

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DO PIAUÍ
COORDENAÇÃO DO CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

OS PRINCÍPIOS FÍSICOS DO TRATAMENTO DE CÂNCER POR RADIOTERAPIA

DAMIÃO FERREIRA DA SILVA COSTA

PARNAÍBA - PI
MAIO DE 2017

OS PRINCÍPIOS FÍSICOS DO TRATAMENTO DE CÂNCER POR RADIOTERAPIA

DAMIÃO FERREIRA DA SILVA COSTA

OS PRINCÍPIOS FÍSICOS DO TRATAMENTO DE CÂNCER RADIOTERAPIA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Licenciatura
em Física do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do
Piauí como requisito para obtenção do
grau de Licenciado em Física.

ORIENTADOR: PROF. MSC. MARCOS ANTONIO MATOS SOUZA

PARNAÍBA - PI
MAIO DE 2017

OS PRINCÍPIOS FÍSICOS DO TRATAMENTO DE CÂNCER POR RADIOTERAPIA

DAMIÃO FERREIRA DA SILVA COSTA

Aprovado em _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Msc. Marcos Antonio Matos Souza - Orientador e Presidente
IFPI/Campus Parnaíba-PI

Prof. Msc. Alexandro das Chagas de Sousa Nascimento - Examinador
IFPI/Campus Parnaíba-PI

Prof. Dra. Márcia Valéria Silva Lima - Examinadora
IFPI/Campus Parnaíba-PI

PARNAÍBA - PI
MAIO DE 2017

À minha mãe Antônia.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus por ter me dado o dom da vida. Em segundo agradeço à minha família pelo apoio dado a mim, independentemente das minhas escolhas pessoais.

Agradeço à minha mãe Antônia, que sempre batalhou para que eu e minha irmã tivéssemos uma educação de qualidade. Nunca esqueci da nossa infância, em que os nossos estudos eram a prioridade máxima. Espero que um dia eu consiga ser pelo menos a metade do ser humano que a senhora é. Saiba que minha inspiração de vida ontem, hoje e amanhã sempre será você.

Aos professores e professoras que passaram por esta etapa de minha vida. Especialmente ao professor Marcos Matos pela orientação, paciência e por toda ajuda dada a mim. A palavra "obrigado" é pequena demais para agradecer.

A professora Janete Cezar que mostrou-se sempre presente e pronta para ajudar a turma. Apresentando profissionalismo, sem esquecer a sua essência. Valeu a pena todas as discussões feitas durante as suas aulas, pois com elas eu aprendi a ser mais humano.

Aos meus colegas de curso. Especialmente aos meus amigos - Emanuel Felipe, Herison Carvalho, Jailda Costa, Ociel Ferreira, Francisco Salvino, Samantha Rocha - que na alegria ou na tristeza, a união sempre se fez presente. Embora sejamos diferentes, a palavra respeito sempre existiu entre nós. Espero encontrá-los pelas estradas da vida, sem esquecer daquele velho e bom papo. Obrigado, vocês são dez.

A todas as pessoas que contribuíram de maneira direta ou indiretamente.

Muito Obrigado!

RESUMO

Com a descoberta dos raios X e da radioatividade, e com o conhecimento obtido pela Física Atômica e Nuclear, surge uma nova modalidade de diagnosticar e tratar doenças, que antigamente eram consideradas incuráveis. Trata-se da integração da Física, Química e Biologia afim de diagnosticar e tratar determinada patologia. O diagnóstico está a cargo da Medicina Nuclear com a utilização de traçadores radioativos e outros tipos de exames. O tratamento é realizado por meio da radioterapia, utilizando como principais métodos a teleterapia e a braquiterapia. Teleterapia é a modalidade cuja a fonte encontra-se afastada do paciente, em torno de 80 cm a 1 m. A braquiterapia é o tratamento radioterapêutico que consiste na utilização de uma fonte radioativa selada próxima ao tecido doente, aplicando doses diretamente na área. O objetivo geral deste trabalho é estudar do tratamento de câncer por radioterapia, dando ênfase nos princípios físicos presentes no mesmo. Os objetivos específicos são: analisar os mecanismos de interação da radiação com a matéria, assim como os efeitos biológicos causados pela mesma, pesquisar sobre o tratamento de câncer por radioterapia observando as origens do tratamento e demonstrar a Física como campo de estudo amplo que fornece diversas aplicações e contribuições para ramos que são considerados essenciais na sociedade, como por exemplo na saúde, através do desenvolvimento de técnicas de diagnósticos e de tratamento de patologias.

Palavras-chave: Radiação, Tratamento de câncer, Radioterapia.

ABSTRACT

With the discovery of X-rays and radioactivity, and with the knowledge obtained by Atomic and Nuclear Physics, a new modality of diagnosing and treating diseases, formerly considered incurable, arises. It is the integration of Physics, Chemistry and Biology to diagnose and treat certain pathology. The diagnosis is in charge of Nuclear Medicine with the use of radioactive tracers and other types of exams. The treatment is performed through radiotherapy, using as main methods teletherapy and brachytherapy. Teletherapy is the modality whose source is far from the patient, around 80 cm to 1 m. Brachytherapy is the radiotherapy treatment that involves the use of a sealed radioactive source next to the diseased tissue, applying doses directly in the area. The general objective of this work is to study the treatment of cancer by radiotherapy, emphasizing the physical principles present in it. The specific objectives are: to analyze the mechanisms of radiation interaction with matter, as well as the biological effects caused by it, to investigate the treatment of cancer by radiotherapy, observing the origins of the treatment and to demonstrate Physics as a broad field of study that provides several Applications and contributions to branches that are considered essential in society, such as health, through the development of techniques for diagnosis and treatment of pathologies.

Keywords: Radiation, Cancer treatment, Radiation therapy.

Lista de Figuras

2.1	Representação da emissão de radiação sob a influência de um campo elétrico. Figura elaborada pelo autor.	6
2.2	Representação do decaimento α do urânio-238. Figura elaborada pelo autor. .	12
2.3	Representação do decaimento β^- do carbono-14. Figura elaborada pelo autor.	14
3.1	Na medida que a energia do feixe de radiação eletromagnética cresce, diminui a probabilidade de ocorrer o efeito fotoelétrico. Para energias medianas, há predominância do efeito Compton. Para energias elevadas, a probabilidade de ocorrer a produção de pares é maior. Figura retirada de TAUHATA (2014). . .	21
3.2	Representação de um circuito no qual consta uma ampola a vácuo que possui um ânodo e o cátodo. A luz incide sobre o cátodo liberando os fotoelétrons. Figura elaborada pelo autor.	22
3.3	Representação do efeito fotoelétrico do ponto de vista atômico. Figura elaborada pelo autor.	24
3.4	Representação do efeito Compton do ponto de vista atômico. Figura elaborada pelo autor.	25

3.5	Esquema do experimento realizado por Davisson e Evans. Figura elaborada pelo autor.	29
3.6	Câmara de ionização estilo dedal. Figura elaborada pelo autor.	31
4.1	Distribuição proporcional dos dez tipos de câncer mais incidentes estimados para 2016 por sexo, exceto pele não melanoma. Figura retirada de INCA (2015).	37
4.2	A descoberta dos raios X. Figura retirada de <goo.gl/ktffTn>.	40
4.3	Rádio aplicador. Figura retirada de LEDERMAN (1981).	42
4.4	Processo de Oncogênese. Figura retirada de INCA (2011)	45
4.5	Diferença entre tumores. Figura retirada de INCA (2011)	46
4.6	Metástase. Figura Retirada de INCA (2011).	47
4.7	A curva A representa a probabilidade de controlar o tumor, e a B representa a chance de complicações. Figura retirada de MARTINS (2012).	49
4.8	Representação dos danos no DNA através das ações direta e indireta da radiação. Figura retirada de PODGORSK (2011).	50
4.9	Esquematização da Lei do inverso do quadrado da distância. Figura retirada de PODGORSK (2005).	53
4.10	Diagrama das sementes de I-125 (A) e Pd-103 (B). Essas sementes são compostas de: 1 - cápsula de titânio; 2 - óxido de iodo; 3 - poliestireno dopado com Pd-103; 4 - marcadores metálicos para visualização das sementes por imagens de raios X. Figura retirada de TRINDADE et al (2012).	55
4.11	Cobalto de coluna e cobalto isocêntrico. Figura retirada de MARTINS (2012).	57

4.12	Corte de um cabeçote de uma bomba de Co-60 modelo Theratron 780 usado em radioterapia. Figura retirada de TAUHATA (2014).	58
4.13	Acelerador Linear. Figura retirada de OLIVEIRA (2009).	59
4.14	Esquema de um acelerador linear de elétrons. Figura retirada de TAUHATA (2014).	59
4.15	Área delimitada para o tratamento - (A) Tumor, (B) Volume tumoral, (C) Volume alvo e (D) Volume de tratamento. Figura elaborada pelo autor.	60
4.16	Representação gráfica de SSD e SAD. Figura retirada de BRASIL (2000).	61
4.17	Porcentagem da dose profunda. Em que a distância d refere-se a qualquer profundidade, sendo referência para a dose profunda máxima (D_{max}). Figura elaborada pelo autor.	62

Conteúdo

Lista de Figuras	i
1 Introdução	1
2 Decaimento radioativo	4
2.1 Conceitos e histórico da radioatividade	4
2.2 Lei do decaimento radioativo	8
2.2.1 Meia-vida	10
2.2.2 Vida-média	11
2.3 Tipos de decaimento	12
2.3.1 Decaimento alfa (α)	12
2.3.2 Decaimento beta (β) e a existência do neutrino (ν_e)	13
2.3.3 Decaimento gama (γ)	16
3 Interação da radiação com a matéria	18

3.1	Partículas carregadas	18
3.2	Radiação eletromagnética	21
3.2.1	Interação da radiação eletromagnética com a matéria	21
3.2.2	Atenuação de raios γ	28
3.2.3	Dosimetria	31
3.3	Efeitos da radiação nos tecidos biológicos	34
4	Tratamento de câncer por radioterapia	36
4.1	Um breve panorama sobre o câncer e a origem da radioterapia	36
4.2	Conceitos importantes em Oncologia	44
4.2.1	Oncogênese	44
4.2.2	Metástase	46
4.3	Tratamento de câncer por radioterapia	47
4.3.1	Princípios básicos	47
4.3.2	Lei do inverso do quadrado da distância	52
4.3.3	Tipos de tratamento	54
4.3.4	Eficiência do tratamento e perspectivas futuras	64
5	Considerações finais	67

Capítulo 1

Introdução

O tratamento radioterapêutico, juntamente com a quimioterapia e o procedimento cirúrgico, faz parte dos métodos mais utilizados no combate ao câncer. O objetivo geral deste trabalho é estudar do tratamento de câncer por radioterapia, dando ênfase nos princípios físicos presentes no mesmo. Os objetivos específicos são analisar os mecanismos de interação da radiação com a matéria, assim como os efeitos biológicos causados pela mesma, pesquisar sobre o tratamento de câncer por radioterapia observando as origens do tratamento e demonstrar a Física como campo de estudo amplo que fornece diversas aplicações e contribuições para ramos que são considerados essenciais na sociedade, como por exemplo na saúde, através do desenvolvimento de técnicas de diagnósticos de patologias, com a Medicina Nuclear, e do seu tratamento através da radioterapia.

A radioterapia é a utilização da radiação para fins terapêuticos no tratamento de determinada enfermidade. No tratamento do câncer, a radioterapia utiliza a radiação ionizante para atingir o local onde existe o tumor, com o objetivo de erradicar a patologia, e também oferecer alívio ao paciente.

Inicialmente, julga-se necessário apresentar conceitos importantes relacionados a radiação. No capítulo 2 serão apresentados os tópicos que estão intimamente interligados com

decaimento radioativo, como também um breve histórico da radioatividade com os principais cientistas e suas descobertas que permitiram o avanço de diversas áreas, como por exemplo da Física Atômica e Nuclear. Com o advento da radioatividade, e os estudos feitos pela Física Nuclear, foi possível empregar a radiação em diversos campos dentre eles a Medicina obtendo assim diagnósticos e curas de doenças que antigamente eram consideradas incuráveis.

No capítulo 3 serão abordados os tipos de interações da radiação com a matéria, e seus efeitos nos tecidos biológicos. Porém antes de abordar os efeitos biológicos provocada pela radiação, é de suma importância observar as interações da radiação com a matéria no ponto de vista da Física. A radiação corpuscular interage basicamente através de colisões, e a radiação eletromagnética possui três mecanismos principais de interação que são: efeito fotoelétrico, efeito Compton e formação de pares. Uma das primeiras evidências experimentais da quantização da energia foi o efeito fotoelétrico, este fenômeno consiste basicamente da liberação de fotoelétrons do cátodo na incidência de luz sobre o mesmo. O efeito Compton é o espalhamento da radiação eletromagnética incidente, causada pela colisão com o elétron "livre". A formação de pares é a interação da radiação eletromagnética com campo elétrico gerado pelo núcleo atômico, formando pares de partículas elétron-pósitron. Após o estudo desses mecanismos de interação, serão apresentados importantes tópicos que relacionam a Física com a radioterapia como a atenuação da radiação eletromagnética, dosimetria e grandezas dosimétricas, e finalizando o capítulo com os efeitos causados pela radiação do ponto de vista biológico.

No capítulo seguinte será abordado o tratamento de câncer por radioterapia. Inicialmente será apresentado um breve panorama do câncer desde os primórdios, e aproveitando o contexto histórico da doença será mostrado o surgimento da radioterapia no final do século XIX. Em seguida, serão apresentados conceitos que são importantes em Oncologia, o princípio básico do tratamento do ponto de vista físico, químico e biológico, e as modalidades básicas do

tratamento do câncer por radioterapia, que são a teleterapia e braquiterapia. O capítulo será finalizado com uma breve discussão sobre a eficácia do tratamento comparado a métodos tradicionais e algumas perspectivas futuras acerca do tratamento.

No capítulo 5 temos as considerações finais acerca do tema abordado e as implicações dos métodos de tratamento. Este trabalho consiste apenas em uma introdução de conceitos que envolvem a Física das radiações e a radioterapia.

Capítulo 2

Decaimento radioativo

Neste capítulo são apresentados conceitos importantes, como também o histórico da radioatividade, Lei fundamental do decaimento radioativo e os tipos de decaimentos. Radiação é energia que pode ser transmitida através da emissão de partículas radioativas, ou de ondas eletromagnéticas. O estudo da radiação feito por importantes cientistas, como por exemplo Rutherford e Madame Curie, foi a peça-chave para o desenvolvimento da Física Nuclear. Com o avanço das técnicas, a Física Nuclear abriu a possibilidade de diversas áreas utilizarem a radiação com sucesso, a exemplo temos a Medicina Nuclear para diagnóstico de doenças. Os conceitos que serão vistos neste capítulo são de suma importância para compreender os princípios físicos que estão por detrás da utilização da radiação no combate de patologias, técnica essa que é conhecida como radioterapia.

2.1 Conceitos e histórico da radioatividade

Radiação é energia em trânsito, emitida por uma fonte natural ou artificial, que propaga-se no vácuo ou em outros meios materiais (OKUNO, 2013). No mecanismo de emissão de radiação por um núcleo atômico podem ocorrer a ejeção de duas formas distintas de

radiação: ela pode ser de natureza corpuscular ou eletromagnética. A radiação corpuscular é aquela formada por partículas massivas que possuem ou não carga elétrica. A radiação eletromagnética tem caráter ondulatório, não possui massa de repouso¹. São considerados exemplos de radiação as partículas α , partículas β , etc. Enquanto ao tipo, a radiação pode ser ionizante que são radiações que possuem energia suficiente para arrancar elétrons do átomo, tornando o mesmo um íon. E pode ser não-ionizante que é a aquela que não possui energia suficiente para arrancar o elétron do átomo, apenas excita o mesmo alterando o nível energético.

Quando há a emissão de partículas no interior do núcleo do átomo está ocorrendo uma desintegração nuclear ou decaimento radioativo. A primeira evidência do decaimento nuclear espontâneo ocorreu com o cientista francês Henri Becquerel. Becquerel guardou um pouco de óxido de urânio em uma gaveta, o cientista ficou surpreso ao notar que o composto havia escurecido as chapas fotográficas que estavam ali guardadas (ATKINS, 2012).

Mais tarde, Marie Curie mostrou que a radiação poderia ser emitida pelo urânio, e em seguida descobriu, juntamente com o seu marido Pierre Curie, os elementos químicos Polônio e Rádio ambos radioativos (CURIE, 1898). Madame Curie deu o nome de radioatividade a esse fenômeno e devido ao seu trabalho ganhou um prêmio Nobel em Física junto com o seu marido, e anos mais tarde ganhou o segundo Nobel, mas dessa vez em Química após determinar a massa atômica do novo elemento, o Rádio.

Mas foi Ernest Rutherford que deu o primeiro passo para descobrir a origem dos raios radioativos. O cientista identificou dois tipos diferentes de radiação após observar o efeito de campos elétricos sobre emissões radioativas, que chamou de radiação alfa (α) e radiação beta (β). As partículas α e β na presença de campos elétricos sofrem deflexões. Rutherford concluiu

¹A natureza corpuscular da radiação foi demonstrada experimentalmente por Arthur Compton em 1923. Compton demonstrou que o fóton, pacotes de energia, possui caráter dual onda-partícula, porém sua massa de repouso é nula. Ou seja, para cada fóton existe uma onda luminosa que governa o seu movimento. Sendo assim, o fóton é uma partícula com massa de repouso nula e energia relativística E puramente cinética.

que partículas α são positivas, devido a atração com o polo negativo gerador do campo elétrico, e por outro lado, as partículas β são dotadas de carga negativa. Rutherford também observou que ambas possuem massa, sendo a partícula α a mais massiva, consequentemente, possuindo alcance menor do que a partícula β (RUTHERFORD, 1911). A Figura 2.1 ilustra o experimento realizado por Rutherford.

