

# *Noções Básicas de Proteção Radiológica*

Instituto de Pesquisas Energéticas  
e Nucleares



**2002**

# **Noções Básicas de Proteção Radiológica**

*Diretoria de Segurança Nuclear  
Divisão de Desenvolvimento de Recursos Humanos*

**Autores:**

*Barbara P. Mazzilli*

*Christovam R. Romero Filho*

*Yasko Kodama*

*Fábio Fumio Suzuki*

*José Claudio Dellamano*

*Julio T. Marumo*

*Matias Puga Sanches*

*Roberto Vicente*

*Sandra A. Bellintani*

**Coordenação geral:  
MSc. Sandra A. Bellintani  
Fátima das Neves Gili**

***agosto de 2002***

# **Índice**

	<b>Página</b>
1 Radioproteção e evolução da tecnologia nuclear	2
2 Radiações e radioatividade	3
2.1 Elementos e átomos	3
2.2 Conceito de radioatividade	6
2.3 Conceito de atividade	8
2.4 Decaimento radioativo	9
2.5 Mecanismos de transferência de energia	9
3 Fontes naturais e artificiais de radiação	10
4 Aplicações das radiações ionizantes	12
4.1 Aplicações na medicina	12
4.2 Aplicações na indústria	13
4.3 Aplicações na agricultura	14
4.4 Geração de energia	15
5 Efeitos biológicos das radiações ionizantes	15
5.1 Noções de biologia	16
5.2 Mecanismo de ação das radiações ionizantes	16
5.3 Características gerais dos efeitos biológicos	16
5.4 Classificação dos efeitos biológicos	17
6 Grandezas e unidades para uso em radioproteção	19
6.1 Atividade	19
6.2 Avaliação de dose	20
7 Princípios de proteção radiológica	23
7.1 Justificação	23
7.2 Limites de dose	23
7.3 Otimização	25
8 Modos de exposição e princípios de proteção	25
8.1 Tipos de fontes	25
8.2 Modos de exposição	26
8.3 Fatores de proteção radiológica	27
8.4 Controle de acesso em áreas restritas	30
9 Detecção e medida das radiações	30
9.1 Detectores	31
9.2 Dosímetros	31
9.3 Calibração de detectores	32

10	Programas e procedimentos de monitoração	32
10.1	Monitoração individual	33
10.2	Monitoração de área	34
10.3	Sinais e avisos de radiação	35
10.3	Classificação das áreas de trabalho	35
11	Contaminação radioativa e procedimentos de descontaminação	36
11.1	Prevenção e controle da contaminação radioativa	36
11.2	Descontaminação de superfície	37
1.3	Procedimentos de descontaminação	38
12	Transporte de materiais radioativos	39
12.1	Aplicação das exigências legais	40
12.2	Embalados	40
12.3	Informações exigidas no transporte de materiais radioativos	40
12.4	Documentos de expedição	42
13	Gerência de rejeitos radioativos	42
13.1	Origem dos rejeitos radioativos	42
13.2	Gerência dos rejeitos radioativos	43
13.3	Tratamento dos rejeitos radioativos	45
13.4	Confinamento	47
13.4	Panorama dos rejeitos radioativos no Brasil	48
14	Controle radiológico ambiental	48
14.1	Programa de monitoração ambiental	49
14.2	Comportamento dos radionuclídeos no ecossistema	51
15	Emergências Radiológicas	51
15.1	Plano de emergência radiológica	51
15.2	Procedimentos de emergência	52
15.3	Procedimentos básicos de emergência	54

## 1 RADIOPROTEÇÃO E EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA NUCLEAR

A radioatividade e as radiações ionizantes não são percebidas naturalmente pelos órgãos dos sentidos do ser humano, diferindo-se da luz e do calor. Talvez seja por isso que a humanidade não conhecia sua existência e nem seu poder de dano até os últimos anos do século XIX, embora fizessem parte do meio ambiente.

Em 1895, o pesquisador alemão Wilhelm Conrad Roentgen descobriu os raios X, cujas propriedades despertaram o interesse da classe médica. Os raios X atravessavam o corpo humano, provocavam fluorescência em determinadas substâncias e impressionavam chapas fotográficas. Eles permitiam obter imagens do interior do corpo. Sua aplicação foi rápida, pois em 1896 foi instalada a primeira unidade de radiografia diagnóstica nos Estados Unidos.

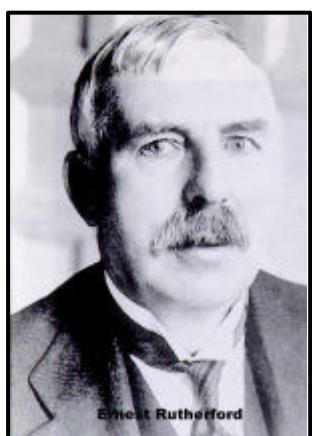


Naquele mesmo ano, em 1896, Antoine Henri Becquerel anunciou que um sal de urânio com que ele fazia seus experimentos emitia radiações espontaneamente. Mais tarde, mostrou que essas radiações apresentavam características semelhantes às dos raios X, isto é, atravessavam materiais opacos, causavam fluorescência e impressionavam chapas fotográficas.

As pesquisas e as descobertas sucederam-se. O casal Pierre e Marie Curie foi responsável pela descoberta e isolamento dos elementos químicos naturalmente radioativos - o polônio e o rádio.



As idéias a respeito da constituição da matéria e dos átomos foram sendo elucidadas pelos estudos e experimentos que se seguiram às descobertas da radioatividade e das interações das radiações com a matéria. Os conhecimentos obtidos por muitos pesquisadores e cientistas contribuíram para o desenvolvimento da física atômica e nuclear, mecânica quântica e ondulatória.



Podem ser citados Ernest Rutherford, Niels Bohr, Max Planck, Louis de Broglie, Albert Einstein, Enrico Fermi entre outros.

Em 1939 já se sabia que o átomo podia ser rompido e que uma grande quantidade de energia era liberada na ruptura, ou seja, na fissão do átomo. Essa energia foi designada como "energia atômica" e mais tarde como "energia nuclear". Esses conhecimentos científicos possibilitaram a construção de reatores nucleares e explosivos nucleares.

Lamentavelmente, ao final dos anos 30 e início dos anos 40, em vista da situação mundial, muitos países estavam envolvidos na 2ª Guerra Mundial. A busca da hegemonia nuclear levou à construção da bomba atômica.

Em 1945, a humanidade tomou conhecimento do poder destruidor das bombas atômicas lançadas nas cidades de Hiroshima e Nagasaki. O efeito das bombas não se restringiu à explosão propriamente dita e ao calor gerado por ela, mas atingidas morreram posteriormente pelos efeitos causados pelas radiações ionizantes.

Com o término da 2ª Guerra Mundial, houve uma preocupação em se aplicar a energia proveniente do núcleo do átomo em benefício da humanidade. As alternativas eram a construção de usinas elétricas e a aplicação de materiais radioativos para melhorar as condições de vida da população, principalmente, na área da saúde.

Atualmente, nos anos que prenunciam o século XXI, a sociedade continua utilizando os materiais radioativos e a energia nuclear nas mais diversas áreas do conhecimento.

A história do desenvolvimento da energia nuclear foi acompanhada também por outros acontecimentos desagradáveis, além das explosões de Hiroshima e Nagasaki. Esses acontecimentos ocorreram quando não se tinha ainda o entendimento adequado sobre os efeitos biológicos das radiações ionizantes. Muitos radiologistas morreram ao redor de 1922 em consequência dos danos causados pelas radiações.

Operárias que trabalhavam pintando painéis e ponteiros luminosos de relógio em New Jersey, entre 1917 e 1924, apresentaram lesões nos ossos e muitas delas morreram. Essas lesões foram provocadas pelas radiações emitidas pelos sais de rádio, ingeridos pelas operárias, durante o seu trabalho.

Estes fatos despertaram a atenção da comunidade científica e fizeram com que fosse criado um novo ramo da ciência, a proteção radiológica, com a finalidade de proteger os indivíduos, regulamentando e limitando o uso das radiações em condições aceitáveis.

Em 1928, foi estabelecida uma comissão de peritos em proteção radiológica para sugerir limites de dose e outros procedimentos de trabalho seguro com radiações ionizantes. Esta comissão, a ICRP - International Commission on Radiological Protection, ainda continua como um órgão científico que elabora recomendações sobre a utilização segura de materiais radioativos e de radiações ionizantes.

Posteriormente, outros grupos foram criados, com o objetivo de aprofundar os estudos neste campo. Como exemplos têm-se o UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - criado em Assembléia Geral da ONU em 1955 e a IAEA - International Atomic Energy Agency - fundada em 1957 como órgão oficial da ONU, com sede em Viena. A IAEA promove a utilização pacífica da energia nuclear pelos países membros e tem publicado padrões de segurança e normas para manuseio seguro de materiais radioativos, transporte e monitoração ambiental.

No Brasil, a utilização das radiações ionizantes e dos materiais radioativos e nucleares é regulamentada pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

Para trabalhar com radiações ionizantes e com materiais radioativos, são necessários conhecimento e responsabilidade.

## 2 RADIAÇÕES E RADIOATIVIDADE

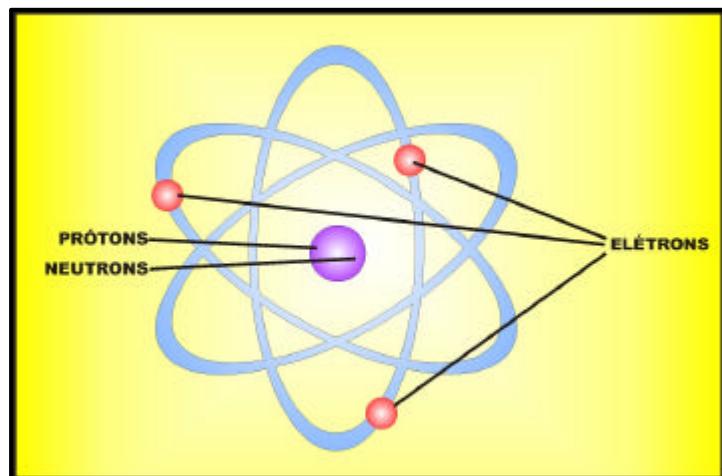
### 2.1 Elementos e átomos

Os químicos descobriram, há muito tempo atrás, que todos os tipos de substâncias encontradas na natureza eram combinações de um número relativamente pequeno de matéria química básica, denominada elemento.

O sal de cozinha, por exemplo, é formado por uma combinação dos elementos sódio e cloro; a água que bebemos é formada por uma combinação dos elementos hidrogênio e oxigênio.

Esses elementos, por sua vez, são constituídos por átomos. Os átomos formam a menor parte dos elementos e por muito tempo foram considerados indivisíveis, mas sabe-se agora que os átomos possuem uma estrutura, e que variações nesta estrutura dão origem à radioatividade.

Embora existam pelo menos 106 elementos conhecidos, 98% do planeta é constituído basicamente por seis elementos principais: ferro, oxigênio, magnésio, silício, enxofre e níquel. Pode-se verificar na tabela periódica dos elementos químicos (tabela 1) que os 92 primeiros são elementos de ocorrência natural, os demais são produzidos pelo homem e são radioativos.



A menor unidade de um elemento é o átomo. O átomo possui todas as propriedades físicas e químicas necessárias para se identificar como um elemento particular. Os átomos são compostos de pequenas partículas as quais incluem os prótons, os nêutrons e os elétrons. Os prótons e os nêutrons são partículas pesadas que são encontradas no núcleo do átomo. A diferença básica entre um próton e nêutron é a carga elétrica associada. Os prótons possuem uma carga positiva e os nêutrons não possuem carga. Os elétrons são bem menores, possuindo carga negativa.

## TABELA PERIÓDICA DOS ELEMENTOS

Tabela 1 - Tabela periódica dos elementos químicos

Os elétrons encontram-se em órbita ao redor do núcleo, de maneira similar à órbita dos planetas ao redor do sol, produzindo o que frequentemente é descrito como uma nuvem ao redor do núcleo. A extensão das órbitas dos elétrons determina o tamanho de um átomo. Se um átomo pudesse ser ampliado de tal maneira que o núcleo pudesse ter o tamanho de uma bola de bilhar, o elétron mais externo seria um pequeno ponto quase 1,5 km distante. Os prótons e nêutrons são muito mais pesados que os elétrons, sendo que o número de prótons mais nêutrons no núcleo determina quanto pesado cada átomo é e corresponde a aproximadamente 99,98% do peso total do átomo. Cada átomo possui um número diferente de elétrons nos orbitais ao redor do núcleo e é este fato que resulta em seu diferente comportamento químico.

### 2.1.1 Número de massa e número atômico

Todos os elementos químicos são representados por um símbolo; por exemplo, o alumínio tem como símbolo Al, o símbolo do ouro é Au e o do urânio é U. Além disso, todo átomo de um elemento químico possui dois números associados que o identificam. Esses números são chamados de número atômico e número de massa.

O número atômico, cujo símbolo é Z, corresponde ao número de prótons presentes no núcleo do átomo; por exemplo o alumínio (Al) possui em seu núcleo 13 prótons portanto seu número atômico (Z) é 13. O urânio possui 92 prótons e seu número atômico é 92.

Uma vez que a massa de um átomo encontra-se praticamente concentrada no núcleo e sabendo-se que os prótons e os nêutrons encontram-se no núcleo, o número de massa é definido pela soma destas partículas. Portanto, o número de massa, cujo símbolo é A, é definido como sendo a soma do número de prótons e nêutrons presentes no núcleo.

O número de massa de um átomo indica quanto pesado ele é em relação a um outro átomo. Por exemplo, pode-se afirmar que um átomo de alumínio é mais leve que um átomo de ouro porque a soma do número de prótons e nêutrons do átomo de alumínio é 27 (13 prótons e 14 nêutrons) e a soma do número de prótons e nêutrons do átomo de ouro é 197 ( 79 prótons e 116 nêutrons).

Para que um átomo seja eletricamente neutro, o número de prótons no núcleo tem que ser igual ao número de elétrons nos orbitais ao redor do núcleo. O número de elétrons caracteriza o comportamento químico dos elementos. A representação genérica de qualquer átomo é dada por:



onde

X é o símbolo químico do elemento

Z é o número atômico

A é o número de massa.

Portanto, para alumínio, ouro e urânio, tem-se, respectivamente:



### 2.1.2 Conceito de isótopos

Supondo a adição de um nêutron extra no núcleo de alumínio, de maneira que se tenha 15 nêutrons e 13 prótons no núcleo do átomo, o novo número de massa passa a ser 28 enquanto que o número atômico que é igual ao número de elétrons nos orbitais ao redor do núcleo permanece inalterado, igual a 13, e o átomo, como um todo, comporta-se quimicamente como o alumínio. As duas espécies diferentes do átomo do alumínio são denominadas isótopos do alumínio. Pode-se dizer então que isótopos são átomos que possuem o mesmo número atômico (átomos de um mesmo elemento químico), mas que possuem números de massa diferentes. Esses átomos possuem o mesmo comportamento químico, porém um é mais pesado que o outro.

