em que os raios X penetram (FERREIRA, 2016). Considerando apenas os princípios radiográficos básicos que se destacam na densidade radiográfica, responsável pelos diferentes tons de cinza observados através da anatomia que forma as radiografias. Na (figura 11), nota-se pontos que apresentam as quatro densidades básicas: ossos, tecido mole, gordura e ar, que são visíveis em uma radiografia convencional de tórax.

As principais densidades radiográficas apresentam características próprias, como por exemplo, o osso, sendo a mais densa das quatro densidades básicas e parece branca ou “radiodensa” como os radiologistas preferem dizer (SINGH; NEUTZE, 2012). Já tecidos moles (tecidos conjuntivo, epitelial e muscular) e os fluidos, possuem a mesma densidade em uma radiografia convencional. Essa densidade é ligeiramente menor do que a do osso, mas um pouco maior do que a

gordura. A gordura por sua vez, nos permite ver as bordas de várias estruturas de tecidos moles, uma vez que a gordura é ligeiramente menos densa do que os próprios órgãos. E por último a densidade do ar, que pode ser observada nos pulmões, lúmen traqueal e ao redor do paciente. De acordo com (SINGH; NEUTZE, 2012), as densidades do ar são geralmente bastante escuras, quase pretas, na radiografia. Assim, os pulmões não são radiodensos, mas sim radiolúcidos¹⁷.

Figura 11: Densidades radiográficas.



Fonte: (SINGH; NEUTZE, 2011, p. 8)

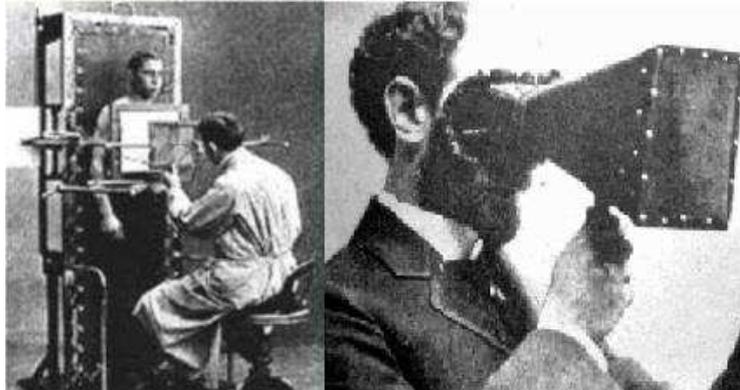
As densidades radiográficas são normalmente aditivas de uma forma aritmética. Isso significa que uma densidade de tecido mole que é duas vezes mais espessa que uma estrutura de tecido mole adjacente será duas vezes mais branca. Por outro lado, uma estrutura com metade da densidade de uma estrutura adjacente, mas com o dobro da espessura, demonstrará uma densidade radiográfica idêntica. Assim o processo de radiografia por raios X se torna bastante eficiente na representação de estruturas ósseas e dentárias ou em imagens do pulmão, sendo úteis para indicações odontológicas, médicas e veterinárias, além de emitirem radiação apenas durante a realização do procedimento.

¹⁷ São imagens de uma radiografia que absorvem pouco os raios X, e ao ser processada apresenta um tom escuro ou negro. Por serem pouco densas, permitem a passagem do feixe com pouca ou nenhuma resistência.

4.1.1.2. FLUOROSCOPIA

Em meio a diversos métodos de diagnósticos que se tornaram possíveis por meio da radiação após a descoberta de Röntgen, Thomas Alva Edison (1847-1931) teve um papel fundamental ao desenvolver o primeiro fluoroscópio portátil em 1896, que consistia de uma tela fluorescente sensível aos raios X, que podia mostrar a imagem sem necessidade de radiografar fotograficamente (KAYE, 1923). Os antigos exames fluoroscópicos eram realizados por observação visual direta das telas fluorescentes, quase sem nenhuma proteção contra a radiação (figura 12), causando danos sérios ao longo dos anos.

Figura 12: Antigo exame de fluoroscopia.



Fonte:

http://3.bp.blogspot.com/_62yJ8ME4uw8/SCIm7e5VJvI/AAAAAAAAAF0/i_m_WTbtfAw/s200/xray-fluoroscope.jpg. Acesso em: 23/11/2020.

A fluoroscopia pode ser utilizada sozinha como procedimento de diagnóstico ou associada a outras técnicas como a radiografia simples ou contrastada, tomografia ou ressonância magnética. Através do exame fluoroscópico, utilizando o contraste com bário, é possível fazer avaliações do tubo digestivo, e verificar se há obstruções ou desvios anormais, enquanto o contraste se desloca pelo tubo digestivo. Atualmente, a fluoroscopia se tornou indispensável no procedimento de cirurgias minimamente invasivas, como por exemplo, para a realização de cateterismo; o exame permite a avaliação do fluxo sanguíneo através das artérias coronárias, para avaliar a presença de obstruções arteriais. Com a inserção de cateter venoso, a fluoroscopia auxilia a orientação do médico a avaliar o sistema periférico do paciente (figura 13) (TENIRI; MACHADO, 2017).

Figura 13: Equipamento fluoroscópico para um procedimento de cateterismo.



Fonte: https://www.bonde.com.br/img/bondenews/2016/11/img_1_27_1008.jpg. Acesso em: 23/11/2020.

Os equipamentos de fluoroscopia usam sistemas de detectores capazes de produzir imagens numa rápida sequência temporal. Produz imagens de projeção e transmissão, sendo, na essência, uma radiografia em tempo real. Baseiam-se na propriedade de certos materiais que emitem luz quando sujeitos a raios X ou gama. Geralmente, utiliza-se uma placa de fósforo localizada atrás do paciente, e a radiação transmitida causa excitação dos átomos de fósforo, proporcionando a formação de imagens dos órgãos internos em movimento, que será convertida e apresentada em um monitor para visualização (TENIRI; MACHADO, 2017).

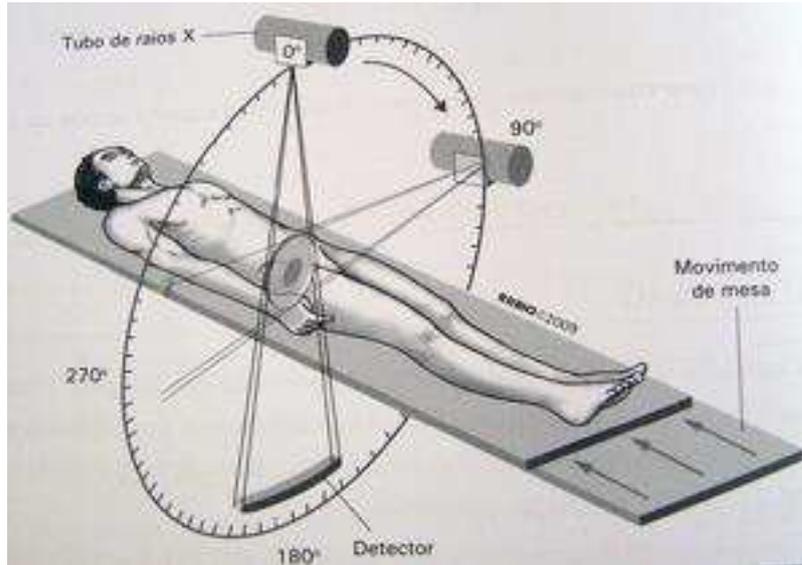
4.1.1.3. TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

A tomografia partilha do mesmo princípio das radiografias formadas pelos raios X, ambos somente são possíveis devido a atenuação desses raios pela matéria. Os exames de tomografia computadorizada são versões modernas dos exames radiográficos, apresentando um detalhamento maior da imagem, sendo possível formá-las digitalmente. A Tomografia Computadorizada (TC) com raios X foi introduzida pela primeira vez em 1973 pelo engenheiro elétrico britânico Godfrey N. Hounsfield (1919 – 2004), sendo o primeiro método de diagnóstico por imagem que se tornou possível através do uso de computadores (TENIRI; MACHADO, 2017).

