



PONTÍFICA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS PUC-GOIÁS  
ESCOLA DE FORMAÇÃO DE PROFESSORES E HUMANIDADES

## **RADIAÇÃO E SUAS APLICAÇÕES NO COTIDIANO**

Orientando: Osni Correia  
Orientador: Prof. Me. Renato Medeiros

Goiânia  
2022

OSNI CORREIA

## RADIAÇÃO E SUAS APLICAÇÕES NO COTIDIANO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto de Física da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, como requisito parcial para a obtenção de título em Licenciatura Plena em Física.

Orientador: Ms. Renato Medeiros

Goiânia  
2022

OSNI CORREIA

## **RADIAÇÃO E SUAS APLICAÇÕES NO COTIDIANO**

Este trabalho de conclusão de curso julgado adequado para atenção do título de licenciando em Física, e aprovado em sua forma final pela Escola de Professores e Humanidades, da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, em \_\_/\_\_/\_\_\_\_

Banca Examinadora:

---

Orientador: Prof. Me. Renato Medeiros

---

Coorientador: Prof. Me. Edson Vaz de Andrade

---

Prof. Dr. Anderson Costa da Silva

**“A Experiência é o único  
juiz da verdade científica”  
Feynman**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Grande Arquiteto do Universo, porque sem ele nada seria possível.

Aos meus filhos: Fabíola Pacheco Correia, Rafael Pacheco Correia e Caíque Pacheco Correia pelo sempre incentivo e apoio que serviram de alicerce para as minhas conquistas.

A minha querida esposa e companheira Márcia Eli Pacheco Correia que sempre me apoiou e compreendeu a minha dedicação ao trabalho de conclusão de curso.

Ao meu professor orientador Renato Medeiros pelas valiosas contribuições e orientações dadas durante o processo.

A todos os meus colegas do curso de Licenciatura em Física que compartilharam dos inúmeros desafios que enfrentamos, sempre com o espírito colaborativo.

Também não poderia deixar de agradecer a Pontifícia Universidade Católica de Goiás e o seu corpo docente que demonstrou estar comprometido com a qualidade e excelência de ensino.

## RESUMO

A Física da radiação vem crescendo bastante nas últimas décadas. Baseia-se na Radioatividade, que consiste em um fenômeno natural no qual um núcleo instável acaba emitindo ondas e partículas até que consiga se estabilizar. Acredita-se as vezes que a radioatividade é maléfica a saúde, mas, no entanto, nós convivemos diariamente com ela.

O trabalho a seguir mostra as várias aplicações das radiações, que são imensas no nosso cotidiano principalmente no campo da Biologia em pesquisas básicas da genética, fisiologia e botânica. Nas ciências médicas, as aplicações são feitas na radiologia, radioterapia, radiologia diagnóstica e medicina nuclear.

Nesse trabalho, mostramos a importância da radiação, um dos ramos da Física Moderna, que tornam os estudos radiológicos, mais quantitativos tanto em seus aspectos experimentais quanto teóricos, formulando hipóteses, conferindo análises de resultados, sendo cada vez mais útil principalmente quando analisado com outras atividades humanas, sempre aperfeiçoando as técnicas e salvando cada vez mais vidas.

## **ABSTRACT**

Radiation Physics has been growing a lot in the last decades. It is based on Radioactivity, which consists of a natural phenomenon in which an unstable nucleus ends up emitting waves and particles until it manages to stabilize. It is sometimes believed that radioactivity is harmful to health, yet we live with it daily.

The following work shows the applications of radiation, which are immense in our daily lives, mainly in the field of Biology in basic research of genetics, physiology, and botany.

In medical sciences, applications are made in radiology, radiotherapy, diagnostic radiology, and nuclear medicine.

In this work, we show the importance of radiation, one of the branches of Modern Physics, which makes radiological studies more quantitative both in their experimental and theoretical aspects, formulating hypotheses, checking results analyses, being increasingly useful, especially when analyzed with other activities, always improving techniques, and saving more and more lives.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### QUADROS

<b>Quadro 1:</b> Espectro eletromagnético .....	20
<b>Quadro 2:</b> Algumas grandezas e unidades de Física das Radiações e suas relações.....	33
<b>Quadro 3:</b> Exposição (mR) na entrada da pele, por radiografia.....	42
<b>Quadro 4 :</b> Atividade De Radionuclídeo Administrado. Dose no órgão mais atingido e nas gônadas em um exame de Medicina Nuclear.....	44

### GRÁFICOS

<b>Gráfico 1</b> – Decaimento exponencial de uma fonte de $^{198}\text{Au}$ radioativo, com escalas lineares .....	29
<b>Gráfico 2-</b> Decaimento da atividade radioativa em função do tempo .....	34



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

1-ácido desóxirribonucleico	D.N.A
2-becquerel	bq
3-centímetro	cm
4-comissão nacional de energia nuclear	C.N.E.N
5-condições normais de temperatura e pressão	C.N.T.P
6-coulomb	C
7-curie	Ci
8-eletron-volt	eV
9-gray	Gy
10-joule	J
11-kilograma	Kg
12-metro	m
13-newton	N
14-pascal	Pa
15-quilotoneladas	Kt
16-radiação	rad
17-roentgen	R
18-sievert	sv
19-tomografia por emissão de pósitron	P.E.T

## SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO .....	10
2- HISTÓRIA DAS RADIAÇÕES E RAIOS X .....	11
3- ACIDENTES HISTÓRICOS IMPORTANTES SOBRE RADIAÇÃO .....	17
4- NOÇÕES BÁSICAS DE FÍSICA DAS RADIAÇÕES .....	18
4.1- Radiação Corpuscular .....	19
4.2- Radiação Eletromagnética .....	19
4.3- Contaminação e Irradiação .....	21
5- RADIAÇÃO NATURAL OU RADIAÇÃO DE FUNDO .....	22
5.1- Exposição externa à radiação .....	22
5.2- Exposição Interna à Radiação .....	24
6- RADIAÇÃO ARTIFICIAL .....	25
7- NOÇÕES FÍSICO-QUÍMICA DA DESINTEGRAÇÃO NUCLEAR .....	26
7.1- Desintegração Radioativa .....	27
7.1.1 - Meia-vida ( $T_{1/2}$ ) .....	28
7.1.2 - Relações Matemáticas Importantes .....	29
8- PRINCIPAIS GRANDEZAS E UNIDADES DE FÍSICA DAS RADIAÇÕES .....	30
8.1- Exposição .....	30
8.2- Dose Absorvida .....	30
8.3- Dose Equivalente .....	31
8.4- Atividade de uma amostra radioativa (A) .....	32
9- LEIS DA DESINTEGRAÇÃO RADIOATIVA .....	34
9.1- Meia-Vida Física ( $T_{1/2}$ ) .....	35
9.2- Meia-Vida Biológica (TB) .....	36
9.3- Meia-Vida Efetiva (TE) .....	36
9.4- Vida Média: .....	37
10 - IONIZAÇÃO .....	37
11 - ABSORÇÃO DE PARTÍCULAS ALFA E BETA .....	38
12 - USO DAS RADIAÇÕES EM BIOLOGIA .....	38
13 - APLICAÇÃO DA RADIAÇÃO NA MEDICINA .....	39
13.1 - Uso da Radiação na Radioterapia .....	40
13.2 - Uso da Física da Radiação nos diagnósticos .....	40
13.3 - Física Nuclear na Diagnóstico Médica .....	43
14 - CONSEQÜÊNCIAS DOS EFEITOS BIOLÓGICOS DAS RADIAÇÕES .....	45
14.1 - Estágios dos Efeitos Biológicos da Radiação .....	47
14.2 - Efeitos Biológicos da Radiação .....	49
14.2.1 - Efeitos somáticos .....	49
14.2.2 - Efeitos hereditários .....	50
15 - CONCLUSÃO .....	52
16 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	53

## 1 - INTRODUÇÃO

A física da radiação é um tema moderno, com um número infindável de aplicações importantes, haja visto a enorme diversidade de material disponível atualmente nas livrarias.

Percebemos que uma das limitações da Física Clássica é a descrição de fenômenos físicos para partículas da ordem de  $10^{-10}$  m. A física moderna surgiu e desenvolveu-se, juntamente, para preencher essa lacuna e melhor descrever os fenômenos de nanotecnologia.

Na Física da Radiação, um dos ramos da física moderna, a radioatividade desempenhou um papel importante no desenvolvimento da física nuclear e atômica, que são muito importantes suas aplicações na medicina, indústrias e pesquisas científicas.

No ensino médio, a física das radiações, integrante da física moderna, quase nunca é ministrada porque as horas-aulas da disciplina de física já não são suficientes para abranger o programa exigido nas provas de vestibulares, e também porque os próprios mestres possuem pouco conhecimento nessa área. Isso também decorre ao fato de que a Física das Radiações não faz parte do elenco de disciplinas obrigatórias de quase todas as escolas de bacharelado e licenciatura em Física, sendo muita das vezes uma disciplina optativa.

Existe também uma maior dificuldade na difusão das aplicações e nos conhecimentos relacionados com as próprias radiações por ser seus fundamentos essencialmente multidisciplinares.

Nesse trabalho são apresentadas as importâncias de se efetuar um levantamento da relação risco e benefício para cada caso específico antes de se expor a radiação, e usá-la com um máximo de benefício toda vez que se fizer necessário.

## 2 – HISTÓRIA DAS RADIAÇÕES E RAIOS X

Em novembro de 1895, inicia-se a história das radiações, com a descoberta experimental de raios x por WILHELM CONRAD ROENTGEN, então com 50 anos, professor de física da Universidade de Würzburg na Alemanha. Entretanto a previsão teórica da existência dos raios x, já havia sido feita alguns anos antes por Hermann Von Helmholtz, que falecera sem saber que seu prognóstico se tornaria realidade.

Nesse período do mesmo ano, Roentgen, estava fazendo experiências com raios catódicos (elétrons), produzindo estes raios em tubos de vidro onde se fazia vácuo, com dois elétrons no tubo, onde era mantida uma diferença de potencial de milhares de volts, onde os chamados raios catódicos passavam do eletrodo negativo (cátodo) para o positivo (ânodo), ou colidiam com a parede do tubo.

Quando Roentgen aplicou uma diferença do potencial de algumas dezenas de quilovolts entre os eletrodos do tubo, observou uma luminescência fraca. Ficou surpreso ao notar que uma placa de vidro coberta com platina cianeto de bário colocada a um metro do tubo também emitia luminescência. Mesmo cobrindo o tubo com papel preto, o fenômeno se repetia. Em seguida colocou um livro entre o tubo e a placa de vidro, mas esta não emitia luminescência quando o tubo funcionava. Ao substituir o livro por um pedaço de madeira e depois por uma folha de alumínio, os raios atravessavam tudo, inclusive sua mão.