## 2.2 Conceito de radioatividade

Pode-se encontrar átomos com o mesmo número de massa (A) e com diferentes números de prótons (Z) e de nêutrons (n), ou seja, átomos com mesmo número de massa (A) mas com uma razão entre o número de prótons (Z) e nêutrons (n), razão  $Z / n$ , diferentes.

Por exemplo, pode-se citar o silício ( $^{28}\text{Si}$ ), o alumínio ( $^{28}\text{Al}$ ), e o fósforo ( $^{28}\text{P}$ ), todos com mesmo número de massa (A = 28), porém o silício ( $^{28}\text{Si}$ ), contém em seu núcleo 14 nêutrons e 14 prótons ( $Z / n = 14/14$ ), enquanto o alumínio, ( $^{28}\text{Al}$ ), contém em seu núcleo 15 nêutrons e 13 prótons ( $Z / n = 13/15$ ) e o fósforo, ( $^{28}\text{P}$ ), contém em seu núcleo 15 prótons e 13 nêutrons ( $Z / n = 15/13$ ).

Para cada número de massa existe somente uma razão  $Z / n$  para a qual o núcleo é estável, ou seja, não radioativo. Todos os outros átomos com mesmo número de massa, porém com razão  $Z / n$  diferentes são instáveis, ou seja, radioativos, e buscam a estabilidade emitindo radiação e transformando-se em outro átomo.

No exemplo citado, o silício ( $^{28}\text{Si}$ ), é o átomo estável, enquanto o alumínio ( $^{28}\text{Al}$ ) e o fósforo ( $^{28}\text{P}$ ) são radioativos e buscam a estabilidade, transformando-se (decaindo) em silício ( $^{28}\text{Si}$ ).

Tudo que existe na natureza tende a permanecer num estado estável. Os átomos instáveis passam por um processo que os tornam mais estáveis. Este processo envolve a emissão do excesso de energia do núcleo e é denominado radioatividade ou decaimento radioativo. Portanto, a radioatividade é a alteração espontânea de um tipo de átomo em outro com a emissão de radiação para atingir a estabilidade.

A energia liberada pelos átomos instáveis, radioativos, é denominada radiação ionizante. Os termos *radiação* e *radioativo* frequentemente são confundidos. Deve-se ter sempre em mente que estes dois termos são distintos: átomos radioativos são aqueles que emitem radiação.

Existem três tipos principais de radiação ionizante emitida pelos átomos radioativos:

- Alfa -  $\alpha$
- Beta -  $\beta$
- Gama -  $\gamma$

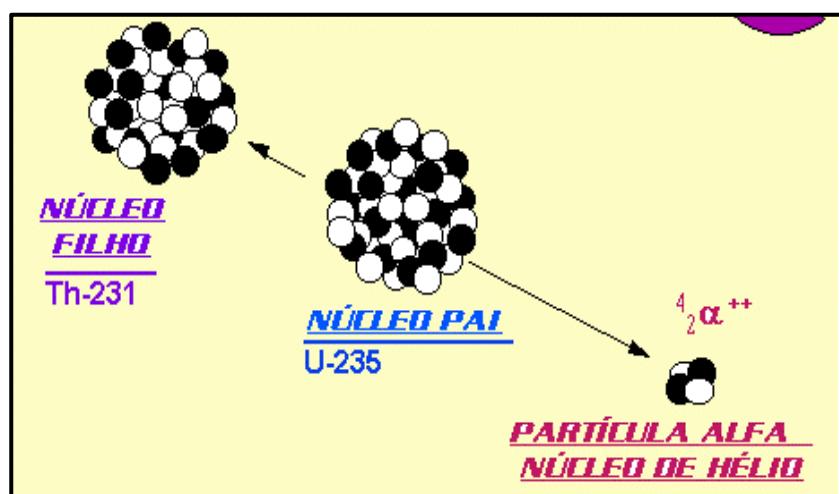
As radiações alfa e beta são partículas que possuem massa e são eletricamente carregadas, enquanto os raios gama são ondas eletromagnéticas.

### 2.2.1 Radiação alfa

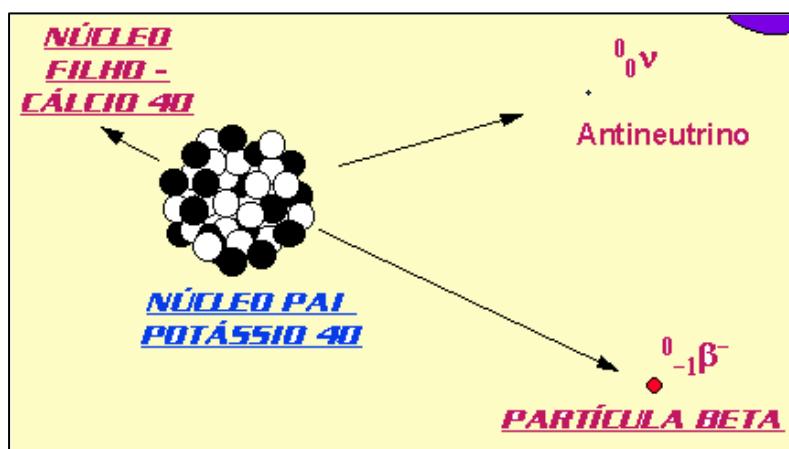
Dentre as radiações ionizantes, as partículas alfa são as mais pesadas e de maior carga e por isso elas são menos penetrantes que as partículas beta e a radiação gama. As partículas alfa são núcleos do átomo do gás hélio e são completamente barradas por uma folha comum de papel e seu alcance no ar não ultrapassa mais que 10 a 18 cm.

Mesmo a partícula alfa com maior alcance (com maior energia) não consegue atravessar a camada morta da pele do corpo humano.

Portanto, a partícula alfa originada fora do corpo do indivíduo não oferece perigo à saúde humana. Por outro lado, se o material radioativo emissor de partícula alfa estiver dentro do corpo ele será uma das fontes mais danosas de exposição à radiação. A partícula alfa quando emitida internamente ao corpo do indivíduo depositará sua energia em uma pequena área, produzindo grandes danos nesta área.



## 2.2.2 Radiação beta

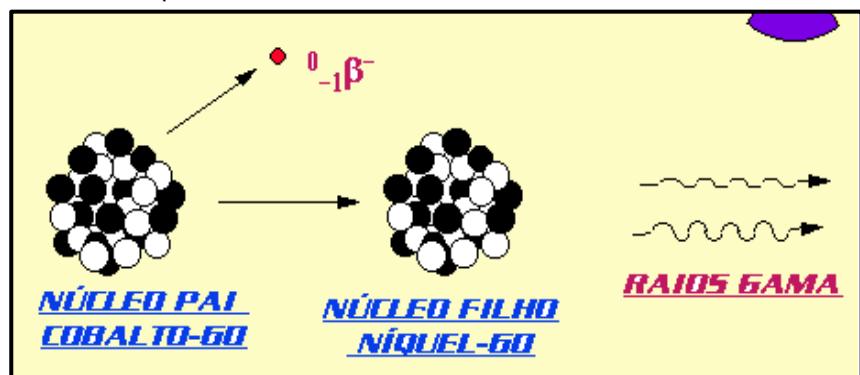


materiais radioativos depositados internamente ao corpo ou quando irradiam diretamente a pele e o cristalino dos olhos.

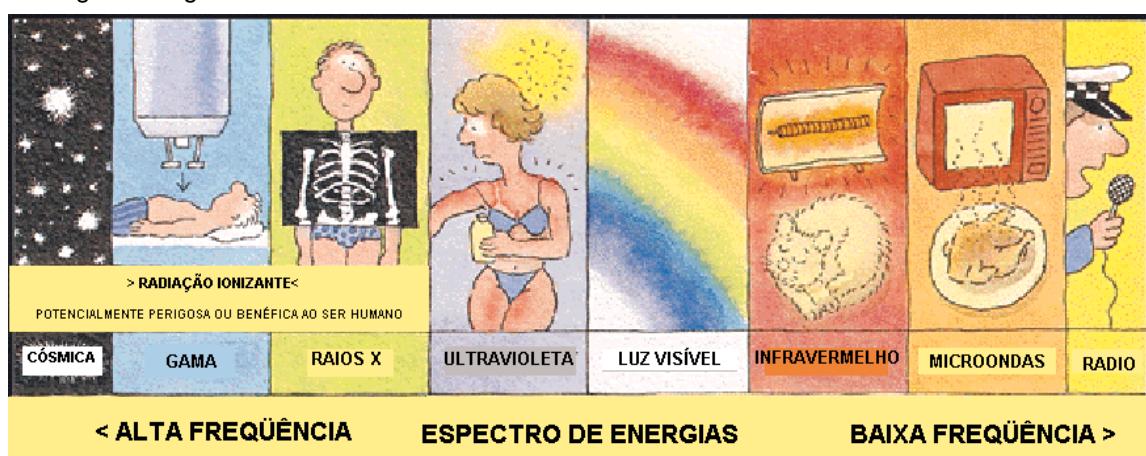
## 2.2.3 Radiação gama

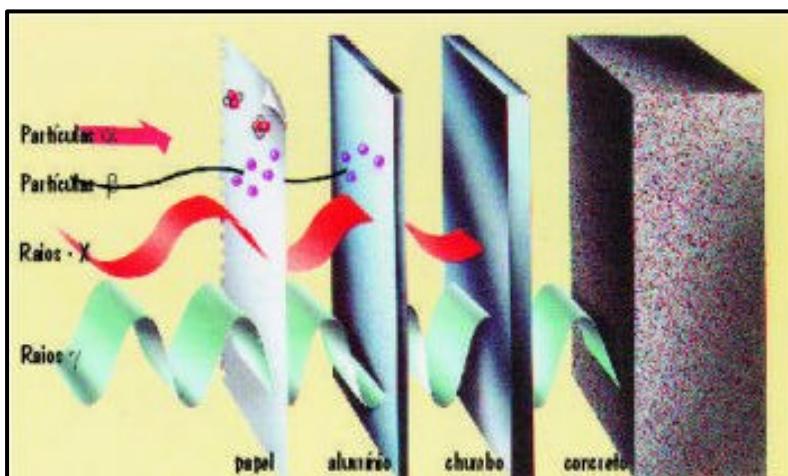
Os raios gama não possuem nem massa nem carga e por isso têm um poder de penetração infinito, podendo atingir grandes distâncias no ar e atravessar vários tipos de materiais.

A radiação gama ou raios gama são radiações eletromagnéticas, tais como a luz, ondas de rádio e microondas. As características físicas da radiação eletromagnética incluem o comprimento e a frequência de onda. Cada tipo de radiação eletromagnética possui comprimento e frequência de onda característicos. Pela medida destas características, pode ser identificado o tipo de radiação.



As principais diferenças entre a radiação gama e estas formas mais familiares de radiação eletromagnética é que a radiação gama é originada no núcleo do átomo, possui pequeno comprimento de onda e alta frequência, conforme figura a seguir.





As radiações ionizantes possuem poder de penetração diferentes na matéria, como ilustrado na figura ao lado. Pode-se verificar que as radiações eletromagnéticas ( $\gamma$  e X) possuem um poder de penetração muito maior do que das partículas alfa e beta. A partícula alfa não consegue ultrapassar uma folha de papel, enquanto a partícula beta atravessa o papel, mas pode ser barrada completamente por uma folha fina de alumínio.

## 2.2.4 Radiação X

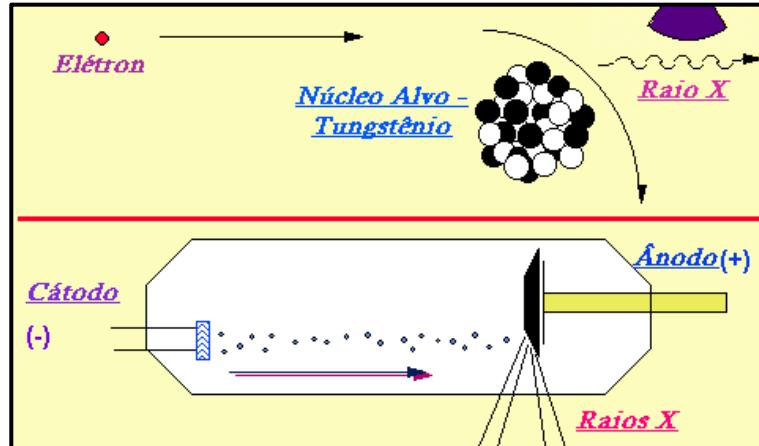
Nos itens anteriores foram citados os três tipos principais de radiação ionizante. Além desses três tipos, será ainda citado o raio X, por sua ampla utilização, principalmente na medicina.

Os raios X são semelhantes aos raios  $\gamma$  quanto as suas propriedades, ou seja, são ondas eletromagnéticas de alta frequência e pequeno comprimento de onda. A principal diferença entre eles é que os raios  $\gamma$  são produzidos no núcleo do átomo enquanto os raios X podem ter origem na atmosfera (raio X característico) ou por meio do fremento de elétrons (raio X artificial). Todos os equipamentos utilizados para fins médicos e industriais produzem raios X artificiais.

Os raios X artificiais são gerados a partir da colisão de um feixe de elétrons contra um alvo metálico. Quando esses elétrons se chocam contra o alvo, sofrem um processo de desaceleração e liberam sua energia na forma de calor e raio X.

As máquinas geradoras de radiação X artificiais são equipamentos elétricos de alta tensão que podem ser desligadas, deixando de produzir os raios X. Esta característica distingue o raio X das fontes radioativas como por exemplo as fontes emissoras de radiação gama que emitem radiação espontânea e constantemente.

Todo material que emite radiação ionizante deve vir sinalizado com o símbolo universal de radiação apresentado no capítulo 10.

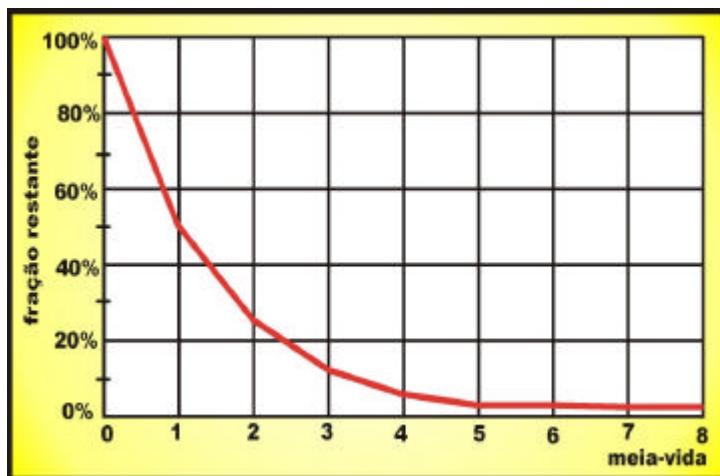


## 2.3 Conceito de atividade

Atividade é a grandeza utilizada para expressar a quantidade de um material radioativo e representa o número de átomos que se desintegram, por unidade de tempo. A unidade empregada é o bequerel (Bq). Uma taxa de desintegração de 1 desintegração por segundo, 1 dps, é definida como sendo igual a 1 Bq.