A tomografia basicamente utiliza os raios X para a formação das imagens. As principais diferenças da radiografia é que o tubo de raios X gira ao redor do corpo do indivíduo e os detectores captam a imagem por vários ângulos (figura 14) e, a

formação da imagem digital, ou seja, é construída computacionalmente. Essas características permitem que a imagem possa ser construída tridimensionalmente, além de serem bem mais práticas que as radiografias convencionais que utilizam filmes, pois podem ser guardadas sem a necessidade de um espaço físico e sempre que precisar reproduzi-las não há a necessidade de um novo exame (FERREIRA, 2016).

Figura 14: Esquema simplificado de uma tomografia computadorizada.



Fonte:

https://lh3.googleusercontent.com/proxy/gSv1x6gm9AGoiY36Wr5YI9tS0TCzHnDQfN0ZraCxYy3OY8u5vPoK7UtNKkr45rukFy5KizqJEDHaU_V7A9SDYwmzE1-X. Acesso em: 28/11/2020.

Os processamentos das geometrias digitais usados para gerar uma imagem tridimensional das estruturas internas do corpo humano são formados a partir de uma grande série de imagens de raios-X bidimensionais tiradas em torno de um único eixo de rotação. Atualmente existem os tomógrafos de 6ª geração (figura 15), chamados de espiral. Estes consistem de scanners com capacidade de rotação contínua (360°) do conjunto (tubos de raios X e detectores), além de movimento de translação do gantry¹⁸, o que possibilita a obtenção de dados do volume de um tecido, não apenas de fatias, como era obtido nos tomógrafos de gerações anteriores (KINNS; PEASE, 2012).

¹⁸ Estrutura móvel em forma de anel onde os componentes essenciais para o funcionamento do tomógrafo são alojados.

Figura 15: Equipamento de tomografia computadorizada de sexta geração.



Fonte: <https://lithoralnews.com.br/images/setembro20/foto-013-2020-novo-aparelho-tomografia-marieta.jpg>. Acesso em: 28/11/2020

Um gantry de TC pode ser inclinado em até 30 graus em direção a uma posição para frente ou para trás, essa angulação do gantry permite que o operador alinhe a anatomia pertinente com o plano de varredura (FERREIRA, 2016). A grande vantagem desse exame é que o mesmo permite o estudo de secções transversais do corpo humano, sendo mais eficiente que a radiografia convencional, que consiste na representação de todas as estruturas sobrepostas do corpo humano. Os scanners de TC podem produzir imagens tomográficas de 10 mm até 0,50-0,62 mm de espessura ao longo de um comprimento de 50 cm do paciente em 5 s. As imagens podem revelar desde a presença de cânceres, até hematomas internos, aneurismas e outras patologias presentes no corpo do paciente (TERINI; MACHADO, 2017). Por se tratar de um método radiológico que permite distinguir tecidos com uma margem muito precisa (apenas 0,5%, na radiologia convencional; esse valor chega a 5%), a TC se tornou muito utilizada como complemento ao tratamento de tumores, antes e após procedimentos cirúrgicos e/ou terapias, para avaliação da extensão e margens do tumor primário, e observação quanto a presença de metástases.

4.2. A FÍSICA APLICADA À RADIOTERAPIA

Após a descoberta da radioatividade em 1895 por Roentgen, houve um crescimento extraordinário nos estudos e pesquisas envolvendo as radiações e suas aplicações, principalmente entre os anos de 1896 e 1898. Embora a maioria das descobertas fundamentais inicialmente não fossem destinadas ao uso na Medicina, muitas vezes não demorava muito para que fossem aplicadas a problemas médicos, como aconteceu de fato com as radiações, onde experimentos foram desenvolvidos

para tratar o câncer, bem como outras doenças, assim como o rádio também foi testado no tratamento de câncer após 3 anos da sua descoberta por Marie Curie em 1898. Em outros casos, especificamente, na terapia com prótons, levaram 35 anos, da descoberta da física fundamental até o primeiro tratamento do paciente (SHALEK, 1977).

A radioterapia visa o alcance de um índice terapêutico, na qual as células sofrem rompimentos das ligações químicas das moléculas, ocasionando a formação de radicais livres¹⁹, que por sua vez, ligam-se a moléculas das células, tais como as proteínas, enzimas ou o DNA, gerando efeitos bioquímicos e fisiológicos, que produzirão alterações morfológicas e/ou funcionais nas células (FERREIRA, 2016). Durante a terapia, os raios X penetram facilmente na pele e agem indiretamente nas moléculas de água, quebrando-as e tendo como produto o radical livre hidroxila (OH) e o peróxido de hidrogênio. Por serem muito instáveis, reagem rapidamente com outras moléculas para ganhar estabilidade, resultando em uma reação em cadeia, e assim, produzindo danos à molécula de DNA das células. Em contraste às radiações corpusculares, que ao entrarem em contato com as células internas do corpo agem diretamente e causam danos ao DNA, como quebra simples ou dupla da hélice, ou ausência de uma das bases nitrogenadas (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

Para as doses empregadas na radioterapia matar em células malignas, relaciona-se o grau de gravidade do efeito, ou seja, quanto maior a dose, mais forte e severo é o efeito, onde uma dose alta de radiação é capaz de causar a morte celular de um número muito grande de células de um tecido ou órgão, a ponto de ele perder sua função ou ter seu funcionamento ficar prejudicado. Normalmente, doses muito altas ocorrem em acidentes ou tratamentos que envolvam o uso de radiação, onde tecidos sadios próximos a tumores também são irradiados (INCA, 2019b). Dessa forma são atribuídos fatores de aplicações e efeitos, considerando uma maior eficácia com o mínimo possível de danos a tecidos sadios, e máximo para células cancerígenas, uma vez que as reações teciduais que resultam de exposição à radiação de alta LET são similares às resultantes de radiação de baixa LET, o que pode se agravar em ambos os casos de acordo com o aumento da dose ou aumento da taxa de dose, podendo levar à morte do paciente exposto ao tratamento (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

¹⁹ Radicais livres são moléculas instáveis e que apresentam um elétron que tende a se associar de maneira rápida a outras moléculas de carga positiva com as quais podem reagir ou oxidar.

A quantidade total de radiação aplicada em radioterapia varia dependendo do tipo e do estágio do câncer que esteja sendo tratado. As doses para o tratamento de tumores sólidos variam de 20 a 80 Gy (Gy, é a unidade no Sistema Internacional de Unidades (SI) de dose absorvida), que administradas em dose única, podem causar danos graves não só às células cancerígenas, como também às células saudáveis do tecido próximo ao tumor, podendo ocasionar o agravamento ou aparecimento de outros tumores (UNEP, 2016). Daí surge uma colaboração entre físicos e médicos, com a finalidade de tornar o tratamento cada vez mais eficaz, onde por meio dos conhecimentos da física é realizada a modelagem da área onde se encontra o tumor e medição da dosagem em pequenas frações repetidas, que podem atingir uma proporção máxima de até 1 Gy (SHALEK, 1977). Esse fracionamento permite que as células do tecido sadio se recuperem, enquanto as células tumorais são mortas porque são geralmente menos eficientes na recuperação após a exposição à radiação.