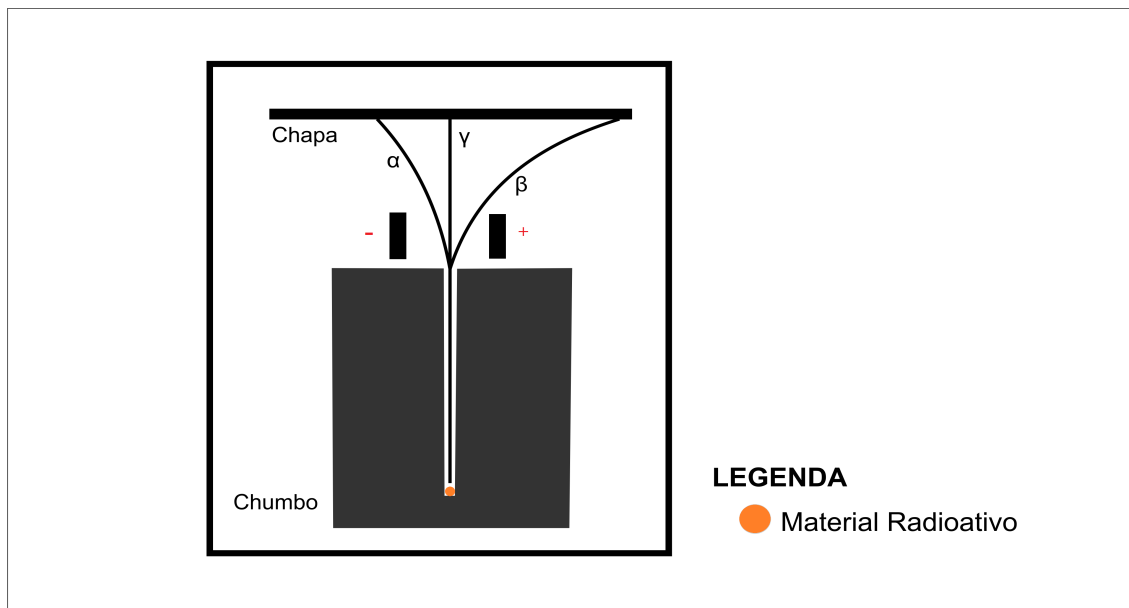


Figura 2.1: Representação da emissão de radiação sob a influência de um campo elétrico. Figura elaborada pelo autor.

Rutherford e Frederick Soddy ganharam um prêmio Nobel em Química. Eles demonstraram que a emissão de partículas α e β envolve a transmutação de elementos químicos, um elemento químico é transformado em outro (YOSHIMURA, 2010). Mais tarde, o francês Paul Ulrich Villard descobriu outro tipo de radiação, que Rutherford nomeou de raios gama (γ) no qual não sofria desvios na presença de campos elétricos, o que levou a conclusão que o decaimento γ é radiação eletromagnética, que inicialmente era confundida com os raios X.

As partículas α e β são emitidas naturalmente por átomos instáveis em busca de estabilidade. No geral, a radioatividade é um processo em que os núcleos instáveis passam por

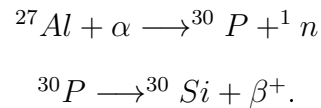
um decaimento até atingir estabilidade, e este processo chama-se decaimento radioativo. Os fenômenos radioativos são capazes de alterar a estrutura e a energia do átomo. Enquanto a emissão de radiação eletromagnética altera a energia do átomo, e outras propriedades importantes como por exemplo o spin, paridade etc; a emissão de partículas, além de mudar o nível energético nuclear, altera também a estrutura atômica em si (ALMEIDA, 1981).

Existem núcleos estáveis e instáveis, os primeiros não decaem e os segundos precisam se estabilizar. Os núcleos instáveis, conhecidos também como radioisótopos, são nuclídeos que emanam radiação. Pode-se afirmar que radioisótopos são isótopos², mas instáveis, ou seja, radioativos. Inclusive um dos resultados obtidos no estudo de elementos radioativos foi justamente a descoberta de isótopos (KAPLAN, 1963). Segundo Okuno (2010, p. 74), "a estabilidade é dita pelo equilíbrio entre forças nucleares entre os pares p-p, p-n, e n-n e a força de repulsão coulombiana entre prótons.". Além de descobrir as partículas α , β e ter dado a nomenclatura a radiação γ , Rutherford, juntamente com Soddy, apresentou a lei fundamental do decaimento radioativo que será apresentada na próxima seção. A emissão e a recepção de partículas é a peça-chave para a formação de novos elementos, já que envolve o processo de transmutação, resultado esse que alquimistas durante a Idade Média tanto almejavam, porém só foi adquirido na Idade Contemporânea graças ao avanço da Física atômica e nuclear.

Porém, é importante frisar a diferença entre transformação químicas e transformação radioativa. A primeira é a quebra de moléculas em suas combinações, já na segunda ocorre a alteração do núcleo atômico. Um exemplo clássico na formação de um novo elemento é bombardear alumínio com partículas α , nessa reação é produzido um isótopo radioativo de fósforo e um nêutron. O fósforo sofre um decaimento β liberando um pósitron e produzindo o silício. Hoje vários isótopos radioativos são produzidos, e suas aplicações são diversas dando destaque nas áreas de Biologia, Química, Medicina e na Tecnologia (CARUSO, p. 280, 2016).

²Nuclídeos que possuem o mesmo número de prótons.

A reação descrita anteriormente é equacionada logo abaixo.



Os núcleos instáveis quando decaem, na maioria das vezes, os elementos resultantes também são radioativos e geneticamente relacionados, o que permite chamar o primeiro elemento de núcleo-pai, e o resultante de núcleo-filho. Este processo pode se estender por várias gerações, constituindo o que se denomina família radioativa (ALMEIDA, 1981).

A Física atômica e nuclear surgiu e cresceu graças às ideias e técnicas baseadas nas propriedades de elementos radioativos e nas suas emissões de radiação, com isso o estudo da radioatividade mostrou-se indispensável para o desenvolvimento deste ramo da Física Moderna (KAPLAN, 1963). Atualmente a radiação possui diversos campos de aplicações, que variam desde a sua utilização na agricultura, aplicação na indústria, nos processos fisiológicos do corpo humano, e chegando até na medicina para o tratamento de diversas patologias como, por exemplo, o câncer.

2.2 Lei do decaimento radioativo

Halliday e Resnick (2012, p. 304) afirmam que "o decaimento radioativo foi a primeira indicação de que as leis que governam o mundo subatômico são estatísticas". De modo geral, o decaimento devido a processos radioativos no tempo, é independente do tipo de transformação, e segue uma lei estatística. Segundo Almeida (1981, p. 222) isso justifica-se devido ao fato da quantidade de núcleos envolvidos no processo de decaimento ser grande, logo é preciso tratar essa quantidade de núcleos como uma variável contínua.

Rutherford e Soddy contribuíram bastante no estudo da radioatividade, e uma dessas

grandes contribuições foi a Lei do decaimento radioativo apresentada no artigo "*The cause and nature of radioactivity*" (YOSHIMURA, 2010).

A taxa de decaimento é proporcional ao número de núcleos, ou seja:

$$-\frac{dN}{dt} \propto N. \quad (2.1)$$

Tonando a (2.1) uma igualdade, é necessário uma constante de ajuste λ . Logo, temos:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N. \quad (2.2)$$

A letra grega λ representa a constante de desintegração (ou constante de decaimento), e varia de acordo com a amostra de radionuclídeo. O sinal negativo presente da taxa de variação, indica que a quantidade de núcleos diminui com o passar do tempo. A equação (2.2) é uma equação diferencial de primeira ordem, que pode ser resolvida pelo método de separação de variáveis, cujo resultado é equação (2.3).

$$N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (2.3)$$

A equação (2.3) é a lei fundamental do decaimento radioativo em que N é número de núcleos após um tempo t , N_0 o número inicial de núcleos no instante $t=0s$, λ a constante de desintegração, e t o tempo. Observa-se, pela expressão matemática, que o número de núcleos radioativos decai exponencialmente com o passar do tempo. Resultado este que já havia sido observado pelo físico Gerhard Carl Schimdt (CARUSO, 2016, p. 282).

Outra forma alternativa da Lei do decaimento radioativo é considerando a taxa de decaimento:

$$R = -\frac{dN}{dt}. \quad (2.4)$$

Substituindo a equação (2.3) na (2.4), fica:

$$\begin{aligned} R &= -\frac{d(N_0 e^{-\lambda t})}{dt}, \\ R &= -N_0 \frac{d(e^{-\lambda t})}{dt}, \\ R &= \lambda N_0 e^{-\lambda t}. \end{aligned} \tag{2.5}$$

fazendo $R_0 = \lambda N_0$, a equação (2.5) fica:

$$R = R_0 e^{-\lambda t}. \tag{2.6}$$

A equação (2.6) é a forma alternativa da Lei do decaimento radioativo, em que R é taxa de decaimento no instante t , R_0 a taxa de decaimento no instante $t = 0$ s, λ a constante de desintegração, e t o tempo. Se $R_0 = \lambda N_0$, pode-se concluir que:

$$R = \lambda N. \tag{2.7}$$

Em que R e N devem ser medidos no mesmo instante t . A soma das taxas de decaimento R de todos os núcleos radioativos de uma amostra chama-se de atividade da amostra, tendo como unidade no Sistema Internacional (SI) o becquerel, que significa decaimento por segundo (HALLIDAY, 2012).

2.2.1 Meia-vida

Tempo de meia-vida refere-se ao tempo necessário para a metade de radionuclídeos contidos em uma amostra se desintegram. Utilizando este argumento, pode-se encontrar uma relação entre o tempo de meia-vida e a constante de desintegração a partir de:

$$t = T_{1/2} \longrightarrow N = \frac{N_0}{2}. \tag{2.8}$$

Substituindo na equação (2.3), o tempo de meia-vida será dado pela equação (2.9).

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}. \tag{2.9}$$

A equação (2.9) serve para determinar o tempo de meia-vida de uma amostra radioativa, no qual deve-se conhecer previamente a constante de desintegração (λ).

2.2.2 Vida-média

Almeida (1981, p. 223) define vida média como "a média do tempo de vida dos átomos que constituem uma amostra cuja população decai exponencialmente". Ou seja, é o tempo necessário para que a quantidade N de núcleos, ou a taxa de atividade R , decaia a $1/e$ do valor inicial. Matematicamente:

$$\tau = \frac{\int_{N(0)}^0 t dN(t)}{\int_{N(0)}^0 dN(t)}. \quad (2.10)$$

Fazendo uma troca de variáveis para facilitar a resolução da integral, de modo que se tenha uma integral no tempo: $N(t) = N(0) \rightarrow t = 0$, e $N(t) = 0 \rightarrow t = \infty$

Logo:

$$\tau = \frac{\int_0^\infty t \frac{dN(t)}{dt} dt}{\int_0^\infty \frac{dN(t)}{dt} dt}, \quad (2.11)$$

como $\frac{dN}{dt} = -\lambda N = -\lambda N_0 e^{-\lambda t}$, a equação (2.11) fica:

$$\tau = \frac{-\int_0^\infty \lambda N_0 t e^{-\lambda t} dt}{-\int_0^\infty \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt} = \frac{\int_0^\infty t e^{-\lambda t} dt}{\frac{1}{\lambda}} = \frac{1}{\lambda}. \quad (2.12)$$

E o número de átomos será:

$$N(\tau) = N_0 e^{-\lambda \tau} = \frac{N_0}{e}. \quad (2.13)$$

Também é possível relacionar o tempo de meia vida com o tempo médio. Utilizando as equações (2.9) e (2.12), essa relação será dada por:

$$\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}. \quad (2.14)$$

2.3 Tipos de decaimento

2.3.1 Decaimento alfa (α)

Um processo de decaimento importe é a emissão de partículas α , que geralmente ocorre em núcleos pesados com número atômico Z maior que 82 ($Z > 82$). A partícula α é emitida espontaneamente por núcleos instáveis e pesados em busca de estabilidade. Segundo Yoshimura (2010) atualmente existem cerca de 400 radionuclídeos emissores de partículas α .

O processo básico do decaimento α é o seguinte: O núcleo pai decai nos núcleos filhos emitindo uma partícula α (EISBERG, 1979). A partícula α é justamente o núcleo de hélio duplamente ionizado, dois prótons e dois nêutrons (SOUZA, 2010). Uma reação nuclear com emissão de partículas α pode ser representada como:



Onde X é o elemento pai, Y o elemento filho e o núcleo de hélio é a partícula α emitida no processo. O número atômico, número de massa e a energia devem se conservar.

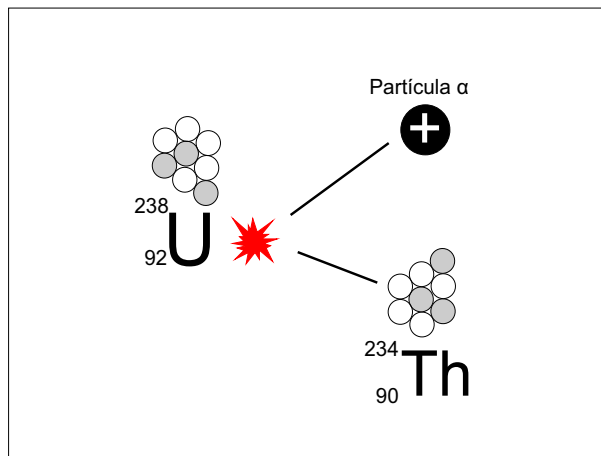


Figura 2.2: Representação do decaimento α do urânio-238. Figura elaborada pelo autor.

A Figura 2.2 ilustra o decaimento do núcleo de urânio-238, em que o elemento passa por

um decaimento α originando o tório-234. Segundo Eisberg (1979), o decaimento α ocorre espontaneamente porque o mesmo é favorecido por questões de energia, já que a massa do núcleo pai é maior do que o somatório das massas do núcleo filho e da partícula α . A energia Q do decaimento pode ser definida como:

$$\begin{aligned} Q &= (m_x - m_y - m_\alpha)c^2, \\ Q &= (m_x - m_y - m_\alpha)931,50 \text{ MeV}/u. \end{aligned} \tag{2.16}$$

Na equação (2.16), m_x é a massa do núcleo pai, m_y a massa do núcleo filho, e m_α a massa da partícula α . A energia Q aparece como sendo puramente cinética, pertencendo quase totalmente a partícula α .

2.3.2 Decaimento beta (β) e a existência do neutrino (ν_e)

Decaimento β é a emissão de elétrons por núcleos instáveis. Em muitos decaimentos, além de liberarem elétrons, podem ser emitidos pósitrons. O decaimento β em que há emissão de elétrons chama-se decaimento β^- , e o que pósitrons são emitidos chama-se decaimento β^+ .

Percebe-se que o pósitron é a antipartícula do elétron, pois possui a mesma massa e carga contrária, e que inicialmente foi prevista por Dirac na resolução da sua equação referente ao momento angular intrínseco do elétron, e logo depois descoberta em 1932 por Carl David Anderson por meio de análises experimentais. Logo após a descoberta do pósitron, Irène Curie e Frédéric Joliot anunciaram ao meio científico da época, que a partícula em questão era emitida naturalmente de núcleos instáveis (YOSHIMURA, 2010).

O decaimento β^- apresentava dificuldades no ponto de vista interpretativo. Primeiro que o espectro de energia era contínuo, e segundo como era possível o núcleo emitir elétrons se o mesmo é formado apenas por prótons e nêutrons. Para solucionar o problema do espectro, Wolfgang Pauli propôs a existência de uma nova partícula batizada de neutrino ν_e por Enrico

Fermi. Fermi explicou o decaimento β através de sua teoria, aceitando a proposta da existência do neutrino para explicar o espectro contínuo do decaimento (WILSON, 1968). O neutrino ν_e é uma partícula sem carga, com massa nula ou desprezível em relação a massa do elétron, questão ainda em aberto na Física de Partículas (CARUSO, 2016). A Figura 2.3 ilustra o decaimento do núcleo de carbono-14 em que o elemento passa por um decaimento β^- liberando um elétron e um anti-neutrino para o meio, e originando assim o nitrogênio-14.

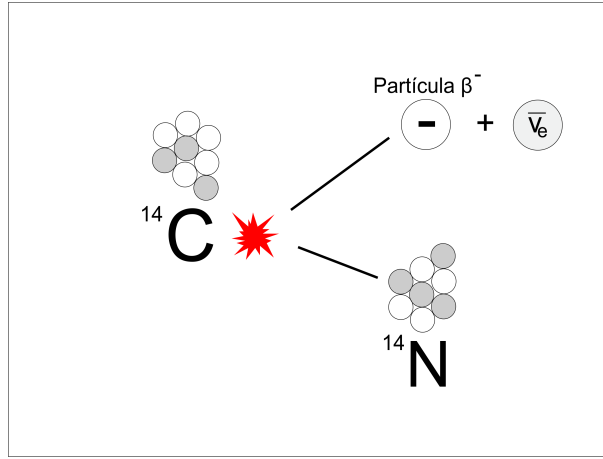


Figura 2.3: Representação do decaimento β^- do carbono-14. Figura elaborada pelo autor.

Segundo Yoshimura (2010), o neutrino carrega uma parte da energia de desintegração, e isso explica o espectro contínuo do decaimento β^- . Posteriormente, foram realizados experimentos e notaram que dois tipos de neutrinos podem ser emitidos no decaimento β : O neutrino e o antineutrino, e, como o próprio nome já diz, o antineutrino é a antipartícula do neutrino. A explicação da emissão de elétron pelo núcleo, foi dada por Fermi quando o mesmo supôs que no decaimento β^- , o elétron e o antineutrino eram criados a partir do decaimento de um nêutron:

$$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e,$$

E no decaimento β^+ , o pósitron e o neutrino eram criados a partir do decaimento de um

próton:

$$p \longrightarrow n + e^+ + \nu_e.$$

Nos dois casos, o número de massa A dos elementos pai e filho não sofrem alterações, porém o número atômico sim.

Como visto, a emissão de partículas β^- tem origem no núcleo do átomo através de decaimentos de nêutrons em excesso. Yoshimura (2010) afirma que existem mais de 600 núcleos emissores de partículas β^- . A reação de decaimento β^- pode ser esquematizada como:

$${}^A_Z X \longrightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1}\beta^- + {}^0_0\bar{\nu}_e. \quad (2.17)$$

A emissão de elétrons ocorre se a massa do núcleo pai foi maior do que o somatório entre a massa do núcleo filho e a massa do elétron. Logo a energia do decaimento será dada por:

$$Q = [m_x - (m_y + m_e)]c^2. \quad (2.18)$$

Adicionando Z massas de repouso de elétrons na expressão (2.18), podemos obter a energia do decaimento em termos da massa atômica:

$$\begin{aligned} Q &= [m_x + Zm_e - (m_y + Zm_e + m_e)]c^2, \\ Q &= \{m_x + Zm_e - [m_y + m_e(Z + 1)]\}c^2, \\ Q &= [M_x - M_y]c^2. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Já o decaimento β^+ , tem origem no decaimento de um próton, ou seja, núcleos que possuem prótons em excesso decaem, dando origem a nêutrons para tornar-se estáveis. A reação de decaimento β^+ pode ser esquematizada como:

$${}^A_Z X \longrightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_{+1}\beta^+ + {}^0_0\nu_e. \quad (2.20)$$

E a energia deste decaimento é expressa em função da massa atômica por:

$$Q = [M_x - M_y - 2m_e]c^2. \quad (2.21)$$

A emissão de pósitrons só será possível se a massa atômica do pai (M_x) for maior que a massa atômica do filho (M_y) em, pelo menos, duas vezes a massa do elétron (YOSHIMURA, 2010, p.97).

