

# RADIAÇÕES IONIZANTES

Implicações e Aplicações na Saúde

Paulo Alberto de Lima Ramos

# RADIAÇÕES IONIZANTES

Implicações e Aplicações na Saúde

Paulo Alberto de Lima Ramos

Nas últimas décadas, o uso de radiações ionizantes tem contribuído significativamente para o avanço do diagnóstico e tratamento médicos. Atualmente, seria inconcebível a prática médica sem o auxílio das radiações ionizantes. No entanto, a sua utilização expõe profissionais, pacientes e as pessoas em geral aos riscos radiobiológicos potenciais.

Portanto, a compreensão das implicações do uso das radiações ionizantes é importante para todos aqueles que pretendam desempenhar atividades direta ou indiretamente relacionadas a elas nas diversas áreas da saúde.

Dessa forma, o texto que ora apresentamos, pretende transmitir fundamentos conceituais a estudantes que se iniciam nessa área do conhecimento.



Editora da  
Universidade Federal  
de Campina Grande



# RADIAÇÕES IONIZANTES

---

Implicações e Aplicações na Saúde

---

Paulo Alberto de Lima Ramos

Editora da Universidade Federal de Campina Grande

Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Thompson Fernandes Mariz  
Reitor

Prof. Dr. Edílson Amorim  
Vice-Reitor

Prof. Dr. Antonio Clarindo Barbosa de Sousa  
Diretor Administrativo da EDUF CG

Conselho Editorial da EDUF CG

Prof. Benedito Antonio Luciano – CEEI  
Prof. Carlos Alberto Vieira de Azevedo – CTRN  
Profª. Consuelo Padilha Vilar – CCBS  
Profª. Edjane E. Dias da Silva – CCJS  
Prof. José Helder Pinheiro – CH  
Prof. José Wanderley A. de Souza – CFP  
Prof. Onaldo Guedes Rodrigues – CSTR

Autor

Prof. Dr. Paulo Alberto de Lima Ramos

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG**

R175r Ramos, Paulo Alberto de Lima.

Radiações ionizantes: implicações e aplicações na saúde /  
Paulo Alberto de Lima Ramos. - Campina Grande, EDUF CG,  
2010.

120 p.

ISBN 978-85-8001-011-4

1. Ciências Biológicas. 2. Medicina. 3. Medicina Nuclear.  
4. Radiações Ionizantes. I. Título.

CDU-577.34

# RADIAÇÕES IONIZANTES

---

Implicações e Aplicações na Saúde

---

Paulo Alberto de Lima Ramos

Professor de Biofísica e Fisiologia  
Unidade Acadêmica de Medicina  
Centro de Ciências Biológicas e da Saúde  
Universidade Federal de Campina Grande.  
Mestre em Ciência – Universidade Federal de Pernambuco.  
Doutor em Medicina – Universidade de Barcelona.  
Especialista em Medicina Nuclear



Editora da Universidade Federal de Campina Grande  
Campina Grande – 2010

## SUMÁRIO

Apresentação .....	7
Radiações .....	9
Estrutura da matéria .....	13
Radiação X .....	33
Radioatividade .....	39
Interações das radiações com a matéria .....	50
Magnitudes e unidades radiológicas .....	54
Efeitos biológicos das radiações .....	57
Mecanismos celulares de reparo de DNA .....	70
Detecção e medida das radiações .....	77
Radioproteção .....	89
Aplicações das radiações ionizantes em saúde .....	99
Bibliografia .....	120

## APRESENTAÇÃO

Este texto foi organizado para servir como fonte de informação teórica para estudantes de graduação em ciências da saúde, especialmente para os cursos de Medicina e Enfermagem.

A sua elaboração deve-se à necessidade de oferecer as bases conceituais de um importante núcleo de conhecimento para a formação técnica de profissionais em saúde, as radiações ionizantes.

Nas últimas décadas, o uso de radiações ionizantes tem contribuído significativamente para o avanço do diagnóstico e tratamento médicos. Atualmente, seria inconcebível a prática médica sem o auxílio das radiações ionizantes. No entanto, a sua utilização expõe profissionais, pacientes e as pessoas em geral aos riscos radiobiológicos potenciais. Portanto, a compreensão das implicações do uso das radiações ionizantes é importante para todos aqueles que pretendam desempenhar atividades direta ou indiretamente relacionadas a elas nas diversas áreas da saúde. Dessa forma, o texto que ora apresentamos, pretende transmitir fundamentos conceituais a estudantes que se iniciam nessa área do conhecimento.

Inicialmente, o texto introduz aspectos físicos das radiações em geral, a estrutura do átomo e a organização da matéria, para, em seguida, dedicar-se à caracterização das radiações ionizantes e suas possíveis interações com a matéria para permitir ao leitor a compreensão dos princípios dos sistemas de detecção e medida das radiações. No estudo dos fenômenos radiobiológicos, o texto aborda os mecanismos de dano aos componentes celulares, suas consequências e os sistemas celulares de defesa contra os danos radiobiológicos, estabelecendo as bases conceituais da radiobiologia e da radioterapia.

O uso das radiações ionizantes em saúde impõe o conhecimento de normas sanitárias e procedimentos da atuação para a proteção radiológica de pessoas e do ambiente. Esse núcleo de conhecimento é indispensável para a formação de profissionais para a área de saúde.

Finalmente, são apresentados os fundamentos das aplicações das radiações ionizantes em saúde, estabelecendo as bases conceituais da Radiologia e da Medicina Nuclear.

# RADIAÇÕES

**Radiação** é toda forma de energia em propagação. As radiações têm em comum a capacidade de produzir trabalho ao interagir com a matéria. Podemos reconhecer três diferentes grupos de radiações:

1. Radiações mecânicas ou elásticas.
2. Radiações inelásticas ou eletromagnéticas.
3. Radiações corpusculares.

Antes de estudarmos as características dos vários grupos de radiações, introduziremos alguns conceitos básicos para a sua compreensão.

**Oscilações.** Qualquer movimento que se repete em intervalos de tempos iguais constitui um movimento periódico. As oscilações ou vibrações resultam de movimentos periódicos. São movimentos oscilatórios aqueles realizados por: cordas de instrumentos musicais, uma massa presa a uma mola, pêndulos, átomos que compõem moléculas ou em uma rede cristalina e moléculas de ar atingidas por uma onda sonora. Todos esses exemplos constituem sistemas mecânicos oscilantes. No entanto, não apenas esses sistemas podem oscilar, também oscilam ondas de rádio, microondas e de luz visível, pois elas são campos elétricos e magnéticos oscilantes.

Para uma completa caracterização do movimento periódico, tomemos como exemplo o pêndulo, um sistema físico que apresenta movimento oscilatório.

**Pêndulo simples.** O pêndulo simples é um corpo ideal que consiste de uma massa puntiforme suspensa por um fio leve e inextensível. Inicialmente, o pêndulo se encontra estacionário ocupando a posição de equilíbrio (0). Neste instante, o afastamos de sua posição de equilíbrio transferindo-lhe energia. O pêndulo oscilará em um plano vertical sob a ação da gravidade, deslocando-se para a direita e para a esquerda entre duas posições, 1 e 2, passando pela posição inicial (0). Supondo a inexistência de atritos entre as partes mecânicas do pêndulo e dele com o ar, o movimento será contínuo.

No caso do pêndulo simples, consideremos um movimento periódico completo: o corpo passa pelo ponto de equilíbrio "0" em direção a posição 1, onde seu movimento cessa momentaneamente. Em seguida, desloca-se para a posição 2, passando pelo ponto "0" e, outra vez, se move em direção a posição 1. Ao alcançar a posição inicial, o pêndulo realizou uma oscilação completa.

A representação gráfica do deslocamento do pêndulo em função do tempo é expresso pela função seno e cosseno sendo, por isso, denominado movimento harmônico.

Para um sistema em movimento oscilatório podemos definir vários parâmetros para caracterizá-lo, tais como:

1. Período. O período (T) de um movimento harmônico é o tempo necessário para a realização de uma oscilação completa. O período tem por unidade o segundo (s).
2. Frequência. A frequência ( $\nu$ ) é o número de oscilações completas realizadas em um segundo e tem como unidade o Hertz (Hz) ou ciclo/segundo.

A frequência mostra relação inversa com o período:

$$\nu = v / T$$

Onde  $v$  é a velocidade da oscilação.

3. Elongação. A elongação é a distância entre o ponto "0" e uma posição qualquer ocupada pelo corpo em movimento.

4. Amplitude. Denominamos amplitude ( $A$ ) a distância máxima ocupada pelo móvel, ou seja, a amplitude corresponde a maior elongação. Para o pêndulo em questão, a amplitude equivale a distância entre o ponto "0" e as posições 1 ou 2.

5. Comprimento de onda. O comprimento de onda ( $\lambda$ ) corresponde a distância percorrida pelo corpo em um período. Graficamente, o movimento é representado por uma onda, assim sendo, o comprimento de onda corresponde a distância entre dois pontos iguais e sucessivos. O comprimento de onda pode ser expresso por qualquer unidade de distância (km, m, mm, nm, Å, etc).

O comprimento de onda guarda proporcionalidade direta com o período ( $T$ ) e inversa com a frequência:

$$\lambda = T / \nu$$

6. Fase. Considere dois pêndulos, eles podem realizar diferentes movimentos quando comparados entre si.

Os pêndulos podem realizar movimentos iguais em direção, sentido, frequência e amplitude. Nesse caso, em um mesmo intervalo de tempo, eles realizam movimentos exatamente iguais, o que nos permite dizer que os pêndulos estão em concordância de fase.

Igualmente, estão em concordância de fase dois pêndulos que realizam movimentos iguais em direção, sentido e frequência, mas diferem em amplitude. Quando os pêndulos realizam movimentos diferentes em direção e sentido, mesmo que apresentem frequências e/ou amplitudes iguais, seus movimentos oscilatórios estão em oposição de fase ou defasados em  $180^\circ$ .

Ao realizarem movimentos na mesma direção e sentido, com iguais e/ou diferentes frequências e amplitudes, mas diferindo quanto às posições assumidas no espaço, dizemos que seus movimentos oscilatórios se encontram fora de fase ou defasados.

**Radiações elásticas ou mecânicas.** As radiações elásticas se propagam exclusivamente em meios materiais ou deformáveis, em razão de serem transportadas de molécula a molécula ou de corpo a corpo pela vibração periódica da matéria. Os sons são exemplos de radiações elásticas.

Essas radiações são geradas pela vibração da matéria em torno de sua posição de equilíbrio. Devido às propriedades elásticas do meio, a vibração é transmitida de uma camada em movimento para a seguinte, propagando-se através do meio material. Cabe destacar que o próprio meio não se desloca como um todo juntamente com a energia em propagação, as várias camadas do meio de propagação apenas oscilam descrevendo trajetórias limitadas, enquanto a energia se desloca progressivamente. Esse fato pode ser observado nas ondas produzidas na superfície da água; a energia em propagação deforma a superfície provocando ondas que causam movimentos para cima e para baixo, em torno de sua posição de equilíbrio, de um objeto em sua superfície, animado pela energia transmitida pela água. A propagação da energia ocorre ao longo do meio material, não havendo deslocamento efetivo da matéria, que serve unicamente como suporte para a energia em propagação. O movimento ondulatório pode transmitir energia a distâncias consideráveis.



Assim sendo, faz-se necessário um meio material contínuo para a transmissão de ondas elásticas. No entanto, o meio material não é necessário para a propagação de ondas inelásticas ou eletromagnéticas e, por essa razão, a luz pode percorrer o espaço interestelar, praticamente vazio, enquanto as ondas sonoras não são capazes.

As propriedades da inércia e da elasticidade da matéria determinam a velocidade de propagação das ondas elásticas no meio. A elasticidade gera forças restauradoras que atuam sobre a matéria em vibração em torno de sua posição de equilíbrio e a inércia determina como o meio responderá às forças restauradoras. Em consequência, o estado físico do meio material influencia diretamente a velocidade de propagação das ondas elásticas no meio. Dessa forma, o som se propaga a uma velocidade de 340 m/s no ar, 1.500 m/s nos líquidos e de 3.500 m/s nos sólidos.

**Radiações inelásticas ou eletromagnéticas.** As radiações inelásticas resultam da propagação da oscilação harmônica de dois campos, um elétrico e outro magnético, perpendiculares entre si. A velocidade de propagação das radiações eletromagnéticas varia com a densidade do meio. Observa-se uma relação inversamente proporcional da velocidade de propagação com o aumento da densidade do meio. Meios mais densos diminuem a velocidade de propagação dessas radiações e como a frequência da oscilação se mantém constante, o comprimento de onda da radiação diminui, sendo, portanto, depende da densidade do meio de propagação.

A relação entre o comprimento de onda ( $\lambda$ ), a frequência ( $\nu$ ) e a velocidade de propagação ( $v$ ) de uma onda eletromagnética é expressa por:

$$v = \lambda \times \nu$$

No vácuo, a velocidade de propagação é igual para todas as radiações eletromagnéticas, sendo de aproximadamente 300.000 km/s.

De acordo com a Teoria Quântica (Max Planck), as radiações eletromagnéticas são emitidas e se propagam de forma descontínua, como pequenos grupos ou pacotes de energia denominados quanta ou fótons. Um quantum ou fóton seria a quantidade mínima, ou unidade de energia, emitida por uma fonte. A quantidade de energia ( $E$ ) transportada por um fóton é determinada por:

$$E = h \times \nu$$

Onde,  $h$  é a constante de Planck ( $6,6 \times 10^{-34}$  J.s) e  $\nu$  a frequência da radiação.

Mesmo sendo energia, faz-se necessário admitir a natureza corpuscular das radiações eletromagnéticas. Assim sendo, de acordo com o princípio da dualidade onda-partícula (De Broglie), as radiações eletromagnéticas apresentam tanto comportamento ondulatório quanto de partícula. Como partícula, para cada fóton se pode atribuir uma massa, cujo valor pode ser deduzido utilizando-se as equações da Teoria Quântica (Planck) e da Teoria da Relatividade (Einstein).

$$\text{(Teoria Quântica)} \quad E = h \times \nu$$

$$\text{(Teoria da Relatividade)} \quad E = m \times c^2$$

$$h \times \nu = m \times c^2$$

$$m = h \times \nu / c^2$$

**Radiação corpuscular.** Denominamos radiações corpusculares aquelas que não apresentam massa nula em repouso. Nessa categoria estão incluídas as partículas alfa, beta e nêutrons emitidos por átomos radioativos.

As propriedades das diferentes radiações corpusculares dependem de características como massa, volume e carga elétrica. Em função de suas energias cinéticas, elas podem propagar-se em qualquer meio, material ou não, estando sua capacidade de propagação profundamente dependente da densidade do meio e de suas próprias características.

Em obediência ao princípio da dualidade onda-partícula, a cada radiação corpuscular, apesar de sua massa característica, pode-se associar um comportamento ondulatório, cujo comprimento de onda pode ser deduzido pelas equações de Planck e Einstein.

$$E = h \times c / \lambda$$

$$E = m \times c^2$$

$$h \times c / \lambda = m \times c^2$$

$$\lambda = h / m \times c$$

Portanto, a propagação de uma radiação corpuscular está associada a um movimento ondulatório cujo comprimento de onda é dado pela equação acima descrita.

**Panorama geral das radiações.** A tabela 1 apresenta os três grupos de radiações, tipos e comprimentos de onda que caracterizam as diferentes formas de radiação.

Em cada grupo, as radiações estão postas de baixo para cima em ordem decrescente de energia. Assim, entre as radiações eletromagnéticas, as radiações cósmicas são as mais energéticas, ou seja, possuem os menores comprimentos de onda, enquanto as radiações elétricas ou de Hertz, onde estão incluídas as microondas e as ondas de rádio e televisão são as menos energéticas.

Tabela 1. Panorama geral das radiações.

Grupo	Tipos	Designações	Comprimento de onda
Elásticas	Som	Infra-som	340 m a 20 m
		Som	20 m a 0,17 m
		Ultra-som	0,17 m a 0,034 m
Corpusculares	Excitantes	Raios catódicos Raios canais de Goldstein	$\lambda = h / m \times c$
	Ionizantes	Radiação alfa	
		Radiação beta	
		Radiação de prótons Radiações de nêutrons	
Eletromagnéticas	Elétricas <sup>(1)</sup>	Ondas elétricas ou ondas de Hertz	$3 \times 10^8$ a 300 m $3 \times 10^4$ m a 0,25 m
		Solares	Radiação infravermelha Radiação luminosa Radiação ultravioleta
	Ionizantes	Radiação X	14 nm a 0,005 nm
		Radiação gama	0,005 nm a 0,0001 nm
		Radiação cósmica	0,0001 nm a 0,00002 nm

Fonte: Leão, M.A.C. Princípios de Biofísica. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1982.

<sup>(1)</sup> Originada de osciladores eletrônicos e usados em meios de comunicação.

## ESTRUTURA DA MATÉRIA

Toda a matéria é constituída por átomos. A estrutura e propriedades da matéria decorrem das interações a pequenas distâncias entre elétrons e átomos.

O átomo é composto por elétrons, partículas dotadas de carga elétrica negativa, cujo valor equivale à denominada carga elementar, representada pelo símbolo  $e$ . Os elétrons giram em torno de um núcleo central. O núcleo é formado por prótons, partículas com carga elétrica positiva de valor exatamente igual à do elétron, e por nêutrons, partículas sem carga elétrica (tabela 2).

Tabela 2. Características das partículas elementares do átomo.

Partícula	Carga elétrica	Massa em repouso
Elétron	$- 1,602177 \times 10^{-19} \text{ C}$	$9,109390 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Próton	$+ 1,602177 \times 10^{-19} \text{ C}$	$1,672623 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Nêutron	Sem carga elétrica	$1,674929 \times 10^{-27} \text{ kg}$

Os prótons e nêutrons são denominados núcleons por constituírem os núcleos dos átomos. Ao número de prótons de um átomo denomina-se número atômico ( $Z$ ) e a soma de prótons e nêutrons de um núcleo, o seu número de massa ( $A$ ). A diferença entre o número de massa e o número atômico equivale ao número de nêutrons de um núcleon, indicado pela letra  $N$ . Portanto:

$$N = A - Z$$

Geralmente, os átomos são encontrados em estado elétrico neutro em razão de o número de elétrons ser igual ao número de prótons.

**Elemento químico** é uma substância formada por átomos iguais, ou seja, átomos de mesmos números atômicos. Cada elemento é identificado por seu nome e um símbolo que o representa. O símbolo consiste de uma ou duas letras do nome do elemento, sendo a primeira escrita em maiúscula.

H (Hidrogênio)

He (Hélio)

Al (alumínio)

C (Carbono)

Ag (Argentum)

Pb (Plumbum)

Para designar um elemento químico, escreve-se seu símbolo ( $X$ ) e à sua esquerda e abaixo, o número atômico ( $Z$ ) e, acima, o número de massa ( $A$ ):



As propriedades químicas de um elemento são determinadas pelo número de prótons de seu núcleo. Dois átomos de um mesmo elemento químico podem ter quantidades diferentes de nêutrons, portanto, seus núcleos apresentam números de massas diferentes. Esses átomos são isótopos do elemento químico (tabela 3). A abundância isotópica natural ou abundância natural é o valor percentual do número de átomos de um determinado isótopo de um elemento químico encontrado em uma mistura natural de átomos.

Átomos de elementos químicos diferentes, mas com o mesmo número de massa são elementos isóbaros. São isóbaros o  ${}_{19}^{40}\text{K}$  e o  ${}_{20}^{40}\text{Ca}$  e o  ${}_{1}^3\text{H}$  e o  ${}_{2}^3\text{He}$ . Isótonos são átomos com números atômicos e de massas diferentes, mas com mesmos números de nêutrons. O  ${}_{6}^{14}\text{C}$  e o  ${}_{8}^{16}\text{O}$  apresentam oito nêutrons e o  ${}_{1}^3\text{H}$  e o  ${}_{2}^4\text{He}$ , com dois nêutrons cada um, são isótonos.

Tabela 3. Isótopos dos elementos químicos Hidrogênio, Oxigênio e Urânio em uma mistura natural.

Elemento químico	Nº atômico (Z)	Isótopo	Nº de massa (A)	Nº de nêutrons (N)	Abundância natural (%)
Hidrogênio	1	Hidrogênio-1	1	0	99,985
	1	Deutério	2	1	0,015
	1	Tritio	3	2	
Oxigênio	8	Oxigênio-16	16	8	99,762
	8	Oxigênio-17	17	9	0,038
	8	Oxigênio-18	18	10	0,200
Urânio	92	Urânio-234	234	142	0,0055
	92	Urânio-235	235	143	0,72
	92	Urânio-238	238	146	99,2745

Isômeros nucleares são átomos que apresentam os mesmos números atômicos, de massas e de nêutrons, diferenciando-se por exibirem um excedente de energia em seus núcleos. O estado de energia mais elevado é chamado de meta-estável, que é representado pela letra m ao lado do número de massa do elemento. São isômeros nucleares:  $^{99m}\text{Tc}$  e  $^{99}\text{Tc}$  (Tecnécio),  $^{111m}\text{In}$  e  $^{111}\text{In}$  e o  $^{113m}\text{In}$  e  $^{113}\text{In}$  (Índio). **Massa atômica relativa de um elemento ou peso atômico.** As massas dos átomos são muito pequenas. No caso do hidrogênio, o elemento mais leve que existe, sua massa atômica é de  $1,66 \times 10^{-27}$  kg. Assim sendo, é mais conveniente escolher uma unidade compatível com a quantidade que se deseja medir. Para isso, as massas dos átomos devem ser comparadas à massa de um átomo específico usado como padrão de referência. Atualmente, utiliza-se como referência o isótopo 12 do carbono ( ${}^1_6\text{C}$ ) e define-se a unidade de massa atômica (u.m.a) como 1/12 da massa do átomo do carbono-12.

$$1 \text{ u.m.a} = 1/12 M ({}^{12}_6\text{C})$$

Tomando como referência a unidade de massa atômica, podemos definir a massa atômica relativa de um isótopo ou massa isotópica como o valor da massa atômica desse isótopo usando-se como referência 1/12 da massa do  ${}^{12}\text{C}$ .

A massa atômica relativa do hidrogênio ( ${}^1_1\text{H}$ ) é 1,00798 e a do hélio ( ${}^4_2\text{He}$ ) 4,0026. Dessa forma, átomos do isótopo-1 do hidrogênio e do isótopo-4 do hélio possuem, respectivamente, massas 1,00798 e 4,0026 vezes a unidade de massa atômica. Assim, as massas do hidrogênio e do hélio são:

$$M({}^1_1\text{H}) = 1,00798 \text{ u.m.a}$$

$$M({}^4_2\text{He}) = 4,0026 \text{ u.m.a}$$

Como a maioria dos elementos é uma mistura de isótopos, define-se o peso atômico ou massa atômica relativa de um elemento como a massa média de um átomo do elemento, tomando-se como referência a unidade de massa atômica. O oxigênio é formado pelos isótopos  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{17}\text{O}$  e  ${}^{18}\text{O}$ , cujas massas isotópicas e abundâncias naturais são mostradas na tabela 4.

Tabela 4. Massas atômicas e abundância natural dos isótopos do Oxigênio.

Isótopos	Massas Atômicas	Abundância Natural (%)
${}^{16}\text{O}$	15,994915	99,762
${}^{17}\text{O}$	16,999131	0,038
${}^{18}\text{O}$	17,999160	0,200

Fonte: Aramburu, X.O., Bisbal, J.J. (eds). Las Radiaciones Ionizantes. Su Utilización y Riesgos. Barcelona: Edicions UPC, 1994.

A massa atômica relativa do oxigênio é calculada de seguinte forma:

$$\text{Oxigênio} = 15,994915 \times 0,99762 + 16,999131 \times 0,00038 + 17,99916 \times 0,002 = 15,999305$$

Esse resultado indica que a massa média de um átomo de oxigênio é 15,999305 vezes a unidade de massa atômica. No caso de um elemento ser formado por um único isótopo, o peso atômico coincide com a massa desse isótopo.

Observe que essa unidade não tem significado, exceto como referência à escala arbitrária de peso atômico.

**Moléculas.** As moléculas são formadas por grupos de átomos. Esses átomos podem ser de um mesmo elemento químico (molécula simples) ou de elementos diferentes (compostos químicos).

Definimos o peso molecular ou massa molecular relativa como a massa de uma molécula, tomando-se como referência a unidade de massa atômica (u.m.a). O peso molecular é a soma dos pesos atômicos dos átomos que compõem a molécula (símbolo M).

Como as massas relativas do hidrogênio e do oxigênio são, respectivamente, 1,00798 e 15,9993, o peso molecular da água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) é:

$$M(\text{H}_2\text{O}) = 1,00798 \times 2 + 15,9993 \times 1 = 18,01526$$

**Mol e massa molar.** Para se comparar quantidades de diferentes átomos, elementos ou compostos define-se a unidade de quantidade de matéria. A quantidade de matéria é o mol. Define-se mol como a quantidade de matéria de um sistema que contém um número de entidades elementares (átomos, moléculas, elétrons, etc) igual ao número de átomos contidos em 0,012 kg de  $^{12}\text{C}$ . Quando utilizamos o mol, devemos especificar quais são as entidades elementares que estamos considerando, se átomos (mol de átomos), moléculas (mol de moléculas), íons (mol de íons), elétrons (mol de elétrons), etc.

O mol de um elemento (ou molécula, íon, etc) é definido como o peso, em gramas, numericamente igual ao peso atômico do elemento (ou da molécula, íon, etc). Como os pesos atômicos estão na mesma proporção entre si e com os pesos reais dos átomos, e como o mol é definido em termos de pesos atômicos, um mol de qualquer elemento (ou molécula, íon, etc) contém sempre o mesmo número de átomos (ou moléculas, íons, etc) que um mol de qualquer outro elemento (ou moléculas, íons, etc).

O número de átomos em um mol de qualquer elemento corresponde ao número de Avogrado, definido como a quantidade de átomos de  $^{12}\text{C}$  contidos em uma massa de 0,012 kg. O número de Avogrado é  $N_A = 6,0221367 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ . Portanto, um mol de átomos de qualquer substância tem sempre o número de Avogrado de átomos e um mol de moléculas, esse mesmo número de moléculas, etc. A massa de um mol de átomos, ou de moléculas, etc, denomina-se massa molar e se expressa em g/mol (símbolo M). Citamos, como exemplos, que a massa de um mol de átomos de alumínio (Al) é de aproximadamente 27 g/mol e a da água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) é 18,01526 g/mol.

Pode-se estabelecer ainda que o valor aproximado da unidade de massa atômica (u.m.a) é de aproximadamente  $1,6605402 \times 10^{-27} \text{ kg}$ . Esse valor permite estabelecer que a massa de um mol de átomos de um determinado elemento coincide com um número de gramas igual a sua massa atômica relativa e que a massa de um mol de moléculas de uma determinada substância coincide com um número

de gramas igual a seu peso molecular. Observe os seguintes exemplos:

1) Quais as massas de um mol de átomos de urânio (U) e de um mol de moléculas de  $H_2O$ , sabendo-se que o peso atômico do urânio é 238,0289 e o peso molecular da água é 18,0153?

Como a massa molar de um elemento químico coincide com o número em gramas igual à massa atômica relativa desse elemento, então:

$$1 \text{ mol de urânio} = 238,0289 \text{ g/mol}$$

Igualmente:

$$1 \text{ mol de água} = 18,0153 \text{ g/mol}$$

2) Se o peso atômico do cálcio é 40,08 e o peso molecular da água é 18,0153: a) Quantos átomos há em 20 g de cálcio? b) Quantas moléculas há em 35 g de água?

c) Quantos átomos de hidrogênio há em 35 g de água?

a) O número de moles (n) de átomos de cálcio em 20 g desse elemento:

$$1 \text{ mol de cálcio} = 40,08 \text{ g/mol}$$

$$n(\text{Ca}) = m / \text{mol de Ca} = 20 \text{ g} / 40,08 \text{ g/mol} = 0,499 \text{ mol}$$

Como 1 mol de átomos contém  $N_A$  átomos, o número de átomos em 20 g de cálcio é:

$$N_A(\text{Ca}) = 0,499 \text{ mol} \times 6,0221367 \times 10^{23} \text{ átomos/mol} = 3,005 \times 10^{23} \text{ átomos}$$

b) O número de moléculas contidas em 35 g de  $H_2O$ :

$$1 \text{ mol de água} = 18,0153 \text{ g/mol}$$

$$n(H_2O) = m / \text{mol da água} = 35 \text{ g} / 18,0153 \text{ g/mol} = 1,9428 \text{ mol}$$

Como 1 mol de moléculas contém  $N_A$  moléculas, o número de moléculas em 35 g de  $H_2O$  é:

$$N_A(H_2O) = 1,9428 \text{ mol} \times 6,0221367 \times 10^{23} \text{ moléculas/mol} = 1,17 \times 10^{24} \text{ moléculas}$$

c) Como cada molécula de água contém 2 átomos de hidrogênio, o resultado obtido em (b) permite calcular o número de átomos de hidrogênio em 35 g de  $H_2O$ :

$$N_A(H) = 1,17 \times 10^{24} \text{ moléculas} \times 2 \text{ átomos/molécula} = 2,34 \times 10^{24} \text{ átomos de H}$$

**Unidades de massa e energia.** Em física atômica são utilizadas comumente as unidades do Sistema Internacional (SI). No entanto, para algumas magnitudes são usadas certas unidades especiais em virtude de as unidades convencionais serem pouco convenientes do ponto de vista numérico.

As energias são expressas em elétron-volt (eV). Um elétron-volt é a energia cinética adquirida por um elétron, no vácuo, ao ser submetido a um campo elétrico criado por uma diferença de potencial de 1 volt. Portanto, recordando que a carga elementar do elétron é:

$$e = 1,602177 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Deduz-se que:

$$1 \text{ eV} = 1,602177 \times 10^{-19} \text{ J ou } 1,602177 \times 10^{-12} \text{ erg}$$

Para se ajustar adequadamente os valores de energias de diferentes fenômenos podemos utilizar múltiplos do eV:

1 kiloelétron-volt:	1 keV = 10 <sup>3</sup> eV
1 megaelétron-volt:	1 MeV = 10 <sup>6</sup> eV
1 gigaelétron-volt:	1 GeV = 10 <sup>9</sup> eV

Como unidade de massa utiliza-se a unidade de massa (u.m.a):

$$1 \text{ u.m.a} = 1,6605402 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Como unidade de comprimento utiliza-se o Fermi ou o Angström

$$1 \text{ fermi (1 fm)} = 10^{-15} \text{ m}$$

$$1 \text{ angström (1 \AA)} = 10^{-10} \text{ m}$$

**Representação de espécies químicas.** A fórmula química expressa a proporção na qual os átomos combinam-se nos compostos químicos. Para representá-la, são usados símbolos e números, subscritos após cada símbolo, que indicam a relação unitária de cada átomo no composto.

Alguns compostos existem como moléculas e suas fórmulas representam o número e as espécies de átomos presentes na molécula. A molécula do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é constituída por um átomo de carbono e dois de oxigênio, a molécula da água (H<sub>2</sub>O) por dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio e a glicose (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>) por carbono, hidrogênio e oxigênio na proporção de 6:12:6. Para compostos formados por grande número de átomos, a fórmula representa a mais simples relação dos átomos na substância.

Outras espécies químicas, os íons, são constituídas de partículas eletricamente carregadas. Um íon é um átomo, ou grupo de átomos, que age como unidade dotada de carga elétrica. A carga de um íon representa a perda (íon positivo) ou ganho (íon negativo) de um número igual de elétrons (tabela 5). Os íons com carga elétrica positiva são cátions e os de carga negativa, ânions. O cloreto de sódio (NaCl) é composto por íons Na<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup> na proporção 1:1. Quando expressamos as fórmulas dos compostos iônicos devemos escrever primeiro os cátions. Nos compostos iônicos, a relação de cátions e ânions é sempre tal que o grupo total de íons é eletricamente neutro

O peso-fórmula é a soma dos pesos atômicos de todos os elementos de um composto, tomando-se como referência o número de átomos de cada elemento

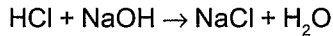
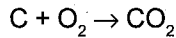
Tabela 5. Carga elétrica de alguns íons.

<b>Cátions</b>		
1 +	2 +	3 +
H + (hidrógeno)	Mg 2+ (magnésio)	Al 3+ (alumínio)
Na + (sódio)	Ca 2+ (cálcio)	Cr 3+ (cromo III)
K + (potássio)	Fe 2+ (ferro II)	Fe 3+ (ferro III)
Cu + (cobre I)	Cu 2+ (cobre II)	Bi 3+ (bismuto)
NH <sub>4</sub> + (amônia)	Sn 2+ (estanho)	Sb 3+ (antimônio)
<b>Ânions</b>		
1 -	2 -	3 -
Cl - (cloreto)	O 2- (óxido)	N 3- (nitreto)
Br - (brometo)	S 2- (sulfeto)	PO <sub>4</sub> 3- (fosfato)
I - (iodeto)	SO <sub>3</sub> 2- (sulfito)	AsO <sub>4</sub> 3- (arseniato)
OH - (hidroxila)	SO <sub>4</sub> 2- (sulfato)	
NO <sub>3</sub> - (nitrato)	SiO <sub>3</sub> 2- (silicato)	
CN - (cianeto)	CO <sub>3</sub> 2- (carbonato)	

Fonte: Slabaugh, W.E., Parsons, T.D. Química Geral. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1982.

na fórmula química, independente do tipo de substância (iônica ou molecular). Para os compostos, o mol é o peso-fórmula em gramas.

A equação química mostra a composição das substâncias envolvidas em uma reação química, sendo representada pela fórmula de cada substância, balanceada em massas e cargas elétricas.



**Eletrosfera do átomo.** No átomo, os elétrons giram em torno do seu núcleo em determinados níveis de energia, estáveis e estacionários, nos quais não ganham nem perdem energia. A força de atração eletrostática entre o elétron (negativo) e o núcleo (positivo) mantém o elétron em uma órbita de raio  $r$  a uma velocidade  $v$ , compensando exatamente a força centrípeta que atua sobre ele.

Quando um elétron ganha ou perde energia deve passar do nível em que se encontra ( $E_1$ ) para outro ( $E_2$ ) de acordo com a equação  $E_2 - E_1 = n \times h \times \nu$ , onde  $n$  é um número inteiro,  $h$  é a constante de Planck e  $\nu$  é a frequência da radiação recebida ou emitida, respectivamente. Esta variação de energia envolve um salto de um nível para outro, de maior ou menor raio, dependendo de a energia haver sido absorvida ou emitida, respectivamente. Caso o elétron salte de um nível periférico ( $E_2$ ) para outro próximo do núcleo, quanto maior for o número de níveis energéticos saltados, maior será a frequência  $\nu$  da radiação emitida. Nesse caso, a energia do elétron (energia potencial eletrostática + energia cinética) se reduz a um valor inferior de energia ( $E_1$ ). Essa diferença de energia é irradiada como um fóton caracterizado por uma frequência  $\nu$  e um comprimento de onda, de acordo com a equação:

$$E_2 - E_1 = h \times \nu$$

Onde,  $h$  é a constante de Planck e  $\nu$  a frequência da radiação.

Os saltos que ocorrem nos níveis mais periféricos do átomo resultam em radiações de grande comprimento de onda, do tipo radiação infravermelha. Caso o salto seja de maior magnitude, levando o elétron para níveis mais próximos do núcleo, serão produzidos, de acordo com as diferenças de energia entre os níveis, fótons de radiação visível, ultravioleta ou radiação X.

Os elementos de números atômicos ( $Z$ ) pequenos, em razão do menor número de camadas, emitem fótons dentro do espectro energético da luz visível, ultravioleta e infravermelha, como ocorre com o hidrogênio ( $Z = 1$ ). Enquanto os átomos pesados emitirão fótons muito mais energéticos, de centenas ou milhares de elétrons-volt (eV), correspondentes ao espectro de energia dos raios X.

O mecanismo oposto, ou seja, o salto de um elétron de um nível mais interno para outro mais afastado do núcleo se faz necessariamente com absorção de energia.

Em geral, o átomo tem todos os seus elétrons ocupando níveis mínimos de energia. Nesta condição diz-se que o átomo está em estado fundamental. Quando uma fonte externa de energia, como fótons ou o bombardeio com elétrons acelerados, interage e transfere energia para um elétron, ele não pode mais permanecer em seu nível original e salta para níveis de maior energia, desfalmando o nível onde estava situado. O átomo passa a um estado de energia superior ao original, o



estado excitado. O átomo excitado em um tempo muito curto, de  $10^{-12}$  s, volta a seu estado de energia original, e, para que isso aconteça, deve necessariamente emitir o excedente de energia que adquiriu no momento da excitação, como um fóton de radiação eletromagnética (infravermelha, visível, ultravioleta ou radiação X).

Na interação, quando a energia incidente é suficientemente elevada, pode transferir grande quantidade de energia a um elétron de um átomo dotando-o de energia superior ao do maior nível de energia do átomo. Nessa condição, o elétron salta para fora de sua eletrosfera, resultando em um par de íons constituído pelo elétron ejetado e pelo átomo com uma carga positiva, por conter um elétron a menos. Nesse estado, o átomo está ionizado. Imediatamente, elétrons das camadas mais energéticas descerão para ocupar o orbital interno desfalcado emitindo fótons, cujas energias dependerão dos níveis de energia saltados (radiação X, ultravioleta, visível ou infravermelha), fenômeno denominado cascata de elétrons.

Outros fenômenos diretamente relacionados com a excitação de átomos podem ser observados, como a fluorescência e a fosforescência. A fluorescência resulta da emissão de luz visível, ou de outra radiação, por um átomo excitado, emissão essa que se extingue ao cessar a transferência de energia a partir da fonte externa de excitação. As substâncias que produzem esse fenômeno são fluorescentes.

Em geral, os átomos excitados voltam imediatamente a seus estados fundamentais de energia. No entanto, alguns átomos podem permanecer em estado excitado por um tempo considerável, inclusive por algumas horas, condição essa denominada metaestável. Essas substâncias são fosforescentes e emitem luz durante algum tempo, depois de cessada a transferência da energia de excitação.

Na eletrosfera de um átomo, os níveis de energia distribuem-se em diferentes níveis em torno do núcleo, sendo o tamanho desses níveis determinado por  $2\pi$  vezes o momento angular do elétron ( $m \times v \times r$ ) que é igual a uma integral  $n$  multiplicada pela constante de Planck ( $h$ ).

$$2\pi \times m \times v \times r = n \times h$$

Nessa equação,  $n$  é o número quântico principal caracterizado por ser um número inteiro positivo (1, 2, 3, 4 ...) e representa o nível energético principal do elétron. Os valores do número quântico principal ( $n$ ) representam o raio relativo do elétron. Quando  $n = 1$ , o elétron está no menor nível de energia. O aumento dos valores de  $n$  corresponde ao aumento de energia para o elétron. Os níveis de energia nos átomos são designados K, L, M, N, etc. A camada K é o nível de energia mais próximo do núcleo, onde  $n = 1$ , L é o nível de energia para  $n = 2$  e assim sucessivamente. A velocidade para os elétrons do nível K é de  $1/137$  da velocidade da luz, para o nível L, metade da do nível anterior e para o nível M, a terça parte, etc.

Os níveis de energia apresentam regiões ou orbitais, onde, com maior probabilidade, os elétrons podem ser encontrados. O número quântico secundário ou azimutal ( $l$ ) determina a forma da nuvem de elétrons. Para  $l = 0$ , a nuvem eletrônica assume unicamente a forma esférica. Para  $l = 1$ , a nuvem de elétrons tem a forma de halteres, com uma esfera distorcida de alta probabilidade em cada lado do núcleo. Para  $l = 2$ , a forma da nuvem eletrônica se assemelha a quatro pêsas, com as extremidades de seus pedúnculos dirigidas para o núcleo. Para valores mais elevados de  $l$ , as formas são ainda mais complexas.

Os valores numéricos de  $l$  estão relacionados aos do número quântico principal ( $n$ ). O número quântico secundário ( $l$ ) tem valores inteiros de 0 e  $n-1$ , inclusive. Quando  $n = 1$ ,  $l$  pode ter apenas o valor 0; para  $n = 2$ ,  $l$  tem dois valores permitidos, 0 e 1; para  $n = 3$ ,  $l$  tem três valores 0, 1 e 2 e assim por diante. Comumente, designam-se os números quânticos secundários  $l = 0, 1, 2, 3$  e 4 pelas letras  $s, p, d, f$  e  $g$ . Um aumento do número quântico secundário ( $l$ ) implica em um aumento no momento angular. Isso significa que o movimento de um elétron  $s$  ( $l = 0$ ) em torno do núcleo aproxima-se mais de uma linha reta do que um elétron  $p$  ( $l = 1$ ), ainda que ele descreva um volume esférico no espaço. Um elétron  $p$ , por sua vez, tem menos curvatura em seu percurso que o elétron  $d$  ( $l = 2$ ) e assim por diante. Os valores de  $l$  representam subníveis energéticos dentro de cada nível de energia principal. O aumento dos valores de  $l$  corresponde a um progressivo aumento de energia para os subníveis  $s, p, d, f$  e  $g$  e a um aumento do momento angular para o elétron.

De acordo com o Princípio de Exclusão de Pauli, um orbital eletrônico só pode conter dois elétrons. O número de orbitais, em cada nível energético, é determinado pelo terceiro número quântico, denominado número quântico magnético ( $m$ ) que, também, tem valores inteiros limitados pelo valor do número quântico secundário. Quando  $l = 0$ ,  $m$  tem um único valor permitido, 0; quando  $l = 1$ ,  $m$  tem três valores permitidos  $-1, 0$  e  $+1$ . Os valores de  $m$  descrevem as orientações no espaço permitidas para uma nuvem eletrônica. Quando  $l = 0$  (subnível  $s$ ) a única orientação possível é a esférica; para  $l = 1$  (subnível  $p$ ) existem três orientações permitidas ( $m = -1, 0$  e  $+1$ ). Os eixos desses três orbitais, em forma de halteres, estão a  $90^\circ$  uns dos outros, sendo designados por  $p_x, p_y$  e  $p_z$ . Quando  $l = 2$  (subnível  $d$ ), os cinco valores permitidos para  $m$  são  $-2, -1, 0, +1$  e  $+2$  e cinco diferentes orientações no espaço. Quando descrevem orbitais em forma de halteres, um mesmo elétron oscila seu nível de energia, quando se aproxima ou se afasta do núcleo.

Todos os orbitais de um dado subnível devem ter a mesma energia em um átomo isolado. Os números quânticos, principal ( $n$ ) e secundário ( $l$ ), indicam a energia do subnível e o número quântico  $m$  indica a orientação do orbital no espaço em torno do núcleo. Quando um átomo interage com outro átomo ou com um campo elétrico, o arranjo espacial e a energia dos orbitais podem se modificar.

O nível  $K$  ( $n = 1$ ) contém apenas um subnível  $s$  de energia e um orbital; o nível  $L$  ( $n = 2$ ) pode conter os subníveis  $s$  e  $p$  totalizando quatro orbitais; o  $M$  ( $n = 3$ ) os subníveis  $s, p$  e  $d$ , com até nove orbitais; o  $N$  ( $n = 4$ ) os subníveis  $s, p, d$  e  $f$ , perfazendo 16 orbitais possíveis, etc. O número máximo de elétrons que pode conter cada um dos níveis estacionários de energia é de dois elétrons para o nível  $K$ , oito para o nível  $L$ , dezoito para o nível  $M$  e trinta e dois para o nível  $N$ , etc.