Provavelmente, desde a descoberta da radioatividade até os dias atuais, não há maneira de avaliar a real contribuição da Física no aperfeiçoamento dos procedimentos clínicos, tanto no processamento de imagens, quanto na eficácia de tratamentos. O devido progresso nos procedimentos radioterápicos ao longo do último século foi em grande parte ao aprimoramento em focalizar e fornecer radiação de forma mais eficaz ao volume alvo do tumor e a diminuição de danos à tecidos saudáveis. As inúmeras descobertas da Física e as invenções tecnológicas têm sido uma das causas por trás desse progresso (SHALEK, 1977). Essas contribuições resultaram em fontes aprimoradas, com a definição e a medição de quantidade e qualidade da radiação, elaboração de sistemas de dose, além dos cálculos que permitem aplicações de radiação ionizante para diferentes regiões do corpo, como também de diferentes pacientes com tumores dos mais variados tipos e tamanhos. Desenvolvimento, como o tratamento de radiação com feixes externos, iniciado pela descoberta dos raios-X; e o tratamento no interior de cavidades, tecidos conjuntivos e artérias, iniciado pela descoberta do rádio, são exemplos de terapias desenvolvidas a partir do conhecimento fundamental da Física das Radiações e que são utilizadas até hoje (BORTFELD; JERAJ, 2011).

Apesar das contribuições anteriores, a Física pode proporcionar grandes melhorias quando se trata de aplicações em Medicina, exemplo na orientação de imagens, gerenciamento de movimento quadridimensional (método utilizado em

tomografias computadorizadas que possibilitam visualizar o comportamento dos órgãos em pleno funcionamento), terapia com partículas carregadas (prótons), além do aperfeiçoamento e maior eficiência de tecnologias mais compactas (BORTFELD; JERAJ, 2011).

4.2.1. TELETERAPIA

A teleterapia ou radioterapia externa consiste na terapia a curta distância, com a fonte emissora de radiação se encontrando a cerca de 1 metro de distância do paciente. Nesse tipo de tratamento, pode ser utilizado feixes de raios X, raios gama, elétrons de alta energia e nêutrons, aplicado em doses fracionadas, que variam de 25 a 35 aplicações (INCA, 2019b). Foi utilizada pela primeira vez no início dos anos 90, através de bombas de rádio (Ra), que consiste em uma fonte emissora de radiação com radioisótopos. Na década de 1950, foram desenvolvidos equipamentos com fontes de cobalto 60 (^{60}Co), que consiste em uma fonte que emite fótons sob a forma de radiação, buscando resultados semelhantes ao obtido com o rádio (Ra), porém com um elemento de fácil acesso e menor custo (COSTA, 2019).

Após o desenvolvimento de equipamentos de ^{60}Co , surgiram os aceleradores lineares (figura 16), são aparelhos emissores de raios X de alta energia; e atualmente, tornaram-se os únicos equipamentos que proporcionam uma radioterapia externa de alta qualidade. Posicionados a uma determinada distância do paciente, onde o feixe de radiação pode ser modificado e direcionado para a região onde se encontra o tumor, sendo possível adaptar a distribuição da dose em quantidade uniforme de acordo com o tecido que deve ser irradiado (SBRT, 2018).

Figura 16: Equipamento para terapia por emissão de radiação externa ou teleterapia.



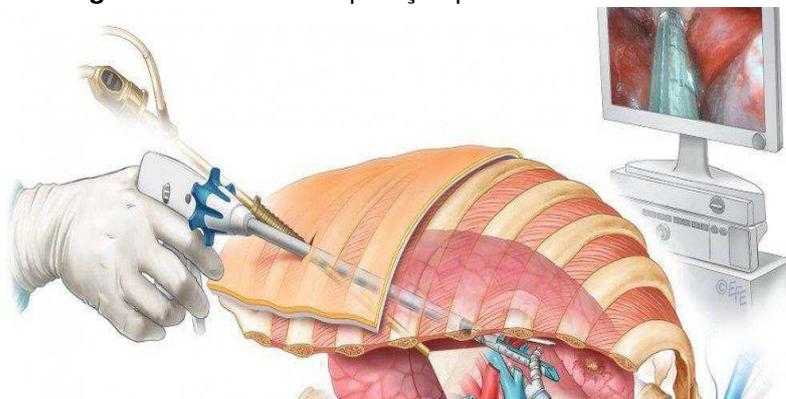
Fonte: <https://www.grupooncoclinicas.com/radioterapia-recife/wp-content/uploads/sites/24/2018/11/Oncocli%CC%81nicas-43-850x567.jpg>. Acesso em: 28/01/2021.

Na extremidade do tubo, os elétrons se chocam com um alvo metálico de alto número atômico, fazendo com que ocorra uma liberação de energia, que é proporcional à perda de velocidade da partícula. Aceleradores lineares se tornam mais eficazes que as fontes de ^{60}Co , considerando a liberação de fótons de alta energia e que estes liberam menos doses para a pele do paciente. Alguns equipamentos permitem que os elétrons acelerados atinjam diretamente os pacientes, porém, não penetram profundamente no tecido, liberando a dose a poucos centímetros da pele (INCA, 2000). As aplicações são realizadas com o auxílio de moldes colocados nos pacientes que permanecem imóveis, facilitando a delimitação da área que recebe a radiação. Como as aplicações de teleterapia são realizadas frequentemente e em pequenas doses fracionadas, as complicações são minimizadas, além de permitir uma cura mais eficaz, quando administradas em doses iguais.

4.2.2. BRAQUITERAPIA

A braquiterapia, conhecida como radioterapia interna, utiliza fontes contendo radioisótopos, onde estes são inseridos na região onde se encontra o tumor dentro do corpo do paciente (figura 17). Ainda na década de 1890, além de terapias por raios X, os pioneiros no tratamento radioterápico realizavam terapias através de elementos radioativos, como o rádio 226 (^{226}Ra), em formas de agulhas, tubos e moldes. Na década de 1960, várias outras fontes começaram a ser utilizadas; como o cobalto 60 (^{60}Co), céσιο 137 (^{137}Cs), ouro 198 (^{198}Au) e irídio 192 (^{192}Ir) (COSTA, 2019).

Figura 17: Método de aplicação por meio de cateteres.



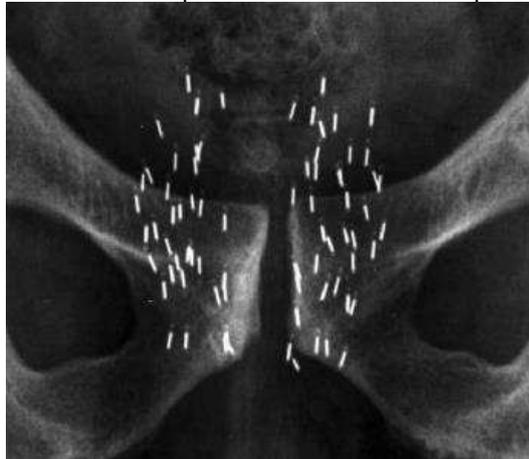
Fonte: https://financaltribune.com/sites/default/files/field/image/17january/12_brachytherapy.jpg. Acesso em: 29/01/2021.