É importante analisar o que ocorre com o pósitron após sua emissão. No caso, a partícula β^+ quando encontra um elétron do meio, ocorre uma interação conhecida como aniquilação. As partículas que estão interagindo, desaparecem e no seu lugar há emissão dois de fótons em direções opostas.

2.3.3 Decaimento gama (γ)

O decaimento γ , diferente dos decaimentos α e β , se caracteriza somente pela emissão de energia em excesso do núcleo filho. Não possui carga e nem massa de repouso, pois trata-se da emissão de fótons por núcleos ainda excitados após decaimentos α e β . É o terceiro tipo comum de radiação que Rutherford identificou, e diferente das outras, a radiação γ não sofre influência de um campo elétrico e magnético (KAPLAN, 1963).

A energia do raio γ é calculada por:

$$E_\gamma = h\nu. \quad (2.22)$$

Onde h é a constante de Planck, cujo valor é $6,63 \times 10^{-34}$ J.s, e ν é a frequência da radiação. Percebe-se que a energia está diretamente relacionada com a frequência, o que acaba diferenciando este tipo de radiação eletromagnética das usuais, pois a frequência dos raios γ são elevadas.

Como não há transmutação³ de elementos, o decaimento γ pode ser esquematizado por:



O ${}^A_ZX^*$ indica o núcleo no estado excitado.

Pode-se afirmar também que energia da radiação γ corresponde a diferença entre os valores iniciais e finais da transição energética do núcleo. Logo, a frequência da radiação emitida pode ser calculada por:

$$\begin{aligned} E_\gamma &= E_i - E_f, \\ h\nu &= E_i - E_f, \\ \nu &= \frac{1}{h}(E_i - E_f). \end{aligned} \quad (2.24)$$

Albert Einstein utilizou o postulado de Planck para a quantização de energia, equação (2.22), justamente para estudar o efeito fotoelétrico; e Bohr a utilizou como postulado ao formular seu modelo atômico para o átomo de hidrogênio.

³Conversão de um elemento químico em outro.

Capítulo 3

Interação da radiação com a matéria

Neste capítulo será abordado como a radiação interage com a matéria no ponto de vista físico. Tal mecanismo é de suma importância para a radioterapia, pois permite saber como aplicar a dose correta de acordo com as necessidades do paciente. Com isso, serão apresentados conceitos importantes relacionados a dosimetria e algumas grandezas dosimétricas no intuito de relacionar o processo de interação com a radioterapia. O presente capítulo será finalizado com os efeitos biológicos da radiação decorrentes dos mecanismos de interação.

3.1 Partículas carregadas

As partículas α e β são conhecidas por radiação ionizante devido ao fato das mesmas provocarem, durante a sua passagem pela matéria, a formação de íons. A interação elétrica provocada pelas partículas radioativas é capaz de arrancar elétrons da camada de valência, consequentemente o sistema passa a ser constituído por íons e elétrons livres, conhecidos também como pares iônicos. Assim, a passagem de radiação ionizante corpuscular pela matéria forma uma esteira de pares iônicos (ALMEIDA, 1981).

Segundo Yoshimura (2010), o que caracteriza a radiação ionizante é a sua capacidade

de ionizar o meio que atravessa, essa ionização é devido a radiação arrancar⁴ elétrons dos átomos do material. Ocorre também a excitação dos átomos do material devido ao depósito de energia da radiação no local, pois na incidência de radiação em um determinado meio há um desencadeamento de ionizações, e como consequência disso há excitação das moléculas e átomos que compõe o meio devido a transferência de energia decorrente das interações radioativas. No geral, a interação da radiação com a matéria depende das características da radiação e do meio irradiado. A energia necessária para formar um par iônico varia com o meio, carga, massa e energia da partícula.

O mecanismo básico da interação de partículas radioativas com o meio são colisões que, segundo Almeida (1981), podem ser resumidas em colisões elásticas e inelásticas com elétrons, e colisões elásticas e inelásticas com núcleos.

As partículas α basicamente interagem com elétrons da nuvem eletrônica através de colisões até que sua energia cinética seja próxima da energia térmica. Existe também a possibilidade da partícula α colidir com o núcleo dando origem a uma reação nuclear, mas para que isso ocorra a energia cinética da partícula deve ser altíssima para superar a repulsão coulombiana do núcleo atômico. Geralmente esse tipo de partícula interage fortemente com a matéria capturando elétrons de tal forma que a sua velocidade é reduzida, tornando-se um átomo de hélio volumoso, possuindo baixo poder de penetração sendo a mesma freada por uma folha de papel. No tecido humano as partículas α interagem, na maioria das vezes, com a camada superficial da pele causando danos imperceptíveis. Porém, são necessários cuidados, pois caso a partícula α seja inalada ou ingerida pode causar diversos problemas nos seres vivos dentre elas a destruição de células pulmonares, doenças decorrentes da radiação e podendo levar a morte (ATKINS, 2012).

No combate ao câncer, apesar de possuir o poder de penetração pequeno, a partícula α

⁴A radiação ionizante, ao atravessar determinado meio, arranca elétrons dos átomos que estão ali presentes. Ou seja, a radiação transforma os átomos que compõem o meio em íons.

possui uma empregabilidade bastante interessante e importante. Um exemplo é a terapia por captura de nêutrons pelo boro-10, em que o elemento é injetado no corpo do paciente e bombardeado com nêutrons, emitindo partículas α com alto poder de destruição. No tratamento, o boro-10 é incorporado por um composto que é facilmente absorvido pelo tumor e o paciente frequenta sessões de bombardeamento por nêutrons. É importante ressaltar que assim que o bombardeio de nêutrons acaba, cessa com ele a emissão de partículas radioativas (ATKINS, 2012).

Tabela 3.1: Proteção necessária contra as radiações corpusculares e eletromagnética. Retirada de ATKINS(2012).

Radiação	Poder relativo de penetração	Proteção necessária
α	1	Papel, pele
β	10	3mm de alumínio
γ	10000	Concreto, Chumbo

As partículas β interagem com a matéria de maneira semelhante a partículas α , através de colisões com elétrons do meio. Porém, a colisão entre elétron-elétron resulta em perdas significativas de energia e mudanças bruscas na direção (YOSHIMURA, 2010). Em detrimento da velocidade do elétron ser muito alta, é necessário tratá-lo como uma partícula relativística, e assim como as partículas α , a partícula β produz pares iônicos quando atravessa algum meio. Como a massa da partícula β é menor, o seu poder de ionização será menor do que o da partícula α , mas por outro lado o seu grau de penetração será bem mais significativo. Segundo Atkins (2012), a radiação β é a segunda mais penetrante sendo capaz de penetrar até 1 cm do corpo humano antes que as interações elétricas com elétrons e moléculas da matéria interrompam a sua passagem. A tabela 3.1 mostra o poder de penetração relativo das radiações corpusculares e eletromagnética, e também a proteção necessária para freá-las. Observem que a mais penetrante é a radiação γ devido ao seu caráter dual onda-partícula com massa de repouso nula, por outro lado a partícula α possui o menor grau de penetrabilidade isso é devido a sua carga e massa.

3.2 Radiação eletromagnética

3.2.1 Interação da radiação eletromagnética com a matéria

Há três formas básicas de interação da radiação eletromagnética com a matéria, que vão variar de acordo com a energia do feixe da radiação incidente. Para baixas energias existe a predominância do efeito fotoelétrico, para energias medianas temos o domínio do efeito Compton e para altas energias o processo de interação que ocorrerá será a formação de pares.

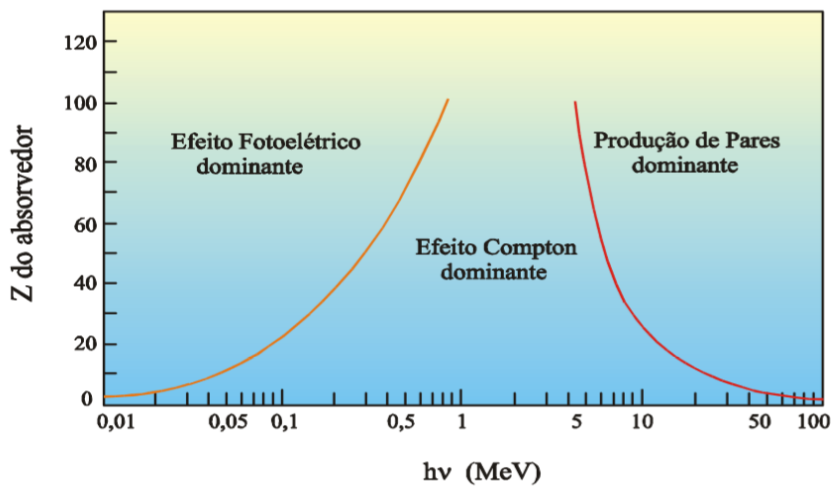


Figura 3.1: Na medida que a energia do feixe de radiação eletromagnética cresce, diminui a probabilidade de ocorrer o efeito fotoelétrico. Para energias medianas, há predominância do efeito Compton. Para energias elevadas, a probabilidade de ocorrer a produção de pares é maior. Figura retirada de TAUHATA (2014).

A Figura 3.1 é um gráfico que mostra os domínios de cada um desses mecanismos citados anteriormente. Independente dos mecanismos de interação, todos dependerão da energia do feixe de raio γ incidente. No geral, o processo de interação da radiação eletromagnética é diferente em relação a partículas carregadas, pois a radiação γ possui uma maior penetrabilidade, como visto na tabela 3.1, devido ao seu caráter ondulatório, e a sua

absorção dependerá do tipo de interação provocada pela mesma (ALMEIDA, 1981, p. 253).

3.2.1.1 Efeito fotoelétrico

Uma das primeiras evidências experimentais da quantização da energia foi o efeito fotoelétrico, fenômeno que foi observado primeiramente por Hertz através de um experimento cujo objetivo era validar a teoria de Maxwell. Hertz percebeu que ao incidir luz sobre um eletrodo, uma faísca de luz saltava do cátodo para o ânodo gerando uma descarga oscilante no circuito (EISBERG, 1979).

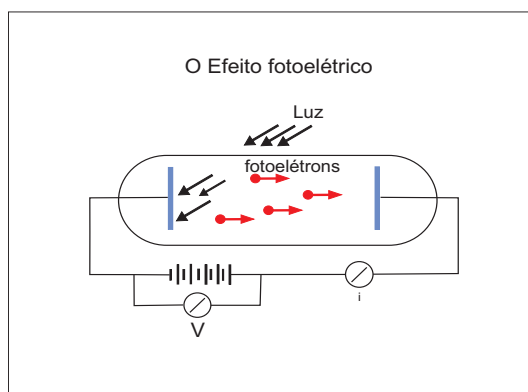


Figura 3.2: Representação de um circuito no qual consta uma ampola a vácuo que possui um ânodo e o cátodo. A luz incide sobre o cátodo liberando os fotoelétrons. Figura elaborada pelo autor.

Segundo Caruso (2016), o efeito fotoelétrico consiste na liberação de elétrons pela superfície de um metal após a absorção da energia proveniente da radiação eletromagnética incidente sobre ele, essa descrição está ilustrada pela Figura 3.2. Além de Hertz, outros cientistas da época deram importantes contribuições na explicação do efeito fotoelétrico. Lenard observou o fenômeno, e concluiu que havia inconsistências com a teoria clássica, que podem ser resumidas como:

- A energia cinética dos fotoelétrons deveria aumentar com o aumento da intensidade da

luz;

- Se a intensidade da luz for baixa, o elétron passaria um tempo para adquirir energia cinética para saltar do cátodo;
- Se a intensidade da luz for alta, deveriam existir elétrons com velocidades bem elevadas.

Nenhuma dessas previsões se cumprem realmente, e além disso a teoria ondulatória da luz não tinha explicações plausíveis para tal fenômeno. Entretanto Albert Einstein propôs uma nova explicação para o efeito fotoelétrico, colocando em questão a teoria clássica da luz. Einstein utilizou a teoria de Max Planck sobre a quantização da energia decorrente do problema da radiação do corpo negro, e aplicou no efeito fotoelétrico afirmando que "a energia radiante está quantizada em pacotes concentrados", e que futuramente passaram a ser chamados de fótons (EISBERG, 1979).

Pela conservação da energia:

$$\begin{aligned}E &= K + W_0, \\K &= E - W_0, \\ \frac{mv^2}{2} &= h\nu - W_0.\end{aligned}\tag{3.1}$$

Para frear um fotoelétron, é necessário um potencial frenador. Logo para frear o elétron, o potencial de frenagem deve ser igual à energia cinética:

$$eV_0 = \frac{mv^2}{2}.\tag{3.2}$$

Substituindo na equação (3.1) obtemos:

$$eV_0 = h\nu - W_0.\tag{3.3}$$

Em que e é a carga do elétron, ν a frequência da luz incidente, V_0 o potencial de corte, h a constante de Planck e W_0 a função trabalho. As equações (3.1) e (3.3) são as equações do

efeito fotoelétrico. No efeito fotoelétrico, a energia $h\nu$ do fóton incidente é transferida⁵ a um elétron orbital, expulsando-o com energia cinética que pode ser calculada através da equação (3.1).

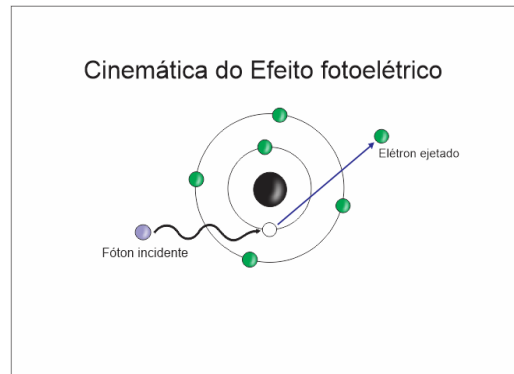


Figura 3.3: Representação do efeito fotoelétrico do ponto de vista atômico. Figura elaborada pelo autor.

Para ocorrer a ejeção de elétron, é necessário que a energia do fóton seja maior ou igual a energia de ligação do elétron ao átomo. A figura 3.3 ilustra a cinemática do efeito fotoelétrico do ponto de vista atômico, em que um fóton é absorvido por um elétron orbital, expulsando-o com energia cinética K . Após a expulsão, o átomo ficará ionizado apresentando uma vacância, sendo que a mesma será preenchida por um elétron de uma camada vizinha emitindo um fóton sob forma de radiação secundária característica que será de acordo com o elemento e com o nível energético que o mesmo se encontra (SCAFF, 1997).

3.2.1.2 Efeito Compton

Em 1923 Arthur Holly Compton confirmou a natureza corpuscular da radiação eletromagnética. Compton fez com que um feixe de raios x incidisse sobre grafite. Ele notou que o feixe de fótons era espalhado, de modo que a teoria clássica do eletromagnetismo não conseguia explicar o porquê desse fenômeno. Compton explicou esse espalhamento afirmando

⁵No efeito fotoelétrico ocorre a absorção completa do fóton, este fóton não é espalhado.

se tratar de uma colisão entre fóton-elétron, considerando o elétron uma partícula livre e ambos obedecem a cinemática relativística, logo a energia e o momento devem se conservar de acordo com a Teoria da Relatividade Restrita proposta por Einstein. Além de explicar o espalhamento de raios x, essa série de experiências permitiu também a aceitação dos fótons no meio científico da época (CARUSO, 2016).

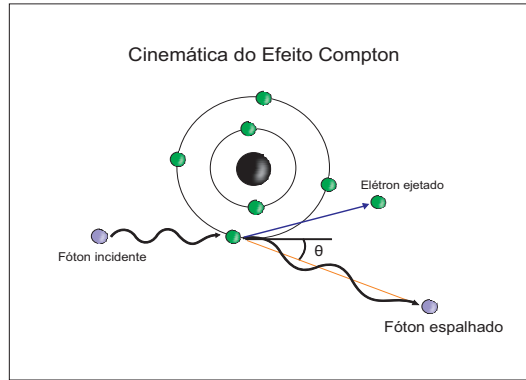


Figura 3.4: Representação do efeito Compton do ponto de vista atômico. Figura elaborada pelo autor.

A Figura 3.4 mostra a cinemática do efeito Compton, no qual um fóton com comprimento de onda λ , energia E_γ e momento p_γ colide em um elétron em repouso. Após a colisão, o fóton é espalhado com energia E'_γ , comprimento de onda λ' e momento p'_γ , e o elétron adquire energia cinética decorrente a colisão, passando a ter momento e energia. O ângulo θ é chamado de ângulo de espalhamento do fóton após a colisão com o elétron. No efeito Compton, o fóton arranca o elétron ionizando o átomo, porém, diferentemente do efeito fotoelétrico, o fóton não é absorvido totalmente. Ele sairá em uma direção diferente da inicial, com energia menor (ALMEIDA, 1981). Ao contrário do efeito fotoelétrico que ocorre com elétrons fortemente ligados ao átomo, no efeito Compton o fóton é espalhado por um elétron que possui baixa energia de ligação. Geralmente a predominância do espalhamento Compton ocorre quando a energia da radiação γ é acima do limite tolerável para a ocorrência do efeito fotoelétrico. A relação entre a energia do fóton espalhado e a energia do fóton incidente é expressada pela

equação (3.4).