Antigamente era utilizada uma unidade de atividade chamada de curie (Ci), que equivale a 37 bilhões de dps ou  $3,7 \times 10^{10}$  Bq.

## 2.4 Decaimento radioativo



A atividade de uma amostra radioativa diminui ou decai com uma taxa fixa que é uma característica de cada radionuclídeo. O tempo necessário para que esta atividade diminua para a metade do seu valor inicial é denominado de meia-vida física ( $T_{1/2}$ ). Por exemplo, o  $^{131}\text{I}$  tem uma meia-vida física de aproximadamente 8 dias. Uma atividade de 1000 Bq de  $^{131}\text{I}$  terá decaído para 500 Bq após 8 dias, para 250 Bq após 16 dias, para 125 Bq após 24 dias e assim sucessivamente. A figura ao lado ilustra a quantidade de material radioativo após cada período de uma meia-vida.

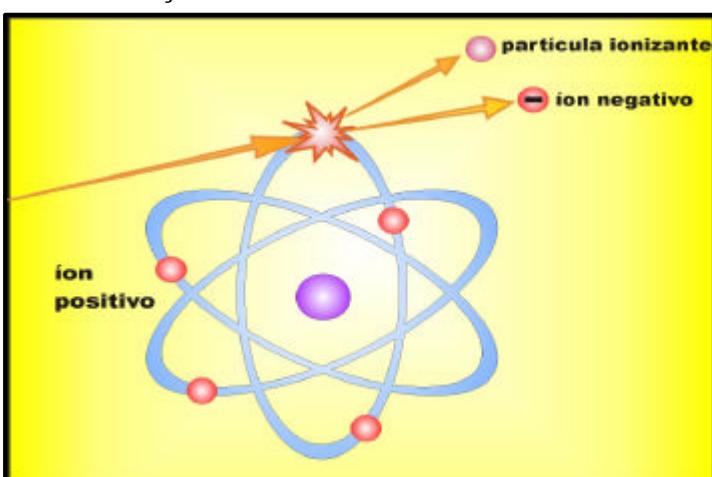
## 2.5 Mecanismos de transferência de energia

Ao atravessar um material (gás, líquido ou sólido), as partículas alfa ou beta e as radiações eletromagnéticas, raios X e raios gama, cedem parte ou toda sua energia para os átomos do material. Essa transferência de energia das radiações para os materiais ocorre principalmente por excitação ou ionização, processos esses que serão explicados mais adiante.

O mecanismo de absorção da energia das radiações é de importância fundamental no campo de radioproteção devido às seguintes razões:

- A absorção pelos tecidos do corpo pode dar origem a danos biológicos
- A absorção pelos materiais é o princípio empregado na detecção da radiação
- O grau de absorção e o tipo de interação da radiação nos materiais são os fatores principais na escolha de blindagens.

### 2.5.1 Ionização



Ionização é o processo que resulta da remoção de um elétron de um átomo ou molécula, deixando-o com uma carga positiva. O resultado deste processo é a criação de um par de íons composto de um elétron negativo e um átomo ou molécula com carga positiva. Uma molécula pode permanecer intacta ou ser rompida, dependendo se o elétron retirado é ou não fundamental para a ligação molecular.

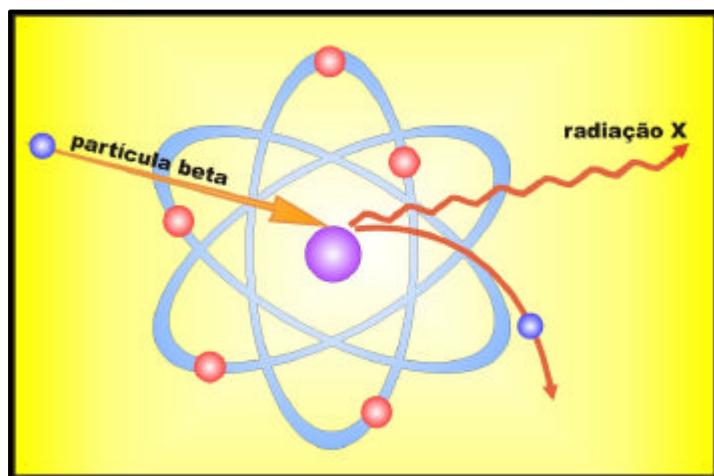
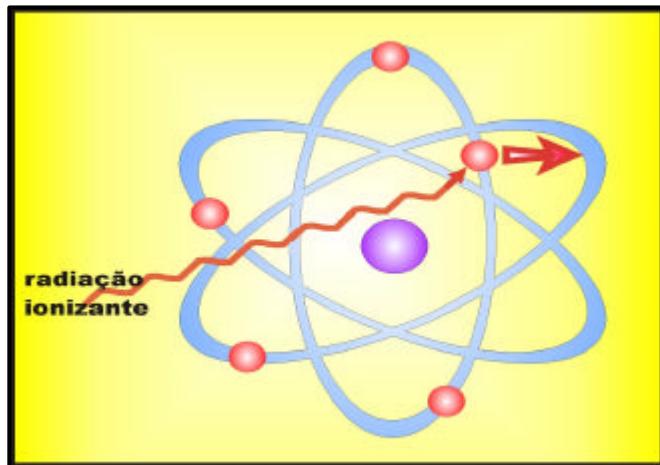
A figura ao lado apresenta esquematicamente uma partícula ionizante liberando um elétron da camada L.

### 2.5.2 Excitação

O processo de excitação pode se dar pela interação da radiação com um elétron ou com o núcleo de um átomo.

A excitação de um elétron se dá quando a radiação promove este elétron para um nível de energia mais elevado, ou seja, transfere o elétron de uma camada eletrônica mais interna para uma camada eletrônica mais externa. O elétron permanece ligado ao átomo e não são produzidos íons.

A figura ao lado mostra esquematicamente uma partícula alfa interagindo com um elétron de uma camada mais interna e transferindo-o para uma camada mais externa de um átomo, deixando este átomo em um estado excitado.



A excitação nuclear é qualquer processo que adiciona energia a uma partícula do núcleo de um átomo, de modo que esta ocupe um estado energético superior. O núcleo continua a possuir o mesmo número de partículas nucleares e pode continuar com o mesmo comportamento químico.

A figura ao lado mostra o efeito da interação de uma partícula beta com um núcleo pesado.

## 3 FONTES NATURAIS E ARTIFICIAIS DE RADIAÇÃO

Os seres humanos e seu ambiente têm sido expostos à radiação proveniente de fontes naturais e artificiais. Essas radiações não são diferentes entre si, seja na sua forma, ou nos seus efeitos.

A radiação natural é inevitável e tem sido recebida pelo homem e seu ambiente, ao longo de toda a sua existência. Essa radiação provém do cosmo (radiação cósmica), do solo, da água e do ar (origem terrestres). As tabelas 2 e 3 apresentam alguns radionuclídeos de origem cósmica e terrestre. Além disso, existem também algumas fontes de radiação internas ao corpo humano.

Tabela 2- Radionuclídeos provenientes do cosmo

Nuclídeo	Símbolo	Meia-vida	Fonte	Atividade natural
Carbono-14	$^{14}\text{C}$	5730 anos	Interações entre raios cósmicos, $^{14}\text{N}(\text{n},\text{p})^{14}\text{C}$	0,22 Bq / g
Trítio	$^3\text{H}$	12,3 anos	Interações dos raios cósmicos com N e O; fragmentação dos raios cósmicos, $^6\text{Li}(\text{n},\alpha)^3\text{H}$	$1,2 \times 10^{-3}$ Bq / kg
Berílio-7	$^7\text{Be}$	53,28 dias	Interações dos raios cósmicos com N e O	0,01Bq / kg

Tabela 3 - Radionuclídeos naturais de origem terrestre

Nuclídeo	Símbolo	Meia-vida	Atividade natural
Urânio-235	$^{235}\text{U}$	$7,04 \times 10^8$ anos	48.000 Bq / tonelada de rocha
Urânio-238	$^{238}\text{U}$	$4,47 \times 109$ anos	2.300 Bq / tonelada de rocha
Tório-232	$^{232}\text{Th}$	$1,41 \times 10^{10}$ anos	6.500 a 80.000 Bq / tonelada de rocha
Rádio-226	$^{226}\text{Ra}$	$1,60 \times 10^3$ anos	16 Bq / kg em pedras calcárias e 48 Bq / kg em rochas ígneas ou magmáticas.
Radônio-222	$^{222}\text{Rn}$	3,82 dias	Gás nobre cuja concentração média anual no ar varia, dependendo do local, de 0,6 Bq/m <sup>3</sup> a 28 Bq/m <sup>3</sup>
Potássio-40	$^{40}\text{K}$	$1,28 \times 10^9$ anos	0,037 a 1,1 Bq / g de solo

Atualmente sabe-se que aproximadamente metade da radiação a qual o homem está exposto, provém da radiação cósmica. Há certos lugares que recebem mais radiação cósmica do que outros, como por exemplo as regiões polares. Verifica-se também que a intensidade dessa radiação aumenta com o aumento da altitude.

As fontes terrestres (solo, água) de radiação são responsáveis por uma outra parte da radiação natural a qual o homem está exposto. A radiação causada pelas fontes terrestres provém dos materiais radioativos que se encontram distribuídos no solo e nas rochas. Os níveis de radiação terrestre diferem de lugar para lugar, já que as concentrações destes materiais na crosta terrestre podem variar.



O maior nível de radiação natural conhecido no mundo é verificado em Kerala, na Índia, níveis comparáveis de radiação ocorrem no Brasil, Irã e Sudão. Nenhum efeito adverso à saúde, decorrente de doses de radiação natural, tem sido observado.

A partir da descoberta dos raios X em 1895, uma série de avanços científicos ocorreram no campo da energia nuclear, o que levou o homem a produzir artificialmente vários materiais radioativos e a aprender a utilizar a energia do átomo para os mais variados propósitos: medicina, indústria, agricultura, pesquisas, geração de energia elétrica e para fins bélicos.

Atualmente, a medicina é responsável pela maior parte da exposição humana às fontes artificiais de radiação. A tabela 4 mostra alguns exemplos destes materiais radioativos.

Tabela 4 - Materiais radioativos produzidos artificialmente

Nuclídeo	Símbolo	Meia-vida
Iodo-131	$^{131}\text{I}$	8,04 dias
Cobalto-60	$^{60}\text{Co}$	5,27 anos
Césio-137	$^{137}\text{Cs}$	30,17 anos
Estrôncio-90	$^{90}\text{Sr}$	28,78 anos
Tecnécio-99	$^{99}\text{Tc}$	$2,11 \times 10^5$ anos
Plutônio-239	$^{239}\text{Pu}$	$2,41 \times 10^4$ anos

A radiação natural contribui com aproximadamente 81% da dose anual recebida pela população e os 19% restantes advêm das fontes artificiais de radiação. Na figura ao lado pode-se observar que a maior parte (55%) da dose anual por fontes naturais de radiação é proveniente do radônio que está presente, principalmente, nos materiais de construção. No caso das doses provenientes de fontes artificiais (19%) a maior contribuição é devida a exposição ao raio X para fins médicos. Pode-se verificar também que as doses decorrentes do ciclo do combustível nuclear para obtenção de energia elétrica são muito pequenas, quando comparadas com as demais.

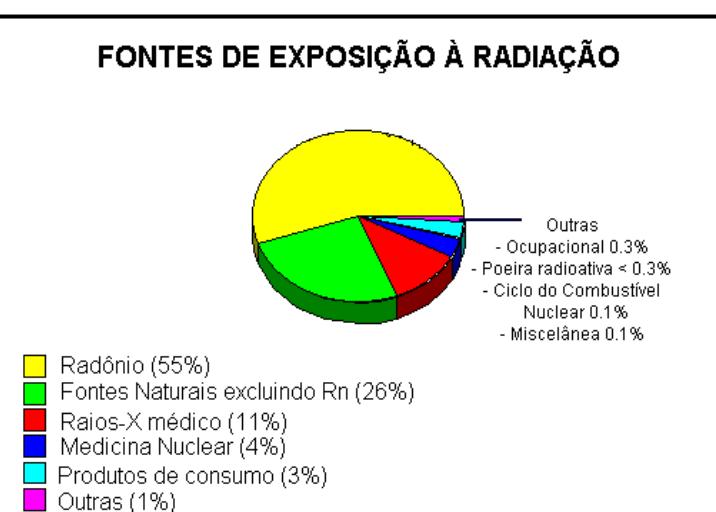
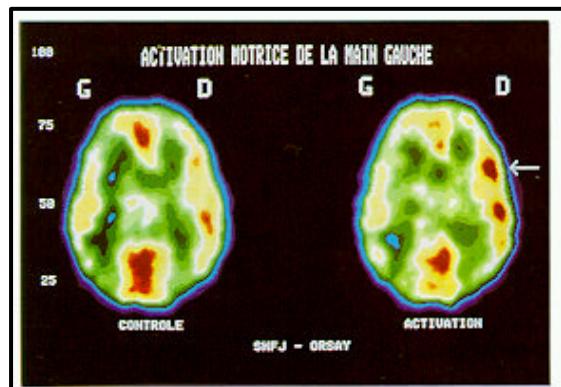
#### 4 APLICAÇÕES DAS RADIAÇÕES IONIZANTES

No início da era nuclear, houve um incentivo muito grande para o desenvolvimento de aplicações dos materiais radioativos. O objetivo era encontrar usos benéficos que proporcionassem retorno econômico, conhecimento científico avançado e, principalmente, melhorasse a qualidade de vida da sociedade. Nos dias de hoje, a energia nuclear é utilizada para geração de energia elétrica, sendo uma forte concorrente com os demais recursos energéticos; os materiais radioativos, por ela produzidos, são largamente utilizados na medicina, indústria e agricultura. Algumas dessas aplicações serão descritas a seguir.

##### 4.1 Aplicações na medicina

O uso de materiais radioativos na medicina engloba tanto o diagnóstico como a terapia, sendo eles ferramentas essenciais na área de oncologia.

###### 4.1.1 Diagnóstico



Os ensaios realizados para diagnóstico podem ser “in vivo” ou “in vitro”.