Considere o átomo do neônio, que dispõe de dez prótons no núcleo ( $Z = 10$ ) e dez elétrons na eletrosfera. O nível  $K$  de energia ( $n = 1$ ) contém um orbital com dois elétrons e os oito elétrons restantes preencherão as quatro possíveis órbitas do segundo nível de energia, nos subníveis  $s$  (2 elétrons) e  $p$  (6 elétrons).

O quarto número quântico, chamado spin, tem dois valores permitidos para cada valor de  $m$ :  $+1/2$  e  $-1/2$ , indicando que em seu orbital, o elétron seria uma massa esférica girando em torno de seu próprio eixo de rotação com um momento angular intrínseco, cujo módulo é  $1/2 \times h/2\pi$ . Este spin intrínseco é específico e não pode aumentar nem diminuir. Para cada valor de  $m$  há um orbital de elétron naquele

subnível de energia, cada elétron orbital assume uma de duas orientações permitidas de spin, uma oposta à outra.

Portanto, para cada elétron na eletrosfera de um átomo estão associados quatro números quânticos que permitem caracterizá-lo (Tabela 6).

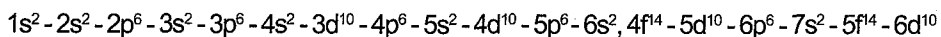
Tabela 6. Distribuição dos elétrons nos níveis quânticos.

Camada	Níveis Energéticos Principais <i>n</i>	Subníveis de Energia <i>l</i>	Orbitais <i>m</i>	Total de orbitais ( <i>n</i> <sup>2</sup> )	Nº máximo de elétrons nos subníveis	Nº máximo de elétrons da camada ( <i>2n</i> <sup>2</sup> )
K	1	0 s	0	1	2	2
L	2	0 s 1 p	0 +1, 0, -1	1 3	2 6	8
M	3	0 s 1 p 2 d	0 +1, 0 -1 +2, +1, 0, -1, -2	1 3 5	2 6 10	18
N	4	0 s 1 p 2 d 3 f	0 +1, 0 -1 +2, +1, 0, -1, -2 +3, +2, +1, 0 -1, -2, -3	1 3 5 7	2 6 10 14	32

Fonte: Slabaugh, W.E., Parsons, T.D. Química Geral. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1982.

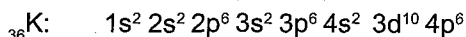
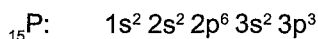
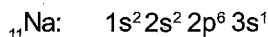
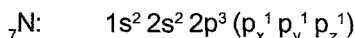
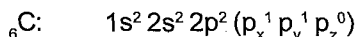
O nível K (*n* = 1) contém um único subnível de energia e um orbital. Quando um elétron recebe energia sendo promovido a níveis mais elevados, ele pode entrar em outras espécies de orbitais.

Para átomos com vários elétrons na eletrosfera, a distribuição deles ocorre em ordem crescente de energia, de modo que, em um átomo, dois elétrons não podem ocupar o mesmo lugar, ao mesmo tempo. Cada orbital comporta apenas dois elétrons de spins opostos. Os demais elétrons devem ocupar outros orbitais. A distribuição dos elétrons nos subníveis de energia é feita partindo da energia mais baixa para a mais elevada.



O subnível de energia mais elevado ocupado realmente por qualquer átomo conhecido no estado mínimo de energia é o 6d. Portanto, há 59 orbitais disponíveis, suficientes para acomodar os 103 elétrons de um átomo de Laurêncio, o elemento mais complexo que existe.

A distribuição eletrônica de alguns átomos é a seguinte:



Observe que há três elétrons no subnível 3p no átomo de fósforo (P). Os elétrons, tanto quanto possível, ocuparão, isoladamente, orbitais disponíveis em um subnível, buscando o estado de energia mais baixo. Dessa forma, os três elétrons no subnível p ocuparão separadamente os três orbitais disponíveis,  ${}_{15}\text{P: } 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p_x^1 3p_y^1 3p_z^1$

Quando os átomos reagem quimicamente uns com os outros, seus elé-

trons externos ou de valência são os que participam da reação.

**Propriedades periódicas dos elementos.** Quando os elementos são dispostos em ordem crescente de seus números atômicos, suas propriedades físicas e químicas variam periodicamente com o aumento do número atômico.

A tabela periódica destaca a natureza periódica da estrutura eletrônica dos átomos. Os elementos dispostos em ordem crescente de número atômico são colocados em filas horizontais denominadas de períodos. Os períodos diferem em comprimento, variando de dois a trinta e dois elementos. Um novo período começa com o primeiro elemento que tem um elétron em um novo nível energético principal. Em relação aos subníveis de energia, subdivide-se em cada ponto em que um novo nível energético principal se inicia. Dessa forma, fornece sete agrupamentos de subníveis energéticos, correspondendo aos sete períodos da tabela periódica.

Subníveis	1s	2s2p	3s3p	4s3d4p	5s4d5p	6s4f5d6p	7s5f6d
Período	1	2	3	4	5	6	7

Os elementos hidrogênio ( $1s^1$ ) e hélio ( $1s^2$ ) compõem o primeiro período. O terceiro elemento, o lítio ( $1s^2 2p^1$ ), tem um elétron no segundo nível energético principal, e, por isso, inicia um novo período. O neônio ( $Z=10$ ) tem, em seu estado mínimo de energia, elétrons no primeiro e segundo níveis energéticos, porém, o  $_{11}\text{Na}$  tem um elétron no terceiro nível energético principal de modo que ele começa o terceiro período. O segundo e o terceiro períodos são constituídos por oito elementos correspondendo ao preenchimento dos subníveis  $2s2p$  e  $3s3p$ , respectivamente.

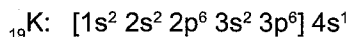
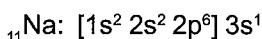
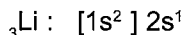
Os períodos quatro e cinco são períodos de 18 elementos. O quarto período corresponde ao preenchimento dos subníveis  $4s$ ,  $3d$  e  $4p$ . A introdução de 10 elétrons no subnível  $3d$  estende o quarto período de oito para dezoito elementos. O quinto período tem uma disposição semelhante. O período consiste de 32 elementos, correspondendo ao preenchimento dos subníveis  $6s$ ,  $4f$ ,  $5d$  e  $6p$ . Os catorze elementos correspondentes à adição de 15 elétrons no subnível  $4f$  são colocados em uma fila separada na parte inferior da tabela para evitar que ela seja excessivamente comprida. A mesma precaução é tomada para os elementos da série dos actídeos do sétimo período. O número total de elementos do sétimo período, assim como a extensão que a tabela possa ter, depende do número de novos elementos que possam ser sintetizados, além daqueles já conhecidos.

Na tabela periódica, as colunas verticais dos elementos são chamadas grupos. É dentro de um grupo que as semelhanças químicas são evidentes. Cada grupo de elementos tem em comum um número particular de elétrons de valência, que são elétrons de seus níveis energéticos mais externos, ou seja, aqueles que tem energia maior do que a correspondente à camada externa  $s^2 p^6$  da estrutura do gás nobre precedente. As razões da inatividade química dos gases nobres resultam da alta estabilidade da estrutura eletrônica da camada externa ( $s^2 p^6$ ).

O átomo pode ser considerado como dotado de uma parte principal, constituída pelo núcleo e seus elétrons de baixa energia, que não são afetados nas reações químicas, e um certo número de elétrons de valência. Elementos de um grupo particular têm diferentes partes principais, porém, o mesmo número de elétrons de valência. O número de níveis energéticos na parte principal e a carga do núcleo têm influência sobre o tamanho do átomo e a facilidade com que ele ganha ou perde elétrons, no entanto, o principal fator que afeta o seu comportamento

químico é a própria estrutura da camada de valência.

Para a maioria dos elementos, o número de elétrons de valência é igual ao número do grupo. Elementos do grupo IA têm a estrutura da camada de valência característica de  $ns^1$ . Alguns desses elementos são:

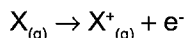


A parte principal inclui a porção de cada átomo representada dentro dos colchetes. Do lado de fora, o número e a espécie dos elétrons de valência são idênticos. Há alguns grupos, do VB até o VIII, em que se observam algumas variações no tipo de elétron de valência, porém o número total é constante.

Alguns grupos de elementos estão relacionados tão intimamente em suas propriedades que são chamados famílias. Famílias dos metais alcalinos (grupo IA), dos metais alcalinos terrosos (grupo IIA), dos halogênios (VIIA). O grupo VIII representa um caso especial e inclui três colunas verticais na tabela. Estes elementos têm tantos elétrons de valência que o número total é menos importante e o comportamento químico é controlado, em grande parte, por outros fatores. Isso resulta numa considerável semelhança química, tanto horizontalmente, no período, como verticalmente, no grupo, e todos os nove elementos são classificados como um grupo único.

Além das relações de grupo, há alguns aspectos gerais do comportamento químico que dependem do tipo de elétrons existentes na camada de valência. Isso conduziu à subdivisão dos elementos em três tipos, cada um identificado pela espécie do elétron diferenciador nas estruturas atômicas. O elétron diferenciador, identificado por seus números quânticos, é aquele que não se encontra presente na estrutura do átomo subsequente, de número atômico mais baixo. O elétron diferenciador no  ${}_3\text{Li}$  é um elétron  $2s$  e no  ${}_{15}\text{P}$  é um elétron  $3p$ . Elementos com elétrons diferenciadores  $s$  ou  $p$  são chamados elementos representativos. Os elementos diferenciadores  $d$  são elementos de transição, que têm elétrons de valência  $s$  e  $d$  e constituem os grupos B da tabela periódica, exceto o grupo IIB. Elementos com elétrons diferenciadores  $f$  são os elementos de transição interna, incluindo todos os que fazem parte do grupo IIIB e os que estão relacionados na parte inferior da tabela periódica.

**Energia de ionização.** A primeira energia de ionização é medida pelo trabalho necessário para remover completamente o elétron mais fracamente ligado de um átomo, no estado gasoso. O processo é uma reação de ionização:



Para remover um segundo elétron será necessário uma segunda energia de ionização e assim sucessivamente. As energias de ionizações são expressas em elétron-volts (eV);  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19}$  joules. Um elétron-volt equivale a 23.060 cal/mol. O elétron ionizado é aquele para o qual a energia ( $e$ ) exigida é um mínimo:

$$E = e(Z_{\text{ef}}) / r$$

Onde,  $Z_{\text{ef}}$  é a carga nuclear efetiva e  $r$  é o raio médio do elétron ionizado.

Assim, a energia de ionização será mais baixa quando a carga nuclear efetiva for pequena e quando o raio médio do elétron for grande. Em geral, as energias de ionização dentro do grupo na tabela periódica decrescem de cima para baixo (tabela 7).

Tabela 7. Energias de ionização.

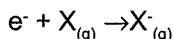
<b>Elemento</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Raio atômico (Å)</b>	<b>Energia de ionização (eV)</b>
Lítio	Li	0,71	5,39
Sódio	Na	0,95	5,14
Potássio	K	1,33	4,34
Rubídio	Rb	1,47	4,18
Césio	Cs	1,74	3,89

Fonte: Slabaugh, W.E., Parsons, T.D. Química Geral. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1982.

Observa-se um aumento geral na energia de ionização ao longo do período na tabela periódica, em consequência da diminuição do tamanho (por atração eletrostática maior) e do aumento de carga nuclear efetiva.

A segunda energia de ionização será muito maior, porque o segundo elétron está sendo retirado de um íon carregado positivamente. O elétron removido pode ser s, p, d ou f dependendo do átomo e do número de ionizações anteriores. Como um elétron s está mais fortemente ligado ao núcleo do que um elétron p de mesmo número quântico principal, a energia de ionização do primeiro é sensivelmente maior do que a do último.

Define-se afinidade por elétrons como a quantidade de energia liberada quando se acrescenta um elétron a um átomo gasoso neutro.



As afinidades por elétrons aumentarão com o decréscimo do tamanho do átomo. Elas dependerão da carga nuclear efetiva ( $Z_{ef}$ ): quanto maior o valor da  $Z_{ef}$  atraindo um elétron, maior será o decréscimo de energia sofrido por ele à medida que penetra em um orbital do átomo. Uma vez que os raios diminuem, a  $Z_{ef}$  aumenta da esquerda para a direita, ao longo de um período, do grupo I para o grupo VII, as afinidades por elétrons serão maiores para os elementos do grupo VII. Dentro de um grupo, as afinidades por elétrons são habitualmente maiores para o primeiro membro. Entretanto, Flúor, Oxigênio e Nitrogênio têm, irregularmente, baixas afinidades por elétrons, porque seus pequenos tamanhos lhes conferem densidades de elétrons excepcionalmente altas (Tabela 8).

Tabela 8. Afinidades por elétrons de alguns não metais.

<b>Elemento não metal</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Afinidade por elétrons</b>
Hidrogênio	H	0,75
Flúor	F	3,62
Cloro	Cl	3,82
Bromo	Br	3,54
Iodo	I	3,24
Oxigênio	O	1,48
Enxofre	S	2,07
Nitrogênio	N	0,2
Fósforo	P	0,8

Fonte: Slabaugh, W.E., Parsons, T.D. Química Geral. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1982.

A energia de ionização e a afinidade por elétrons de um elemento são medidas da tendência do elemento para participar em uma reação química com outros elementos. Caso a energia de ionização de um elemento seja muito baixa e um outro elemento apresentar uma afinidade por elétrons muito elevada, esses dois elementos reagirão fortemente um com o outro para formar um produto estável. A energia de ionização e a afinidade por elétrons são medidas quantitativas da facilidade com que os átomos perdem ou ganham elétrons. Estas propriedades estão representadas na escala de eletronegatividade que apresenta a torça do átomo para atrair elétrons (Tabela 9).

Tabela 9. Eletronegatividade.

Número atômico	Elemento	Eletronegatividade	Número atômico	Elemento	Eletronegatividade
1	H	2,10	30	Zn	1,65
3	Li	0,98	31	Ga	1,81
4	Be	1,57	32	Ge	2,01
5	B	2,04	33	As	2,18
6	C	2,55	34	Se	2,55
7	N	3,04	35	Br	2,96
8	O	3,44	37	Ru	0,89
9	F	3,98	38	Sr	0,95
11	Na	0,93	39	Y	1,22
12	Mg	1,31	40	Zr	1,33
13	Al	1,61	48	Cd	1,46
14	Si	1,90	49	In	1,78
15	P	2,19	50	Sn	1,96
16	S	2,58	52	Te	2,10
17	Cl	2,16	53	I	2,66
19	K	0,82	55	Cs	0,79
20	Ca	1,00	56	Ba	0,89
21	Sc	1,36			
22	Ti	1,54			

Fonte: Slabaugh, W.E., Parsons, T.D. Química Geral. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1982.

Conhecendo-se a eletronegatividade de um átomo é possível prever certas propriedades químicas dos elementos. Átomos de eletronegatividades muito diferentes formam compostos mais iônicos do que aqueles constituídos por elementos de eletronegatividade mais próximas.

**Valência dos elementos.** Os elementos dos grupos I, II e III apresentam números de valência 1, 2 e 3, respectivamente. Quase todos os outros elementos apresentam números de valência iguais aos seus números de grupo.

Os não metais, como os halogênios (grupo VII) apresentam número de valência de 7 e -1, e os do grupo VI, como o oxigênio, enxofre, selênio e telúrio tem, mais comumente, número de valência -2. Por outro lado, o carbono, o silício e o germânio, elementos do grupo IV, são quase sempre tetravalentes. Assim, podemos dizer o número de valência mais provável de um elemento a partir de sua posição na tabela periódica.

**Ligação química.** Os átomos da maioria dos elementos reagem entre si ou com átomos de outros elementos para formar ligações químicas. Eles fazem isso para alcançar uma configuração eletrônica mais estável. Quando os átomos reagem uns com os outros, às vezes, resulta uma molécula; outras vezes, formam-se íons.

Para que se estabeleça uma ligação química entre dois átomos ocorre um

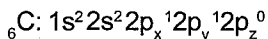
decréscimo de energia, em razão de sua liberação, o que significa dizer que os compostos estão em um estado de energia mais baixo que o dos átomos que lhes deram origem.

**Ligação covalente.** Essa ligação entre átomos resulta do compartilhamento de elétrons, de tal modo que os elétrons dos dois átomos fiquem sob a influência de ambos os núcleos. Na ligação covalente ocorre a formação de um orbital molecular que será ocupado pelo par de elétrons compartilhado pelos átomos unidos pelo orbital formado. Esse orbital é uma parte de ambos os átomos sob a influência dos núcleos atômicos. A estabilidade pode ser atribuída à atração que os núcleos exercem sobre o par de elétrons compartilhado.

Quando a ligação ocorre entre átomos idênticos, a distribuição dos elétrons compartilhados será simétrica, por ser igualmente influenciada pelos dois núcleos idênticos. Essa ligação é apolar, onde o centro de carga negativa dos elétrons coincide com o centro de cargas positivas dos núcleos. Quando os átomos são diferentes, o par de elétrons se distribui assimetricamente, devido a maior probabilidade dos elétrons estarem mais próximos de um dos núcleos. Nesse caso, o átomo mais eletronegativo atrairá mais o par de elétrons compartilhado que o outro átomo, formando uma ligação covalente polar, na qual existe uma separação entre os centros de carga positiva e negativa, ao longo do eixo da ligação.

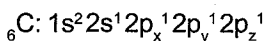
Os orbitais moleculares devem ter geometria adequada para formar as ligações covalentes. Os orbitais *s* são esféricos em torno do núcleo, podendo, portanto, interagir igualmente com outros núcleos, em qualquer direção. Outros tipos de orbitais têm características direcionais e formam, portanto, ligações direcionais. Na ligação entre átomos de flúor para a formação de sua molécula simples ( $F_2$ ), o orbital de ligação é constituído por um dos dois orbitais atômicos  $2p$  de cada átomo de flúor. A ligação entre o hidrogênio e o flúor (HF) resulta da combinação do orbital  $1s$  do hidrogênio e o orbital  $2p$  do flúor. Nas duas moléculas, as ligações encontram-se na direção onde os orbitais atômicos  $2p$  do flúor têm alta densidade eletrônica e formam orbitais moleculares do tipo sigma ( $\sigma$ ).

O átomo de carbono apresenta particularidades que o torna diferente dos demais elementos químicos. No estado fundamental, o átomo de carbono tem seis elétrons, assim distribuídos:



Nessa forma, o carbono poderia formar duas ligações covalentes, usando seus elétrons *p* desemparelhados. Nesse arranjo do carbono fica vago um orbital de baixa energia ( $2p_z^0$ ). No entanto, atinge-se um estado de energia muito mais baixo, utilizando-se esse orbital vazio na formação de uma ligação. Isto pode ocorrer, se o elétron do orbital  $2s^2$  saltar para o orbital  $2p_z^0$ , o que faz surgir quatro orbitais incompletos, denominados orbitais híbridos, de um novo tipo.

O processo de hibridação permite formar quatro ligações covalentes, o que caracteriza a tetravalência do carbono. As quatro valências são iguais entre si e, dessa forma, podem formar ligações simples, por exemplo, com quatro átomos de hidrogênio, formando o composto mais simples de carbono e hidrogênio, o metano ( $CH_4$ ).



Nesse caso, a hibridação é do tipo  $sp^3$  onde há um elétron em cada orbital

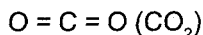


híbrido. Na hibridação  $sp^3$  ocorre uma reorientação dos orbitais envolvidos, definida no espaço nas direções dos vértices de um tetraedro regular imaginário, com o átomo de carbono em seu centro e suas valências direcionadas para os seus quatro vértices. A molécula do metano é, por isso, uma estrutura tridimensional, com o átomo de carbono no centro e os átomos de hidrogênio em torno dele igualmente separados entre si e formando ângulos iguais a  $109^{\circ}28'$ .

A hibridação  $sp^3$  só aparece nas ligações simples ou ligações sigma ( $\sigma$ ) entre átomos de carbono e de átomos de carbono com outros átomos. Na formação da molécula do  $CH_4$ , a ligação se faz entre os orbitais  $s$  dos átomos de hidrogênio e os orbitais  $sp^3$  do carbono, dando origem a orbitais moleculares  $\sigma_{s-sp^3}$ .

Uma ligação simples entre átomos de carbono representa a união de dois tetraedros por um vértice.

No entanto, um átomo de carbono pode estabelecer duas ou três ligações com um segundo átomo, formando ligações dupla e tripla. Diz-se que as moléculas são insaturadas quando ligações múltiplas estão unindo dois átomos. A dupla ligação envolve dois pares de elétrons compartilhados.



Para a formação de uma dupla ligação, o átomo se ativa com a passagem de um elétron do orbital  $2s^2$  para o orbital  $2p_z^0$ , formando orbitais híbridos do tipo  $sp^2$ , permanecendo à parte um orbital do tipo  $p$ .

A hibridação  $sp^2$  é trigonal. Os três orbitais híbridos  $sp^2$  estão em um mesmo plano e separados por ângulos de  $120^{\circ}$  iguais entre si. O quarto elétron do carbono permanece em orbital do tipo  $p$  puro.

A segunda ligação de uma união dupla entre os mesmos átomos é de caráter diferente em relação à primeira. A primeira delas é uma ligação sigma formada pela interpenetração das extremidades dos orbitais atômicos. A segunda ligação se forma por interpenetração lateral de dois orbitais atômicos paralelos. Dois átomos unidos por uma ligação sigma têm orbitais  $p$  que se dispõem em posições perpendiculares ao eixo da ligação sigma, estando numa posição favorável a sua interpenetração que, quando ocorre, produz um orbital ligante. Esta ligação é denominada ligação pi ( $\pi$ ).

Após a ativação, um átomo de carbono pode originar dois orbitais híbridos do tipo  $sp$  e dois orbitais atômicos  $p$ . A hibridação  $sp$  é digonal, ou seja, os orbitais  $sp$  se dispõem em linha reta separados por um ângulo de  $180^{\circ}$ , enquanto os orbitais  $p$  se mantêm em dois planos perpendiculares entre si. Nesse caso, é possível, para o átomo, formar simultaneamente duas ligações pi. Ambas as ligações pi podem ser formadas com outro átomo de carbono, permitindo uma ligação tríplice ou com átomos diferentes originando duas duplas ligações, como na molécula do  $CO_2$ .

Todas as quatro camadas de valência  $s$  e  $p$  de um átomo em uma molécula serão ocupadas por elétrons, nenhuma ficará vazia. Os orbitais  $s$  e  $p$  podem ser convertidos em orbitais sigma e pi ligantes. Não podem ser formadas mais de duas ligações pi por um determinado átomo, pois apenas dois orbitais  $p$  podem ficar perpendiculares ao eixo de uma ligação sigma. Uma ligação dupla entre átomos de carbono representa a união de dois tetraedros unidos por uma aresta e uma ligação tripla, dois tetraedros unidos por uma face.

O carbono pode ligar-se ora a elementos eletropositivos como, por exem-

plo, o hidrogênio, ora a elementos eletronegativos, como o oxigênio. O hidrogênio aparece nos compostos orgânicos típicos e juntamente com o oxigênio e o nitrogênio são os elementos mais frequentes, e, por isso, são elementos formadores dos compostos orgânicos. Outros elementos que entram na formação das moléculas orgânicas são o enxofre, o fósforo, os halogênios (F, Cl, Br, I) e os metais (Fe, Mg).

O átomo de carbono tem a capacidade extraordinária de ligar-se a outros átomos de carbono, de oxigênio e de nitrogênio, etc, formando cadeias curtas ou longas e com as mais variadas disposições.

**Ligação covalente doador-receptor.** Em certas substâncias formadas por ligações covalentes, os átomos ligantes podem contribuir desproporcionalmente no compartilhamento de elétrons para a ligação. Para isso, um átomo deve ter um par de elétrons para ser compartilhado e o outro átomo deve ter um orbital vazio. A ligação ocorre pelo compartilhamento do par de elétrons do átomo doador para o orbital vazio do átomo receptor. A ligação denomina-se doador-receptor ou covalente coordenada.

**Ligação iônica.** No caso extremo em que a diferença de eletronegatividade é muito grande, o par de elétrons compartilhados está essencialmente sob a influência de um dos núcleos. Nesse caso, um dos átomos perde o elétron para o outro, ficando com carga elétrica positiva e o outro com carga elétrica negativa. Por isso, não se tem uma ligação no sentido convencional, em consequência dos átomos, agora íons, serem atraídos um para o outro por força de interação eletrostática. Para separá-los, faz-se necessário desprender uma quantidade considerável de energia. A essa interação dá-se o nome de ligação iônica. Se a energia eletrostática de atração exceder a quantidade de energia necessária para formar os dois íons será possível formar-se uma molécula estável.

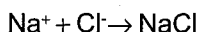
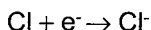
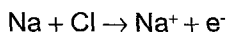
Dessa forma, a ligação iônica é formada pela transferência de um ou mais elétrons, de um átomo para outro, originando íons. Para que isso ocorra é necessário que a energia de ionização do átomo doador de elétrons seja baixa e que o átomo receptor tenha uma elevada afinidade por elétrons. Denomina-se potencial de ionização (PI) a energia necessária para que o átomo libere um elétron e afinidade eletrônica (AE) a energia liberada quando um elétron é anexado a um átomo.

A energia necessária para formar dois íons será igual ao potencial de ionização menos a afinidade eletrônica. Caso dois íons se aproximem suficientemente de modo que a energia eletrostática de atração (ER) seja maior que a energia resultante, formar-se-á uma molécula estável.

Considere as energias envolvidas na formação do cloreto de potássio (KCl), o potencial de ionização (PI) do potássio é 4,34 e a afinidade eletrônica (AE) do Cloro é 3,82.

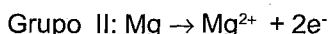
$$\text{KCl: } K^+(\text{PI } 4,34) \text{ Cl}^-(\text{AE } 3,82) \text{ ER} = 4,34 - 3,82 = 0,52$$

Os elementos do grupo IA apresentam as mais baixas energias de ionização e os do grupo VIIA as máximas afinidades por elétrons, o que favorece as reações de transferência de elétrons entre átomos dos dois grupos:

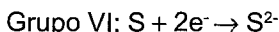


Quando o elétron de valência do sódio é removido, o átomo torna-se estável à semelhança do gás nobre neônio. O átomo de cloro ao ganhar um elétron fica com uma estrutura eletrônica estável, semelhante à de um átomo de gás nobre argônio. Os átomos, agora íons, se atraem formando o cloreto de sódio.

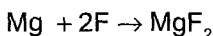
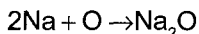
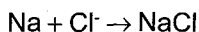
Os elementos dos grupos IIA e IIIA devem perder mais de um elétron para formar uma estrutura estável.



Os elementos do grupo VI e V podem formar ânions de cargas múltiplas, por envolver sucessivas afinidades por elétron.



A fórmula de um composto iônico é a relação de íons positivos e negativos, formando um composto neutro.



**Íons multiatômicos.** Muitas substâncias apresentam características de ligações iônicas e de ligações covalentes. Essas substâncias, denominadas radicais, contêm átomos unidos por ligação covalente e são dotadas de carga elétrica. O  $\text{NH}_4^{+}$  é um radical. Na substância  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , o radical  $\text{NH}_4$  é unido por ligação iônica aos íons  $\text{Cl}^{-}$ . Nesses radicais, os átomos são ligados por pares de elétrons compartilhados, porém, há uma carga residual no grupo, tornando-o uma espécie química iônica. Compostos contendo radicais apresentam habitualmente características iônicas.

**Polaridade da ligação.** Quando orbitais atômicos combinam-se, não é necessário que eles contribuam igualmente para a formação de um orbital molecular. Em geral, quando os átomos que se ligam são diferentes, é comum que suas contribuições sejam diferentes; a um átomo de maior eletronegatividade é atribuída uma maior contribuição para o orbital molecular que um átomo menos eletronegativo e os elétrons de ligação estão sob maior influência de um dos núcleos que do outro.

Para uma molécula como a do ácido clorídrico ( $\text{HCl}$ ), o orbital de ligação sigma é formado por uma combinação linear do orbital  $1s$  do hidrogênio com o orbital  $3p$  do cloro. O cloro, de eletronegatividade 3, atrai os elétrons mais fortemente que o hidrogênio, de eletronegatividade 2,1, produzindo uma ligação polarizada. As ligações polares têm caráter parcialmente iônico, uma vez que o deslocamento da densidade eletrônica é equivalente a uma transferência parcial de carga. Com isso, uma ligação iônica pode ser considerada como uma ligação covalente complementariamente polarizada.

As propriedades de substâncias iônicas são radicalmente diferentes daquelas compostas por moléculas. Em uma substância sólida composta de íons, cada íon está circundado por íons vizinhos dotados de cargas opostas que, por sua vez, estão circundados por outros íons. As forças eletrostáticas entre os íons adjacentes produzem grandes forças de interação entre as partículas de cargas opostas.

tas. A soma dessas forças em um sólido iônico excede consideravelmente a energia de muitas reações químicas comuns.

Substâncias iônicas e substâncias covalentes são compostas por moléculas diferentes. As moléculas propriamente ditas são compostas de átomos ligados entre si por ligações covalentes, porém a atração entre as moléculas vizinhas é muito pequena. As forças que mantêm unidas as moléculas de uma substância sólida denominam-se forças de van der Waals e se caracterizam por serem forças muito pequenas, quando comparadas às forças eletrostáticas existentes entre os íons.

Um íon simples é essencialmente uma partícula esférica, dotada de carga elétrica positiva ou negativa. A intensidade dos campos elétricos dos íons adjacentes determina a força de interação entre as partículas. Nas espécies iônicas, as forças eletrostáticas não são direcionais.

Ao contrário, as ligações covalentes são direcionais e conduzem a um arranjo definido dos átomos em uma molécula. Nas moléculas do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e da água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), ambas triatômicas, os átomos estão dispostos linearmente no  $\text{CO}_2$  ( $\text{O} = \text{C} = \text{O}$ ) e, na água, apresentam uma estrutura angular com as duas ligações  $\text{O} - \text{H}$  formando um ângulo de  $104^\circ 40'$  entre elas.

Na definição da geometria molecular, os pares de elétrons da camada de valência têm influência sobre a estrutura da molécula. A estrutura linear é a única possível para dois pares de elétrons. Duas estruturas moleculares, um triângulo plano e uma estrutura angular, são observadas quando há três pares de elétrons no átomo central. Quatro pares de elétrons dão origem a uma estrutura tetraédrica, havendo dois fragmentos para uma estrutura tetraédrica, uma pirâmide trigonal e uma estrutura angular.

**Interações íon-molécula e molécula-molécula.** Os íons interagem com as moléculas de maneira muito semelhante à sua interação com íons de carga oposta. Quando uma molécula é polar, ela é orientada pelo campo elétrico do íon, de modo que a extremidade de carga oposta do dipolo esteja dirigida para o íon. Nesse caso, a presença do íon cria um momento dipolo que aumenta o momento dipolar de uma molécula polar. Em caso de uma molécula não polar, a presença do íon cria um momento dipolo, induzindo na molécula uma polaridade, o dipolo induzido. As cargas parciais, no dipolo, são menores que uma carga iônica integral, de modo que as interações íon-dipolo, em geral, são mais fracas que as interações íon-íon ou entre os átomos em ligações covalentes.

As diferentes interações íon-molécula e molécula-molécula podem ser agrupadas em cinco categorias:

**1. Ligação íon-dipolo permanente.** A tendência de íons e dipolo permanente de interagirem explica as interações que ocorrem em muitas soluções comuns que contém um solvente polar. Soluções aquosas de espécies iônicas, como as de cloreto de sódio, contém ligações íon-dipolo permanente, em que um número variável de moléculas de água está intimamente associado aos íons, formando hidratos.

A solubilidade em água de muitas substâncias iônicas é o resultado das ligações íon-dipolo que o soluto forma com o solvente. Geralmente, os sais iônicos monovalentes são facilmente solúveis em água, porém os íons polivalentes interagem tão fortemente, que a formação da ligação íon-dipolo não pode romper a rede cristalina.

**2. Ligação íon-dipolo induzido.** A ligação íon-dipolo induzido explica alguns compostos por ligação covalente coordenada em que um grupo coordenado não é polar, porém, se torna polarizado pelo íon. No íon iodeto, um íon I<sup>-</sup> induz um dipolo na molécula de iodo (I<sub>2</sub>) não polar. A natureza do íon tri-iodeto é semelhante à de qualquer molécula linear, covalentemente ligada.

**3. Ligação dipolo permanente-dipolo permanente.** As moléculas polares interagem umas com as outras nos estados físicos, sólido e líquido, de modo semelhante a dos íons de uma substância iônica. A energia da interação eletrostática depende, naturalmente, do tamanho das cargas dipolares. As moléculas polares são orientadas nas redes sólidas de modo que a extremidade negativa de um dipolo se aproxima da extremidade positiva do outro. A quantidade de energia necessária para romper esse arranjo é maior que a necessária para romper uma rede semelhante de moléculas não polares.

**4. Ligação dipolo induzido-dipolo induzido.** As moléculas de água, fortemente dipolares, induzem um dipolo nas moléculas que, de outro modo, seriam não polares, formando ligações muito fracas. A interação dipolo induzido-dipolo induzido é mais frequentemente encontrada nas soluções de moléculas não polares em solventes polares. É a mais fraca do grupo e ocorre nos sólidos moleculares que teriam, sem essa interação, moléculas simétricas.

As moléculas de iodo sólido, por exemplo, são capazes de interagir umas com as outras, induzindo, mutuamente, interações dipolo-dipolo fracas e transitórias.

**5. Forças de van der Waals.** Em um sentido mais amplo, muitas das interações de moléculas que não as ligações iônicas ou covalentes foram atribuídas a forças atrativas de van der Waals. Essas forças são o resultado da interação de cargas positivas e negativas entre os átomos vizinhos. Os elétrons de átomos vizinhos se repelem mutuamente, porém atraem as cargas nucleares positivas. As cargas nucleares se repelem quando os átomos se aproximam uns dos outros, porém são atraídas pelas nuvens de elétrons. As forças repulsiva e atrativa se equilibram a uma distância intermolecular de 4Å. Entretanto, a distâncias intermoleculares entre 4Å e 10Å, há uma força atrativa nítida. Essas forças atrativas são bastante fracas e são inversamente proporcionais à sexta potência da distância entre os átomos. Aproximando-se duas moléculas, elas exercerão forças atrativas, uma sobre a outra, até que se mantenham a cerca de 4Å. Em distâncias menores, elas começam a se repelir e, na ausência de outras forças, permanecerão em equilíbrio previsto pelas forças de van der Waals.

**Sólidos cristalinos (supermoléculas).** A maioria dos compostos e dos elementos, quando no estado sólido, apresenta-se com os átomos numa rede periódica que aparece à observação como um cristal. Os átomos podem ser ligados numa estrutura periódica ilimitada ou supermoléculas. Da mesma forma que há moléculas iônicas e covalentes, há também cristais iônicos e covalentes. Os cristais assumem uma configuração espacial de menor energia.

**Ligação metálica.** A ligação metálica ocorre apenas em elementos com elétrons periféricos em quantidade suficientemente pequena. A ligação metálica aparece quando os átomos são colocados mais próximos um do outro do que o tamanho da nuvem eletrônica dos elétrons periféricos; essa configuração tende a elevar os elétrons externos a energias mais altas. No entanto, nos metais essa configuração

ainda tem energia menor do que se os átomos estivessem muito afastados.

Nos cristais iônicos e covalentes, os elétrons periféricos estão ligados a seus próprios átomos, por isso geralmente não conduzem eletricidade. Os cristais metálicos terão elétrons livres ou de condução que não estão ligados a nenhum átomo em particular e tem a liberdade de se moverem em qualquer lugar do metal.

Átomo = nuvem eletrônica interna (fechada) e nuvem eletrônica externa (aberta)

O lítio, o potássio e o sódio têm apenas um elétron externo. Se os átomos se amontoarem de modo a que suas camadas internas fechadas se toquem, os núcleos vizinhos ficarão no interior do que era a nuvem eletrônica externa do átomo livre. Nesse caso, o elétron periférico é atraído pelos núcleos vizinhos, o que aumenta tanto a sua energia de ligação como o seu tamanho. Isso lhes permitem aproximar-se de átomos vizinhos ainda mais afastados, que por sua vez afasta a nuvem eletrônica ainda mais, resultando que cada elétron periférico tem uma fração de onda que se estende por todo o cristal.

**Semicondutores.** Há alguns cristais não-metálicos covalentes, como o silício e o germânio, onde as funções de onda dos elétrons periféricos não se estendem completamente por todo o cristal, mas apenas até o vizinho mais próximo do átomo considerado. No entanto, para o silício e o germânio, o primeiro estado excitado de um elétron externo do átomo é formado por uma nuvem eletrônica suficientemente grande para satisfazer a condição de se estender a todo o cristal.

O silício e o germânio, com todos os seus elétrons nos estados de energia mais baixos, são cristais covalentes ou isolantes. No entanto, se alguns dos seus elétrons externos puderem ser excitados até o próximo estado de energia mais alta, chamada banda de condução, esses elétrons excitados subitamente tornar-se-ão elétrons livres e o cristal poderá conduzir eletricidade. À temperatura ambiente apenas uma percentagem muito pequena de elétrons estará nesta condição, no entanto, haverá pelo menos alguns elétrons de condução, resultando que a condutividade do germânio será muitas vezes maior que a de um isolante, caracterizando o estado de semicondutor. A presença de uma pequena quantidade de impureza pode aumentar enormemente a condutividade do germânio. Por exemplo, poucas partes por milhão (ppm) de arsênio podem aumentar a condutividade do germânio por um fator de 1.000 à temperatura ambiente. O arsênio tem um elétron a mais que o germânio e este elétron se encontra no próximo estado de energia mais alto. Assim, o elétron externo de um átomo de arsênio inserido em um cristal de germânio estará forçosamente na banda de condução.

O germânio é fabricado com impureza de arsênio ou germânio tipo n (negativo). Os cristais de germânio podem ser produzidos com impurezas de gálio. O átomo de gálio captura um elétron de um átomo de germânio vizinho deixando uma lacuna eletrônica que se pode movimentar de um átomo de germânio a outro, funcionando como um portador positivo ou germânio tipo p (positivo). Uma junção p-n é formada por um semicondutor que tenha regiões de impurezas do tipo p e tipo n adjacentes uma à outra. Assim o semicondutor tem a propriedade de ter resistência elétrica centenas de vezes maior em um sentido do que no outro.

# RADIAÇÃO X

**Radiações X** são radiações eletromagnéticas de comprimentos de onda compreendidos entre 14 nm e 0,005 nm. Os fótons de radiação X são dotados de maior energia que fótons de radiações ultravioletas e menor energia que os de radiações gama.

Os raios X foram descobertos por Wilhelm Röntgen em novembro de 1895, enquanto estudava, em um quarto escuro, a fluorescência verde produzida pela descarga de raios catódicos em uma ampola de vidro coberta externamente por cartolina preta. Röntgen observou que uma placa fluorescente de platina-cianeto de bário, que se encontrava sobre a mesa de trabalho, emitia luz quando a ampola era acionada. Naquela época, não se conhecia nenhuma forma de radiação de comportamento semelhante à luz e capaz de atravessar os corpos negros, razão pela qual Röntgen a denominou Raios X.

Em dezembro de 1895, ao anunciar sua descoberta, Röntgen estabeleceu que as radiações X eram capazes de:

1. Impressionar filmes fotográficos.
2. Produzir fluorescência em numerosas substâncias.
3. Ionizar o ar.
4. Atravessar os organismos e que os tecidos moles absorviam menos esta radiação que os ossos.

5. Ampolas com gás rarefeito produziam raios X moles (pouco penetrantes), portanto, facilmente absorvidos pela matéria e naquelas em vácuo máximo os raios X gerados eram muito penetrantes ou duros.

A repercussão dessa descoberta foi imediata e em pouco tempo clínicas de Viena já utilizavam a radiação X para fins de diagnóstico médico.

**Produção dos raios X.** Os raios X são gerados pela desaceleração de elétrons ao colidirem contra uma superfície material qualquer. Para a produção de raios X, um feixe de elétrons desprendidos de um cátodo é acelerado por uma diferença de potencial de alta tensão para colidir contra uma superfície material ligada ao ânodo, denominado anticátodo, construído com substâncias pesadas de alto ponto de fusão, como o tungstênio.

Os primeiros tubos geradores continham gás residual com pressão relativamente alta e produziam raios X de pequeno poder de penetração. Durante a descarga elétrica, íons são produzidos em consequência da quebra das moléculas do gás. A fixação dos íons aos materiais do tubo, aumenta progressivamente o vácuo, determinando a produção de raios X de comprimento de onda cada vez menor, ou seja, mais energéticos e, portanto, mais penetrantes.

Os tubos de raios X modernos foram desenhados por Coolidge em 1913. Estes tubos apresentam vácuo máximo. A fonte de elétrons é um filamento de tungstênio (cátodo-filamento) que, ao ser aquecido pela passagem de corrente elétrica, libera uma nuvem de elétrons. Uma diferença de potencial de alta tensão é aplicada entre o cátodo-filamento e o anticátodo de tungstênio a fim de acelerar os elétrons, que em alta velocidade, colidem contra o anticátodo, produzindo radiação X. Um cilindro de Molibdênio carregado negativamente é colocado em torno do cátodo-filamento com o objetivo de concentrar em um único feixe os elétrons liberados pelo cátodo-filamento. O conjunto cátodo-filamento-cilindro constitui o fuzil de elétrons.

É possível controlar a qualidade e a quantidade dos raios X produzidos nos tubos de raios X. A intensidade da corrente elétrica, miliamperagem (mA), que passa pelo cátodo-filamento regula a quantidade de elétrons liberados por efeito termiônico, determinando a quantidade de elétrons que colidem contra o anticátodo e, conseqüentemente, a quantidade de raios X produzidos. A voltagem de alta tensão, kilovoltagem (kV), entre o cátodo e o anticátodo determina a energia dos raios X, ou seja, a sua capacidade de penetração na matéria (dureza da radiação). Desse modo, uma maior intensidade de corrente elétrica que passa pelo cátodo-filamento determina a maior quantidade de raios X produzidos e uma maior voltagem determina raios X mais energéticos (qualidade da radiação).

O comprimento de onda dos raios X depende da diferença de potencial aplicada entre o cátodo e o anticátodo: quanto maior esta diferença menor o comprimento de onda dos fótons de raios X gerados. A tabela 10 apresenta as relações entre comprimentos de onda dos raios X gerados por diferentes voltagens aplicadas às ampolas de raios X.

Tabela 10. Comprimentos de onda dos raios X gerados em função da diferença de potencial aplicada ao tubo e classificação quanto à capacidade de penetração ou dureza.

<i>Dureza</i>	<i>Comprimento de Onda (Angström)</i>	<i>kilovoltagem</i>
Muito duros	0,05	250
Duros	0,10	125
Médios	0,15	85
Moles	0,25	50
Muito moles	0,50	25

Fonte: Cicardo, V.H. Física Biológica. Buenos Aires: Lopez Libreros Editores, 1960.

O rendimento dos tubos na geração de raios X é baixo, sendo menor que 1% da energia consumida. Toda a energia restante é convertida em calor que pode superaquecer o anticátodo. Assim sendo, faz-se necessário um sistema eficiente para o resfriamento do anticátodo, assegurado pela condução do calor através de uma barra de cobre que mantém o anticátodo em uma extremidade e a outra contendo um sistema de dissipação de calor. Além disso, na atualidade, os anticátodos são discos de tungstênio que giram movidos por um motor a uma velocidade de 3.000 rotações por minuto, de modo que o impacto do feixe de elétrons não ocorra sempre no mesmo lugar, evitando o dano rápido do anticátodo, o que inutilizaria o tubo gerador de raios X.