Após uma investigação minuciosa, conclui que os responsáveis pelo fenômeno não poderia ser os raios catódicos, pois sua capacidade de penetração no ar é somente uns poucos centímetros. As conclusão que Roentgen chegou é que os raios muito potentes emitidos pelo tubo, podiam atravessar corpos humanos e sensibilizar filmes fotográficos, por ser ainda desconhecidos foram denominados raios x.

Tinha-se então, descoberto uma forma fantástica de se observar o interior dos corpos, causando uma verdadeira revolução na área da medicina diagnóstica.

Cerca de 45 dias após a descoberta dos raios x, Roentgen tirou a primeira radiografia, que foi a de mão de sua esposa, expondo-a durante 15 minutos, com alguma suspeita que esses raios pudessem provocar efeitos danosos. Em 1901, Roentgen foi o primeiro físico a ser agraciado com o prêmio Nobel de Física.

Em 1896, Antoine Henri Becquerel, professor de física da Escola Politécnica de Paris, comunicou à Academia de Ciências de Paris, o segundo evento importante na área de radiação. Ele trabalhou com substâncias fosforescentes que absorviam a luz para depois a reemitirem, colocando certa quantidade de sulfato de urânio e potássio, um sal de urânio, sobre uma placa fotográfica, embrulhada em papel preto, e expôs a mistura à luz solar durante vários dias. Após o filme ser revelado, verificou-se que a posição do mineral ficou claramente marcada com manchas escuras. Repetiu-se as experiências, até que um dia o céu ficou nublado e não continuou suas pesquisas. Becquerel guardou o sal de urânio sobre um filme fotográfico em uma gaveta, na ausência de luz. Ao revelar a chapa ele teve uma grande surpresa, quando esperava, no processo poucas manchas escuras devido a difusão da luz e ao pouco de iluminação, no entanto as manchas estavam muito mais escuras do que antes quando haviam sido expostas ao sol.

Nos anos seguintes, Becquerel estudou as emanações de urânio, concluindo que elas não diminuíam com o tempo e que tinham propriedades similares aos raios x.

Os raios de Becquerel foram estudados novamente em 1897, por Marya Sklodowska, uma jovem polonesa que foi à Paris para estudar na Sorbonne, e após terminar sua licenciatura em matemática, casou-se com Pierre Curie, passando a se chamar Marie Curie. O tema de sua tese na época era o estudo da natureza dos “raios de Becquerel”. Logo em seguida aos seus estudos, observou que o fenômeno não podia ser específico do urânio, mas devia existir outros materiais com as mesmas propriedades. Continuando com sua pesquisa, logo ela descobriu que o tório também emitia espontaneamente raios semelhantes ao do urânio e com a mesma intensidade, comprovando sua teoria.

Surge então o termo radioatividade, significando ativado por uma radiação penetrante que preenche todo o espaço e pela radiância dos elementos como o urânio e o tório, que foram denominados de radioelementos. Em seguida Marie Curie, verificou que a pechblenda, um mineral de urânio, apresentava uma radioatividade muito alta, não explicável pela sua porção de urânio. Em 1898, publicou um artigo afirmou que devia existir um elemento mais radioativo que o tório ou o urânio.

Pierre se associou a esposa nos estudos desses fenômenos, quando em meados de 1898, um artigo com o nome de ambos, propuseram o nome polônio, país de origem de Marie, surgindo um novo elemento, cuja existência precisava ser confirmada. Dando continuidade aos estudos e após uma série de separações químicas, eles conseguiram isolar o polônio que era cerca de 400 vezes mais ativo que o urânio. Em dezembro de 1898, anunciaram a existência de um outro elemento químico radioativo, o qual propuseram o nome de rádio. Um galpão com teto de vidro quebrado era o laboratório do casal, que durante quatro anos, trabalharam arduamente em condições precárias. Nesse ambiente Marie, conseguiu separar de várias centenas de quilos de pechblenda, 100 mg de cloreto de rádio, determinando a massa atômica do novo elemento como sendo 225, e verificando que o cloreto de rádio era espontaneamente luminoso. Logo em seguida em 1903, Becquerel e o casal Curie foram agraciados com o Prêmio Nobel de Física.

Os trabalhos de Marie Curie continuaram, em relação ao isolamento do elemento rádio, que só foi conseguido em 1910. Esse elemento teve um papel extremamente importante na terapia do tratamento de câncer, e por esse motivo em 1911, Marie Curie recebeu seu segundo Prêmio Nobel, agora de Química, e apesar de todas as homenagens recebidas de diversas partes do mundo durante sua vida, nunca participou como membro da Academia de Ciências de Paris, por ser mulher.

Em meados de 1898, quem iniciou os estudos para desvendar a natureza dos “raios de Becquerel”, foi um jovem cientista neozelandês, Ernest Rutherford, descobrindo um ano mais tarde que a emanção proveniente de substâncias radiativas era complexa, sendo formado pelo menos dois tipos de radiação: um facilmente absorvido, e o outro, muito mais penetrante, sendo ambos desviados por

campos magnéticos, só que com direções opostas. Na época tais radiações foram chamadas, respectivamente, radiação alfa e radiação beta, hoje comumente denominados, partículas alfa e beta.

Em 1899, Paul Villard, identificou a radiação gama, que, ao contrário das duas primeiras, ela não sofre deflexão em campos magnéticos. Em seguida Rutherford, identificou que a radiação gama é uma onda eletromagnética de mesma natureza que os raios x, porém mais energética.

As radiações utilizadas na Medicina, até 1934, eram os raios x e as radiações alfa, beta e gama, provenientes de radionuclídeos naturais. A partir de 1935 a filha de Marie Curie, Irene Curie e seu esposo Frédéric Joliot conseguiram produzir artificialmente, pela primeira vez, os elementos radioativos fósforo-30 e nitrogênio-13, bombardeando alumínio e boro, com partículas alfa emitidas por uma fonte natural de polônio, conseguindo assim transformar elementos não radioativos em elementos radioativos.

Surge então á partir de 1930 o ciclotron, acelerador de partículas, desenvolvendo por Ernest Orland Lawrence e M. Stanley Livingston e também o reator de fissão nuclear, desenvolvido por Enrico Fermi, no período da segunda Guerra Mundial. Atualmente esses radionuclídeos são utilizadas nas mais diversas áreas científicas, como por exemplo, na diagnose e terapia de doenças, nos ensaios não destrutivos, conservação de alimentos, esterilização de materiais cirúrgicos e médicos e também na produção de novas variedades de plantas, etc.

A radiação provoca danos nos seres humanos, portanto, qualquer uso que se faça dela, deve ser criterioso, com muito conhecimento de proteção radiológica e muita responsabilidade.

No início do estudo da radiação, pouco sabia sobre os efeitos danosos e quase nada sobre os efeitos tardios. Os primeiros cientistas, estudiosos do assunto, tiveram queimaduras na pele e muitos morreram precocemente com leucemia ou com algum outro tipo de câncer.

No Brasil, na cidade de Guarapari, muitas pessoas tomam banho nas praias com areias monazíticas para a cura dos mais variados sintomas, tais como reumatismo e artrite.

Após a descoberta dos raios x, a pele da mão esquerda de Emil H. Grubbé, médico e fabricante de tubos de raios catódicos, apresentava dermatite aguda e escamações de pele, sendo que anos mais tarde sua mão teve que ser amputada, em consequência da exposição a radiação.

Em 1896, J.E. Gilman, foi o primeiro a sugerir o uso dos raios x com finalidade terapêutica, sendo que esse médico também foi o primeiro a observar que a dermatite era provocada pelos raios x na mão de Grubbé e impressionado com os danos causados nos tecidos vivos de sua mão.

No período entre 1917 a 1924, em New Jersey, aproximadamente 800 moças trabalharam em indústrias de relógios, pintando mostradores e ponteiros, com uma solução contendo rádio, que os tornavam luminescentes. Elas tinham o hábito de afinar os pincéis usados, com os lábios, ingerindo, dessa forma, todos os dias um pouco do elemento rádio. Foi feito um estudo onde até 1950, havia-se registrado 41 mortes entre essas moças com destruição de ossos, câncer nos ossos e anemia aplástica.

O rádio foi muito usado, na década de 1920, em tratamento de diversas doenças, quando por volta de 1929, o Conselho de Farmácia e Química de Associação Médica Americana anunciou que soluções de rádio e radônio não podiam ser usados como agentes terapêuticos, por falta de evidências clínicas claras.

As extensivas publicidades sobre os efeitos danosos da radiação, na época não surtira muito efeito, pois foram administrados a 32 pacientes com doenças mentais de 70 a 450 microgramas de rádio em um tratamento feito no hospital em Elgin, Illinois, no ano de 1931.



Em 1941, o Comitê Nacional de Proteção Radiológica dos Estados Unidos, apresentou suas primeiras recomendações, sendo que o máximo permissível de rádio para trabalhadores com radiação deve ser de 0,1 micrograma.

Em anos mais recentes, no período de 1944 a 1951, foi injetado intravenosamente um composto contendo rádio-224 em cerca de 2.000 alemães para tratamento de tuberculose e outras doenças, quando por volta de 1969, um estudo estatístico mostrou que 50 pessoas pertencentes ao grupo tinham morrido de câncer nos ossos, um valor bem acima das estatísticas média.

### **3 – ACIDENTES HISTÓRICOS IMPORTANTES SOBRE RADIAÇÃO**

Acidentes radiativos têm ocorrido, infelizmente, em várias partes da Terra. Destacaremos alguns considerados mais expressivos. Na cidade de Juarez no México, em dezembro de 1983, ocorreu um acidente com uma fonte de Cobalto-60 em um aparelho de radioterapia, que só veio a ser descoberto, por acaso, 30 dias depois.

Nessa fonte radiativa constatou na época uma atividade de 450 curies, proveniente de 6010 micrométricas pastilhas metálicas de cobalto-60.

Nesse acidente, as consequências foram menos sérias que as de Goiânia porque a fonte não pode ser transformada em pó, além de sua atividade ser mais baixa. Semelhante ao de Goiânia, o aparelho também foi levado de um depósito de hospital a um ferro-velho, onde foi desmanchado e suas pastilhas espalhadas.

Duas fundições no México e uma nos Estados Unidos, receberam sucatas desse ferro-velho, transformando-as em barras de aço e pés de mesa, que em seguida foram comercializadas à população. Felizmente, nesse acidente não houve nenhum óbito, em 1987, um rapaz, trabalhador do ferro-velho, continuava estéril, e três mulheres irradiadas na época deram à luz a crianças saudáveis.

Outros acidentes também ocorreram de forma catastrófica em usinas nucleares. Dentre os mais sérios, cronologicamente, citaremos o de Windscale, Inglaterra, em Outubro de 1957, o de Three Mile Island, nos Estados Unidos, em março de 1979, o mais sério de todos, o de Chernobyl, na União Soviética, em abril de 1986 e o mais recente em Fukushima, no Japão em Março de 2011.