A radiação sai da fonte, percorre o cateter colocado no paciente, e através dos aplicadores, irradiam na área delimitada. Dessa forma são realizadas as

braquiterapias com alta taxa de dose (High Dose Rate – HDR), aplicadas em um curto período de tempo e realizadas apenas algumas sessões. Assim com a teleterapia, a braquiterapia é administrada por uma equipe composta por diversos especialistas de diferentes áreas, cada um responsável por diferentes cuidados e demandas de cada paciente, entre eles, o físico médico que trabalha em colaboração com o radioterapeuta no planejamento do tratamento fornecido (ONCOGUIA, 2015). Dentre todo o planejamento e etapas do tratamento, o físico é o responsável por determinar os ângulos de incidência dos feixes de radiação, localização do volume alvo do tumor, composição das curvas de distribuição, determinação do tempo de cada tratamento, execução das medidas de segurança nos equipamentos, bem como todos os parâmetros dosimétricos necessários para o cálculo da dose de cada paciente (TERINI; MACHADO, 2017).

Além da braquiterapia com altas doses, também existem braquiterapia com baixas doses. Essas, por sua vez, são inseridas permanentemente dentro do tumor (figura 18), geralmente usada em paciente que apresentam câncer de próstata, onde são inseridas “sementes” radioativas no seu interior.

Figura 18: Raio x de uma cintura pélvica com implantação de sementes de iodo-125 para o tratamento de um paciente com câncer de próstata.



Fonte: http://scielo.isciii.es/img/revistas/aeue/v35n6/original4_f2.jpg. Acesso em: 31/01/2021.

Por se tratar de baixas doses e os radioisótopos utilizados apresentarem uma meia-vida relativamente curta, o nível de radiação emitida pelas sementes diminui gradativamente, de modo que a maior parte da radiação é eliminada no período de 3 a 9 meses após o procedimento, tornando-se quase que inativas em seguida. O iodo-125, ouro-198, irídio-192 e o paládio-103 são exemplos de radioisótopos com meia-vida curta que são utilizados para este procedimento de braquiterapia.

4.3. QUIMIOTERAPIA

A quimioterapia é um termo associado indevidamente ao tratamento de câncer, sendo descrita também como uma droga anticancerosa. No entanto, a quimioterapia é a manipulação e administração de compostos químicos ou drogas, para a eliminação de doenças em geral. Os compostos químicos desenvolvidos para o tratamento do câncer são inseridos no corpo do paciente por via oral, intravenosa, intramuscular, subcutânea, intratecal ou tópica (COSTA, 2019). A droga desenvolvida para o tratamento, depois de introduzidas no corpo, podem se espalhar através da corrente sanguínea e atacar as células tumorais onde quer que estejam, sendo muitas vezes mais eficaz que a cirurgia ou radioterapia, já que em algumas situações, as metástases podem estar espalhadas por regiões que podem trazer riscos a órgãos ou mobilidade do paciente; dessa forma, utiliza-se a quimioterapia para impedir a disseminação das células cancerígenas pelo corpo (INCA, 2015).

Com o desenvolvimento de novos medicamentos e procedimentos químicos, a quimioterapia começou a ser utilizada em combinação com outros agentes quimioterápicos. As primeiras aplicações da quimioterapia combinada foram utilizadas no tratamento de leucemia e linfomas. Após esses procedimentos, a quimioterapia começou a ser utilizada como terapias em tumores sólidos presentes em qualquer lugar do corpo (ONCOGUIA, 2018). A quimioterapia tem como objetivo diminuir o tumor antes do procedimento cirúrgico ou radioterápico, a qual é denominada de quimioterapia neoadjuvante, para destruir células cancerosas remanescentes após a cirurgia ou seções de radioterapia, relacionado à quimioterapia adjuvante²⁰. A quimioterapia também tem como finalidade tornar outras terapias mais eficazes quando utilizadas em conjunto, já que tem a capacidade de destruir as células cancerosas que retornam ou se espalham para outras partes do seu corpo.

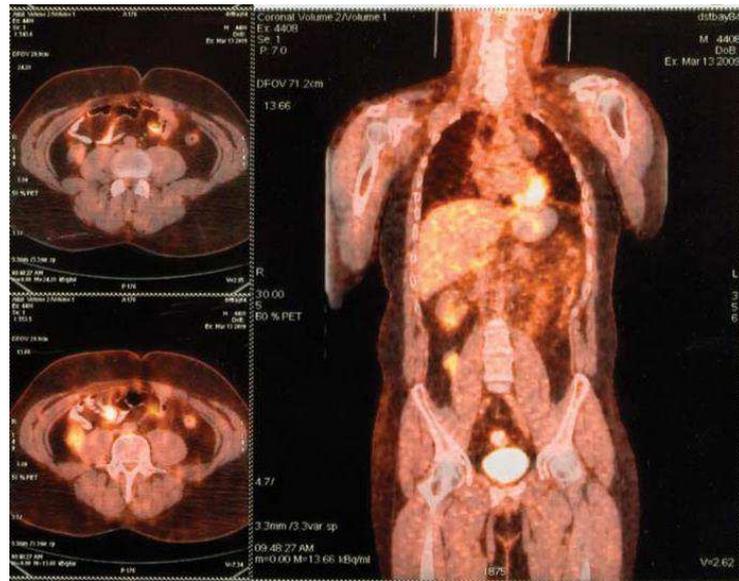
²⁰ Tratamento feito de maneira complementar após a realização de um procedimento principal, com o objetivo de aniquilar qualquer célula cancerígena que ainda possa estar presente no corpo do indivíduo, impedindo o retorno do câncer.

4.4. A FÍSICA APLICADA À MEDICINA NUCLEAR, DIAGNÓSTICO E TERAPIA (PET, SPECT)

De acordo com Terini Machado (2017), a Medicina Nuclear é o ramo da Radiologia em que um radioisótopo de meia-vida curta é fornecida ao paciente por via oral (ingestão), injeção ou inalação, onde esses radioisótopos emitem fótons com energia suficiente para atravessar o corpo do paciente e chegar ao detector. Dessa forma, são produzidas imagens de emissão (e não de projeção, como o CT, por exemplo), já que os radioisótopos emitem radiação de dentro do paciente. O uso dos radioisótopos permite que os médicos identifiquem de forma não invasiva e precisa a atividade molecular nos tecidos e órgãos do corpo, facilitando a detecção precoce de algumas doenças, como também o monitoramento imediato das respostas terapêuticas em tumores. Exemplos de métodos que utilizam esse procedimento são; a tomografia por emissão de pósitrons (anti-partícula do elétron) (PET) e a tomografia computadorizada por emissão de fóton único (SPECT).