Os tubos geradores de radiação X são produzidos em diversas formas e tamanhos adaptando-se a equipamentos de portes e funções diferentes. Os anticátodos são inclinados em ângulos de 45° para favorecer a emissão dos raios X na direção desejada.

**Mecanismos de geração dos raios X.** Os elétrons projetados pelo fuzil de elétrons interagem com átomos constituintes do anticátodo. Nessas interações, ocorrem transferências de parte de suas energias, produzindo os fenômenos de excitação e ionização dos átomos do anticátodo e, como consequência, a geração de fótons de raios X.

Os elétrons acelerados, embora sob a ação de uma mesma diferença de potencial, possuem diferentes valores de energia cinética. Desse modo, tem-se um grande número de elétrons com um valor médio de energia, enquanto outros apresentam valores de energia acima e abaixo desse valor médio.



As interações dos elétrons com diferentes energias cinéticas podem ocorrer com elétrons orbitais ou com os núcleos dos átomos do anticátodo.

Nas interações com a eletrosfera dá-se a transferência de energia de elétrons acelerados para elétrons orbitais, que dependendo da quantidade de energia recebida, podem saltar para uma camada de energia mais externa ou serem ejetados do átomo. Na primeira condição, o átomo passa ao estado excitado, com um orbital interno desfalcado. Em um intervalo de tempo muito curto ( $10^{-12}$  s), o elétron retorna a seu nível original de energia, emitindo, para isso, um fóton de radiação. Caso os saltos ocorram das camadas M para L ou L para K de energia são emitidos fótons de radiações X. A energia dos fótons de radiação X gerados depende do nível de energia do elétron envolvido na interação. Na ionização, o elétron orbital é arrancado do átomo, os elétrons das camadas de maior energia descem para ocupar os orbitais internos vazios, sendo emitidos fótons de radiação X nos saltos para as camadas L e K.

Quando os elétrons acelerados passam nas proximidades dos núcleos dos átomos do anticátodo são atraídos por forças eletrostáticas nucleares, o que provoca brusca desaceleração, com mudança na direção de sua trajetória e perda de energia cinética com a emissão de fóton de radiação X, fenômeno denominado reação de frenamento.

**Espectro das radiações X.** As radiações emitidas por tubos de raios X formam um conjunto de fótons de diferentes energias, no qual se distinguem dois espectros:

**1. Espectro descontínuo ou característico.** É representado por estreitos picos de radiações superpostos a um espectro contínuo de energia dos raios X emitidos. Essas radiações X resultam das interações dos elétrons acelerados com elétrons das camadas K, L e M dos átomos do anticátodo.

A voltagem do tubo gerador de raios X ao atingir um valor crítico são emitidos fótons de radiações X de energias semelhantes, cujos comprimentos de onda dependem da natureza dos átomos do anticátodo e das camadas energéticas onde ocorrem as interações, sendo, por essa razão, denominados raios X característicos. Quando são aplicadas altas tensões no tubo gerador de raios X, surge o primeiro pico constituído por radiações X de maior energia produzidas pelas interações dos elétrons acelerados com elétrons da camada K. O segundo pico corresponde a raios X de comprimento de onda sete vezes maior, que constitui a série L, gerado pela interação com elétrons da camada L. Da mesma forma, a interação com elétrons da camada M gera radiações X da série M, de comprimentos de onda cinco e seis vezes mais longos.

**Espectro contínuo ou de fundo.** A emissão de fótons de radiação X que compõem o espectro contínuo depende da diferença de potencial entre o fuzil de elétrons e o anticátodo e independe da natureza do material que compõe o anticátodo. Ele se origina pela reação de frenamento sofrida pelos elétrons mais energéticos ao serem atraídos pelos núcleos dos átomos do anticátodo. Essas radiações diminuem seus comprimentos de onda à medida que aumenta a diferença de potencial entre o fuzil de elétrons e o anticátodo, o que determina uma maior energia cinética dos elétrons no momento da interação. Considerando-se que a energia cinética do elétron é igual ao produto de sua carga elétrica ( $e$ ) pela diferença de potencial ( $V$ ) do campo elétrico gerado pelo cátodo e o anticátodo e que toda a energia seja transformada em um fóton de energia radiante ( $E = h \times \nu$ ), teremos:

$$E_c (\text{elétron}) = E (\text{fóton})$$

$$e \times V = h \times \nu$$

Substituindo-se  $\nu$  pelo seu valor em função do comprimento de onda ( $c/\lambda$ ), obtém-se:

$$e \times V = h \times c / \lambda$$

Os valores de  $h$  (constante de Planck =  $6,62 \times 10^{-27}$  erg.s),  $c$  (velocidade da luz =  $3 \times 10^{10}$  cm.s<sup>-1</sup>), e ( $e$  (carga do elétron =  $4,8 \times 10^{-10}$  unidades eletrostáticas de carga) são constantes. A diferença de potencial ( $V$ ) é expresso em volts e, tendo em vista que 1 volt = 1/300 unidades eletrostáticas de carga, a expressão anterior pode ser reescrita:

$$E \times V / 300 = h \times c / \lambda$$

Substituindo-se os valores das constantes, obtém-se a seguinte relação:

$$\lambda_0 \times V = 1,24$$

Onde,  $\lambda_0$  corresponde ao menor comprimento de onda do espectro em análise, expresso em nanômetro e  $V$  é a diferença de potencial entre o cátodo e o anticátodo, expresso em quilovolts (kV).

Segundo esta relação, para uma diferença de potencial de 100 kV, o menor comprimento de onda para os fótons de radiação X gerados em uma ampola de raios X será igual a:

$$\lambda_0 = 1,24 / 100 = 0,0124 \text{ nm}$$

Como os elétrons provenientes do cátodo apresentam diferentes valores energéticos, embora dentro de uma faixa estreita de kilovoltagem, uns se aproximam mais ou menos do núcleo dos átomos do anticátodo, dissipando quantidades variáveis de energia em forma de fótons de diferentes comprimentos de onda ou energias, mas dentro do intervalo de energia da radiação X. Dessa forma, a curva do espectro contínuo da radiação não é homogênea, mas, para um determinado comprimento de onda há um valor máximo ( $\lambda_m$ ) indicativo da maior quantidade de fótons X produzidos. Este máximo se desloca no sentido dos menores comprimentos de onda à medida que se eleva a diferença de potencial do tubo gerador de raios X.

A radiação X do espectro contínuo, por sua previsibilidade, é a que se utiliza em medicina, interessando o valor de  $\lambda_m$  que corresponde ao maior número de fótons, ou seja, a maior quantidade de radiação produzida.

O valor do comprimento de onda dos fótons de radiação X mais abundantes é dado pela expressão:

$$\lambda_m = 1,5 \times \lambda_0$$

Para um tubo de raios X sob tensão de 180 kV, os valores do  $\lambda_0$  e do  $\lambda_m$  gerados são:

$$\lambda_0 = 1,24 / 180 = 0,0068 \text{ nm}$$

$$\lambda_m = 1,5 \times 0,0068 = 0,0102 \text{ nm}$$

**Absorção de radiação X pela matéria.** Quando um feixe de raios X atravessa um corpo ocorre diminuição da energia dos fótons X, ou atenuação, em consequência da transferência de energia da radiação X incidente para os átomos que o compõem. A absorção da energia pelos átomos do meio material causa ejeção de

elétrons do átomo com formação de pares de íons, o denominado efeito fotoelétrico, dispersão dos raios X incidentes por efeito Compton e a produção de raios X secundários.

No efeito fotoelétrico, toda a energia do fóton de radiação X incidente é transferida a um elétron orbital, sendo esta energia suficiente para fazê-lo vencer a força de atração nuclear, ejetando-o do átomo. O elétron e o átomo com um orbital vazio formam um par de íons (ionização). A saída do elétron orbitário, desfalcando um nível menos energético, desencadeia uma cascata de elétrons de camadas mais periféricas para ocupar os níveis mais internos, com a consequente emissão de fótons. Nos saltos quânticos de elétrons de camada M para L e de L para K são emitidos fótons X (radiação X secundária).

O efeito Compton ocorre na interação do fóton de radiação X incidente (ou primário) com um elétron de um átomo do corpo com o qual interage, cedendo-lhe parte de sua energia, o fóton primário sofre desvio de sua trajetória (dispersão dos raios X primários). Ao receber energia adicional, o elétron não pode permanecer em seu nível original de energia, saltando para uma camada mais periférica (excitação atômica). Neste fenômeno, a energia cedida pelo fóton X ao elétron, não foi suficiente para fazê-lo vencer a força de atração do núcleo, que permanece na eletrosfera do átomo. O átomo não pode permanecer em estado excitado, portanto, o elétron retorna a seu nível original de energia e, ao fazê-lo, emite um fóton cuja energia depende dos níveis de energia envolvidos no fenômeno.

**Atenuação.** A atenuação de um feixe de fótons X incidentes, ou raios X primários, em um material absorvedor de espessura  $\Delta x$  é descrita pela equação exponencial:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot \Delta x}$$

Onde,  $I_0$  e  $I$  são as intensidades dos fótons X incidente e transmitido e  $\mu$  é o coeficiente linear de absorção, que depende da energia do fóton incidente e da qualidade do material atravessado.

Devemos entender o coeficiente linear de absorção como a fração da diminuição de intensidade de um fóton X incidente de unidade de secção e por unidade de comprimento percorrido através de um meio absorvente.

A absorção dos raios X por um corpo simples depende do número de átomos que a radiação encontra em sua trajetória. Para um corpo composto, a absorção da radiação é igual à soma das absorções parciais pelos átomos que o compõe. Dividindo-se o coeficiente linear de absorção ( $\mu$ ) pela densidade ( $d$ ) de uma substância determina-se o coeficiente mássico de absorção, característico da substância.

$$\text{Coeficiente mássico de absorção} = \mu / d$$

O coeficiente de absorção por átomo ( $\mu_a$ ) é determinado pela equação:

$$\mu_a = C \cdot \lambda^3 \cdot Z^4$$

Onde,  $C$  é uma constante,  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação X e  $Z$  o número atômico do elemento.

Utilizando o coeficiente de absorção por átomo, podemos estabelecer a capacidade relativa de absorção da energia das radiações X de diferentes tecidos.

Considere, como exemplo, a absorção relativa de tecidos moles e ossos. Os tecidos moles são constituídos predominantemente por hidrogênio ( $Z=1$ ) e oxi-

gênio ( $Z=8$ ), portanto, sua capacidade de absorção de radiação é equivalente à da água. Assim sendo, a absorção molecular da água é proporcional a  $2 \times 1^4 + 8^4 = 4.098$ . O tecido ósseo é composto por uma matriz inorgânica de hidroxiapatita ( $(\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3$ ). Da mesma forma, a absorção molecular é proporcional às capacidades de absorção do fósforo ( $Z=15$ ), oxigênio ( $Z=8$ ) e cálcio ( $Z=20$ ), ou seja,  $2 \times 15^4 + 8 \times 8^4 + 3 \times 20^4 = 614.018$ . Assim, a absorção relativa dos tecidos moles e ossos é:

$$\text{osso} / \text{água} = 614.018 / 4.098 = 149,8$$

Podemos concluir que os ossos absorvem 149,8 vezes mais a energia da radiação X que os tecidos moles.

Dessa forma, para uma mesma radiação, considerando dois meios quaisquer cujos coeficientes mássicos de absorção são  $\mu_{m1}$  e  $\mu_{m2}$ , para se determinar suas capacidades de absorção relativas utilizamos a proporção:

$$\mu_{m1} / \mu_{m2} = Z_1^4 / Z_2^4$$

**Propriedades dos raios X.** As principais propriedades dos raios X são:

1. Propriedades físicas. Por serem radiações eletromagnéticas, as radiações X apresentam propriedades físicas semelhantes à da luz visível, ou seja, trajetória retilínea, velocidade de propagação de 300.000 km/s (vácuo ou ar), sofrem fenômenos de reflexão, refração e polarização, etc. Produzem ionização e, por excitação atômica, fluorescência e fosforescência em diversas substâncias (platina-cianeto de bário, tungstato de cálcio, quinina, sais de urânio e sulfato de zinco), induzem reações de oxido-redução, sensibilizam filmes fotográficos, alteram o pH do meio e desorganizam colóides.
2. Propriedades químicas. Induzem a formação de radicais livres e do peróxido de hidrogênio (água oxigenada), desnaturação e floculação de proteínas e a despolimerização e decomposição de moléculas.
3. Propriedades biológicas. As propriedades biológicas são consequência de suas propriedades físicas e químicas sobre as moléculas biologicamente importantes, como proteínas, lipídios e ácidos nucleicos, causando dano aos componentes celulares.

## RADIOATIVIDADE

**Núcleo do átomo.** O núcleo do átomo é uma estrutura formada por prótons e nêutrons, denominados núcleons. Os núcleons apresentam características muito semelhantes e são mantidos presos em órbitas definidas, análogas à estrutura das órbitas eletrônicas do átomo. O diâmetro do núcleo é da ordem de  $10^{-14}$  m. Todos os núcleos têm a mesma densidade independentemente de seu tamanho.

Os núcleons estão ligados entre si por forças atrativas, suficientemente intensas para vencer as forças de repulsão eletrostática entre os prótons. Essas forças são denominadas de forças nucleares.

**Forças nucleares.** São as forças responsáveis pela coesão do núcleo dos átomos. A interação entre as cargas elétricas dos prótons resulta em uma força de repulsão que tenderia a desorganizar o núcleo do átomo. No entanto, as interações próton-próton, próton-nêutron e nêutron-nêutron geram a força nuclear forte, que é aproximadamente cem vezes mais intensa do que a força de repulsão eletrostática dos prótons, mantendo o núcleo organizado. As forças nucleares são de curto alcance. Estas forças são atrativas quando os prótons se afastam a distâncias não muito pequenas, mas se convertem em fortemente repulsivas a partir de distâncias provavelmente inferiores a 0,5 fermi ( $1 \text{ fermi} = 10^{-15} \text{ m}$ ).

**Energia de ligação do núcleo.** Parece-nos lógico pensar que a massa de um núcleo qualquer, composto por um certo número de prótons e de nêutrons, seria igual a soma das massas dos prótons e nêutrons que o constituem. No entanto, ao medi-la, constata-se que seu valor é inferior a soma das massas de seus constituintes, ou seja, observa-se uma perda de massa no processo de estruturação do núcleo. O equivalente energético da diferença de massa denomina-se energia de ligação do núcleo ( $E_l$ ).

$$E_l = 931,5 \times (\sum m_n - M_n)$$

Onde,  $\sum m_n$  é a soma das massas individuais dos núcleons (número de prótons  $\times$  massa do próton + número de nêutrons  $\times$  massa do nêutron) que compõem o núcleo e  $M_n$  é a massa do núcleo do átomo em questão. A  $E_l$  tem como unidade o MeV (megaelétron-volt).

A energia de ligação do núcleo representa a energia necessária para separar os seus constituintes, sendo equivalente à energia liberada quando prótons e nêutrons agrupam-se para formar um núcleo.

Considere o núcleo do átomo de Hélio ( $Z=2, A=4$ ), tendo em conta que a massa do próton é 1,007825 u.m.a e a massa do nêutron é 1,008665 u.m.a e a massa do núcleo do He é 4,002603 u.m.a. A energia de ligação do núcleo ( $E_l$ ) é:

$$E_l = 931,5 \times (2 \times 1,007825 + 2 \times 1,008665 - 4,002603) = 28,3 \text{ MeV}$$

A  $E_l$  aumenta com o número de massa, fato que se pode constatar comparando as energias de ligação do  ${}_{20}^{40}\text{Ca} = 342,1 \text{ MeV}$ ,  ${}_{29}^{63}\text{Cu} = 551,4 \text{ MeV}$  e  ${}_{92}^{238}\text{U} = 1.802 \text{ MeV}$ .

O quociente entre a energia de ligação do núcleo e o número de núcleons define a energia de ligação média por núcleon.

$$E_n = E_l / A$$

Para os núcleons dos átomos do exemplo anterior, as  $E_n$  valem:

$${}^4_2\text{He} = E_1 / A = 28,3 / 4 = 7,07 \text{ MeV}$$

$${}^{40}_{20}\text{Ca} = E_1 / A = 342,1 / 40 = 8,55 \text{ MeV}$$

$${}^{63}_{29}\text{Cu} = E_1 / A = 551,4 / 63 = 8,75 \text{ MeV}$$

$${}^{238}_{92}\text{U} = E_1 / A = 1.802 / 238 = 7,57 \text{ MeV}$$

Cada núcleon não está realmente ligado ao núcleo com uma energia  $E_1/A$ , sendo apenas um valor médio. Desse modo, a energia de separação de um núcleon, próton ou nêutron, que é a energia necessária para a sua liberação do núcleo, mesmo diferente de  $E_1/A$ , é da mesma ordem de grandeza. Um núcleo será tanto mais estável quanto maior a energia de ligação média por núcleon.

Em núcleos leves, a energia de ligação por núcleon aumenta com o aumento do número de massa ( $A$ ), o que resulta em adição de forças. No entanto, para núcleos de número de massa acima de 80, a energia de ligação por núcleon diminui gradativamente com o aumento do número de massa ( $A$ ), o que sugere que a força atrativa nuclear é de pequeno alcance (cerca de um diâmetro nuclear). Além dessa distância, a força repulsiva eletrostática domina, ou seja, quando dois prótons estão a mais de  $2,5 \times 10^{-13}$  cm de distância a força é repulsiva em vez de atrativa. Os núcleos da região  $A = 80$  são os mais fortemente ligados.

Quando um elétron e um próton são aproximados, 13,6 eV de energia são liberados, o que resulta no fato de que a massa do hidrogênio é menor 13,6 eV que a soma das massas do elétron e do próton livres. Da mesma forma, dois núcleos leves têm mais massa ou energia em repouso que a sua soma, ou seja, se puderem ser aproximados, sofrerão fusão nuclear com a liberação de energia correspondente à diferença de massa.

Se um núcleo pesado se romper em dois pedaços menores, os dois pedaços terão menor massa que o núcleo original. Assim, há uma tendência de um núcleo pesado se fissionar em dois núcleos menores, com liberação de energia.

**Modelo nuclear.** O modelo de camadas para o núcleo do átomo sugere que os núcleons se distribuem em camadas ou níveis de energia à semelhança da estrutura da eletrosfera do átomo, com um número limitado de lugares disponíveis em cada uma dessas camadas.

Em estado fundamental, o núcleo teria seus núcleons situados nas camadas de menor energia possível, ou seja, em estado mínimo de energia. No estado excitado, o núcleo apresenta uma configuração em que os núcleons não ocupam as camadas de menor energia. Se o núcleo está em estado excitado, passará ao seu estado fundamental, ou a um estado excitado de menor energia, emitindo radiação eletromagnética de energia superior à dos raios X característicos, denominada radiação gama ( $\gamma$ ).

**Estabilidade nuclear.** Os núcleos dos átomos ou nuclídeos podem ser estáveis ou instáveis. Os nuclídeos estáveis não emitem radiação. A existência de núcleos estáveis é consequência direta do fato de as forças nucleares serem muito mais intensas que as forças eletromagnéticas.

Os nuclídeos instáveis se modificam espontaneamente cedendo energia em forma de partículas ou fótons de energia eletromagnética. A instabilidade nuclear está relacionada à estrutura do núcleo. A avaliação da relação entre o número de nêutrons e o número de prótons ( $N/Z$ ) de um átomo permite estabelecer algumas regras:

1. Para os átomos leves,  $A < 20$ , os núclídeos estáveis apresentam o mesmo número de prótons e de nêutrons (relação  $N/Z = 1$ ).
2. Para os átomos de  $A > 20$ , os núclídeos para serem estáveis devem ter um número de nêutrons ( $N$ ) superior ao de prótons ( $Z$ ). Nesse caso, a relação  $N/Z$  deve ser maior que 1 e para  $A > 50$  tende a ser de aproximadamente 1,6.

Essas observações sugerem que há alguma propriedade, relacionada às forças nucleares, associada com a igualdade do número de prótons e nêutrons e, no caso dos núcleos pesados, o excesso de nêutrons se faz necessário para compensar a crescente repulsão eletrostática dos prótons.

Os núclídeos que apresentam uma relação  $N/Z$  superior ou inferior ao valor correspondente à faixa de estabilidade serão instáveis, constituindo os chamados núclídeos radioativos ou radionúclídeos.

Os núclídeos instáveis espontaneamente se desintegram emitindo partículas ou radiações eletromagnéticas (fótons) e transformar-se-ão em núclídeos diferentes, estáveis ou instáveis. No caso do núclídeo produzido ser instável, o processo se repetirá até que, depois de uma cadeia de processos radioativos, alcance a estabilidade.

Basicamente há duas formas de instabilidade nuclear:

1. A instabilidade dinâmica, onde espontaneamente a fragmentação do núcleo se produz em duas ou mais partes, como na emissão de partículas alfa, constituída por dois prótons e dois nêutrons, e a fissão espontânea do núcleo.
2. A instabilidade beta, onde, de modo espontâneo, há uma mudança de carga de  $\pm 1$  com a emissão simultânea de um elétron ( $e^-$ ) ou de um pósitron ( $e^+$ ), como ocorre na emissão de partículas beta ( $\beta$ ) e na captura eletrônica.

**Radioatividade.** A descoberta da radioatividade por Henry Becquerel em 1896 marcou o início do estudo dos núcleos atômicos. Becquerel demonstrou que sais de urânio eram capazes de sensibilizar filmes fotográficos, depois de várias horas de exposição, sendo o fenômeno determinado pela emissão espontânea de radiação penetrante por parte do urânio.

A propriedade radioativa também foi observada em átomos de tório, polônio e rádio. Como esses átomos são encontrados na natureza são denominados radionúclídeos naturais.

**Radiações atômicas.** As radiações emitidas por átomos radioativos são as radiações alfa, beta e gama, cujas características são apresentadas no quadro 1.

Quadro 1. Características das principais radiações atômicas.

<b>Radiação atômica</b>	<b>Características principais</b>
Partículas alfa ( $\alpha$ )	Correspondem ao núcleo do átomo de Hélio ( ${}^4_2\text{He}$ ) São facilmente absorvidas pela matéria Apresentam trajetória curta no ar Produzem intensa ionização de gases Apresentam velocidade de 1/10 da velocidade da luz
Partículas beta ( $\beta$ )	Correspondem a elétrons negativos ( $\beta^-$ ) ou positivos ( $\beta^+$ ) Apresentam massa 1/1.840 da massa do próton e 1/7.300 da massa da partícula alfa Apresentam maior poder de penetração na matéria Exibem trajetória mais longa no ar Produzem menor ionização de gases Apresentam velocidade de 90% da velocidade da luz
Radiações gama ( $\gamma$ )	Radiações eletromagnéticas Desprovidas de carga elétrica Exibem grande poder de penetração na matéria Apresentam velocidade igual à da luz

A capacidade de penetração na matéria é diferente para os vários tipos de radiações atômicas. As partículas alfa podem ser absorvidas por uma folha de papel, as partículas beta necessitam de 1,5 mm de chumbo para serem paradas e as radiações gama são capazes de atravessar camadas de chumbo de alguns centímetros de espessura.

A capacidade de penetração e o poder ionizante relativos das radiações atômicas são mostrados na tabela 11.

Tabela 11. Poder de ionização e poder de penetração relativos das radiações atômicas.

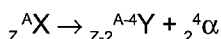
	<i>Partícula alfa</i>	<i>Partícula beta</i>	<i>Radiação gama</i>
Poder ionizante relativo	10.000	100	1
Poder penetrante relativo	1	100	10.000

Fonte: Cicardo, V.H. Física Biológica. Buenos Aires: Lopez Libreros Editores, 1960.

**Fenômeno radioativo.** A radioatividade resulta de uma transição espontânea do núcleo de um estado energético inicial maior para outro menor.

Basicamente, os processos radioativos são:

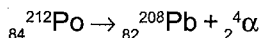
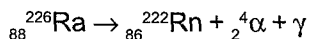
1. **Decaimento alfa.** O núcleo do átomo é instável por excesso de núcleons (prótons e nêutrons). Ao emitir uma partícula alfa, o núcleo perde dois prótons e dois nêutrons diminuindo em duas unidades seu número atômico e em quatro unidades o seu número de massa.



A partícula alfa não existe pré-formada no núcleo. Admite-se que para cada núcleo, de acordo com a relação entre o número de nêutrons e de prótons, haja uma probabilidade de que, em um determinado instante, a movimentação dos núcleons e a distribuição de energia entre eles permitam a aproximação de dois prótons e dois nêutrons, de modo a alcançar as distâncias compatíveis para a estruturação da partícula alfa. Nesse momento, a energia dissipada para unir os núcleons e a nova distribuição da energia, agora modificada pela presença anômala da partícula alfa formada, permite ejetá-la para fora do núcleo.

A probabilidade para a formação de uma partícula alfa no núcleo de um átomo é baixa. Para que ocorra, dependendo de cada nuclídeo onde exista condição favorável para que o fenômeno aconteça, o processo exige um determinado dispêndio de energia. Dessa forma, a energia necessária para que o evento ocorra é constante para cada espécie de nuclídeo. Em consequência, as partículas alfa emitidas por átomos iguais têm energias constantes. Após a emissão da partícula alfa, o núcleo pode permanecer excitado, sendo a energia excedente dissipada sob a forma de radiação gama. Nesse caso, a soma das energias da partícula alfa e da radiação gama é constante para um mesmo nuclídeo.

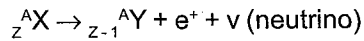
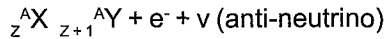
A emissão alfa ocorre somente em nuclídeos com número de massa maior que 150. São exemplos de nuclídeos emissores de partículas alfa, o Rádio-226 e o Polônio-212



2. **Decaimento beta.** O núcleo emite um elétron de carga negativa ( $e^-$ ) ou um elétron positivo ou pósitron ( $e^+$ ).



O processo é representado pelas equações:



Como os núcleos não contêm elétrons ( $e^-$ ) nem pósitrons ( $e^+$ ), a transição se explica por meio das seguintes reações:

Emissão  $\beta^-$ : um nêutron converte-se em um próton + um elétron (ejetado) + um anti-neutrino

Emissão  $\beta^-$ : nêutron  $\rightarrow$  próton +  $e^-$  + anti-neutrino

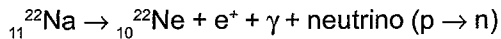
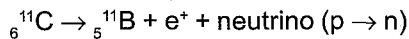
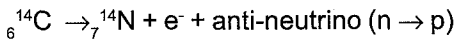
Emissão  $\beta^+$ : um próton converte-se em um nêutron + um pósitron (ejetado) + um neutrino

Emissão  $\beta^+$ : próton  $\rightarrow$  nêutron +  $e^+$  + neutrino

O neutrino é uma partícula elementar que não tem massa de repouso nem carga. A interação de um neutrino a qualquer outra coisa é tão fraca que quase não é observável. O neutrino é de alguma forma semelhante a um fóton.

Esse tipo de fenômeno radioativo pode ocorrer com qualquer nuclídeo independentemente de seu número atômico, inclusive com  $Z=0$ , ou seja, para o nêutron. Alguns nuclídeos podem ser emissores de  $\beta^+$  ou  $\beta^-$ . Para um determinado nuclídeo, a proporção dessas duas classes de emissões radioativas é sempre a mesma.

São exemplos de reações nucleares que originam emissões beta:



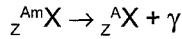
Os emissores beta são nuclídeos naturais ou artificiais. A emissão beta ocorre devido a uma maior quantidade de massa em relação à carga elétrica, ficando o núcleo com excesso de energia livre. A transformação de um próton em um nêutron ou de um nêutron em um próton permite ao átomo alcançar a estabilidade.

As partículas beta, originárias de átomos de um mesmo elemento, não têm a mesma energia, mas, a radiação ou radiações gama, que em certos elementos são emitidas juntas, são sempre fótons de energia constante. Isso decorre do fato de que junto com as emissões  $\beta^+$  ou  $\beta^-$  e  $\gamma$  o núcleo emite também um neutrino (associado à emissão  $\beta^+$ ) ou um anti-neutrino (associado à emissão  $\beta^-$ ) responsáveis pela aparente variação de energia do processo. A diferença de energia da partícula beta será assim complementada pela energia do neutrino, cujos valores somados perfazem o total da energia do processo. Quando a radiação beta conduz toda a energia do processo, o neutrino não aparece e, ao contrário, quando a beta conduz pouca energia, a diferença para o total da energia envolvida é transportada pelo neutrino ou anti-neutrino. I gualmente, este raciocínio é válido para as emissões de beta e gama.

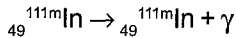
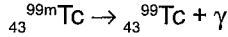
**3. Emissores gama.** O núcleo pode ficar em estado excitado como consequência de emissões alfa ou beta. Em alguns casos, representa um excesso de energia ainda mantida no núcleo no processo de emissão da partícula. Em geral, essa

energia permanece durante um tempo extremamente curto após a emissão da partícula, sendo rapidamente dissipada como fóton de radiação gama.

Em certos elementos, a emissão gama se faz tardiamente permanecendo o núcleo excitado por longo tempo, esse estado é denominado metaestável. Em relação a núcleos iguais, mas sem excesso de energia, os nuclídeos em estados metaestáveis são denominados isômeros nucleares. O processo é representado por:

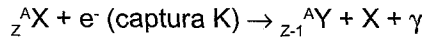


O símbolo <sup>m</sup> indica que o núcleo se encontra em estado metaestável. São exemplos de nuclídeos em estado metaestável:

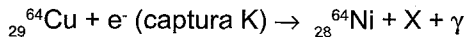


**4. Captura eletrônica.** Na captura eletrônica, um elétron orbital é atraído e capturado pelo núcleo do átomo. O elétron incorporado ao núcleo une-se a um próton convertendo-o em um nêutron, o seu número atômico se reduz em uma unidade, permanecendo o núcleo com o mesmo número de massa, transformando-o em um nuclídeo isóbaro do inicial. O elétron capturado pode ser da camada K (captura K), ou, muito raramente, das camadas L (captura L) ou M (captura M). A alteração da composição de núcleons induz o reordenamento do núcleo com a emissão de fóton de radiação gama. A eletrosfera também se reorganiza para preencher o orbital interno desfalcado, havendo emissão de fótons X nos saltos de elétrons das camadas L para a K e M para a L e de radiações eletromagnéticas menos energéticas entre as demais camadas eletrônicas.

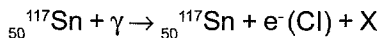
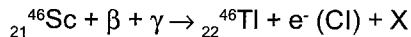
A captura eletrônica é representada pela reação:



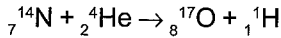
São exemplos de reações de captura K:



**5. Conversão interna.** Algumas vezes, a radiação gama emitida por um núcleo alcança um elétron de sua própria camada K, raramente L ou M, expulsando-o do átomo. A esse fenômeno denomina-se conversão interna. Os elétrons de alta energia emitidos por esse processo diferenciam-se das partículas beta por serem de mesma energia. A descida de elétrons para ocupar a órbita interna desfalcada emite fótons X ou de radiações menos energéticas. São exemplos de reações de conversão interna:

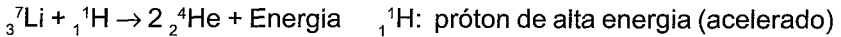


**Isótopos radioativos artificiais.** Isótopos radioativos que não ocorrem na natureza podem ser produzidos artificialmente bombardeando isótopos naturais com partículas atômicas. A primeira reação foi obtida bombardeando o nitrogênio-14 com partículas alfa, produzindo oxigênio e hidrogênio, segundo a reação:

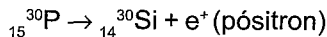
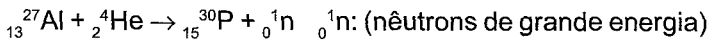


Posteriormente, observou-se que o bombardeio nuclear por meio de partículas alfa, prótons, nêutrons e dêuterons (núcleo do isótopo 2 do hidrogênio ou deutério) era capaz de provocar transformações nucleares. Os elementos mais leves que o cálcio podem desintegrar-se utilizando partículas alfa, prótons ou dêuterons, mas, para os elementos mais pesados, faz-se necessário nêutrons, partículas que não possuem carga elétrica e, por isso, podem penetrar mais facilmente no núcleo e desintegrá-lo.

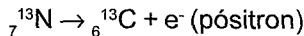
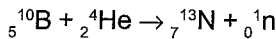
O núcleo do lítio pode ser desintegrado por meio de prótons acelerados, com desprendimento de energia.



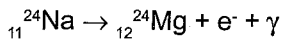
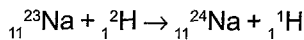
Elementos radioativos podiam ser produzidos por bombardeio de átomos de alumínio, magnésio e boro com partículas alfa emitidas pelo polônio. A desintegração do alumínio ocorria após a captura nuclear da partícula alfa e a sua transformação em fósforo radioativo e, como consequência, se originavam nêutrons de grande energia. O fósforo radioativo emite pósitrons e transforma-se em um átomo estável de silício, segundo as reações:



Com o boro ocorria a seguinte reação:



Átomos estáveis de sódio-23 bombardeados com dêuterons produziram isótopos radioativos de sódio, que emitiam partículas  $\beta$  e radiações  $\gamma$ :



Os nêutrons perdem pouca energia ao atravessar a matéria e, sem sofrer nenhuma influência, alcançam o núcleo do átomo, mas, como o núcleo é muito pequeno, a probabilidade de colisão é muito baixa. No entanto, alguns nêutrons são absorvidos quando atingem um núcleo, formando um novo isótopo que contém um nêutron adicional em um nível de energia excitado. Em geral, o núcleo excitado formado decai ao estado fundamental por emissão gama. Com frequência, o isótopo também é radioativo em estado fundamental (radioisótopo).

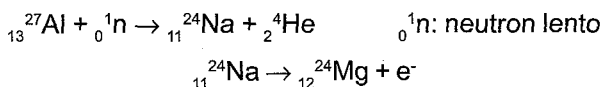
Observe a reação de desintegração de átomos de nitrogênio. Para isso, são utilizados nêutrons rápidos obtidos bombardeando o berílio com partículas alfa emitidas por átomos de rádio ou seus produtos ou por dêuterons acelerados, segundo a reação:



Nêutrons lentos possuem maior capacidade de alcançar o núcleo dos átomos produzindo artificialmente radioisótopos. A redução da velocidade dos nêutrons é obtida facilmente quando atravessam uma camada de uma substância hidrogenada, como água ou parafina, de determinada espessura. Atualmente os nêutrons lentos, com velocidade de uns 1.600 metros por segundo, são obtidos

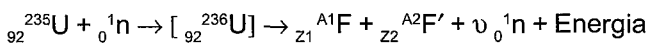
fazendo-os atravessar uma camada de água pesada (água cujos átomos de hidrogênio são deutérios —  ${}^2_1\text{H}$ ) ou de grafite de alto grau de pureza.

A captura de nêutrons lentos pelos núcleos atômicos é muito fácil, o que explica sua grande capacidade de desintegração nuclear. Como exemplo, observe a seguinte reação:



**Fissão do urânio.** O urânio bombardeado por nêutrons dissocia-se em dois ou mais núcleos de pesos intermediários. Cada núcleo fissionado libera 2 ou 3 nêutrons, que podem induzir fissão em outros átomos de urânio, e, assim sucessivamente, desencadeando uma “reação em cadeia”. A fissão do urânio ocorre de forma explosiva e os fragmentos se separam liberando grande quantidade de energia. A diferença de massa entre o núcleo do urânio e os produtos típicos da fissão libera energia em média 200 MeV ou 5.000.000 de calorias por molécula-grama.

A fissão do urânio por nêutrons lentos ocorre no isótopo de número de massa 235, segundo a reação:



O processo de fissão é predominantemente assimétrico, sendo produzido grande número de isótopos desde o zinco (número atômico 30) até o európio (número atômico 63), que, em geral, são radioisótopos. Para cada núcleo fissionado, a soma do número atômico dos isótopos produzidos é sempre 92. O coeficiente  $\nu$  representa o número médio de nêutrons emitidos por fissão, sendo seu valor de 2,43 por mil fissões.

**Reator de urânio.** Os reatores são, atualmente, utilizados para marcar materiais, produzir isótopos, plutônio ou energia elétrica. Como combustível é utilizado urânio natural ou óxido de urânio, enriquecido por  ${}^{235}\text{U}$  ou plutônio ou o  ${}^{233}\text{U}$  produzido pelo tório. Nos reatores, o urânio metálico é distribuído em tubos de alumínio dispostos regularmente em um bloco de grafite ou imersos em água pesada (reator de piscina), que funcionam como moderadores de nêutrons. Os nêutrons fissionam o urânio-235, que libera 2 ou 3 nêutrons rápidos por átomos, sendo enlencidos quando atravessam o moderador de nêutrons. Alguns desses nêutrons se perdem ou são absorvidos dentro do reator, outros se incorporam ao urânio-238 e produzem plutônio e outros provocam fissão de urânio-235, o que libera novos nêutrons mantendo a reação em cadeia.

Os reatores emitem grande quantidade de radiações mortais para as pessoas que trabalham em suas proximidades e, por isso, devem ser contidas por grossas paredes de concreto ou aço.

Durante seu funcionamento, o reator produz grande quantidade de calor o que exige grande quantidade de água para o seu resfriamento. A água na forma de vapor pode ser utilizada para movimentar turbinas para a produção de energia elétrica.

A reação em cadeia deve ser controlada, para impedir o superaquecimento e a possível explosão do reator. Para isso, são utilizadas varinhas de cádmio ou boro, que podem ser colocadas ou retiradas em ranhuras especiais entre os cilindros de urânio. Esses elementos têm grande capacidade de absorver os nêutrons, moderando a reação em cadeia, ao reduzir o número de nêutrons capazes de induzir novas fissões nucleares.

Entre os produtos da fissão do urânio estão muitos radioisótopos utiliza-

dos em biologia e medicina.

**Bomba atômica.** Pequenas quantidades de plutônio-239 ou de urânio-235 são inócuas. No entanto, quando se acumula uma determinada quantidade de material fissionável, denominada massa crítica, a fissão de um núcleo induz a desintegração de outros núcleos, o que desencadeia uma reação explosiva.

Uma massa de  $U^{235}$  ou  $Pu^{239}$  pode também se tornar supercrítica. Os nêutrons de uma fissão induzem mais de uma fissão secundária. Um dispositivo supercrítico pode ser todo gasto (explosivo) em menos de um milésimo de segundo (bomba A). O método padrão para a formação de uma esfera de plutônio supercrítica é a técnica de implosão. Uma esfera supercrítica de plutônio pode ser formada momentaneamente por compressão de duas massas menores por explosivos químicos aumentando a sua densidade, o que permite a absorção de nêutrons a uma taxa superior à sua perda para o exterior, desencadeando a reação explosiva. As bombas termonucleares têm potências designadas por comparação com o poder explosivo de uma bomba de TNT. Como suas potências são muito grandes, as bombas nucleares são medidas em equivalentes a toneladas de TNT. Assim, uma bomba de um kiloton equivale à potência explosiva de 1.000 toneladas de TNT e a de um megaton corresponde a 1.000.000 de toneladas de TNT.

A explosão nuclear libera também produtos de fissão, todos inicialmente radioativos.

**Desintegração radioativa.** Para qualquer tipo de desintegração radioativa denominamos pai ou precursor o nuclídeo radioativo inicial e filho ou descendente ao nuclídeo residual. No caso mais simples, após a emissão de radiação, o nuclídeo filho é estável. Caso o nuclídeo filho seja radioativo, assim como suas várias gerações, dizemos que se trata de uma cadeia de desintegração radioativa.

A radioatividade é um fenômeno aleatório (ao azar) regido pelas leis da probabilidade. A probabilidade de um radionuclídeo emitir radiação em um intervalo de tempo ( $dt$ ) é independente de qualquer influência externa. Para um determinado radionuclídeo, todos os seus núcleos têm a mesma probabilidade de sofrer desintegração, de maneira que a probabilidade  $P(dt)$  de que se produza uma desintegração em um intervalo de tempo  $dt$ , é somente proporcional a  $dt$ , se  $dt$  for suficientemente pequeno a fim de que  $P(dt) \ll 1$ :

$$P(dt) = \lambda \cdot dt$$

A constante de proporcionalidade ( $\lambda$ ), denominada constante de desintegração radioativa, é uma característica de cada radionuclídeo e do modo de desintegração. Devemos entender essa constante como a probabilidade de cada núcleo radioativo de se desintegrar na unidade de tempo, sendo, portanto, expressa em  $s^{-1}$ ,  $min^{-1}$ ,  $h^{-1}$ , etc.

Suponha que uma amostra radioativa contenha um certo número de átomos ( $N_0$ ) em um determinado momento e, transcorrido um certo tempo  $t$ , exista um número  $N(t)$  de átomos que permanece sem se desintegrar. O número de átomos que se desintegrarão em um intervalo de tempo ( $dt$ ) compreendido entre o instante inicial e o tempo  $t$  considerado será:

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt$$

O sinal negativo indica que houve uma diminuição no número inicial de átomos radioativos. Integrando a equação diferencial com a condição inicial ( $t=0$ )  $N(t=0) = N_0$  obtemos:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Onde e corresponde ao número de Neper = 2,7118...

Na prática, as substâncias radioativas caracterizam-se por uma magnitude diretamente relacionada com a constante de desintegração denominada tempo de meia-vida.

O tempo de meia-vida física de uma substância radioativa é o tempo necessário para que o número de átomos radioativos de uma quantidade inicial se reduza à metade. Indicando por  $t_{1/2}$  tem-se que:

$$N(t = t_{1/2}) = N_0/2$$

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t_{1/2}}$$

$$N_0/2 = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t_{1/2}}$$

$$\ln(1/2) = \ln e^{-\lambda \cdot t_{1/2}}$$

$$\ln 1 - \ln 2 = -\lambda \cdot t_{1/2} \cdot \ln e$$

$$- \ln 2 = -\lambda \cdot t_{1/2} \cdot \ln e$$

$$\ln 2 = \lambda \cdot t_{1/2}$$

$$\lambda = \ln 2 / t_{1/2}$$

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

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

Devemos expressar a meia-vida em unidades de tempo (segundo, minuto, hora, etc). Esse tempo pode ter valores bastante diversos de um radionuclídeo para outro, desde frações de microssegundo ( $\mu s$ ) a  $10^{20}$  anos. Evidentemente, quanto maior a constante de desintegração de um radionuclídeo mais rapidamente ele se desintegrará e menor será seu tempo de meia-vida.

A proposição de que um certo radionuclídeo tem uma meia-vida de 5 horas significa que cada núcleo possui uma probabilidade de 50% de se desintegrar em qualquer período de 5 horas. Não significa dizer que 100% dos núcleos se desintegrarão em 10 horas; a sua probabilidade de desintegração por unidade de tempo é constante até o momento dele se desintegrar. Uma meia-vida de 5 horas implica 75% de probabilidade de desintegração em 10 horas, que cresce para 87,5% em 15 horas, para 93,75% em 20 horas, e assim por diante, pois em cada intervalo de 5 horas a probabilidade é sempre 50%.