## 4 – NOÇÕES BÁSICAS DE FÍSICA DAS RADIAÇÕES

Consideramos radiação uma forma de energia, emitida por uma fonte, e que se propaga de um ponto a outro sob a forma de partículas com ou sem carga elétrica, ou sob a forma de ondas eletromagnéticas.

A radiação é ionizante, quando possui energia suficiente para arrancar um dos elétrons orbitais de átomos neutros, transformando-os em um par de íons, resultando, portanto, na eliminação direta ou indireta de um elétron de um átomo, transformando-o em um íon positivo. As partículas carregadas produzem ionização direta enquanto as neutras e as eletromagnéticas, na sua interação com os átomos do meio, produzem ionização apenas indiretamente, criando partículas que podem ionizar. Oliveira e Mota<sup>1</sup> classificam as radiações ionizantes em “diretamente ionizante” e “indiretamente ionizante”.

Existe uma certa probabilidade de o feixe de partículas sem carga e as ondas eletromagnéticas, passar através de um meio material sem sofrer nenhuma interação, ou seja, sem perder nenhuma energia, portanto uma partícula carregada sempre sofre colisões em um meio, perdendo energia gradativamente. No tecido humano, as ionizações dos átomos do corpo podem resultar em quebra molecular e dar origem a alterações profundas com consequências bastante sérias, como mutações, morte das células e câncer. Em muitos casos, o tecido vivo tem a propriedade de se recuperar.

## 4.1 – Radiação Corpuscular

A radiação corpuscular é constituída de um feixe energético de partículas, como por exemplo: os elétrons, pósitron, prótons, nêutrons, mesons pi, muons, dêuterons, partículas alfas etc. Parte dessas partículas, são emitidas espontaneamente de núcleos atômicos, em busca de uma maior estabilidade energética. A esse fenômeno físico dá-se o nome de desintegração ou decaimento nuclear, e como resultado de tal emissão, o radionuclídeo pode se transformar em outro elemento.

O primeiro elemento é chamado elemento pai e o segundo, filho. Se este não tiver alcançado a estabilidade energética ele também se desintegrará e assim sucessivamente, até transformar em um elemento estável.

A radiação corpuscular é caracterizada por sua carga, massa e velocidade, e, pode ser carregada ou neutra, leve ou pesada, lenta ou rápida (GONÇALVES; FARIAS; GONÇALVES, 2008).

A energia cinética  $K$  de uma partícula de massa  $m$  com velocidade  $v$ , quando  $v < c$ , o que geralmente acontece, é dado por:

$$K = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

$K$ , também chamada energia cinética da radiação, em que  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e vale  $3 \times 10^8$  m/s. (OKUNO; CALDAS; CHOW, 1982).

## 4.2 – Radiação Eletromagnética

As ondas eletromagnéticas são constituídas de campos elétricos e magnéticos oscilantes (perpendiculares entre si) que se propagam no vácuo com velocidades constante, igual a 300 mil km/s, que é a velocidade da luz. Como exemplos de ondas eletromagnéticas temos: ondas de rádio, de TV, micro-ondas, radiação infravermelho,

luz visível, radiação ultravioleta, raios x e raios gama, que diferem entre si pela sua frequência e pelo seu comprimento de onda.

A onda eletromagnética tem energia quantizada, ou seja, assume valores discretos. Na interação da radiação eletromagnética com a matéria, a absorção e a emissão de energia só ocorrem em quantidades discretas de energia denominadas quanta ou fótons. A energia  $E$  de um fóton é obtida por  $E = h \cdot f$ , sendo  $h$ , a constante de Planck, que vale  $4,14 \cdot 10^{-15}$  eV e  $f$  a frequência da onda eletromagnética.

### Quadro 1 – Espectro eletromagnético

Quadro 1.1 – O espectro eletromagnético.

Comprimento de onda (m)	Outras unidades	Espécimes	Radiação
$10^{-15}$		núcleo dos átomos	raios gama raios X
$10^{-12}$	1,24 MeV		
$10^{-11}$	0,1 Å	átomos	ultravioleta
$10^{-10}$	1,0 Å		
$10^{-9}$	1 nm	vfrus moléculas	luz visível
$10^{-8}$	100 Å		
$10^{-7}$	1 000 Å		
	4 000 Å	células	infravermelha
	7 000 Å		
$10^{-6}$	1 $\mu$ m		
$10^{-5}$	10 $\mu$ m	insetos	ondas de rádio
$10^{-4}$	100 $\mu$ m		
$10^{-3}$	1 mm	televisão e FM	
$10^{-2}$	1 cm		
$10^{-1}$	10 cm		
1	300 MHz		
10	30 MHz		
$10^2$	3 MHz		
$10^3$	1 km		

**Fonte:** OKUNO, E; CHOW, C. & CALDAS, I. L. – Física para Ciências Biológicas e Biomédicas. São Paulo, HARBRA, 1982.

A energia de um fóton é diretamente proporcional à frequência da onda eletromagnética, quanto maior a frequência da onda, maior a energia de seus fótons.

Os fótons de raios x e gama são os mais energéticos e, portanto, são interessantes, pois são ionizantes.

Os raios x e os raios gama diferem somente quanto à origem, pois os raios gama provêm do núcleo atômico ou da aniquilação de partículas, enquanto os raios x têm sua origem fora do núcleo.

Grande parte dos elementos radioativos emite raios gama, quando os elétrons rápidos colidem com certos materiais, parte de sua energia, ou todo ela, é convertida em fótons de raios x, denominados radiação de freamento ou bremsstrahlung, como exemplo temos os tubos de raios x usados para tirar radiografias. É percebido que a emissão de radiação x cessa quando o tubo é desligado da tomada elétrica, sendo impossível impedir emissão de radiação por uma fonte radioativa.

### **4.3 – Contaminação e Irradiação**

Nós estamos mais comumente expostos aos raios x e aos raios gama, no entanto eles não tornam radioativos os materiais ou os seres humanos irradiados. Se uma pessoa ingerir, inalar ou sofrer contaminação com radionuclídeos, aí sim essa pessoa torna-se radioativa, ou seja, uma fonte radioativa. As pessoas contaminadas são também irradiadas, pois estão portando os átomos radiativos dentro ou fora do organismo.

Concluimos, portanto, que nem todas as pessoas irradiadas são contaminadas, ou seja, elas mesmas não contaminadas, podem estar sujeitas à radiação emitida, por átomos radioativos de uma pessoa ou local contaminado, logicamente dependendo da proximidade.

Como exemplo podemos citar os alimentos irradiados, para fins de esterilização, com raios gama de uma fonte de césio-137 ou cobalto 60, não tornam radiativos, mas os alimentos contaminados pela poeira radioativa, ou que receberam nutrientes radioativos via sistêmica, se tornam radioativos.

Quando ocorreu o acidente em Goiânia, cerca de 250 pessoas foram contaminadas interna ou externamente, pois entraram em contato direto com os

átomos de césio-137, ingerindo ou inalando, no primeiro caso, e tocando, no segundo. A contaminação começou com um número bem menor de pessoas, que foram passando os átomos do césio-137 a outras, através do aperto de mão. Quando o pedaço da fonte, foi levado em um ônibus, do ferro-velho até o Centro de Vigilância Sanitária, o mesmo contaminou o próprio local, o ônibus, as pessoas e os objetos que ela tocou. Várias pessoas não contaminadas foram irradiadas em Goiânia, pois, não tinham átomos de césio-137 na sua pele, nem mesmo os havia ingerido ou inalado, mas tiveram perto de pessoas ou objetos contaminados.

Em Chernobyl, quando ocorreu o acidente, praticamente todo o solo europeu foi contaminado, existindo uma variação no grau de contaminação, em cada local, dependendo da direção do vento, densidade do ar, quantidade de chuvas locais etc.

## **5 – RADIAÇÃO NATURAL OU RADIAÇÃO DE FUNDO**

No nosso organismo, a cada minuto, milhares de átomos estão se desintegrando, emitindo radiações.

Todo organismo em nosso planeta está exposto a radiação natural, podendo ser a exposição externa ou interna.

### **5.1 – Exposição externa à radiação**

A todo momento os organismos na superfície da Terra estão sendo irradiados pela exposição externa, sendo que a metade dessa radiação é cósmica e a outra metade provém de radionuclídeos naturais. De qualquer forma, nossa atmosfera é uma proteção natural contra os raios cósmicos. Como a radiação cósmica, atingindo organismos vivos pode causar alterações genéticas, muitos cientistas acreditam que essa radiação tem sido importante no processo evolutivo da vida em nosso planeta.

A radiação cósmica primária provém do espaço interestelar e no topo da atmosfera é constituída de prótons (85%) partículas alfa (14%) e núcleos de

número atômico entre 3 e 26 (1%). Essas partículas são extremamente energéticas, possuindo uma energia até 10 GeV (INÁCIO, 2015, p. 15).

Sua interação com os núcleos atômicos da atmosfera produzem outras partículas. Com uma pressão atmosférica normal à nível do mar, aproximadamente 75% das radiações cósmicas são constituídas de múons que resultam do decaimento dos mésons pi, sendo os outros 25%, constituído por principalmente elétrons e fótons. Ocorrendo o desvio das partículas pelo campo magnético terrestre, a intensidade da radiação cósmica é mínima na região do Equador e máxima na região dos pólos.

A atmosfera funciona como um atenuador da radiação cósmica, tendo essa uma intensidade maior quando maior a altitude. É observado que a radiação cósmica a aproximadamente 3000 m de altura é cerca de duas a três vezes maior que a medida ao nível do mar.

A intensidade da radiação cósmica varia de local para local, dependendo da latitude e da altitude, percebe, porém, ter se mantida constante durante milhares de anos, para um mesmo local da superfície terrestre. Devida à radiação cósmica para pessoas que vivem em altitudes de 0 a 200 m, a dose equivalente é da ordem de 0,27 mSv/ano. Para altitudes de 200 a 1.800 m, varia de 0,28 a 0,52 mSv/ano.

Para uma pessoa que faz uma viagem de 10 horas em um avião a jato, a mesma está sujeita à uma dose extra de radiação cósmica de 0,05 mSv, o que é alto, se pensarmos que a dose média de radiação natural, é de 2,4 mSv, mas como essa dose é absorvida em uma situação atípica, pra maioria das pessoas, se torna inofensiva.

Na crosta terrestre existe grande quantidade de radiação gama, proveniente de radionuclídeos naturais, que contribui para a exposição externa. As grandes diferenças nas concentrações de minerais radioativos no solo têm sido encontradas nas áreas monazíticas das praias de Guarapari, nas minas de urânio e tório na região de Poços de Caldas e em depósitos monazíticos no estado de Kerala, na Índia. Nas ruas da cidade de Guarapari, os níveis de radiação chegam a ser 10 vezes maiores que as radiações consideradas normais que existe na natureza.