Nos ensaios “in vivo”, o radioisótopo é administrado diretamente no paciente. O material a ser administrado, contendo uma pequena concentração do radioisótopo, deve ter afinidade com o tecido ou o órgão que se quer observar. A radiação emitida produz uma imagem que revela o tamanho, a forma, as condições do órgão e, principalmente, sua dinâmica de funcionamento.

Pode-se dizer que este tipo de ensaio é utilizado para todos os órgãos e sistemas do corpo humano, destacando-se, entre muitos, os estudos do miocárdio, da função renal e tireoidiana e a detecção de neuroblastomas. A figura ao lado apresenta uma imagem de radiodiagnóstico mostrando o aumento do fluxo sanguíneo cerebral, utilizando  $^{15}\text{O}$ .

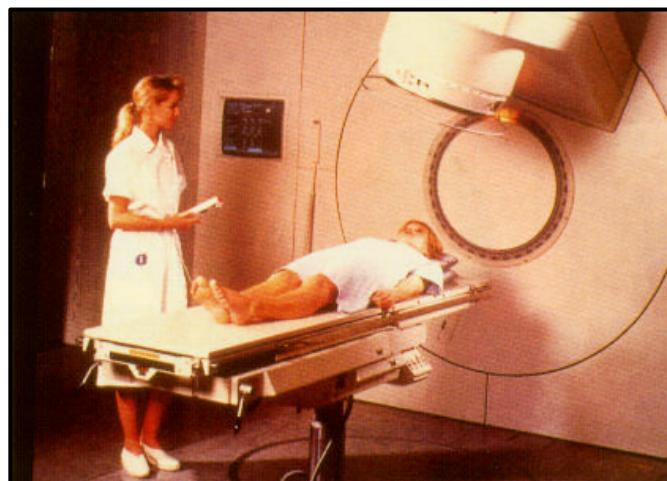
Os ensaios "in vitro" consistem na retirada de material orgânico do paciente, em geral plasma sanguíneo (sangue), e na reação de substâncias marcadas com material radioativo com algumas substâncias presentes no plasma, e posteriormente, medidas em detectores de radiação. A atividade detectada indica a presença e a concentração das substâncias que estão sendo analisadas.

#### 4.1.2 Terapia

Nesta prática, a irradiação do paciente, a fim de destruir as células cancerígenas de um órgão, pode ser feita de três formas distintas:

- A fonte radioativa é posicionada a certa distância do paciente e a irradiação se dá por feixe colimado (teleterapia).
- A fonte radioativa é posicionada em contato direto com o tumor ou inserida no mesmo (braquiterapia).
- A substância radioativa é injetada no paciente, a qual se instala no órgão de interesse por compatibilidade bioquímica.

A figura ao lado apresenta uma ilustração de uma sessão de teleterapia.



Recentemente, os materiais radioativos têm sido utilizados também para o tratamento da dor. É o caso do uso de  $^{153}\text{Sm}$  em pacientes portadores de metástases ósseas de câncer, nos quais o uso de analgésicos potentes não surtem efeitos.

#### 4.2 Aplicações na indústria

Na indústria, os materiais radioativos têm uma grande variedade de usos, destacando-se, principalmente, o controle de processos e produtos, o controle de qualidade de soldas e a esterilização.



Medidores de nível, espessura, densidade e detectores de fumaça utilizam princípios semelhantes. Uma fonte radioativa é colocada em posição oposta a um detector e o material a ser controlado, que passa entre a fonte e o detector, age como blindagem da radiação, fazendo com que o fluxo detectado varie.

Na gamagrafia, o controle de qualidade de soldas baseia-se na impressão de chapas fotográficas por raios gama, mostrando a estrutura interna da solda e eventuais defeitos.

Fontes radioativas de alta atividade são utilizadas, principalmente, para esterilização de materiais cirúrgicos, tais como suturas, luvas, seringas, esterilização de alimentos e produção de polímeros.

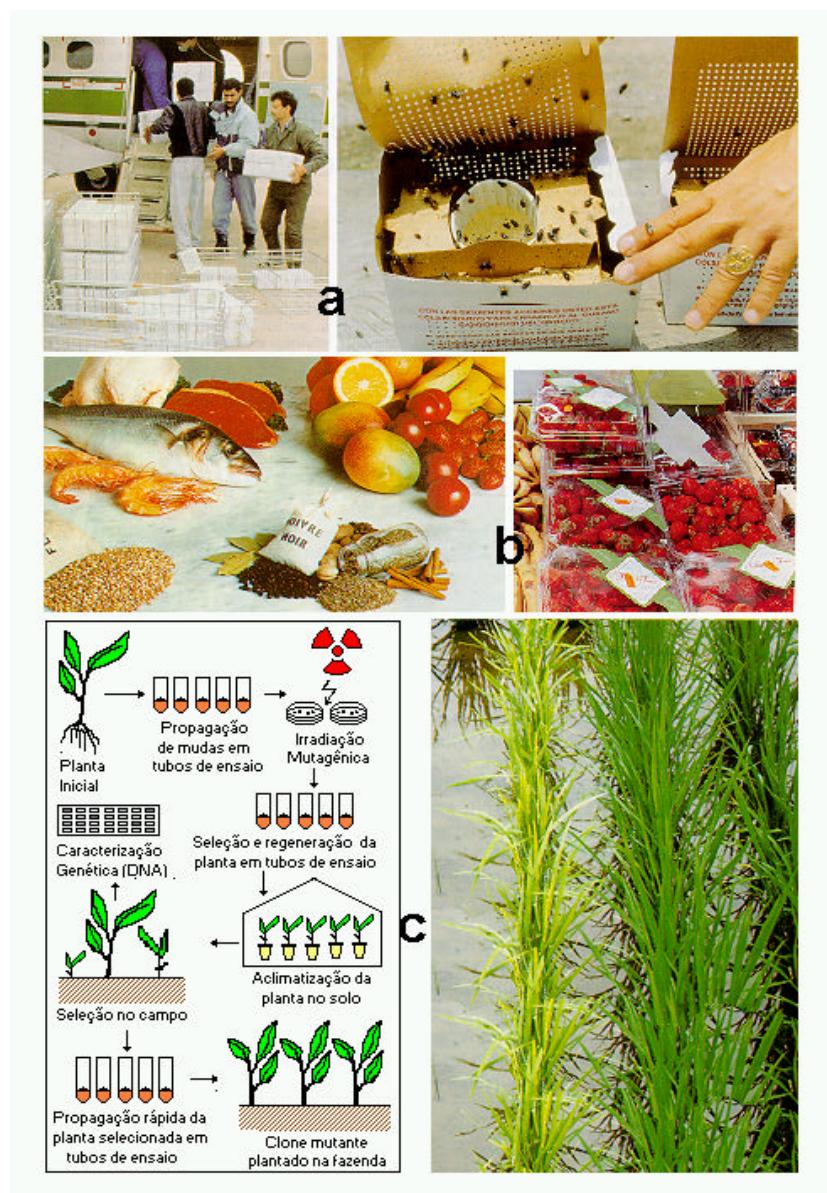
Radioisótopos são usados em hidrologia para medição de várias grandezas, como vazão de rios, direção de correntes marinhas, direção e vazão do fluxo subterrâneo de águas, taxa de infiltração de água no solo.

Na figura acima é mostrado o controle de espessura de chapas metálicas, o controle de qualidade de soldas, a medição de vazão e a conservação de peças de artes, nos quadros "a, b, c, d" respectivamente.

#### 4.3 Aplicações na agricultura

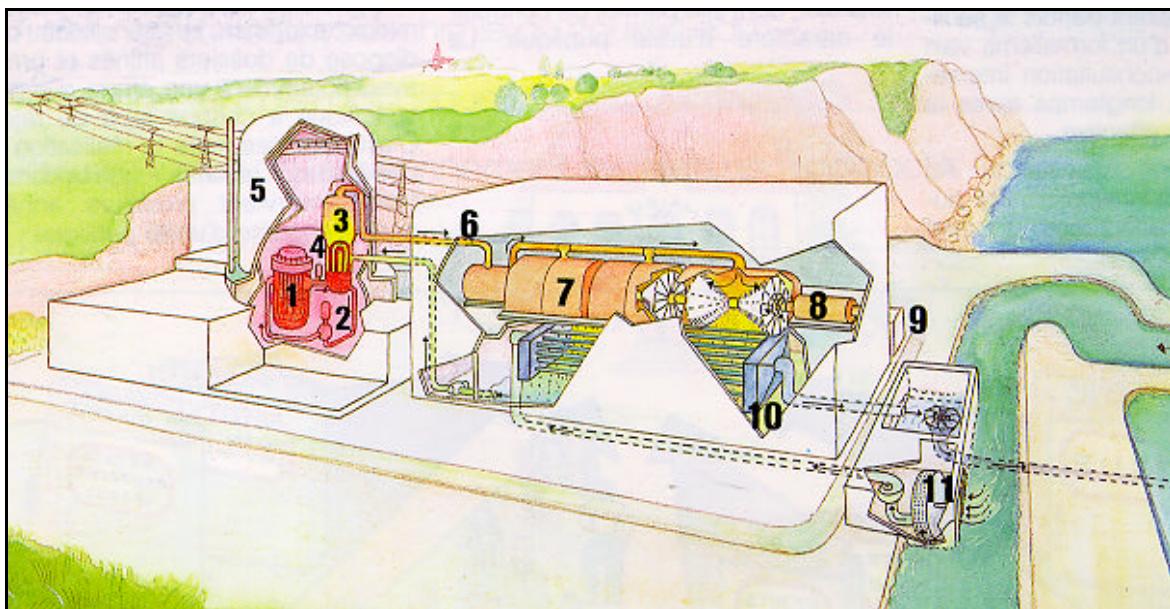
Na agricultura, os materiais radioativos são utilizados para controle de pragas e pestes, hibridação de sementes, preservação de alimentos, estudos para aumento de produção etc.

A conservação de alimentos por períodos prolongados é conseguida por meio de esterilização desses alimentos com altas doses de radiação, e o controle de pragas e pestes pode ser efetuado por meio da esterilização por raios  $\gamma$ . Na figura ao lado apresenta-se algumas ilustrações sobre os usos de fontes radioativas na agricultura, sendo o quadro "a" referente ao controle de pragas e pestes, o quadro "b" referente à esterilização de alimentos e o quadro "c" referente à hibridação de sementes.



#### 4.4 Geração de energia

Alguns tipos de reatores são utilizados na geração de energia nucleoelétrica, variando basicamente o tipo de combustível e o refrigerante do núcleo. O princípio de geração de energia é o mesmo em todos eles, ou seja, a energia liberada pelo núcleo é utilizada para gerar vapor, o qual movimenta uma turbina. Na figura a seguir, apresenta-se um esquema simplificado de um reator nuclear.



- |                        |                                 |                               |
|------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 1. Núcleo do reator    | 2. Circuito primário            | 3. Gerador de vapor           |
| 4. Pressurizador       | 5. Vaso de contenção            | 6. Circuito secundário        |
| 7. Turbinas            | 8. Gerador elétrico             | 9. Alternador e Transformador |
| 10. Circuito terciário |                                 |                               |
|                        | 11. Estação de captação de água |                               |

Dentre as inúmeras contribuições que o uso de materiais radioativos traz para o dia-a-dia de nossa sociedade, resultando na melhoria da qualidade de vida, pode-se citar, além dos usos já descritos, a datação de amostras arqueológicas, a esterilização de esgotos urbanos, a identificação e quantificação de metais pesados no organismo humano, as baterias de marca-passos, as fontes luminosas para avisos de emergência etc.

#### 5 EFEITOS BIOLÓGICOS DAS RADIAÇÕES IONIZANTES

Há muitos anos verificou-se que as radiações ionizantes produziam danos biológicos nos seres vivos. Os primeiros casos de dano ao homem (dermatites, perda de cabelo, anemia) foram relatados na literatura logo após a descoberta dos raios X.

Ao longo dos anos foram relatados casos de dano em consequência da exposição à radiação, entre os quais se incluem os danos que afetaram os primeiros pesquisadores no campo da energia nuclear, como Marie Curie.

Foi somente após a segunda Guerra Mundial, em virtude das explosões nucleares nas cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki e do uso cada vez maior de radionuclídeos nos mais variados setores de atividades, que se estudou com mais detalhes os efeitos produzidos por doses repetidas de radiação a longo prazo.

## 5.1 Noções de biologia

O organismo humano é uma estrutura complexa cuja menor unidade com funções próprias é a célula. As células são constituídas de moléculas e estas por sua vez de átomos.

As células são compostas por vários tipos de moléculas como: aminoácidos, proteínas, água e eletrólitos como o potássio, cloro, sódio, cálcio, magnésio, fosfatos.

Podemos dividir as células do organismo humano em dois grandes grupos, as células somáticas e as células germinativas.

As células somáticas compõem a maior parte do organismo, sendo elas responsáveis pela formação da estrutura corpórea (ossos, músculos).

As células germinativas estão presentes nas gônadas (ovários e testículos) e se dividem produzindo os gametas (óvulos e espermatózoides) necessários na reprodução. Essas células são muito importantes pois são as responsáveis pela transmissão das características hereditárias do indivíduo.

## 5.2 Mecanismo de ação das radiações ionizantes

Os efeitos biológicos produzidos pela ação das radiações ionizantes no organismo humano são resultantes da interação dessas radiações com os átomos e as moléculas do corpo. Nessa interação, o primeiro fenômeno que ocorre é físico e consiste na ionização e na excitação dos átomos, resultante da troca de energia entre a radiação e a matéria. Seguindo-se a este, ocorre o fenômeno químico que consiste de rupturas de ligações químicas nas moléculas. A seguir aparecem os fenômenos bioquímicos e fisiológicos. Após um intervalo de tempo variável aparecem as lesões observáveis, que podem ser no nível celular ou no nível do organismo como um todo. Na maioria das vezes, devido à recuperação do organismo, os efeitos não chegam a tornar -se visíveis ou detectáveis.

Um dos processos mais importantes de interação da radiação no organismo humano é com as moléculas de água. Esta importância é consequência da quantidade de água presente no organismo humano (aproximadamente 70 % do corpo humano).

Quando a radiação interage com as moléculas de água do organismo humano, essas moléculas se quebram formando uma série de produtos danosos ao organismo, como os radicais livres e a água oxigenada. Esse processo é chamado de radiólise da água.

## 5.3 Características gerais dos efeitos biológicos das radiações ionizantes

- **Especificidade**

Os efeitos biológicos das radiações ionizantes podem ser provocados por outras causas que não as radiações, isto é, não são característicos ou específicos das radiações ionizante. Outros agentes físicos, químicos ou biológicos podem causar os mesmos efeitos. Exemplo: O câncer é um tipo de efeito que pode ser causado tanto pelas radiações ionizantes como por outros agentes.