O PET é uma técnica de produção de imagens que, assim como a tomografia computadorizada e a radiografia convencional, é usada para diagnósticos não invasivos, onde utiliza-se um composto radioativo ou radionuclídeo emissor de pósitrons de curta duração (como por exemplo o tálio-201 (^{201}Tl) com meia-vida de 3 dias, iodo-123 (^{123}I) com meia-vida de 13h, tecnécio-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) com meia-vida de 6h e o flúor-18 (^{18}F) com meia-vida de aproximadamente 2h) que é introduzido no corpo do paciente (BRITANNICA *et al.*, 2013). A atividade dos radiofármacos utilizados durante o procedimento é medida quantitativamente em todos os órgãos-alvo. Dessa forma, à medida que o radionuclídeo decai, os pósitrons são aniquilados por elétrons, dando origem a raios gama que são detectados simultaneamente por cintiladores (que convertem radiação gama em luz) posicionados em lados opostos do paciente e por meio de detectores fotomultiplicadores, que são encarregados de receber a luz e transformá-la em sinal elétrico (ZIESSMAN; O'MALLEY; THRALL, 2014). Os dados dos detectores são analisados, integrados e reconstruídos por meio de um computador para produzir imagens dos órgãos que estão sendo escaneados (figura 19).

Figura 19: Imagens do corpo humano produzidas por tomografia por emissão de pósitrons (PET).



Fonte: <https://cdn.britannica.com/41/152941-050-4DB250E9/Images-human-body-positron-emission-tomography.jpg>. Acesso em: 05/02/2021.

Normalmente o flúor-18 (^{18}F) é o radiofármaco mais utilizado na tomografia por emissão de pósitrons. Após ser utilizado, o ^{18}F decai por emissão de pósitrons, onde um pósitron é emitido do núcleo do ^{18}F e logo em seguida sofre uma reação de aniquilação com um elétron. Este processo resulta em dois fótons contendo 511 keV cada, viajando em direções opostas. Por sua vez, os fótons atingem o anel de detectores do scanner PET a 180 ° de distância e uma imagem é criada (BAILEY et al., 2005). Por se tratar de fótons com alta energia, basicamente, todos os procedimentos são realizados em aparelhos híbridos de PET / CT, que combinam o aspecto anatômico e diagnóstico da tomografia computadorizada com os dados metabólicos obtidos por PET. Estes, por sua vez, apresentam não só a anatomia do paciente, como também as condições fisiológicas (TERINI; MACHADO, 2017).

A tomografia por emissão de pósitrons tornou-se uma ferramenta útil em pacientes com câncer, sendo usado para diagnosticar estágios de doenças malignas; ou após os tratamentos com radioterapia e quimioterapia, PET é utilizado para avaliar a resposta de um tumor à terapia. Além das aplicações anteriores, o estudo PET pode ser realizado para avaliar a probabilidade de o tumor ser maligno ou benigno pós a utilização de uma TC, caso confirme a presença de tumores. (SINGH; NEUTZE, 2011).

Além das técnicas tomográficas destacadas até o momento, também foram desenvolvidos métodos para se obter representações mais próximas possíveis da distribuição de radiação no corpo do paciente, sendo possível a partir das distribuições

projetadas nos planos cintilográficos em diversos ângulos, formando imagens 3D ou imagens tomográficas (TERINI; MACHADO, 2017). Na Medicina Nuclear, esta técnica é denominada de SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography), ou tomografia computadorizada por emissão de fóton único, sendo o termo “fóton único” associado em oposição ao PET, onde ocorrem a emissão de dois fótons para descrever o local da emissão.

5. OUTRAS APLICAÇÕES DA RADIAÇÃO IONIZANTE

Como citado no decorrer do trabalho, as aplicações da radiação ionizante são inúmeras, podendo ser aplicadas em diversas áreas, facilitando muitos processos que seriam bem mais complicados se fossem realizados de maneira convencional. Dentre as aplicações já vista, podemos destacar também algumas utilizadas em áreas como: esterilização de equipamentos hospitalares, conservação de alimentos, áreas voltadas para a agricultura, estudo de rochas e fósseis, tratamento de esgotos, bem como diversas áreas da Medicina moderna que conhecemos hoje (PINO; GIOVEDI, 2005). Algumas dessas aplicações fazem uso de fontes radioativas ou de aceleradores de partículas, mais especificamente de elétrons.

5.1. FINALIDADE DAS APLICAÇÕES

As principais fontes de radiação ionizante são irradiadores de raios gama e aceleradores de elétrons, utilizados para a esterilização por irradiação, e fontes de fótons utilizadas em geradores de raio X de alta potência. Só em 2001 havia no mundo, cerca de 200 irradiadores γ e 1.000 aceleradores de elétrons, dedicados exclusivamente para aplicações na indústria e em áreas como Geologia, Engenharia, Agricultura e etc., (CLOUGH, 2001; PINO; GIOVEDI, 2005).

Os irradiadores γ produzem radiação de forma contínua, baseando-se no processo de decaimento natural, o qual a energia dos raios γ produzidos variam de acordo com o radioisótopo utilizado. Por exemplo, o cobalto 60 (^{60}Co) produz raios γ com energia de 1,17 a 1,33 Mev, onde a taxa de dose, ou seja, a quantidade de energia absorvida pelo material irradiado é muito baixa, na ordem de 0,1 a 5 kGyh^{-1} , apresentando uma função que relaciona a quantidade de material radioativo presente no irradiador e a posição em relação a fonte do material irradiado (CALVO, 2005).

Assim, tem-se utilizado a radiação γ em materiais e/ou em embalagens que apresentam estruturas finas (em torno de 3 a 5 cm). Se tratando desta situação, utilizam-se raios γ e X com alta energia (em torno de $10^6 Ci$ ou $10^{16} Bq$), que possuem capacidade de penetrar os recipientes, fornecendo a dose de forma homogênea por todo o volume.

No fornecimento de radiação para o processo de esterilização por irradiação, são empregadas fontes emissoras de fótons com energia elevada, como por exemplo o ^{60}Co ou aceleradores de fótons (raios X de freamento) com $h\nu_{máx}$ entre 5 e 10 Mev. Dessa forma, são esterilizados materiais cirúrgicos como cateteres, implantes e produtos hospitalares descartáveis (como suturas, seringas, gazes, agulhas, etc.), sendo necessário para a esterilização adequada destes matérias doses em torno de 25 kGy (OKUNO; YOSHIMURA, 2010). Considerando como uma das vantagens ao utilizar este método, a eliminação de microrganismos de forma segura e eficiente, matando os germes sem prejudicar a substância que está sendo desinfetada e sem torná-la radioativa, lembrando que os produtos passam pelo processo de esterilização na fase final de produção, ou seja, em lotes na embalagem final; dessa forma, evitando a manipulação posterior à esterilização (NRC, 2020).

A esterilização por irradiação também é utilizada pela indústria alimentícia, tendo como objetivo diminuir a contaminação por fungos e insetos, além de retardar ou inibir o brotamento. Como resultado de tal procedimento, o alimento passa a ter uma duração maior, sem que venha a estragar com tanta facilidade. Este método é considerado seguro, desde que a dose aplicada não ultrapasse 20 kGy , não acarretando em mudança de cor, textura e sabor do alimento ou até mesmo trazendo complicações para quem o consumir (DIEHL, 2002).

Existem ainda aplicações da radiação ionizante na agricultura, para desinfestação de insetos por meio da irradiação de raios gama, porém em menor escala comparada aos procedimentos de esterilização alimentício. A irradiação é empregada em uma certa quantidade de insetos, tornando-os inférteis, podendo ser aplicadas em larvas ou pupas em laboratório e liberadas em plantações (SCAFF, 1997). O cruzamento dos insetos presentes na plantação com os insetos modificados em laboratório, não geram descendentes. Dessa forma, a praga é controlada sem grandes perdas para o produtor, já que os insetos possuem um tempo de vida relativamente curto e sem a proliferação de novos parasitas a plantação se mantém livre até que novos insetos migrem de outra região, o que leva um determinado tempo,

consideravelmente longo. Além de aplicações em insetos, a radiação pode ser utilizada em sementes tornando as plantas mais fortes, diminuindo assim o uso de fertilizantes artificiais (NRC, 2020).