Dependendo do material utilizado na construção das casas, as pessoas que utilizam concreto estão mais vulneráveis a radiação do que as que utilizam madeira. A dose anual devido a radiação natural terrestre, depende do local e varia de 0,28 até 8,00 mSv, sendo a média de 2,40 mSv.

## **5.2 – Exposição Interna à Radiação**

Como podemos observar essa exposição é devido aos radionuclídeos que são inalados ou ingeridos, contribuindo com uma dose anual média de 0,18 mSv. Nos isótopos de potássio existentes na natureza, somente o potássio-40 com quantidade relativa de 0,0118% é radioativo, sendo responsável por 0,17 mSv, de dose interna anual.

Sua meia-vida física é de 1,26 bilhões de anos, enquanto a meia-vida biológica é 58 dias. Esse elemento localiza-se nos músculos do corpo humano, com uma concentração média de 2 g por cada quilograma de músculo. Sua atividade em uma pessoa de 70 kg de massa é da ordem de 3.700 Bq, ou seja, a cada segundo ocorrem 3.700 desintegrações nucleares.

O potássio em sintonia com o sódio, têm um papel muito importante na transmissão de impulsos nervosos no organismo humano, constituindo elementos essenciais na nossa alimentação diária, sendo o potássio encontrado no feijão, nas verduras frescas, no leite etc. Segundo pesquisas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRG), para cada litro de leite de vaca, existe em média cerca de 1,4 g de potássio, do qual 0,0118% é o radioativo, correspondente a 44 Bq. Concluimos então que o leite é naturalmente radioativo, devido exclusivamente ao potássio-40. Dentre os alimentos que apresentam grande atividade do potássio-40, podemos citar o espinafre cru, com 240 Bq/kg, a cenoura crua, a batata e a banana, com 120 Bq/kg. O complemento de 0,01 mSv de dose equivalente interna anual é principalmente devido ao carbono-14 e ao gás radônio.

Alguns alimentos concentram mais diferentes tipos de radionuclídeos que outros. Como exemplo temos a castanha-do-pará, que possui característica de concentrar o elemento rádio, chegando essa concentração a ser 1.000 vezes superior a aquela encontrada na dieta alimentar médio americana.

## **6 – RADIAÇÃO ARTIFICIAL**

O homem com a aplicação cada vez mais dos meios modernos está também exposto a radiação artificial, proveniente de artefatos produzidos por ele próprio, além da exposição á radiação natural. Advindo o desenvolvimento dos técnicos e equipamentos radiológicos, a contribuição mais acentuada, provém de raios x, principalmente para fins de diagnósticos, mas que adequadamente prescrito pode ser realizado com uma certeza absoluta de benefício ao paciente, apesar de seus efeitos danosos. Dentre as radiações a que a população está normalmente exposta, esta pode ser diminuída, ou mantida ao mínimo, com um adequado uso e controle de qualidade dos equipamentos, técnicos bem capacitados, responsáveis e com grande conhecimento de proteção radiológica.

Temos ainda outra fonte de radiação artificial que é a poeira radioativa resultante de testes ou acidentes nucleares, onde os elementos radioativos liberados na atmosfera, acabam se depositando no solo e entrando na cadeia alimentar.

Foram realizados testes nucleares no hemisfério norte até 1963, a partir daí foi assinado um acordo entre os Estados Unidos, a Grã-bretanha e a União Soviética, para que não se realizassem testes nucleares ao ar livre.

A França e a China por não participarem desse acordo, explodiram algumas bombas após essa data, porém em incidência menor. Em consequência disto o acúmulo de estrôncio-90 no solo devido a poeira radiativa aumentou de 5 a 10 vezes no hemisfério norte, e de 1,5 a 3 vezes no hemisfério sul, a partir de 1954.

De 1963 a 1971, os Estados Unidos fizeram aproximadamente 220 detonações no subsolo. Felizmente, nesse tipo de teste a liberação de radionuclídeos na atmosfera é baixa. Em 1974, as superpotências fizeram acordo de não detonar no subsolo artefatos nucleares com potência superior a 150 kt (kt – quilotoneladas). Dois anos mais tarde em 1976, em novo acordo limitou em 150 kt, as explosões subterrâneas tanto para fins pacíficos como militares.

## **7 – NOÇÕES FÍSICO-QUÍMICA DA DESINTEGRAÇÃO NUCLEAR**

O núcleo do átomo pode ser considerado uma esfera minúscula, carregada positivamente e responsável pela quase totalidade da massa do átomo.

O núcleo atômico é constituído de prótons e nêutrons, sendo que cada elemento químico tem um número específico de prótons no núcleo, portanto o número de nêutrons dentro do núcleo pode variar para cada elemento químico.

Chamamos de isótopos, os elementos cujos núcleos possuem diferentes números de nêutrons, podendo ser estáveis ou instáveis.

Nos isótopos instáveis, os núcleos estão em níveis energéticos excitados e eventualmente podem dar origem à emissão espontânea de uma “partícula” do núcleo passando de um núcleo “pai” para outro (filho) que possui um nível energético menos excitado ou fundamental. Essas partículas podem ser alfa, elétron, pósitron ou fóton da radiação gama, sendo esse fenômeno denominado desintegração ou decaimento nuclear, ou desintegração ou decaimento radiativo.

Os isótopos instáveis são radioativos e conhecidos por radioisótopos.

Nos isótopos estáveis não percebemos a desintegração radioativa, portanto não são radioativos.

Como exemplo temos o elemento carbono, onde possui dois isótopos estáveis ( $^{12}\text{C}_6$ ,  $^{13}\text{C}_6$ ) e alguns radioisótopos ( $^{11}\text{C}_6$ ,  $^{14}\text{C}_6$ ,  $^{15}\text{C}_6$  etc), onde o índice superior indica o número de prótons mais o de nêutrons no núcleo, chamado número de massa (A), e o índice inferior, representa o número de prótons no núcleo, chamado de número atômico (Z). Subtraindo esses índices, teremos o número de nêutrons do núcleo.

Na natureza encontramos somente elementos com número atômico de 1 (hidrogênio) à 92 (urânio), os outros de Z 93 a 103 são produzidos artificialmente. Os elementos com Z superior a 82 (chumbo), se desintegram, passando de um núcleo a outro, através de uma série, transformando num isótopo estável de chumbo.

No avanço da tecnologia, foram desenvolvidos reatores nucleares e aceleradores de partículas, capazes de produzir grandes quantidades de isótopos radioativos artificiais, usados em pesquisa nas diversas áreas da Ciência, Medicina e Indústrias.

### **7.1 – Desintegração Radioativa**

Na desintegração radioativa, o núcleo emite espontaneamente uma partícula alfa (um núcleo de  $^4_2\text{He}$ ), uma partícula beta (um elétron ou um pósitron) ou um gama (um fóton), adquirindo uma configuração mais estável. Vejamos o caso do iodo-131, utilizado em Medicina Nuclear para exames de tireoide, que possui a meia-vida de oito dias. Isso significa que, decorridos 8 dias, atividade ingerida pelo paciente será reduzida à metade. Passados mais 8 dias, cairá metade desse valor, ou seja, 1/4 da atividade inicial e assim sucessivamente. Após 80 dias (10 meias-vidas), atingirá um valor cerca de 1000 vezes menor. Entretanto, se for necessário aplicar-se uma quantidade maior de iodo-131 no paciente, não se poderia esperar por 10 meias-vidas (80 dias), para que a atividade na tireoide tivesse um valor desprezível. Isso inviabilizaria os diagnósticos que utilizam material radioativo, já que o paciente seria uma fonte radioativa ambulante e não poderia ficar confinado durante todo esse período.

Para felicidade nossa, o organismo humano elimina rápida e naturalmente, via fezes, urina e suor, muitas das substâncias ingeridas. Dessa forma, após algumas

horas, o paciente poderá ir para casa, sem causar problemas para si e para seus familiares. Assim, ele fica liberado mas o iodo-131 continua seu decaimento normal na urina armazenada no depósito de rejeito hospitalar, até que possa ser liberado para o esgoto comum.

### 7.1.1 – Meia-vida ( $T_{1/2}$ )

As fontes radioativas possuem muitos átomos e não é possível dizer quando um núcleo irá se desintegrar. Há possibilidade de prever que, em média, após um certo intervalo de tempo, denominado meia-vida ( $T_{1/2}$ ), metade dos átomos (núcleos) terão se desintegrado. Em seguida, no mesmo intervalo de tempo, metade dos átomos remanescentes sofrerá decaimento. A meia-vida é característica de cada radioisótopo, sendo que aquele que possui meia vida longa decai mais lentamente que aquele com meia-vida curta.

As meias-vidas dos radioisótopos variam de um segundo a muitos milhões de anos, portanto nos radioisótopos com aplicação na Biologia deve estar dentro de um intervalo de tempo limitado. Como exemplo temos, a meia-vida do iodo ( $^{131}_{53}\text{I}$ ), aplicado no estudo da tireóide, é de 8 dias, enquanto que a do  $^{15}_8\text{O}$ , usado na investigação respiratória, é de 2,1 minutos e a do  $^{14}_6\text{C}$ , pesquisando o comportamento metabólico de proteínas, açúcares e gorduras, é de 5.760 anos.

**Gráfico 1** – Decaimento exponencial de uma fonte de  $^{198}\text{Au}$  radioativo, com escalas lineares.

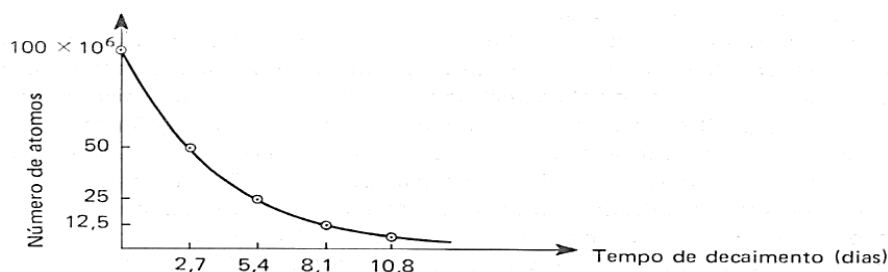


Figura 5.1 – Gráfico do decaimento exponencial de uma fonte de  $^{198}\text{Au}$  radioativo, com escalas lineares.

**Fonte:** OKUNO, E ; CHOW , C . & CALDAS . I .

O tipo de curva apresentado no diagrama acima, apresenta um decaimento exponencial com o tempo. A desintegração radioativa segue a lei exponencial cuja característica é de um fenômeno de natureza estatística, onde cada núcleo em uma

amostra de material radioativo possui uma certa probabilidade de desintegração, mas não se pode conhecer, antecipadamente, qual núcleo se desintegrará num dado intervalo de tempo.