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}, \quad (3.4)$$

Em que

$$\alpha = \frac{E_\gamma}{m_0 c^2}. \quad (3.5)$$

A energia do fóton espalhado é máxima quando $\theta = 0^\circ$ e mínima quando $\theta = 180^\circ$. Já a energia cinética adquirida pelo elétron ejetado devido a colisão é calculada através da expressão abaixo.

$$T = \frac{h\nu_0\alpha(1 - \cos\theta)}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}. \quad (3.6)$$

A equação (3.6) permite o cálculo da energia cinética do elétron espalhado em função do ângulo de espalhamento θ do fóton. A energia cinética é máxima quando $\theta = 180^\circ$, logo:

$$\begin{aligned} T_{max} &= \frac{h\nu_0\alpha(1 - (-1))}{1 + \alpha(1 - (-1))}, \\ T_{max} &= h\nu_0 \frac{2\alpha}{1 + 2\alpha}, \\ T_{max} &= h\nu_0 \frac{2\alpha}{2\alpha(\frac{1}{2\alpha} + 1)}, \\ T_{max} &= \frac{h\nu_0}{1 + \frac{1}{2\alpha}}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

E o deslocamento de onda Compton do fóton espalhado pode ser calculado através da relação abaixo.

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c^2}(1 - \cos\theta). \quad (3.8)$$

Fazendo

$$K = \frac{h}{m_0 c^2} = cte = 2,426 \times 10^{-12} = 0,02426\text{\AA},$$

a equação (3.8) pode ser resumida em:

$$\Delta\lambda = K(1 - \cos\theta). \quad (3.9)$$

As equações desta seção encontram-se deduzidas em diversas literaturas de Física Moderna e Física Nuclear dentre elas podemos citar Caruso (2016), Nussenzveig (2003), Almeida (1981) e Scaff (1997) etc. A constante K é conhecida como comprimento de onda Compton do elétron. A radiação espalhada sofre alteração no seu comprimento de onda, logo possui uma componente λ_0 e uma variação do mesmo, podendo ser calculado através da equação (3.9) (NUSSENZVEIG, 2003).

3.2.1.3 Formação de pares

Outra forma da radiação eletromagnética interagir com a matéria é produzindo pares elétron-pósitron, processo no qual a energia do feixe de fótons é alta. Segundo Almeida (1981) "o fóton desaparece e o par elétron-pósitron é criado", sendo que a energia mínima necessária para criar um par é 1,02 MeV. É a aplicação prática da famosa equação de Einstein, $E = mc^2$, o fóton tem que ter energia alta o suficiente para criar duas partículas de massa m_0 , ou seja, a radiação incidente é completamente absorvida pelo núcleo do átomo e toda a sua energia é convertida em massa de repouso e energia cinética de um par partícula-antipartícula, que geralmente é um par do tipo elétron-pósitron.

Neste processo a carga é conservada, pois já que a radiação eletromagnética não possui carga e é completamente absorvida, o somatório das cargas das partículas resultantes é zero, ou seja $e^+ + e^- = 0$, sendo que e^+ representa a carga do pósitron e e^- a carga do elétron (EISBERG, 1961, p. 523). O elétron e o pósitron são liberados, sendo que a energia cinética do pósitron é maior devido a repulsão causada pelo núcleo, e interagem no meio. O pósitron é aniquilado por um elétron do meio, liberando dois fótons em direção opostas com energias iguais à 0,511 MeV. Esse processo também é conhecido por radiação de aniquilação, e embora não seja de natureza nuclear, essa radiação é denominada de radiação γ (TAUHATA, 2014).

3.2.2 Atenuação de raios γ

Ao se propagar pela matéria, a radiação diminui sua intensidade. Uma parte do feixe é espalhado, ou absorvido por alguns dos mecanismos de interação descritos anteriormente, outra parte atravessa o meio sem interagir (TAUHATA, 2014). Essa parte do feixe não-interagente é chamado de radiação atenuada. Quando o feixe eletromagnético incide em algum material, o decréscimo de sua intensidade é proporcional a espessura do meio que atravessa.

$$dI \propto -I(x)dx. \quad (3.10)$$

Tornando a (3.10) uma igualdade, temos

$$dI = -\mu I(x)dx. \quad (3.11)$$

Em que μ é a constante de ajuste. Resolvendo a (3.11) por simples integração, temos:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}. \quad (3.12)$$

Em que I_0 é Intensidade inicial, μ o coeficiente de atenuação total e x a espessura do material. É importante ressaltar que o coeficiente de atenuação total varia de acordo com o elemento empregado como absorvedor, e trata-se da soma dos coeficientes parciais para cada um dos mecanismos de interação da radiação com a matéria, ou seja:

$$\mu = \sigma + \tau + \kappa. \quad (3.13)$$

Em que σ é coeficiente de atenuação linear do efeito Compton, τ o coeficiente de atenuação linear do efeito fotoelétrico e κ o coeficiente de atenuação da produção de pares. Além do linear, temos o coeficiente mássico de atenuação. Basta dividir (3.13) pela densidade ρ do absorvedor.

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\sigma}{\rho} + \frac{\tau}{\rho} + \frac{\kappa}{\rho}. \quad (3.14)$$

Para o efeito fotoelétrico, temos que o coeficiente mássico é inversamente proporcional a energia do feixe incidente, e diretamente ao número atômico Z do absorvedor, ou seja, para a interação fotoelétrica há uma dependência significativa do número atômico Z do material e energia. Para o efeito Compton, o seu coeficiente de massa é independente de Z , e depende apenas da quantidade de elétrons por grama do material. Quanto a formação de pares, seu coeficiente mássico também está relacionado com número atômico Z (KHAN, 2003).

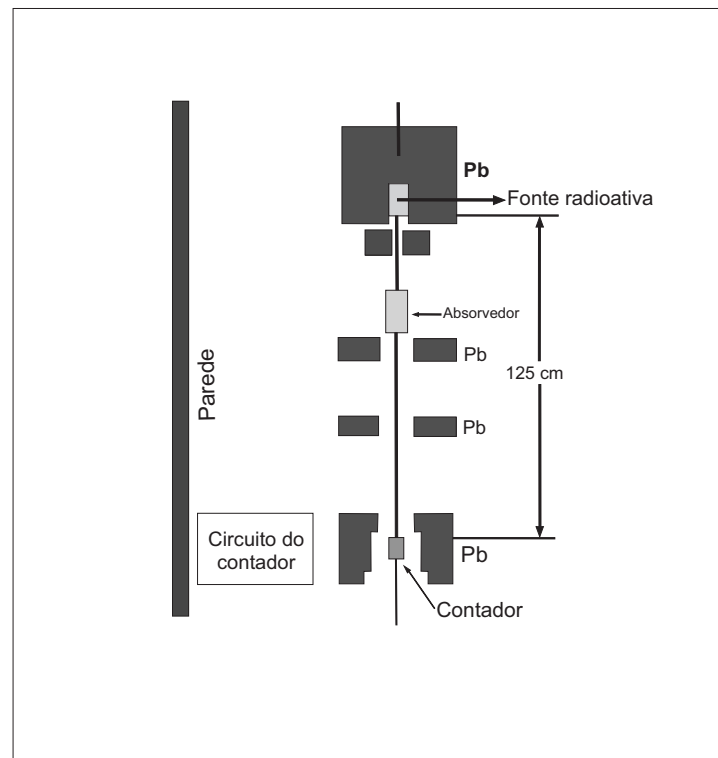


Figura 3.5: Esquema do experimento realizado por Davisson e Evans. Figura elaborada pelo autor.

Alguns valores de μ foram obtidos experimentalmente por Davisson e Evans (KAPLAN, 1963). A Figura 3.5 ilustra o aparato utilizado pelos cientistas para a obtenção dos coeficientes de atenuação total.

Segundo Kaplan (1963), a intensidade I da radiação γ também pode ser representada

como:

$$I = Bh\nu. \quad (3.15)$$

B é o número de fótons que atravessam uma área por unidade de tempo. Pode-se dizer então que B é o fluxo de fótons. A equação (3.12) pode ser escrita como:

$$B(x) = B_0 e^{-\mu x}. \quad (3.16)$$

As equações anteriores descrevem a absorção de raios γ e raios X por um determinado material. O fator $e^{-\mu x}$ é referente a fração de fótons que não interage com o absorvedor de espessura x . No nosso cotidiano, diariamente a atmosfera atenua a radiação de origem cósmica, nos protegendo de doses elevadas dessa radiação. É necessário também definir em que condições as equações (3.12), (3.15) e (3.16) são válidas. Essas condições são (KAPLAN, 1963, p. 368):

- Os raios γ devem ser monoenergéticos, e o feixe homogêneo;
- O feixe deve está colimado e ser estreito;
- O absorvedor deve ser fino.

Para feixes largos, os resultados teóricos (para feixes estreitos) e experimentais (para feixes largos) podem ser relacionados através de um fator de espalhamento conhecido como "*build up*". Logo, para feixes largos, a atenuação é dada por:

$$I(x) = UI_0 e^{-\mu x}. \quad (3.17)$$

O fator U é complicado para se obter. Ele é em função da energia incidente, da espessura e do material absorvedor, como também da área do campo de irradiação (SCAFF, 1997, p. 37). Como aproximação, para campos grandes, o fator U pode ser dado por:

$$U \cong 1 + \mu x. \quad (3.18)$$

3.2.3 Dosimetria

A dosimetria é o processo pelo qual pode se conhecer as características do feixe, possibilitando assim o seu uso adequado. É imprescindível na radioterapia, pois nessa área é necessário conhecer o feixe antes de sua aplicação nos pacientes. O objetivo principal da dosimetria é a determinação da taxa de exposição e taxa de dose da radiação em um ponto específico de um meio, seja orgânico ou não. No geral, as dificuldades encontradas para realizar medidas da radiação eletromagnética são decorrentes das suas propriedades e características. Além disso, elas podem interagir com os equipamentos de medidas, alterando de vez as suas propriedades (TAUHATA, 2014).

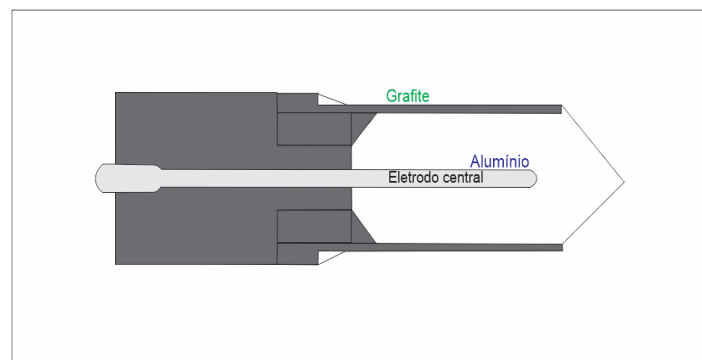


Figura 3.6: Câmara de ionização estilo dedal. Figura elaborada pelo autor.

A solução encontrada para tentar medir a dose de radiação consiste em avaliar as consequências da interação da radiação com um material, analisando algum efeito. Por exemplo, íons produzidos pela passagem de radiação em um gás etc. A dosimetria mais comum é feita com a câmara de ionização. Na câmara de ionização do tipo dedal, ilustrada pela Figura 3.6, o feixe de radiação provoca ionizações no ar contido dentro da câmara, sendo que as cargas elétricas geradas são coletadas. A carga elétrica total será medida por um eletrômetro acoplado à câmara. A medida da radiação não varia apenas com a espessura da parede da câmara ou do material em que a mesma é constituída, também dependerá de outros

fatores como por exemplo temperatura e pressão no interior da mesma, sendo assim a leitura do eletrômetro é corrigida pelo "fator de temperatura e pressão". A câmara de ionização deve ser calibrada a cada dois anos, para assim obter fidelidade nas medidas realizadas. O conjunto câmara e eletrômetro é conhecido por dosímetro (SCAFF, 1997, p. 75).

3.2.3.1 Grandezas dosimétricas

Para compreender os efeitos da radiação é necessário definir grandezas físicas para quantificá-las. Para isso, foi criada a grandeza dose absorvida, representada pela letra D , com o intuito de medir a energia depositada por um feixe de fótons de alta energia em um tecido biológico. Almeida (1981, p. 263) afirma que "a radiação quando interage com o material do tecido humano deixa parte de sua energia, devido às várias interações possíveis". Sendo assim, a dose absorvida pode ser definida por:

$$D = \frac{dE_{ab}}{dm}. \quad (3.19)$$

Em que dE_{ab} é a energia média depositada pela radiação em um volume de massa dm . Foi introduzida na década de 50 para ser utilizada em radioterapia no combate de neoplasias malignas. Sendo a sua unidade original é o rad, abreviação de *radiation absorbed dose*, mas atualmente é utilizando o gray (Gy). A relação entre gray e rad é definida logo abaixo (YOSHIMURA, 2010):

$$1Gy = 100rad = 1 \frac{J}{Kg}.$$

Outra grandeza importante é a exposição, representada pela letra X , no qual foi a primeira relacionada com a radiação. Essa grandeza possibilita ter uma medida da capacidade de fótons ionizarem o ar. Segundo Yoshimura (2010) ela caracteriza um feixe de radiação eletromagnética medindo a quantidade de carga elétrica de mesmo sinal produzida no ar,

por unidade de massa do ar. Essas medições, tanto da carga quanto da massa de ar contida no interior de um volume V , só é possível através de uma câmara de ionização. A unidade da exposição, no Sistema Internacional de Unidades, é C/Kg , porém existe outra unidade que também é bastante usual, chama-se röntgen (R). Matematicamente, essa grandeza é dada por:

$$X = \frac{dQ}{dm}. \quad (3.20)$$

A relação entre o röntgen e C/Kg é:

$$1R = 2,58 \times 10^{-4} C/Kg,$$

ou

$$1C/Kg = 3876R.$$

Podemos também relacionar a exposição X com a dose absorvida no ar, essa relação é dada por:

$$D_{ar} = 0,00876X. \quad (3.21)$$

Sendo que a unidade da exposição X deve ser em röntgen. Logo, a unidade de D_{ar} será dada em Gy. Este cálculo permite estimar a dose absorvida por um indivíduo em áreas superficiais, como por exemplo a pele. O Kerma tem como unidade o gray (Gy) e muitas vezes é confundido com a dose absorvida, porém o Kerma utiliza a energia que foi transferida ao meio. Matematicamente, o Kerma é dado por:

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}. \quad (3.22)$$

Note que dE_{tr} é a energia transferida ao meio. Embora as grandezas Dose absorvida e Kerma possuam unidades iguais, são diferentes na utilização da energia em suas relações. Na

Dose absorvida é utilizada apenas a energia absorvida pelo tecido representada por dE_{ab} . Já no Kerma é utilizada a energia que não foi absorvida pelo tecido, ou seja, a que foi dispersada ao meio.

3.3 Efeitos da radiação nos tecidos biológicos

Como visto em seções anteriores, a incidência de radiação provoca ionizações. Essas ionizações podem provocar quebras de moléculas, alterando de vez a estrutura molecular das mesmas. Porém, nem toda alteração da estrutura biológica será prejudicial, dependerá do tempo de exposição e da energia envolvida no processo. Sendo assim, os danos podem ser reversíveis em alguns casos. Entretanto se o tempo de exposição à radiação for elevado, isso pode afetar diretamente o processo de divisão celular e até mesmo levar as células a morte. Segundo Tauhata (2014), o estabelecimento da relação entre exposição à radiação ionizante e os efeitos biológicos produzidos no homem foi graças à observação de efeitos danosos em pessoas pioneiras na descoberta da radioatividade, como por exemplo, Madame Curie que padeceu devido a uma doença causada pela exposição elevada à radiação. E além disso, outros fatores, como por exemplo, acidentes nucleares e até mesmo as bombas atômicas que foram lançadas sobre o Japão durante a Segunda Guerra Mundial, permitiram o avanço do estudo sobre os efeitos biológicos da radiação, garantindo assim o avanço de técnicas para se proteger dos perigos causados pela mesma, como também a criação de normas trabalhistas que regulamentam a exposição de profissionais a esse tipo de periculosidade.

Possuindo diversas utilidades, o uso da radiação varia desde a indústria até em aplicações na área da saúde. Porém todo cuidado é necessário no seu manuseio, pois uma falta de atenção pode ocasionar acidentes e consequentemente danos relacionados a exposição à radiação. O corpo dos seres vivos é composto por inúmeras moléculas, que na realidade é um conjunto de átomos unidos, e podem ser pequenas e simples, exemplo de uma molécula de água, e

outras podem possuir estruturas complexas, exemplo o DNA humano. Esses átomos estão sob influência de uma força elétrica, e quando uma radiação ionizante arranca um elétron de algum átomo do corpo do ser humano pode causar desestabilização, o que acaba resultando em quebras moleculares (OKUNO, 2013).

Sendo assim, a radiação eletromagnética é capaz de comprometer diversas funcionalidades do corpo humano, alterando de vez as propriedades físico-químicas das moléculas que formam diversos tecidos. As células com maior capacidade de reprodução são as mais sensíveis a esses efeitos nocivos, por exemplo as células da pele, os gametas masculinos e femininos e a medula óssea. Na mulher gestante a radiação além de afetá-la pode também atingir o feto, causando anormalidades fetais e, dependendo da dose, morte fetal (D'IPPOLITO, 2005).

Na medula óssea a radiação pode afetar diretamente na produção de células sanguíneas, levando o indivíduo a uma leucemia induzida por causa dos efeitos nocivos provocados pela mesma. Na própria radioterapia quando não há um cuidado e atenção ao ministrar as doses de radiação para o paciente, pode ocorrer o surgimento de um segundo câncer no futuro. No geral, os efeitos podem ser classificados como teciduais e em estocásticos. Os teciduais são aqueles que resultam em morte celular, em que o órgão ou tecido perde a sua função devido a dose elevada. Geralmente são empregados na radioterapia para danificar células doentes, já que são mais sensíveis do que as células saudáveis. Já os efeitos estocásticos são os que podem ser chamados de efeitos a longo prazo, geralmente são dois: efeito hereditário e efeito cancerígeno. O primeiro atinge diretamente as células reprodutoras, o segundo atinge as células somáticas da pessoa que recebeu a radiação provocando nela um câncer. Diferentemente do efeito tecidual, o efeito estocástico não depende da dose de radiação, podendo assim ser causado tanto por doses altas quanto baixas, ou seja, é probabilístico. A probabilidade de sua ocorrência é baixa para doses baixas, e alta para doses altas (YOSHIMURA, 2010).

Capítulo 4

Tratamento de câncer por radioterapia

As radiações ionizantes são empregadas na medicina principalmente por causa de sua ação destrutiva sobre células neoplásicas que integram tumores malignos. Além disso, a função anti-inflamatória permite a empregabilidade de forma eficiente em tratamentos paliativos, que visam o alívio da dor do paciente. Entretanto o uso indevido da radiação sobre os pacientes pode afetar os órgãos sadios, acarretando assim danos maiores sobre o organismo. O princípio básico da radioterapia moderna é tratar com a maior dose efetiva a zona afetada pelo câncer, evitando atingir os tecidos sadios que estão em volta. Neste capítulo encontra-se o foco principal do trabalho, que é justamente observar os princípios físicos que estão envolvidos no tratamento de câncer por radioterapia.