Quando um radionuclídeo é incorporado a um organismo vivo, a radioatividade reduz-se em função da maior ou menor eliminação do elemento em decorrência do metabolismo. Portanto, o tempo de meia-vida biológica ( $t_{1/2}_B$ ) é o tempo necessário para reduzir-se à metade o número inicial de um determinado radionuclídeo incorporado a um organismo vivo. Devemos lembrar que o decaimento da radioatividade incorporada por um organismo depende também da meia-vida física ( $t_{1/2}_F$ ) do elemento. Assim, considerando estes dois fatores de decaimento, podemos definir o tempo de meia-vida efetiva ( $t_{1/2}_E$ ) como sendo:

$$t_{1/2}_E = t_{1/2}_F \times t_{1/2}_B / t_{1/2}_F + t_{1/2}_B$$

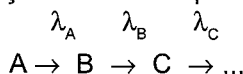
A tabela 12 mostra tempos de meia vida física e efetiva de radionuclídeos importantes para a medicina e biologia.

Tabela 12. Radionuclídeos de interesse biológico.

Radionuclídeo	Meia-vida física aproximada	Meia-vida efetiva
<sup>3</sup> H	12,3 anos	19 dias
<sup>14</sup> C	5,5 x 10 <sup>3</sup> anos	35 dias (gordura) 180 dias (osso)
<sup>32</sup> P	14,5 dias	14 dias
<sup>35</sup> S	87 dias	18 dias
<sup>45</sup> Ca	160 dias	151 dias
<sup>131</sup> I	8,1 dias	7 dias
<sup>51</sup> Cr	27,8 dias	22 dias
<sup>59</sup> Fe	45 dias	40 dias
<sup>42</sup> K	12,5 horas	0,5 dia
<sup>24</sup> Na	15 horas	0,6 hora
<sup>64</sup> Cu	12,8 horas	0,5 hora
<sup>74</sup> As	18 dias	5 dias
<sup>60</sup> Co	5,2 anos	8 dias
<sup>47</sup> Ca	4,7 dias	4,5 dias
<sup>65</sup> Zn	245 dias	21 dias
<sup>72</sup> Ga	14,3 horas	0,5 dia
<sup>198</sup> Au	2,7 dias	2,5 dias
<sup>86</sup> Rb	18,6 dias	15 dias
<sup>38</sup> Cl	37,3 minutos	0,5 hora
<sup>82</sup> Br	35,9 horas	30 horas
<sup>133m</sup> In	1,7 horas	
<sup>99m</sup> Tc	6 horas	

Fonte: Leão, M.A.C. Princípios de Biofísica. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1982.

**Cadeia de desintegração radioativa.** Considere o caso em que um nuclídeo radioativo A se desintegra dando lugar a um nuclídeo B que, por sua vez, é radioativo. Origina-se então uma cadeia de desintegrações radioativas que se pode representar por:



Onde  $\lambda_A$ ,  $\lambda_B$  e  $\lambda_C$  são as constantes de desintegração dos nuclídeos A, B e C.

Existem três cadeias radioativas naturais, a primeira tem como átomo inicial o urânio, a segunda o actínio e a terceira o tório. Artificialmente foi produzida uma quarta cadeia, a do netuno, que se desintegra gerando o protoactínio e, logo, urânio. A tabela 13 apresenta a cadeia radioativa do urânio.

Tabela 13. Cadeia radioativa do urânio.

Elemento	Nº Atômico	Peso Atômico	Radiação emitida	Meia-vida Física
Urânio	92	238	$\alpha, \gamma$	4,5 x 10 <sup>9</sup> anos
Tório	90	234	$\alpha, \gamma$	24,5 dias
Protoactínio	91	234	$\beta, \gamma$	1,14 minutos
Urânio	92	234	$\alpha, \gamma$	3 x 10 <sup>5</sup> anos
Tório	90	230	$\alpha, \gamma$	8,2 x 10 <sup>4</sup> anos
Rádio	88	226	$\alpha, \gamma$	1.600 anos
Radônio	86	222	$\alpha$	3,8 dias
Rádio A	84	218	$\alpha$	3,05 minutos
Rádio B	82	214	$\beta, \gamma$	26,8 minutos
Rádio C	83	214	$\beta, \gamma$	19,7 minutos
Rádio C'	84	214	$\alpha$	100 $\mu$ segundos
Rádio D	82	210	$\beta, \gamma$	22 anos
Rádio E	83	210	$\beta, \gamma$	5 dias
Polônio	84	210	$\alpha, \gamma$	140 dias
Chumbo	82	206	Inativo	Estável

Fonte: Cicardo, V.H. Física Biológica. Buenos Aires: Lopez Libreros Editores, 1960.

## INTERAÇÕES DAS RADIAÇÕES COM A MATÉRIA

Uma das características das radiações, corpusculares ou eletromagnéticas, é sua capacidade para penetrar na matéria e interagir com seus átomos constituintes. Nestas interações, parte ou a totalidade da energia da radiação é absorvida pelo meio material. Esta transferência de energia é a causa dos diferentes efeitos produzidos pelas radiações, tais como os efeitos biológicos sobre os organismos vivos. Da mesma forma, os vários instrumentos utilizados para a detecção e a medida das radiações baseiam-se nos efeitos das interações das radiações com determinados materiais.

As principais interações das radiações com a matéria são descritas a seguir:

**Interação de partículas carregadas.** Ao percorrer um meio material as partículas carregadas interagem com os átomos constituintes do meio, perdendo energia e velocidade ao longo da sua trajetória, até serem detidas e neutralizadas eletricamente. O principal processo de perda de energia é a interação eletrostática entre a partícula carregada e os elétrons dos átomos do meio material. Essas interações podem ser interpretadas como colisões elásticas ou inelásticas da partícula incidente com os elétrons. Na interação elástica, a energia cinética total se conserva; uma parte da energia cinética da partícula incidente é transferida como energia cinética para o átomo com o qual interage. Na interação inelástica, parte da energia transferida é absorvida pelo átomo que passa a um estado excitado ou ionizado.

**Radiação de frenado.** As partículas carregadas também podem interagir com os núcleos atômicos do meio material. Essas interações podem ser eletrostáticas ou nucleares. Fundamentalmente, as interações eletrostáticas são as que provocam a perda de energia das partículas carregadas ao atravessar o meio material. A interação eletrostática com o núcleo atômico pode provocar uma mudança brusca da velocidade da partícula incidente, que ao sofrer uma forte desaceleração emite um fóton de radiação eletromagnética (radiação X de espectro contínuo) com a consequente perda de energia, a denominada reação de frenamento. A energia da radiação X (radiação de frenado) emitida tem uma intensidade proporcional ao quadrado da aceleração da partícula ao interagir com o núcleo.

**Excitação.** Durante a interação da partícula carregada com átomo do meio material, quando a energia transferida a um elétron orbital é inferior à energia de ionização, o elétron não pode ser arrancado do átomo, mas é suficiente para permitir ao elétron passar a ocupar um nível de energia superior, promovendo-o a um orbital mais afastado do núcleo, o denominado estado excitado. O átomo excitado volta a seu estado fundamental pela emissão de uma radiação eletromagnética. A energia mínima necessária para levar um átomo em estado fundamental a um estado excitado é denominada energia de excitação ou potencial de excitação do átomo.

A energia de excitação média para muitos átomos foi determinada. O quociente entre a energia de excitação média e o número atômico de um átomo é praticamente constante para átomos de números atômicos superiores a 13, sendo seu valor de aproximadamente 13 elétrons-volt.

**Ionização.** Quando uma partícula carregada atravessa um meio pode colidir inelasticamente com elétrons, transferindo-lhes parte de sua energia. Caso a energia cedida ao elétron seja superior à sua energia de ligação ao átomo, ele escapa do átomo convertendo-se em uma partícula livre, o que deixa o átomo carregado positivamente, formando um par de íons.

$$\text{Energia final do elétron} = \text{Energia absorvida} - \text{Energia de ligação}$$



Ao processo de ionização que resulta da interação da partícula incidente com átomo do meio denomina-se ionização primária. Da mesma forma, os elétrons ejetados dos átomos durante as ionizações primárias terão energias suficientes para produzir novas ionizações em outros átomos do meio material (ionizações secundárias). A energia necessária para ionizar um átomo ou molécula em estado fundamental denomina-se energia de ionização, cujo valor depende do átomo ou molécula que se ioniza (tabela 14).

Tabela 14. Energia de ionização de alguns átomos.

<b>Elemento</b>	<b>Número Atômico</b>	<b>Energia de Ionização</b>
Hidrogênio	1	13,6 eV
Carbono	6	11,2 eV
Nitrogênio	7	14,5 eV
Oxigênio	8	13,6 eV
Alumínio	13	6,0 eV
Argônio	18	15,7 eV
Ferro	26	7,9 eV
Chumbo	82	7,4 eV

Fonte: Aramburi, X.O., Bisbal, J.J. (eds). Las radiaciones ionizantes. Su Utilización y Riesgos. Barcelona: Edicions UPC, 1994.

O número total de pares de íons, produzidos por ionização primária e secundária, formado pela passagem de uma partícula eletricamente carregada através da matéria denomina-se ionização total (I). O poder de ionização de uma radiação expressa o número total de pares de íons produzidos na sua interação com a matéria, sendo diretamente proporcional ao quadrado da carga da partícula e inversamente proporcional à sua velocidade. Duas grandezas indicam o poder de ionização de uma radiação, o KERMA e o LET.

O KERMA (*kinetic energy released per unit mass*) refere-se à dissipação de energia por unidade de massa, sendo uma constante para um mesmo meio material e uma mesma radiação e equivale à cessão de  $8,77 \times 10^{-3}$  J/kg de ar:

$$K = \Delta E / \Delta M$$

Os efeitos físicos, químicos ou biológicos das radiações só ocorrem quando há cessão de energia para átomos do meio material, decorrente da interação da radiação e transferência de energia para os átomos ao longo do seu percurso. À medida que as interações se produzem, a energia da radiação primária diminui, reduz-se a velocidade da partícula incidente e, em consequência, aumenta a probabilidade de que ocorram novas interações, razão pela qual o maior número de interações se dá no final do percurso do fóton ou da partícula incidente. Assim sendo, a liberação de energia pela radiação não é uniforme e sim progressiva. No entanto, para facilitar a comparação entre diferentes tipos de radiação foi introduzido o conceito da transferência linear de energia (LET - *linear energy transfer*) que corresponde a energia cedida ou depositada pela radiação por unidade de trajeto percorrido na matéria, sendo expressa frequentemente em keV/mm.

O seu valor é dado por:

$$S = LET / W$$

Onde, S é a ionização específica (número de pares de íons por centímetro de matéria percorrida pela radiação) e W a energia consumida para produzir um par de íons. Como são necessários aproximadamente 34 eV para produzir um par de íons, podemos dizer que:

$$\text{LET} = 34 \times S$$

**Interação da partícula alfa com a matéria.** Ao interagir com a matéria, as partículas alfa produzem intensa ionização, uma vez que perdem suas energias em um percurso muito curto, gerando uma grande densidade de pares de íons. A ionização total ( $I_1$ ) produzida por uma partícula alfa de energia  $E$  no ar antes de neutralizar-se para formar um átomo de hélio é determinada por:

$$I_1 = 2,88 \times 10^4 \times E$$

Onde, a energia da partícula alfa deve ser expressa em milhões de elétrons-volt.

Como resultado da interação com a matéria, as partículas alfa podem produzir também excitação atômica.

**Interação da partícula beta com a matéria.** A interação da partícula beta com a eletrosfera de um átomo pode produzir excitação ou ionização atômicas. A ionização específica das partículas beta é menor que a produzida por partículas mais pesadas. A interação da partícula beta com o núcleo dos átomos produz reação de frenamento e emissão de radiação X.

**Interação do pósitron com a matéria.** Um elétron positivo ou pósitron não pode existir livremente, uma vez que rapidamente interage com um elétron resultando no aniquilamento, ou seja, a desmaterialização de ambos os elétrons com a formação de dois fótons de mesmo valor energético, emitidos em sentidos opostos.

**Interação das radiações X e gama com a matéria.** Quando fótons X ou  $\gamma$  interagem com elétrons de átomos de um meio material pode ocorrer os efeitos fotoelétrico e Compton. No efeito fotoelétrico, a energia do fóton X ou  $\gamma$  é totalmente transferida para um elétron orbital, elevando consideravelmente a energia desse elétron, ejetando-o do átomo. Este elétron, denominado fotoelétron, escapa do átomo com uma energia equivalente a diferença entre a energia do fóton incidente e a sua energia de ligação ao átomo. O orbital interno de menor energia não permanece desfalcado, sendo a vacância preenchida pelo movimento de elétrons das camadas mais periféricas para as internas, a denominada cascata de elétrons, com a emissão de fótons de radiação X de energia característica, quando os saltos ocorrem entre as camadas M, L e K ou outros menos energéticos como as radiações ultravioleta ou visível para saltos entre as camadas mais periféricas.

O efeito Compton é consequência de uma colisão inelástica entre o fóton incidente e um elétron orbital. Nesse processo, o fóton incidente perde parte de sua energia, que será maior ou menor dependendo do ângulo de dispersão, ficando com comprimento de onda maior que o do fóton incidente. A energia perdida pelo fóton passa a um elétron em forma de energia cinética. De acordo com a quantidade de energia transferida para o elétron orbital pode resultar em excitação, quando a energia recebida pelo elétron é menor que a energia de ligação do elétron, ou ionização, em caso da energia recebida pelo elétron for superior. Na excitação, o próprio elétron retorna ao seu orbital de origem, emitindo a energia recebida sob a forma de radiação X característica ou outra, retornando o átomo a seu estado fundamental. Na ionização, ocorre a cascata de elétrons para o preenchimento do orbital desfalcado e a emissão de radiações secundárias.

Na interação de fótons X ou gama com o campo eletromagnético do núcleo de um átomo ocorre a transformação da energia do fóton em um par elétron-pósitron,

fenômeno que corresponde à materialização da energia do fóton. Para que a formação de pares elétron-pósitron aconteça faz-se necessário que o fóton incidente tenha uma energia mínima de 1,022 MeV.

# MAGNITUDES E UNIDADES RADIOLÓGICAS

A dosimetria tenta fixar as magnitudes e unidades adequadas para estimar de maneira mais completa possível os fenômenos que a radiação induz na matéria.

1. **Atividade.** Essa grandeza exprime o número de núclídeos em uma amostra radioativa que se desintegra na unidade de tempo. Como a velocidade com que os átomos emitem radiação não é a mesma para os diferentes radionuclídeos, eles não apresentam a mesma atividade.

Curie (Ci): corresponde à atividade de um grama do elemento radioativo rádio em equilíbrio com seus descendentes.

Curie (Ci) equivale a  $3,7 \times 10^{10}$  desintegrações por segundo (dps)

$$\text{Millicurie (mCi)} = 3,7 \times 10^7 \text{ dps}$$

$$\text{Microcurie } (\mu\text{Ci}) = 3,7 \times 10^4 \text{ dps}$$

A unidade de atividade no Sistema Internacional é o becquerel (Bq):

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ desintegração por segundo (1 dps)}$$

$$1 \text{ mCi} = 37.000 \text{ Bq ou } 37 \text{ MBq (Megabecquerel)}$$

Na prática cotidiana frequentemente utiliza-se como unidade o Curie (Ci) e seus sub-múltiplos:

Para uma determinada massa de uma amostra radioativa, define-se a atividade específica da amostra como a sua atividade por unidade de massa. A atividade específica é expressa em Becquerel por quilograma (Bq/kg) no Sistema Internacional ou em Curie por quilograma ou grama (Ci/kg ou Ci/g). Em caso de substâncias líquidas ou gasosas, a atividade específica pode ser expressa como atividade por unidade de volume em condições normais, tendo como unidades Bq/m<sup>3</sup> ou Ci/m<sup>3</sup>.

2. **Fluxo.** Fluxo em uma dada região é a quantidade de radiação (número de fótons e/ou partículas) emanada por uma fonte que atravessa, na unidade de tempo, uma esfera de secção de área unitária situada em um lugar considerado. Assim sendo, o fluxo é igual ao número de fótons ou partículas por cm<sup>2</sup>.s. A partir do conhecimento do fluxo de radiação, pode-se estabelecer a dose administrada em uma determinada área.

3. **Dose de exposição.** Essa é uma grandeza definida somente para radiação X ou  $\gamma$  até uma energia de 3 MeV. Expressa a capacidade dessas radiações de produzir ionizações em um determinado volume de ar. Sua unidade é o Röentgen (R) definida como a quantidade de radiação X ou gama que, se dissipando em um quilograma de ar seco, produz  $2,58 \times 10^{-4}$  coulomb de carga elétrica positiva e negativa.

$$1 \text{ R} = 8,77 \times 10^{-3} \text{ joule/kg de ar}$$

$$1 \text{ R} = 1 \text{ KERMA}$$

$$1 \text{ R} = 9,3 \times 10^{-3} \text{ joule/kg de tecido}$$

$$1 \text{ R} = 87,7 \text{ erg/g}$$

4. **Dose absorvida.** No âmbito da radioproteção, a magnitude fundamental é a de

dose absorvida, que estabelece a quantidade de energia depositada no meio, definida como a energia cedida pela radiação por unidade de massa irradiada. A dose absorvida indica a probabilidade do efeito biológico subsequente. Suas unidades são:

Rad (*Radiation absorbed dose*) é a quantidade de radiação, de qualquer espécie, que libera 100 erg de energia por grama de tecido. O rad é uma unidade em desuso.

Gray (Gy) corresponde à quantidade de radiação que libera um (1) joule de energia por quilograma de tecido. Essa unidade é de grande interesse em biologia porque mede a quantidade de radiação que poderá produzir efeitos biológicos. É a unidade de medida de dose absorvida atualmente recomendada.

100 Rad equivale a 1 Gy

**5. Dose equivalente.** Os efeitos biológicos não só dependem da dose de radiação absorvida como também do tempo de irradiação e de sua distribuição pelo organismo. A dose equivalente é a grandeza utilizada para medir os efeitos biológicos das radiações. Suas unidades são:

Rem (*Röntgen ou Rad equivalente man*) é a quantidade de radiação, de qualquer espécie, que produz o mesmo efeito biológico que um (1) röntgen de radiação X ou gama. O rem é uma unidade em desuso.

A unidade de medida de dose equivalente atualmente utilizada é o Sievert (Sv).

100 Rem equivale a 1 Sv

Para uma mesma dose de radiação absorvida, os diversos tipos de radiações podem produzir diferentes efeitos biológicos em um determinado tecido. Assim, a relação entre as magnitudes de doses absorvida e equivalente é:

$$\text{Dose equivalente (Sv)} = \text{dose absorvida (Gy)} \times Q$$

Onde Q é o fator de qualidade, denominado fator de ponderação da radiação –  $W_r$ , que modifica o efeito biológico da radiação (tabela 15).

Tabela 15. Fator de ponderação das radiações.

<b>Radiações</b>	<b>Fator de ponderação da radiação (<math>W_r</math>)</b>
Fótons (todas as energias)	1
Elétrons, nêutrons (todas as energias)	1
Energia < 10 eV	5
Energias de 10 a 100 eV	10
Energias > 0,1 a 2 MeV	20
Energias > 2 MeV a 20 MeV	10
Energias > 20 MeV	5
Partículas alfa	20

Fonte: Bitelli, T. Física e Dosimetria das Radiações. 2 ed. São Paulo: Editora Atheneu; Centro Universitário São Camilo, 2006.

O Sievert (Sv) é uma unidade grande demais para expressar a dose equivalente recebida por indivíduos expostos às radiações em razão do seu trabalho. Para fazê-lo, deve ser utilizado submúltiplos:

$$1 \text{ miliSievert (mSv)} = 10^{-3} \text{ Sv}$$

$$1 \text{ microSievert (\mu Sv)} = 10^{-6} \text{ Sv}$$

A relação entre a probabilidade da ocorrência de um efeito biológico e a

dose equivalente depende também do órgão ou tecido irradiado, ou seja, a dose absorvida em todo o corpo não produziria o mesmo efeito se fosse absorvida por uma parte dele. Diante disso, foi definida a dose efetiva, grandeza que considera a sensibilidade do tecido às radiações e que permite quantificar uma larga variação de doses não-uniformes em um órgão ou tecido.

$$\text{Dose efetiva (E)} = \sum W_T \cdot H_T$$

Onde,  $W_T$  é o fator de ponderação do tecido (tabela 16) e  $H_T$  é a dose equivalente média no tecido.

Tabela 16. Fator de ponderação do tecido ( $W_T$ ).

<i>Tecido ou órgão</i>	<i>Fator de ponderação do tecido (<math>W_T</math>)</i>
Gônadas	0,20
Medula óssea, cólon, pulmão, estômago,	0,12
Bexiga, mama, tireóide, fígado, esôfago	0,05
Pele, superfície óssea	0,01
Demais órgãos (supra-renal, cérebro, intestinos, rins, pâncreas, baço, timo, útero)	0,05

Fonte: Bitelli, T. Física e Dosimetria das Radiações. 2 ed. São Paulo: Editora Atheneu; Centro Universitário São Camilo, 2006.

O fator de ponderação do tecido representa a contribuição relativa do tecido para o dano total esperado devido aos efeitos de uma radiação não uniforme de corpo inteiro. A dose efetiva representa o risco à saúde da pessoa irradiada, independentemente das diferenças de doses equivalentes recebidas pelos órgãos.

# EFEITOS BIOLÓGICOS DAS RADIAÇÕES

A radiobiologia estuda os efeitos das radiações ionizantes nos seres vivos, seus mecanismos de ação, as lesões induzidas nos componentes celulares e tissulares e os mecanismos celulares para compensar estes efeitos.

Para a compreensão dos fenômenos radiobiológicos é necessário ter em mente que:

1. Durante as interações das radiações com átomos que compõem moléculas celulares, o processo de transferência de energia para elétrons orbitais desses átomos é um fenômeno aleatório e se distribui no meio ao azar, podendo ou não acontecer e, se de fato ocorrer, poderá ou não causar danos moleculares.
2. Na interação, os fenômenos químicos desencadeados pela transferência de energia da radiação para átomos componentes de moléculas celulares são extremamente rápidos e, portanto, difíceis de serem estudados.
3. As consequências biológicas das interações das radiações com as células são inespecíficas, não sendo possível distingui-las daquelas produzidas por outros agentes químicos, físicos ou biológicos.
4. Os efeitos radiobiológicos podem aparecer de forma imediata, denominados efeitos agudos, ou após transcorrer períodos variáveis de tempo (período de latência) dando lugar aos efeitos crônicos.

Os efeitos biológicos das radiações podem ser sistematizados em duas categorias: 1) os efeitos estocásticos, aleatórios e probabilísticos e 2) os efeitos determinísticos. Nos primeiros, o alvo é o gene e sua lesão elementar é a mutação. Caracterizam-se por não serem letais para a célula e não haver um limite de dose, podendo ocorrer com doses muito baixas. A probabilidade de que ocorram é função da dose. Os efeitos determinísticos mostram uma clara relação de causa-efeito, apresentam um limite de dose abaixo do qual não ocorrem, sendo de gravidade diretamente proporcional à dose recebida e podem determinar a morte celular ou a perda de sua capacidade reprodutiva.

Independentemente das características das radiações incidentes, eletromagnéticas ou corpusculares, elas interagem com átomos do meio material, perdendo energia nas interações. Os efeitos biológicos somente ocorrem quando há absorção de energia pelos átomos constituintes de moléculas celulares que pode levar ao desenvolvimento de lesões radioinduzidas. Os eventos que levam ao desenvolvimento de radiolesões ocorrem em uma sequência apresentada no quadro 2.

Quadro 2. Sequência de eventos para o desenvolvimento de radiolesões.

<b>Estágios</b>	<b>Tempo para ocorrer</b>	<b>Eventos</b>
1	$10^{-16}$ a $10^{-12}$ segundos	Processo físico de absorção da radiação, ionização e excitação
2	até milissegundos	Reações químicas iniciais
3	segundos a horas	Alterações de moléculas biologicamente importantes
4	Horas a anos	Fenômenos biológicos: mutações, efeitos letais e não-letais

Fonte: Rocha, A.F.G., Harbert, J.C. Medicina Nuclear Bases. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 1979.

O estágio 1 corresponde ao processo físico de absorção da energia da radiação, determinando a excitação ou a ionização dos átomos do meio com o qual interage. A ionização dos átomos altera a distribuição dos elétrons e a camada da

valência, induzindo a ruptura de ligações químicas e a formação de radicais livres altamente reativos. Esses radicais gerados no meio tendem rapidamente a recombinarem formando novas moléculas (estágio 2 da radiolesão). Essas reações químicas ocorrem aleatoriamente havendo as mais diversas possibilidades de recombinarem, o que provoca alterações na forma e composição de moléculas biologicamente importantes (DNA, proteínas e lipídeos). Os danos a essas moléculas afetam o metabolismo e induzem danos ao material genético e a estrutura celular (estágio 3 da radiolesão) causando efeitos sub-letais ou letais. As células que sofrem lesões subletais podem ser capazes de identificar e reparar os danos ao DNA, utilizando mecanismos celulares para este fim se houver tempo suficiente para isso. As células que receberam lesões letais, mesmo apresentando morfologia aparentemente normal e, em algumas ocasiões, continuar a sua atividade metabólica habitual, morrerão ao iniciar o processo de reprodução (morte mitótica) ou, mesmo que completem algumas divisões aparentemente normais, as células descendentes morrerão ao se dividir (estágio 4).

**Teoria do alvo.** A irradiação seletiva de partes de uma célula causa efeitos biológicos mais ou menos graves, o que significa dizer que há moléculas e/ou estruturas de importância vital para a célula que, quando danificadas, leva à morte celular. A importância das lesões moleculares produzidas depende da complexidade e da abundância da molécula alterada. Quando uma molécula é abundante, a célula pode substituí-la por outra normal sem prejudicar a sua função. Da mesma forma, se a molécula é simples, pode ser reparada ou sintetizada novamente, sem que isso represente um grande esforço por parte da célula. Por outro lado, as alterações em moléculas complexas e/ou escassas, dão lugar a transtornos biológicos de importância vital.

Segundo a teoria do alvo, a célula contém centros vitais, cujo número varia para os diferentes tipos celulares, que quando alcançados pela radiação, pode levar à morte celular. Os danos a esses alvos podem ocorrer por ação direta da radiação ou, de modo indireto, tendo como agentes causadores radicais livres gerados no meio como efeito das radiações. Apesar das supostas regiões celulares não terem sido identificadas, podem estar associadas a moléculas de DNA contidas no núcleo.

Concomitante à ação direta, a radiação causa ionização em átomos de moléculas de menor importância que compõem o meio intracelular. Essas moléculas, com excesso de energia e modificadas, difundem-se pelo meio, transferem energia e alteram as moléculas biologicamente importantes.

**Estresse oxidativo.** Durante o processo de fosforilação oxidativa são geradas pequenas quantidades de formas reativas de oxigênio parcialmente reduzidas. Algumas dessas formas são radicais livres que danificam lipídeos, proteínas e ácidos nucleicos. As células têm sistemas de defesa para prevenir lesões causadas por esses produtos. O desequilíbrio entre os sistemas de geração e eliminação de radicais livres causa estresse oxidativo, condição que tem sido associada à lesão celular em muitas condições patológicas. Lesões envolvendo radicais livres contribuem para processos como lesões químicas e por radiações, envelhecimento celular e eliminação de microorganismos por células fagocitárias.

Os radicais livres são espécies químicas que possuem um único elétron sem um par em sua órbita externa. Mesmo sendo mais estáveis que os íons, suas



atividades químicas os fazem altamente reativos, desencadeando deslocamentos sucessivos de elétrons que alteram a composição e a reatividade química induzindo reações com moléculas biológicas importantes, lipídeos, proteínas e ácidos nucléicos, causando dano molecular e celular.

Os efeitos dos radicais livres são vários e incluem importantes reações para a lesão celular, a saber:

1. Peroxidação lipídica das membranas. Na presença de oxigênio, os radicais livres podem causar peroxidação de lipídeos componentes das membranas celulares e das organelas. A lesão oxidativa é iniciada quando as ligações duplas dos ácidos graxos são atacadas pelos radicais livres de oxigênio, especialmente a hidroxila ( $\text{OH}^\cdot$ ).
2. Modificação oxidativa de proteínas. Os radicais livres promovem a oxidação da cadeia lateral de aminoácidos formando ligações cruzadas entre proteínas e oxidação da estrutura principal da molécula causando fragmentações.
3. Lesões no DNA. As reações com a timina no DNA nuclear e mitocondrial causa rupturas em um dos filamentos do DNA. Esta lesão está relacionada com o envelhecimento celular e com a cancerização.

As células desenvolveram diversos mecanismos para neutralizar os radicais livres, reduzindo o grau de lesão molecular. Existem vários sistemas enzimáticos e não enzimáticos que contribuem para a desativação das reações de radicais livres, como:

1. Antioxidantes que bloqueiam o início da formação dos radicais livres, ou os inativam, cessando o dano oxidativo causados por eles. São antioxidantes que atuam na matriz mitocondrial a vitamina A e E, o ácido ascórbico e o glutatião.
2. Enzimas que agem como eliminadores de radicais livres e degradam o peróxido de hidrogênio e ânion superóxido, como a catalase que decompõe o  $\text{H}_2\text{O}_2$  (peróxido de hidrogênio), a dismutase superóxido que converte o superóxido e o  $\text{H}_2\text{O}_2$  e a glutatião peroxidase.

**Radiólise da água.** A água por sua abundância possivelmente representa um elemento importante no dano indireto às estruturas celulares vitais. A radiação induz a quebra da molécula de água (radiólise da água) e a formação de íons altamente reativos e radicais livres.

Os radicais livres são responsáveis por grande parte dos danos biológicos das radiações. Esses efeitos são consequência da ionização de moléculas complexas, importantes do ponto de vista biológico, por cumprirem funções relevantes e, ao sofrerem danos, provocam alterações irreversíveis.

**Radiossensibilizador e radioprotetor.** Qualquer substância que favoreça a produção de radicais livres, ou seja, capaz de transformar-se em uma molécula tóxica para a célula por efeito da radiação é um radiossensibilizador. Quando no meio irradiado há oxigênio molecular, formam-se radicais livres como o peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), que mesmo sendo uma molécula estável, é quimicamente muito ativa e causa danos em outras moléculas de maior importância biológica. Assim sendo, o oxigênio dissolvido no meio intracelular em concentrações fisiológicas é o melhor radiossensibilizador.

Por outro lado, substâncias capazes de ceder elétrons a outras espécies químicas sem converter-se em um produto tóxico é um radioprotetor. O radical sulfidrilo ( $-\text{SH}$ ) é um excelente radioprotetor, por ceder elétron a um radical livre

estabilizando-o. Uma fonte orgânica de radicais sulfidrilo é o aminoácido cisteína. **Eficiência biológica relativa (EBR).** As radiações que formam grande densidade de ionizações têm maior probabilidade de produzir lesões biológicas de importância e, conseqüentemente, possuem maior eficiência biológica. Desse modo, nêutrons e partículas alfa têm uma eficiência biológica superior à dos fótons. Para se medir a eficiência biológica de uma radiação em relação a outra, utiliza-se o conceito de eficiência biológica relativa (EBR). A EBR é o quociente entre as doses de duas radiações diferentes necessárias para produzir o mesmo efeito biológico. Normalmente, utiliza-se como referência a eficiência biológica dos fótons de alta energia ou a do Cobalto-60. Desta forma, a EBR dos fótons de baixa energia é de 1,15, enquanto que a dos nêutrons ou de partículas alfa é de 2 ou 3, ou seja, duas ou três vezes mais eficientes.

**Radiobiologia molecular.** A informação genética contida no DNA é transmitida ao citoplasma através do RNA mensageiro (RNAm), o que permite a síntese de proteínas e de outras moléculas segundo modelos pré-estabelecidos. Como a atividade de síntese da célula é constante, há a necessidade de uma produção de RNAm também constante. Por sua vez, o DNA só é sintetizado no momento da reprodução celular.

A dose de radiação necessária para induzir perda da capacidade reprodutiva de uma célula é de 100 a 300 cGy. Do ponto de vista radioquímico, a quantidade de energia depositada por essa dose de radiação e o pequeno número de alterações bioquímicas por ela determinada não explicam a importância dos efeitos observados. Efetivamente, a quantidade de macromoléculas, inclusive de proteínas de importância para a célula, é muito grande em cada uma delas e não é de se esperar que o pequeno número de alterações químicas induzidas por essa dose resulte em efeitos de importância. Por outro lado, a estrutura do DNA nuclear é única, uma lesão dessa molécula pode resultar em alterações catastróficas para a célula. Por isso, a hipótese mais difundida é que, para aquela dose, as lesões celulares são produzidas por ação direta da radiação e por efeitos indiretos sobre a molécula de DNA.

As macromoléculas apresentam uma estrutura tridimensional complexa que pode variar *in vivo* ou *in vitro*. Por isso, as alterações produzidas pela radiação decorrem de alterações físico-químicas ou biológicas em macromoléculas. A diminuição na solubilidade de uma molécula, após a irradiação, decorre da formação de pontes que alteram seu volume e a perda de função de uma enzima para catalizar uma reação indica alteração química do seu grupo ativo.

**Proteínas.** As proteínas são cadeias de aminoácidos mais ou menos longas que podem estar ligadas a outras substâncias químicas, como a glicídeos na formação de glicoproteínas ou a moléculas de DNA, para formar estruturas tridimensionais mais complexas. Apesar do grupo amino ser a porção do aminoácido mais sensível, o fato de, na ligação peptídica, estar unido ao grupo carboxila para formar a cadeia de aminoácidos, confere a essas moléculas maior resistência aos efeitos das radiações. As porções mais sensíveis das proteínas são suas cadeias laterais que podem sofrer danos como rupturas ou deslocamentos de átomos de hidrogênio com facilidade. Por isso, a perda da função de uma proteína não se deve a alteração de sua estrutura primária, mas a uma modificação das estruturas secundária ou terciária que a torna incapaz de desempenhar sua função biológica.

As proteínas assumem importantes funções celulares como a atividade enzimática, os danos a essas macromoléculas causam alterações metabólicas que podem ser restabelecidas se preservada a informação genética contida no genoma celular. As alterações em proteínas e lipídeos estruturais determinam o aumento de permeabilidade das membranas celulares que causa desequilíbrio osmótico e o movimento de água entre os compartimentos extra e intracelulares e, como consequência, altera a função celular.

**Ácidos nucléicos.** Os ácidos nucléicos são macromoléculas muito sensíveis às radiações, sendo a sensibilidade do DNA cinco vezes maior que a do RNA.

A ação das radiações sobre os cromossomos pode produzir grande variedade de danos. Alguns deles podem ocorrer com doses muito baixas, que resultam da modificação da estrutura química da cadeia do DNA, produzindo alteração da informação genética (mutação). As mutações não determinam alterações morfológicas ou funcionais na célula e só se manifestam na descendência.

Com doses superiores podem produzir alterações celulares mais importantes, mesmo assim, a célula irradiada pode continuar com atividade metabólica normal e, aparentemente, é uma célula sadia. No entanto, em muitos casos podem surgir mitoses aberrantes, células gigantes com o número duplicado de cromossomos (diploides) ou células multinucleadas acompanhadas de alterações morfológicas dos cromossomos.

Como consequência do dano cromossômico, dois fenômenos podem ocorrer: 1) se uma célula recebeu um dano cromossômico não-letal, ela pode se reproduzir e exibir ou não alterações cromossômicas, o que significa que algumas lesões subletais não têm tradução morfológica por ocorrer nos genes. Essas alterações genéticas podem dar origem a um tumor maligno, se ocorrerem em células somáticas, ou a malformações congênitas na descendência, caso acometam gametas que cheguem a fecundar; e, 2) se as alterações cromossômicas ou genéticas são importantes, impedem a reprodução celular ou causam a sua morte imediata prescindindo de que tenham ou não tradução morfológica. No primeiro caso, trata-se de rupturas simples, enquanto no segundo, as alterações devem-se a rupturas duplas ou múltiplas da cadeia de DNA.

As possíveis alterações morfológicas observadas nos cromossomos são ruptura única de um cromossomo, ruptura dupla em mais de um cromossomo, ruptura múltipla em um cromossomo e adesividade e fusões entre cromossomos.

As rupturas possibilitam que ocorram perdas de fragmentos ou deleções cromossômicas que podem ser terminais ou intersticiais, deleções de cromátides e de isocromátides, trocas ou permutas de fragmentos dentro de um mesmo cromossomo e/ou entre cromossomos, inversões e translocações. Essas lesões radio-induzidas podem ser reparadas sem dano residual, mas podem ocorrer perdas de parte de um cromossomo ou reagrupamentos ou alterações na ordem dos genes no cromossomo afetado.

Qualquer alteração na dotação genética quer seja na quantidade de informação ou na qualidade (ordem dos genes) pode determinar uma mutação. Para isso, faz-se necessário que a célula seja viável e, portanto, capaz de se reproduzir e de transmitir a informação alterada aos descendentes. As mutações que afetam células germinativas (gametas), caso cheguem a fecundar, são transmitidas aos descendentes e dar origem a doenças hereditárias ou podem determinar malforma-

ções congênitas em seus descendentes. As mutações em células somáticas podem originar cânceres.

As mutações podem ser classificadas em: 1) mutações genômicas que envolvem perda ou ganho de cromossomos inteiros, 2) mutações cromossômicas que resultam do rearranjo do material genético e, 3) mutações gênicas que resultam da depleção parcial ou completa de um gene, ou afetar uma única base, como a substituição (mutação pontual) ou na inserção ou depleção de um ou dois pares de bases no DNA.

**Morte celular.** As lesões celulares ocorrem quando as células são expostas a agentes nocivos ou a estresse tão severo que não são capazes de se adaptar. As lesões podem progredir a um estágio irreversível e levar à morte celular. As lesões celulares resultam de anormalidades funcionais e bioquímicas em componentes celulares essenciais. Os alvos mais importantes dos efeitos nocivos são: 1) a respiração aeróbica envolvendo a fosforilação oxidativa mitocondrial com redução da produção de ATP, 2) a integridade das membranas celulares da qual depende o equilíbrio iônico e osmótico da célula e de suas organelas, 3) a síntese de proteínas, 4) o citoesqueleto e, 5) a integridade dos componentes genéticos. A lesão celular reversível manifesta-se inicialmente pela redução da fosforilação oxidativa e da oferta de ATP e por edema celular consequência do desequilíbrio osmótico. Com a progressão do dano, a lesão torna-se irreversível, sendo a célula incapaz de se recuperar, mostrando alterações morfológicas características da morte celular.

Existem dois tipos de morte celular, a necrose e a apoptose. Na necrose há dano severo às membranas, as enzimas lisossômicas são liberadas no citoplasma, digerindo a célula e os componentes celulares vazam para o espaço extracelular. Alguns agentes nocivos, principalmente aqueles que causam dano ao DNA, induzem a apoptose. Nessa condição, as células ativam enzimas que degradam o DNA nuclear e as proteínas citoplasmáticas. A membrana celular permanece íntegra, mas sua estrutura é alterada, permitindo que a célula seja reconhecida pelas células de defesa, fagocitada e rapidamente eliminada.

**Radiossensibilidade celular e tecidual.** Cinética de uma população celular é o termo utilizado para indicar como cresce um tecido em relação ao número de células que o compõe. Em uma população de células pode haver: 1) aumento real no número de células, como é o caso de embriões e tumores; 2) redução em seu número como consequência da morte celular devido à agressão; ou, 3) produção celular suficiente apenas para manter constante o número total de células, ou seja, a quantidade necessária para compensar as perdas.

Dizemos que uma população celular encontra-se em fase proliferativa quando mantém o número total de células mais ou menos constante. Em um cultivo celular, pode-se determinar objetivamente pela observação ao microscópio óptico do número de células em mitose. Mantendo-se as condições de cultivo estáveis, o número de células em mitose é constante. O quociente entre o número total de células e o número de células em mitose denomina-se índice mitótico. Para um tecido em fase de proliferação, o índice mitótico em função do tempo é constante.

Quando se submete uma cultura celular de índice mitótico conhecido a uma dose baixa de radiação, observa-se inicialmente diminuição no número de células em mitose. Posteriormente, o número de células em mitose aumenta progressivamente, ultrapassa o valor inicial para logo decrescer alcançando os valores

prévios à irradiação. Doses baixas de radiações retardam a divisão celular de grande parte das células, reduzindo o índice mitótico. Com o passar do tempo, as células recuperam a capacidade reprodutiva e reiniciam suas atividades proliferativas gradativamente e, em conjunto com células cuja função reprodutiva não havia sido afetada, fazem com que o número de mitoses observado aumente acima do normal, efeito denominado sobrecarga mitótica, para logo decrescer aos valores iniciais, processo conhecido como retardo na divisão celular.

Ao se irradiar a cultura celular com uma dose maior de radiação, a diminuição do índice mitótico é mais profunda e prolongada, a recuperação é mais lenta e, posteriormente, uma vez alcançado a estabilização, o número de células situa-se abaixo do valor inicial, ao que se denomina falha reprodutiva. Nesse caso, muitas células, após a primeira mitose, perdem a capacidade reprodutiva e, em consequência, o número de mitoses permanece abaixo do normal.

Quando a dose é mais alta, o dano celular é também maior e as células irradiadas não são capazes de progredir até a mitose. Algumas conseguem recuperar a capacidade reprodutiva, mas nem todas o fazem, não se observando o retorno do número de células aos níveis pré-irradiação, ao que se denomina morte intermitótica.

**Radiossensibilidade.** Segundo a lei de Bergonié e Tribondeau, a radiossensibilidade de um determinado tipo celular seria diretamente proporcional a seu índice mitótico e inversamente proporcional ao seu grau de diferenciação. Assim sendo, as células mais sensíveis às radiações são aquelas que se reproduzem regularmente e são mais indiferenciadas (quadro 3).

Quadro 3. Sensibilidade relativa de células de mamíferos às radiações.

<b>Radiossensibilidade Relativa</b>	<b>Tipo Celular</b>	<b>Características</b>
Elevada	Células primordiais hematopoiéticas, espermatogônias, células das criptas intestinais	Vida curta, indiferenciada, divide-se regularmente
Pouco elevada	Células precursoras da série hematopoiética	Divide-se um número limitado de vezes, diferenciada até certo grau
Média	Células endoteliais, fibroblastos	Divide-se irregularmente, período de vida muito variável
Pouco baixa	Células parenquimatosas (fígado, rim, glândula salivar, etc)	Vida longa, não se divide frequentemente, grau variável de diferenciação
Baixa	Neurônios, eritrócitos, células musculares	Não se divide, altamente diferenciada

Fonte: Rocha, A.F.G., Harbert, J.C. Medicina Nuclear Bases. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 1979.

De acordo com este conceito, as células do tecido hepático devem ser resistentes às radiações, pelo pequeno número de mitoses que apresenta, enquanto que o tecido intestinal seria radiossensível. As observações referentes a radiossensibilidade celular são corretas, mas as conclusões não. É certo que ao se irradiar o fígado e o intestino com a mesma dose de radiação, o exame histológico revela uma aparente ausência de lesão no primeiro e grandes alterações no segundo. No entanto, se a atividade proliferativa do fígado for estimulada por meio de uma ressecção parcial, quando as células iniciarem a multiplicação para repor a parte extirpada, tornar-se-ão aparentes as alterações secundárias induzidas pela radiação administrada. Diante desse fato, Ancel e Vitemberg introduziram modificações

na lei de Bergonié e Tribondeau, incluindo dois novos fatores: as condições biológicas em que a célula se encontra antes, durante e depois da irradiação e a tensão ou estresse biológico a que está submetida após a irradiação. Considerando-se esses fatores, a resposta das células após uma dose de radiação, varia amplamente se são modificados fatores como a natureza e características das radiações e as condições de cultivo. Desse modo, não se pode falar de radiosensibilidade intrínseca. A sensibilidade depende de certas condições (sensibilidade condicional) que determinam a resposta de duas populações celulares.