### 7.1.2 – Relações Matemáticas Importantes

Podemos representar matematicamente o decaimento exponencial, conhecendo-se a constante de decaimento  $\lambda$ , ou seja, a probabilidade de desintegração por unidade de tempo com a seguinte equação:  $N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ , onde temos  $N_0$ , como sendo o número de átomos inicialmente presentes,  $N$  o número de átomos que ainda não se desintegraram após um intervalo de tempo  $t$  e  $e$  a base dos logaritmos naturais ou neperianos.

Outra maneira matematicamente que se pode expressar o  $N$ , que é o número de átomos radiativos, que ainda não se desintegraram após um tempo  $t$ , conhecendo a meia-vida  $T_{1/2}$  e o  $N_0$ , número de átomos presentes no instante inicial  $T_0$ , pode ser

$$N = \frac{N_0}{2^{\frac{t}{T_{1/2}}}} = N_0 \left[ 2^{-\left(\frac{t}{T_{1/2}}\right)} \right]$$

Quando calculamos  $N$  para  $t = T_{1/2}$ ,  $2T_{1/2}$ ,  $3T_{1/2}$ , temos respectivamente,  $N_0/2$ ,  $N_0/4$ , e  $N_0/8$ , facilitando para  $t$  igual a números interiores de  $T_{1/2}$ .

## 8 – PRINCIPAIS GRANDEZAS E UNIDADES DE FÍSICA DAS RADIAÇÕES

A partir do momento que se reconheceu a capacidade das radiações na destruição de tremores, surgiu então a necessidade de especificá-las e medi-las. A medida que os conhecimentos foram se ampliando, novas grandezas foram sendo introduzidas.

## **8.1 – Exposição**

Foi a primeira grandeza introduzida na área específica da Física da Radiação, no ano de 1928, mas inicialmente foi definida de uma forma muito confusa. Somente em 1962, após várias tentativas, no processo, conseguiu eliminar a confusão. Redefiniram a exposição sendo uma grandeza que caracteriza o feixe de raios x e gama e mede a quantidade de carga elétrica produzida por ionização, no ar, por essa radiação, por unidade de massa do ar. Inicialmente a unidade de exposição adotada foi o roentgen (R). A partir de 1985, houve uma recomendação para substituir essa unidade, por outra no Sistema Internacional, que foi o Coulomb por quilograma (C/kg), sendo  $1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$ . Por exemplo, uma exposição para radiografar um abdômen é de 0,15 mC/kg (milésimo de Coulomb por quilograma), equivalente a 0,6 R.

## **8.2 – Dose Absorvida**

Sendo a exposição, definida em comparação com a ionização no ar, não era adequada para medir a quantidade de radiação absorvida por uma parte do corpo, por exemplo, não podendo ser usada em radioterapia.

A partir de 1950, foi introduzida uma nova grandeza física, denominada de dose absorvida, definida como sendo a energia média cedida pela radiação ionizante à matéria por unidade de massa dessa matéria. A vantagem dessa grandeza é que pode ser definida para qualquer tipo de radiação ionizante e qualquer meio, ao contrário da exposição, que era definida somente para raios x e gama em um dado meio, o ar. Essa unidade, o rad, foi definida de tal forma que uma exposição à radiação x ou gama de 1R resultasse em uma dose absorvida pelo tecido mole de aproximadamente 1 rad. No ano de 1975 foi recomendada a substituição do rad pelo gray (Gy), nova unidade do Sistema Internacional de Unidades. O gray corresponde a 1 J/kg o equivalente a 100 rad. Atualmente, em radioterapia, uma dose típica absorvida pelo tumor é de 2 Gy (200 rad) por cada aplicação.

### **8.3 – Dose Equivalente**

Dependendo do tipo de radiação, para uma mesma dose absorvida, o efeito biológico poderá ser diferente para cada indivíduo. A partir, de 1962, foi introduzida uma grandeza especial para fins de proteção radiológica, que é definida multiplicando-se a dose absorvida por um fator numérico, adimensional, denominado fator de qualidade, possibilitando concluir que quanto maior o número de ionizações produzidas por unidade de comprimento, tanto maior será o dano.

Conclui-se que para prótons, nêutrons, partículas alfa e íons mais pesados recomenda-se o uso do valor 25 para o fator de qualidade. Para os raios beta emitidos pelo trítio recomenda-se o valor 2 e para raios x, gama e elétrons com energia superior a 0,030 MeV, que são os tipos de radiações a que mais comumente estamos expostos o valor de 1, para o fator de qualidade. Foi analisando que embora uma partícula alfa dificilmente atravesse a pele, ela provoca um dano biológico 25 vezes maior que um fóton de raio x, para a mesma dose absorvida, se ela foi emitida no interior do corpo. Essa grandeza foi denominada dose equivalente. A partir de 1979, a unidade adotada para essa grandeza, no Sistema Internacional de Unidades, em substituição ao rem, foi o sievert (Sv), sendo  $1 \text{ Sv} = (1\text{Gy}) \times (\text{fator de qualidade}) = 1\text{J/kg} = 100 \text{ rem}$ . Uma pessoa, anualmente, está submetida a uma dose equivalente, vindo das radiações naturais, em média de ordem de  $1 \text{ mSv} = 100 \text{ mrem}$ .

### **8.4 – Atividade de uma amostra radioativa (A)**

Chamamos de atividade de uma amostra ao número de átomos que se desintegram por unidade de tempo. A atividade radioativa de uma fonte, diminui para a metade do valor anterior após cada meia-vida física, esse tipo de diminuição é denominado decaimento exponencial, medindo a velocidade de desintegração dos átomos;

$$A = \frac{-dN}{dt} = \lambda \cdot N$$



Concluimos que, para:

$$t_0 \rightarrow \lambda \cdot N_0 = A_0$$

$$t \rightarrow \lambda \cdot N = A$$

$$\frac{A}{A_0} = \frac{\lambda \cdot N}{\lambda \cdot N_0} = \frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

$$A = e^{-\lambda t} \rightarrow A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Em que:

$A_0$  = atividade num instante inicial

$A$  = atividade após decorrido um tempo  $t$

$t$  = tempo decorrido

$\lambda$  = constante de desintegração radioativa, que é uma característica de cada elemento

$e$  = base neperiana

No Sistema Internacional de Unidades, a unidade de atividade é o becquerel, sendo sua abreviação Bq e seu plural becqueréis sendo 1 Bq correspondendo 1 desintegração por segundo. Essa unidade foi introduzida para substituir o Curie, Ci, como referência, foi definido como sendo a atividade de 1g do elemento rádio, correspondendo a  $3,7 \cdot 10^{10}$  desintegrações por segundo.

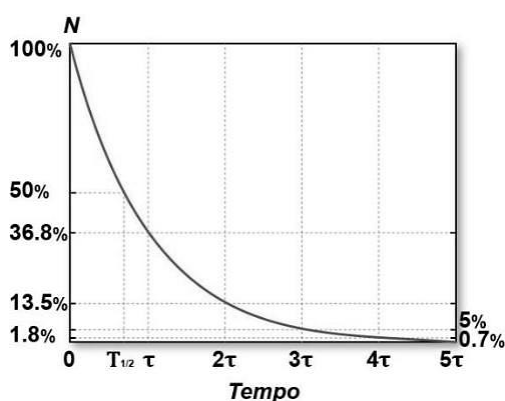
Para as radiações que comumente o ser humano, está mais exposto, ou seja, raios x, raios gama e elétrons, as unidades antigas são mais vantajosas, mas por outro lado, as novas unidades do sistema internacional facilitam os cálculos. Recomenda-se usar as Unidades do Sistema Internacional, mas tem se encontrado dificuldade para a aceitação completa, pela comunidade geral e mesmo a científica. Verificou-se que após o acidente de Chernobyl alguns autores continuam usando em seus artigos e reportagens as unidades antigas de medida da radiação, enquanto outros, as novas.

**Quadro 2:** Algumas grandezas e unidades de Física das Radiações e suas relações

Grandeza	unidade antiga	unidade nova no Sistema Internacional
Exposição	roentgen (R)	coulomb/quilograma(C/kg) 1 R=2,58.10 <sup>-4</sup> C/kg
Dose absorvida	rad	Gray (Gy) 1 rad=0,01 Gy = 0,01 J/kg
Dose equivalente	rem	sievert (Sv) 1 rem=0,01 Sv = 0,01J/kg
Atividade	curie (Ci)	becquerel (Bq) 1 Ci= 3,7 . 10 <sup>10</sup> Bq= 3,7 . 10 <sup>10</sup> s <sup>-1</sup>

**Fonte:** OKUNO, E. Radiação: Efeitos, Riscos e Benefícios –p 25

Conhecida a atividade radioativa de uma amostra, podemos calcular em gramas, a massa do nuclídeo.

**Gráfico 2-**Decaimento da atividade radioativa em função do tempo

**Fonte:** SCAFF , L. A . M – Bases Físicas da Radiologia. Brasil , Sarvier , 1979.

Quando colocamos em um papel semi-log a atividade de uma amostra em função do tempo, obteremos uma reta de inclinação negativa, onde o ponto de interseção com o eixo das ordenadas (log), nos dará a atividade no instante inicial, no mesmo eixo, o valor da metade da atividade inicial, nos dará o valor correspondente no eixo das abscissas, sendo a meia-vida física do elemento avaliado. O coeficiente angular desta reta será a constante de desintegração ( $\lambda$ ) do elemento radioativo.

## 9 – LEIS DA DESINTEGRAÇÃO RADIOATIVA

A desintegração radioativa envolve a emissão ou de uma partícula ou de uma partícula do núcleo do átomo que irá se desintegrar. Nessa desintegração teremos a modificação do núcleo original e, portanto, o número de átomos do elemento que se desintegra (pai) é reduzido, como consequência, aumento o número de átomos do elemento produzido na desintegração. O processo físico da desintegração só pode ser discutido no campo probabilístico.

Considere que em um instante  $t = 0$ , tenhamos um número inicial ( $N_0$ ) de átomos radioativos. Após certo tempo  $t$  ( $t > t_0$ ), teremos  $N$  átomos radioativos, pois o número provável de átomos que desintegrará na unidade de tempo será:

$$\lambda \cdot N \quad (\lambda = \text{probabilidade para que o átomo se desintegre na unidade de tempo}).$$

Sabendo que cada desintegração reduz o número  $N$ , podemos representar o número provável de desintegrações por unidade de tempo.

$$\frac{-dN}{dt} \quad (\text{o sinal negativo significa que } N \text{ decresce com o tempo})$$

Portanto, temos:

$$\frac{-dN}{dt} = \lambda \cdot N \quad \text{ou} \quad dN = -\lambda \cdot dt, \text{ integrando}$$

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \cdot \int_{t_0}^t dt$$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda \cdot t$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda \cdot t \rightarrow e^{-\lambda t} = \frac{N}{N_0} \text{ ou } N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Onde:

$N_0$  = número de átomos no instante inicial

$N$  = número de átomos decorrido certo tempo  $t$

$\lambda$  = constante de desintegração radioativa, característica de cada elemento.