4.1 Um breve panorama sobre o câncer e a origem da radioterapia

A palavra câncer vem da palavra grega *Karkínos* - que significa caranguejo - utilizada pela primeira vez por Hipócrates, serve para designar um conjunto de mais de 100 doenças, cujo a característica comum é a divisão celular desordenada, ocasionando o surgimento de um tumor (INCA, 2011). O tumor quando cresce de maneira incontrolável, invade os tecidos e

órgãos comprometendo o funcionamento dos mesmos. E embora ele cresça em determinada localização, ocasionando um câncer local, o mesmo pode espalhar-se pelo restante dos órgãos através de metástase, que ocorre quando as células cancerígenas decorrentes do tumor caem na corrente sanguínea ou no sistema linfático. Geralmente esses tipos de células são bastante agressivas e incontroláveis o que acaba ocasionando a formação de novos tumores no local em que as mesmas se encontram, caracterizando o tumor como secundário ou tumor metastático.

Localização Primária	Casos	%	Homens	Mulheres	Localização Primária	Casos	%
Próstata	61.200	28,6%			Mama feminina	57.960	28,1%
Traqueia, Brônquio e Pulmão	17.330	8,1%			Cólon e Reto	17.620	8,6%
Cólon e Reto	16.660	7,8%			Colo do útero	16.340	7,9%
Estômago	12.920	6,0%			Traqueia, Brônquio e Pulmão	10.890	5,3%
Cavidade Oral	11.140	5,2%			Estômago	7.600	3,7%
Esôfago	7.950	3,7%			Corpo do útero	6.950	3,4%
Bexiga	7.200	3,4%			Ovário	6.150	3,0%
Laringe	6.360	3,0%			Glândula Tireoide	5.870	2,9%
Leucemias	5.540	2,6%			Linfoma não Hodgkin	5.030	2,4%
Sistema Nervoso Central	5.440	2,5%			Sistema Nervoso Central	4.830	2,3%

Figura 4.1: Distribuição proporcional dos dez tipos de câncer mais incidentes estimados para 2016 por sexo, exceto pele não melanoma. Figura retirada de INCA (2015).

A neoplasia maligna é responsável por mais de 12% de óbitos no mundo, e a nível de Brasil estima-se a ocorrência de cerca de 600 mil novos casos para o biênio 2016-2017. A Figura 4.1 mostra a estimativa de cânceres mais prevalentes na sociedade brasileira no ano de 2016, e para 2017, segundo o INCA, os cânceres mais prevalentes continuarão sendo o câncer de mama para as mulheres e de próstata para os homens. Este perfil se assemelha bastante com a previsão epidemiológica estimada para a América Latina e Caribe (INCA, 2015).

Presente desde os primórdios de sociedades antigas, o câncer sempre foi temido por diversos povos. Os egípcios, os persas e os indianos já tinham conhecimentos básicos sobre a doença, e os gregos já se referiam a ela como sendo um tumor, que embora extirpado do corpo, reaparecia causando dor e morte. Imhotep, um assistente direto e médico do faraó Djozer, descreveu em

seus pergaminhos sobre o câncer de mama como sendo "uma massa saliente no peito, fria, dura, densa como uma fruta e espalhando-se insidiosamente debaixo da pele" (MUKHERJEE, 2012, p. 56). O câncer, mesmo sendo uma doença desconhecida, deixou as suas impressões digitais na época. Os gregos hipocráticos viam o câncer como uma desordem nos fluxos corpóreos, e esse pensamento pendurou até a Idade Média com a medicina galênica, e com a descoberta do sistema linfático no século XV, a doença passa a ser atribuída ao desequilíbrio de linfa nos organismos reforçando a ideia do desequilíbrio dos fluidos corpóreos. Sendo assim, a doença passa ter um tratamento homeopático com a utilização de sanguessugas, realização de sangrias no indivíduo visando a recuperação total do doente já que a mesma era considerada um problema orgânico mais geral, afetando o indivíduo como um todo. Assim os tumores cancerígenos representavam a manifestação visível da desordem orgânica, e as terapias visavam buscar o equilíbrio do doente.

Somente no século XVIII, o câncer passou a ser visto como uma doença que afeta determinado órgão, e isso foi graças ao avanço da anatomia e também dos estudos das células. E esses avanços permitiram ver a doença como uma patologia local, relacionado com as mais diminutas estruturas. No século XIX, as hipóteses de Virchow sobre o crescimento humano sugeriram a relação da patologia com as células. Segundo ele, as células se originam de outras células - *omnis cellula e cellula*, nas palavras dele - e poderia ser de duas formas: através do aumento de tamanho das células sem alterar a quantidade (hipertrofia), e através do aumento da quantidade causando assim o crescimento de algum tecido ou órgão (hiperplasia). Quando Virchow se deparou com o câncer observando pelo microscópio, ele viu que as células se dividiam de maneira descontrolada. Ele concluiu que aquilo não era um crescimento comum, e esse fenômeno patológico ficou conhecido como neoplasia. Crescimento novo, inexplicável e distorcido, hoje a palavra neoplasia é sinônimo de câncer (MUKHERJEE, 2012). Posteriormente, Wilhelm Waldeyer confirmou que a neoplasia se desenvolve de células cancerosas, e que as mesmas eram decorrentes de células saudáveis. Além disso, afirmou que o

processo de metástase ocorria quando as células doentes caíam na circulação sanguínea ou linfática, originando assim os tumores secundários.

Apesar dos avanços sobre o conhecimento da doença, um tratamento eficaz contra a patologia era inexistente restando para doente apenas dor, sofrimento e morte. O câncer também causava execração social do indivíduo doente. Muitos temiam o contágio, pois o conhecimento sobre o câncer era insuficiente para o público em geral. A única área que houve um crescimento significativo na época foi o de assistência aos desamparados, surgindo na Europa vários hospitais e instituições que demonstraram interesse de cuidar dos doentes. Na Inglaterra, por exemplo, foi fundado o *Cancer Charity of the Middlesex Hospital* com o objetivo de prestar caridade aos doentes. Na França, a Associação de Senhoras do Calvário matinha um asilo destinado às mulheres vítima de câncer (TEIXEIRA, 2007).

Em meados do século XIX novas técnicas cirúrgicas surgiram. As primeiras cirurgias oncológicas datam da década de 1840, quando a utilização de anestesia possibilitou a realização de procedimentos cirúrgicos mais invasivos. E com o desenvolvimento da assepsia e anti-sepsia por Joseph Lister na década de 1860, e a aceitação das ideias de Pasteur sobre as infecções microbianas, as cirurgias passam a ser mais efetivas e com um grau de aceitação maior no meio medicinal da época. Com o advento da assepsia, o mundo cirúrgico foi totalmente revolucionado, pois isso possibilitou a realização de procedimentos cirúrgicos seguros levando em consideração o pós-operatório do paciente. Vale ressaltar que grande parte dos doentes que foram submetidos a cirurgia, faleciam devido a infecções e complicações no pós-operatório. A primeira cirurgia oncológica de mama documentada e que obteve sucesso foi uma mastectomia radical realizada por Willian Stewart Halsted no Hospital Johns Hopkins, em Nova York no ano de 1890, consagrando o mesmo como pai da cirurgia moderna (TEIXEIRA, 2007).

Entretanto, a medicina não conseguia combater o câncer sozinha. Apesar dos aperfeiçoamentos cirúrgicos obtidos, ela teve que se aliar a química e a física no combate

de neoplasias malignas. O primeiro passo foi a descoberta dos raios X por Röntgen em 1895. Antes disso, Lenard já havia produzido e observado os raios catódicos e raios X, porém Röntgen fez duas coisas que o diferenciou de Lenard, que foram: escurecer a sala e cobrir o tubo de Crooke com uma caixa de papelão. Depois de excitar o tubo, Röntgen posicionou a sua mão entre ele e os cristais de platino-cianeto de bário, quando os cristais começaram a brilhar, ele viu a sombra do contorno dos ossos de sua mão (LEDERMAN, 1981).

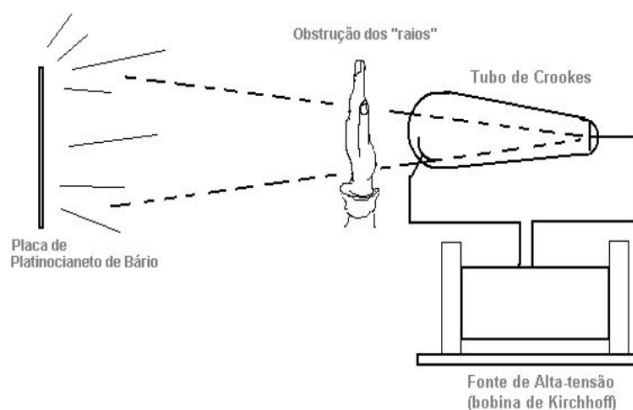


Figura 4.2: A descoberta dos raios X. Figura retirada de <goo.gl/ktfFtN>.

A Figura 4.2 ilustra a esquematização do experimento realizado por Roëntgen na descoberta dos raios X. No ano seguinte, médicos interessados por sua potencialidade diagnóstica, começaram a testar os raios X no combate de doenças. A princípio, os raios X foram bastante utilizados para tumores superficiais, como por exemplo, o câncer de pele, entretanto ninguém tinha compreensão biológica sobre sua forma de ação nos organismos (TEIXEIRA, 2007).

O radiologista Jean Bergonié e o histologista Louis Tribondeau demonstraram que as células cancerígenas são mais sensíveis do que as sadias, dando uma fundamentação biológica para a radioterapia e possibilitando o uso dos raios X no combate de diversos tipos de tumores. Essa propriedade não passou despercebida aos olhos do estudante de medicina Emil Grubbe que teve a ideia de tratar um câncer de mama com raios X. Grubbe expôs uma senhora

conhecida como Rose Lee por 18 dias consecutivos ao tratamento improvisado utilizando radiação. O tratamento era doloroso, porém de certa forma obteve resultado. O tumor de mama de Lee contraiu-se e diminuiu de tamanho, produzindo assim a primeira reação local documentada da terapia com raios X. Como o câncer de Lee era metastático, ela veio a falecer, porém isso forneceu uma conclusão importante para Grubbe: a radiação só serviria para tratar o câncer localmente, assim como a cirurgia (MUKHERJEE, 2012).

A nova tecnologia apesar de ser inovadora mostrava-se perigosa, causando queimaduras nos pacientes e até mesmo um câncer induzido devido à altas doses de radiação. Os raios X passaram a ser vistos como uma possibilidade a mais no tratamento de doenças (TEIXEIRA, 2007). Porém era necessário mensurar para aplicar, e diante dessa necessidade, os conhecimentos dosimétricos mostraram-se mais que importantes no desenvolvimento da radiologia e da radioterapia, pois vidas dependiam diretamente deles.

Com a descoberta do elemento rádio pelo casal Curie, o mundo radioterápico ganha um novo aliado. Os médicos já podiam bombardear o tumor com energias mil vezes mais poderosas do que a energia proveniente dos raios X. O rádio, assim como os raios X, produz um efeito cauterizante sobre a pele, sendo descoberto acidentalmente por Becquerel. O cientista levou consigo uma amostra de rádio guardada em seu paletó, e após um certo prazo, o mesmo percebeu que havia uma úlcera de difícil cicatrização à altura do bolso em que se encontrava o rádio. Após consultar os médicos, Becquerel viu que a ferida causada pelo elemento radioativo era similar as que eram causadas pelos raios X. Ao mesmo tempo que a comunidade científica observava semelhanças entre o rádio e os raios X, a hipótese que os danos celulares provenientes dos raios X eram de origem elétrica saía de cena, pois observando os efeitos sobre a pele de Becquerel, constatou-se que os danos eram de natureza radioativa (TEIXEIRA, 2007).

As constatações da origem dos danos levaram a conclusão de que a radiação γ emitida pelo rádio e os raios X, além de transportar energia radiante, depositavam a mesma dentro dos

tecidos. As mãos de Marie Curie, quando a mesma buscava por minério de urânio, ficaram irritadas e começaram a descascar em camadas enegrecidas. Foi como se a radiação causasse efeitos de dentro do tecido para fora. Além disso, a radiação penetrou a medula óssea da cientista, tornando-a anêmica para o resto da vida. Pela quantidade de tecidos afetados, como por exemplo pele, unha, sangue e etc, os biólogos já tinham uma noção que a radiação atacava diretamente no DNA. Duas características marcantes do DNA são que o mesmo é resistente a reações químicas e imutável, entretanto a radiação pode alterar o DNA. Os raios X e γ podem destruir hélices de DNA, ou então gerar substâncias tóxicas que o corroem. As células do corpo humano respondem esse estrago morrendo, ou então parando de efetuar o seu processo de divisão celular. Logo, a radiação eletromagnética causa danos maiores e mata células que possuem rápida reprodução no corpo humano. Como a característica comum das neoplasias malignas é a rápida divisão celular incontrolada, a radiação eletromagnética demonstra-se eficaz no combate destes tipos de patologias (MUKHERJEE, 2012).

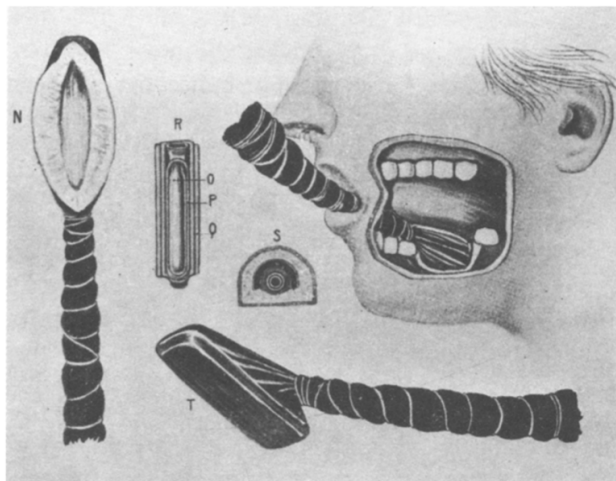


Figura 4.3: Rádio aplicador. Figura retirada de LEDERMAN (1981).

O primeiro uso da nova radiação foi realizado por um dermatologista para o tratamento do Lúpus cutâneo. No caso de câncer, especialmente de tumores internos, área em que os raios X falharam (na época), os médicos logo tentaram suprir essa deficiência através de aparatos

que teriam como objetivo a aplicação direta da radiação no tumor (LEDERMAN, 1981). A Figura 4.3 ilustra um aparato utilizado para o tratamento de neoplasias na boca e língua, neste aparato o sal de rádio era colocado no aplicador, e o mesmo era posicionado dentro da boca do paciente.

Madame Curie, que ganhou destaque na radioatividade, levantava a bandeira do combate ao câncer com a fundação do Instituto Curie em Paris, que inicialmente chamou-se de Instituto Radium. Projetado para ser o laboratório de Madame Curie, o Instituto Radium nasceu de uma parceria entre a Universidade de Paris e o Instituto Pasteur cujo o objetivo inicial era estudar a radioatividade e suas aplicações tanto na Física, Química e Biologia através de pesquisas. Após a I Guerra Mundial, o Instituto Radium foi reconhecido pelo governo como sendo uma instituição de caridade e passou a ser chamado de Fundação Curie. Em 1922, passa a atender o público empregando a radiação aliada a cirurgia para o combate de neoplasias malignas, passando a ser referência mundial de combate ao câncer. Hoje, a antiga Fundação Curie chama-se Instituto Curie, e continua sendo uma referência mundial unindo ensino, pesquisa e, ao mesmo tempo, tratamento contra o câncer.

No Brasil, a preocupação da classe médica mineira com número elevado de mortes causadas pela doença, levou a iniciativa privada na década de 20 a fundar o Instituto do Radium em Belo Horizonte para estudar o rádio e os raios X, além de ser um importante centro de combate ao câncer no país oferecendo a população o tratamento com rádio e raios X (BRASIL, 2006).

A radioterapia, em um panorama geral, está presente no mundo desde o século XIX com o tratamento de patologias. Na medida que o mundo científico pesquisava e buscava possuir conhecimento sobre as radiações ionizantes, as mesmas já eram empregadas no combate de neoplasias malignas. A ótima respostas dos tumores quando submetidos a radiação gerou uma onda de otimismo em relação ao uso da mesma. Porém quando ocorria recorrências da doença e os próprios efeitos colaterais causados pela radiação, trazia novamente o medo e

pessimismo. Além de utilizarem os raios X, era comum também o uso de agulhas, tubos e moldes radioativos de rádio-226 para o tratamento. Somente na década de 20 que chegaram as bombas de rádio. A partir disso, surgiram outros tipos de equipamentos, como por exemplo, as máquinas de cobalto-60, e também outras fontes radioativas foram empregadas, como o cézio-137, ouro-198, irídio-192 entre outras. Atualmente existe diversos aparelhos que são utilizados no tratamento de câncer, destacando-se os aceleradores lineares cujo o sistema moderno permite o cálculo exato, através de computadores, da dose a ser utilizada no tumor (INCA, 2008).

4.2 Conceitos importantes em Oncologia

Por definição etimológica, a palavra Oncologia vem do grego "*onkos*" que significa massa, tumor e o sufixo "logia" significa estudo. Oncologia é a área da medicina que estuda os tumores malignos, incluindo formas de tratamentos e o seu desenvolvimento⁶.

4.2.1 Oncogênese

O termo oncogênese refere-se a um mecanismo genético cujo células sadias torna-se cancerígenas. Geralmente, as células sadias são submetidas a diversos fatores externos que causam mutações em seu DNA, por exemplo a alta exposição à radiação ultravioleta, vírus, uso abusivo de cigarros e bebidas alcoólicas, uma dieta rica em substâncias cancerígenas etc. Além disso, pode haver também uma predisposição genética. Logo, os fatores externos carcinogênicos podem ser divididos em três grupos:

- Fatores biológicos;
- Fatores físicos;

⁶ Conceito retirado de <<http://www.oncoguia.org.br/conteudo/o-que-e-oncologia/82/1/>>.

- Fatores químicos.