No Brasil, durante os anos 80, foram instalados três irradiadores comerciais que utilizavam o ^{60}Co como fonte de emissão, operando com potência de 1.000 Ci (curie). Sendo instalados na Johnson & Johnson em São José dos Campos e no Instituto Brasileiro de Pós-Graduação (IBRAS) em Campinas, ambas de propriedade particular, para atender suas demandas de produção. O terceiro foi construído por meio da Empresa Brasileira de Radiações Ltda. (EMBRARAD) para fins comerciais, dedicada a realização de serviços à terceiros (INPE, 2017).

Devido a ampliação das áreas em que a radiação ionizante pode ser aplicada, principalmente pelo método de irradiação, foram construídas outras instalações a partir da Companhia Brasileira de Equipamentos (CBE), com projeto totalmente brasileiro. Através deste projeto, foi ampliada a capacidade da EMBRARAD e a criação de uma unidade na Technion, empresa voltada para áreas de engenharia e tecnologias. Atualmente a IBRAS e a Technion se encontram desativadas, porém a EMBRARAD é hoje a maior especialista em esterilização e redução de microrganismos por radiação gama da América Latina, em operação desde 1978 (INPE, 2013).

O mecanismo principal de ação do efeito esterilizante nos materiais se dá devido aos processos de transferências de energia desta radiação, inativando os microrganismos existentes pela ação direta da radiação nas regiões sensíveis da célula, ionizando uma parte da molécula de DNA ou moléculas importantes da célula, levando-o a um estado de falência ou inibição de seu poder de reprodução (PORTO, 2013). Atualmente durante a pandemia do novo coronavírus (SARS-CoV-2/ Covid-19), a radiação pode ser utilizada para meios de esterilização, devido ao risco de que os alimentos também possam ser um meio para transmitir o vírus. Por conseguinte, foram elaboradas prevenções nos procedimentos de segurança da indústria de alimentos para desinfetar a covid-19. Alguns desinfetantes eficazes que comprovadamente inativam o coronavírus são: dióxido de cloro, ozônio e radiação UVC (ultravioleta de onda curta) (QUEVEDO-LEÓN et al., 2020).

A radiação pode também ser utilizada na Geologia para a datação radiométrica ou datação radioativa, a qual é usada para determinar a idade de rochas ou sedimentos contidos no solo, a partir das substâncias radioativas que os constituem

e dos produtos que resultam no decaimento radioativo. O decaimento radioativo pode se dar apenas em um único decaimento e logo se tornar um elemento estável ou envolver vários decaimentos em elementos instáveis até que se torne estável, como é o caso do decaimento do U-238 em Pb-206. Como o processo de decaimento ocorre com velocidade específica para cada elemento, a datação radiométrica trabalha com o conceito de meia-vida (BRANCO, 2014). Para que o estudo de datação radiométrica em rochas seja possível, os compostos precisam possuir meia-vida relativamente longa, por exemplo, são necessários 106 bilhões de anos para que metade do Sm-147 (samário-147) decaia em Nd-143 (neodímio-143), ou seja, a meia-vida do samário é cerca de 106 bilhões de anos (BERTOTTI, 2005).

Além do samário, elementos como Rb-87 (rubídio-87) que decai em Sr-90 (estrôncio-90) com meia-vida de $4,75 \times 10^{10}$ anos, o ^{238}U (urânio-238) que decai em ^{206}Pb (chumbo-206) com meia-vida de $4,5 \times 10^{10}$ anos, e o ^{14}C (carbono-14) que decai em ^{14}N (nitrogênio-14) com meia-vida de 5.730 anos (OKUNO; YOSHIMURA, 2010). Assim, os elementos químicos a serem usados na datação radiométrica são escolhidos conforme a Geologia indique ser a rocha é muito antiga ou pouco antiga, geralmente em uma escala de milhões ou bilhões de anos. Assim, o ^{14}C não pode ser usado em datações radiométricas, pois possui meia-vida relativamente curta em comparação aos outros materiais citados anteriormente, entretanto é útil na Arqueologia, por exemplo, para calcular a idade de materiais com até 70.000 anos, como madeira, carvão, cerâmica, ossos, roupas, etc. (BRANCO, 2014).

Essas aplicações abordadas são apenas uma pequena parte do campo que as radiações podem abranger e que estão em constante expansão, apresentando uma estreita relação entre os avanços da Física, aperfeiçoamento tecnológico e suas utilizações.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho visou abordar o contexto histórico do desenvolvimento e das aplicações da Física na Medicina por meio das radiações e a importância dessas radiações na melhoria da qualidade de vida, além de toda a evolução que envolve as suas aplicações, principalmente em tratamentos de tumores e processamento de imagens, destacando os benefícios e malefícios do uso dessas radiações, como também algumas aplicações em diversas áreas da indústria. Assim, apresentando

uma visão geral de como ocorreu o descobrimento e a evolução do conhecimento sobre a radioatividade, bem como o crescente uso de ferramentas de pesquisa que por meio da radiação, propôs um grande avanço na Física Nuclear e das tecnologias que utilizamos hoje em dia.

Durante o desenvolvimento do trabalho buscamos explicar de forma clara, a história dos principais procedimentos e experimentos que levaram a descoberta da radiação, desde a primeira aparição da radioatividade e dos raios X, do uso desenfreado após o conhecimento das propriedades que tais raios continham, como o desenvolvimento de equipamentos rústicos, porém revolucionários para a época, com finalidades inicialmente radiográficas, até as mais modernas máquinas desenvolvidas que ajudam no avanço das mais diversas áreas de estudos e, principalmente, na Medicina moderna, sendo a base do que conhecemos hoje como Medicina Nuclear.

Mediante o tema abordado, é possível perceber o quanto foi importante o desenvolvimento de estudos sobre a radioatividade e suas aplicações para o benefício da humanidade, em particular para o uso clínico em processamento de imagens, produção de radiofármacos e tratamento de algumas doenças, como o câncer. A descoberta da radioatividade causou uma explosão rápida de seu uso; também trouxeram inúmeros malefícios com o uso exagerado, que podiam causar a morte de quem fosse exposto a eles. Porém, com o avanço nos estudos e na evolução da compreensão sobre o comportamento das radiações e o que eles causavam, novas medidas de proteção foram propostas. Com a inserção da radioatividade em diversas áreas, deu-se origem à Física Médica e a outros campos de estudo dentro da Medicina, que envolvia e exigia cada vez mais o conhecimento físico por trás dos procedimentos.

Além da abordagem histórica, buscamos enfatizar a importância da Física para o aprimoramento de equipamentos médicos e a revolução que proporcionou, a qual não é possível expressar quantitativamente. Entretanto, através deste trabalho podemos imaginar o quão imenso foi o passo para uma nova medicina, com novas possibilidades, métodos em processamento de imagens, tratamentos de doenças que antes não tinham a mínima possibilidade de cura, cirurgias minimamente invasivas. Possibilidades estas que aumentam, não só a perspectiva de vida de pacientes em todo o mundo, como também a qualidade de vida deles.