A resposta celular à radiação está relacionada ao intervalo de tempo transcorrido para que as alterações se manifestem, mas não com o resultado final que se expressa como radiosensibilidade. Assim sendo, há tecidos, sádios ou tumoriais, que respondem rapidamente à agressão e, por isso, são denominados radiosensíveis. Outros demoram mais em manifestar os efeitos e são classificados como resistentes às radiações. Na realidade, a eficiência da dose pode ser a mesma, sendo a única diferença entre células distintas o tempo decorrido para que o efeito se manifeste (período de latência). Assim, o conceito de radiosensibilidade, que expressa a possibilidade da radiação matar uma célula, deve ser entendido como a probabilidade de que ela seja destruída quando tente se dividir, prescindindo do tempo necessário para iniciar a divisão e, portanto, em manifestar o dano.

Os tecidos de proliferação rápida, como a mucosa intestinal, medula óssea e testículos manifestam precocemente os efeitos da radiação em razão de sua permanente atividade reprodutiva e, por isso, alcançam antes o momento crítico em relação a outros tecidos de renovação lenta. O quadro 4 apresenta esquematicamente e em ordem decrescente a sensibilidade dos vários tecidos às radiações.

Quadro 4. Radiossensibilidade tissular relativa.

<b>Sensibilidade Relativa</b>	<b>Tecidos</b>
Elevada	Epitélio linfóide, hematopoietico, espermatogênico, epitélio intestinal
Pouco elevada	Epitélio estratificado orofaríngeo, epitélio epidérmico
Média	Tecido conjuntivo intersticial, vascular, cartilaginoso ou ósseo em crescimento
Pouco baixa	Cartilagem ou osso maduro, epitélio hepático, renal, pancreático, tireoidiano e suprarenal
Baixa	Tecidos muscular e nervoso

Fonte: Rocha, A.F.G., Harbert, J.C. Medicina Nuclear Bases. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 1979.

Assim sendo, o conceito de resistência celular à radiação deve ser entendido como um termo relativo. Não existem células radiorresistentes. As células são incapazes de neutralizar a totalidade dos efeitos das radiações. Um determinado tipo celular pode ser mais radiosensível que outro, mas, aumentando a dose sempre se pode conseguir a destruição celular.

A sobrevivência celular depende de sua resposta à radiação, sendo evidente que modificando a natureza e as características das radiações e/ou as condições bioquímicas ou biológicas em que se encontra a célula, a sua capacidade de sobrevivência variará.

Os fatores que podem modificar a tolerância celular às radiações podem ser divididos em três grupos:

**1. Fatores físicos.** São aqueles que dizem respeito às características da radiação.

**Natureza da radiação.** A eficiência biológica de uma dose de radiação varia diretamente com a sua capacidade de produzir ionizações. Assim sendo,

radiações de alta transferência linear de energia (LET), como as partículas alfa e nêutrons, causam menor taxa de sobrevivência celular que a mesma dose de radiação X ou gama.

**Taxa de dose.** A eficiência biológica de uma dose de radiação varia diretamente com a taxa de dose (dose por unidade de tempo) que se irradia a célula. Assim, à medida que a taxa de dose aumenta, cresce a eficiência para produzir dano celular. Esta resposta deve-se a que as ionizações produzidas são concentradas no tempo, superando a capacidade da célula de reparar os danos produzidos nas moléculas biologicamente importantes (acúmulo de danos sub-letais).

**2. Fatores químicos.** Qualquer substância química que se concentre no interior da célula no momento da irradiação pode modificar a sua sensibilidade aos efeitos da radiação. Substâncias químicas que se convertem em produtos tóxicos para a célula, ou que aumentam a vida média e a quantidade de radicais livres, aumentam a sensibilidade celular às radiações, sendo, portanto, radiosensibilizadores.

Como sabemos, o radiosensibilizador celular mais importante é o oxigênio. Em condições controladas, ao se irradiar duas populações celulares, uma submetida a baixas tensões de oxigênio (hipóxia) e outra saturada de oxigênio, as células oxigenadas mostram menor capacidade de sobrevivência para uma mesma dose de radiação. Outros radiosensibilizadores celulares são as pirimidinas halogenadas, a actinomicina-D, a hidroxauréia e a vitamina K.

Ao contrário, substâncias químicas capazes de liberar elétrons, neutralizando a formação de radicais reativos são radioprotetores e, em consequência, diminuem a eficiência biológica da radiação. À semelhança dos radiosensibilizadores, essas substâncias devem estar no interior da célula no momento da irradiação. Radioprotetores importantes são os compostos que contém o radical sulfidrilo (-SH) como a cisteína e a cisteamina.

**3. Fatores biológicos.** As células em diferentes fases do ciclo reprodutivo mostram capacidades variáveis de sobrevivência. Assim sendo, células em fase de síntese inicial e tardia do DNA são menos sensíveis que aquelas em fases  $G_1$  e  $G_2$  ou em mitose.

**Radiossensibilidade tecidual.** A radiossensibilidade dos tecidos depende da sensibilidade dos tipos celulares que o compõem. Os órgãos são constituídos por tecido parenquimatoso característico e especializado e por elementos estruturais, denominado estroma, formados por tecido conjuntivo responsável por sua organização, sustentação e nutrição.

Os principais efeitos das radiações sobre os órgãos resultam de danos às células parenquimatosas. No entanto, mesmo que as células do parênquima sejam pouco sensíveis, as alterações radioinduzidas no tecido conjuntivo, particularmente sobre os vasos sanguíneos que os nutrem, pode ocasionar danos a essas células por mecanismo indireto com a diminuição do aporte sanguíneo e a morte celular por inanição. Dessa forma, as consequências da irradiação de um tecido ou órgão dependerão dos efeitos sobre as células mais sensíveis que o compõe.

Todo tecido contém tipos celulares diferentes e, portanto, radiossensibilidades diferentes, e cada um deles, com células em diferentes fases do ciclo reprodutivo e graus de diferenciação. Como sabemos, células indiferenciadas e em fase de proliferação são mais sensíveis à radiação, enquanto que aquelas diferenciadas com pequena ou nula atividade mitótica são mais resistentes. Assim,

órgãos com células parenquimatosas muito sensíveis à radiação manifestarão os efeitos das radiolesões por redução do número de células do parênquima, como ocorre nos testículos e na medula óssea. Nesses órgãos, a radiação produzirá dano nas células primordiais, espermatogônias nos testículos e das linhagens de hemácias, leucócitos e plaquetas na medula óssea, com perda temporária ou permanente de suas capacidades reprodutivas e redução da população celular, produzindo, como consequência, esterilidade ou aplasia medular, enquanto que o tecido conjuntivo não sofrerá lesões aparentes.

Órgãos formados por células parenquimatosas resistentes sofrerão alterações funcionais por dano indireto, como é o caso do tecido muscular cujas células são resistentes à radiação, mas quando irradiado com uma dose suficientemente alta para produzir alterações no tecido vascular, ocorrerá atrofia e/ou necrose de fibras musculares por falha de aporte sanguíneo.

**Irradiação sobre o corpo inteiro.** Enquanto nas irradiações parciais ou localizadas a resposta obtida depende das características dos tecidos e células incluídas na área irradiada, a irradiação de corpo inteiro por uma quantidade suficiente de radiação induzirá a síndrome aguda da radiação. Nela, as alterações teciduais são consequência da redução do número de células nos tecidos e as manifestações clínicas e o tempo para o seu aparecimento dependerão da cinética da população celular implicada.

A síndrome aguda da radiação ocorre após a irradiação de corpo inteiro com dose única acima de 0,5 Gy. A síndrome instala-se como consequência da falência dos sistemas hematopoiético, gastrointestinal e nervoso central. O organismo humano responde a uma irradiação de corpo inteiro por meio de lesões celulares que originam quadros clínicos e alterações orgânicas de surgimento sucessivo. A fase prodrômica inicia-se durante a exposição, ou pouco depois, e sua duração depende da dose recebida. Em seguida, tem início a fase de latência na qual o indivíduo não apresenta sintomas, mas estarão ocorrendo alterações degenerativas celulares e repostas proliferativas na tentativa de compensar ou reparar as lesões. Depois disso, instala-se a doença propriamente dita e, de acordo com a dose recebida, surge sintomas próprios de cada síndrome. Finalmente, dá-se a morte ou a recuperação das lesões.

A fase prodrômica caracteriza-se por náuseas, vômitos, cefaléia, fraqueza e vertigem. O período de latência dura poucos dias. A evolução dos sintomas e o tempo para seu aparecimento dependem da quantidade de dose recebida.

A síndrome hematopoiética manifesta-se por leucopenia, plaquetopenia e anemia, devido à lesão de células precursoras da medula óssea. Dessa forma, o indivíduo é susceptível a hemorragia e infecção. A síndrome gastrointestinal manifesta-se com náuseas, vômitos, cólica, diarreia aquosa e sanguinolenta, desequilíbrio hidreletrolítico, infecção, falência circulatória, coma e morte. A síndrome do sistema nervoso central ocorre rapidamente após dose elevada de radiação, que provoca vasculite e encefalite, que se manifesta por apatia, prostração, convulsão, coma e morte.

A gravidade e cronologia dos sintomas nos dão uma idéia da importância da dose recebida e estabelece um prognóstico, especialmente quando se trata de uma exposição acidental e essa não é conhecida. Dessa forma, é certo que todos aqueles pacientes com sintomas neurológicos morrerão e o aparecimento de vômi-



tos e diarreia, que não respondem ao tratamento e com duração superior a três dias, indicam péssimo prognóstico. As alterações hematológicas podem ser tratadas com a reposição de sangue e derivados, correção do desequilíbrio hidroeletrolítico e, às vezes, transplante de medula óssea, permitindo a sobrevivência do indivíduo irradiado.

**Irradiação total de embriões e fetos.** As alterações que ocorrem em embriões e fetos podem ser classificadas em dois grupos: 1) aquelas secundárias a alterações nos genes do óvulo e/ou espermatozóide e que originarão efeitos genéticos e, 2) as que decorrem da irradiação do útero após a fecundação e que surgem de alterações no desenvolvimento do embrião (efeitos congênitos).

Os efeitos da irradiação sobre embriões e fetos dependem da fase do desenvolvimento em que se encontram no momento da exposição e se manifestam como morte pré-natal, mal-formações congênitas, morte neonatal ou como efeitos tardios. A fase de pré-nidação compreende desde a fecundação até a implantação do embrião na parede uterina. No homem, essa fase dura 10 dias e caracteriza-se por divisões rápidas da célula ovo resultando em um conjunto de células indiferenciadas. A fase de organogênese compreende desde a implantação até a formação completa dos órgãos. No homem, estende-se até a sexta semana de gestação. Durante essa fase, as células diferenciam-se para formar os diferentes tecidos e órgãos, exceto o sistema nervoso central cujo desenvolvimento pode ocorrer até os 10 a 12 anos de idade. Devido a grande atividade proliferativa das células, o embrião apresenta elevada sensibilidade à radiação. A fase fetal, que no homem vai da sexta semana até o nascimento, o organismo já formado cresce até alcançar o tamanho e a viabilidade própria de um feto maduro.

Na fase de pré-nidação, o número total de células é baixo e todas elas assumem grande importância, pois cada uma delas dá origem a muitas outras. Por isso, uma dose de radiação, por menor que seja, tem grande probabilidade de ser letal, determinando como efeito mais frequente a morte pré-natal. Caso o embrião sobreviva, frequentemente, não desenvolverá mal-formações, em razão das células sobreviventes íntegras compensarem a deficiência celular induzida. Caso ocorram, as mal-formações mais frequentes são a anencefalia ou ausência congênita do cérebro e a exencefalia ou a protrusão do cérebro através da calota craniana.

Na organogênese inicia-se a formação dos órgãos por diferenciação celular do embrião. Como esse processo ocorre em etapas sucessivas, as mal-formações que aparecerão variam em relação ao dia da irradiação. Em qualquer caso, quando se irradia nessa fase, o feto chegará à termo, mas nasce com mal-formações, frequentemente relacionadas a defeitos do sistema nervoso central ou em órgãos a ele relacionados (olhos e maxilar facial). Nessa fase, se as anomalias produzidas são graves determinarão a morte do feto nas primeiras horas após o nascimento (morte neonatal).

Na fase fetal, como as células estão diferenciadas, os tecidos em geral e o sistema nervoso em particular são menos sensíveis e o feto tolera doses mais altas de radiações. Com doses administradas de 100 a 300 cGy, não ocorrerão mal-formações congênitas nem morte intra-útero. Porém, os efeitos da radiação podem se manifestar mais tardiamente em forma de envelhecimento prematuro, carcinogênese e desenvolvimento insuficiente.

**Efeitos tardios.** Os efeitos tardios das radiações são alterações teciduais que se

apresentam a partir dos seis meses da irradiação. Esses efeitos podem ocorrer sobre o indivíduo que recebeu a irradiação (efeitos somáticos) ou sobre a sua descendência (efeitos genéticos). Os efeitos somáticos podem ser localizados, como consequência de irradiações em áreas restritas, ou sistêmicos decorrentes do efeito aleatório das radiações sobre todo o organismo.

Enquanto os efeitos agudos são autolimitados e se resolvem durante as semanas que se seguem à irradiação, os efeitos tardios podem ter períodos de latência prolongados, resultado de processos degenerativos, e têm um curso progressivo e irreversível. Os efeitos agudos dependem da destruição de populações celulares de vida média curta, ou seja, aquelas de intensa atividade proliferativa, e os efeitos crônicos decorrem de alterações em populações celulares bem diferenciadas, com uma vida média longa e ritmo proliferativo baixo.

Doses baixas de radiação, que permitem a sobrevivência do indivíduo sem alterações clínicas aparentes, podem causar efeitos sistêmicos, como o envelhecimento precoce, ou locais, como o aparecimento de uma neoplasia (carcinogênese), que se manifestarão tardiamente após períodos de latência prolongados.

**Envelhecimento precoce.** Em experiência com animais observou-se que a exposição crônica a baixas doses de radiação determina uma aceleração do processo de envelhecimento e encurtamento da expectativa de vida. Possivelmente, o envelhecimento resulta da incapacidade das células primordiais de manter a multiplicação celular necessária para garantir a integridade dos tecidos. A destruição das células-mãe poderia esgotar as reservas, precipitando a degeneração dos tecidos. O envelhecimento precoce reduz a expectativa de vida sem uma doença aparente que cause a morte dos animais.

**Anemia aplásica.** A anemia aplásica resulta da incapacidade da medula óssea de produzir os elementos celulares maduros do sangue. A maior incidência dessa forma de anemia foi observada em indivíduos irradiados com doses muito baixas de radiações para o tratamento de doenças inflamatórias.

**Carcinogênese e leucemogênese.** As radiações podem induzir leucemias e outros tipos de tumores malignos. O período de latência é de 5 a 8 anos para as leucemias e de 10 a 15 anos para tumores sólidos. A incidência é baixa, sendo de dois casos de leucemias e dois tumores sólidos por ano para cada 100.000 indivíduos submetidos a uma irradiação de 1 cGy por ano. Em geral, devemos aceitar que a exposição às radiações ionizantes aumentam a possibilidade de induzir uma doença proliferativa maligna, porém, o aumento da probabilidade em relação à dose absorvida é difícil de ser quantificada e não se pode excluir a possibilidade de que exista uma dose limiar abaixo da qual o efeito carcinogênico não se manifesta.

Atualmente, os dados disponíveis para relacionar a incidência de leucemias às radiações correspondem a estudos 1) dos efeitos das bombas atômicas sobre a população japonesa, 2) de pessoas profissionalmente expostas e 3) de pacientes irradiados por outras causas. A incidência de leucemia em sobreviventes de Hiroshima é muito superior à de indivíduos não irradiados. Além disso, a incidência é maior em indivíduos dessa população que recebeu fótons e nêutrons, que entre os sobreviventes de Nagasaki irradiados unicamente por fótons.

**Efeitos genéticos das radiações.** Os efeitos genéticos das radiações são decorrentes de alterações induzidas no DNA celular. As alterações podem se manifestar de várias maneiras, sendo as mais frequentes rupturas de cadeias de DNA e

recombinações de fragmentos, ocasionando trocas de material genético e disposições anormais dos fragmentos.

Em qualquer caso, as possibilidades de dano sobre o material genético são múltiplas e dependem da dose administrada. Podem variar desde lesões reparáveis, que não produzirão alterações posteriores, danos irreparáveis, que não apresentam tradução morfológica, ou até grandes fragmentações e recombinações aberrantes que impedem que cromossomos duplicados se separem durante a divisão celular.

As lesões de maior importância para a produção de transtornos genéticos são aquelas mais sutis, que permitem a divisão celular normal e, portanto, sua transmissão à descendência. Ao contrário, as alterações grosseiras do material genético levam à morte celular, não sendo transmitidas.

## MECANISMOS CELULARES DE REPARO DE DNA

Na Terra, a vida evoluiu em condições adversas devido a contínuas agressões causadas por agentes químicos e físicos. Assim sendo, foram selecionadas as estruturas mais aptas a resistir aos diversos agressores. Paralelamente, desenvolveram-se mecanismos, frequentemente enzimáticos, capazes de restaurar a integridade do genoma danificado, mecanismos que, provavelmente, se tornaram mais complexos com a progressiva diferenciação das estruturas biológicas. Embora os mecanismos de reparo tivessem como objetivo primordial a manutenção do patrimônio genético para a preservação das características biológicas celulares, mas, caso fossem dotados de uma eficiência absoluta, teriam se constituído em obstáculo intransponível à evolução.

Essas considerações permitem-nos imaginar a coexistência de mecanismos enzimáticos de reparação correta e incorreta, tendo como objetivo comum a eliminação ou minimização de lesões produzidas principalmente no DNA. A mutagênese e a evolução biológica são, portanto, consequências de uma relativa imprecisão dos mecanismos de reparação de DNA.

O DNA pode sofrer danos por ação de agentes químicos, físicos ou biológicos. A célula dispõe de enzimas com funções de reconhecer a alteração na molécula de DNA e, se possível, reparar as lesões. Caso ocorra e a estrutura do DNA seja reparada corretamente, a informação genética será preservada. A reparação incorreta determina a mutação e a ausência de reparação pode levar a perda da atividade biológica da célula.

Muitas evidências indicam a correlação entre os danos ao DNA e a indução de câncer, assim como, com o processo de envelhecimento. Outro importante aspecto é o estudo das doenças hereditárias por deficiências de reparação de danos ao DNA em células de pacientes portadores de xeroderma pigmentosum, ataxia-telangiectasia, síndrome de Bloom e anemia de Fanconi.

**Fotolesão e radiolesão.** A adoção da classificação das radiações em ionizantes e não ionizantes nos permite distinguir fotolesões e radiolesões. As fotolesões ocorrem quando a matéria viva é exposta às radiações solares (ultravioleta, visíveis e infravermelha) e as radiolesões são produzidas pelas radiações ionizantes, eletromagnéticas (X e gama) ou por partículas (alfa, beta, prótons e nêutrons).

As radiações ultravioletas emitidas pelo sol são classificadas em três grupos de acordo com suas faixas de comprimentos de onda: UVA de 320 a 400 nm, UVB de 280 a 320 nm e UVC de 200 a 280 nm. As radiações ultravioletas B e C são capazes de provocar danos a moléculas de DNA e proteínas, determinando efeitos sobre as células que incluem inibição da divisão celular, inativação de enzimas, indução de mutações e, em dose suficiente, a morte celular. O dano frequentemente causado pelas radiações UV no DNA é a formação de dímeros de timina. Essa lesão resulta do rompimento e fusão de duas bases nitrogenadas de timina dispostas lado a lado. A dimerização da timina deforma a cadeia de DNA, o que impede a sua transcrição ou duplicação.

**Mecanismos celulares de reparo de DNA.** Os mecanismos celulares de reparo de DNA são, em geral, controlados por diversos genes e ocorrem em várias etapas sucessivas. Da natureza poligênica resulta um processo multienzimático e a possi-

bilidade de vias alternativas coexistentes e competitivas.

Dentre as diferentes tentativas de classificação dos processos de reparo de DNA, destaca-se aquela que tem por base aspectos topográficos. Para isso, foram considerados três modelos básicos:

1. A alteração estrutural induzida pelo agente agressor espontaneamente ou por interferência de uma enzima pode ser reparada. Exemplos desse modelo de reparação *in situ* são a fotorreativação enzimática e a reversão de certos hidratos de pirimidinas.

2. A lesão do DNA é removida por mecanismo enzimático, geralmente acompanhada por alguns nucleotídeos adjacentes, e substituída por um novo fragmento sintetizado de acordo com a sequência de nucleotídeos na cadeia complementar. Esse mecanismo é exemplificado pelo processo de reparação por excisão.

3. A existência de dois ou mais exemplares de um mesmo segmento informacional pode tornar possível uma recombinação, de forma a originar uma molécula íntegra. Processos dessa natureza ocorrem antes ou após a duplicação do DNA ou quando a síntese de DNA começa, assim, independentemente da eliminação das lesões, elas se diluirão de geração a geração.

Esses modelos, obviamente bastante simplificados, propiciam a base para outra sistematização dos processos de reparação, fundamentada em um parâmetro temporal, qual seja o instante do reinício da replicação semiconservativa do DNA. Assim, a reparação pode ser pré-replicativa, tendo como exemplos a fotorreativação enzimática e a reparação por excisão, ou pós-replicativa.

No passado, foi bastante frequente a distinção de dois tipos gerais de restauração, um mediado pela luz (fotorreativação) e outro independente ou restauração no escuro que hoje se sabe abranger vários mecanismos distintos.

A natureza constitutiva ou indutiva também tem sido usada como parâmetro de classificação. Diante do papel biológico desempenhado por tais mecanismos, torna-se lógico que muitas das enzimas por eles responsáveis já existam pré-formadas nas células, sendo parte constituinte de seu conjunto de enzimas, hipótese apoiada por diversas observações, como:

1. Enzimas de reparo de DNA plenamente funcionais podem ser isoladas de preparações celulares não-irradiadas;

2. A reparação é detectável em células onde a biossíntese de proteínas tenha sido bloqueada imediatamente após a irradiação, embora, nessa situação, sejam observadas alterações de eficiência; e,

3. O DNA de bacteriófago (vírus de bactérias) previamente danificado pela radiação pode ser reparado após sua penetração em bactérias não-irradiadas, fenômeno conhecido como reativação pela célula hospedeira.

Além dos mecanismos constitutivos, outros estão bem caracterizados, cuja expressão é dependente da síntese de enzimas após a irradiação. Esse mecanismo induzido, ainda que eventualmente utilize algumas enzimas pré-formadas, só pode se exteriorizar na dependência da síntese enzimática e constitui as funções SOS.

Como já descrito, a reparação de lesões do DNA pode ser correta, conduzindo à preservação do patrimônio genético, ou incorreta, com a perda da atividade biológica da molécula. O segundo caso se traduz pela inviabilidade da estrutura celular dependente da função da molécula ou determina a alteração de seu conteúdo.

do informacional, resultando, entre outros fenômenos, em mutagênese.

**Fotorreativação enzimática.** Caracteriza-se pelo aumento da sobrevivência de células irradiadas com radiação ultravioleta (UV) de comprimento de onda de 254 nm quando a cultura celular é exposta a radiações de comprimentos de onda superiores a 300 nm. O processo ocorre em várias etapas, a saber:

1. A enzima de fotoreativação (EFR) combina-se especificamente com o DNA contendo dímeros de pirimidinas, podendo a interação enzima-substrato ocorrer independentemente da luz.

2. Quando iluminado, o complexo se dissocia, liberando a enzima e seu substrato já reativado. A reativação consiste no rompimento da ligação entre as duas pirimidinas adjacentes caracterizando uma desdimerização.

A enzima de fotoreativação, uma fotoliase, foi isolada em várias espécies, desde micoplasmas até células eucarióticas, inclusive humanas, e apresentam características diferentes em cada espécie. Em *Escherichia coli* (*E. Coli*), bactérias presentes na flora bacteriana intestinal, o número de enzimas de fotoreativação por células é baixo, aproximadamente 20 unidades, mas aumenta cerca de mil vezes em cepas nas quais o gene *pbr* tenha sido traduzido por um bacteriófago  $\lambda$ . Alguns comprimentos de onda capazes de promover a fotoreativação parecem também poder inativar a enzima de fotoreativação, como ocorre em 365 nm.

**Reparação por excisão.** Vários outros mecanismos de reparo de DNA independentes de iluminação foram estabelecidos. O primeiro desses mecanismos é o processo de reparação por excisão. Esse processo tem início pelo reconhecimento do dano ao DNA por uma enzima que identifica a distorção estrutural provocada pela lesão. Após o reconhecimento da alteração estrutural, promove a quebra por incisão (endonuclease) na cadeia do DNA, rompendo as ligações dos nucleotídeos nas vizinhanças da lesão. Essa etapa é relativamente inespecífica, podendo ser reconhecidos diversos tipos de lesões.

Como a enzima de fotoreativação e a endonuclease reconhecem, frequentemente, as mesmas lesões, deve haver competição entre elas. Assim sendo, a formação do complexo fotoliase-dímero impedirá que a lesão seja reparada por excisão e, reciprocamente, o rompimento da cadeia polinucleotídica impossibilitará a fotoreativação da lesão.

Em *E. coli*, a endonuclease que tem maior participação no processo é codificada pelos genes *uvrA* e *uvrB*. O produto dos genes *uvrA* e *uvrB* (endonuclease II) reconhece como substrato específico hélices de DNA que contenham dímeros de timina.

Outras endonucleases tem sido identificadas em *E. coli*, e outras células infectadas pelo bacteriófago  $T_4$ , situação na qual a enzima é produzida por um gene viral. Várias endonucleases foram também isoladas a partir de extratos de células eucarióticas.

O DNA incisado é alvo de atividades enzimáticas que removem o fragmento contendo a lesão, degradando-o, resultando em uma lacuna na cadeia polinucleotídica e, simultaneamente, novos nucleotídeos são inseridos de acordo com a sequência correspondente da cadeia complementar, supostamente íntegra. As atividades exonucleolítica e polimerásica podem coexistir ou não em uma mesma enzima. A coexistência parece ser comum nos procariontes, embora diversas exonucleases não associadas já tenham sido isoladas. Em células eucarióticas

também já foi isolada uma enzima dotada das duas atividades.

Em *E. coli*, três polimerases foram isoladas, todas também dotadas de atividades exonucleolíticas, designadas polimerases I, II e III e codificadas, respectivamente, pelos genes *polA*, *polB* e *polC*.

A última etapa na reparação por excisão envolve a ligação do fragmento novo sintetizado às extremidades livres da cadeia de DNA restaurando a sequência original de nucleotídeos. Forma-se uma ponte fosfodiéster do segmento novo. A enzima responsável por essa fase, em *E. coli*, é a polinucleotídeo ligase.

**Excisão de bases.** Em certas ocasiões, a base nitrogenada danificada é removida enzimaticamente, sem que ocorra o rompimento da cadeia, fenômeno que ocorrerá em outra fase do processo. Em *E. coli*, a remoção da base é mediada pela N-glicosidase.

**Reparação por recombinação.** A redundância de informação genética, em consequência da existência de dois ou mais exemplares de um mesmo segmento de DNA na célula, pode se traduzir em maior resistência aos efeitos das radiações, devido à possibilidade de complementação informacional, com cada segmento contribuindo com partes íntegras de sua estrutura. Esse processo de reparação por recombinação antecede ou não a replicação semiconservativa do DNA, ou seja, é um processo pré-replicativo em algumas situações e pós-replicativo em outras. A reparação por recombinação está fundamentada por algumas observações:

1. Quando do início da síntese de DNA pós-irradiação, essa se faz de modo descontínuo, sendo os fragmentos de dimensões correspondentes à distância esperada entre as lesões.
2. As dimensões dos fragmentos são dependentes da dose e aumentadas por uma prévia fotorreativação do DNA.
3. Esses fragmentos se reúnem progressivamente, o que se traduz pela elevação da massa molecular do DNA neossintetizado.
4. Mutantes do gene *recA* são inteiramente desprovidos desse tipo de restauração.

Nessa reparação, as ligações dos fragmentos de DNA à cadeia polinucleotídica parece ser mediada pela polinucleotídeo ligase.

A reparação por recombinação é dependente do gene *recA*. O produto desse gene é essencial para a recombinação dos segmentos homólogos de DNA íntegro, para alguns tipos de reparação por recombinação e para a ligação dos fragmentos que preenchem as lacunas nas hélices neoformadas. O gene *recA* é o responsável pelo controle da degradação do DNA pós-irradiação, provavelmente dependente da exonuclease V. Os genes *recB* e *recC* codificam, em conjunto, para a síntese da exonuclease V, responsável por um dos ramos da reparação por recombinação. Essa enzima é dotada de diversas funções como: 1) atividade exonucleolítica dependente de ATP, 2) atividade endonucleolítica, estimulada pelo ATP, sobre o DNA em hélice simples e 3) atividade hidrolítica, dependente de DNA, sobre o ATP. O gene *recF* assegura, provavelmente, o funcionamento de uma via alternativa para a recombinação.

**Reparação indutiva.** Os genes *recA* e *lexA* estão envolvidos no controle da radiosensibilidade. As respostas fenotípicas dependentes de produtos dos genes *recA* e *lexA* são induzidas em células cuja replicação semiconservativa do DNA tenha sido reprimida por modificações metabólicas ou pela introdução de lesões através de tratamento por agentes físicos e químicos. Assim, elas constituem uma

das formas de resposta celular à agressão e costumam ser englobadas sob a designação genérica de funções SOS. Algumas consequências da indução das funções SOS são a seguir relacionadas:

**1. Mutagênese.** A indução de mutações em sistemas biológicos tratados com certos agentes físicos e químicos constitui fenômeno já bastante conhecido e está incluída entre as funções SOS.

**2. Reativação induzida pelo fago (W-reativação).** Weigle expôs uma preparação de bacteriófagos a determinada dose de radiação UV e determinou o número de partículas virais ainda ativas, isto é, a sobrevivência, mediante infecção de células sensíveis (culturas indicadoras), irradiadas ou não irradiadas. Verificou que a sobrevivência do fago crescia com o aumento da dose a que fosse submetida a célula indicadora, passando por um máximo, sendo a posterior diminuição provavelmente consequência da perda da capacidade da bactéria de assegurar a multiplicação viral. Esse aumento de sobrevivência constitui o fenômeno Weigle ou reativação induzida do fago (W-reativação). A W-reativação é acompanhada de importante mutagênese do DNA viral e se deve a ativação da reparação do DNA do fago secundária à indução das enzimas de funções SOS, decorrentes do dano do DNA da bactéria, que ao reparar o DNA do fago permite a sua sobrevivência.

**3. Indução lisogênica.** A manutenção do estado lisogênico, caracterizado pelo equilíbrio entre o profago e a célula hospedeira, é assegurada por meio de uma molécula protéica repressora que impede a expressão de genes virais indispensáveis ao ciclo lítico. O rompimento desse equilíbrio, isto é, a indução do profago, pode ser desencadeada por diversos tratamentos físicos e químicos, tais como radiações, agentes cancerígenos, inibição da replicação semiconservativa, etc. A indução do profago não parece ser provocada diretamente pela interação de alguma espécie molecular com o repressor, como ocorre na desrepressão de outras funções celulares. A indução se deve à clivagem do repressor, do qual resulta o aparecimento de produtos de degradação.

**4. Filamentação.** Algumas bactérias formam longos filamentos não septados após irradiação ou tratamentos por agentes químicos inibidores da replicação semiconservativa do DNA quando incubadas em meio nutritivo. A capacidade de filamentação é controlada geneticamente e a sobrevivência celular depende da amplitude da filamentação. O fator protéico responsável pela filamentação ocorre, provavelmente, como consequência da desrepressão de um operon analogamente ao observado nas demais funções SOS.

**5. Termoindutibilidade.** Algumas bactérias mutantes, quando incubadas a 42°C, evidenciam filamentação, indução do fago e capacidade de promover a W-reativação, com sua consequente mutagênese. Essas expressões fenotípicas são inibidas em células que não podem expressar funções SOS. Isto significa que tratamentos térmicos nesses mutantes mimetizam a resposta celular a agentes físicos e químicos.

**6. Bloqueio da respiração pós-irradiação.** Algumas cepas bacterianas (rec<sup>+</sup> lex<sup>+</sup>) cessam a respiração cerca de 30 minutos após a irradiação, fenômeno que tem sido frequentemente correlacionado com a inativação celular. O bloqueio e a consequente inativação têm sido relacionados com o teor celular de Adenosina 3'-5'-monofosfato (cAMP) e células cultivadas desencadeiam os dois fenômenos. A adição de substâncias inibidoras de proteases amplifica o efeito da radiação no bloqueio da radiação e na inativação.



**Carcinogênese pela radiação.** Os raios ultravioletas (UV) derivados do sol aumentam a incidência de câncer de pele: carcinoma de células escamosas, carcinomas basocelulares e possivelmente melanomas malignos cutâneos. O grau de risco depende do tipo de raios UV, da intensidade da exposição e da quantidade de melanina na pele. Admite-se que a UVB (280 a 320 nm) seja responsável pelo câncer de pele. A UVC (200 a 280 nm) também é mutagênico, mas não exerce efeito significativo na incidência de câncer de pele porque é filtrado pela camada de ozônio em volta da terra. A carcinogênese da luz UVB é atribuída à formação de dímeros de timina no DNA. Esse tipo de lesão é corrigido pela via de excisão de nucleotídeos. Nas células de mamíferos, o processo de reparo de DNA pela via de excisão pode envolver 30 ou mais proteínas. Acredita-se que com uma exposição solar excessiva, a capacidade de reparação de dímeros de timina é ultrapassada e parte das lesões não é reparada.

As radiações ionizantes são todas cancerígenas. Em humanos, os cânceres mais frequentes são as leucemias, exceto a leucemia linfóide crônica, em seguida o câncer da tireóide, mas só em pessoas jovens. Na categoria intermediária estão os cânceres de mama, pulmões e glândulas salivares, enquanto a pele, o osso e o aparelho gastrointestinal são relativamente mais resistentes às neoplasias induzidas pelas radiações, apesar das células gastrintestinais serem muito vulneráveis aos efeitos agudos das radiações.

**Defeitos dos mecanismos de reparo de DNA.** A exposição natural aos agentes nocivos ao DNA, como as radiações ionizantes, luz solar, poluentes ambientais, radicais livres de oxigênio gerados pelo metabolismo celular e estresse oxidativo induzem danos ao DNA. Da mesma forma, o processo normal de divisão celular está sujeito a erros que ocorrem espontaneamente durante a replicação do DNA. As células normais são capazes de corrigir os defeitos no DNA prevenindo a mutação em seus genes. O papel fundamental dos mecanismos celulares de reparo de DNA na manutenção da integridade do genoma pode ser percebido nas doenças hereditárias humanas determinadas por mutações em genes que codificam enzimas de reparo de DNA.

Erros de pareamento na replicação do DNA podem ocorrer em qualquer célula em divisão. Quando uma hélice de DNA está replicando, os genes de reparo do pareamento errôneo agem para corrigir possíveis defeitos. Caso o processo falhe, os erros se acumulam lentamente em diversos genes. O defeito em genes de correção de erros de pareamento do DNA predispõe ao câncer.

O xeroderma pigmentosum é uma doença hereditária que envolve mutações em genes da via de reparo pela excisão de nucleotídeos, processo esse que depende de diversas proteínas e genes. Esses pacientes estão em maior risco (2.000 vezes) para o desenvolvimento de câncer de pele quando expostos aos raios UV da luz do sol.

Outro grupo de doenças hereditárias por defeitos no mecanismo de reparo de DNA por recombinação homóloga inclui a ataxia-telangiectasia, a síndrome de Bloom e a anemia de Fanconi. Essas doenças caracterizam-se pela hipersensibilidade a agentes que causam dano ao DNA, como as radiações ionizantes no caso de pacientes com ataxia-telangiectasia e com síndrome de Bloom, ou a agentes que se ligam ao DNA, como na anemia de Fanconi. Essas síndromes incluem, além da predisposição ao câncer, outras características como

sintomas neurais (ataxia-telangiectasia), anemia (anemia de Fanconi) e defeitos de desenvolvimento (síndrome de Bloom).

A síndrome de Bloom resulta do defeito de uma helicase que participa do mecanismo de reparo de DNA por recombinação homóloga.

Na ataxia-telangiectasia ocorre perda gradual das células de Purkinje do cerebelo que causam ataxia cerebelar, maturação defeituosa de linfócitos e proliferação. Esses defeitos levam a imunodeficiência, sensibilidade aguda às radiações ionizantes e uma profunda susceptibilidade a malignidades linfóides. A ataxia-telangiectasia resulta da mutação do gene ATM que codifica uma proteína quinase que percebe a ruptura das duplas hélices do DNA, um tipo de lesão causada pelas radiações ionizantes e pelos radicais livres de oxigênio. A deficiência da proteína permite que as células com DNA lesado continuem a se proliferar e são susceptíveis a transformações malignas.

# DETECÇÃO E MEDIDA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES

Os seres humanos não são capazes de perceber de forma direta as radiações ionizantes. Para isso, necessitam utilizar instrumentos especialmente desenvolvidos para a detecção e medida das radiações. Os vários sistemas de detecção atualmente disponíveis baseiam-se em diferentes processos de interação das radiações com a matéria. Assim sendo, em alguns detectores, como os a gás ou de semicondutores, a ionização produzida pela interação da radiação com o meio que os constituem é recolhida por um par de eletrodos originando um impulso ou corrente elétrica que, após ser processada, é medida por um circuito eletrônico apropriado. No caso dos dosímetros fotográficos, filmes fotográficos são sensibilizados pelas radiações ionizantes da mesma forma que pela luz visível, enquanto os detectores de termoluminescência emitem luz, sob condições especiais, após absorverem a energia das radiações ionizantes.

De modo geral, os sistemas de detecção são divididos em dois grupos: 1) detectores de sinal elétrico, como as câmaras de ionização, os detectores proporcionais, os detectores de Geiger-Müller, os detectores de cintilação e os detectores de semicondutor e, 2) detectores visuais, como os filmes fotográficos e os detectores termoluminescentes.

**Detectores de sinal elétrico.** Os detectores de sinal elétrico são subdivididos em duas classes: detectores tipo pulso e detectores tipo não pulso. Nos detectores tipo pulso, cada radiação ionizante incidente dá origem a um pulso de voltagem, como resposta à interação da radiação no meio detector, que pode ser contada individualmente (*Scaler*) ou ser determinada a energia da radiação incidente por sistemas eletrônicos (espectrômetros). Nos detectores tipo não pulso, todos os sinais elétricos são somados, devido ao grande número de interações de radiações com o meio detector, permitindo determinar o valor médio dos pulsos individuais das radiações incidentes, enquanto o sistema eletrônico apresenta o número de pulsos provenientes do detector por unidade de tempo (*Ratemeter*).

**Detectores a gás.** Esses detectores utilizam a ionização produzida pela interação da radiação ionizante com um gás contido em uma câmara.

Em condições normais, os íons formados se recombinam, mas se a câmara dispuser de dois eletrodos com uma diferença de potencial elétrico entre 100 a 1000 volts, os íons negativos livres se deslocarão atraídos pelo eletrodo positivo (ânodo) e os íons positivos o farão atraídos pelo eletrodo negativo (cátodo), produzindo uma variação no potencial elétrico aplicado aos eletrodos que pode ser medida e avaliada. Nessas condições, o sinal elétrico gerado será muito pequeno, da ordem de  $10^5$  pares de íons formados, o que produzirá em um contador de gás típico um sinal da ordem de 0,5 mV. Assim sendo, esse sinal deve ser amplificado de modo a se obter uma intensidade de aproximadamente 1 volt.

Quando a voltagem aplicada aos eletrodos é baixa (Voltagem < 100 Volts) pode ocorrer recombinação de parte dos íons durante o seu trajeto aos eletrodos, essa diferença de potencial é denominada zona de recombinação. À medida que aumentamos a tensão entre os eletrodos, e dessa forma a intensidade do campo elétrico, diminui progressivamente a recombinação iônica até que, a uma voltagem entre 100 e 250 Volts, ou zona de saturação, todos os íons formados alcançam os

eletrodos, contribuindo para a geração do sinal elétrico. Um aumento adicional de voltagem não é mais acompanhado por um aumento da corrente ou amplitude do pulso elétrico, definindo um *plateau*. Nesse caso, a resposta do sistema de registro é proporcional ao número de íons-par produzidos pela radiação ionizante e ao número de partículas que interagem na câmara.

Para voltagens elevadas (entre 250 e 500 Volts), os íons gerados adquirem suficiente energia para interagir com moléculas do gás e induzir novas ionizações (ionizações secundárias). Os novos íons podem produzir ionizações terciárias, até que todos os elétrons, originados de um elétron primário, cheguem ao ânodo, a denominada avalanche de *Townsend*, resultando, para cada elétron primário produzido pela radiação incidente, a geração de muitos elétrons, originando um pulso elétrico muito maior. Dessa forma, tem-se um efeito de multiplicação que varia na razão direta do aumento da voltagem, a denominada zona proporcional. O pulso de corrente depende também do número total de avalanches que ocorrem ao mesmo tempo, ou seja, da intensidade da ionização primária produzida pela radiação incidente.

Para voltagens entre 500 e aproximadamente 600 Volts, ou região de proporcionalidade limitada, o processo de ionização secundária ocorre, no entanto, não mais mantendo a proporcionalidade entre as energias das partículas e as amplitudes dos pulsos gerados.

Para voltagens aplicadas entre 600 e aproximadamente 900 Volts, o número de íons secundários aumenta muito, produzindo novas avalanches, com o ciclo se repetindo até que todo o gás dentro do detector seja ionizado. Os pulsos elétricos gerados são independentes do número de íons-par primários produzidos pela radiação incidente no detector. A essa diferença de potencial denomina-se zona Geiger.

Ao aumentarmos mais a diferença de potencial ocorre ionização do gás do detector espontaneamente (zona de descarga contínua).

Dependendo da voltagem aplicada, um detector a gás funcionará como câmara de ionização, contador proporcional ou contador de Geiger-Muller.

**Câmara de ionização.** É um detector a gás que funciona a uma tensão entre os eletrodos correspondente à zona de saturação, permitindo a detecção de radiações alfa, beta e gama. Esse detector apresenta melhor rendimento para as radiações beta e muito baixa eficiência de detecção para radiações gama (rendimento da ordem de 1%).

A voltagem de trabalho da câmara de ionização não é crítica por operar com tensões na zona de saturação, ou seja, onde todos os íons produzidos são coletados pelos eletrodos e contribuem para a produção do sinal elétrico. Entre 100 e 250 volts, o aumento da voltagem aplicada não determina aumento da corrente, obtendo-se um valor denominado intensidade de corrente de saturação. A geometria da câmara de ionização pode ser plana ou cilíndrica e a gás da câmara é o ar atmosférico.

Utilizando as câmaras de ionização é possível discriminar a energia das partículas incidentes, mas a carga total produzida por uma partícula é muito pequena, dificultando o uso das câmaras de ionização como detectores do tipo pulso. As câmaras de ionização são utilizadas para medir o efeito médio produzido por um feixe de radiação, assim sendo, a carga total recolhida pelo ânodo, em um intervalo

de tempo, é proporcional ao número de partículas detectadas.