Além disso, o câncer não é provocado apenas por um fator. Na maioria das vezes é necessário a junção de diversos fatores, levando em consideração o tempo de exposição em cada um. Por exemplo, um indivíduo que passa um período longo expondo-se a radiação ultravioleta sem a proteção necessária nos períodos de pico, entre 10:00 às 16:00, tem a maior probabilidade de ser acometido por um câncer de pele, e essa probabilidade é maior ainda se o indivíduo for branco.

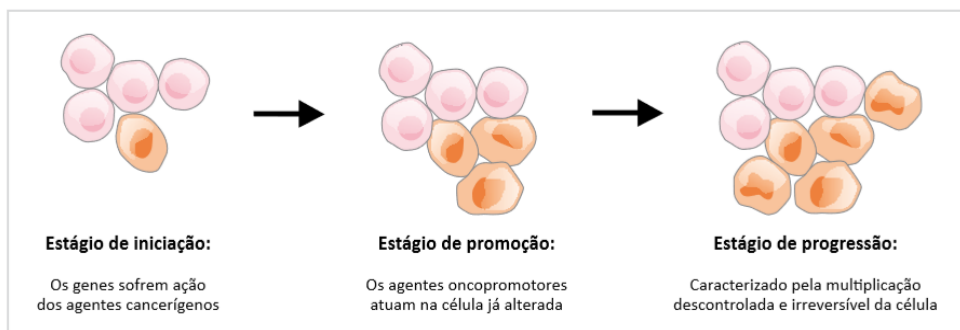


Figura 4.4: Processo de Oncogênese. Figura retirada de INCA (2011)

Em geral, o processo de formação de um câncer pode demorar anos. Sendo que o mesmo será desencadeado com o acúmulo de exposição aos agentes mencionados anteriormente. Os efeitos cumulativos dos fatores carcinogênicos são responsáveis pela iniciação, promoção e progressão do tumor, essas etapas estão ilustradas na Figura 4.4. A fase de iniciação é a etapa em que a célula sadia é exposta a agentes cancerígenos, nessa etapa a célula já é geneticamente alterada, entretanto não é possível detectar a presença de tumor. Se a célula iniciada continuar sendo exposta à esses agentes, classificados em agentes oncopromotores, a célula avança para a segunda etapa que é a promoção. Na promoção, os agentes oncopromotores são responsáveis por tornar a célula iniciada maligna. O último estágio é a progressão caracterizado pela multiplicação descontrolada das células. Nessa fase, a multiplicação das células é irreversível se estendendo até as manifestações clínicas da doença.

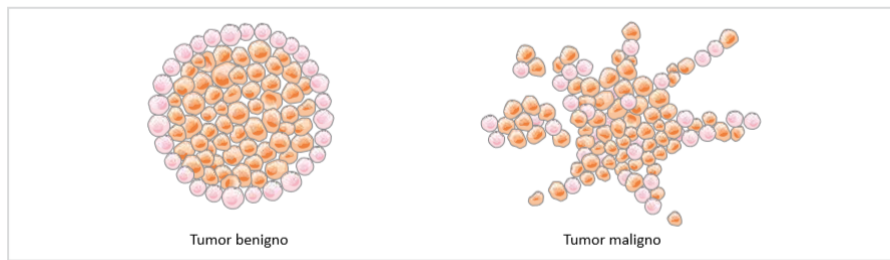


Figura 4.5: Diferença entre tumores. Figura retirada de INCA (2011)

Quanto a classificação de neoplasias, o tumor pode ser benigno ou maligno. A Figura 4.5 ilustra a diferença entre as neoplasias. Os tumores benignos têm crescimento ordenado, lento e no geral possuem um formato de expansão bem definidos. Apesar de não invadirem tecidos vizinhos, o tumor benigno pode comprimir órgãos próximos a ele. Já os malignos possuem crescimento desordenado, sofrem metástases e são capazes de comprometer a vida do hospedeiro.

4.2.2 Metástase

O processo de disseminação de células cancerígenas para o resto do organismo chama-se metástase. Pode ser definida também como o comprometimento a distância por uma parte de um tumor que não guarda relação direta com o foco primário (INCA, 2008). O foco primário é o local em que o câncer surgiu primeiro, no estágio inicial é chamado de câncer local, ou câncer *in situ*, pois as células doentes encontram-se somente no tecido em que inicialmente se desenvolveram. Se o câncer for diagnosticado nesse estágio, as chances de cura são maiores. Essa classificação não é empregada para câncer do sistema sanguíneo. Com o passar do tempo a neoplasia avança, tornando-se um câncer invasivo ou metastático.

A Figura 4.6 ilustra o processo de metástase, em que as células doentes alcançam a corrente sanguínea ou linfática, disseminando assim as células doentes para outras localidades do organismo. A capacidade invasiva das neoplasias malignas é a principal causa da dificuldade

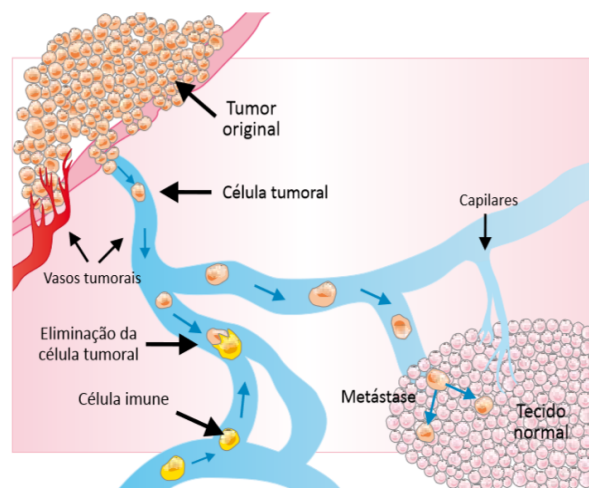


Figura 4.6: Metástase. Figura Retirada de INCA (2011).

cirúrgica da erradicação da doença. Às vezes o paciente é submetido a cirurgia, radioterapia e quimioterapia e mesmo assim o câncer retorna, na maioria das vezes sob forma de metástases. Tumores metastáticos são eliminados por cirurgia, e através de medicamentos quimioterápicos. A quimioterapia preza pela eliminação de células doentes no organismo como todo, ou seja, é um tratamento sistêmico que visa combater o foco primário e as possíveis metástases. Já o papel da radioterapia em tumores metastáticos é paliativo, sendo que a mesma possui mais eficiência em tumores *in situ*. Metástase é a principal causa por mortes em pacientes com câncer (BRONCHUD, 2000).

4.3 Tratamento de câncer por radioterapia

4.3.1 Princípios básicos

A radioterapia é o emprego da radiação ionizante no tratamento de neoplasias malignas. No processo de interação com a matéria, a radiação deposita energia no meio. No caso do tratamento do câncer, a radiação deposita energia diretamente no tumor, com o intuito de destruir o mesmo. A interação da radiação com o tumor depende diretamente da energia

do feixe empregado durante o tratamento. Para baixas energias, há predominância do efeito fotoelétrico, entretanto o mesmo depende do número atômico Z do material, como visto anteriormente, para ocorrer e os elétrons devem está fortemente ligados. Em um tecido cujo o valor energético da camada K seja igual a 0,5 KeV, um fóton incidente com 100 KeV irá interagir através do efeito fotoelétrico. A energia do elétron ejetado será de 99,5 e a radiação característica será de 0,5 KeV que novamente será absorvida. Conclui-se então que o efeito fotoelétrico emitirá dois fotoelétrons, um com 99 KeV e outro de 0,5 KeV, logo a radiação incidente no tecido será completamente absorvida (SCAFF, 1997).

Tabela 4.1: Densidade eletrônica de alguns materiais. Retirada de SCAFF (1997).

Material	Elétrons/grama
Gordura	$3,48 \times 10^{23}$
Músculo	$3,44 \times 10^{23}$
Água	$3,35 \times 10^{23}$
Osso	$3,01 \times 10^{23}$
Tecido mole	$3,36 \times 10^{23}$

Se o fóton possuir energia superior a 1 MeV, a probabilidade da ocorrência do efeito fotoelétrico diminui drasticamente. Para energias acima disso, há predominância do efeito Compton. Ao contrário do efeito fotoelétrico, o efeito Compton não depende do número atômico Z da matéria, apenas da concentração de elétrons por grama do material, ou seja, da densidade eletrônica do meio. Na tabela 4.1 temos a densidade de elétrons para diversas partes do corpo humano sendo que a concentração é maior para áreas gordurosas, como por exemplo, o tecido adiposo, e menor para áreas do tecido ósseo. Para energias acima de 5 MeV, ocorrerá a formação de pares, este processo de interação é dependente do número atômico Z do átomo, pois para que haja a produção de elétron-pósitron é necessário a interação do feixe com o campo elétrico gerado pelo núcleo atômico. As duas partículas geradas transferem energia cinética para o meio material, sendo que o pósitron volta a se combinar com um elétron do meio dando origem a 2 fótons, cada um com energia de 511 keV (TAUHATA, 2014).

O fato das radiações eletromagnéticas serem bastante penetrantes, e induzirem diversos efeitos destrutivos em células orgânicas, elas podem ser utilizadas no tratamento do câncer. Assim, tumores profundos e superficiais podem regredir, e até mesmo serem extintos, por meio da aplicação de doses de radiação, que devem ser aplicadas adequadamente.

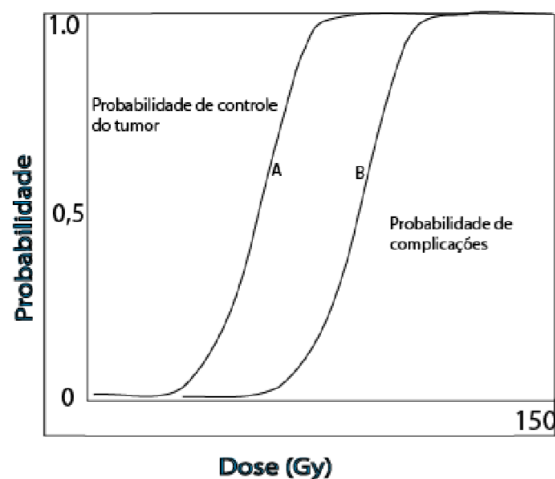


Figura 4.7: A curva A representa a probabilidade de controlar o tumor, e a B representa a chance de complicações. Figura retirada de MARTINS (2012).

É necessário levar em consideração a radiosensibilidade e radiocurabilidade. Radiossensibilidade é a resposta das células quando são irradiadas com radiação. Quanto mais rápida é a capacidade de multiplicação das células, mais radiosensíveis são. Conceito esse indispensável na radioterapia, pois as células cancerígenas são mais sensíveis do que as sadias devido ao seu alto grau de proliferação. Radiocurabilidade é a possibilidade de controlar o tumor na administração de doses, entretanto ela depende de vários fatores como a sensibilidade do tumor, do seu volume e do estado do paciente. A localização do tumor também influencia, pois se o mesmo estiver em locais vitais de baixa tolerância a radiação, doses tumoricidas não poderão ser administradas (OLIVEIRA, 2009). A Figura 4.7 é um gráfico composto por duas curvas. Uma representa a probabilidade em função da dose de controlar o tumor, e a outra a probabilidade em função da dose de obter complicações. Logo

a curva de dose ideal na radioterapia seria entre essas duas curvas para controlar a neoplasia sem extrapolar a dose limite, evitando assim possíveis complicações.

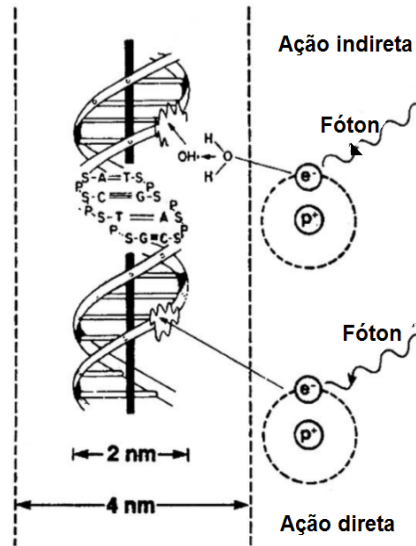
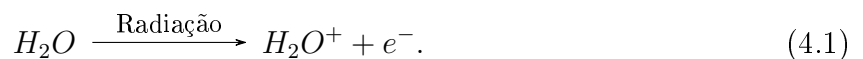


Figura 4.8: Representação dos danos no DNA através das ações direta e indireta da radiação. Figura retirada de PODGORSK (2011).

Após a absorção da radiação pelo tecido, por algum processo de interação, ocorrerá no organismo os efeitos biológicos decorrentes dessa dose aplicada. A ação da radiação pode ser de dois tipos (YOSHIMURA, 2010): Pode ser através da ação direta pelo fato da interação da radiação ocorrer diretamente em moléculas importantes como o DNA; ou ação indireta, que refere-se quando a radiação interage com as moléculas de água produzindo assim radicais livres altamente reativos. Esses mecanismos de ações da radiação estão ilustrados na Figura 4.8.

A ionização de uma molécula de água, decorrente do mecanismo indireto, produz um elétron livre e um íon carregado positivamente (MARTIN, 2006):



O elétron livre irá interagir com outra molécula de água, produzindo assim um íon negativo:



Ambos os íons são instáveis, e podem dissociar-se para formar radicais livres. Sendo assim, para as equações (4.1) e (4.2), temos respectivamente:



Os radicais livres são muito ativos quimicamente, podendo interagir com outras moléculas do organismo, afim de produzirem radicais livres orgânicos. Logo:



A molécula RH representa uma estrutura orgânica qualquer. Os radicais livres gerados nas equações (4.5) e (4.6) poderão induzir alterações químicas em estruturas biológicas críticas, como por exemplo cromossomos. Se a área irradiada for rica em oxigênio, outro conjunto de reações podem acontecer:



O oxigênio é um agente modificador da dose, pois o sistema biológico é mais sensível a radiação na presença dele do que em sua ausência. Alguns tumores, devido a multiplicação desordenada das células, têm áreas pobres em oxigênio. As áreas que são ricas ficam muito próximas a vasos capilares, o que acaba potencializando o efeito da radiação. A ocorrência

do efeito oxigênio, descrito anteriormente, é uma das causas principais do fracionamento da dose na radioterapia (INCA, 2008).

As células cancerígenas periféricas, que inicialmente são oxigenadas, morrem, e no intervalo entre uma dose e outra do tratamento, permite que o oxigênio utilizado por células que já morreram seja desviado para células que possuam baixa concentração de oxigênio, potencializando assim os danos causados pelos radicais livres. Logo, a cada sessão de radioterapia, a área tumoral irradiada deverá ser cada mais oxigenada, devido a redistribuição do oxigênio pelo tumor que ocorre durante os intervalos das doses. Como o corpo humano é composto de mais de 70% de água, o mecanismo indireto da radiação é importante, sendo responsável por cerca de 70% dos efeitos biológicos (YOSHIMURA, 2010).

4.3.2 Lei do inverso do quadrado da distância

Um tópico importante na radioterapia é a lei do inverso do quadrado da distância. Na aplicação da radiação sobre o paciente, esta lei contribui para diminuir a intensidade do feixe, ou seja, a intensidade do feixe decresce proporcionalmente ao inverso do quadrado da distância (KHAN, 2003).

Podemos ter as seguintes relações:

$$I_a = \frac{N}{A} \quad , \quad I_b = \frac{N}{B}. \quad (4.9)$$

Em que I_a é a intensidade do feixe na distância a por unidade de área A , e I_b é intensidade do feixe na distância b por unidade de área B . As relações (4.9) indicam que a intensidade do feixe é o número de fótons N por unidade de área. Dividindo I_a por I_b , temos:

$$\frac{I_a}{I_b} = \frac{B}{A}. \quad (4.10)$$

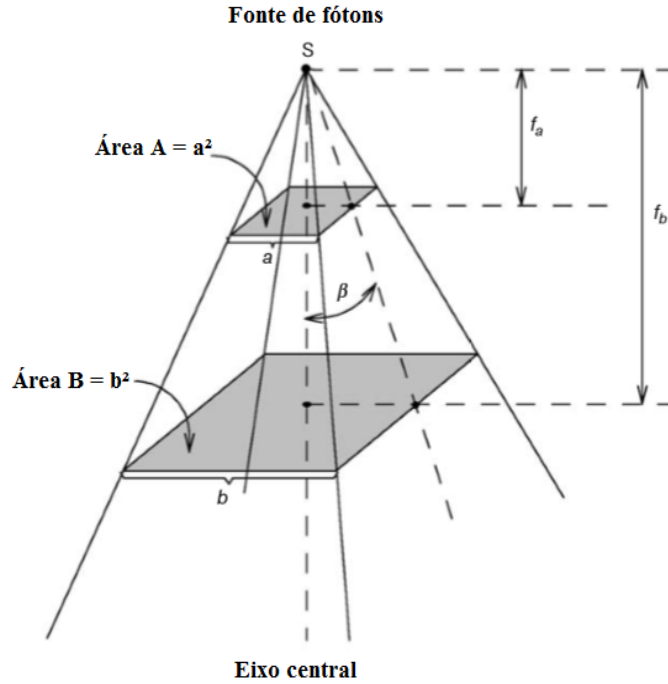


Figura 4.9: Esquematização da Lei do inverso do quadrado da distância. Figura retirada de PODGORSK (2005).

Da Figura 4.9, podemos ter:

$$\frac{f_a}{f_b} = \frac{a}{b}. \quad (4.11)$$

Elevando a expressão (4.11) ao quadrado

$$\frac{f_a^2}{f_b^2} = \frac{a^2}{b^2} = \frac{A}{B}. \quad (4.12)$$

Comparando a (4.12) com a (4.10)

$$\frac{I_a}{I_b} = \frac{f_b^2}{f_a^2}. \quad (4.13)$$

A equação (4.13) é a lei do inverso do quadrado da distância, ela só é válida para fontes pontuais. As fontes de telecobaltoterapia⁷ é um exemplo prático da utilização desta lei.

⁷Telecobaltoterapia é o tratamento radioterápico, na modalidade teleterapia, que utiliza o cobalto-60

4.3.3 Tipos de tratamento

4.3.3.1 Braquiterapia

A braquiterapia é uma modalidade de tratamento radioterapêutico, que consiste na utilização de uma fonte radioativa selada para a aplicação da radiação diretamente no tumor. Alta dose de radiação é depositada no local, isso se deve ao fato que a fonte está muito próxima do ponto de aplicação. A braquiterapia emprega diversas fontes gama e beta emissoras de meias-vidas longas para a irradiação em que a fonte é introduzida e retirada da lesão, permanecendo por intervalos de tempo adequados, ou meias-vidas curtas em implantes permanentes de fontes no paciente (YOSHIMURA, 2010). Como a dose absorvida é inversamente proporcional ao quadrado da distância da fonte emissora, a braquiterapia permite a aplicação segura de altas doses absorvidas em um curto intervalo de tempo (TRINDADE et al, 2012). A tabela abaixo mostra alguns núclídeos radioativos utilizados na braquiterapia e o tempo de meia-vida de cada um deles.