- **Tempo de latência**

É o tempo que decorre entre o momento da irradiação e o aparecimento de um dano biológico visível. No caso da dose de radiação ser alta, esse tempo é muito curto. Os danos decorrentes da exposição crônica, doses baixas com tempo de exposição longo, podem apresentar tempos de latência da ordem de dezenas de anos. O tempo de latência é inversamente proporcional à dose.

- **Reversibilidade**

Os efeitos biológicos causados pelas radiações ionizantes podem ser reversíveis. A reversibilidade de um efeito dependerá do tipo de célula afetada e da possibilidade de restauração desta célula. Existem, porém, os danos irreversíveis como o câncer e as necroses.

- **Transmissibilidade**

A maior parte das alterações causadas pelas radiações ionizantes que afetam uma célula ou um organismo não são transmitidos a outras células ou outros organismos. Devemos, porém, citar os danos causados ao material genético das células dos ovários e dos testículos. Esses danos podem ser transmitidos hereditariamente por meio da reprodução.

- **Dose Limiar**

Certos efeitos biológicos necessitam, para se manifestar, que a dose de radiação seja superior a um valor mínimo, chamada de dose limiar. Temos também os efeitos que não necessitam de uma dose mínima para se manifestar. Como exemplo podemos citar a anemia cuja dose limiar é de 1 Sv e todas as formas de câncer que teoricamente não necessitam de uma dose limiar.

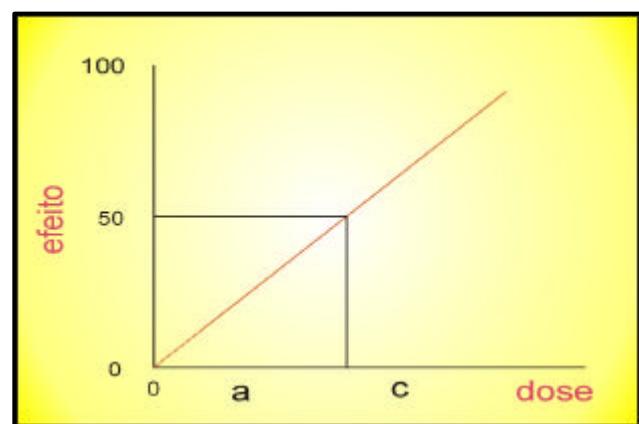
- **Radiosensibilidade**

Nem todas as células, os tecidos, os órgãos e os organismos respondem igualmente à mesma dose de radiação. As diferenças de sensibilidade observadas seguem a “lei de Bergonie e Tribondeau” a qual diz: “a radiosensibilidade das células é diretamente proporcional a sua capacidade de reprodução e inversamente proporcional ao seu grau de especialização”. Por exemplo a pele e as células produtoras de sangue.

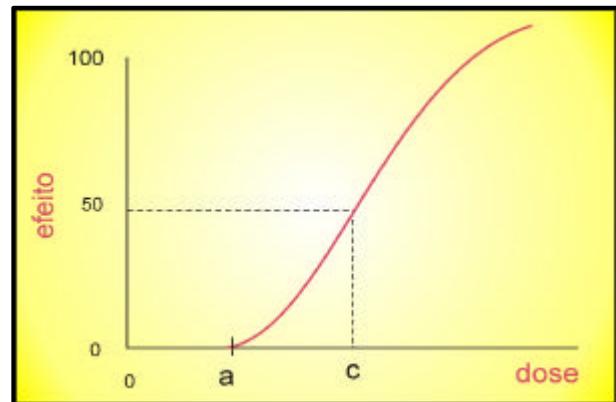
#### 5.4 Classificação dos efeitos biológicos das radiações ionizantes

Os efeitos biológicos das radiações ionizantes são classificados em estocásticos e determinísticos.

Os efeitos estocásticos são aqueles para os quais a probabilidade de ocorrência é função da dose, não apresentando dose limiar. Como exemplo podemos citar o câncer e os efeitos hereditários. A curva característica deste tipo de efeito é mostrada na figura ao lado.



Os efeitos determinísticos são aqueles cuja gravidade aumenta com o aumento da dose e para os quais existe um limiar de dose, como exemplo podemos citar a anemia, a catarata, as radiodermites etc. A curva característica deste tipo de efeito é mostrada na figura ao lado.



Podemos também apresentar os efeitos biológicos em somáticos e hereditários.

Os efeitos somáticos são alterações que ocorrem nas células somáticas e se manifestam no indivíduo irradiado, não sendo transmissíveis aos descendentes.

Os efeitos hereditários podem ser transmitidos aos descendentes e são consequência de alterações nos cromossomos (DNA) dos gametas (óvulos e espermatozoides) do indivíduo irradiado.

#### 5.4.1 Efeitos somáticos

Os efeitos somáticos das radiações podem ser divididos em imediatos e tardios. Os efeitos somáticos imediatos são aqueles que apresentam um tempo de latência muito curto e são consequência de uma exposição aguda à radiação (dose alta recebida num curto espaço de tempo). Os efeitos tardios são aqueles que apresentam um tempo de latência muito longo; alguns efeitos demoram dezenas de anos para se manifestar.



"Síndrome Aguda da Radiação".

No caso do indivíduo receber uma dose de radiação localizada em uma determinada região do corpo, os efeitos observados terão uma relação direta com esta região. Por exemplo, uma irradiação localizada nas gônadas poderá acarretar uma esterilidade no indivíduo, uma irradiação localizada na pele acarretará uma radiodermite (queimadura por radiação), como pode ser visto na figura ao lado.

No caso do organismo inteiro receber uma dose alta de radiação num curto espaço de tempo, os efeitos podem se manifestar em um período de horas ou dias, com o aparecimento de um conjunto de sinais e sintomas que levam a um quadro clínico típico denominado de

##### Síndrome Aguda da Radiação

Sabendo-se que cada tipo de célula apresenta um sensibilidade diferente frente à radiação, podemos saber qual sistema biológico será afetado com diferentes doses de radiação.

Para doses de aproximadamente 2 Sv (200 rem), as células mais danificadas serão aquelas com maior sensibilidade, como as células da medula óssea. Desta forma, os efeitos observáveis durante a manifestação deste estágio da síndrome são relativos a danos nessas células. Temos então a observação de anemia, leucopenia, plaquetopenia, infecção, febre e hemorragia. Esta é conhecida como forma hematopoética da síndrome aguda da radiação.

Com doses mais altas, acima de 8 Sv (800 rem), as células mais danificadas serão as células do tecido epitelial (mucosa) que revestem o trato gastrointestinal; quando essas células são danificadas, uma barreira biológica vital é quebrada. Tem-se então uma perda de líquidos e eleutrólitos, infecção e diarréia. Esta é conhecida como forma gastro-intestinal da síndrome aguda da radiação.

Para doses acima de 50 Sv (5000 rem), as células relativamente resistentes do sistema nervoso central serão danificadas e o indivíduo afetado rapidamente apresentará sintomas de dano nesse órgão, apresentando convulsões, estado de choque, desorientação. Esta é conhecida como forma neuro vascular cerebral ou de sistema nervoso central da síndrome aguda da radiação.

##### Efeitos somáticos tardios

Estes efeitos são chamados tardios pois apresentam um período de latência muito longo, manifestando-se muitos anos após a exposição à radiação. Podem ser decorrentes de uma exposição aguda ou crônica à radiação. Dentre os efeitos somáticos tardios, podemos citar como principal exemplo o câncer.

### 5.4.2 Efeitos hereditários

Qualquer alteração do material genético das células (DNA) é denominada mutação. A radiação é um dos agentes que pode provocar mutações.

Os efeitos hereditários podem ocorrer quando as gônadas de um indivíduo são expostas à radiação. Neste caso, os genes e os cromossomos das células responsáveis pela reprodução (óvulos e espermatozoides) podem ser danificados pela radiação. Assim sendo, essas alterações podem ser transmitidas, de pais para filhos por meio da reprodução.

Entre os efeitos hereditários podemos citar: anidria (ausência da íris do olho), albinismo, hemofilia, daltonismo, síndrome de Down.

## 6. GRANDEZAS E UNIDADES PARA USO EM RADIOPROTEÇÃO

Há dois tipos de grandezas utilizadas na proteção radiológica: atividade e dose. A grandeza atividade determina a quantidade de radiação emitida por uma determinada fonte radiativa. A grandeza dose descreve a quantidade de energia absorvida por um determinado material ou por um indivíduo.

A toda grandeza física está associada uma ou mais unidades e os valores das medidas muitas vezes são expressos com múltiplos e submúltiplos destas unidades.

### 6.1 Atividade

A grandeza atividade, cujo símbolo é A, é utilizada para expressar a quantidade de material radioativo. A atividade de um material radioativo é medida em termos de desintegrações por unidade de tempo.

Se considerarmos um certo número de átomos N, num instante de tempo t, e supondo que depois de um intervalo de tempo muito pequeno ( $\Delta t$ ) o número de átomos N diminui de um valor ( $\Delta N$ ), a relação entre  $\Delta N$  e  $\Delta t$  dará o número de desintegrações desses átomos por unidade de tempo, que é denominada ATIVIDADE do material radioativo.

A unidade atual da grandeza atividade é o becquerel (Bq) e 1 Bq corresponde a uma desintegração por segundo. A unidade antiga, ainda empregada, é o curie (Ci) que corresponde a  $3,7 \times 10^{10}$  desintegrações por segundo.

As relações existentes entre o becquerel e o curie são:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Bq} &= 1 \text{ dps} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ci} \\ 1 \text{ Ci} &= 3,7 \times 10^{10} \text{ dps} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq} \end{aligned}$$

As tabelas abaixo mostram os submúltiplos do Curie e os múltiplos do Becquerel mais frequentemente empregados.

Tabela 5: Submúltiplos do curie

Unidade	Abreviatura	relação com o Ci	dps
curie	Ci	1	$3,7 \times 10^{10}$
milicurie	mCi	$0,001 (1 \times 10^{-3})$	$3,7 \times 10^7$
microcurie	$\mu\text{Ci}$	$0,000001 (1 \times 10^{-6})$	$3,7 \times 10^4$
nanocurie	nCi	$0,000000001 (1 \times 10^{-9})$	$3,7 \times 10^1$
picocurie	pCi	$0,00000000001 (1 \times 10^{-12})$	$3,7 \times 10^{-2}$

Tabela 6: Múltiplos do becquerel

UNIDADE	ABREVIATURA	relação com o Bq	dps
becquerel	Bq	1	1
quilobecquerel	kBq	$1000 (1 \times 10^3)$	$1 \times 10^3$
megabecquerel	MBq	$1000000 (1 \times 10^6)$	$1 \times 10^6$
gigabecquerel	GBq	$1000000000 (1 \times 10^9)$	$1 \times 10^9$
terabecquerel	TBq	$1000000000000 (1 \times 10^{12})$	$1 \times 10^{12}$

## 6.2 Avaliação de dose

O conceito de dose foi introduzido em proteção radiológica em analogia ao seu uso em farmacologia, uma vez que queremos determinar o efeito causado por uma dose de radiação ionizante.

O termo dose usado na farmacologia significa a quantidade de uma substância aplicada em um ser vivo por unidade de peso do corpo humano para se obter um certo efeito biológico.

A dose de radiação recebida por um indivíduo pode ser avaliada por meio das seguintes grandezas: exposição, dose absorvida, dose equivalente e dose equivalente efetiva.

### 6.2.1 Exposição

A grandeza exposição, cujo símbolo é X, foi a primeira grandeza definida para fins de radioproteção.

Esta grandeza é uma medida da habilidade ou capacidade dos raios X e  $\gamma$  em produzir ionizações no ar. Ela mede a carga elétrica total produzida por raios X e  $\gamma$  em um kilograma de ar.

A unidade atual da grandeza exposição é o coulomb por kilograma (C/kg). A unidade antiga é o roentgen (R) que equivale a  $2,58 \times 10^{-4}$  C/kg.

Os instrumentos de medida da radiação, em sua maioria, registram a taxa de exposição que é a medida por unidade de tempo, isto é, C/(kg.h) ou C/(kg.s).

### 6.2.2 Dose absorvida

Esta grandeza foi definida para suprir as limitações da grandeza exposição e possui como símbolo D.

A grandeza dose absorvida é mais abrangente que a grandeza exposição, pois é válida para todos os tipos de radiação ionizante (X,  $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ) e é válida para qualquer tipo de material absorvedor. Ela é definida como a quantidade de energia depositada pela radiação ionizante na matéria, num determinado volume conhecido.

A unidade atual da grandeza dose absorvida é o gray (Gy) que equivale a 1 J/kg. A unidade antiga é o rad que equivale a  $10^{-2}$  J/kg, ou seja,  $10^{-2}$  Gy.

A medida da taxa de dose absorvida tem por definição a medida da dose absorvida por unidade de tempo, ex: Gy/h.

### 6.2.3 Dose equivalente

As grandezas definidas até agora levaram em conta a energia absorvida no ar e no tecido humano, porém não dão uma idéia de efeitos biológicos no homem. Foi então definida a grandeza dose equivalente, cujo símbolo é H, que considera fatores como o tipo de radiação ionizante, a energia e a distribuição da radiação no tecido, para se poder avaliar os possíveis danos biológicos.

A dose equivalente é numericamente igual ao produto da dose absorvida (D) pelos fatores de qualidade Q e N.

$$H = D \cdot Q \cdot N$$

O fator de qualidade Q relaciona o efeito de diferentes tipos de radiação em termos de danos aos tecidos. Por exemplo, 1 Gy de dose absorvida de radiação alfa produz no tecido um dano vinte vezes maior do que 1 Gy de radiação gama. Este Q representa na realidade o poder de ionização dos diferentes tipos de radiação ionizante no meio e os valores obtidos para Q são apresentados na tabela 7.

Tabela 7: Valores adotados para Q

Tipo de Radiação	Valor de Q
Raios X, $\gamma$ , $\beta$ e elétrons	1
Nêutrons rápidos e protões	10
Partícula $\alpha$ e íons pesados	20

O N é o produto de outros fatores modificadores, que permitem avaliar a influência na dose de um radionuclídeo depositado internamente. Atualmente o valor utilizado para o fator N é 1.

A unidade antiga da dose equivalente é o rem. A unidade nova é o sievert (Sv) e 1Sv equivale a 100 rems.

A medida da taxa de dose equivalente tem por definição a medida da dose equivalente por unidade de tempo, ex: Sv/h.

#### 6.2.4 Dose equivalente efetiva

Com o objetivo de se limitar o risco dos efeitos estocásticos, foi introduzido o conceito de dose equivalente efetiva. Esta grandeza está baseada no princípio de que para um certo nível de proteção, o risco deve ser o mesmo se o corpo inteiro for irradiado uniformemente, ou se a irradiação é localizada em um determinado órgão. A dose recebida em cada órgão do corpo humano é multiplicada por um fator de ponderação ( $W_T$ ), o qual leva em conta o risco de efeitos estocásticos.

$$H_E = \bar{a} W_T \cdot H_T$$

A tabela 8 apresenta os valores de fatores de ponderação para os diversos órgãos do corpo humano.