Finalmente, podemos destacar também a escassez de sistematização das informações, quanto às diversas áreas em que a Física atua em nosso dia a dia e que são essenciais, como foi proposto neste trabalho. Essa falta de informação impossibilita a visão que um estudante de Física poderia ter referente a inúmeras possibilidades durante sua jornada em busca de conhecimento e atuação profissional; além de excluir a importância do papel de um Físico dentro da sociedade, em áreas que normalmente não somos acostumados a ver ou imaginar. Assim, a este trabalho pode ser utilizada como base para o esclarecimento de como a Física está inserida na Medicina Nuclear; qual o papel de um Físico neste ramo interdisciplinar, entre Física e Medicina; e o que essa colaboração mútua foi capaz de desenvolver na melhoria da qualidade de vida para a humanidade. Por fim, que este trabalho sirva de complemento para o desenvolvimento de novas pesquisas, ajudando na divulgação de um ramo da Física pouco divulgado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARPANSA (AUSTRALIAN RADIATION PROTECTION AND NUCLEAR SAFETY AGENCY). **Other types of radioactive decay**. Disponível em: <<https://www.arpansa.gov.au/understanding-radiation/what-is-radiation/ionising-radiation/radiation-decay>>. Acesso em: 7 ago. 2020.

ASTRONOO. **Neutrino and beta decay**. Disponível em: <<http://www.astronoo.com/en/articles/neutrino.html>>. Acesso em: 25 jun. 2020.

AUGUSTYN, A. et al. **Half-Life**. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/half-life-radioactivity>>. Acesso em: 25 jul. 2020.

AUGUSTYN, A.; HIGGINS, J.; PALLARDY, R. **Radiology**. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/radiology>>. Acesso em: 19 out. 2020.

BAILEY, D. L. et al. (EDS.). **Positron Emission Tomography**. London: Springer-Verlag, 2005.

BERTOTTI, A. Metodologia Samário/Neodímio: Uma Abordagem Analítica Simplificada E Alguns Exemplos Aplicativos. **Ufrgs**, p. 105, 2005.

BORTFELD, T.; JERAJ, R. The physical basis and future of radiation therapy. **The British Journal of Radiology**, v. 84, n. 1002, p. 485–498, jun. 2011.

BRAGA, N. R.; RODRIGUES, A. D. S. W. Estudo da dose de radiação absorvida em indivíduo ocupacionalmente exposto em serviços de PET-CT. **Revista Brasileira de Física Médica**, v. 13, n. 2, p. 35, 28 dez. 2019.

BRANCO, P. DE M. **Como Sabemos a Idade das Rochas?** Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/CPRM-Divulga/Como-Sabemos-a-Idade-das-Rochas%3F-1070.html>>. Acesso em: 17 fev. 2021.

BRASIL; SAÚDE, MINISTÉRIO DA; INCA, I. NACIONAL DE C.-. **Blindagem em radioterapia: técnicas e normas.** Disponível em: <<https://www.inca.gov.br/publicacoes/livros/blindagem-em-radioterapia-tecnica-e-normas>>. Acesso em: 9 jul. 2020.

BRITANNICA, E. et al. **Positron Emission Tomography.** Disponível em: <<https://www.britannica.com/topic/positron-emission-tomography>>.

BRITANNICA, E. OF E. et al. **Radioactive isotope.** Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/radioactive-isotope>>. Acesso em: 16 jul. 2020.

BRITANNICA, E.; RASMUSSEN, J. O.; STEINBERG, E. P. **Radioatividade: A natureza das emissões radioativas.** Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/radioactivity>>. Acesso em: 21 abr. 2020a.

BRITANNICA, E.; RASMUSSEN, J. O.; STEINBERG, E. P. **Radioatividade: Tipos de Decaimentos.** Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/gamma-ray>>. Acesso em: 11 ago. 2020b.

CALVO, W. A. P. Desenvolvimento do sistema de irradiação em um irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto. p. 158, 2005.

CARVALHO, R. P. DE; OLIVEIRA, S. M. V. DE. **Aplicações da Energia nuclear na Saúde.** Disponível em: <http://bvsm.sau.de.gov.br/bvs/publicacoes/inca/nocoas_em_medicina_nuclear_e_radiofarmacos-l_rafael.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2020.

CLOUGH, R. . High-energy radiation and polymers: A review of commercial processes and emerging applications. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, v. 185, n. 1–4, p. 8–33, dez. 2001.

CNEN (COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR); TECNOLOGIA, M. DA C. E. **Radiação ionização e a vida.** Disponível em: <<https://www.gov.br/ebserh/pt-br/comunicacao/noticias/acoes-da-rede-ebserh-reforcam-a-importancia-do-diagnostico-e-tratamento-do-cancer-de-mama>>. Acesso em: 30 ago. 2020.

COSTA, J. **Cancer.** Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/cancer-disease>>. Acesso em: 10 fev. 2020.

COSTA, P. R. Interação Da Radiação Com a Matéria. p. 1–12, 2011.

DEYLLLOT, M. E. C. **Física das radiações: Fundamentos e Construções de Imagens**. 1. ed. São Paulo: 2014, 2014.

DIEHL, J. F. Food irradiation—past, present and future. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 63, n. 3–6, p. 211–215, mar. 2002.

FAIZ, M.; HEALTH, W. K. **The Physics of Radiation Therapy**. 4. ed. Philadelphia, USA: Wolters Kluwer, 2018.

FERNÁNDEZ-VAREA, J. M.; LEITÓN, A. M. G.; EZPELETA, A. G. **Fundamentos de Física Médica: Medida de la radiación**. 1. ed. Madrid: SEFM, Sociedad Española de Física Médica, 2011.

FERREIRA, P. **Princípios da Física Aplicados à Radiologia**. 1. ed. [s.l.] managed, 2016.

GEIGER, H.; NUTTALL, J. M. LVII. The ranges of the α particles from various radioactive substances and a relation between range and period of transformation . **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 22, n. 130, p. 613–621, 1911.

GREGORY F. HERZOG. **Isotope**. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/isotope>>. Acesso em: 14 jul. 2020.

IAEA (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY). **Radioisotopes**. Disponível em: <<https://www.iaea.org/topics/nuclear-science/isotopes/radioisotopes>>. Acesso em: 16 jul. 2020.

INCA (INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER). Curso para técnicos em radioterapia: Programa de Qualidade em Radioterapia. **Instituto Nacional de Cancer José Alencar Gomes da Silva (INCA) - Ministério da Saúde (Brasil)**, p. 43, 2000.

INCA (INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER). **Bases do Tratamento**. Disponível em: <<http://www1.inca.gov.br/enfermagem/docs/cap7.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2020.

INCA (INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER). **Estimativa 2020: Incidência de câncer no Brasil**. Rio de Janeiro: Serviço de Educação e Informação Técnico-Científico, 2019a.

INCA (INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER). **Cartilha - Radioterapia: Tratamento do Câncer**. Disponível em: <<https://www.inca.gov.br/publicacoes/cartilhas/radioterapia>>. Acesso em: 27 nov. 2020b.

INPE (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS). **Radiação x**

Gama. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/fenomenos.associados/radiacao.x.e.gama.php>>. Acesso em: 7 jul. 2020.

INPE (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS).

Radioesterilização. Disponível em: <https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=741>. Acesso em: 23 jul. 2020.

INPE (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS). **Histórico do**

CTR. Disponível em: <https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=681>. Acesso em: 16 dez. 2020.