Tabela 4.2: Tempo de meia-vida de alguns radionúclídeos usados em radioterapia. Retirada e adaptada de YOSHIMURA (2010).

Radionúclídeo	$T_{1/2}$
^{60}Co	5,26 a
^{137}Cs	30 a
^{198}Au	2,7 d
^{192}Ir	73,8 d
^{125}I	60 d
^{103}Pd	17 d
^{90}Sr / ^{90}Y	28,2 a
^{106}Ru / ^{106}Rh	373 d

Há dois métodos distintos de braquiterapia relacionado a posição da fonte. Quando a fonte é colocada próxima a cavidades que dão acesso ao tumor, o método é chamado de braquiterapia intracavitária. Esse tipo de modalidade é bastante presente no tratamento de tumores ginecológicos femininos, como por exemplo o câncer do colo do útero. E o segundo

método refere-se ao tratamento em que a fonte é colocada diretamente no tecido, esse tipo de braquiterapia chama-se intersticial, bastante aplicada no tratamento de câncer de próstata. Os formatos das fontes variam, geralmente as fontes para braquiterapia intracavitária possuem a forma da cavidade em que vão ocupar. Para a intersticial é comum o uso de agulhas radioativas, mas existem também as sementes, ilustradas pela Figura 4.10, que guarda em seu interior algum material radioativo.

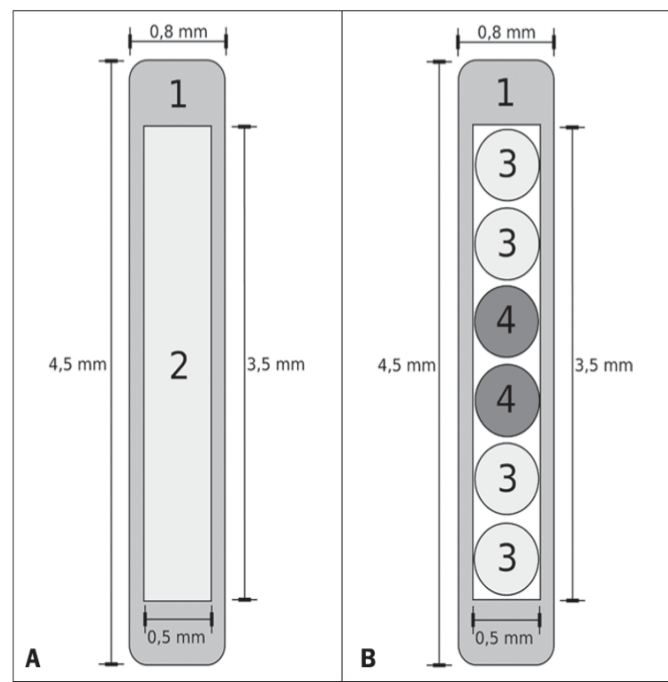


Figura 4.10: Diagrama das sementes de I-125 (A) e Pd-103 (B). Essas sementes são compostas de: 1 - cápsula de titânio; 2 - óxido de iodo; 3 - poliestireno dopado com Pd-103; 4 - marcadores metálicos para visualização das sementes por imagens de raios X. Figura retirada de TRINDADE et al (2012).

Nos primórdios, as fontes radioativas eram colocadas manualmente, o que ocasionava irradiação indevida nas pessoas que estavam envolvidas no tratamento (radioterapeuta, enfermeiros, físicos etc). Atualmente foram desenvolvidas técnicas, cujo o objetivo é evitar a irradiação nos profissionais. A técnica principal é a de pré-carregamento, ou "*after loading*", que consiste em posicionar os aplicadores dentro do paciente, sem fonte radioativa, e depois

a máquina de carregamento, previamente programada, instala os radionuclídeos na devida posição dentro dos aplicadores (ZARAGOZA, 1992).

A tabela 4.3 mostra alguns núcleos radioativos utilizados em radioterapia, especificamente na modalidade braquiterapia com as suas respectivas energias. Para implantes permanentes são empregados nuclídeos com meias-vidas curtas, como por exemplo, o ouro-198 que possui o tempo de meia-vida aproximadamente igual a 2,7 dias (veja a tabela 4.2). Por outro lado, existem núcleos que possuem meias-vidas longas, como no caso do cobalto-60 cujo tempo de meia-vida é 5,26 anos. Para esses elementos que possuem meias-vidas longas, a braquiterapia ocorre através de contatos temporários com a fonte selada (YOSHIMURA, 2010).

Tabela 4.3: Alguns radionuclídeos usados em radioterapia. Retirada e adaptada de YOSHIMURA (2010).

Radionuclídeo	Energia γ média (MeV)	Energia β máxima	Uso
^{60}Co	1,25	-	Teleterapia e braquiterapia de baixa taxa de dose
^{137}Cs	0,662	-	Braquiterapia de baixa dose
^{198}Au	0,41	0,961	Implante permanente
^{192}Ir	0,380	-	Braquiterapia de alta taxa de dose
^{125}I	0,028	-	Implante permanente
^{103}Pd	0,021	-	Implante permanente
$^{90}\text{Sr} / ^{90}\text{Y}$	-	2,27	Braquiterapia em pele e olhos
$^{106}\text{Ru} / ^{106}\text{Rh}$	0,55	3,4	Braquiterapia em pele e olhos

4.3.3.2 Teleterapia

Teleterapia é o tratamento radioterápico cujo a fonte está afastada do paciente. As distâncias mais utilizadas hoje são 80 cm para bombas de cobalto e 1 m para aceleradores lineares. Essa distância varia de acordo com o equipamento utilizado. Os equipamentos de cobalto são mais antigos, porém são muito úteis até hoje devido a simplicidade de seu funcionamento.



Figura 4.11: Cobalto de coluna e cobalto isocêntrico. Figura retirada de MARTINS (2012).

Na Figura 4.11 temos dois tipos de bombas de cobalto: os aparelhos que se movem apenas verticalmente são chamados de cobaltos de coluna, já os que podem girar em torno do paciente são os cobaltos isocêntricos.

O surgimento deste aparelho veio para superar as limitações, e tornar possível técnicas de tratamento que consagraram a teleterapia por mais de 30 anos. As fontes de cobalto-60 liberam radiação γ com energia média de 1,25 MeV. Como a fonte é radioativa, a liberação de fótons é contínua, ou seja, a fonte não para de emitir fótons. Estas fontes, quando não

utilizadas, ficam confinadas dentro de uma blindagem de chumbo ou urânio exaurido e são expostas durante o tratamento afim de irradiar o paciente com a radiação eletromagnética. O principal problema da bomba de cobalto-60 é a diminuição da intensidade da radiação devido ao tempo de meia-vida da fonte. Assim, a intensidade diminui 1,1% ao mês. Depois de 5 anos, a exposição do paciente demora o dobro de tempo em relação ao inicial para que seja recebida a mesma dose. Em decorrência disso, a fonte de cobalto deve ser trocada a cada 8 anos (BRASIL, 2000). Na Figura 4.12 temos o corte transversal do cabeçote de uma bomba de cobalto-60, no intuito de mostrar os componentes que compõem o mesmo.

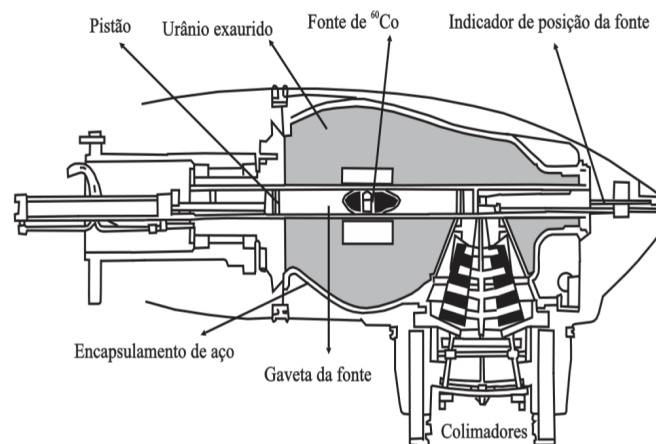


Figura 4.12: Corte de um cabeçote de uma bomba de Co-60 modelo Theratron 780 usado em radioterapia. Figura retirada de TAUHATA (2014).

Se de um lado temos a bomba de cobalto que emite radiação com energia média de 1,25 MeV, do outro temos os aceleradores de elétrons que chegam a emitir energias que variam de acordo com a necessidade, podendo ser de 1 até 25 MeV. Os aceleradores de elétrons são utilizados em diversos locais, e têm aplicações tanto nas áreas de pesquisa, indústria e em hospitais. No tratamento do câncer, os aceleradores de elétrons passam a ser chamados de aceleradores lineares, ilustrado pela Figura 4.13. O princípio de funcionamento básico destes aparelhos consiste na utilização de micro-ondas, em um processo semelhante ao *surf*, para

acelerar os elétrons em um tubo de vácuo. Após acelerados, os elétrons colidem em um alvo metálico e são desacelerados pelos átomos da chapa metálica. A diferença de energia relativa a velocidade é emitida sob forma de raios X. Dessa forma obtêm-se radiação eletromagnética tão penetrantes, que torna possível o tratamento de tumores cancerígenos profundos.



Figura 4.13: Acelerador Linear. Figura retirada de OLIVEIRA (2009).

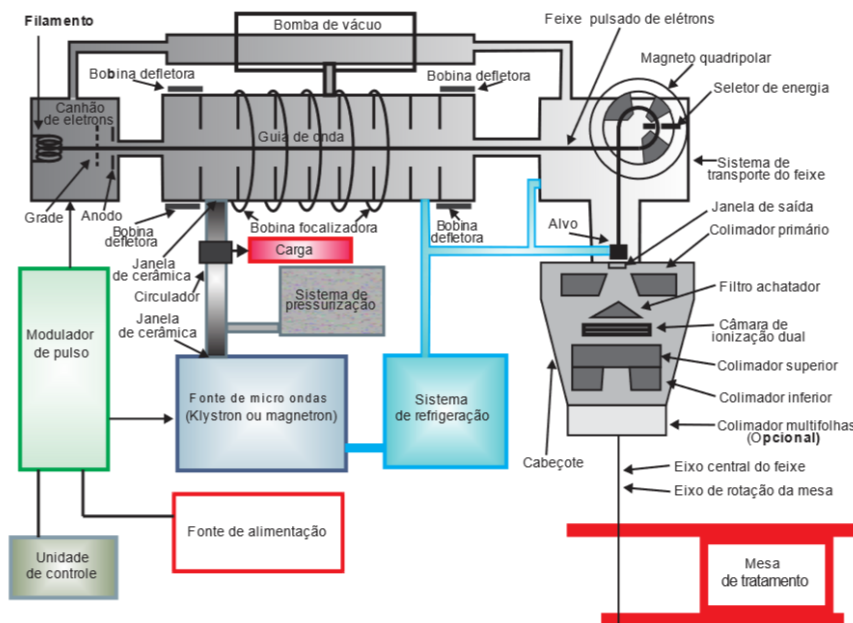


Figura 4.14: Esquema de um acelerador linear de elétrons. Figura retirada de TAUHATA (2014).

A Figura 4.14 ilustra os principais componentes de um acelerador linear, ao contrário da bomba de cobalto, esses equipamentos possuem um custo elevado, pois os mesmos exigem mais manutenção e pessoal mais habilitado para o seu funcionamento, e sem esquecer que requer um potencial elétrico mais estável.

4.3.3.2.1 Distribuição da dose

Ao iniciar o tratamento, o radioterapeuta demarca a área do paciente que será submetida à radioterapia, ilustrada pela Figura 4.15, e toda as estruturas sadias que estão próximas da área a ser tratada para prescrever a dose. Após a delimitação da área, o físico calcula qual a forma e quantos são os campos necessários para que a dose seja distribuída perfeitamente durante o tratamento (PELLIZZON, 2015). No planejamento são definidos todos os parâmetros necessários do tratamento radioterapêutico, como por exemplo, entradas de campos, energia do feixe, o equipamento a ser utilizado, o fracionamento da dose e a dose total a ser recebida pelo paciente (BRASIL, 2000).

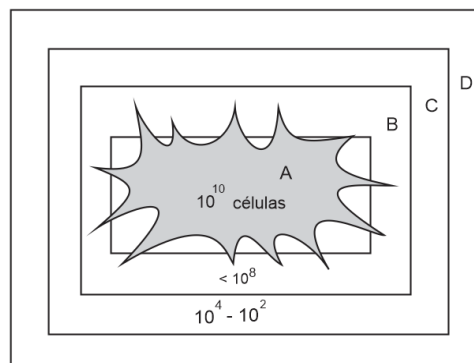


Figura 4.15: Área delimitada para o tratamento - (A) Tumor, (B) Volume tumoral, (C) Volume alvo e (D) Volume de tratamento. Figura elaborada pelo autor.

Como o feixe irá incidir sobre o paciente, a dose absorvida pelo mesmo irá variar de acordo com a profundidade. Essa variação depende de diversos parâmetros, como por exemplo a energia do feixe, tamanho do campo, distância da fonte, e até mesmo do sistema de

colimação (BRASIL, 2000). Dose refere-se a energia depositada em um determinado ponto. Profundidade é a distância abaixo da pele em que a dose deverá ser depositada.

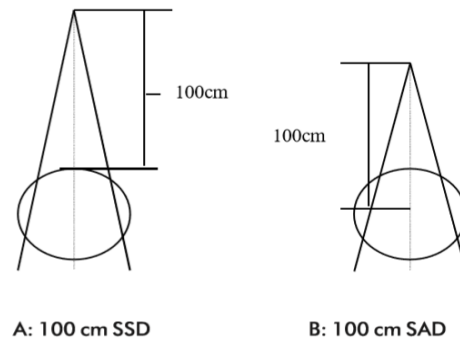


Figura 4.16: Representação gráfica de SSD e SAD. Figura retirada de BRASIL (2000).

É necessário definir também as distâncias foco-pele (SSD - *Source-Skin distance*) e foco-eixo (SAD - *Source-Axis distance*). A distância foco-pele é o comprimento entre a fonte e a pele do paciente. A distância foco-eixo é a distância entre o foco (ou fonte de raios γ) e o isocentro da máquina de tratamento. Isocentro é a interseção do eixo de rotação do gantry⁸ e o eixo de colimação da máquina utilizada no tratamento. A diferença entre essas duas distâncias pode ser observada pela Figura 4.16.

4.3.3.2.2 Porcentagem dose profunda

A grandeza porcentagem de dose profunda pode ser definida como o quociente, expresso em porcentagem, entre a dose absorvida em um ponto **d** por a dose absorvida em um ponto **dm** (KHAN, 2003). Matematicamente:

$$P = \frac{D_d}{D_m} \times 100. \quad (4.14)$$

A porcentagem de dose diminui de acordo com a profundidade. Entretanto há uma

⁸Gantry é a base de fixação com o dispositivo de movimentação do cabeçote da máquina. A movimentação pode ser isocêntrica ou translação vertical (OLIVEIRA, 2009).

região em que o crescimento da dose inicial é mais acentuado conforme a energia aumenta. Essa região, conhecida como "*build up*", permite que a dose cresça sem afetar a pele, por exemplo (MATSUSHIMA, 2015). A dose máxima não está sobre a pele do paciente, e sim em estruturas internas, isso é de suma importância na radioterapia pois permite a utilização de feixes energias elevadas para o tratamento de tumores profundos. A Figura 4.17 mostra a esquematização para medir porcentagem de dose profunda. Os dosímetros são posicionados nas posições **dm** e **d**. Geralmente são utilizados simuladores do corpo humano, como meio espalhador, pela facilidade de posicionamento dos dosímetros para a medição de grandezas (SCAFF, 1997).

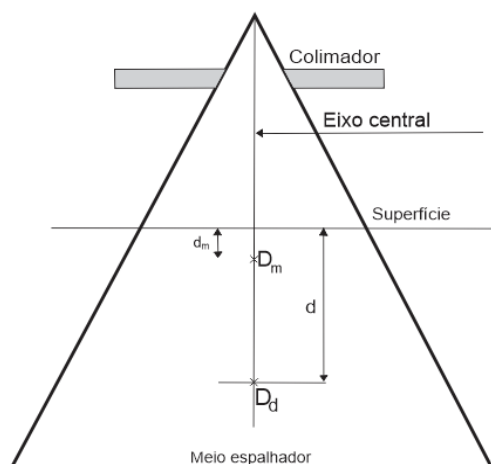


Figura 4.17: Porcentagem da dose profunda. Em que a distância d refere-se a qualquer profundidade, sendo referência para a dose profunda máxima (**Dmax**). Figura elaborada pelo autor.

Segundo Yoshimura (2010) a física do "*build up*" pode ser explicada por três fatores distintos que são: A) Os fótons percorrem caminhos longos antes de interagir, logo o número de fótons no feixe não é muito atenuado por pequenas espessuras de tecido. B) O elétron liberado, através do efeito Compton pois os números atômicos são pequenos, pelo fóton de alta energia recebe quase toda energia do fóton, percorrendo na mesma direção do feixe original.

C) Os elétrons ejetados depositam sua energia apenas no final de sua trajetória. Dessa forma, na pele do paciente, há pouca deposição de energia; logo, na medida que a profundidade aumenta, a dose cresce até o feixe atingir seu alcance máximo. Chegando no ponto máximo, a radiação não consegue ir mais adiante por causa de efeitos da atenuação.

Na radioterapia, **D_{max}** é dose absorvida máxima para um campo único de um feixe de fótons, e depende principalmente da energia deste feixe. Normalmente a profundidade de ionização máxima aumenta com o aumento da energia do fóton. Matematicamente, a dose máxima é calculada por:

$$D_{max} = \frac{D_d}{P} \times 100. \quad (4.15)$$

Segundo Khan (2003) vários fatores afetam a distribuição da dose profunda. Que incluem a energia do feixe, a profundidade, o tamanho do campo, a distância entre a fonte-superfície e a colimação do feixe. A tabela abaixo exhibe a dependência da profundidade máxima em relação a energia do feixe incidente, em que **d_{max}** é o ponto em que a dose é máxima.