Tabela 8 – Fatores de ponderação para órgãos do corpo humano

Órgão	Fator de ponderação ( $W_T$ )
Gonadas	0,25
Mamas	0,15
Medula óssea	0,12
Pulmão	0,12
Tireóide	0,03
Osso	0,03
Restante do corpo	0,06

As unidades de medida da Dose Equivalente Efetiva são o rem e o Sv.

Na tabela 9 é apresentado um resumo das principais unidades e grandezas usadas em radioproteção.

GRANDEZA	SÍMBOLO	UNIDADE ANTIGA			UNIDADE NOVA			UNIDADE ANTIGA VALE COM RELAÇÃO À NOVA	UNIDADE NOVA VALE COM RELAÇÃO À ANTIGA
		NOME	SÍMBOLO	VALOR	NOME	SÍMBOLO	VALOR		
ATIVIDADE	A	Curie	Ci	$3,7 \times 10^{10}$ dps	Becquerel	Bq	1 dps	$3,7 \times 10^{10}$ Bq	$2,7 \times 10^{-11}$ Ci
EXPOSIÇÃO	X	roentgen	R	$2,58 \times 10^{-4}$ C/kg	<u>Coulomb</u> Kilograma	C/kg	1 C/kg	$2,58 \times 10^{-4}$ C/kg	$3,88 \times 10^3$ R
DOSE ABSORVIDA	D	radiation absorbed dose	rad	$10^{-2}$ J/kg	Gray	Gy	1 J/kg	$10^{-2}$ Gy	$10^2$ rad
DOSE EQUIVALENTE	H	roentgen equivalent man	rem	$10^{-2}$ J/kg.Q.N	Sievert	Sv	1 J/kg.Q.N	$10^{-2}$ Sv	$10^2$ rem

## 7 PRINCÍPIOS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

A principal finalidade da proteção radiológica é proteger os indivíduos, seus descendentes e a humanidade como um todo dos efeitos danosos das radiações ionizantes, permitindo, desta forma, as atividades que fazem uso das radiações.

Para atingir essa finalidade, três princípios básicos da proteção radiológica são estabelecidos: Justificação, Limitação de dose e Otimização.

### 7.1 Justificação

Como visto anteriormente, toda exposição à radiação ionizante pode levar a algum risco de dano à saúde humana, e este risco aumenta com o aumento da exposição. Consequentemente, qualquer aplicação da radiação que conduza a um aumento da exposição do homem deve ser justificada, para garantir que o benefício decorrente dessa aplicação seja mais importante que o risco devido ao aumento à exposição.

### 7.2 Limites de dose

Limites de dose representam um valor máximo de dose, abaixo do qual os riscos decorrentes da exposição à radiação são considerados aceitáveis. No caso das radiações ionizantes, são estabelecidos **limites de dose anuais máximos admissíveis (LAMA)**, que são valores de dose às quais os indivíduos podem ficar expostos, sem que isto resulte em um dano à sua saúde, durante toda sua vida. Para o estabelecimento dos limites máximos admissíveis para trabalhadores foram considerados os efeitos somáticos tardios, principalmente o câncer.

**Existem duas situações em que as pessoas podem estar sujeitas às radiações ionizantes:**

- (a) situação normal: situação em que a fonte radiativa está controlada e a exposição pode ser limitada com o emprego de medidas adequadas de controle.
- (b) situação anormal ou acidental: situação em que se perde o controle sobre a fonte de radiação e a exposição, portanto, deve ser limitada unicamente com medidas corretivas.

#### 7.2.1 Limites primários

As medidas adotadas para situações normais de operação devem ser tais que os limites de dose para trabalhadores e para indivíduos do público não excedam aos níveis recomendados pela CNEN. A figura ao lado indica os limites de dose equivalente para alguns órgãos isolados e o limite de dose equivalente efetiva para o corpo inteiro. Esses limites primários anuais de dose equivalente para todos os órgãos e dose efetiva para o corpo inteiro são apresentados na tabela 10.

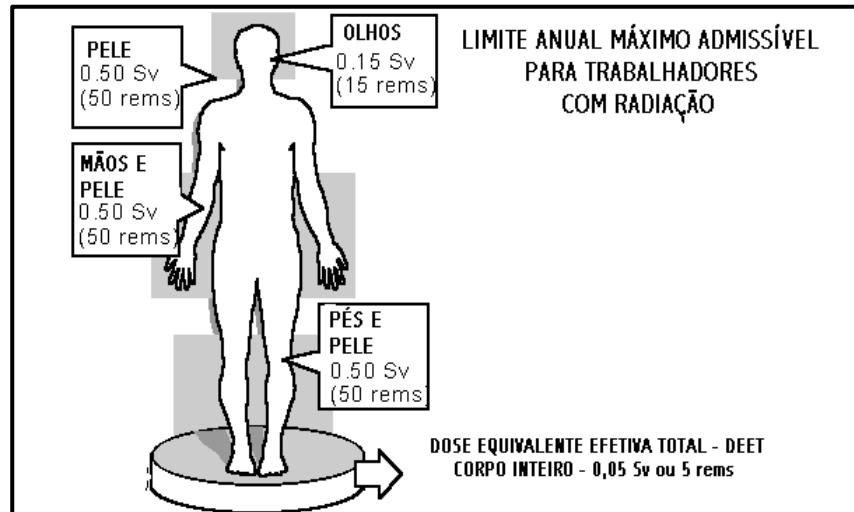


TABELA 10 - Limites primários anuais de dose equivalente

DOSE EQUIVALENTE	TRABALHADOR	PÚBLICO
EFETIVA (LAMA)* - $H_E$	50 mSv	1 mSv
ÓRGÃOS OU TECIDOS - $H_T$	500 mSv	1 mSv / $W_T^*$
PELE	500 mSv	50 mSv
EXTREMIDADES	500 mSv	50 mSv
CRISTALINO DOS OLHOS	150 mSv	50 mSv

\* $W_T$  - fator de ponderação: considera o grau de dano que um órgão causaria independentemente para o corpo todo, e são apresentados na tabela 8 da seção 6.2.4.

### 7.2.2 Limites Secundários

A verificação direta do cumprimento dos limites primários muitas vezes não é praticável e então são utilizadas outras grandezas cuja avaliação é possível e que são definidas como limites secundários. No caso de irradiação externa, são aplicados os índices de dose equivalente superficial e profunda. No caso de irradiação interna, é aplicado o limite de incorporação anual, LIA. O LIA é o maior valor de incorporação anual, por ingestão, inalação ou absorção pela pele, permitido que garante o cumprimento dos limites primários de dose.

### 7.2.3 Limites Derivados

Para garantir a concordância com os limites de dose recomendados pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica, ICRP, e adotados pela CNEN, frequentemente são usados limites derivados para o trabalho.

#### Limites Derivados para Irradiação Externa

São função da fração de tempo gasto para executar as tarefas projetadas para o ano nos locais de trabalho. Por exemplo, o limite derivado para um trabalhador, baseado numa semana de 40 horas trabalhadas, para 50 semanas em um ano de trabalho, equivale a 25  $\mu\text{Sv}/\text{h}$ . Este limite garante a concordância com o limite de 50 mSv por ano, conforme mostrado a seguir.

$$H_D = \frac{5000 \mu\text{Sv}/\text{ano}}{(40 \text{ h/sem}) \cdot (50 \text{ sem/ano})} = 25 \mu\text{Sv}/\text{h}$$

#### Limites Derivados para Contaminação de Superfície

Outro limite derivado é estabelecido em termos da quantidade de material radioativo que é permitida em superfícies, roupas e pele. Ele é baseado no limite primário de dose equivalente para trabalhadores e no radionuclídeo de maior radiotoxicidade manuseado na área de trabalho.

#### Limite Derivado para Contaminação do Ar

A concentração no ar derivada (CAD) para qualquer radionuclídeo é definida como aquela concentração no ar, que se respirada pelo homem referência por 2000 horas de trabalho anual, resultará no LIA para inalação.

$$\text{CAD} = \frac{\text{LIA (Bq)}}{(2000 \text{ h/ano}) \cdot (1,2 \text{ m}^3/\text{h})} = \frac{\text{LIA (Bq)}}{2400 \text{ m}^3}$$

onde  $1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  é o volume de ar respirado em 1 hora de trabalho pelo homem referência.

**□ Considerações quanto ao sistema de limitação de doses**

- a) A dose total recebida por ano por um trabalhador corresponde à soma da dose externa mais a dose interna.
- b) Existem limites especiais para várias categorias de pessoas, tais como:
- Mulheres com capacidade de procriação
  - Mulheres grávidas
  - Estudantes e estagiários
  - Visitantes
- c) Para o caso de gestantes, estas não devem trabalhar em áreas controladas, locais cujas doses podem exceder a 0,30 do LAMA.
- d) Com relação à gravidez, uma vez constatada a concepção, a dose no feto não deverá exceder a 1 mSv durante todo o período de gestação.
- e) Para o caso de estudantes, estagiários e visitantes, os limites de dose serão:
- menores de 16 anos: não devem receber por ano, doses superiores aos limites primários para público, e em exposições independentes, não devem exceder a 0,10 deste limite;
  - entre 16 e 18 anos: não devem receber por ano, doses superiores a 0,30 do LAMA para trabalhadores;
  - maiores de 18 anos: não devem receber por ano, doses maiores que o limite primário para trabalhadores.
- f) Em situações de emergência, as doses previstas não devem exceder a 2 vezes os limites primários. Caso a dose seja excedida, a participação nas tarefas devem ser voluntárias. Os voluntários só poderão ser trabalhadores que estejam previamente informados a respeito dos riscos envolvidos na execução das tarefas de intervenção. A participação de um mesmo trabalhador em mais de uma intervenção deve, em todos os casos, ser autorizada pelo responsável de radioproteção da instalação. Quando for previsto que um trabalhador recebeu uma dose efetiva superior a 100 mSv, este deve ser submetido a uma avaliação clínica e dosimétrica antes de sua reintegração ao trabalho.

### 7.3 Otimização

Ainda que a aplicação das radiações ionizantes seja justificada e que os limites de dose sejam obedecidos, é necessário otimizar os níveis de radiação, ou seja, a exposição de indivíduos a fontes de radiação deve ser mantido “tão baixo quanto razoavelmente exequível”, filosofia ALARA (as low as reasonably achievable), considerando-se fatores sociais e econômicos.

## 8 MODOS DE EXPOSIÇÃO E PRINCÍPIOS DE PROTEÇÃO À RADIAÇÃO

O uso de fontes de radiação pode resultar em algum grau de exposição das pessoas. Os riscos a que estão expostos os indivíduos irradiados, dependem de diversos fatores relacionados com as propriedades das fontes de radiação e das relações das pessoas com as fontes, ou seja, tempo de permanência junto à fonte e distância entre a fonte de radiação e o indivíduo exposto.

### 8.1 Tipos de fonte

As fontes de radiação ionizante de maior interesse para a radioproteção são os aparelhos de raios X, os aceleradores de partículas, as substâncias radioativas e os reatores nucleares.

Nos aparelhos de raios X, um filamento de lâmpada produz um feixe de elétrons que é acelerado num campo elétrico e lançado contra um alvo metálico de número atômico elevado e densidade alta. Ao atingir o alvo, os elétrons são freados, emitindo sua energia na forma de radiação de freamento que é o raios X.

Nos aceleradores de partículas, gases ionizados são injetados em um campo magnético onde são acelerados e lançados contra um alvo onde provocam reações nucleares.

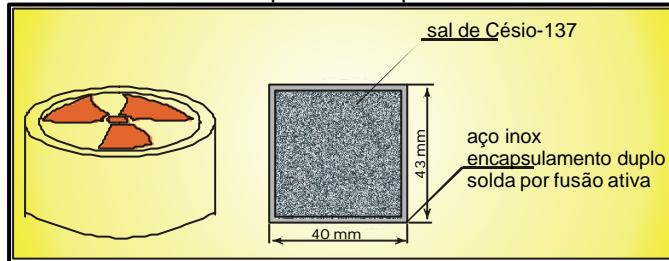
Estes dois tipos de aparelhos são fontes de radiação somente enquanto estão conectados à rede elétrica.

As fontes de radiação constituídas de substâncias radioativas, ao contrário, emitem radiação contínua e independentemente da ação do homem, até que todos os átomos da fonte tenham se desintegrado. Estas fontes são chamadas de fontes radioativas. As energias das radiações emitidas são características dos radionuclídeos presentes e a intensidade das radiações emitidas depende da massa do radionuclídeo na amostra e varia continuamente, de acordo com as leis do decaimento radioativo.

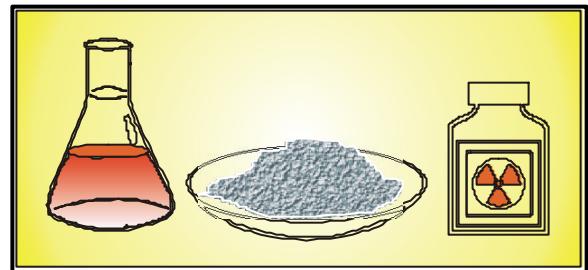
As fontes radioativas podem apresentar-se sob duas formas, seladas ou abertas. O risco associado às fontes seladas é o de irradiação somente; as fontes abertas podem irradiar e também provocar contaminações.

**Fontes seladas** são aquelas em que a substância radioativa está enclausurada dentro de um invólucro robusto

que impede o escape do material radioativo sob as condições normais de uso ou até mesmo sob certas condições anormais brandas. A figura ao lado mostra uma ilustração de uma fonte selada de Césio-137.



As fontes abertas são aquelas em que o material radioativo está sob a forma sólida (pó), líquida, ou mais raramente, gasosa, em recipientes abertos ou que permitem que o conteúdo seja fracionado sob as condições normais de uso. A figura ao lado apresenta algumas ilustrações de fontes abertas sob a forma líquida e sólida.

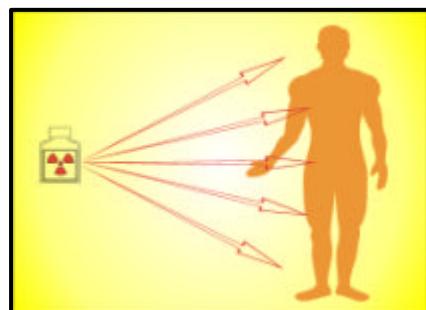


Para alcançar o objetivo da proteção radiológica, de limitar adequadamente as doses de radiação, é preciso conhecer e controlar as exposições a estes tipos diferentes de fontes. Os modos pelos quais os indivíduos podem se expor às fontes de radiação são abordados a seguir.