INPE (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS). **IOD-IPEN-123.** Disponível em: <<https://docplayer.com.br/54126483-lod-ipen-123-iodeto-de-sodio-123-i.html>>. Acesso em: 25 jul. 2020a.

INPE (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS). **IOD-IPEN-131.** Disponível em: <https://www.ipen.br/portal_por/conteudo/geral/BULA_IOD-IPEN-131_Profissional_da_saude.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2020b.

KAYE, G. W. C. Practical Applications of X-Rays. **Journal of the Röntgen Society**, v. 19, n. 74, p. 39–40, 1923.

KHAN ACADEMY. **Radioactive decay types article.** Disponível em: <<https://www.khanacademy.org/science/in-in-class-12th-physics-india/nuclei/in-in-nuclear-physics/a/radioactive-decay-types-article>>. Acesso em: 7 ago. 2020.

KINNS, J.; PEASE, A. P. Computed tomography. **Equine Surgery**, p. 979–985, 2012.

L'ANNUNZIATA, M. F. **Radiação alfa.** Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444527158500049#!>>. Acesso em: 15 abr. 2020a.

L'ANNUNZIATA, M. F. **Beta Radiation.** Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444527158500050>>. Acesso em: 26 jun. 2020b.

LIMA, J. J. P. DE. **Introdução à mecânica e a outros temas em medicina dentária.** Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 1999.

LIMA, J. J. P. DE. **Física em medicina nuclear: temas e aplicações.** Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2008.

LOTHA, G.; YOUNG, G. **Ionization**. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/ionization>>. Acesso em: 20 ago. 2020.

MARTINS, R. DE A. Hipóteses e interpretação experimental: a conjectura de Poincaré e a descoberta da hiperfosforescência por Becquerel e Thompson. **Ciência e Educação (Bauru)**, v. 10, n. 3, p. 501–516, 2004.

MEDICINE, C. IN N. **The Half-Lives: Physical, Biological, and Effective**. Disponível em: <<https://nucmedtutorials.com/half-lives/>>. Acesso em: 27 jul. 2020.

NRC (UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION). **Uses of Radiation: Medical, Industrial, and Academic**. Disponível em: <<https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/around-us/uses-radiation.html>>. Acesso em: 16 fev. 2021.

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M. **Física das radiações**. 1. ed. São Paulo: 2010, 2010.

OMS (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE). **Câncer mata 88 milhões de pessoas anualmente no mundo**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/oms-cancer-mata-88-milhoes-de-pessoas-anualmente-no-mundo/>>. Acesso em: 17 fev. 2020.

ONCOGUIA, I. **Exames de Medicina Nuclear**. Disponível em: <<http://www.oncoguia.org.br/conteudo/exames-de-medicina-nuclear/6798/842/>>. Acesso em: 26 jul. 2020.

ONCOGUIA, I. **A equipe Multidisciplinar no Serviço de Radioterapia**. Disponível em: <[http://www.oncoguia.org.br/conteudo/equipe-multidisciplinar/4618/698/#:~:text=O rádio-oncologista é quem,ser administrada a cada paciente.](http://www.oncoguia.org.br/conteudo/equipe-multidisciplinar/4618/698/#:~:text=O%20r%C3%A1dio-oncologista%20%C3%A9%20quem,ser%20administrada%20a%20cada%20paciente.)>. Acesso em: 30 jan. 2021.

ONCOGUIA, I. **Tratamentos do Câncer**. Disponível em: <<http://www.oncoguia.org.br/conteudo/tratamentos/77/50/>>. Acesso em: 2 out. 2020.

OPAS (ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE). **Folha informativa - Câncer**. Disponível em: <https://www.paho.org/bra/index.php?option=com_content&view=article&id=5588:folha-informativa-cancer&Itemid=1094>. Acesso em: 17 fev. 2020.

PINO, E. S. .; GIOVEDI, C. Radiação Ionizante E Suas Aplicações Na Indústria. **Revista UNILUS Ensino e Pesquisa**, n. 2, p. 47–51, 2005.

PORTO, K. M. B. G. Efeitos da Radiação Gama (Cobalto-60) nas Principais Propriedades Físicas e Químicas de Embalagens Compostas por Papel Grau

Cirúrgico e Filme Plástico Laminado, Destinada à Esterilização de Produtos para Saúde. v. 66, n. 1997, 2013.

QI, C. et al. On the validity of the Geiger–Nuttall alpha-decay law and its microscopic basis. **Physics Letters B**, v. 734, p. 203–206, jun. 2014.

QUEVEDO-LEÓN, R. et al. Inactivation of Coronaviruses in food industry: The use of inorganic and organic disinfectants, ozone, and UV radiation. **Scientia Agropecuaria**, v. 11, n. 2, p. 257–266, 8 jun. 2020.

SAÚDE, O. M. DA. **OMS e IARC: relatórios globais sobre o câncer**. Disponível em: <<https://www.inca.gov.br/noticias/oms-e-iarc-lancam-relatorios-globais-sobre-o-cancer>>. Acesso em: 16 jul. 2020.

SBRT (SOCIEDADE BRASILEIRA DE RADIOTERAPIA). **Introdução à Técnicas de Radioterapia**. Disponível em: <<https://sbradioterapia.com.br/restrito/introducao/>>. Acesso em: 29 jan. 2021.

SCAFF, L. A. M. **Física da radioterapia**. 1. ed. São Paulo: 1997, 1997.

SHALEK, R. J. Physics of Radiation Therapy. In: **Radiotherapy, Surgery, and Immunotherapy**. Boston, MA: Springer US, 1977. p. 39–50.

SILVA, C. B. DA C. E. **Medição de Vazão Multifásica na Produção de Petróleo e Gás Natural**. São Paulo: Baraúna, 2016.

SINGH, H.; NEUTZE, J. A. **Fundamentals of radiology**. 4. ed. New York: Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 2011.

SINGH, H.; NEUTZE, J. A. Patient Radiation Safety and Risk. In: **Radiology Fundamentals**. New York, NY: Springer New York, 2012. p. 1–5.

SOUSA, W. B. DE. Universidade de São Paulo Interunidades em Ensino de Ciências Wellington Batista de Sousa. p. 275, 2015.

STARK, G. **Gamma ray**. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/gamma-ray>>. Acesso em: 13 ago. 2020.

TENIRI, R. A.; MACHADO, A. C. B. **Uma introdução à física médica: da antiguidade aos tempos atuais**. 1. ed. São Paulo: 2017, 2017.

TERINI, R. A.; MACHADO, A. C. B. **Uma introdução à física médica: da antiguidade aos tempos atuais**. 1. ed. São Paulo: 2017, 2017.

TIPLER, PAUL A.; LLEWELLYN, R. A. **Modern Physics - Vol.2**. 5. ed. New York, NY: 2008, 2008.

TODESCATTO, T. S. **Manual de Física Radiológica Para Técnicos e Tecnólogos em Radiologia**. 1. ed. São Paulo: agBook, 2016.

UNEP (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME). **Radiação: Efeitos e fontes**. Vienna: [s.n.].

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **What Are The Different Types of Radiation?** Disponível em: <nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/science-101/what-are-different-types-of-radiation.html>. Acesso em: 30 mar. 2020.

ZAMBONI, C. B. **Fundamentos da física de nêutrons**. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2007.

ZIESSMAN, H. A.; O'MALLEY, J. P.; THRALL, J. H. **Nuclear Medicine**. 4. ed. [s.l.] Elsevier, 2014.