Tabela 4.4: Dependência do alcance máximo em relação a energia do feixe de radiação. Retirada de BRASIL (2000).

Energia (MeV)	d _{max} (cm)
0,20	0
1,25	0,5
4	1
6	1,5
10	2,5
18	3,5
24	4

Os valores **d_{max}** variam de 5 mm para um feixe de fótons de Co-60 (aproximadamente 1,25 MeV) a 5 cm para um feixe de raios X, produzido por um acelerador linear de elétrons, de 25 MeV. Logo para tratamentos de tumores profundos, os aceleradores lineares mostram-se eficazes. Atualmente a utilização dos mesmos é bastante frequente para o tratamento de neoplasias malignas através da produção de raios X por *Bremsstrahlung*. Assim, as energias

do feixe são em torno de 20 a 30 MeV, o suficiente para alcançar o tumor (YOSHIMURA, 2010).

4.3.4 Eficiência do tratamento e perspectivas futuras

A radioterapia aliada a outros métodos de tratamentos ou até mesmo sozinha, é uma alternativa eficaz no combate e controle do câncer. Um estudo realizado pela Sociedade Americana de Oncologia Clínica concluiu que o tratamento de câncer utilizando radiação, no intuito de evitar o espalhamento do câncer de mama, é tão eficiente quanto a cirurgia. Para obter essa conclusão, um grupo de pesquisadores americanos, resolveram testar essa hipótese, então eles resolveram dividir as pacientes em dois grupos. O primeiro grupo realizou o tratamento tradicional, que consiste na retirada de linfonodos próximos a mama; e o segundo foi submetido a radioterapia. O total de mulheres atendidas foram de 1425, e todas já estavam com os linfonodos próximos a axilas comprometidos pelo câncer. Essa quantidade foi distribuída entre os dois grupos. Após cinco anos, verificou-se que a incidência de câncer na axila foi baixa nos dois grupos e além disso, a taxa de sobrevivência das pacientes permaneceu constante em ambos. Quanto aos efeitos colaterais, houve incidência em 28% das pacientes que foram submetidas à cirurgia, por outro lado apenas 14% do grupo que realizou a radioterapia sofreram os efeitos indesejáveis do tratamento. Confirmando assim o tratamento de câncer por radioterapia como uma alternativa melhor, afim de evitar as possíveis complicações decorrentes da cirurgia (RUTGERS, 2014).

No Brasil cerca de 60% dos cânceres diagnosticados são tratados por radioterapia. Isso significa que de 100 pacientes, 60 passarão por radioterapia podendo ser exclusiva, ou unificada a outra modalidade de tratamento como a cirurgia e quimioterapia (SALVAJOLI, 2012).

O Hospital de Clínicas de Porto Alegre já utiliza a radioterapia durante a cirurgia, técnica essa conhecida como radioterapia intra-operatória. Essa modalidade de radioterapia consiste

na irradiação da região operada durante o procedimento cirúrgico, logo a dose que seria fracionada no pós-operatório pode ser aplicada uma única vez aumentando assim a eficiência do tratamento. Além disso os efeitos colaterais são menores, e a taxa de reincidência do tumor é pequena (OLIVEIRA, 2009).

Outra modalidade que está em alta é a radioterapia guiada por imagens (IGRT), essa técnica possibilita a verificar a localização, em tempo real, das lesões que devem ser tratadas. Permitindo assim a aplicação da dose com alta precisão, e diminuindo o risco da irradiação dos tecidos saudáveis. O princípio físico dessa modalidade baseia-se no cruzamento de duas coordenadas afim de estabelecer um alvo específico. Na Física Médica aplicada na IGRT, umas das possibilidades, é a utilização de feixes de infravermelho. No cruzamento desses feixes encontra-se o tumor a ser tratado. O tratamento consiste em deitar o paciente, colando em seu abdômen esferas que refletem os raios infravermelhos. A reflexão dos raios possibilita visualizar as esferas no monitor, e a partir disso obter uma imagem digital da forma do tumor e a sua localização no corpo do paciente. Com o formato e a posição definidos, a dose só é liberada quando o ciclo respiratório do paciente corresponde aquele que foi previamente capturado pelo equipamento com o auxílio de câmeras e infravermelho. A IGRT é bastante ampla, possuindo diversas técnicas e tecnologias que pode empregar. Qualquer imagem que permite acertar com precisão o alvo, e é uma forma de radioterapia guiada por imagem, acredita-se que no futuro essa é uma das modalidades de tratamento que será mais utilizada (SALVAJOLI, 2012).

No futuro aguarda-se também o aperfeiçoamento do tratamento através de outras partículas atômicas. Atualmente há a utilização de prótons, em uma modalidade conhecida por protonterapia. Trata-se de uma a terapia que utiliza feixe de prótons de alta energia, aplicada no tumor. A principal vantagem deste tratamento é devido aos prótons possuírem alcance limitado devido à sua carga e massa, logo a dose é restringida apenas no volume

tumoral. Segundo Caruso (2000), a protonterapia tem sido muito utilizada em tumores de cabeça, pescoço e região pélvica. Hoje é o método escolhido para tratamento de melanomas oculares, conseguindo-se que a doença seja debelada, com a preservação da visão em 95% dos casos. Este índice deve ser comparado ao obtido pelo método cirúrgico, anteriormente utilizado, que só oferecia 60% de sucesso, mas com perda da visão e desfiguramento do paciente.

Capítulo 5

Considerações finais

Neste trabalho foi realizado um estudo a respeito da radioatividade e a sua aplicação prática em Medicina, no contexto do tratamento de câncer por radioterapia. Para um melhor entendimento sobre a radioterapia, foi necessário observar o histórico do surgimento da radioatividade e da radioterapia afim de mostrar e compreender conceitos importantes que ligam intimamente estas duas áreas. Sendo assim, o foco do capítulo 2 foi o relato da origem da radioatividade, bem como a descrição de tópicos importantes neste campo de estudo. Assim, foi abordado de maneira breve os decaimentos alfa, beta e gama, e finalizando o capítulo com algumas aplicações da radiação em diversos áreas. O surgimento da radioatividade, com a observação das propriedades da radiação, e com estudos realizados pela Física Nuclear, permitiu o nascimento e avanço da Medicina Nuclear por meio do diagnóstico de patologias e do seu tratamento por meio da Radioterapia.

Uma exemplificação do uso da radiação na medicina é na utilização de traçadores radioativos para monitorar diversas atividades do corpo, como fluxo sanguíneo, crescimento dos ossos etc. No diagnóstico de doenças destaca-se a obtenção de imagens utilizando radioisótopos, o exemplo clássico é a tomografia por emissão de pósitrons no qual é utilizado um elemento que emite essas partículas para obter imagens de tecidos humanos bastante detalhadas no qual seria impossível obter através de um simples raio X. No tratamento de

doenças destaca-se a radioterapia, no combate de neoplasias.

Com o estudo dos decaimentos observou-se que as radiações podem ser classificadas em dois tipos, a saber, as radiações corpusculares e eletromagnéticas. As radiações corpusculares são representadas basicamente pelas partículas alfa e beta, e as eletromagnéticas representadas pelos raios X e radiação gama. No capítulo 3, foram discutidos os efeitos que as partículas e ondas produzem durante a sua passagem pela matéria, causando a ionização do meio. A interação das partículas radioativas é diferente da interação da radiação eletromagnética. Logo para a radiação eletromagnética, o processo de interação pode ser através do efeito fotoelétrico, efeito Compton e formação de pares.

Esse estudo foi realizado pelo fato da radioterapia utilizar nuclídeos radioativos, e também no intuito de compreender como a radiação age no organismo do ponto de vista físico e biológico, visando formas de tratamento para o combate ao câncer. A radioterapia é basicamente a utilização da radiação ionizante eletromagnética, que pode ser de natureza nuclear ou produzida por freamento aplicada ao tecido biológico doente. As radiações corpusculares, devido ao seu pequeno alcance, possuem aplicabilidade limitada, entretanto em algumas modalidades do tratamento especificamente na braquiterapia, são bastante utilizadas. As propriedades da radiação eletromagnética permitem que a mesma seja empregada em tratamentos de neoplasias malignas. Na teleterapia há utilização de fótons de média e alta energia, devido a sua eficiência na penetração e capacidade de danificar o DNA de células cancerígenas. No geral, a eficácia da radioterapia é equivalente ou até mesmo melhor do que métodos tradicionais, como a cirurgia, e depende diretamente do estágio da doença. O tratamento pode ser exclusivo, ou pode ser acompanhado da quimioterapia e o tradicional procedimento cirúrgico.

Este trabalho consiste apenas em uma introdução do tema abordado, já que o universo da radioterapia é bastante amplo e não se resume apenas aos conteúdos e tópicos abordados

até aqui. A intenção principal foi introduzir este assunto, que é pouco explorado, e conhecido pelos estudantes de Licenciatura em Física, mostrando a Física como um campo que também contribui para o desenvolvimento de técnicas de diagnóstico e tratamento de patologias na Medicina.

Bibliografia

- [1] ALMEIDA, E. S. De; TAUHATA, L. **Física Nuclear**. 1 ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1981.
- [2] ATKINS, P. W.; JONES, L. **Princípios de Química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- [3] BRASIL. **Curso para técnicos em radioterapia**. 1 ed. Rio de Janeiro: INCA, 2000.
- [4] BRASIL. **A situação do câncer no Brasil**. 1 ed. Rio de Janeiro: INCA, 2006.
- [5] BRONCHUD, M. H. et al. **Principles of Molecular Oncology**. 1 ed. Totowa: Humana Press, 2000.
- [6] CARUSO, F. et al. **A física de altas energias e a terapia de câncer por prótons: Motivações e perspectivas**. Capítulo do livro O mundo das partículas elementares, p. 117-130, jan. 2000. Disponível em: <www.cbpf.br/caruso/fcn/publicacoes/pdfs/cancer.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2017.
- [7] CARUSO, F; OGURI, V. **Física Moderna: Origens Clássicas e fundamentos quânticos**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- [8] CNEN. **A história da energia nuclear: Apostila educativa**. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/educativo/historia-da-energia-nuclear.pdf>>. Acesso em: 01 abr. 2017.

-
- [9] CNEN. **Aplicações da energia nuclear.** Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/educativo/aplicacoes-da-energia-nuclear.pdf>>. Acesso em: 02 mar. 2017.
- [10] CNEN. **Radiações Ionizantes.** Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/educativo/radiacoes-ionizantes.pdf>>. Acesso em: 07 fev. 2017.
- [11] CUNHA, S. S. D. et al. **Efeitos da radioterapia no tecido ósseo.** Radiologia Brasileira, v. 40, n. 3, p. 189-192, mar. 2007
- [12] CURIE, Mme.; CURIE, P.; BÉMONT, G. **Sur une nouvelle substance fortement radio-active, contenue dans la pechblende.** Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris, v. 127, p. 1215-1217, dez. 1898.
- [13] D'IPPOLITO, G; MEDEIROS, R. B. **Exames radiológicos na gestação.** Radiologia Brasileira, v. 38, n. 6, p. 447-450, dez. 2005.
- [14] EISBERG, R; RESNICK, R. **Física: Átomos, moléculas e partículas.** 1 ed. São paulo: Elsevier, 1979.
- [15] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física Vol 4.** 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- [16] HOSPITAL ALBERT EINSTEIN. **Radioterapia guiada por imagem IGRT e Gating.** Disponível em: <<https://www.einstein.br/especialidades/oncologia/exames-tratamentos/radioterapia-guiada-imagem>>. Acesso em: 18 abr. 2017.
- [17] INCA(BRASIL). **ABC do câncer: abordagens básicas para o controle do câncer.** 1 ed. Rio de Janeiro: INCA, 2011.

-
- [18] INCA(BRASIL). **Ações de enfermagem para o controle do câncer: uma proposta de integração ensino-serviço**. 3 ed. Rio de Janeiro: INCA, 2008
- [19] INCA(BRASIL). Estimativa 2016: incidência de câncer no Brasil. 1 ed. Rio de Janeiro: INCA, 2015.
- [20] INCA(BRASIL). **Radioterapia**. Disponível em: <http://www.inca.gov.br/conteudo_view.asp?id=100>. Acesso em: 15 abr. 2017.
- [21] INSTITUT CURIE. **Notre histoire**. Disponível em: <<https://curie.fr/page/notre-histoire>>. Acesso em: 03 abr. 2017
- [22] JORNAL ZERO HORA. **Radioterapia aplicada durante a cirurgia é mais eficaz no tratamento contra o câncer**. Disponível em: <<http://zh.clicrbs.com.br/rs/noticia/2011/07/radioterapia-aplicada-durante-cirurgia-e-mais-eficaz-no-tratamento-contr-o-cancer-3417635.html>>. Acesso em: 11 abr. 2017.
- [23] KAPLAN, I. **Nuclear Physics**. 2 ed. United States: Addison-Wesley, 1963.
- [24] KHAN, F. M. **The physics of radiation therapy**. 3 ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2003
- [25] LENICARE - UNIDADE DE TERAPIA DE ALENTEJO. **História da radioterapia no mundo**. Disponível em: <<http://www.oncologiaalentejo.com/historia-no-mundo>>. Acesso em: 15 abr. 2017.
- [26] LERDEMAN, M. **The early history of radiotherapy: 1895 - 1939**. Radiation Oncology Biology Physics, v. 7, n. 5, p. 639-648, mai. 1981.

-
- [27] MARIE CURIE - ARTICLE ON RADIUM AND RADIOACTIVITY. **Radium and Radioactivity**. Disponível em: <<http://history.aip.org/history/exhibits/curie/article.htm>>. Acesso em: 07 fev. 2017.
- [28] MARIE CURIE - RADIOACTIVITY. **On a New, Strongly Radio-active Substance Contained in Pitchblende**. Disponível em: <<http://history.aip.org/history/exhibits/curie/discover.htm>>. Acesso em: 07 fev. 2017
- [29] MARTIN, B. R. **Nuclear and Particle Physics: an introduction**. 1 ed. London: Wiley, 2006.
- [30] MARTINS, H. L. **Princípios físicos da radioterapia**. Disponível em: <<http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/images/documentos/radioterapia.pdf>>. Acesso em: 08 fev. 2017
- [31] MUKHERJEE, S. **O imperador de todos os males: Uma biografia do câncer**. 1 ed. São Paulo: Companhia das letras, 2012.
- [32] MATSUSHIMA, L. C. **Determinação das curvas de isodose e confirmação do planejamento em Radioterapia de intensidade modulada - IMRT convencional empregando as técnicas de termoluminescência, luminescência opticamente estimulada e detectores semicondutores**. 2015. 156f. Tese (Doutorado em tecnologia nuclear e aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2015.
- [33] NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica. Vol. 4**. 4 ed. São Paulo: Blucher, 2003.
- [34] OLIVEIRA, L. S. R. **Notas de aula: Tecnologia em radioterapia**. Disponível em: <lucianosantarita.pro.br/Arquivos/Radioterapia_2009.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2017.

-
- [35] OKUNO, E. **Efeitos biológicos das radiações ionizantes**. Estudos avançados, São Paulo, v. 27, n. 77, p. 185-199, jan. 2013.
- [36] ONCOGUIA.O **que é oncologia?**. Disponível em: <<http://www.oncoguia.org.br/conteudo/o-que-e-oncologia/82/1/>>. Acesso em: 12 abr. 2017.
- [37] PELLIZZON, A. C. De A. **A importância da radioterapia no tratamento oncológico**. A.C. Camargo Cancer Center, jan. 2015. Disponível em: <<http://www.accamargo.org.br/noticias/a-importancia-da-radioterapia-no-tratamento-oncologico/505>>. Acesso em: 06 abr. 2017.
- [38] PODGORSAK, M. B. **Notas de aula: Principles and practice of radiation oncology**. Disponível em: <<https://www.roswellpark.edu/sites/default/files/PRINCIPLES%202011.pdf>>. Acesso em: 01 abr, 2017.
- [39] PODGORSAK, E.B. **Radiation Oncology Physics: A handbook for teachers and students**. 1 ed. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005.
- [40] RUTGERS, E. J. T. et al. **Radiotherapy or surgery of the axilla after a positive sentinel node in breast cancer (EORTC 10981-22023 AMAROS):a randomised, multicentre, open-label, phase 3 non-inferiority trial**. The lancet Oncology, v. 15, n. 12, p. 1303-1310, nov. 2014. Disponível em: <[http://thelancet.com/journals/lanonc/article/PIIS1470-2045\(14\)70460-7/fulltext](http://thelancet.com/journals/lanonc/article/PIIS1470-2045(14)70460-7/fulltext)>. Acesso em: 01 mar. 2017.
- [41] RUTHERFORD, E. **The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom**. Philosophical Magazine, London, v. 21, n. 6, p. 669-688, mai. 1911.

-
- [42] SALVAJOLI, J. V. SALVAJOLI. B. P. **O papel da radioterapia no tratamento do câncer - avanços e desafio.** Revista Onco&, v. 13, n. 3, p. 32-36, set. 2012.
- [43] SCAFF, L. A. M.. **Física da radioterapia.** 1 ed. São Paulo: Sarvier, 1997.
- [44] SOUZA, M. A. M.; DANTAS, J. D. **Fenomenologia nuclear: uma proposta conceitual para o ensino médio.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 27, n. 1, p. 136-158, abr. 2010.
- [45] TAUHATA, L. et al. **Radioproteção e dosimetria: Fundamentos.** 10 ed. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2014.
- [46] TEIXERA, L. A.; FONSECA, C. M. O. **De doença desconhecida a problema de saúde pública: O inca e o controle de câncer no brasil.** 1 ed. Rio de Janeiro: Ministério da Saúde, 2007.
- [47] TRINDADE, B. M. et al. **Dosimetria comparativa de braquiterapia de próstata com sementes de I-125 e Pd-103 via SISCODES/MCNP.** Radiologia Brasileira, v. 45, n. 5, out. 2012.
- [48] WILSON, F. L. **Fermi's Theory of Beta Decay.** American Journal of Physics, v. 36, n. 12, p. 1150-1160, dez. 1968.
- [49] YOSHIMURA, E.; OKUNO, E. **Física das radiações.** 1 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2010.
- [50] ZARAGOZA, R.; RAMÓN, J. **Física e instrumentación médicas.** 1 ed. Barcelona: Masson-Salvat, 1992.