## 8.2 MODOS DE EXPOSIÇÃO

A exposição é definida, nos regulamentos da CNEN, como a irradiação externa ou interna de pessoas, com radiação ionizante. Portanto, os modos de exposição podem ser classificados em exposição interna ou externa ao corpo do indivíduo irradiado

### 8.2.1 Exposição externa



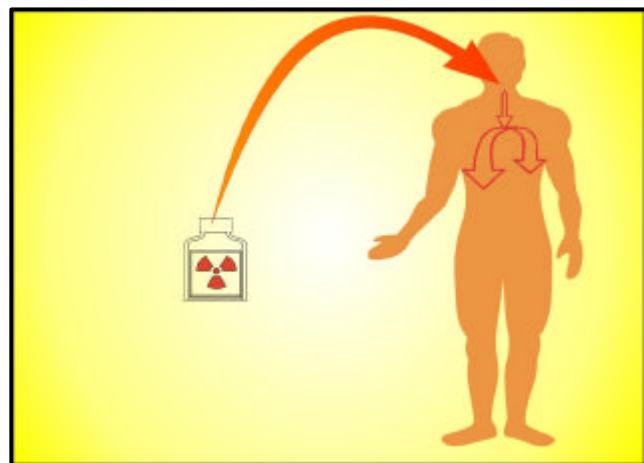
Entende-se por exposição externa aquela em que a fonte de radiação, aparelhos de raios X ou fontes radioativas, estão fora do corpo da pessoa irradiada. Este modo de exposição ocorre sempre em que são manipuladas as fontes de radiação, sejam seladas ou abertas. A exposição externa é significativa para a radiação eletromagnética, raios X e gama, é pouco relevante para as fontes de radiação beta e é praticamente insignificante para as fontes de radiação alfa.

A dose de radiação devida à exposição externa depende de fatores como atividade da fonte, energia da radiação, tempo de exposição, distância fonte-indivíduo e a utilização de blindagens.

### 8.2.2 Exposição interna

Entende-se por exposição interna aquela em que a fonte de radiação está dentro do corpo da pessoa irradiada. Isto ocorre quando o material radioativo entra dentro do corpo do indivíduo por inalação, ingestão ou através da pele intacta ou ferida, quando do manuseio de uma fonte aberta de radiação.

Neste caso, a fonte de radiação deve ser necessariamente um radioisótopo depositado em um órgão ou tecido do corpo. As doses resultantes dependem dos seguintes fatores: radioisótopo depositado, atividade do radioisótopo, via de contaminação, forma físico-química e faixa etária do indivíduo.



## 8.3 Fatores de proteção radiológica

Serão apresentadas medidas práticas de proteção radiológica que devem ser adotadas para assegurar o cumprimento dos limites de dose. No estabelecimento dessas medidas deve-se considerar o tipo de fonte radioativa, sua atividade, energia e os modos de exposição.

### 8.3.1 Proteção contra a irradiação externa

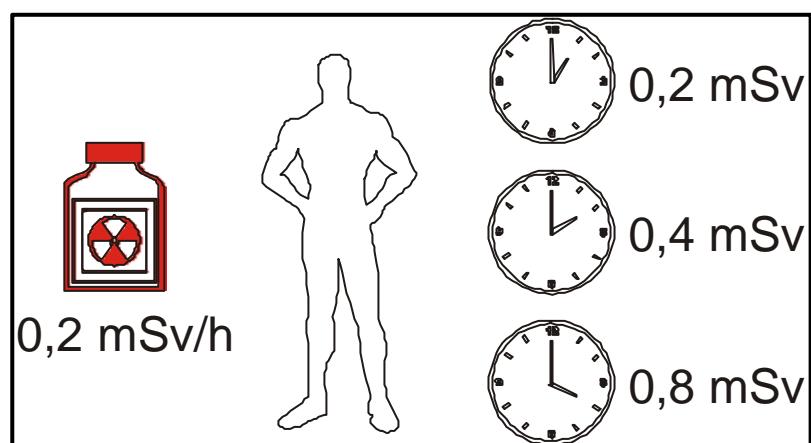
A dose equivalente recebida pelo trabalhador na irradiação externa é função da taxa de dose no início da irradiação e de sua variação com o transcorrer do tempo de irradiação. Desta forma existem duas maneiras para se reduzir a dose equivalente do trabalhador, ou seja, fornecer-lhe proteção adequada. A primeira considera a variação do tempo de irradiação e a segunda considera a redução da taxa de dose, conseguida por redução da atividade da fonte, aumento da distância fonte-indivíduo ou com o uso de blindagem. Será examinado a seguir, com mais detalhes, como esta redução da dose pode ser conseguida.

#### Redução do tempo de irradiação

A dose recebida por irradiação externa é diretamente proporcional ao tempo. Quanto maior o tempo de irradiação maior a dose recebida. Evidentemente, a redução do tempo de irradiação deve ser compatível com a correta realização das operações necessárias para o bom funcionamento da instalação.

Caso seja necessário o trabalho em áreas com níveis da radiação elevados, para que as doses recebidas não excedam aos limites estabelecidos, é necessário planejar detalhadamente a tarefa a ser executada, a fim de minimizar o tempo de exposição e controlar o tempo de permanência no local de trabalho. Isso, às vezes, leva ao método de rodízio entre vários trabalhadores para a complementação de uma determinada tarefa.

A variação da dose em função do tempo de irradiação pode ser visualizada na figura ao lado.



### □ Redução da atividade da fonte

A redução da atividade da fonte pode ser conseguida diminuindo-se a quantidade de material radioativo manipulado. Esta redução pode ser obtida, por exemplo, fracionando-se a fonte em fontes com atividades menores.

Outro procedimento para redução da atividade de uma fonte é seu armazenamento para que ocorra o decaimento radioativo do material. Este processo é geralmente empregado para radionuclídeos de meia-vida curta e principalmente para rejeitos radioativos. Para tanto é necessário ter locais adequados para armazenamento do material, de acordo com suas características.

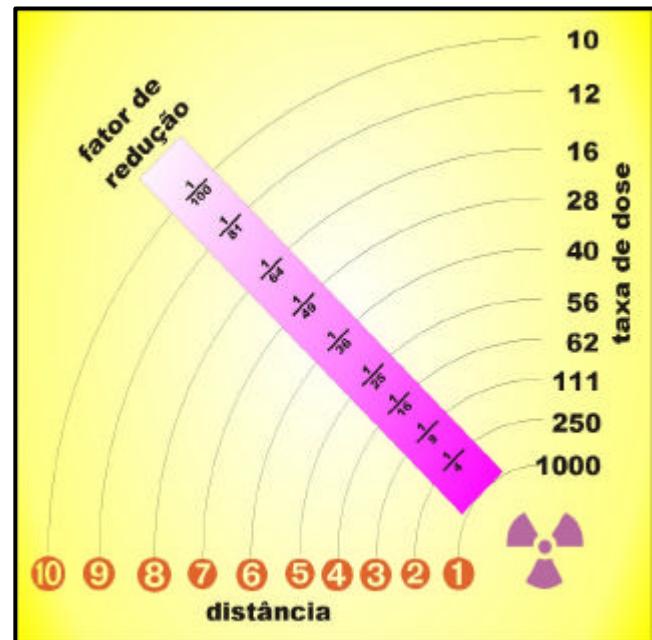
### □ Aumento da distância fonte-indivíduo

A dose de radiação recebida por um indivíduo é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre o indivíduo e a fonte, ou seja, à medida que um indivíduo se afasta da fonte de radiação, a dose por ele recebida diminui.

Conhecendo-se, portanto, a taxa de dose a uma determinada distância da fonte, pode-se calcular a taxa de dose resultante em qualquer distância. A equação abaixo é bastante utilizada para estabelecer a distância fonte-indivíduo mínima de modo a atender aos limites de dose derivados de trabalho. Na figura ao lado pode-se visualizar a relação entre taxa de dose e distância.

$$H_1 / H_2 = (d_2)^2 / (d_1)^2$$

Na prática, o aumento da distância fonte-indivíduo, durante o manuseio com substâncias radioativas, é conseguido por meio da utilização de pinças e garras.



### □ Uso de blindagem

Denomina-se blindagem a todo sistema destinado a atenuar um campo de radiação por interposição de um meio material entre a fonte de radiação e as pessoas ou objetos a proteger, sendo a blindagem o método mais importante de proteção contra a irradiação externa.

- **blindagem para partículas alfa** - O reduzido alcance das partículas alfa no ar e sua pouca penetração no tecido, não chegando a travessar a camada morta da pele, torna desnecessário qualquer tipo de medida de proteção contra a radiação alfa externa.
- **blindagem para partícula beta** - A proteção, no caso de irradiação externa por partículas beta, tem por objetivo evitar a irradiação da pele, cristalino dos olhos e gônadas. Devido ao pequeno alcance das partículas beta, a taxa de dose pode ser reduzida a zero quando se interpõe um material de espessura maior ou igual que o alcance das partículas beta mais energéticas neste material.
- **Blindagem para radiação gama ou X** - O método mais prático para a estimativa da espessura de blindagem para radiação X e g é a utilização do conceito de **camada semi-redutora**. A **camada semi-redutora** de um material utilizado para blindagem é a espessura necessária para reduzir a intensidade de radiação à metade. A tabela 13 apresenta valores de **camada semi-redutora** para alguns radionuclídeos.

Tabela 13 - Valores de camada semi redutora de chumbo para alguns radionuclídeos

Radionuclídeo	Meia-espessura (cm)
Cs-137	0,5
Co-60	1,2
Fe-59	1,1
I-131	0,3
Au-198	0,3
Na-24	1,5

A seleção dos materiais a serem empregados numa blindagem dependerá das condições técnicas e econômicas. A tabela 14 apresenta alguns materiais que são utilizados como blindagens para emissões beta e gama.

Tabela 14 - Materiais para blindagem

TIPOS DE RADIAÇÃO	MATERIAL PARA BLINDAGEM
<b>g, X</b>	Usa-se chumbo, a espessura dependerá da atividade da fonte e da energia da radiação emitida. Também são usados concreto, ferro, urânio e outros materiais de alta densidade.
<b>Beta ( <math>\beta</math> )</b>	Normalmente usa-se 1 cm de lucite ou outro material plástico seguido de uma folha de chumbo de 1 cm de espessura, que é usado para blindar a radiação de freimento (bremsstrahlung). Para fontes de baixa atividade pode ser dispensável o uso desta folha de chumbo.

### 8.3.2 Proteção contra a contaminação

A contaminação tanto externa como interna ao corpo humano, pode ser evitada adotando-se procedimentos para confinar o material radioativo evitando que haja dispersão no meio ambiente, ou isolando e protegendo o indivíduo com a utilização de equipamentos de proteção individual, EPI, tais como luvas, aventais, botas, óculos, máscaras, ou fazendo o controle de acesso às áreas contaminadas. Evidentemente, o confinamento do material é preferível ao uso de EPI's, pois estes limitam o movimento do trabalhador, além de causar desconforto.

O confinamento dos materiais radioativos deve ser feito utilizando uma capela ou "glove box" (caixa de luvas), com sistema de exaustão e filtração adequados.

A contaminação interna acontece quando o material radioativo é incorporado pelo indivíduo por inalação, ingestão ou absorção através da pele. A seguir são abordados métodos para evitar a incorporação de material radioativo.

#### Proteção contra a inalação de materiais radioativos

As substâncias radioativas podem encontrar-se na forma gasosa ou em suspensão no ar na forma de aerossol, e ser inalada por um trabalhador. Esta é a forma mais comum de entrada de radionuclídeos no corpo humano dos trabalhadores.

Ao trabalhar com substâncias radioativas na forma de pó, voláteis e gasosas deve-se ter o cuidado para evitar sua dispersão no ar e manipulá-las em locais apropriados, como capelas e caixas com luvas. Além disso pode ser necessário o uso de máscaras ou outros equipamentos de proteção respiratória.

#### **Proteção contra a ingestão de material radioativo**

A ingestão de substâncias radioativas também resulta em uma contaminação interna. Pode-se evitar essa contaminação por meio de regras tais como: não fumar, não comer, não beber, nem utilizar cosméticos nas áreas de trabalho que envolvam o manuseio de material radioativo.

Na manipulação de substâncias radioativas devem ser utilizadas luvas e os materiais de laboratório não devem ser levados à boca. A higiene das mãos após a saída da área de trabalho é fundamental para se evitar uma contaminação interna.

#### **Proteção contra a absorção através da pele**

Muitos radionuclídeos podem penetrar no corpo através da pele. Em trabalhos que envolvam tal risco deve-se utilizar aventais, macacões, luvas e botas apropriadas.

Pode ocorrer a penetração de materiais radioativos no corpo humano através de cortes causados por agulhas, bisturis, vidros quebrados, ou outros instrumentos cortantes contaminados, ou através de feridas já existentes na pele.

### **8.4 Controle de acesso em áreas restritas**

Um controle de acesso adequado diminui o risco de contaminação, pelo simples fato de manter o pessoal fora das áreas onde existe um potencial significativo de contaminação. A entrada numa área com potencial de contaminação exige o uso de roupas de proteção, as quais devem ser removidas ao deixar o local. As roupas de proteção são basicamente compostas por sapatilhas, galochas, macacões, luvas, toucas, e máscaras de proteção respiratória.

Nas áreas de trabalho onde é necessário um controle mais rigoroso, o acesso é feito através de vestiários, que devem contar com, pias para lavar as mãos, recipientes para recolher as roupas de proteção utilizadas na área, instruções para operação normal e em emergência e monitores para detectar a contaminação.

## **9 DETECÇÃO E MEDIDA DAS RADIAÇÕES**

A detecção e medida das radiações são fundamentais para a Proteção Radiológica, tanto para obtenção de medidas precisas quanto para a avaliação do grau de risco envolvido em atividades com exposições à radiação.

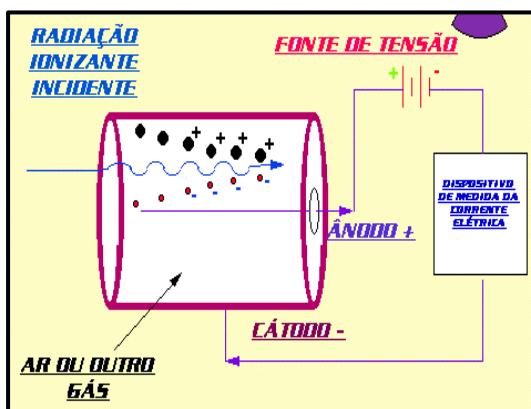
A radiação por si só não pode ser medida diretamente, portanto, a detecção é realizada pela análise dos efeitos produzidos pela radiação quando esta interage com um material.

Um sistema de detecção de radiação é constituído de duas partes: um mecanismo detector e outro de medida. A interação da radiação com o sistema ocorre no detector e o sistema de medida interpreta esta interação. De maneira geral, os sistemas de detecção de radiação são chamados de detectores.