$t$  = tempo decorrido

$e$  = base neperiana

### 9.1 – Meia-Vida Física ( $T_{1/2}$ )

É considerado como sendo o tempo necessário para que um certo radioisótopo tenha o seu número de desintegração por unidade de tempo reduzido à metade.

Analisando a expressão anterior:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad \text{e} \quad \text{tomando } N = \frac{N_0}{2}, \text{ temos}$$

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \rightarrow \frac{1}{2} = \frac{e^{-\lambda \cdot t}}{1}$$

$$2 = e^{\lambda \cdot t} \quad (\text{onde } t \text{ é a meia-vida } T_{1/2})$$

$$2 = e^{\lambda \cdot T_{1/2}}$$

$$\lambda \cdot T_{1/2} = \ln 2 \rightarrow \lambda \cdot T_{1/2} = 0,693$$

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}$$

### 9.2 – Meia-Vida Biológica ( $T_B$ )

É o tempo necessário para que a metade da quantidade de um elemento (radioativo ou não), ingerido pelo organismo seja eliminado pelas vias normais.

### 9.3 – Meia-Vida Efetiva ( $T_E$ )

A meia-vida efetiva depende da meia-vida física e meia-vida biológica. Isso implica na dose de radiação recebida por um órgão, quando nele existe um material agregado. Conclui-se então que o tempo em que a exposição a radiação desse órgão ou tecido fica reduzida a metade é denominado meia-vida efetiva.

$$TE = \frac{T_{1/2} \cdot T_B}{T_{1/2} + T_B}$$

A meia-vida efetiva é normalmente menor que a meia-vida física, podemos observar pela equação acima, que seus valores poderão se aproximar quando a meia-vida biológica tiver um valor bem grande.

#### **9.4 – Vida Média:**

Todo material radioativo, tem teoricamente, uma duração infinita. A vida média de um elemento radioativo, é avaliada como sendo a soma das idades de todos os seus átomos, dividida pelo número total de átomos nele existentes.

## **10 – IONIZAÇÃO**

A ionização acontece quando as partículas carregadas ( ou ) passam por perto de um átomo, e existem entre as mesmas e os elétrons orbitais a atuação de forças eletrostáticas. Quando a partícula passa muito perto, pode acontecer que um dos elétrons adquira energia suficiente e necessária para se separar do átomo. A esse processo dá-se o nome de “ionização”.

Chama-se ionização específica ao número de pares de íons produzidos por mm de trajetória percorrida pela partícula ionizante no ar a C.N.T.P. (Condições Normais de Temperatura e Pressão). A ionização específica é inversamente proporcional à velocidade da partícula ionizante.

A “excitação” é outro processo relacionado com a ionização, que acontece quando a energia cedida ao elétron é insuficiente para retirá-lo do átomo, mas suficiente para que ele adquira uma energia maior dentro do mesmo.

O átomo que é excitado, volta ao seu estado normal, emitindo energia (luz) de comprimento de onda característico.

Analisando as três radiações ( $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ ) pode se verificar que a mais penetrante é a gama e a menos penetrante a alfa; que nos leva a concluir que o poder de ionização é inversamente proporcional à penetração.

## 11 – ABSORÇÃO DE PARTÍCULAS ALFA E BETA

O comprimento da trajetória das partículas carregadas está inteiramente ligado com a energia inicial da mesma, constituindo o que chamamos de “alcance” de partícula no meio considerado.

As partículas  $\alpha$ , devido a sua alta ionização específica, o seu “alcance” em um dado meio é pequeno, não sendo possível estabelecer uma expressão matemática, para a dimensão do alcance no ar a C.N.T.P. A relação empírica que nos fornece o alcance das partículas no ar com relativa precisão é:

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

$R_{ar}$  = alcance no ar em cm

$E$  = energia de partículas em MeV, sendo que para outras substâncias podemos usar a regra de “Bragg – Kleeman”.

$$R = 3,2 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\sqrt{A}}{\mu} \cdot R_{ar}$$

onde:

$R$  = alcance em cm no determinado meio

$A$  = número de massa do meio

$\mu$  = densidade em  $\text{g/cm}^3$  do meio

$R_{ar}$  = alcance em cm da partícula  $\alpha$  no ar.

As partículas são emitidas pelo núcleo com uma velocidade muito grande, aproximadamente  $0,33.c$  ( $c$  = velocidade da luz no vácuo), essas partículas ao se aproximar dos elétrons de um átomo, são desviadas perdendo energia.

## **12 – USO DAS RADIAÇÕES EM BIOLOGIA**

Na biologia as aplicações das radiações são feitas em pesquisas básicas nos campos da genética, da fisiologia, da botânica, etc.

No estudo de transporte nas plantas, observa-se que o dióxido de carbono é absorvido pela folha das plantas participando do processo da fotossíntese, onde são produzidos os carboidratos.

O traçador radioativo é o método utilizado para determinar o transporte e a localização desses carboidratos.

Uma técnica muito comum empregada é a da auto-biografia, que consiste em colocar a planta toda exposta ao gás radioativo, em seguida as folhas e as porções da haste são removidas e colocadas entre filmes de raio x, onde as partículas beta do  $^{14}\text{C}$ , vão sensibilizar a chapa fotográfica. Após a revelação, observou-se locais claros e escuros, sendo os últimos os locais com maior concentração de átomos radioativos. No experimento observa-se uma maior concentração de carboidrato no sistema vascular da folha do vegetal. Também foi observado que entre folhas jovens e adultas, verificou-se uma maior concentração nos primeiros, sendo suas necessidades maiores para seu próprio desenvolvimento.

Percebe-se que esse tipo de informação tem sido muito difícil de obter com outras técnicas comumente usadas e conhecidas.

## **13 – APLICAÇÃO DA RADIAÇÃO NA MEDICINA**

No trabalho apresentado até aqui, temos a impressão de que as radiações são os vilões da ciência. Não é bem por aí, pois mostraremos a seguir o outro lado das pesquisas, onde suas aplicações são muito importante.

Nas ciências médicas, por outro lado, as aplicações são feitas num campo genericamente denominado radiologia, que amplamente está distribuído em radioterapia, radiologia diagnóstica e a medicina nuclear.

### ***13.1 – Uso da Radiação na Radioterapia***

A radioterapia é utilizada na destruição do tumor pela absorção da energia da radiação incidente, tendo como princípio básico maximizar o dano ao tumor e minimizar o dano em tecidos vizinhos normais, o que se consegue irradiando o tumor de várias direções. A radiação deve ser mais energética, se o tumor for mais profundo. A bomba de cobalto é uma fonte radioativa de cobalto-60, que é utilizada para tratamento do câncer de órgãos que estão mais profundos.

As fontes de césio-137, que foram bastante utilizadas na radioterapia estão sendo desativadas, pois a energia da radiação gama emitida pelo césio-137 é relativamente baixa, quando comparada com a nova geração de aparelhos de radioterapia que são os acelerados lineares. Esses dispositivos, tem por finalidade, acelerar os elétrons até atingirem uma energia de 22 MeV, que quando incidem em um alvo, produzem raios x com energia, bem mais alta que os raios gama do césio-137 e do cobalto-60, que atualmente são utilizados na terapia de tumores de órgãos mais profundos como o pulmão, a bexiga, o útero etc.

A radioterapia hoje em dia é um fator muito importante no tratamento de pessoas com câncer, pois com a aplicação da radiação muitos indivíduos são curados ou se



não tem uma melhoria significativa na qualidade de vida, durante o tempo que ainda lhe resta.

Atualmente a radioterapia se divide em dois métodos de aplicação. O primeiro trata-se da teleterapia, onde a fonte radioativa é colocada a muitos centímetros da região a ser tratada. Nesse método os equipamentos utilizados podem ser de quilovoltagem, de megavoltagem e de teleisotopoterapia, onde se emprega isótopos radioativos, sendo os mais comuns  $^{60}\text{C}$  e  $^{137}\text{Cs}$ , ocorrendo a dose máxima a 5mm de profundidade da pele, caindo lentamente para atingir 52% a 10cm da pele e de 20% a 25% a 25cm da pele. A aplicação de telecobalto é mais vantajosa por ser mais compacta, além de não ter um largo espectro de energia como no caso de raios x.

O segundo método denominado Braquiterapia, permite que a fonte fique em contato com o tecido a ser tratado, ou seja implantado no mesmo. A grande vantagem da Braquiterapia é que possibilita irradiar o tumor com uma dose alta e os tecidos vizinhos que estão normais, com dose mínima, bem menor que no da teleterapia. Esse tratamento é muito utilizado no câncer ginecológico. As aplicações na Braquiterapia, podem ser externa, intracavitária ou intersticial, podendo nas últimas as aplicações ser temporária ou permanente.

### ***13.2 – Uso da Física da Radiação nos diagnósticos***

O uso da radiologia diagnóstica consiste na utilização de um feixe de raios x, que em sua transmissão através de parte do corpo, após a absorção por diferentes tecidos, teremos a obtenção de imagens do interior do corpo através de uma chapa fotográfica, ou em uma tela fluoroscópica, ou ainda em uma tela de TV. A absorção dos raios x não é a mesma para todos os tecidos, onde no organismo humano, gorduras, tecidos moles e ossos podem ser distintos numa chapa de raios x, isso ocorre devido a diferença de densidade e número atômico médio dos diferentes materiais analisados.

O profissional, ao examinar uma chapa, pode analisar as estruturas anatômicas do paciente, descobrindo qualquer anormalidade existente. As imagens obtidas podem ser estáticas ou dinâmicas. Como exemplo podemos citar as imagens visualizadas na TV, no exame de cateterismo, que permite ao médico verificar o funcionamento cardíaco. O aspecto dinâmico desse exame radiológico é excelente onde o mesmo pode ser gravado por equipamento de vídeo tape, permitindo registrar seqüências de detalhes do exame, podendo ser de grande importância para estudos posteriores e também para fins didáticos.

Na radiografia convencional, as imagens de todos os órgãos são superpostas e projetadas no plano do filme, sendo que as estruturas normais podem mascarar ou interferir na imagem de tumores ou regiões anormais. A distinção entre o ar, o tecido mole e o osso é feita facilmente em uma chapa fotográfica, o que não ocorre entre os tecidos normais e anormais que apresentam uma pequena diferença na absorção de raios x.

Outro procedimento necessário, para a visualização de alguns órgãos do corpo é quando é injetado ou ingerido o que se chama de contraste, que pode absorver mais ou menos raios x que os tecidos vizinhos. Comumente os contrastes mais comuns utilizados são o ar, compostos de iodo e de bário. Como o ar é pouco absorvedor de raios x, é utilizado em pneumoencefalograma. O composto de iodo é injetado no fluxo sanguíneo, obtendo imagens das artérias e o composto de bário são ingeridos para radiografar o trato gastrintestinal, esôfago e estômago, portanto esses contrastes não são e nem se tornam radioativos.