**Contadores proporcionais.** Os contadores proporcionais são detectores a gás que funcionam com tensões na zona de proporcionalidade limitada, ou seja, onde ocorre ionização secundária, mantendo a proporcionalidade entre o número total de íons produzidos e a ionização primária. Os elétrons resultantes da ionização secundária podem produzir novos íons e cada evento ionizante primário induz a produção de íons secundários, espalhando a descarga sobre o volume total do contador.

Os contadores proporcionais são normalmente utilizados como detectores do tipo pulso. A dependência entre a amplitude do pulso e a ionização primária faz esses detectores úteis quando se deseja discriminar a energia das radiações (espectrometria das radiações). Os gases utilizados são misturas de gases nobres, principalmente o argônio (90%), com uma pequena quantidade de um gás orgânico (10% de metano).

Para que um contador proporcional tenha boa eficiência de detecção para as partículas alfa e beta, a espessura da janela da câmara de gás deve ser a menor possível. Esse detector é de grande utilidade para a espectrometria beta e alfa.

Um sistema de detecção desse tipo é o de fluxo contínuo de gás. A sua principal vantagem é que se pode colocar a amostra radioativa a ser contada dentro do próprio detector, aumentando a eficiência de contagem de partículas beta de baixa energia como as do  $^{14}\text{C}$  e  $^3\text{H}$ .

**Contador de Geiger-Müller.** Nesses detectores, a tensão de trabalho está na zona Geiger. Os pulsos de correntes gerados são de alta amplitude, da ordem de volts, e independentes da energia da radiação incidente, não sendo possível utilizar a amplitude do pulso como parâmetro de medida da energia da radiação incidente. Portanto, esse detector não pode ser utilizado como espectrômetro, mas, tem como vantagem, não necessitar de um sistema eletrônico complexo de amplificação do pulso. O detector Geiger-Müller (GM) é um tubo metálico ou uma ampola de vidro, vedado em uma de suas extremidades por uma película delgada ou janela, geralmente de mica. No interior do tubo há um fio central que constitui o ânodo para onde convergem os elétrons. O detector GM é muito eficiente para detecção de partículas alfa e beta, sendo largamente utilizados como monitores de contaminação de superfície. A eficiência desses detectores é muito alta para partículas beta (da ordem de 99%) e muito baixa para radiação gama.

O contador de Geiger-Müller tem como inconveniente o fato de, após a detecção de um impulso, ser incapaz de detectar imediatamente um novo impulso, ao que se denomina tempo morto. Quando o detector GM é constituído de um gás mono ou diatômico não há extinção rápida da carga, dessa forma, a nuvem de íons positivos impede, durante um tempo de aproximadamente  $10^{-4}$  s, a produção de nova descarga, tempo que os íons positivos levam para se moverem até o cátodo. Ao chegarem ao cátodo, eles serão neutralizados por elétrons extraídos do eletrodo, porém resultando átomos em estados excitados que emitem fótons para voltarem aos seus estados fundamentais. Esses fótons quando atingem o cátodo arrançam elétrons e, consequentemente, mantêm a descarga. Para a extinção da descarga, na mistura do gás existe certa proporção de um gás poliatômico, como por exemplo, vapor de álcool, mas, cada vez que o tubo conta uma partícula, grande número de moléculas de gás se rompe produzindo o desaparecimento das moléculas poliatômicas, o que ocasiona a perda progressiva da capacidade de detecção

do equipamento. A vida útil do tubo pode ser prolongada adicionando ao gás um halogênio (*Bromo ou Cloro*). As moléculas dos halogênios sofrem dissociações durante as descargas, mas se recombinam posteriormente. Além disso, o campo elétrico não se recupera até haver transcorrido um tempo de duas vezes o tempo morto, o denominado tempo de recuperação. Portanto, esses detectores não podem ser utilizados em espectrometria nem quando a taxa de partículas incidentes é alta.

Um aspecto importante dos contadores Geiger é a denominada curva característica. A curva característica reflete a variação da taxa de contagem em função da tensão aplicada para uma fonte de atividade constante a uma distância fixa do detector. Para tensões baixas, o detector não registra nenhum impulso mesmo que possa chegar radiação. À medida que a voltagem cresce, aumenta o número de impulsos produzidos por minuto até chegar a uma zona, denominada platô, na qual, mesmo que a voltagem seja aumentada, não se observa um incremento correspondente no número de impulsos registrados. A largura do platô costuma ser de uns 200 volts. A tensão de trabalho ideal para um detector GM está no centro do platô.

O aumento adicional da voltagem da zona Geiger entre os eletrodos chega-se a zona de descarga contínua na qual o gás se torna um condutor e o aparelho não é mais funcional.

**Detectores de cintilação.** Os detectores de cintilação baseiam-se na propriedade de certos materiais de emitirem luz visível, ou radiação ultravioleta, quando sobre eles incidem radiações ionizantes, as denominadas substâncias cintiladoras. A luz emitida por esses materiais pode ser processada e transformada em um sinal elétrico a fim de ser medida.

Um detector de cintilação é constituído por três partes fundamentais: a substância cintiladora, o acoplamento óptico e o tubo fotomultiplicador. A luz emitida pela substância cintiladora quando absorve a energia da radiação é transmitida pelo acoplamento óptico ao fotocátodo, recoberto por um material, geralmente um composto alcalino. O fotocátodo emite elétrons como efeito da absorção da energia do fóton de luz transmitido. Esses elétrons arrancados pelo fóton de cintilação são convertidos em correntes de elétrons após serem amplificados pelo tubo fotomultiplicador.

**Cintiladores ou substâncias luminescentes.** As energias liberadas pelas radiações incidentes ao interagirem com os átomos cintiladores causam transições eletrônicas e estados excitados diversos no material. O retorno desses átomos ao estado fundamental se faz pela emissão de fótons com energias características que constituem as cintilações. A desexcitação pela emissão de cintilação compete com outros mecanismos de dissipação de energia, como a geração de calor, que contribuam para que o rendimento do mecanismo de cintilação não ultrapasse, na maioria dos casos, um valor em torno de 12%. Preferentemente, o que se deseja nos cintiladores é que esse valor, denominado rendimento de conversão, seja o mais alto possível.

Além de oferecer um alto rendimento de conversão, um cintilador deve apresentar três requisitos básicos: a substância cintiladora deve ser transparente à luz da cintilação, o espectro de luz emitido deve corresponder a curva de sensibilidade espectral do fotomultiplicador e a cintilação produzida pela interação deve

decair rapidamente a fim de não permitir a manutenção de impulsos de detecção.

Existe uma grande variedade de substâncias luminescentes, como o antraceno, alguns plásticos, o sulfato de zinco em pó impregnado com átomos de prata (utilizado para a detecção de partículas alfa), o iodeto de sódio com impurezas de tálio e diversos cintiladores orgânicos.

**Cintilador sólido.** O cintilador sólido mais utilizado é o cristal de iodeto de sódio com impurezas de Tálcio por sua grande eficiência de conversão luminosa, ser possível a obtenção de cristais de grande transparência e ser suficientemente sensível para a detecção de fótons gama.

O inconveniente observado nos cristais cintiladores decorre do fato de os fótons emitidos na desexcitação terem energias suficientes para induzirem novas ionizações e, portanto, o cristal não é totalmente transparente a sua própria luz. Essa dificuldade é minimizada introduzindo-se na rede cristalina, em proporção muito pequena, um tipo de átomo diferente daqueles que constituem o cristal. Esse tipo de impureza introduzida na rede cristalina recebe o nome de ativador. No cristal ativado, a energia envolvida no processo de ionização é transferida, em um tempo muito curto, aos átomos do ativador que ficam excitados e quando decaem emitem fótons de energia para os quais o cristal é transparente. No iodeto de sódio, o ativador utilizado é o tálio, o que se indica com a denominação NaI(Tl). O tálio confere a esses cristais um espectro de emissão que se ajusta quase perfeitamente à curva de sensibilidade dos fotomultiplicadores padrão. Esse fato associado ao alto rendimento de conversão que apresentam e a grande eficiência de detecção para a radiação gama, favorecida por sua alta densidade e pela possibilidade de se dispor de cristais de grande tamanho, fazem do NaI(Tl) o cintilador inorgânico sólido mais utilizado.

As desvantagens do cristal de iodeto de sódio são a fragilidade e o caráter altamente higroscópico, o que exige cuidados especiais para protegê-lo. Quando umedecido, os cristais perdem a transparência e, para que isso não ocorra, são montados em um invólucro de alumínio hermeticamente selado, exceto na face de contato com os tubos fotomultiplicadores, onde são recobertos por uma janela de quartzo para permitir que os fótons de luz escapem e atinjam os fotomultiplicadores.

**Cintilador orgânico.** Nos cintiladores orgânicos, mesmo que alguns deles apresentem estrutura cristalina, esse fato não desempenha um papel fundamental. Nesses cintiladores, a emissão de luz é uma característica de suas moléculas, assim sendo, a cintilação ocorre em qualquer dos estados físicos. Nesses materiais, o estado energético de uma molécula está condicionado pelas transições eletrônicas e pelos modos de vibração da molécula. Nas substâncias orgânicas, os saltos energéticos entre estados de vibração molecular correspondem a valores muito menores que os saltos energéticos correspondentes a transições eletrônicas, por isso, cada estado de excitação eletrônica aparece desdobrado em uma série de subníveis muito próximos correspondentes aos diversos estados de vibração. Na maioria dos casos, a energia depositada pela radiação produz transições eletrônicas e excitação dos modos de vibração da molécula. A molécula excitada perde a energia de vibração sob a forma de calor, transmitindo-a para as moléculas vizinhas, para finalmente passar ao estado fundamental através da emissão de um fóton. Esse mecanismo possibilita que o material seja transparente a sua própria luz e, em algumas ocasiões, que essa luz tenha o espectro adequado para ser

detectada por um fotomultiplicador. Assim ocorre com o antraceno que é um excelente cintilador orgânico, embora não tenha o mesmo rendimento de conversão do NaI(Tl).

**Acoplamento óptico.** No processo de cintilação, os fótons de luz são emitidos em todas as direções, mas devem ser conduzidos até o fotocátodo do tubo fotomultiplicador. O cristal é opticamente acoplado ao fotocátodo por um guia de luz ou um tubo luminoso para assegurar a eficiência da coleta dos fótons de luz.

**Fotomultiplicador.** O fotomultiplicador é constituído pelo fotocátodo que funciona como célula fotoelétrica e uma série de eletrodos, denominados dinodos. Os fótons de luz emitidos pela substância cintiladora arrancam elétrons do fotocátodo que são atraídos pelo primeiro dinodo. Os dinodos são revestidos por material capaz de emitir elétrons em consequência do choque de elétrons. Os dinodos sucessivos estão submetidos a diferenças de voltagens crescentes, da ordem de 100 Volts entre dois dinodos consecutivos, com o objetivo de acelerar os elétrons provocando, nos choques sucessivos, o desprendimento de mais elétrons, o que produz um aumento considerável na quantidade de elétrons liberados dependendo do número de dinodos. O feixe de elétrons é coletado por um ânodo ou coletor do tubo fotomultiplicador. Para um tubo fotomultiplicador com 10 dinodos sequenciais é possível aumentar o número de elétrons até  $10^7$  vezes. O pulso elétrico resultante do tubo fotomultiplicador é processado posteriormente, para se determinar a energia da radiação incidente no cristal (análise da altura do pulso) ou para permitir a localização espacial do evento (análise de posição). O número de fótons liberados pelo cristal é proporcional à energia liberada pela radiação incidente no cristal. O número de elétrons deslocados no fotocátodo é proporcional ao número de fótons luminosos emitidos pelo cristal e a corrente elétrica gerada no fotomultiplicador. Assim, a altura do pulso elétrico proveniente da fotomultiplicadora é proporcional à energia da radiação absorvida pelo cristal, o que permite a discriminação entre fótons de energias diferentes pela análise da altura de pulso.

**Cintilador líquido.** A cintilação pode ser produzida em líquidos. As partículas beta são relativamente de baixas energias, tendo, portanto, pequeno poder de penetração. Assim, faz-se necessário um sistema de detecção de alta sensibilidade para contá-las eficientemente.

Os cintiladores líquidos são misturas constituídas por um solvente orgânico, substâncias cintiladoras e por um apagador ou extintor.

Os principais solventes utilizados são hidrocarbonetos aromáticos como o xileno, tolueno e o benzeno. No entanto, o caráter não polar desses solventes requer a adição de produtos polares para permitir a solubilização de amostras aquosas ou biológicas no líquido cintilador. Como aditivos são utilizados metanol, sulfóxido de dietil e o etilenoglicol.

Os cintiladores são moléculas orgânicas com configurações polibenzênicas adequadas. Um bom líquido cintilador deve apresentar valores elevados de eficiência quântica e do fator espectral, solubilidade suficiente com a amostra e uma baixa sensibilidade aos agentes extintores da luz. Os cintiladores mais utilizados são o 2,5-difenil oxazol (PPO) e seus derivados. Muitas misturas cintiladoras usam dois compostos fluorescentes, aquele com maior concentração é o cintilador primário e o outro o secundário. A função do cintilador secundário é mudar o comprimento de onda da luz que deve ser emitida pela solução cintiladora a fim de adequá-



lo às características físicas do fotocátodo, bem como do meio transparente que oclui a janela do tubo fotomultiplicador. Os cintiladores secundários apresentam as mesmas características dos cintiladores primários, exceto pelo fato de emitirem a fluorescência máxima na região de 415-430 nanômetros.

As substâncias apagadoras ou extintoras são capazes de inibir a produção de luz em um processo de cintilação. Nessas condições, a eficiência de contagem diminui proporcionalmente ao aumento da concentração do agente que a provoca. Como apagadores químicos são usados o oxigênio, a acetona e compostos halogenados (R-Cl, R-NH<sub>2</sub>).

A amostra radioativa a ser quantificada é dissolvida no líquido de cintilação contido em pequenos tubos que são colocados em frente a dois fotomultiplicadores dispostos em 180°. A substância mais abundante na mistura cintiladora é o solvente. Assim, quando a radiação interage com a solução, irá, preferencialmente, ionizar e excitar as moléculas do solvente, que por sua vez transferem o excesso de energia para moléculas vizinhas que, na maioria das vezes, são moléculas do solvente. No entanto, a grande quantidade de interações moleculares aumenta a chance de transferência da energia do solvente para uma molécula diferente. Quando a transferência se dá para uma molécula apagadora, a energia transferida é dissipada sob a forma de calor. No caso da energia ser transferida para uma molécula cintiladora, ela emitirá fótons de luz ultravioleta (UV). A presença no líquido de cintilação de uma substância cintiladora secundária permite a absorção dos fótons UV e a emissão de fótons de luz visível (de 400 a 500 nm) ajustando a emissão de luz à sensibilidade dos fotomultiplicadores que os convertem em pulsos elétricos a fim de que sejam registradas, como ocorre nos cintiladores sólidos. A presença de moléculas apagadoras no líquido de cintilação tem a função de absorver as radiações provenientes de moléculas excitadas do solvente, evitando assim um efeito de excitação em cascata, produzindo como consequência vários fótons de luz para cada radiação incidente.

Desse modo, o sistema apresenta uma grande geometria de detecção, devido a que o sistema detector visualiza a amostra radioativa em todos os ângulos possíveis, ficando minimizados os problemas de auto-absorção da radiação pela própria amostra ou sua absorção pelo ar e pela janela do detector, aumentando a eficiência de contagem das radiações emitidas pela amostra.

Assim sendo, esse sistema é utilizado para contar as fracas emissões do trítio (<sup>3</sup>H), carbono-14 (<sup>14</sup>C) e do enxofre-35 (<sup>35</sup>S). Pode, também, ser usado para a detecção de emissores alfa e gama, mas, nesse último caso, o rendimento de detecção é muito inferior aos anteriores. A enorme sensibilidade dos detectores de cintilação líquida converte essa técnica em uma ferramenta muito valiosa para fazer frente aos complicados problemas de análises de líquidos e amostras biológicas.

Os cintiladores líquidos são utilizados para a espectroscopia gama, embora estejam sendo progressivamente substituídos por detectores de semicondutores que, apesar de se mostrarem menos eficientes, permitem uma maior resolução de energia. São utilizados também para determinar a presença de radionuclídeos emissores gama em amostras ambientais e para a contagem de amostras marcadas em laboratórios de investigação e de Medicina Nuclear.

**Detectores de semicondutores.** Esses detectores são usados para a detecção tanto de fótons quanto de partículas carregadas eletricamente. A principal caracte-

rística desses detectores é a capacidade em diferenciar radiações de energias muito próximas, em razão da energia requerida para sensibilizar o sistema ser muito menor que a necessária para detectores convencionais.

Em um átomo isolado, onde os elétrons estão submetidos unicamente ao campo elétrico do núcleo, os níveis de energia correspondentes aos diversos estados são sempre simples.

Na estrutura dos cristais, devido à proximidade entre os átomos, as órbitas de diferentes átomos se superpõem parcialmente e interagem entre si de modo que os elétrons periféricos ou de valência estão submetidos à ação conjunta dos núcleos próximos organizados na rede cristalina. Isso faz com que os elétrons estejam confinados não em um nível de energia discreto, mas em toda uma faixa contínua formada por níveis de energia muito próximos, denominada banda de valência. Para liberar um elétron do seu confinamento na banda de valência deve-se ceder uma energia maior do que um determinado valor mínimo. Uma vez liberado, o elétron pode migrar pela rede cristalina com uma energia que também não é simples, mas que está compreendida dentro de uma faixa contínua ou banda de condução. A energia mínima necessária para um elétron passar da banda de valência para a banda de condução significa que há uma faixa contínua de energia entre o limite superior da banda de valência e o limite inferior da banda de condução. Essa faixa de energia recebe o nome de banda proibida porque os elétrons do meio não podem ter uma energia compreendida dentro de seus limites. O retorno de um elétron da banda de condução para a banda de valência ocorre através da emissão de fótons, cuja cintilação se caracterizará pela energia da banda proibida.

Nos condutores, as bandas de valência e de condução estão superpostas, permitindo aos elétrons grande mobilidade por uma banda de energia única apenas parcialmente cheia. Nos isolantes, a banda de valência está cheia e a de condução vazia, enquanto a banda intermediária proibida aos elétrons é muito ampla, sendo necessário um forte aumento de energia (da ordem de 7 elétrons-volt) para que um elétron salte de uma banda a outra.

Os semicondutores possuem disposições de bandas de energia semelhantes a dos isolantes, mas para um elétron saltar a banda proibida, a energia necessária é consideravelmente menor (da ordem de 1 elétron-volt). Os semicondutores são ditos intrínsecos quando conduzem corrente elétrica devido a sua própria estrutura atômica, como o germânio e o silício, e extrínsecos quando resultam da adição a um semicondutor intrínseco de átomos estranhos (impurezas) que aumentam a sua condutividade.

Nos semicondutores intrínsecos, quando um elétron salta da banda de valência para a de condução, passa a se comportar como um elétron livre de um condutor, enquanto que na banda de valência fica um vazio equivalente a uma carga elétrica positiva. O elétron livre responderá prontamente a uma diferença de potencial elétrico aplicada ao semicondutor, deslocando-se em sentido inverso ao do campo elétrico formado. Origina-se, sob a ação do campo elétrico, uma corrente de elétrons de valência, de modo que o vazio (e a carga elétrica positiva a ele ligada) se desloca na direção do campo elétrico.

Nos semicondutores extrínsecos, a adição de uma proporção finita de impurezas na rede de um cristal de silício ou de germânio altera a rede cristalina, processo denominado *doping*. As impurezas são átomos com cinco elétrons na

última camada, como o arsênio, antimônio, fósforo ou lítio, ou trivalentes como o boro, alumínio, gálio ou índio. Os átomos dopantes pentavalentes formam semicondutores do tipo n (negativo), por apresentar excesso de elétrons, sendo por esta razão denominados doadores. Quando o dopante é trivalente, o semicondutor é do tipo p (positivo), que tem excesso de vazios e, por isso, é um receptor de elétrons.

**Semicondutores como detectores de radiação.** Uma radiação ao atravessar um semicondutor, gera um par elétron-vazio. A produção desses pares pode ocorrer de forma direta ou indireta. No primeiro caso, ao longo da trajetória, a radiação vai transferindo parte de sua energia a elétrons situados na banda de valência que saltam a banda proibida e passam a ocupar um lugar na banda de condução, deixando um vazio correspondente na banda de valência. De forma indireta, a radiação incidente produz elétrons altamente energéticos (raios delta) que, em seguida, interagem com outros elétrons transferindo sua energia, provocando o salto entre bandas e a formação de pares de elétrons e vazios. Através da medida desses portadores de carga é possível detectar a passagem da radiação e em determinadas condições medir a sua energia.

**Detectores de junção pn.** A união de dois semicondutores de tipos p e n produz uma interface eletricamente carregada, em razão dos elétrons do semicondutor n migrarem para ocupar os vazios do semicondutor p. Esse fato determina uma diferença de potencial elétrico entre os semicondutores, ficando o semicondutor do tipo n positivo por haver perdido elétrons e o do tipo p negativo por haver recebido elétrons para ocupar as posições vazias. Os elétrons do semicondutor n não podem migrar para longe da junção pn em razão do campo elétrico gerado atraí-los para o lado original, limitando as camadas de semicondutores n e p que sofrem interações. Essas camadas são denominadas zonas de depleção ou de junção pn.

Quando uma radiação ionizante atravessa a junção pn, o equilíbrio elétrico é alterado, porque a radiação induz novos vazios ao produzir ionizações. Os elétrons e os vazios migram para os pólos atratores, gerando uma corrente transitória que pode ser detectada e contada.

Os detectores de germânio compensados com lítio – Ge(Li) – e de germânio intrínseco (HPGe) constituem a principal alternativa aos detectores de NaI(Tl) no campo da espectrometria da radiação gama. A utilização de um ou outro sistema detector depende do parâmetro que se considere mais importante, a resolução energética ou a eficiência de detecção, respectivamente.

**Sistemas de medidas de radiações.** Os sistemas de detecção de radiações anteriormente descritos são utilizados para avaliar a intensidade ou nível de radiação em um ambiente a cada instante. Podem ser usados como monitores fixos para o controle de uma área, estando os instrumentos de medição em uma sala de controle ou serem dotados de sistemas de alarme que permitem alertar, através de sinais acústicos ou luminosos, quando os níveis ambientais de radiação ultrapassam certos limites pré-fixados.

Como monitores portáteis, os detectores de radiação são usados para a busca de átomos radioativos no ambiente, a detecção de contaminações em superfícies ou utensílios contaminados ou prevenir a entrada de pessoas em lugares com níveis excessivos de radiação.

Outros dispositivos permitem medir a quantidade de radiação recebida por

profissionais expostos a radiações ionizantes em razão do seu trabalho durante determinados períodos de tempo, sendo, portanto, utilizados para dosimetria pessoal. Esses dispositivos são de pequeno porte e podem ser levados pelo usuário ou serem utilizados como monitores de área ou para dosimetria ambiental.

Os monitores fixos ou portáteis podem ser câmaras de ionização, dosímetros de filme fotográfico e dosímetros de termoluminescência.

**Dosímetro de bolso.** É uma pequena câmara de ionização utilizada para dosimetria pessoal a fim de se determinar a quantidade total de radiação recebida por pessoas expostas à radiações durante um determinado intervalo de tempo. Esse dosímetro de leitura direta consiste de pequena câmara em forma de caneta contendo como gás ar seco à pressão atmosférica e eletrodo de coleta especialmente adaptado. A adaptação consiste de uma fibra de quartzo revestida de ouro e ligada ao eletrodo. Quando o dosímetro é carregado por uma bateria a uma determinada tensão  $V_1$ , as forças eletrostáticas repelem a fibra de quartzo do eletrodo que se desloca até o zero de uma escala graduada, que pode ser observada através de um sistema de lentes. Quando exposto à radiação, os íons gerados no gás são coletados pelo eletrodo, reduzindo gradualmente a tensão original entre a fibra e o eletrodo e as forças eletrostáticas, fazendo a fibra voltar a sua posição original, deslocando na escala graduada que, em geral, varia de 0 a 200 miliRöntgens (mR) ou em Röntgens (R). Assim, a qualquer instante, o usuário do dosímetro pode conhecer a dose de radiação que está recendo durante a exposição.

**Detectores de termoluminescência (TLD).** Certas substâncias, como o fluoreto de lítio (LiF), fluoreto de cálcio ( $\text{CaF}_2$ ), sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ) e o alumínio fosfatado, todas ativadas com magnésio, quando expostas a radiações são capazes de armazenar a energia absorvida para, posteriormente, quando aquecidas a temperaturas entre 200 e 350° C emitirem uma quantidade de luz proporcional à dose de radiação recebida, fenômeno denominado termoluminescência.

Para a leitura da radiação absorvida, a substância termoluminescente é fixada em um pequeno cilindro metálico que é aquecido pela passagem da corrente elétrica. O aparelho de leitura é constituído pelo circuito de aquecimento do dosímetro, uma válvula fotomultiplicadora destinada a transformar a mais fraca quantidade de luz emitida em corrente elétrica e um circuito de medida de corrente. A leitura da dose recebida pelo dosímetro é mostrada em uma escala graduada em Röntgen ou miliRöntgen.

Vários dispositivos TLD podem ser utilizados em diversas aplicações particulares. O fluoreto de lítio (LiF) é sensível a nêutrons, enquanto outros como o sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ) não o são. O intervalo de dose para o fluoreto de lítio vai de 200 a 500  $\mu\text{Gy}$  e o fluoreto de cálcio ( $\text{CaF}_2$ ) de 0,5 a 100 Gy.

A dosimetria por termoluminescência tem como características:

1. Os dosímetros apresentam-se com uma grande variedade de geometrias: discos de 4,5 mm de diâmetro, paralelepípedos de 3,1 mm x 3,1 mm x 0,9 mm, cilindros de 1 mm de diâmetro, em forma de pó, o que facilita a sua colocação em locais de pequenas dimensões e de difícil acesso.
2. Os dosímetros são reutilizáveis após serem submetidos ao tratamento térmico para a leitura da dose recebida.
3. A eficiência de detecção depende da natureza do detector, do processo de leitura e do sistema dosimétrico.

4. O rendimento de detecção pode ser afetado pela história do dosímetro, umidade, exposição à luz, ao estado de pureza, etc.
5. A eficiência de detecção pode depender em alguns casos da taxa de exposição, do campo de radiação e apresentar uma supralinearidade para o caso de fortes doses acumuladas.
6. Para muitos materiais, a resposta termoluminescente dos dosímetros em função da energia da radiação ionizante não é constante. Em geral, para a radiação gama, a resposta é maior para fótons de menor energia que para aqueles de energia superior.

Esses detectores são úteis para:

1. Dosimetria pessoal. Indivíduos ocupacionalmente expostos podem levar vários dosímetros de termoluminescência para avaliar a dose de radiação recebida no corpo inteiro ou em áreas específicas como mãos, punhos e dedos. Os dosímetros integram a dose absorvida durante um determinado período de tempo, o que permite quantificar a dose recebida pelo usuário.
2. Medida de radiação ambiental.
3. Aplicações em radioterapia. Em razão de pequeno tamanho, os dosímetros de termoluminescência (TLD) podem ser utilizados para se determinar experimentalmente a dose absorvida em diferentes partes do corpo de pacientes a serem submetidos à radioterapia. Para isso são utilizados manequins ou phantoms que simulam os diversos órgãos e tecidos do corpo humano. Posicionados os TLD, os manequins são expostos às radiações, para, depois de lidos, aferir a quantidade de radiação que chega às diversas partes do manequim, permitindo ajustar adequadamente a dose de radiação a ser aplicada ao paciente.

**Detectores de filme fotográfico.** O filme fotográfico é amplamente utilizado como dosímetro pessoal. É constituído por um estojo plástico, dotado de janela, filtro metálico e de um ou mais receptáculos para pequenos filmes para raios X. Ao incidir no filme, a radiação ioniza os cristais de sais de prata da emulsão fotossensível, formando íons de prata. Para produzir essa reação química, a energia da radiação deve ser superior a um mínimo que depende das características físicas dos cristais. Radiações com energias inferiores ao valor mínimo não produzem nenhum tipo de sensibilização da película fotográfica. Assim sendo, o filme fotográfico pode ser exposto à luz vermelha em um quarto escuro sem que se produza a sua sensibilização.

O processo de revelação consiste em tratar o filme fotográfico sensibilizado pelas radiações com um agente químico redutor que converte os íons de prata em prata metálica, formando depósitos de cor negra onde a prata foi ionizada. Depois da etapa de revelação, a película é submetida a um banho a fim de deter o ataque químico, eliminar os sais de prata não revelados e fixar a prata metálica à película. No fim do processo, obtém-se manchas escuras correspondentes às áreas que receberam maior quantidade de radiação. Na leitura da dose acumulada, quantifica-se o grau de enegrecimento do filme, utilizando o densitômetro óptico, aparelho que determina a quantidade de luz que atravessa o filme revelado. A densidade óptica do filme sensibilizado é comparada com as densidades de filmes expostos a quantidades padronizadas de radiações. Normalmente, são colocados quatro filmes da mesma marca e remessa a diferentes distâncias de uma fonte padrão durante um determinado intervalo de tempo. Após as exposições, os filmes-

padrão são revelados juntamente com um filme virgem e com os filmes dosimétricos utilizados. O zero de densitômetro é ajustado com o filme virgem. As densidades dos filmes-padrão são utilizadas como valores de referência para a construção de curva-padrão, que relaciona as densidades ópticas às respectivas doses de radiações a que os filmes foram expostos em milisievert. Determinada a curva-padrão, faz-se a leitura da densidade dos filmes dosimétricos, cujos valores são levados ao gráfico, onde se determina para a densidade observada a correspondente dose de exposição.

Os dosímetros de filmes fotográficos devem ser usados na parte do corpo mais exposta à radiação, geralmente presos ao bolso do jaleco, sendo de uso pessoal e intransferível. Em geral, são utilizados durante um mês de trabalho e revelados mensalmente, embora possam ser lidos no instante em que se julgar necessário.

As vantagens do filme fotográfico são sua simplicidade e baixo custo, permitindo uma informação direta sem necessidade de nenhum tratamento adicional. Entre as desvantagens ressalta-se a sua saturação após receber uma certa dose, muito baixa eficiência e a falta de linearidade dose-resposta. Além disso, não oferece informação sobre a classe e a energia das radiações ionizantes, nem o instante em que elas foram produzidas.

# RADIOPROTEÇÃO

Com a utilização das radiações ionizantes em várias aplicações científicas tornou-se evidente seus efeitos tóxicos. Como consequência disso, houve a necessidade de se conhecer os efeitos radioinduzidos em um determinado meio e, em particular, sobre os tecidos dos organismos vivos. Da mesma forma, se fez necessário o desenvolvimento de instrumentos para a detecção e medida das radiações e se estabelecer normas de proteção dos organismos vivos contra os efeitos nocivos das radiações.

A proteção radiológica estuda os modos e condições, sejam tecnológicas ou administrativas, necessárias para a proteção dos organismos vivos dos efeitos das radiações.

Entre os organismos internacionais que se dedicam ao estudo da proteção radiológica destaca-se a "*International Commission on Radiological Protection*" (ICRP), em estudos sobre os efeitos biológicos das radiações ionizantes o "*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*" (UNSCEAR) e em magnitudes radiológicas, a "*International Commission on Radiation Units and Measurements*" (ICRU). Outros organismos que se dedicam à proteção radiológica são a Organização Mundial da Saúde (OMS) e o Organismo Internacional da Energia Atômica (OIEA).

No Brasil, o órgão responsável pelo controle de produção, transporte e utilização de radioisótopos e pela proteção radiológica é a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

**Normas de radioproteção.** A proteção radiológica estabelece normas de controle e proteção a serem aplicadas a pessoas que se expõem profissionalmente às radiações e medidas de segurança para a população em geral e o meio ambiente, destinadas a reduzir ou eliminar os riscos somáticos e genéticos da exposição às radiações ionizantes. É aplicada a todo tipo de instalação nuclear e radioativa, de investigação, de uso, armazenamento ou transporte e, em geral, a qualquer atividade que implique em risco derivado das radiações ionizantes. O não cumprimento das normas de radioproteção submete a um risco desnecessário, tanto as pessoas profissionalmente expostas às radiações ionizantes como ao público em geral. Os aspectos mais importantes dessas regras são estabelecer normas básicas para a proteção radiológica e estabelecer os limites de doses permitidos.

As normas de proteção radiológica classificam as pessoas em:

1. Indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE), entendido como pessoas que em virtude do seu trabalho estão submetidas a um risco de exposição às radiações ionizantes.
2. Indivíduos do público, ou seja, pessoas da população consideradas individualmente que não estão profissionalmente expostas.
3. População em geral, definido como a coletividade de pessoas profissionalmente expostas e os indivíduos do público.

**Limites individuais de doses.** A exposição normal de pessoas deve ser restrita de tal modo que nem a dose efetiva nem a dose equivalente em órgãos e tecidos causada pelas exposições às radiações excedam os limites de doses definidos na tabela 17.

Tabela 17. Limites anuais de doses para indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) e indivíduos do público (IP), considerado como dose no ano calendário.

Grandeza	Órgão	IOE	IP
Dose efetiva <sup>(1)</sup>	Corpo inteiro	20 mSv <sup>(2)</sup>	1 mSv <sup>(3)</sup>
Dose equivalente	Cristalino	150 mSv	15 mSv
	Pele <sup>(4)</sup>	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	-

Fonte: Comissão Nacional de Energia Nuclear. Norma CNEN-NN-3.01: Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica, 2005.

<sup>(1)</sup> Dose efetiva equivale à soma das doses efetivas causadas por exposições externas.

<sup>(2)</sup> Média ponderada em 5 (cinco) anos consecutivos desde que não se exceda 5 mSv em 1 (um) ano.

<sup>(3)</sup> Pode ser autorizado um valor de dose efetiva de 5 (cinco) mSv em 1 (um) ano desde que a dose efetiva média em 5 anos consecutivos não exceda 1 (um) mSv.

<sup>(4)</sup> Valor médio em 1 cm<sup>2</sup> de área na região mais irradiada.

Para mulheres grávidas, em condições de trabalho, suas tarefas devem ser controladas de maneira que seja improvável que, a partir da notificação da gravidez, o feto receba dose efetiva superior a 1 mSv durante o resto do período da gravidez.

Pessoas menores de 18 anos não podem estar sujeitas a exposições ocupacionais.

Para o cálculo dos limites de doses estabelecidas não se aplicam as exposições médicas, de acompanhantes e voluntários que eventualmente assistam pacientes. As doses devem ser restritas de forma que seja improvável que alguns desses acompanhantes recebam mais de 5 mSv durante o período do exame ou do tratamento. A dose de crianças em visita a pacientes deve ser restrita de modo que seja improvável exceder a 1 mSv.

### **Medidas fundamentais de vigilância para proteção radiológica de pessoas.**

Várias práticas médicas envolvem o uso de radiações ionizantes como exames radiológicos, medicina nuclear e radioterapia. Nessas atividades participam profissionais médicos, de enfermagem, físicos e técnicos diversos. Para a realização de procedimentos que envolvam o uso de radiações ionizantes são imprescindíveis determinados requisitos para a proteção de indivíduos ocupacionalmente expostos, pacientes e acompanhantes:

1. Incluir margens de segurança suficientes para garantir um desempenho seguro durante os procedimentos atendendo à prevenção de acidentes.
2. As fontes de radiação e as instalações devem ser mantidas em condições de segurança para prevenir roubos, avarias e ações de pessoas não autorizadas. O sistema de segurança e proteção utilizado de ser diretamente proporcional a intensidade e a probabilidade das exposições potenciais envolvidas.
3. Para a realização de práticas que utilizem fontes de radiação, toda pessoa física ou jurídica deve obter junto a CNEN a licença ou autorização pertinente.
4. As pessoas responsáveis pela implementação de medidas técnicas e organizacionais que garantam a segurança das fontes e a proteção radiológica de pessoas em exposições ocupacionais, médicas e do público devem estar devidamente habilitadas pela CNEN.
5. Dentro da estrutura responsável pela proteção radiológica, de acordo com o porte da instalação, deve contar com, pelo menos, um profissional habilitado pela CNEN como supervisor de proteção radiológica.

Ao supervisor de proteção radiológica cabe planejar, implantar e supervisionar as atividades de radioproteção a fim de garantir o cumprimento dos requisitos



de proteção radiológica.

As exposições médicas dos pacientes devem estar justificadas ponderando-se os benefícios diagnósticos e terapêuticos em relação ao dano potencial correspondente.

Em relação às exposições causadas por uma determinada fonte de radiação associada a uma atividade prática, exceto em exposições médicas, a proteção radiológica deve ser otimizada de modo que a magnitude das doses individuais, o número de pessoas expostas e a probabilidade da ocorrência de exposições mantenham-se tão baixa quanto possível.

Para as análises relativas à proteção radiológica e a segurança das fontes de radiação associadas às práticas devem ser identificadas as situações em que possam ocorrer exposições normais ou potenciais de pessoas às emissões das fontes de radiação e determinar a intensidade das exposições normais e estimar os valores das exposições potenciais. Para a monitoração radiológica e a medição dos parâmetros necessários devem estar disponíveis procedimentos e equipamentos para a adequada medida das radiações. Esses instrumentos devem estar corretamente guardados e, periodicamente, testados e calibrados.

Os indivíduos ocupacionalmente expostos devem seguir normas e procedimentos de segurança e proteção radiológica, incluindo a participação em treinamentos que os capacite ao trabalho. As mulheres ocupacionalmente expostas devem comunicar imediatamente aos responsáveis pela segurança radiológica ao tomar conhecimento da gravidez. A gravidez não deve ser motivo para excluir a profissional do trabalho com radiação, mas medidas de proteção devem ser asseguradas evitando os seus efeitos nocivos sobre os embriões e fetos.

**Proteção da exposição.** Para melhor vigilância e controle objetivando a proteção de exposição de indivíduos ocupacionalmente expostos, as áreas de trabalho com fontes de radiação devem ser classificadas em áreas controladas, áreas supervisionadas e áreas livres. Nas áreas controladas faz-se necessário a adoção de medidas específicas de proteção e segurança para garantir que as exposições ocupacionais normais estejam limitadas e para prevenir e reduzir a intensidade das exposições potenciais. As áreas supervisionadas não requerem a adoção de medidas específicas de proteção e segurança, mas onde as condições de exposições ocupacionais devem ser reavaliadas regularmente.

As áreas controladas devem estar delimitadas adequadamente e sinalizadas com o símbolo internacional de radiação ionizante, acompanhado de texto descritivo, de modo que fique explícito o risco potencial de exposição existente em cada uma delas. O acesso a essas áreas deve ser permitido somente a pessoas autorizadas.

As áreas supervisionadas devem ter seus acessos identificados.

**Monitoração de exposição.** Toda atividade que envolva o uso de radiações ionizantes exige a implementação de um programa de monitoração individual e de área, levando-se em conta a natureza e a intensidade das exposições normais e os riscos potenciais previstos. As doses recebidas por indivíduos expostos a radiações ionizantes em condições habituais de trabalho devem ser determinadas mensalmente por meio de dosímetros pessoais ou de área. Caso exista o risco de que alguma parte do seu corpo possa receber doses superiores a que recebe a totalidade do mesmo, deve ser usado, além do dosímetro pessoal, dosímetros nas partes

potencialmente afetadas para avaliar adequadamente as doses locais de exposição.

No caso de uma exposição acidental, devem ser realizadas medidas ou análises pertinentes para avaliar as doses correspondentes.

As doses recebidas durante a vida laboral de indivíduos expostos profissionalmente às radiações ionizantes devem ser registradas em um dossiê dosimétrico individual que estará a todo o momento disponível no Serviço de Proteção Radiológica para conhecimento do trabalhador e pelos órgãos de fiscalização (Agência Estadual de Vigilância Sanitária – AGEVISA e Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN). As doses recebidas em exposições excepcionais constarão nesse dossiê de modo independente.

Os indivíduos ocupacionalmente expostos que trabalham em mais de uma instalação ou serviço estão obrigados a comunicar essa circunstância ao Serviço de Proteção Radiológica em cada um dos locais de trabalho com o objetivo de que, em cada um deles, conste atualizado e completo seu histórico dosimétrico.

Outros profissionais que trabalham em instalações que operam fontes de radiação, mas que não lidam diretamente com elas, como recepcionistas e vigilantes, a avaliação da exposição ocupacional deve ter como base os resultados da monitoração da área onde suas atividades são desenvolvidas.

**Vigilância médica.** Toda pessoa que vai assumir um posto de trabalho que implique risco de exposição às radiações ionizantes deverá se submeter a um programa de saúde ocupacional, para a avaliação inicial e periódica do seu estado de saúde. Devem ser realizados exames para avaliação inicial da saúde e visitas médicas periódicas pelo menos uma vez por ano. Caso necessário, realizar-se-ão visitas médicas eventuais adicionais. Todo indivíduo profissionalmente exposto terá um prontuário médico onde constarão os resultados dos exames médicos realizados, os registros de exposição individual, incluindo informações sobre a natureza geral do trabalho que realiza. Esse prontuário estará sempre à disposição do trabalhador e das autoridades competentes para a fiscalização de suas atividades.

Os registros de doses devem ser preservados até que os indivíduos atinjam a idade de 75 anos ou, pelo menos, 30 anos após o encerramento de suas ocupações, mesmo já falecidos.

**Exposição médica.** Menores de 16 anos não devem ter acesso às áreas controladas das instalações, exceto no caso de exposição médica. As visitas a instalações que operam radiações ionizantes são somente permitidas a pessoas devidamente acompanhadas por técnico habilitado.

As exposições médicas a radiações ionizantes para fins de diagnóstico e tratamento de pacientes só devem ser realizadas sob prescrição médica. Os procedimentos técnicos devem ser realizados por equipe médica habilitada, com qualificação legalmente reconhecida para o uso médico de fontes de radiações ionizantes, por pessoal técnico treinado e supervisionados por profissionais habilitados. Os equipamentos devem estar submetidos a um programa de garantia de qualidade para as exposições médicas. Os controles de qualidade devem ser realizados ou supervisionados por especialistas para a calibração dos feixes e das fontes de radiação, a dosimetria clínica e os testes de qualidade. Deve-se assegurar que os equipamentos usados para calibrar fontes de radiação em exposição médica sejam rastreados por laboratório padrão de dosimetria.

A exposição de acompanhantes que assistam pacientes submetidos a procedimentos de diagnóstico e tratamento deve ser restrita.

Cabe aos profissionais responsáveis pela proteção radiológica tomar as medidas necessárias para prevenir erros e falhas, ou minimizar as suas consequências, selecionando os procedimentos adequados para a prática, considerando os aspectos de segurança e proteção radiológicas. Devem ser evitados erros acidentais que envolvam exposições médicas, que serão investigadas e tomadas medidas preventivas quanto à recorrência desses acidentes.

**Exposição do público.** Medidas de segurança devem ser implementadas visando a proteção radiológica dos indivíduos do público, cuja exposição seja atribuível a fontes de radiação considerando as restrições de dose para o grupo crítico. Deve-se garantir a segurança das fontes de radiação, a prevenção de erros que resultariam em exposições acidentais, restringir a exposição em áreas de acesso público das instalações e evitar que os materiais radioativos provenientes de práticas médicas sejam liberados no meio ambiente.

**Meios de exposição às radiações.** Do ponto de vista da proteção radiológica é interessante distinguir entre irradiação interna e externa. A irradiação externa corresponde à exposição de pessoas a doses de radiação desde o exterior, enquanto que a irradiação interna se refere à produção de dose devido a uma fonte radioativa que se encontra no interior do organismo ou em contato com ele. O tipo de risco gerado e as medidas de proteção a serem implementadas serão diferentes em cada caso.

**Risco de irradiação externa.** O risco de irradiação externa é produzido por fontes de radiação X e de radionuclídeos emissores de radiação gama em razão do grande poder de penetração dessas radiações. As radiações alfa devido a seu pequeno poder de penetração não constituem risco como fonte externa de irradiação. No caso das radiações beta de energia menor que 2 MeV o maior dano se limita à pele ou tecidos subjacentes.

Os métodos básicos de radioproteção para irradiação externa são distância, tempo e blindagem.

**Distância.** A taxa de dose diminui como função inversa ao quadrado da distância a que se encontra da fonte emissora de radiação. Dessa forma, se a um metro de distância de uma fonte uma pessoa estivesse exposta a uma taxa de dose equivalente de 120 mSv por hora, a dois metros a dose seria de  $120/2^2 = 30$  mSv/h e a três metros de  $100/3^2 = 13,3$  mSv/h. O exemplo mostra a importância de nos afastarmos a maior distância possível quando diante de fontes de irradiação externa.

**Tempo.** A dose equivalente recebida é diretamente proporcional ao tempo de exposição. Se em uma hora, uma pessoa recebe 120 mSv, com a mesma taxa de dose, em meia hora receberá 60 mSv e em 15 minutos, 30 mSv.

**Blindagem.** As radiações ionizantes ao atravessar a matéria perdem intensidade. Esse é o princípio em que se baseia a blindagem e telas protetoras contra as radiações ionizantes. A atenuação que sofre a radiação depende de suas características e energia e da natureza do material absorvente. Para um material absorvedor de uma determinada espessura, colocado entre o feixe de radiação e um detector, será registrada uma redução na intensidade da radiação devido a interação de alguns fótons com os átomos do material.

As partículas alfa são bloqueadas facilmente, inclusive por uma folha de papel. As partículas beta necessitam filtros de alumínio, para as de grande energia devem ser usados filtros de chumbo de alguns milímetros, enquanto as radiações gama e X necessitam filtros mais espessos. Quando a energia das partículas beta supera 2 MeV, não se deve usar como meio absorvedor material de elevado número atômico, a não ser que seja revestido por substância de baixo número atômico, para se evitar a produção de radiação X de frenado. Para as radiações X e  $\gamma$  devem ser usados materiais de grande densidade e número atômico, como as barreiras de chumbo.

Assim sendo, podemos definir como regras gerais de Proteção Radiológica contra fontes externas de radiação:

1. Permanecer o mais distante possível das fontes de radiação ionizante.
2. Reduzir o tempo de exposição ao mínimo possível.
3. Interpor barreiras adequadas entre as pessoas e as fontes de radiação.

**Risco de irradiação interna.** As principais vias de incorporação de um radionuclídeo ao organismo são: 1) a inalação de gases ou aerossóis radioativos, 2) a ingestão de alimentos contaminados, e 3) o contato com materiais ou superfícies contaminadas.

Nesse caso, o risco radiológico será maior para as fontes de radiação alfa devido ao grande poder ionizante dessas radiações, seguido pelo das radiações beta. As regras básicas de proteção para a radiação externa não podem ser aplicadas para a irradiação interna. As pessoas que manipulam fontes radioativas não encapsuladas devem se prevenir contra: 1) ingestão ou inalação de substâncias radioativas, 2) contaminação da pele, dos utensílios e das superfícies das bancadas e, 3) exposição do corpo a fontes de radiações beta e  $\gamma$ . Quanto a possibilidade de inalação, se existirem gases radioativos ou material pulverizado, devem ser manipulados em lugares adequados como capelas com sistema de extração de ar dotados de filtro. Quando o manuseio de fontes emissoras de radiação beta deve ser feito diretamente, utiliza-se câmara de luvas.

O levantamento radiométrico de instalações radioativas deve ser realizado diariamente no fim do período de trabalho por pessoa responsável, devendo fazer as devidas anotações em planilha própria.

As regras de Proteção Sanitária contra radiações ionizantes estabelecem limites anuais expressos em unidades de atividade (Becquerel) para a incorporação de substâncias radioativas ao organismo, tanto por inalação quanto por ingestão. Esses limites variam segundo a radiotoxicidade do radionuclídeo.

**Proteção radiológica do paciente.** A avaliação dos riscos e a proteção do paciente baseiam-se em princípios gerais que consistem em decidir a adequação da exploração ou tratamento com base em uma análise de risco-benefício que envolve a sua prescrição. Nessas considerações entram parâmetros como:

- 1) risco da técnica de exame ou tratamento.
- 2) risco de outras técnicas ou tratamentos alternativos.
- 3) risco da própria doença.
- 4) a idade e o sexo do paciente.
- 5) as possíveis consequências caso o exame ou tratamento não seja realizado.

Deve-se considerar qual é a técnica de exame ou tratamento mais adequado. Quando o procedimento exige a utilização de átomos radioativos, que radionu-

clídeo deve ser empregado e em que atividade. A esse respeito, dispõe-se de estimativas sobre a dose que cada radionuclídeo comporta para cada órgão e para o corpo inteiro, segundo a substância a que esteja ligado. Esses dados são obtidos por método de cálculo, considerando o organismo dividido em compartimentos e qualificando as transferências de tais substâncias entre esses compartimentos. Por sua vez, esses estudos levam em consideração a forma física e química, o tempo de meia-vida físico e biológico e o tipo e a energia da radiação.

Para as técnicas de exploração atuais, o radionuclídeo mais utilizado é o tecnécio-99m, que além de poder marcar diversas moléculas, é emissor de radiação gama pura de 140 keV de energia e a dose que se deposita no local de acumulação é menor, além de ter um tempo de meia-vida curto (6 horas). Como consequência disso, pode-se utilizar doses mais altas (várias centenas de MBq ou vários mCi), o que supõe uma melhor qualidade das imagens em menor tempo de aquisição, mas influi na quantidade a ser administrada, a dose que possam receber os outros pacientes na sala de espera, principalmente nos casos que necessitam a administração de atividades elevadas da ordem de 0,4 a 0,8 GBq (aproximadamente 10 a 20 mCi). A esse respeito, é importante dispor de um bom planejamento no que se refere a chegada de pacientes ao serviço de medicina nuclear, especialmente daqueles que necessitam de uma atividade média elevada e de um tempo de espera longo antes de começar a exploração, como em casos de estudo de perfusão cerebral e cintilografia óssea.

**Indivíduos ocupacionalmente expostos.** Em serviços de medicina nuclear são manipuladas fontes não encapsuladas (líquidos, vapores ou gases radioativos) expondo ao risco radiológico de irradiação externa e de contaminação superficial e interna.

Os riscos de irradiação por fontes externas de radiação podem ser reduzidos observando-se as normas de radioproteção, ou seja, mantendo-se afastado da fonte de radiação, encurtando o tempo de exposição e interpondo blindagens ou barreiras entre a pessoa e a fonte.

Quanto à contaminação deve ser evitada impedindo que a substância radioativa entre em contato físico com a pessoa ou que possa chegar a penetrar nela. Para isso, faz-se necessário o confinamento do material radioativo em recipientes, limitando ou impedindo possíveis escapamentos.

Quanto às regras gerais para a proteção de indivíduos ocupacionalmente expostos vale salientar:

**Combate ao risco de irradiação externa.** Deve-se fazer a diferença entre a irradiação que afeta a totalidade ou grande parte do organismo (irradiação de corpo inteiro) daquela que afeta fundamentalmente a partes muito localizadas expostas às radiações. As irradiações localizadas ocorrem em determinadas manipulações quando, principalmente, mãos e antebraços, permanecem próximos de fontes de radiação sem a devida proteção.

As zonas do laboratório onde existe maior risco potencial de exposição a doses por irradiação externa são aquelas onde há uma maior atividade de material radioativo emissor gama. Fontes radioativas de atividades elevadas devem ser protegidas por blindagens exceto no momento da manipulação. Em geral, a dose recebida no corpo inteiro só é significativa quando se manipula atividades da ordem de GBq ou maiores (dezenas de mCi ou maiores). As medidas de proteção são:

1. Blindar as fontes radioativas.
2. Guardar as fontes radioativas que estejam em uso em recintos de manipulação blindados. A espessura dos materiais de blindagem deve ser dimensionada em função da quantidade e tipo de material radioativo a ser armazenado, das distâncias a que se pode situar o pessoal e o tempo de permanência.
3. A exposição do corpo inteiro pode ser produzida durante a permanência do pessoal nas proximidades dos pacientes que receberam doses elevadas de tecnécio-99m. O procedimento de radioproteção é de permanecer o menor tempo possível e considerar a quantidade de exames quando riscos são elevados.
4. Para estudos *in vitro* a dose sobre o corpo inteiro por irradiação externa é desprezível devido a baixas atividades manipuladas.

**Combate ao risco de exposições localizadas.** Basicamente, refere-se ao caso das mãos durante a manipulação de substâncias radioativas. Para minimizá-lo, faz-se necessário:

1. Manter as fontes radioativas em proteções blindadas.
2. Utilizar seringas com proteção de chumbo.
3. Para estudos *in vitro*, a exposição local à radiação externa é a mais relevante devido a manipulação direta de fontes radioativas com as mãos sem proteção.
4. Usar equipamentos de proteção individual como aventais de chumbo, protetores de tireóide e óculos plumbificados.

**Combate ao risco de contaminação.** A contaminação ocorre quando existe contato entre a substância radioativa e a pessoa. O risco radiológico dependerá da via de acesso: ingestão, inalação, contato com feridas ou com a pele e mucosas.

Como fontes de irradiação externa, devido ao pequeno poder de penetração, as radiações alfa não constituem perigo e as radiações beta de energia menor que 2 MeV causam danos limitados à pele e tecidos subjacentes, mas, se ingeridos ou inalados, o contato direto com os tecidos provocam danos celulares mais intensos (radiação alfa) e mais extenso (radiações beta) em razão do maior poder ionizante, especialmente as radiações alfa.

A ingestão pode ocorrer ao comer, beber, fumar ou, de maneira indireta, através das mãos, roupas ou objetos contaminados. Gases ou vapores podem ser inalados. Todas as medidas de proteção são orientadas para se evitar a contaminação interna e externa. Os requisitos de radioproteção são:

1. Não se deve comer, beber ou fumar em ambientes onde são armazenadas e manipuladas fontes radioativas.
2. Não pipetar diretamente com a boca substâncias radioativas líquidas. Utilizar sempre pipetas automáticas.
3. Verificar a possibilidade de contaminação das mãos, roupas, objetos ao final da jornada de trabalho ou, a qualquer momento, na suspeita de contaminação usando detectores apropriados.
4. Ao manipular fontes radioativas, usar sempre equipamentos de proteção individual como luvas de látex descartáveis e aventais de mangas compridas e punho cirúrgico. Não tocar maçanetas, instrumentos, objetos e partes do corpo com as luvas.
5. Manter recipientes e seringas que contenham substâncias radioativas líquidas bem acondicionados e protegidos. O transporte deve ser realizado em bandejas, recipientes de chumbo (para radionuclídeos emissores gama) e recipientes de plás-

tico (para emissores beta).

6. As bancadas e superfícies utilizadas durante o manuseio de fontes radioativas devem ser de materiais de fácil descontaminação. As superfícies não podem ser revestidas de materiais porosos ou apresentar juntas, fendas e suas bordas devem ser arredondadas. As torneiras devem ser acionadas usando o cotovelo. A manipulação de líquidos será realizada sobre bandejas de inox recobertas por papel de filtro.

7. Quanto à possibilidade de contaminação por inalação de gases radioativos, as manipulações de substâncias voláteis ( $I^{125}$ ,  $I^{131}$ ,  $H^3$ ,  $C^{14}$ ) devem ocorrer em câmaras com sistema de exaustão com filtros, manter os recipientes fechados e ambientes bem ventilados.

**Resíduos radioativos.** A utilização de fontes radioativas em laboratórios de medicina nuclear provoca a contaminação de utensílios e materiais diversos, incluindo recipientes, vidros, tubos de ensaio, seringas e materiais sólidos como luvas, papéis absorventes, etc. Os pacientes que receberam substâncias radioativas para fins de diagnóstico ou tratamento podem eliminá-las através da urina e, em menor grau, pela saliva e fezes. Todos esses materiais e fluidos biológicos contaminados, denominados resíduos radioativos, devem ser tratados com extremo rigor a fim de se evitar os riscos de irradiação externa e de contaminação de pessoas e do meio ambiente.

O gerenciamento de resíduos radioativos é uma questão importante exigindo-se o cumprimento das normas de segurança, Norma CNEN-NE-6.05, que define os processos de coleta, armazenamento e liberação dos rejeitos radioativos.

Os resíduos radioativos devem ser coletados em recipientes específicos de acordo com o tipo de material contaminado no mesmo local onde são produzidos, identificados convenientemente e armazenados. Exige-se controle rigoroso do pessoal designado para o manuseio, retirada e transporte dos resíduos do laboratório ou serviço que os produzem.

**Resíduos sólidos.** Os resíduos sólidos são armazenados em local adequado e determinado para esse fim durante o tempo necessário para que as atividades dos radionuclídeos contaminantes alcancem níveis suficientemente baixos para serem tratados como lixo hospitalar comum. O tempo de armazenamento do resíduo radioativo depende do tempo de meia-vida física do radionuclídeo e da atividade radioativa. Assim sendo, os resíduos radioativos devem ser convenientemente identificados (tipo de radionuclídeo, material contaminado e data da contaminação) e acondicionados, requerendo um controle rigoroso a fim de garantir uma baixa atividade específica ( $7,4 \times 10^4$  Bq/kg ou  $2 \mu\text{Ci/kg}$ ) no momento da retirada e transporte desses resíduos, de acordo com os limites definidos na Norma CNEN-NE-6.02.

Os resíduos sólidos consistem em recipientes, seringas, tubos de ensaio, algodões, papéis absorventes, luvas, geradores de tecnécio-99m e roupas de cama, pijama, lençóis e outros objetos possivelmente contaminados.

**Resíduos líquidos.** Todos os resíduos líquidos produzidos podem ser escoados pela rede de esgoto sanitário, de modo lento e controlado permitindo uma adequada diluição, transcorrido o tempo de armazenamento suficiente em função do decaimento físico dos radionuclídeos.

**Resíduos gasosos.** Utilizando-se sistemas de ventilação e renovação do ar nos diferentes ambientes de trabalho consegue-se que a atividade incorporada por via

inalatória seja frações de poucas unidades por cento de limite estabelecido para o pessoal ocupacionalmente exposto. Quanto à liberação do ar contaminado para a atmosfera, devemos considerar os fatores de diluição e os limites de inalação para os indivíduos do público. Caso necessário, serão utilizados filtros nos sistemas de ventilação para reter radionuclídeos e aerossóis reduzindo a atividade liberada na atmosfera. Esses filtros devem ser tratados como resíduos sólidos.



# APLICAÇÕES DAS RADIAÇÕES IONIZANTES EM SAÚDE

**Radiologia.** Os raios X são amplamente utilizados para fins de diagnóstico e tratamento em Medicina.

Para fins de diagnóstico, os raios X são empregados para a obtenção de imagens, utilizando as técnicas da radiografia, radioscopia e da tomografia computadorizada.

**Radiografia.** Para a obtenção da imagem radiográfica utilizam-se fótons X de penetração média, geradas por uma diferença de potencial de 50 a 100 kV, e com corrente elétrica de 10 a 30 mA de intensidade. A impressão de imagem é realizada sobre um filme radiográfico.

O filme radiográfico é composto por uma base plástica, poliéster transparente ou tiacetato, com suas faces impregnadas por uma camada fotossensível ou emulsão, constituída por sais de prata, brometo de prata (90 a 99%) e iodeto de prata (10 a 1%). A qualidade da imagem radiográfica depende da espessura da camada fotossensível, do tamanho e da densidade dos grãos fotossensíveis. Quanto menor for a espessura da emulsão, o tamanho e a densidade dos grãos fotossensíveis, maior será a resolução obtida na imagem. A superfície da camada fotossensível é protegida contra danos mecânicos por uma fina camada de gelatina.

Até alcançar o filme radiográfico, os raios X atravessam diversos meios:

1. Parede do tubo gerador de raios X.
2. Filtros metálicos interpostos no trajeto dos raios X.
3. Estruturas biológicas do paciente.
4. Écrans reforçadores.

As interações dos raios X com todos esses meios, principalmente, nas estruturas biológicas do paciente, alteram o feixe de radiação primário e produzem radiações X secundárias, que podem sensibilizar o filme radiográfico e prejudicar a qualidade da imagem. Para atenuá-las são utilizados meios de restrição, a saber:

1. Diafragmas, cilindros e colimadores. Esses elementos têm como finalidade evitar grande dispersão do feixe de radiação e eliminar radiações secundárias originadas nas paredes de vidro do tubo gerador. Os diafragmas são lâminas de chumbo com orifícios em seus centros. Esses dispositivos são baratos, mas produzem, de modo indesejável, grande área de penumbra. Os cones e cilindros permitem restrições mais eficientes que os diafragmas, delimitam melhor o feixe de raios X e proporcionam uma menor zona de penumbra. No entanto, os melhores restritores são os colimadores, que são constituídos por placas de chumbo que podem ser movidas como um obturador de máquina fotográfica, dessa forma, é possível delimitar um campo retangular para a exposição aos raios X. Os colimadores produzem uma área de penumbra quase nula e são dotados de um sistema de iluminação próprio que permite a visualização da área a ser exposta aos raios X.

2. Grades radiográficas. As grades radiográficas são utilizadas para dificultar a chegada de radiação X secundária gerada pelo próprio paciente ao filme fotográfico. As grades radiológicas são constituídas por um sistema de lâminas de chumbo, separadas por espaçadores transparentes aos raios X, cujas fendas estão direcionadas a fonte de radiação X. A grade é colocada entre a estrutura a ser

radiografada e o filme radiográfico. Os raios X que incidem perpendicularmente às fendas atravessam a grade e alcançam o filme radiográfico. Os raios X secundários por terem direções aleatórias são retidos pelo chumbo não sensibilizando o filme, reduzindo ou eliminando os seus efeitos prejudiciais sobre a qualidade da imagem produzida.

3. **Écrans de intensificação.** Para a obtenção de imagens, os filmes radiográficos podem ser expostos diretamente aos raios X, no entanto, a sensibilidade da emulsão à ação direta da radiação X é baixa. Os écrans convertem os fótons de radiação X em fótons de luz visível (com comprimentos de onda entre 350 e 580 nm) que impressionam o filme radiográfico com maior eficiência e podem multiplicar a quantidade de fótons recebidos, de modo que para cada fóton X incidente, os écrans emitem milhares de fótons de luz. Considerando que o filme radiográfico é mais sensível à luz que aos fótons X, os écrans reforçam a impressão das imagens no filme radiográfico.

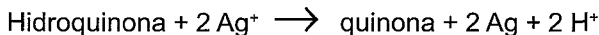
**Imagem radiográfica.** A imagem radiográfica é formada por áreas mais enegrecidas onde o filme radiográfico foi mais sensibilizado pela radiação X, em contraste com áreas mais ou menos transparentes onde o filme foi sensibilizado por diversas intensidades pela radiação. O grau de enegrecimento do filme radiográfico é denominado densidade.

Em uma radiografia, a imagem é obtida em razão da quantidade de prata precipitada ser diferente em cada ponto do filme radiográfico. A incidência de maior quantidade de radiação sobre a camada fotossensível do filme desorganiza e precipita uma maior quantidade de sais de prata em determinada área. O processo de revelação transforma a prata precipitada em prata metálica, que sendo preta escurecerá a área da placa. Por outro lado, quando uma área não recebe radiação, nenhuma prata é precipitada. A revelação química dissolve os cristais de prata ficando a área transparente. Portanto, diferentes graus de precipitação de prata produzirão tonalidades de cinza entre o negro e o transparente máximo.

A observação da imagem radiológica deve ser feita colocando o filme sobre um fundo iluminado, as áreas negras não permitirão a passagem da luz, enquanto nas áreas mais ou menos transparentes a luz passará em graus variados de intensidade. As áreas claras correspondem a estruturas do paciente de maior poder de atenuação, por isso, os ossos são vistos brancos na imagem radiográfica.

**Revelação do filme radiográfico.** No processo de revelação do filme radiográfico são utilizadas substâncias redutoras, como a hidroquinona, que reagem com os íons de prata. Na reação, as moléculas de hidroquinona cedem elétrons para os íons de prata, neutralizando-os, produzindo prata metálica, de acordo com a reação:

pH alcalino



Toda a prata que não foi reduzida pelo revelador acaba sendo removida pela solução fixadora, feita à base de tiosulfato de sódio ou de amônio, de acordo com a reação:



Na emulsão fotossensível, a hidroquinona reage com os íons de prata e com os sais de prata não-sensibilizados, no entanto, a reação química com os sais

de prata não-sensibilizados é lenta. Assim sendo, controlando-se o tempo de reação, é possível revelar as áreas mais ou menos sensibilizadas pela luz.

**Contraste.** Na imagem radiológica, para uma estrutura anatômica ser identificada é necessário que possua bom contraste. Entende-se por contraste (C) de um objeto em relação às áreas vizinhas o quociente entre as intensidades das radiações que atravessam o objeto ( $I_v$ ) e as áreas vizinhas ( $I_o$ ).

$$C = I_v / I_o$$

O contraste depende de vários fatores:

1. Qualidade da radiação X. A qualidade dos raios X depende da quantidade e da capacidade de penetração dos fótons X produzidos pelo tubo gerador. Faz-se necessário boa capacidade de penetração nos tecidos para a sensibilização eficiente do filme radiográfico.
2. Tempo de exposição do filme radiográfico. O produto miliamperagem x tempo de exposição determina a quantidade de ionização necessária para impressionar o filme radiográfico.
3. Distância entre o tubo gerador e o objeto radiografado.
4. Capacidade de atenuação do corpo examinado que depende diretamente do número atômico e do número de átomos que compõem o corpo e a sua espessura.
5. Densidade da estrutura examinada.

Para se analisar órgãos que não apresentam contraste com as estruturas circunvizinhas, devem ser utilizados os contrastes radiológicos. Os meios contrastantes podem ser radiopacos (contraste positivo) ou menos radiopacos (contraste negativo) que os tecidos que delimitam a estrutura a ser contrastada. Os contrastes positivos são o sulfato de bário e os sais orgânicos de iodo.

O sulfato de bário ( $BaSO_4$ ) devido ao elevado número atômico principalmente do Bário ( $Z=56$ ) é um meio fortemente absorvente de radiação X, sendo, por isso, utilizado como meio de contraste para o estudo radiológico do tubo digestivo. A comparação dos coeficientes mássicos de atenuação entre o sulfato de bário e os tecidos moles (água) resulta em:

$$\mu_m(\text{sulfato de bário})/\mu_m(\text{água}) = BaSO_4/H_2O = 56^4 + 16^4 + 4 \times 8^4 / 2 \times 1^4 + 8^4 = 2.420$$

Podemos concluir que o sulfato de bário absorve 2.420 vezes mais energia da radiação X que os tecidos moles. Assim sendo, a presença da substância no tubo digestivo, por ingestão ou administração por via anal, permite identificar as estruturas devido ao nitido contraste com que aparecem nas radiografias.

A injeção intravascular de contrastes iodados (sais orgânicos de iodo) permite um realce acentuado das estruturas onde se encontram em relação às demais. Essa acentuação não é causada pelo aumento momentâneo da densidade, mas sim pelo aumento da absorção fotoelétrica devido à introdução de átomos de iodo de elevado número atômico ( $Z=53$ ) no sistema.

Os contrastes iodados são utilizados para estudo de artérias e veias (angiografia). O acesso ao sistema arterial para a realização de uma arteriografia é obtido através de punção ou por cateterismo da artéria femoral ou, alternativamente, pelas artérias braquial ou axilar, sob anestesia local. A injeção do contraste radiológico permite a visualização dos vasos na área submetida a exame.

Na urografia excretora, o contraste radiológico administrado no sangue e excretado pelos néfrons concentra-se progressivamente na urina permitindo a iden-

tificação das vias excretoras do sistema urinário. Da mesma forma, na broncografia a inalação do contraste radiológico possibilita a identificação da árvore brônquica.

A presença de ar no interior das estruturas e de cavidades diminui a opacidade do meio por sua baixa capacidade de absorção de raios X, sendo, por isso, contraste negativo.

**Radioscopia.** A radioscopia ou fluoroscopia consiste no exame direto dos corpos por meio de imagem gerada pela interação de fótons X com uma tela fluorescente. Durante o exame, o tubo emite radiação X continuamente, utilizando corrente elétrica de 3 a 5 mA. O órgão a ser observado é posicionado entre o tubo de raios X e a tela fluorescente permitindo ao observador analisar a imagem produzida pela emissão de luz da tela. Atualmente, a imagem da tela fluoroscópica é focalizada por uma câmara e transmitida para monitores de televisão, evitando a exposição do observador aos raios X.

Como se trata de uma técnica de caráter dinâmico, permite o estudo ao vivo, visualizando-se o movimento das estruturas internas do corpo. Essa técnica é muito utilizada para o acompanhamento de procedimentos invasivos como o cateterismo cardíaco.

O cateterismo cardíaco consiste na introdução de um cateter até o coração, através de uma artéria periférica localizada no membro superior (artérias radiais ou braquiais) ou na virilha (artéria femoral) com o paciente deitado, sob anestesia local de acesso e sedação. O cateter é posicionado nas artérias coronárias para injetando-se contraste radiológico (sais orgânicos de iodo), serem visualizadas através das imagens radioscópicas, técnica denominada cineangiocoronariografia. Observa-se a existência de obstruções coronarianas causadas por placas de gordura depositadas nas paredes arteriais (ateromas) e outras anormalidades que reduzem ou impedem o fluxo sanguíneo coronariano, determinando a doença miocárdica isquêmica. Em geral, os ateromas são considerados críticos quando causam um estreitamento das artérias maior que 70%. Outras anormalidades podem ser vistas, como artérias coronárias tortuosas e ponte intramiocárdica, onde uma parte da artéria passa por dentro do músculo cardíaco sofrendo estreitamento durante a contração do coração. Identificadas as obstruções coronarianas pode ser realizado procedimento para a desobstrução coronariana com a colocação de *stents* uma endoprótese expansível caracterizada como um tubo, geralmente de metal principalmente nitinol, aço e ligas de cromo e cobalto, perfurado que é inserido para prevenir ou impedir a obstrução ao fluxo de sangue causado pela redução do diâmetro das artérias. Embora o uso mais comum dos *stents* seja nas obstruções coronarianas, também podem ser utilizados para o mesmo fim em outras artérias como a aorta, carótidas, íliacas, e veias centrais, assim como em órgãos tubulares como os ductos biliares, esôfago, cólon, traquéia, ureteres e uretra.

**Tomografia.** A principal limitação de todas as técnicas convencionais de radiografia é a representação em duas dimensões de estruturas tridimensionais. Numa radiografia, as imagens das estruturas que compõem o segmento do corpo são superpostas e projetadas em um mesmo plano. Dessa forma, as estruturas normais mais atenuantes interferem na imagem de processos anormais. Além disso, tecidos normais ou anormais com pequenas diferenças de densidades radiológicas não são identificadas por falta de contraste. As técnicas de tomografia convencional e computadorizada possibilitam a visualização de uma seção plana ou corte

tomográficos e, no caso da tomografia computadorizada, pode-se distinguir estruturas com diferenças de atenuação de até 0,5%.

**Tomografia convencional.** A tomografia linear tem por base o movimento sincronizado do tubo de raios X e do filme radiográfico. Essas peças estão presas a uma haste fixa que se movem acima e abaixo de um ponto fixo ou fulcro. O braço do tubo de raios X é maior que o braço do filme. Quando o tubo se move em um sentido, o filme radiográfico se move em sentido contrário. O ângulo máximo do movimento é chamado ângulo tomográfico. O plano de interesse médico localiza-se no fulcro, denominado de plano focal ou plano objeto. As estruturas que estiverem nesse plano formarão imagens mais nítidas que aquelas que estão acima e abaixo do plano focal.

Os raios X ao passarem pelo segmento do corpo, projetam as imagens das estruturas internas sobre o filme. Quando o tubo de raios X e o filme radiográfico se movem sincronicamente em torno do fulcro, as imagens das estruturas situadas no plano focal são projetadas sempre nas mesmas posições, permanecendo estáticas sobre o filme radiográfico, portanto, em foco. As estruturas que não pertencem a esse plano têm suas imagens deslocadas sobre o filme, apresentando-se fora de foco ou borradas. Na tomografia linear, a melhor imagem é aquela de uma fatia plana localizada no plano focal.

A tomografia convencional limita-se a focalizar planos de interesse selecionados, turvando as imagens das regiões localizadas acima e abaixo da zona de interesse. Nesse sistema, as variações sutis de densidade tecidual no plano focal são veladas, seja pelas imagens das estruturas superpostas, seja pela radiação difusa. A tomografia convencional não diferencia adequadamente os tecidos moles, comprometendo a qualidade das informações.

**Tomografia computadorizada.** Na tomografia computadorizada (TC), o filme radiográfico é substituído por um sistema de detectores. Nos aparelhos de última geração, o sistema de detecção utiliza 600 detectores estacionários de forma circular; um tubo de raios X colimado em forma de leque, com o feixe sempre no mesmo plano, gira em torno do paciente dentro do círculo de detectores. Em qualquer instante, vários detectores, situados em um arco de círculo, detectam a radiação transmitida através do segmento corporal a ser examinado.

Na tomografia computadorizada, o feixe de raios X é direcionado através de uma seção axial transversa do paciente. O feixe transmitido é interceptado no lado oposto pelos detectores, sendo feita uma contagem para cada ângulo e posição do feixe. Os dados coletados são armazenados em um computador e processados utilizando algoritmos que permitem a reconstrução volumétrica das imagens das estruturas anatômicas ou a seção em vários planos do segmento do corpo examinado. A imagem das estruturas reflete suas propriedades de absorção da radiação X, sendo apresentadas em um monitor de computador e registradas em filme ou impressas em papel.

**Formação da imagem em TC.** A tomografia computadorizada obtém uma série de projeções angulares de feixes de raios X para gerar um corte de determinada espessura. A imagem formada é a representação, ponto a ponto, da atenuação dos raios X em cada seção transversa do tecido. O computador divide o campo de visão em uma matriz de celas uniformes de dimensões  $\Delta x$  por  $\Delta y$ , denominadas *pixels*. Cada *pixel* define um pequeno volume retangular, pois o processo de formação da

imagem percebe uma espessura finita de tecido em uma determinada seção transversa. Um feixe delgado de raios X penetra por um lado da seção transversa e sai pelo outro, atravessando uma série de estruturas, cuja intensidade inicial ( $I_0$ ) é atenuada no tecido pela interação dos fótons X com os componentes das diversas estruturas biológicas. A atenuação produzida em um *pixel* específico da matriz, definido espacialmente pela linha e coluna, é expressa pelo coeficiente linear de atenuação  $\mu$  desse *pixel*. A intensidade do feixe transmitido através de vários *pixels* depende das somas dos valores dos coeficientes de atenuação dos *pixels* atravessados pelos feixes.  $I$  é a quantidade medida pelo sistema detector. A relação  $I/I_0$  é a transmitância ( $T$ ), cujo valor representa a fração do feixe incidente transmitido através do paciente. O computador obtém a transmitância que é proporcional à soma dos coeficientes lineares de atenuação. Quando um feixe incide na matriz em ângulo oblíquo, atravessa parte dos *pixels*, nesses casos, o computador avalia proporcionalmente a atenuação devido a cada fração de *pixel* atravessado. Os valores dos sinais processados pelo sistema detector para cada *pixel* individual não podem ser avaliados em uma só leitura. Para cada imagem de seção transversa, o aparelho de tomografia deve obter centenas de contagens de forma a fornecer ao computador informações suficientes para a determinação de todos os valores individuais dos *pixels*. Essas leituras são feitas com o feixe em posições e ângulos diferentes, para correlacionar todos os valores dos coeficientes lineares de atenuação para cada *pixel* da matriz.

Todos os tecidos contidos dentro do *pixel* atenuam as projeções dos raios X e determinam um valor de atenuação médio para o *pixel*. Esse valor é comparado com o valor de atenuação da água e demonstrado em uma escala (escala Hounsfield). Convencionou-se que a água tenha uma atenuação de zero unidade Hounsfield (UH) e que essa escala tenha uma amplitude de 2.000 UH. O ar tipicamente tem um número UH de -1.000; a gordura aproximadamente -100 UH; os tecidos moles localizam-se na faixa de +20 a +70 UH; e o osso geralmente tem mais que +400 UH.

Com esses dados, o computador utiliza um algoritmo de reconstrução da imagem.

**Reconstrução da imagem tomográfica.** O movimento do tubo gerador de raios X em torno do segmento do corpo do paciente permite a obtenção de séries de leituras associadas, todas elas obtidas com o feixe atravessando o paciente em um dado ângulo, mas em posições sequencialmente deslocadas. As contagens sequenciais produzem um perfil constituído de várias centenas de leituras separadas. Cada perfil representa a atenuação da radiação em uma série de estreitas faixas. Se existe um ponto em que a transmissão está relativamente diminuída, ele aparece em um único perfil. Esse perfil, por si só, não pode estabelecer o local exato da ocorrência. Um segundo perfil, obtido 90° do primeiro, localiza a região da atenuação. A retroprojeção das duas imagens em uma tela mostra as zonas de atenuação como bandas de intensidades intermediárias. A interseção dessas bandas na tela localiza nos planos x e y a região de atenuação.

O alto nível de discriminação de densidade e a resolução espacial dos sistemas de tomografia computadorizada requerem a obtenção de muitos perfis sucessivos em curtos intervalos angulares à medida que o tubo de raios X gira em torno do paciente.

**Aplicações clínicas.** A tomografia computadorizada (TC) tornou-se um método

auxiliar de diagnóstico de valor reconhecido. Nenhum preparo específico é necessário para os exames de TC do cérebro, coluna vertebral ou sistema musculoesquelético. Em neurologia, a TC mostra uma precisão igual ou superior a 90%, sendo considerado um teste não invasivo e muito sensível para o estudo das lesões cerebrais.

Os estudos do tórax, abdômen e pelve geralmente necessitam de meio de contraste iodado intravenoso para a obtenção do realce de artérias e veias e a definição de suas relações. A opacidade do intestino nos estudos de TC do abdômen e pelve pode ser feita através da ingestão de meio de contraste 24 horas antes do exame para a demonstração do cólon, combinado com nova ingestão entre zero e 60 minutos antes do exame, para a demonstração do estômago e do intestino delgado. Ocasionalmente, pode ser necessária a introdução direta do contraste pelo reto para o estudo das partes distais do intestino grosso.

A aplicação de sistemas para o estudo do corpo inteiro, para a obtenção de imagens de seções transversas do tronco, tem sido útil no diagnóstico de neoplasias abdominais, sendo mais estudados o fígado, o pâncreas, o retroperitônio e o trato geniturinário. A tomografia computadorizada é determinante na avaliação da extensão de massas abdominais e suas relações com os órgãos ali situados. As imagens do fígado normal, que aparece homogêneo, mostram maior densidade que a dos outros órgãos intra-abdominais. Os tumores malignos e benignos do fígado mostram menor atenuação que o parênquima normal. A administração intravenosa do contraste melhora tipicamente a diferenciação do parênquima em relação ao tumor. A visualização do pâncreas pela tomografia computadorizada é auxiliada pela presença de tecido adiposo adjacente. Os rins aparecem bem delimitados em consequência do tecido adiposo circundante. As massas são evidenciadas pela deformação do contorno dos rins e alterações de absorção do parênquima renal.

Geralmente, todos os estudos são realizados com o paciente em decúbito dorsal e as imagens são obtidas no plano transversal ou axial.

Os modernos equipamentos de TC helicoidais multicortes podem obter imagens em frações de segundo e gerar imagens de todo o corpo, desde o topo da cabeça às coxas, em uma única apnéia de 20-30 segundos. Esses tempos de aquisição de imagens mais rápidos permitem a realização de estudos dinâmicos das artérias e veias em diferentes momentos após a injeção de meios de contraste intravenosos.

**Medicina Nuclear.** A utilização de radionuclídeos tem permitido um considerável avanço no diagnóstico e tratamento em Medicina. A Medicina Nuclear utiliza alguns radionuclídeos ou moléculas ligadas a eles, denominados radiofármacos, que administrados ao paciente, têm a capacidade de se concentrar em um órgão determinado pela fixação seletiva, permitindo a obtenção de imagens utilizando equipamento de detecção de radiações. Uma importante vantagem dos exames da Medicina Nuclear deve-se ao fato dos tecidos absorverem doses baixas de radiação, o que não oferece riscos significativos para os pacientes. O uso preferencial de radionuclídeos de meia vida curta assegura a eliminação total de vestígios radioativos em um intervalo curto de tempo.

Segundo o órgão que se deseja avaliar, utilizam-se diferentes radiofármacos ou traçadores específicos. Atualmente, existem técnicas que permitem a exploração de praticamente todos os órgãos do corpo humano.

**Sistema de detecção de imagem em Medicina Nuclear.** As imagens de Medicina Nuclear são obtidas pela detecção externa das radiações gama emitidas por radiofármacos concentrados em tecidos específicos do paciente. Essa detecção é realizada pela câmara de cintilação. O componente responsável pela detecção da radiação gama é o cristal de iodeto de sódio com impurezas de tálio, NaI(Tl). O cristal absorve as energias dos fótons incidentes emitindo cintilações de luz, que são detectadas e convertidas em correntes elétricas pelos tubos fotomultiplicadores. A intensidade da corrente elétrica produzida está relacionada com a energia que o fóton incidente transferiu ao cristal. Para que as cintilações produzidas pelo cristal de NaI(Tl) possam ser localizadas e contadas pelo sistema de detecção, vários fotomultiplicadores são opticamente acoplados em posições específicas no cristal. Os sinais produzidos pelos tubos fotomultiplicadores são processados, resultando em um par de sinais (x,y), que vai indicar a posição do fóton detectado, e um sinal Z, cuja amplitude traduz a energia depositada pelo fóton no cristal. Assim, se o sinal Z tiver a amplitude correspondente à energia do fóton emitido pelo radionuclídeo selecionado, ele é aceito e o par de sinais de posição é registrado. Após um certo intervalo de tempo, o registro dos sinais aceitos resulta no mapa da distribuição dos pontos de cintilação no plano do detector, sendo a imagem denominada cintilografia. Atualmente, os sinais são digitalizados, processados e enviados a um computador e armazenados, de maneira que, ao final de um exame, uma imagem digital é formada e pode ser apresentada em um monitor ou impressa, processada para fornecer informações quantitativas, reconstruída volumetricamente, seccionada em cortes tomográficos, etc.

**Aquisição de imagens em Medicina Nuclear.** Uma importante aplicação para o diagnóstico em Medicina é a utilização de radionuclídeos para os estudos morfofuncionais de diferentes órgãos, tendo como característica mais relevante a de permitir análises funcionais.

A imagem formada é uma projeção bidimensional da distribuição volumétrica do radiofármaco, ou seja, uma imagem plana, onde é impossível separar diferentes objetos superpostos ou mesmo estimar suas profundidades. Para minimizar os efeitos da sobreposição dos objetos se pode obter imagens planas em diferentes ângulos de visão do detector (projeções) ou realizar estudos tomográficos. Para os modos de aquisição planas ou tomográficas, existem numerosos procedimentos específicos em função dos objetivos de estudo.

De acordo com o procedimento a ser realizado podem ser obtidas: 1) imagens estáticas, 2) imagens sequenciais, o que permite a aquisição de estudos dinâmicos, 3) em modo sincronizado e, 4) estudos tomográficos.

Nas imagens estáticas obtêm-se informações sobre a distribuição espacial do radiofármaco pelos tecidos do paciente, sem considerar a sua variação temporal. O radiofármaco é administrado ao paciente, após o tempo necessário para a sua distribuição e fixação ao órgão a ser examinado, o paciente é colocado sobre a mesa de exame e o sistema de detecção posicionado adequadamente sobre o local para a aquisição da projeção desejada, durante um intervalo de tempo previamente estabelecido ou quando o sistema registrar um determinado número de cintilações.

Nos estudos dinâmicos são adquiridas informações temporais sobre a distribuição do radiofármaco administrado aos pacientes. Uma série de imagens sequenciais é registrada, permitindo a quantificação de parâmetros funcionais de interesse.



Com o modo sincronizado, a aquisição de uma série temporal de imagens sincronizada com a atividade elétrica do coração permite o estudo da função cardíaca.

**Tomografia Computadorizada por Emissão Simples de Fótons – SPECT.** Como toda técnica tomográfica, a SPECT (*Single Photon Emission Computed Tomography*) fundamenta-se na observação de que um objeto pode ser reconstruído em duas ou três dimensões a partir de uma série de imagens obtidas em diferentes ângulos ou projeções.

**Aquisição da imagem SPECT.** Uma câmara de cintilação ou gama-câmara rotatória gira em torno do paciente obtendo uma série de imagens planares. Cada imagem é obtida em um determinado ângulo onde o detector pára e adquire uma imagem do plano transaxial que se encontra à frente a partir da emissão de radiação pelos radionuclídeos distribuídos nos tecidos.

As imagens SPECT são muito mais vulneráveis que as imagens planares às imperfeições do sistema e, por isso, faz-se necessário um programa rigoroso de controle de qualidade das imagens que inclua o equipamento, o radiofármaco e o paciente.

**Reconstrução das imagens em SPECT.** A imagem SPECT resulta da reconstrução computadorizada das imagens planares utilizando um algoritmo denominado *retroprojeção filtrada*. A *retroprojeção* permite recuperar a informação sobre a distribuição dos radionuclídeos pelo tecido, pois cada uma das projeções contém informações sobre o perfil da atividade de um plano transaxial. A imagem reconstruída é borrada e, por isso, deve ser tratada por processo de filtração. Os filtros que eliminam os traços borrados das imagens reconstruídas são denominados filtros RAMP. A função dos filtros é diminuir o ruído introduzido por sinais de baixa frequência, melhorando a resolução das imagens. Outros filtros permitem reduzir o ruído decorrente do número limitado de cintilações registradas por *pixel*. Os filtros suprimem frequências acima ou abaixo de uma frequência de corte. A localização da frequência de corte determinará a forma que o filtro afetará o ruído e a resolução da imagem. As frequências de corte baixas proporcionam uma boa supressão do ruído, mas pode também deteriorar as imagens. As frequências de corte altas preservam melhor a resolução das imagens, mas podem suprimir o ruído de modo insuficiente.

A imagem volumétrica é obtida após a reconstrução a partir das imagens transaxiais atenuadas.

**Apresentação das imagens SPECT** Após o processamento, as imagens são apresentadas em planos tomográficos, entendidos como uma superfície formada por um determinado corte ao redor do corpo ou sobre parte dele. Os cortes seccionais são mostrados sequencialmente em plano transversal em relação ao eixo longitudinal do corpo do paciente, sendo os cortes representados com a superfície anterior para cima e o lado direito do paciente à esquerda do observador. As secções em planos paralelos ao eixo longitudinal do corpo de um lado ao outro do paciente são denominados planos sagitais e os planos coronais são perpendiculares aos sagitais.