Em 1972 a firma inglesa EMI desenvolveu comercialmente a tomografia computadorizada, causando grande revolução na área de radiologia diagnóstica. Essa técnica consiste em fazer a reconstrução tridimensional, por computação, da imagem, possibilitando a visualização de uma fátia do corpo, sem a superposição de órgãos. A tomografia computadorizada é um sistema que produz imagens com detalhes que não são visualizados em uma chapa convencional de raios x.

A tabela abaixo nos mostra os valores de exposição na entrada da pele em um paciente padrão; para diferentes radiografias, por chapa. Os diferentes valores de exposição são devido a condição do equipamento e técnicas diferentes utilizadas pela clínica de radiologia. A dose no paciente pode ser reduzida sem alterar o filme e a informação diagnóstica. Numa tomografia cerebral, pode se ter na exposição na entrada da pele no plano da imagem uma dose da ordem de 2.000 a 3.000 mR.

**Quadro 3** : Exposição (mR) na entrada da pele, por radiografia

Órgão	EXPOSIÇÃO (mR)		
	Mínima	Máxima	Média
Pulmão	2	283	17
Crânio Lateral	55	734	163
Abdômen	44	6.668	508
Coluna Torácica	119	1.238	606
Coluna Cervical	14	1.600	149
Coluna Lombossacral	62	4.985	645

**Fonte:**, Three Years of Next na Analysis – Hew Publication (FDA), 1977.

### **13.3 – Física Nuclear na Diagnose Médica**

As técnicas da Física Nuclear e os radionuclídeos são usados na Medicina para o tratamento e estudo de doenças. A grande diferença entre o uso de raios x e o de radionuclídeos na diagnose está no tipo de informação obtida. No primeiro caso, a obtenção de dados é feita diretamente do paciente, como é o caso do mapeamento hepático com o colóide de enxofre marcado com o tecnécio metaestável  $^{99}\text{Tc}^m$ . O segundo caso consiste no composto radioativo que é administrado ao paciente, onde

as amostras de sangue ou da excreção são coletados para análise posterior. Esse processo também pode ser usado, no estudo de absorção da vitamina B<sub>12</sub> por paciente com anemia. Os radioisótopos podem ser usados em terapia, por exemplo, no tratamento de disfunção tireoideana.

Em 1927, teve-se o uso clínico do material radioativo, quando Herrmann Blumgart e Soma Weiss, injetaram na veia de um braço o radioisótopo natural rádio C(radon), e mediram o intervalo de tempo que este levou para chegar ao outro braço, usando como detector uma câmara de Wilson, permitindo estimar a velocidade do fluxo sanguíneo entre os dois braços. No ano de 1948 M. Prinzmetal, E. Cordey, obtiveram o primeiro radiocardiograma com um contador Geiger-Müller, após injetar intravenosamente, o Cloreto de Sódio marcado com o sódio radioativo <sup>24</sup>Na.

Com o aparecimento de novas tecnologias e o desenvolvimento de aceleradores nucleares como o ciclotron, e de reatores nucleares, têm se produzido radionuclídeos artificiais em grande escala, os quais são usados na marcação de compostos para estudos biológicos, bioquímicos e médicos, onde a principal vantagem é a redução da meia-vida física dos elementos, acarretando uma dose baixa no paciente. Portanto para se utilizar radionuclídeos de meia-vida curta há a necessidade de instalação do ciclotron dentro do espaço físico do hospital, que como exemplo citamos o oxigênio-15, nitrogênio-13, carbono-11 e flúor-18, com meias-vidas físicas respectivamente de 2, 10, 20 e 110 minutos. A técnica da tomografia por emissão de pósitron (PET), consiste na obtenção de imagens, por radionuclídeos que emitem pósitron.

No estudo do metabolismo do glucose, incorpora-se, por exemplo, o flúor-18 a essa molécula, onde são feitos os mapeamentos das áreas cerebrais onde a substância se concentra em maior quantidade, havendo uma maior atividade cerebral localizada. Em conseqüência disso é possível até delimitar regiões cerebrais para cada idioma conhecido pelo paciente e até a zona de ideogramas das línguas japonesa e chinesa.

No momento ainda é difícil medir a dose de radiação recebida durante o exame usando a Medicina Nuclear, pois a mesma não é uniforme no corpo da pessoa que a

recebe, uma vez que os radionuclídeos possuem a tendência de se concentrar em certos órgãos, portanto existem cálculos teóricos feitos para o “homem referência” permitindo determinar as respectivas doses.

exame (mapeamento)	radiofármaco	atividade do radionuclídeo administrado (MBq)	dose no órgão (mGy)	dose nas gônadas (mGy)
cérebro	Tc <sup>*</sup> -99m (pertecnetato de sódio)	500	20 (intestino)	4
fígado	Tc-99m (colóide de enxofre)	150	20 (fígado)	0,85
pulmão	Tc-99m (macroagregado de albumina)	100	9 (pulmão)	0,3
osso	Tc-99m (pirofosfato)	500	60 (bexiga)	4
rim	I-131 (ácido hipúrico)	8	20 (bexiga)	0,2
tireóide	I-131 (iodeto de sódio)	0,3	80 (tireóide)	0,6

\* Tc = tecnécio.

**Fonte:** CAMERON, JR – Medical Physics USA, John Wiley - 1978

A Medicina Nuclear também é usada na terapia de certos tipos de tumores, usando a propriedade que certos radionuclídeos possuem de se acumular em determinados tecidos. Como exemplo temos o uso do iodo-131 na terapia de tumores malignos da tireoide, que após sua retirada cirurgicamente, é feito o mapeamento de todo o corpo do paciente para a verificação se existe metástase, que são células tumorais espalhadas pelo corpo. Se o resultado for positivo, o iodo-131 é administrado ao paciente, com uma atividade bem maior que a usada anteriormente para mapeamento, tendo assim um melhor resultado na finalidade terapêutica.

Nessa monografia são apresentadas as diferenças básicas entre a radioterapia e a terapia aplicada na medicina nuclear, onde o importante são as fontes radioativas utilizadas. Na primeira, usa-se fontes seladas nas quais o material radioativo não entra em contato direto com o paciente ou com os profissionais que os manuseiam, enquanto no segundo, os materiais radioativos não selados são ingeridos ou injetados para serem incorporados às regiões do corpo a serem tratadas. Com a utilização

dessas técnicas cada vez mais apuradas, a Medicina Nuclear está prolongando a existência das pessoas, salvando vidas e melhorando também a qualidade de vida de muitas pessoas.

## **14 – CONSEQUÊNCIAS DOS EFEITOS BIOLÓGICOS DAS RADIAÇÕES**

A radiação ionizante pode ser considerada o grande problema para nossa era moderna, podendo levar a óbito várias pessoas. Sua ação é microscópica. Quando as doses recebidas são altas, a síndrome aguda da radiação surge imediatamente após a exposição, e quando as doses são baixas os efeitos podem ocorrer alguns anos depois. Sendo a radiação ionizante invisível, inaudível, inodora, insípida e nós não possuímos sensores para medi-la não percebendo se fomos ou se estamos sendo irradiados. Isto é comprovado por exemplo quando se tira uma radiografia de qualquer parte do corpo e nós não sentimos absolutamente nada.

Desde 1899, o uso do raio x na terapia, apresentava, entretanto, alguns resultados desagradáveis. A partir deste momento não só os benefícios trazidos pela radiação, mas também seus efeitos danosos interessaram os cientistas de todo o mundo.

Com as análises microscópicas dos mecanismos básicos da radiologia, pode se observar que com a passagem da radiação e liberação de sua energia em volumes muito pequenos, onde essa energia liberada pode produzir ionização e excitação dos átomos e quebra de moléculas, formando íons e radicais livres altamente reativos; que com o ataque deles em moléculas de grande importância como a molécula de DNA (ácido desoxirribonucleico) do núcleo da célula, causa-lhe grandes danos. A consequência da destruição de uma molécula de DNA, é que a célula continua vivendo, mas não consegue se dividir, provocando assim sua morte e não sendo renovada. Ocorrendo isso com um número muito grande de células, acarreta o mau

funcionamento do tecido constituído por elas e como consequência tem-se a sua morte.

Recentemente nos estudos sobre diferentes tipos de linfócitos humanos, teve-se uma indicativa que a radiação ionizante diminui a função do linfócito T, produzindo uma condição de imunodeficiência adquirida semelhante àquela causada pelo vírus da AIDS.

O organismo humano tem cerca de 75 trilhões de células, que constituem a unidade básica da vida, onde cada órgão é formado por um conjunto de diversas células. A parte mais essencial da célula é o núcleo, onde se tem o centro de controle. Nesse componente encontramos os cromossomos que são estruturas nucleares filamentosas, formadas essencialmente pela molécula de ácido desoxirribonucleico (DNA), que contém os genes que se organizam linearmente nos cromossomos e são os responsáveis pelas informações genéticas. Os genes armazenam e transportam informações genéticas de uma célula para outra e também nas gerações, controlando a reprodução e funcionamento das células. O resultado do processo de variação da estrutura molecular dos genes ou de variação do número ou da estrutura dos cromossomos é denominado mutação. A mutação induzida por um agente externo é indistinguível de uma mutação “espontânea”, e, como esta, pode ser somática, não se transmitindo aos descendentes de pessoa irradiada, ao contrário da mutação germinal que ocorre em células da linhagem germinal, passando para as gerações futuras.

No organismo humano, a radiação ionizante pode desencadear várias reações, que poderão resultar até a sua morte ou induzir mutações em seu material genético. As mutações geralmente formadoras de características indesejáveis, sendo raras aquelas que poderão beneficiar seus portadores. Experimentalmente tem-se demonstrado que a maioria das lesões induzidas no D.N.A é reparada por mecanismos especiais existentes no interior das células.

### **14.1 – Estágios dos Efeitos Biológicos da Radiação**

Segundo, Emiko Okuno, em seu livro *Radiação Efeito, Riscos e Benefícios*, 1998, as reações causadas pelas radiações podem ser descritas em quatro estágios.

O primeiro tem uma duração muito pequena, da ordem de um quatrilionésimo de segundo, após o instante inicial de incidência da radiação, ocorrendo neste estágio o fenômeno físico da ionização e da excitação dos átomos do corpo humano, com a absorção de energia da radiação, que como consequência tem-se a ejeção do elétron do átomo e na excitação o mesmo ganha energia, passando para uma órbita mais energética.

O segundo estágio é denominado de físico-químico, onde as ligações químicas das moléculas são rompidas formando-se os radicais livres. Este estágio também tem uma duração curta, de aproximadamente, um milionésimo de segundo.

O terceiro estágio é considerado químico e tem uma duração de poucos segundos. Nele os radicais livres formados anteriormente, sendo altamente reativos, são ligados a moléculas importantes da célula por exemplo as proteínas, as enzimas ou na pior das hipóteses as moléculas de DNA, onde são danificadas. Existem mecanismos que as moléculas utilizam para corrigir os danos causados por radicais livres. As moléculas que constituem as vitaminas C ou E podem liberar facilmente elétrons que inativam os radicais livres. O próprio organismo possui maneiras de recompor moléculas lesadas pelos radicais livres, no entanto, é impossível impedir que todos os radicais livres produzam algum dano e também que todos os danos resultantes podem ser corrigidos, acumulando com o tempo em todo o organismo. Grande parte dos pesquisadores acreditam que o envelhecimento dos seres vivos seja causado pelos danos provocados pelos radicais livres e acumulados durante a vida.



Por último temos o quarto estágio, onde ocorrem os efeitos bioquímicos e fisiológicos, produzindo assim alterações morfológicas e ou funcionais, com duração variável desde horas até anos.

As moléculas podem ser lesadas pelo efeito da radiação, por algum tipo de mecanismo, dos quais podemos classificar em direto e indireto. O mecanismo direto consiste numa ação direta da radiação sobre a biomolécula considerada importante, como exemplo o DNA, e como consequência será desestruturado o seu material genético. No mecanismo indireto, a radiação atua nas moléculas da água, quebrando-as, pois as mesmas constituem cerca de 70% das células, causando um efeito indireto. Na ação desse mecanismo, tem-se como produto o radical livre hidroxila OH e outro oxidante que é o peróxido de hidrogênio, mais conhecido como água oxigenada, que são muito eficientes para produzir dano biológico, atacando as principais biomoléculas das células.

Ainda segundo Okuno, quando uma radiação passa através do corpo humano, quatro tipos de eventos podem ocorrer:

- 1) A radiação passa próximo ou através da célula sem produzir dano.
- 2) A radiação danifica a célula, mas ela é reparada adequadamente
- 3) A radiação mata a célula, ou a torna incapaz de se reproduzir.
- 4) O núcleo da célula é lesado, sem, no entanto, provocar morte celular. A célula sobrevive e se reproduz na sua forma modificada, podendo-se diagnosticar, anos mais tarde, células malignas nesse local.

## **14.2 – Efeitos Biológicos da Radiação**

Nos estudos dos mecanismos básicos da Física da Radiação, a radiobiologia nos permite fazer análise microscópicas do que ocorre com a passagem da radiação pelo organismo e a liberação de sua energia em volumes muito pequenos como

células ou partes de células. Essa energia liberada pode produzir ionização e excitação dos átomos e a quebra de moléculas, tendo como consequência a formação de íons e radicais livres altamente reativos, que podem atacar moléculas de grande importância como por exemplo o D.N.A, causando-lhe dano. A destruição de uma molécula de D.N.A, produz uma célula capaz de sobre existir, mas incapaz de se dividir, conseqüentemente levando a sua morte, e não sendo mais renovada. Quando isso ocorre com um número muito grande de células que constituem o tecido, sobrevém o mau funcionamento do mesmo e, por fim, a sua morte.

### **14.2.1 – Efeitos somáticos**

Os efeitos biológicos somáticos são aqueles que afetam diretamente o indivíduo exposto a radiação e não são transmitidos aos descendentes. Esses efeitos dependem de: tipo de radiação, profundidade atingida e tipo de tecido irradiado, área ou volume do corpo exposto, dose total recebida e finalmente o intervalo de tempo medido de radiação.

No homem; os efeitos somáticos mais importantes são:

a) Aumento da incidência de câncer:

É o mais temido entre os efeitos somáticos a longo prazo. Em laboratório, experiências realizadas com animais mostraram a possibilidade de induzir neles os mais variados tipos de tumores, dependendo da radiação empregada e a parte do corpo exposta.

Nos humanos há dados disponíveis, mostrando uma relação entre a exposição à radiação e leucemia, câncer de pele, da tireoide, dos ossos e do seio.

Foi constatado grande incidência de câncer nos ossos em pessoas que pintavam mostradores de relógios com o elemento rádio radioativo, no período de 1913 a 1925. Essas pessoas afinavam o pincel com a língua, ingerindo o rádio, onde nelas foi observada necrose nos ossos, causada pela radiação emitida pelo elemento

radioativo. Muitos desses indivíduos também desenvolveram câncer na boca e no esôfago.

b) Anormalidade no desenvolvimento do embrião

Nos organismos mais jovens existe uma maior sensibilidade a radiação, sendo inclusive a fase fetal que merece maiores cuidados, pois nesse período a radiação pode provocar deformações no feto.

c) Indução de Catarata:

Se o olho humano for diretamente atingido pela radiação, as células que morrem não são renovadas ou expelidas, como ocorre com outros órgãos do corpo. Se o número de células mortas for grande, ocorre a opacidade do cristalino, ocorrendo o que chamamos de catarata. O período latente entre a irradiação e a formação da catarata pode ser de meses ou anos.

d) Redução da vida média

A verificação desse efeito ocorreu em laboratórios, onde grandes números de animais foram irradiados e nos resultados estatísticos, observou um significado encurtamento da vida média nos animais irradiados.

Em estudos científicos observou também que a vida média dos radiologistas é inferior a de médicos de outras especialidade. Na década de 1960, estudos mostraram um aumento na taxa de mortalidade, entre 65 e 79 anos, de 15% para os radiologistas em comparação a outras especialidades.

### **14.2.2 – Efeitos hereditários**

Esses efeitos ocorrem quando existem mutações nas células reprodutoras que afetam as gerações futuras, em consequência da exposição dos órgãos reprodutores as radiações, podendo ocorrer uma alteração na informação genética codificada. Se

o ovócito ou o espermatozoide dos indivíduos forem danificados pela exposição à radiação, os novos indivíduos concebidos, terão em suas células os defeitos reproduzidos, incluindo aqueles que mais tarde irão se transformar em ovócitos e espermatozoides, podendo os efeitos resultantes da mutação original passar para as gerações futuras.

Existem algumas mutações que podem ser letais, causando a morte do feto mesmo antes do nascimento, enquanto outras produzem defeitos físicos ou mentais ou aumentam a suscetibilidade da origem de determinadas doenças crônicas.

Segundo, Juarez Marshall, em seu livro *Unprecedented Radiation Accident*, 1994, felizmente não foi detectado nenhum aumento de anormalidades genéticas entre os descendentes de Hiroxima e Nagasáqui, concluindo assim que a capacidade de recuperação das células germinativas é maior do que se pensava em tempos anteriores.

O organismo do indivíduo tem uma maior sensibilidade à radiação na fase embrionária, onde os efeitos somáticos são mais percebidos, podendo causar malformação física ou mental congênita ou ainda propiciar a criança a ter asma, bronquite ou leucemia. Segundo um estudo feito por Robert, L. *Science*, 238, 1997, na Dinamarca se o feto ou embrião for irradiado no útero da mãe com dose superior a 0,1 Gy, o aborto terapêutico é recomendado, dependendo se há algum outro fator agravante ou não.

Geralmente quanto mais jovem o organismo do indivíduo, mais sensível ele é a radiação. As células que constituem o organismo, apresentam diferentes sensibilidades aos efeitos somáticos da radiação ionizante, em função do tipo e da fase de seu ciclo de reprodução. As células que estão em divisão, ou as que são ativos metabolicamente, ou as que reproduzem mais rápido, tais como as células brancas do sangue, são mais sensíveis que aquelas altamente diferenciadas que constituem os músculos, os ossos e o tecido nervoso.

## 15 - CONCLUSÃO

Nesse trabalho ressaltamos a ligação entre a Física da Radiação, um dos ramos da Física Moderna com a Ciências Biológicas e Médicas, no nosso cotidiano. A Física presente nesse trabalho mostra a importância nos estudos, que se tornam mais quantitativos tanto em seus aspectos experimentais quanto teóricos, refletindo o uso, nesses campos de pesquisa, dos métodos e conceitos fundamentais da Física da Radiação. Outro tema ressaltado foi o emprego de equipamentos e dispositivos desenvolvidos para pesquisa físicas, necessários para a obtenção de informações mais completas e precisas em experiências biológicas e diagnoses médicas.

Nesse trabalho mostrou-se também os conceitos cientificamente importantes, ligados a Biologia e a Medicina, formulando hipóteses, julgamento e análises de resultados, obtendo uma metodologia de trabalho e de raciocínio envolvidos na Física da Radiação, sendo útil e auxiliando a outras atividades humanas.

Com técnicas cada vez mais aperfeiçoadas, a Física da Radiação aplicada a Medicina salva muitas e muitas vidas!

## 16 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEISER, A. **Conceitos de Física Moderna**. Brasil, Polígono e EDUSP, 1969.

CAMERON, J. R. **Medical Physics**. U.S.A., John Wiley, 1978.

CASARETT, A. **Radiation Biology**. U.S.A., Prentice Hall Inc., 1978.

CIÊNCIA HOJE. Suplemento 7: 14-17, março 1998.

CURIE, E. **Madame Curie**. Paris, Gallimard, 1968.

GONÇALVES, Giuliana; FARIAS, Josué; GONÇALVES, Tatiana. **Módulo Inovador USP: Radioatividade X Radiação**. Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo. São Paulo: USP, 2008. Disponível em: <http://paje.fe.usp.br/~mef-pietro/mef2/app.upload/86/RadiacaoXRradioatividade.pdf>

GUYTON, A. C. **Tratado de Fisiologia Médica**. 5ª ed. RJ, Editora Interamericana Ltda. 1977.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, S. K. **Física 3 e 4**. 5ª edição. Rio de Janeiro: Editora L.T.C. 5ª edição. 1996.

INÁCIO, Miguel Adriano. **Desenvolvimento de Compósito Cerâmico a Base de B4C Para Aplicação Como Blindagem de Radiação em Aplicações Espaciais**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2015. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/06.29.18.24/doc/publicacao.pdf>

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**. 4ª edição. São Paulo, Editora Edgar Blucher, 2002.

OKUNO, E. **RADIAÇÃO: Efeitos, Riscos e Benefícios**. São Paulo, HARBRA, 1998.

OKUNO, E.; CHOW, C. & CALDAS, I. L. **Física para Ciências Biológicas e Biomédicas**. São Paulo, HARBRA, 1982.

OLIVEIRA, S. V.; MOTA, H. C. **Notas do Curso básico de licenciamento e fiscalização em radiologia médica e odontológica**. Rio de Janeiro (RJ): IRD/CNEN; 1999.

Resolução CNEN - /87. Normas Básicas de Proteção Radiológica. Diário Oficial, 5132. Brasil, set 1987.

SCAFF, L. A. M. **Bases Físicas da Radiologia**. Brasil, Sarvier, 1979.

SILVA, A. M.; PINHEIRO, M. S. F.; FREITAS, N. E. **Guia para Normalização de Trabalhos Técnicos-Científicos**. Minas Gerais : Universidade Federal de Uberlândia, 2004.

TIPLER, P. A. **Física**. 4<sup>a</sup> ed., v 3. Rio de Janeiro : Editora LTC, 1997.