Os estudos SPECT podem ser apresentados de vários modos, a saber:

1. Imagem volumétrica tridimensional.
2. Mapa polar. O mapa polar é uma reconstrução bidimensional do órgão elaborada com o propósito de incluir, em apenas uma imagem, a distribuição relativa do radiofármaco em todo o órgão. Apresentado de forma circular assemelha-se a um

alvo, com a distribuição do radiofármaco demonstrada por uma escala de cores, o centro do círculo corresponde ao topo (ou vértex) do órgão e a sua periferia representada por sua base. A compreensão da imagem torna-se clara quando visualizamos o órgão comprimido em direção à base, tornando o órgão tridimensional uma figura plana.

3. Múltiplas imagens em cortes delgados sucessivos nos planos transversal, sagital e coronal, o que ajuda a diferenciar pequenos defeitos de captação, identificando suas posições anatômicas.

A SPECT mostra sua grande utilidade ao oferecer informações sobre a fisiologia e fisiopatologia das lesões orgânicas. Permite gerar cortes tomográficos e proporciona informações qualitativas e semiquantitativas sobre os diferentes processos fisiológicos e patológicos por meio do estudo do comportamento do radiofármaco administrado.

**Tomografia por Emissão de Pósitrons – PET.** A tomografia por emissão de pósitrons (PET) é uma técnica única por sua capacidade de obter imagens funcionais de fluxo sanguíneo ou de processos metabólicos. Os dados de natureza funcional da PET permitem a investigação e a comparação de eventos que ocorrem em nível celular. Esses dados não podem ser avaliados por outras técnicas de imagens anatômicas ou estruturais convencionais como a tomografia computadorizada (TC), a ressonância nuclear magnética (RNM) e a tomografia computadorizada por emissão simples de fótons (SPECT).

**Radionuclídeos usados em PET.** A PET utiliza radionuclídeos emissores de pósitrons disponíveis para a marcação de compostos biológicos e fisiológicos. Com a disponibilização de ciclotrons pequenos e eficientes foi possível produzir radionuclídeos emissores de pósitrons de vida curta de elementos orgânicos básicos, como o carbono ( $^{11}\text{C}$ ), nitrogênio ( $^{13}\text{N}$ ), oxigênio ( $^{15}\text{O}$ ) e flúor ( $^{18}\text{F}$ ). Esses radionuclídeos ligados a moléculas orgânicas comuns encontradas no organismo podem ser usados especificamente para o estudo de órgãos-alvo. Os tecidos podem ser visualizados utilizando glicose fluorada ( $^{18}\text{F}$ ) que permite estudar a função celular ou viabilidade do tecido em órgãos-alvo.

Os radionuclídeos emissores de pósitrons e suas características que podem ser utilizados em PET são apresentados na tabela 18.

Tabela 18. Radionuclídeos utilizados em tomografia por emissão de pósitrons.

<i>Produzidos pelo ciclotron</i>	<i>T<sub>1/2</sub> (minutos)</i>	<i>Energia do Pósitron (MeV)</i>
Oxigênio-15	2,04	1,72
Nitrogênio-13	9,96	1,19
Carbono-11	20,4	0,96
Flúor-18	110,0	0,64
<i>Produzidos por gerador</i>		
Rubídio-82	1,27	3,35
Cobalto-62	9,8	2,93
Gálio-68	68,1	1,90

Fonte: Early, P.J., Sodde, D.B. Principles and Practice of Nuclear Medicine. 2 ed. St. Louis: Mosby, 1995.

**Aquisição de imagens PET.** Para a obtenção da imagem em PET utiliza-se radionuclídeos pobres em nêutrons emissores de pósitrons (elétrons positivos). Ao ser emitido do núcleo do átomo, o pósitron interage imediatamente com um elétron ocorrendo a reação de aniquilamento, ou seja, a conversão total de suas massas combinadas para energia de 1,02 MeV. Dessa conversão resulta duas radiações

gama, cada uma contendo exatamente a metade da energia total (511 keV), emitidas em direções opostas ( $180^\circ$ ). Dois detectores, colocados de cada lado do objeto onde os eventos de aniquilamento estão ocorrendo, estão preparados para absorver as emissões simultaneamente e processar seus pulsos resultantes, empregando um circuito de coincidência. Para ser identificado, ambos os eventos devem ser detectados, aceitos pelo circuito de coincidência e enviados para a avaliação pelo analisador da altura do pulso e pelo circuito de análise de posição.

Caso os dois detectores em oposição estejam equidistantes ao local de emissão do evento de aniquilamento, ambos os fótons gama alcançariam os cristais dos detectores exatamente ao mesmo tempo e seriam aceitos pelo circuito de coincidência. No entanto, quando o evento de aniquilamento ocorre em posição não equidistante aos detectores, o fóton originado mais próximo de um dos detectores, chegaria alguns nanossegundos mais rápido que o outro fóton. Para as dimensões humanas, esse fato ocorreria em um máximo de 2,2 ns. Essa janela de tempo é uma variável que é definida no dispositivo eletrônico de coincidência para o tamanho de um ser humano. Quanto maior a largura da janela de tempo, menor a resolução da imagem final. De acordo com essa janela, o tempo diferencial pode ser calculado tendo por base a velocidade da luz, permitindo que o evento seja registrado como válido. Completada a informação de posição, o intervalo ao longo da linha de resposta é calculado e os sinais de posição são enviados, sendo o evento registrado. Uma vez aceito, o circuito posiciona o evento positrônico em torno de uma linha projetada entre o centro dos dois detectores ao longo da qual os eventos ocorrem nas direções x, y e z. Os dados da distribuição dos eventos registrados são enviados ao computador matriz para serem submetidos a processamento para a reconstrução das imagens, utilizando a técnica da retroprojeção filtrada.

Em outra técnica para a determinação da posição do evento de aniquilamento, o sistema identifica os dois cristais em oposição que detectam os fótons coincidentes e desenha um vetor eletrônico entre eles. Quando a linha ao longo da qual os eventos ocorrem é identificada, todos os pixels do computador matriz, que representa essa linha, recebem a contagem uniformemente. A superposição de linhas múltiplas para todos os ângulos serve para acentuar as áreas de atividade aumentada ou diminuída. Isso é posteriormente delineado ao completar a aquisição da imagem quando os dados são submetidos ao algoritmo de retroprojeção filtrada.

Não havendo coincidência, os eventos detectados são rejeitados. Fótons dispersos ou quando o evento de aniquilamento ocorre fora do campo de detecção de um dos detectores em oposição somente um fóton é detectado, não sendo registrado.

Esse sistema elimina a necessidade de utilizar colimadores, o que aumenta a sensibilidade de 25 a 100 vezes dependendo do tamanho do detector e a resolução do sistema.

**Aquisição de imagens PET.** A câmara PET detecta os eventos de aniquilamento que dependem da variação quantitativa da distribuição de radionuclídeos acumulados em uma determinada área. A câmara gira em torno do paciente obtendo uma sequência de imagens planares em diferentes ângulos, onde os detectores adquirem uma imagem do plano transaxial que se encontra à frente, registrando as emissões gama dos eventos de aniquilamento ocorridos nos tecidos durante o tempo de aquisição de cada uma das imagens.

Os detectores são compostos por cristais e tubos fotomultiplicadores. Os detectores PET são usualmente feitos de material muito mais denso que o usado para a detecção de fótons de baixa energia. Esse material inclui o Germanato de Bismuto - BGO ( $\text{Bi}_3\text{Ge}_4\text{O}_{12}$ ), o Fluoreto de Bário ( $\text{BaF}_2$ ) e o Fluoreto de Césio ( $\text{CsF}$ ). Todos esses cristais são de aproximadamente 5 mm e produzem imagens de alta resolução. Esses cristais são capazes de emitir luz como resultado da interação da radiação gama similar ao que ocorre com os cristais de  $\text{NaI}(\text{TI})$ . A luz é direcionada para o tubo fotomultiplicador onde é convertida em corrente elétrica.

A câmara PET é um dispositivo que usa anéis de detectores dispostos em arranjo hexagonal, podendo conter 256 cristais detectores vistos por 16 tubos fotomultiplicadores (TFM), organizados em 4 blocos de 64 cristais com 4 TFM cada, ou 3 anéis de 16 grupos em um círculo (12.288 cristais com 768 TFM) ou, alternativamente, contendo anéis com 21 cristais sendo vistos por 6 TFM. Pode haver sistemas com um número menor de detectores em cerca de 30%, mas necessitando detectores rotatórios.

### **Aplicações clínicas da Medicina Nuclear.**

**Cintilografia óssea.** Os radiofármacos utilizados para a obtenção de imagens dos ossos são derivados difosfonatos marcados com tecnécio-99m, como o metildifosfonato (MDP) e o hidroximetildifosfonato. Os difosfonatos são adsorvidos na superfície dos cristais de hidroxiapatita, nos locais de formação óssea, sendo sua captação proporcional à atividade osteoblástica. Após a administração endovenosa do radiofármaco, entre 4 a 6 horas, 68% do radiofármaco encontra-se fixado ao osso, sendo o restante eliminado pela urina.

As imagens podem ser obtidas em diferentes tempos após a administração do radiofármaco: 1) imediatamente após a injeção obtém-se uma série de imagens sequenciais que representa a primeira passagem do radiofármaco pelo osso, permitindo a análise do fluxo sanguíneo arterial ósseo, 2) transcorridos poucos minutos da administração do radiofármaco (imagem precoce) quando se deseja avaliar a vascularização do osso, e, 3) após 4 a 6 horas, imagem tardia, que traduz a fixação do radiofármaco ao osso.

A imagem normal caracteriza-se principalmente pela simetria entre os lados direito e esquerdo. As regiões mais ativas do esqueleto são: o esterno, a coluna, as articulações sacrílicas e a pelve e, menos ativas, o crânio, as costelas e as extremidades. Alterações patológicas frequentemente manifestam-se como áreas focais de elevação da concentração do radiofármaco devido ao aumento da atividade osteoblástica, mas podem manifestar-se como lesões hipoativas. Suas principais indicações são o diagnóstico de metástases, tumores ósseos primários, osteomielites, fraturas, patologia de próteses ósseas, necrose avascular, doença de Paget e doenças ósseas metabólicas.

**Cintilografia hepatoesplênica.** Os radiofármacos utilizados são o enxofre ou o estanho coloidal marcado com tecnécio-99m. O tamanho das partículas injetadas é de 200 a 500 nm. Essas partículas são fagocitadas pelas células do sistema retículoendotelial, sendo sua captação diretamente proporcional ao número e distribuição dessas células.

São adquiridas imagens planares em projeções anterior, posterior e laterais (direita e esquerda) ou estudo tomográfico do fígado e baço 15 minutos após a administração do radiofármaco. Na distribuição normal, 86% do radiofármaco inje-

tado encontra-se no fígado fagocitado pelas células de Kupffer, 6% no baço e 8% na medula óssea. A imagem normal mostra uma distribuição homogênea do radiofármaco pelo parênquima hepático, com uma concentração maior no lobo direito, o baço menos concentrante e apenas discreta atividade em medula óssea, visto em projeção posterior. A principal indicação do exame é a avaliação de formações nodulares do fígado permitindo o diagnóstico diferencial entre hepatocarcinoma, adenoma e hiperplasia nodular focal.

**Cintilografia hepatobiliar.** Os radiofármacos utilizados são derivados do ácido imidoacético (IDA) marcados com tecnécio-99m, principalmente o dimetil IDA (HIDA) e o diisopropil IDA (DISIDA). Os derivados do IDA comportam-se de modo semelhante à bilirrubina, sendo rapidamente captados pelos hepatócitos e eliminados pela bile (85 a 90%). Os 10 a 15% restantes são eliminados pelos rins. São obtidas imagens planares sequenciais durante 45 a 60 minutos e, se necessário, imagens mais tardias. Nas imagens normais, o parênquima hepático é visualizado durante o primeiro minuto após a administração do radiofármaco, apresentando atividade máxima entre 5 e 20 minutos. Os ductos biliares são identificados aos 10 minutos e a vesícula biliar entre 10 e 15 minutos. A visualização do intestino ocorre entre 20 e 30 minutos. Aos 60 minutos, o fígado deve ter eliminado todo o radiofármaco. Indicações principais: 1) colecistite aguda, 2) anomalias congênitas da árvore biliar, 3) complicações pós-cirúrgicas, 4) colecistite crônica, e 5) transplante hepático.

**Deteção de hemorragia gastrointestinal.** Os radiofármacos utilizados são o enxofre ou estanho coloidal e as hemácias marcadas com tecnécio-99m. O enxofre coloidal permanece pouco tempo no sangue, sendo eliminado rapidamente pelo sistema retículoendotelial. Por isso, é curto o tempo no qual se pode detectar o local do sangramento. As hemácias marcadas permanecem no sangue por um período mais longo de tempo, o que permite prolongar o tempo de exploração, aumentando a possibilidade de detectar a hemorragia. Imagens planares sequenciais são adquiridas durante 45 a 60 minutos e, se necessário, podem ser obtidas imagens tardias. Na imagem normal, o radiofármaco deve permanecer no sistema circulatório. Concentrações extravasculares e que aumentam de intensidade ao longo do tempo são sugestivas de hemorragia digestiva.

**Refluxo gastresofágico.** O radiofármaco utilizado é o enxofre (ou estanho) coloidal ou o ácido dietilenotriaminopentacético (DTPA) marcados com tecnécio-99m, diluído em suco de laranja ou leite, administrado por via oral. Imagens da área gastresofágica são registradas sequencialmente durante 30 minutos. Pode ser utilizada compressão abdominal progressiva para provocar o refluxo do conteúdo gástrico para o esôfago confirmando o refluxo gastresofágico. Com as imagens no monitor do computador é possível desenhar áreas de interesse em diferentes partes do esôfago para se quantificar a passagem da atividade do estômago para o esôfago. No exame normal, o refluxo deve ser praticamente inexistente. A principal indicação é o estudo da esofagite de refluxo.

**Deteção de mucosa gástrica ectópica (divertículo de Meckel).** O radiofármaco utilizado é o <sup>99m</sup>Tc-pertecnetato administrado por via endovenosa. Normalmente, o pertecnetato é secretado pelas células da mucosa gástrica. Imagens abdominais são registradas a cada 5 minutos durante uma hora. Nas imagens normais, observa-se atividade em estômago, rins e bexiga urinária. A concentração progressiva do radiofármaco no abdômen confirma o diagnóstico de mucosa gástrica ectópica

(divertículo de Meckel).

**Estudo das glândulas salivares.** O radiofármaco utilizado é o  $^{99m}\text{Tc}$ -pertechnetato administrado por via endovenosa. O pertechnetato é normalmente concentrado pelas glândulas salivares. Realiza-se um estudo dinâmico, durante 40 a 60 minutos, em projeção anterior da face. O estudo permite avaliar a vascularização, incorporação e eliminação do radiofármaco pelas glândulas salivares. Normalmente realiza-se estímulo com suco de limão para avaliar a excreção de saliva. A principal indicação é o diagnóstico da síndrome seca ou de Sjögren.

**Perfusão miocárdica.** Os radiofármacos utilizados para o estudo da perfusão miocárdica são o tálio-201, o metoxi-isobutil-isonitrilo (sestamibi) ou o tetrafosmin, sendo os dois últimos marcados com tecnécio-99m. O tálio-201 tem comportamento semelhante ao potássio, sendo transportado para o interior da célula por meio da bomba de sódio/potássio. Concentra-se no miocárdio em duas fases: 1) distribuição inicial que depende da extração do tálio-201 pelas células miocárdicas proporcionalmente ao consumo de oxigênio e ao fluxo sanguíneo e, 2) redistribuição devido à saída do tálio-201 das células miocárdicas e sua redistribuição. O sestamibi e o tetrafosmin são incorporados pelo miocárdio proporcionalmente ao fluxo de sangue, mas, uma vez no interior das células, não apresentam fenômeno de redistribuição.

Esse tipo de exame, normalmente é realizado associado a um teste ergométrico. A injeção do radiofármaco é feita no momento de esforço máximo, sendo adquirido estudo tomográfico (SPECT) sobre a área cardíaca, obtendo-se uma série temporal de imagens sincronizadas com a atividade elétrica do coração, o que permite o estudo da função cardíaca.

As imagens são representativas da perfusão miocárdica durante o esforço. Quando o tálio-201 é utilizado, 3 a 4 horas após a sua administração, obtém-se um novo estudo tomográfico, que representa a perfusão miocárdica em repouso. Quando o sestamibi ou o tetrafosmin é utilizado, são necessárias duas doses do radiofármaco, uma para o estudo de esforço e outra para o repouso.

Os cortes tomográficos correspondentes dos estudos em esforço e repouso são comparados entre si. Na exame normal, observa-se uma distribuição homogênea em todas as paredes do ventrículo esquerdo, sendo algo menos ativas as regiões apical e inferior. As regiões cardíacas com necrose aparecerão como defeitos de concentração tanto nas imagens de esforço como nas de repouso, enquanto que nas isquemias as falhas de captação do radiofármaco são vistas somente nas imagens de esforço. A principal indicação é o diagnóstico e seguimento das cardiopatias isquêmicas.

**Cintilografia renal estática.** O radiofármaco utilizado é o ácido dimercaptosuccínico (DMSA) marcado com tecnécio-99m. Os rins concentram 4 a 5% do DMSA a cada passagem do sangue, fixando 50% do radiofármaco em 60 minutos. A excreção urinária é de 30% em 14 horas. Imagens planas são obtidas em projeções anterior, posterior e oblíquas entre 4 e 6 horas da administração endovenosa do radiofármaco. A principal indicação é a determinação da massa renal funcionante nas pielonefrites agudas e crônicas.

**Estudo renal dinâmico.** Os radiofármacos utilizados são o ácido dietilenotriaminopentacético (DTPA) e a mercaptoacetilglicina ( $\text{MAG}_3$ ) marcados com tecnécio.

O DTPA é eliminado por filtração glomerular, apresenta baixa união a proteínas plasmáticas (0,6 a 6%) e uma baixa eficiência de extração. O MAG<sub>3</sub> é eliminado por secreção tubular ativa, apresenta uma alta união às proteínas plasmáticas (70 a 80%) e uma alta eficiência de extração (80%). Uma série dinâmica de imagens é adquirida, possibilitando avaliar a chegada do radiofármaco ao rim (fase vascular), sua incorporação ao parênquima (fase cortical) e eliminação, além da morfologia renal. O programa de processamento possibilita a seleção de regiões de interesse sobre as áreas renais e aorta, obtendo-se curvas de atividade em função do tempo, denominadas renogramas. Nos renogramas, distinguimos as fases que representam a incorporação ao parênquima renal e eliminação que representa a saída do radiofármaco pelas vias urinárias. As principais indicações são: 1) determinação da função renal relativa em pacientes com doença renal simétrica, 2) diagnóstico diferencial na dilatação pélvica de origem obstrutiva e não obstrutiva, 3) seguimento do transplante renal, 4) avaliação da perfusão renal e, 5) hipertensão renovascular.

**Cintilografia da tireóide.** Os radiofármacos utilizados são o <sup>99m</sup>Tc-pertecnetato, <sup>123</sup>Iodo ou <sup>131</sup>Iodo. O pertecnetato é captado ativamente pelas células tireoidianas à semelhança dos iodetos, mas não é organificado. O <sup>123</sup>I ou <sup>131</sup>I é administrado por via oral e pertecnetato por injeção endovenosa, obtendo-se imagens estáticas da região tireoidiana em várias projeções. Na imagem normal observa-se uma distribuição homogênea do radiofármaco por toda a glândula. A cintilografia da tireóide é indicada para a avaliação de: 1) nódulo tireoidiano ou da massa cervical, 2) bócio, 3) hipertireoidismo, 4) massa subesternal ou mediastínica e, 5) pesquisa de tecido tireoidiano ectópico.

**Pesquisa de corpo inteiro com Iodo-131.** O iodeto é captado e organificado pelas células tireoidianas. Imagens do corpo inteiro são adquiridas 24 horas após a administração oral de uma dose de Iodo-131. Observa-se concentração focal de iodetos em tecido tireoidiano. A principal indicação é a detecção de restos tireoidianos após tireoidectomia total e de metástases em consequência de câncer diferenciado da tireóide (carcinomas folicular e papilífero).

**Cintilografia de perfusão pulmonar.** O radiofármaco utilizado é o macroagregado de albumina marcado com tecnécio-99m, que forma partículas de tamanho médio da 10 a 45 µm de diâmetro, que administrados por via endovenosa ficam momentaneamente bloqueadas nos capilares pulmonares. Imagens planas da região torácica são obtidas em múltiplas projeções. Nas imagens normais, observa-se distribuição homogênea do radiofármaco no parênquima pulmonar, representativa da distribuição da perfusão. Tem como principal indicação o diagnóstico do tromboembolismo pulmonar, que se manifesta como defeitos focais da concentração do radiofármaco.

**Cintilografia de ventilação pulmonar.** Podem ser utilizados como radiofármacos os aerossóis de DTPA e o grafite (pseudogotas) marcados com tecnécio-99m e gases como o xenônio-133, xenônio-127 e o kriptônio-88m. Imagens dinâmicas são adquiridas, enquanto o paciente respira o gás, primeiro durante alguns minutos em circuito fechado e depois em circuito aberto. Isso permite a visualização de modo dinâmico das fases de chegada e eliminação do gás dos pulmões.

No caso dos aerossóis, o paciente respira primeiro em circuito fechado, permanecendo retidos na árvore bronquial. Posteriormente, adquirem-se imagens estáticas em várias projeções, obtendo-se uma representação estática da distribui-

ção do ar nos pulmões. As principais indicações são o estudo das alterações da ventilação pulmonar (enfisema e bronquiectasias) e como complemento ao estudo de perfusão pulmonar no diagnóstico do tromboembolismo pulmonar.

**Perfusão cerebral.** Os radiofármacos utilizados são a hexametil propilenoamina oxina – HMPAO e a Etilenodicitostina Dietil Éster – ECD marcados com tecnécio-99m. Esses radiofármacos formam compostos lipossolúveis que atravessam a barreira hematoencefálica e são retidos no cérebro, principalmente na substância cinzenta, distribuindo-se proporcionalmente ao fluxo sanguíneo regional. O estudo é realizado utilizando técnica tomográfica – SPECT. Em condições normais, o radiofármaco mostra distribuição uniforme, mas não homogênea, sobre a superfície cortical dos hemisférios, com atividade máxima no cerebelo, seguido pelos gânglios da base que praticamente se iguala à captação do córtex cerebral. A concentração subcortical do radiofármaco é marcadamente menor. A SPECT permite melhorar a precisão no diagnóstico, ver dentro do órgão através da análise das imagens dos corte tomográficos em diversos planos.

A SPECT cerebral proporciona um mapa semiquantitativo da perfusão cerebral regional permitindo estabelecer correlação com a atividade metabólica de cada área. Está indicado principalmente no estudo das doenças cérebro-vasculares e das demências. Permite a detecção precoce do infarto cerebral de menos de 48 horas de evolução.

No estudo das demências, a SPECT de perfusão cerebral é um meio alternativo de diagnóstico e seguimento de pacientes especialmente quando se estabelecem índices obtidos por métodos de quantificação. O índice de atividade regional em relação ao cerebelo parece ser mais indicado em seu estudo. É possível realizar o diagnóstico diferencial entre a demência tipo Alzheimer e outras, como a demência por múltiplos infartos ou do lobo frontal. Além de ser capaz de diferenciá-la dos transtornos cognitivos que se associam à depressão.

Na doença de Alzheimer são típicos os achados de defeitos de fixação de forma bilateral sobre as regiões temporal medial, parietal posterior e, por último, os lobos frontais, sem que exista afetação do córtex sensorio-motor, nem dos lobos occipitais. Em alguns casos, pode ter defeito de fixação sobre a região parieto-temporal, mas de forma unilateral. Na demência por múltiplos infartos, os defeitos encontram-se distribuídos pelo córtex de forma aleatória, sem padrão característico.

**Cintilografia com gálio-67.** O citrato de gálio-67, após a administração endovenosa, é captado normalmente pela medula óssea, fígado e baço, sendo também observadas atividades em glândulas lacrimais e salivares, nasofaringe, genitais, cólon e em mamas. O gálio-67 tem aplicação no diagnóstico de tumores e de inflamação e infecção. O mecanismo de captação em ambos os processos não está totalmente esclarecido. Nos tumores depende de massa tumoral viável, fluxo sanguíneo, permeabilidade capilar, drenagem linfática e dos receptores da transferrina. Na inflamação depende da permeabilidade vascular, transporte protéico (transferrina, lactoferrina) e da união a leucócitos e bactérias. Está indicada para o diagnóstico de: 1) extensão e controle evolutivo de tumores, 2) processos infecciosos, principalmente ósseos, 3) doença pulmonar intersticial e, 4) sarcoidose.

**Cintilografia com leucócitos marcados.** Os leucócitos, depois de separados de uma amostra de sangue do paciente, podem ser marcados com radiofármacos



lipossolúveis ligados ao tecnécio-99m ou índio-111. Na exploração normal utilizando leucócitos marcados com tecnécio-99m, nos trinta primeiros minutos, observa-se atividade pulmonar que diminui rapidamente. Depois da captação pulmonar, aumenta rapidamente a atividade em fígado, baço e medula óssea. Após quatro horas pode ser vista atividade fisiológica em cólon. A cintilografia com leucócitos marcados está indicada para o diagnóstico de processos infecciosos ósseos, abdominais, torácicos e vasculares.

**Radioterapia.** A finalidade da terapia com radiações ionizantes é a erradicação de tumores. Esse objetivo deve ser alcançado respeitando ao máximo a integridade anatômica e funcional dos órgãos e tecidos adjacentes ao tumor. O quociente entre as probabilidades de curar um tumor e de produzir efeitos tóxicos denomina-se índice ou quociente terapêutico. Infelizmente, todos os tratamentos com radiações, como os demais tratamentos médicos, produzem efeitos indesejáveis. A falta de seletividade desse meio terapêutico produz a depleção mais ou menos intensa de células saudáveis. Isso implica em que a probabilidade de se produzir efeitos tóxicos nunca é zero.

O tratamento que utiliza radiação ionizante, genericamente denominado radioterapia, pode ser dividida em: 1) teleterapia, 2) braquiterapia e, 3) terapia metabólica.

Na teleterapia, a fonte de radiações ionizantes é colocada afastada da região a ser irradiada. Nessa forma de radioterapia são utilizados equipamentos de raios X de quilovoltagem e megavoltagem e os de teleisotopoterapia.

Os equipamentos de quilovoltagem são tubos convencionais de raios X que utilizam voltagens de no máximo 250 kV. São utilizados principalmente no tratamento de tumores superficiais. A dose é máxima na pele, decrescendo até atingir 50% a 5 cm de profundidade, 25% a 10 cm e sendo praticamente desprezível a 25 cm. Nesse tratamento o paciente é submetido a doses diárias de 3 Gy até atingir um total de 60 Gy.

Na classe de equipamentos de megavoltagens estão os aceleradores de partículas, como os aceleradores lineares e o betatron. Quando os elétrons acelerados atingem uma energia de 22 MeV, a dose máxima devido aos raios X ocorrerá em 4 a 5 cm de profundidade, desce a 83% a 10 cm e para 50% a 25 cm. Portanto, são mais utilizados para o tratamento de tumores profundos em órgãos como os pulmões, bexiga, próstata, útero, esôfago, etc. As principais vantagens desses equipamentos são a ocorrência de dose máxima abaixo da pele, seu grande poder de penetração e baixa absorção nos ossos. O paciente recebe entre 50 e 60 Gy no tumor distribuídos em frações diárias de 2 Gy.

**Filtros de raios X em radioterapia.** Os feixes de radiação X emitidos por equipamentos geradores são compostos por fótons de diferentes energias. Para a segurança tecnológica no uso médico dos raios X em radioterapia, as radiações menos energéticas, de baixa capacidade de penetração, devem ser eliminadas do feixe de raios X minimizando o efeito superficial da radiação. Para isso, utilizam-se filtros, ou seja, dispositivos metálicos que interpostos entre o equipamento gerador e o paciente, absorvem os fótons X menos energéticos, eliminando-os do feixe de radiação incidente. Dessa forma, os filtros permitem ajustar a qualidade dos raios X às necessidades de penetração nos tecidos evitando o dano celular superficial.

Para esse fim, são usados filtros de alumínio, cobre ou ligas metálicas de

diversas espessuras posicionadas na saída do tubo gerador. Para equipamento gerador operando a 80 kV, filtro de alumínio de 1 mm de espessura permite a passagem de 36% da radiação emitida, de 2 mm 23% e de 3 mm, somente 16% dos fótons mais energéticos compõem o feixe de raios X transmitido.

Aparelho de raios X funcionando a uma tensão de 200 kV produz fótons X de menor comprimento de onda (em torno de 0,06 Angström – Å), com predominância de fótons de 0,25 Å. A interposição de um filtro de cobre de 1 mm de espessura reduz a intensidade de todas as radiações, excluindo-se do feixe as radiações menos energéticas. Comportamento semelhante ocorre com a interposição de um filtro de alumínio de 17,5 mm de espessura.

**Teleisotopoterapia.** Utiliza como fontes de radiação externa as emissões radioativas de radionuclídeos de cobalto-60, céσιο-137 e rádio-226, cujas características são mostradas na tabela 19.

Tabela 19. Características dos radionuclídeos mais utilizados em teleisotopoterapia.

<b>Radionuclídeo</b>	<b>Energia da radiação (MeV)</b>	<b>Tempo de meia vida (anos)</b>
Cobalto-60	1,17 e 1,33	5,3
Césio-137	0,66	30
Rádio-226	0,18 a 0,22	1620

Fonte: Okuno, E., Caldas, I.L., Chow, C. Física para Ciências Biológicas e Biomédicas. São Paulo: Harper & Row do Brasil, 1982.

**Cobaltoterapia (bomba de cobalto).** Um grama de cobalto-60 possui uma atividade de 20 Curie (Ci), o que equivale a radiação emitida por 32 g de rádio, proporcionando 33 Röentgens/minuto a 80 cm de distância. Para a aplicação do radiocobalto no tratamento do câncer utiliza-se a bomba de cobalto. A unidade para aplicação consiste em um cabeçote de chumbo montado em um suporte de aço. A fonte de cobalto está localizada no centro do cabeçote, que pode ser deslocado de forma rotatória e pode ter uma capacidade superior a 5.000 Ci, o que permite uma taxa de emissão de 160 Röentgens/minuto. O foco do sistema obtém-se com quatro blocos de chumbo que permite formar campos entre 4 por 4 e 20 por 20 cm a uma distância de 1 metro.

O céσιο-67 em fontes de 1.500 Ci utiliza-se para teleterapia de igual modo e com resultados semelhantes aos do cobalto-60.

**Braquiterapia.** Nesse caso, a fonte de radiação é colocada em contato direto ou implantado no tecido a ser tratado. Podem ser utilizados radionuclídeos como o Ítrio (<sup>90</sup>Y), Estrôncio (<sup>90</sup>Sr), Césio (<sup>137</sup>Cs), Irdíio (<sup>192</sup>Ir) e o ouro (<sup>198</sup>Au) selados dentro de recipientes em forma de tubos, agulhas ou fios metálicos. Uma das vantagens da braquiterapia é a possibilidade de se irradiar diretamente o tumor com doses altas, enquanto os tecidos vizinhos recebem quantidades pequenas de radiação, inferior à recebida quando se emprega a teleterapia.

Um tipo especial de braquiterapia usa elementos emissores de partículas beta (betaterapia). As fontes radiativas mais usadas são:

**Ítrio-90.** É um emissor de radiações beta de energia máxima de 2,27 MeV e de meia vida de 64 horas. É frequentemente utilizado na destruição de câncer de hipófise. O <sup>90</sup>Y é incorporado em uma agulha que é introduzida na hipófise.

**Irdíio-192.** A implantação local de agulhas de <sup>192</sup>Ir pode ser utilizada no tratamento de tumores do colo uterino.

**Estrôncio-90.** O <sup>90</sup>Sr, de meia vida de 28 anos, emite partículas beta com energia

máxima de 0,54 MeV. O  $^{90}\text{Sr}$  é depositado na superfície de uma placa metálica que é usada em contato com o tecido.

Na braquiterapia, o objetivo é irradiar intensa e seletivamente um tecido, causando uma mínima ou nula dose de radiação no resto do organismo. Isso pode ser alcançado, administrando diretamente um radionuclídeo em um tecido (terapia intersticial) ou uma cavidade (terapia intracavitária), aplicados temporária ou permanentemente.

Outra forma de se alcançar diretamente os tecidos com fontes radioativas é através da administração oral ou endovenosa de radionuclídeos, a denominada terapia metabólica. Nessa forma de braquiterapia, são aproveitadas as características químicas do radiofármaco, que com uma cinética *in vivo* adequada, se fixa ou penetra nas células do tecido a ser irradiado.

Em qualquer das formas de terapia, o objetivo é conseguir o efeito biológico das radiações diretamente sobre as células ou indiretamente ao provocar lesão precoce e intensa sobre os vasos (vasculite) cessando o fluxo sanguíneo essencial à nutrição do tumor. O dano subagudo sobre os vasos (endarterite) deverá curar por reparação, sendo o tecido irradiado substituído lentamente por fibrose ou cicatriz. Para provocar essa resposta utilizam-se radionuclídeos emissores de radiação de alta transferência linear de energia (LET) e de baixa penetrabilidade. Para esse fim, as partículas beta devem ser preferidas, devido ao pequeno poder de penetração, mas, em contato direto com o tecido, têm alcance e capacidade de ionização suficientes para provocar grande dano celular e tecidual, irradiando pouco o restante do organismo. Para se conseguir o efeito terapêutico desejado, deve-se utilizar doses mais altas que as usadas nos procedimentos de diagnóstico. Dessa forma, faz-se necessário planejar e executar medidas especiais de radioproteção, destinados aos pacientes, familiares, profissionais assistentes e ao público em geral.

Nessa forma de terapia não se pode assegurar um risco nulo ao paciente, sendo os radionuclídeos usados, principalmente, para o tratamento de neoplasias. Para doenças benignas são utilizados quando apresentam rendimento superior ao de outras técnicas médicas ou cirúrgicas alternativas e, em muitos casos, utilizam-se quando essas formas de tratamento fracassam.

Na terapia intersticial, utilizam-se radionuclídeos sólidos e, muitas vezes, encapsulados, sendo uma técnica aplicada em radioterapia e em medicina nuclear. Atualmente, as aplicações específicas da medicina nuclear são aquelas que usam radionuclídeos como fontes não encapsuladas para as terapias intracavitária e metabólica.

**Terapia cavitária.** Administra-se um radiofármaco por punção direta em uma cavidade natural. O ítrio-90 é utilizado com bons resultados em derrames articulares recidivantes por sinovite inflamatória crônica que não responde ao tratamento clínico. Por sua energia, o  $^{90}\text{Y}$  é usado em joelhos. Para as demais articulações são empregados outros radionuclídeos emissores de partículas beta menos energéticas, como os colóides de Rênio-186 para as articulações coxo-femorais, ombros, cotovelos, punhos e tornozelos, e o Érbio-169 para as pequenas articulações das mãos e pés.

**Terapia metabólica.** São várias as aplicações clínicas de radionuclídeos específicos em terapia metabólica, a saber:

**Iodeto de sódio-131.** Após a administração oral, os iodetos são utilizados unicamente pelo tecido tireoidiano para a produção de hormônios. Os iodetos não incor-

porados ao tecido tireoidiano são rapidamente eliminados pela urina. O  $^{131}\text{I}$  segue a mesma via metabólica que o iodo natural da dieta. Os cânceres diferenciados da tireóide, tipos folicular e papilar, conservam a capacidade de incorporar e organificar iodetos, mas com uma capacidade de captação inferior à do tecido tireoidiano normal.

O  $^{131}\text{I}$  é usado no tratamento do hipertireoidismo, para a eliminação de tecido remanescente após a cirurgia para a retirada da tireóide (tireoidectomia) por câncer diferenciado, recidiva local do tumor, infiltrações em linfonodos ou metástases à distância. No hipertireoidismo devido a bólios difusos ou adenomas tóxicos, a finalidade do tratamento é diminuir a atividade funcional da glândula, provocando depleção celular e fibrose parcial ou, no caso de adenomas, total. Como resultado do tratamento, o paciente pode normalizar a função glandular ou evoluir para o hipotireoidismo, mas, como a terapia hormonal substitutiva é de fácil manejo, não se considera como efeito colateral.

A eliminação de tecido tireoidiano remanescente após tireoidectomia por câncer diferenciado de tireóide são usadas doses altas (30 a 100 millicurie – mCi), enquanto que para tratar a recorrência da doença, as linfadenopatias infiltrativas e as metástases à distância empregam-se doses de 150 a 300 mCi. Essas doses podem ser repetidas em caso de persistência do tecido concentrante de iodetos, confirmado pela pesquisa de corpo inteiro com  $^{131}\text{I}$  ou sestamibi marcado com  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . Foram descritos efeitos secundários precoces, embora os mais frequentes sejam sintomas banais como gosto metálico na boca, inflamação das glândulas salivares (sialoadenite) e gastrite. Não existe risco importante de indução de leucemia e câncer tireoidiano anaplásico nesses pacientes, mas, devem ser evitadas doses acumuladas excessivas (500 a 800 mCi). Para doses maiores que 30 mCi devem ser adotadas medidas de radioproteção que consistem em isolar o paciente do convívio familiar e social, durante 48 a 72 horas, internando-o em quarto especialmente preparado para esse fim.

**Metaiodobenzilguanidina- $^{131}\text{I}$ .** É utilizado para o tratamento de tumores originados da crista neural (feocromocitoma maligno, paraganglioma maligno, neuroblastoma, carcinoma medular de tireóide e carcinóides metastásicos sintomáticos) que foram demonstrados em uma cintilografia prévia utilizando a MIBG- $^{131}\text{I}$ . Esse radiofármaco é administrado por via endovenosa lentamente em doses de 100 a 200 mCi. Previamente, a captação tireoidiana de iodetos deve ser bloqueada com doses altas de iodo por via oral, evitando assim a irradiação da glândula. Deve-se observar medidas de radioproteção semelhantes às usadas na terapia metabólica do câncer de tireóide. Como efeitos secundários, aparece frequentemente síndrome de irradiação aguda de tipo prodrômico e, em pacientes com metástases medulares, quadros de supressão ou aplasia medular.

**Fosfato sódico- $^{32}\text{P}$ .** É utilizado no tratamento de doenças mieloproliferativas como a policitemia Vera e a trombocitose essencial. Administra-se por via endovenosa doses de 3 a 5 mCi de solução de fosfato de sódio- $^{32}\text{P}$ . Os pacientes devem ser reavaliados em 10 a 12 semanas. As doses podem ser repetidas a cada 6 meses até se obter uma resposta satisfatória no hemograma. A dose não pode exceder 6 mCi durante qualquer período de 6 meses. A única medida de radioproteção necessária é evitar a contaminação com urina em razão da excreção renal do  $^{32}\text{P}$  durante as primeiras 48 horas após a administração.

**Doença óssea de origem metastática.** Os ossos são mais frequentemente acometidos por metástases de carcinomas de mama, próstata, brônquios, rins e de tireóide, que podem causar dores ósseas intensas, com diminuição da qualidade de vida dos pacientes. O objetivo da terapia com radionuclídeos é o alívio da dor provocada por metástases ósseas que já não respondem a outro tipo de tratamento.

O cloreto de estrôncio-<sup>89</sup>Sr foi o primeiro radionuclídeo empregado para a terapia da dor óssea metastática. O estrôncio-89 é um emissor de partículas beta de 1.463 MeV de energia. No organismo, comporta-se como um análogo do cálcio participando ativamente no metabolismo ósseo. O radionuclídeo se fixa aos focos de metástases, onde se concentra em quantidade oito a dez vezes maior que no osso sadio, permanecendo durante um longo tempo irradiando as metástases, o que provoca diminuição da dor óssea e, como consequência, a melhoria da qualidade de vida em 79% dos pacientes com câncer de próstata e em 83% com metástases de câncer de mama. Para se submeterem ao tratamento com estrôncio-89 os pacientes devem ter múltiplas metástases que provocam dores ósseas incapacitantes e contagens de plaquetas e leucócitos no sangue periférico superiores a 60.000 e 2.400 por mm<sup>3</sup>, respectivamente. Todos os pacientes que não respondem a terapia hormonal para metástases de carcinoma de próstata são candidatos à terapia com estrôncio-89. A dose efetiva é de 40 a 60 µCi/kg de peso, com dose total geralmente de 4 mCi. Os pacientes podem receber dose adicional em 10 semanas.

Outros agentes terapêuticos para a dor óssea de origem metastática são o Rênio-186 e o Samário-153. Administrados nas formas de hidróxi-etileno-difosfonato (HEDP) de rênio-186 e de etileno-diamino-tetrametileno-difosfonato (EDTMP) de samário-153 fixam-se seletivamente ao esqueleto com alta afinidade pelas lesões ósseas metastáticas.

**Artrite reumatóide.** A artrite reumatóide causa inflamação sinovial crônica que pode levar a formação de *pannus* e destruição eventual da cartilagem articular. Em caso de não resposta ao tratamento medicamentoso, uma opção terapêutica é a sinovectomia por radiação. Agentes particulados de Ytrio-90, um radionuclídeo emissor de radiação beta pura de 2,3 MeV de energia, podem ser injetados na forma de macroagregado de oxalato de cálcio e hidróxido férrico nas articulações afetadas para irradiar e destruir a sinóvia, induzindo a melhora clínica do paciente.

## BIBLIOGRAFIA

- ALGARA, M., VALLS, A. *Radiobiologia*. Madrid: Ediciones Eurobook, 1994.
- ARAMBURU, X.O., BISBAL, J.J. *Las Radiaciones Ionizantes. Su Utilización y Riesgos*. Barcelona: Ediciones UPC, 1994.
- BITELLI, T (org). *Física e Dosimetria das Radiações*. 2 ed. São Paulo: Editora Atheneu, 2006.
- CICARDO, V.H. *Física Biológica*. Buenos Aires: Lopez Libreros Editores, 1960.
- EARLY, P.J., SODEE, D.B. *Principles and Practice of Nuclear Medicine*. 2 ed. St. Louis: Mosby, 1995.
- GARCIA, E.A.C. *Biofísica*. São Paulo: Sarvier, 1997.
- KUMAR, V, ABBAS, A.K, FAUSTO, N (eds). *Robbins e Cotran. Patologia – Bases Patológicas das Doenças*. 7 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.
- LEÃO, M.A.C. *Princípios de Biofísica*. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1982.
- OKUNO, E., CALDAS, I.L., CHOW, C. *Física para Ciências Biológicas e Biomédicas*. São Paulo: Harper & Row do Brasil, 1982.
- OREAR, J. *Física*. 2ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1977.
- PIQUERAS, J.L.P., TEJEDOR, J.P.L., ARIZ, I.S., MARTINEZ-AEDO, J.L., MAYORGA, A.S. *Medicina Nuclear Clínica*. Madrid: Editorial Marban, 1994.
- ROCHA, A.F.G, HARBERT, J.C. *Medicina Nuclear Bases*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1979.
- SLABAUGH, W.H., PARSONS, T.D. *Química Geral*. 2 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1982.
- THOM, A.F., SMANIO, P.E.P. *Medicina Nuclear em Cardiologia: da Metodologia à Clínica*. São Paulo: Atheneu, 2007.
- THRALL, J.H., ZIESSMAN, H.A. *Medicina Nuclear*. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2001.
- WEIS, J., ABRAHAMS, P.A. *Atlas de Anatomia Humana em Imagem*. 3 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.