Muitos detectores utilizados em Proteção Radiológica são de natureza eletrônica e indicam a intensidade da radiação num determinado ponto e num determinado instante de tempo. São principalmente os detectores por ionização, os detectores a cintilação e os detectores semicondutores. Existem também os detectores que indicam a radiação total a que uma pessoa foi exposta. Estes instrumentos são chamados dosímetros.

## 9.1 Detectores

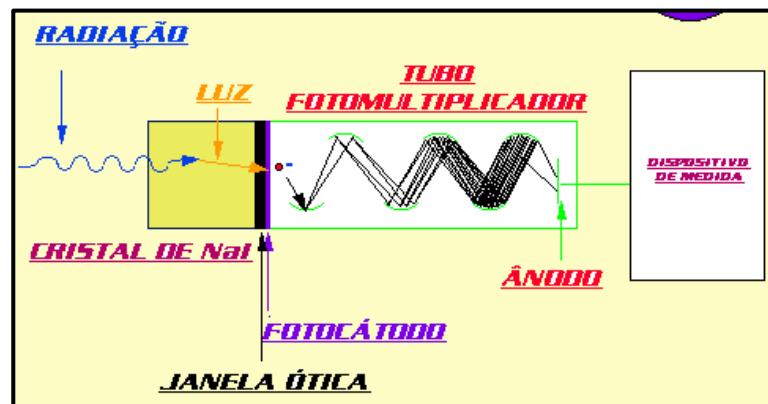
### 9.1.1 Detectores por ionização



Em detectores por ionização, a radiação incidente cria pares de íons no volume de medida do detector. Este volume de medida geralmente é preenchido com um gás ou uma mistura de gases. A quantidade de pares de íons criados são contados em um dispositivo de medida da corrente elétrica. Como exemplos deste tipo de detector pode-se citar a câmara de ionização, o contador proporcional e o contador Geiger-Muller. A figura ao lado apresenta um esquema de um detector por ionização.

### 9.1.2 Detectores à cintilação

Os detectores à cintilação baseiam -se na propriedade de fluorescência ou cintilação, que é o fenômeno observado em certas substâncias que emitem luz quando bombardeadas por um feixe de radiação ionizante. As cintilações produzidas pela radiação nos cristais cintiladores são amplificadas em uma válvula foto multiplicadora, que gera um pulso elétrico que é medido. Os detectores de iodeto de sódio (NaI) se enquadram-se nesta categoria (figura ao lado).



## 9.2 Dosímetros

A dosimetria é a avaliação quantitativa da dose de radiação recebida pelo corpo humano. Os dosímetros são os instrumentos utilizados para esta avaliação, e indicam a exposição ou a dose absorvida total a que uma pessoa foi submetida. São também chamados de dosímetros integradores. As principais características que um bom dosímetro deve apresentar são:

- a resposta deve ser independente da energia da radiação incidente,
- deve cobrir um grande intervalo de dose,
- deve medir todos os tipos de radiação ionizante e
- deve ser pequeno, leve, de fácil manuseio, confortável para o uso e econômico quanto à fabricação.

Até hoje não existe um dosímetro que preencha todos esses requisitos de forma ideal, mas apenas parcialmente. Os principais tipos de dosímetros são: fotográfico, termoluminescente (TLD) e câmara de ionização de bolso (caneta dosimétrica).

### 9.2.1 Dosímetro fotográfico

O dosímetro fotográfico é um dos detectores de radiação mais simples que existem. É constituído de um filme (chapa fotográfica) acondicionado em uma embalagem de proteção, que protege a parte fotossensível contra os efeitos da luz, agentes químicos e mecânicos. Esta embalagem contém pequenos discos metálicos que funcionam como filtros que permitem a estimativa da dose e uma distinção entre os vários tipos de radiação.

Os filmes dosimétricos utilizam a propriedade das radiações ionizantes de impressionarem chapas fotográficas. Mediante a medida do grau de enegrecimento da película revelada, pode-se relacioná-lo com a quantidade de radiação absorvida, e desta forma avaliar a dose recebida pelo indivíduo.

Os filmes dosimétricos oferecem a vantagem de assegurar uma informação permanente (podem ser guardados), permitindo desta forma que as medidas, se necessário, sejam repetidas. As desvantagens são decorrentes das influências das condições ambientais que podem afetar sua resposta, tais como temperatura, umidade e o desvanecimento do enegrecimento com o tempo.

### 9.2.2 Dosímetro termoluminescente (TLD)

Os dosímetros termoluminescentes são cristais que, quando irradiados, armazenam a energia da radiação incidente. Se este dosímetro for aquecido, a uma certa temperatura, após ter sido irradiado, a energia armazenada será liberada com emissão de luz, fenômeno conhecido como termoluminescência. A quantidade de luz emitida durante o aquecimento é proporcional à dose absorvida pelo dosímetro.

Os dosímetros TLD têm o formato de pastilhas e, geralmente, são utilizados num estojo que acomoda vários filtros, com a mesma finalidade daqueles utilizados nos dosímetros fotográficos. Os TLD's apresentam pouca dependência energética e quase nenhuma dependência direcional, mas a informação armazenada só pode ser avaliada uma única vez. A grande vantagem desses dosímetros é que podem ser reutilizados.

### 9.2.3 Câmara de ionização de bolso (caneta dosimétrica)

Os dosímetros de bolso, do tamanho de uma caneta comum, chamados por isso de canetas dosimétricas, são utilizados como dosímetros complementares, quando é necessário uma medida direta e rápida, permitindo ao usuário verificar a dose a que foi submetido durante um determinado trabalho. O princípio de funcionamento deste dosímetro é semelhante aquele descrito no item 9.1.1.

## 9.3 Calibração de detectores

Todos os instrumentos utilizados pela radioproteção não são instrumentos absolutos, necessitando portanto de calibração. Essa calibração significa determinar sua resposta a uma exposição de radiação conhecida ou de uma dose absorvida conhecida, envolvendo sempre o uso de pelo menos um instrumento de referência ou padrão. A calibração dos instrumentos deve ser efetuada em intervalos regulares ou após conserto.

## 10 PROGRAMAS E PROCEDIMENTOS DE MONITORAÇÃO.

As radiações ionizantes não podem ser percebidas diretamente pelos órgãos dos sentidos do corpo humano; por isso, um indivíduo pode permanecer inadvertidamente num campo radioativo sem notar a sua presença, nem perceber de imediato seus efeitos nocivos.

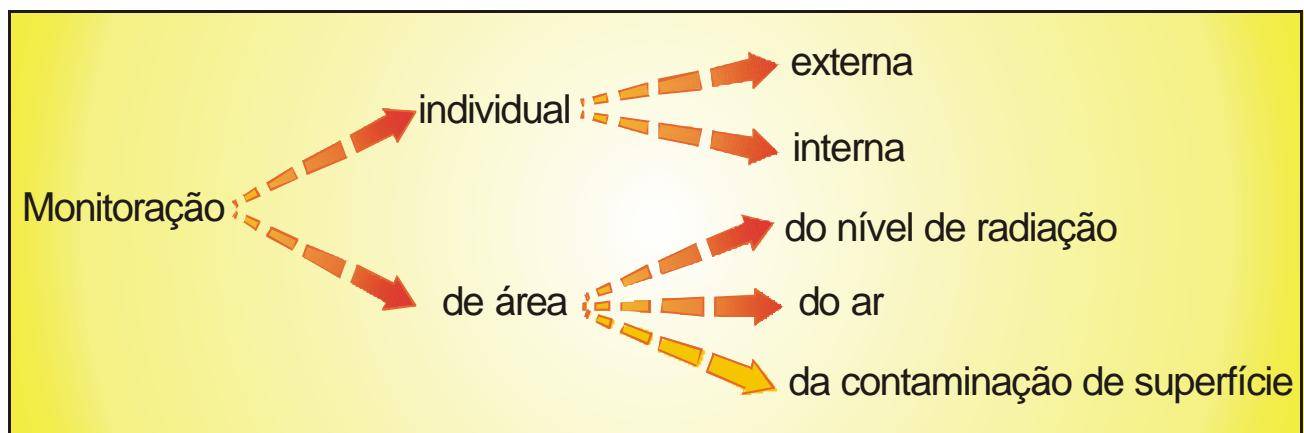
A proteção radiológica dispõe de vários recursos para evitar que os indivíduos recebam doses excessivas ou desnecessárias, e avalia se esses recursos foram eficientes por meio da monitoração.

Para que as monitorações atinjam suas finalidades, devem ser racionalmente planejadas e realizadas dentro de um programa. Um programa de monitoração inclui:

- a obtenção de medidas,
- a interpretação das medidas obtidas,
- registro dos dados e
- as providências, quando necessário, para melhorar os dispositivos de proteção.

Um programa de monitoração pode requerer um ou mais métodos, dependendo da natureza da radiação e das circunstâncias em que a radiação pode afetar um indivíduo.

As avaliações podem ser feitas por meio das medidas tomadas no próprio indivíduo (monitoração individual) e no local onde ele trabalha (monitoração de área). Os principais tipos de monitoração são apresentados esquematicamente na figura a seguir.



## 10.1 Monitoração individual

### 10.1.1 Monitoração individual externa

A monitoração individual externa tem como objetivo a obtenção de dados para avaliar as doses equivalentes recebidas pelo corpo inteiro, pela pele ou pelas extremidades, quando o indivíduo é irradiado externamente.

Nesta monitoração, dosímetros individuais são colocados em determinadas regiões do corpo e são utilizados continuamente pelo indivíduo, durante o seu trabalho.

Os dosímetros mais utilizados com esta finalidade são: os filmes dosimétricos, os dosímetros termoluminescentes, as câmaras de ionização de bolso e os dosímetros eletrônicos de alerta.

Os filmes dosimétricos e os dosímetros termoluminescentes são de leitura indireta e necessitam ser recolhidos periodicamente (geralmente dentro de um mês) para a avaliação das doses.

As câmaras de ionização de bolso e os dosímetros eletrônicos de alerta são providos de escalas visíveis, que permitem a avaliação imediata das doses recebidas pelo usuário. Os dosímetros eletrônicos de alerta (visuais ou sonoros), além de marcar a dose, emitem sinais sonoros ou luminosos, alertando imediatamente o usuário quando um valor de dose pré-estabelecido, for atingido.

### 10.1.2 Monitoração individual interna

A monitoração individual interna é utilizada para determinar a quantidade de radionuclídeos incorporados pelo indivíduo e avaliar a respectiva dose equivalente. Pode ser feita pela análise de excretas (técnica “in vitro”) ou pela contagem direta (técnica “in vivo”).

Pela técnica “in vitro”, a quantidade de material radioativo incorporado pelo indivíduo pode ser estimada pela análise de urina, fezes, secreções nasais, escarro, etc. Esta técnica pode ser aplicada para qualquer radionuclídeo desde que se conheça a relação entre a quantidade eliminada pelo corpo e a quantidade existente dentro do corpo.

Pela técnica “in vivo”, a avaliação da quantidade de materiais radioativos presentes no corpo ou num órgão é feita pela medida direta das radiações, posicionando-se detectores sensíveis, junto ao corpo do indivíduo. Essa medida deve ser realizada dentro de um recinto blindado com baixa radiação de fundo. O sistema mais comumente utilizado para esta monitoração é chamado de “contador de corpo inteiro”.

## 10.2 Monitoração de área

### 10.2.1 Monitoração do nível de radiação

É utilizada para dar uma indicação dos níveis de radiação existentes em locais de trabalho. Por este método, pode-se estimar com antecedência a dose esperada nas pessoas que permanecerem nesta área, por um determinado tempo, podendo-se adverti-las quando os níveis de radiação forem inadequados.

Os instrumentos utilizados na monitoração do nível de radiação são: câmaras de ionização, detectores Geiger-Muller, cintiladores etc. Estes monitores, utilizados nas áreas de trabalho, são geralmente calibrados para medir as taxas de dose ( $\mu\text{Sv/h}$  ou  $\mu\text{Gy/h}$ ) ou as taxas de exposição ( $\mu\text{C} / (\text{kg.h})$ ). Os detectores antigos possuem escala em mrad/h ou mR/h. Podem ser portáteis ou fixos.

Um aparelho portátil comumente utilizado é o detector Geiger-Muller, muitas vezes denominado “detector betagama”. Este tipo de aparelho possui um invólucro metálico com uma janela. Quando esta janela estiver fechada, permite detecção apenas da radiação gama e, quando aberta, permite detectar as radiações gama e beta.

Monitores do tipo fixo podem ser instalados em locais estratégicos. Medem o nível de radiação constantemente e, quando um nível pré-determinado for atingido, um sinal de alerta luminoso e/ou sonoro chama a atenção do operador, não permitindo que ele receba uma dose excessiva de radiação.

### 10.2.2 Monitoração do ar

Esta monitoração tem como objetivo detectar a dispersão de material radioativo no ar, com a finalidade de providenciar a proteção adequada ao trabalhador exposto ao ar contaminado e auxiliar a avaliação da quantidade de radionuclídeos incorporados por inalação. A monitoração de ar é importante nos locais de trabalho onde há possibilidade de ocorrer a contaminação por poeira, aerossóis e gases radioativos.

Um instrumento típico empregado na monitoração de ar é uma bomba de vácuo modificada, que possui um dispositivo para fixar um filtro na entrada de ar. O material radioativo presente no ar é coletado sobre o filtro, e este é analisado e/ou contado, sendo o resultado expresso em termos de atividade por volume de ar ( $\text{Bq/m}^3$ ).

### 10.2.3 Monitoração da contaminação de superfície

Tem como objetivo avaliar a quantidade de material radioativo depositado em objetos ou superfícies. Pode ser realizado por método direto ou indireto.

No método direto, o detector é colocado sobre a superfície com suspeita de estar contaminada. A medida da contaminação pode ser lida diretamente no aparelho.

Quando a superfície a ser monitorada for muito extensa, tomam-se medidas apenas das áreas representativas.

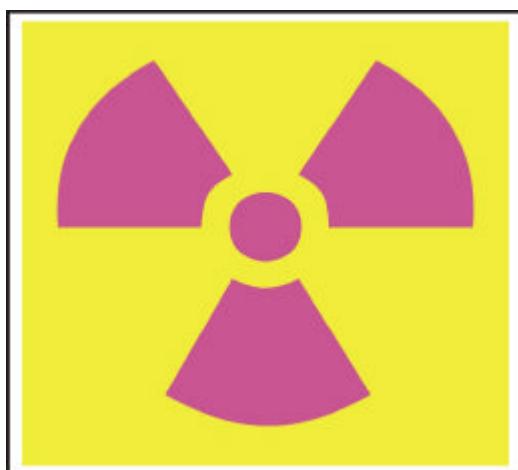
O método indireto é empregado quando for impossível realizar medidas diretas ou para complementá-las. Consiste em obter amostras da superfície contaminada, por exemplo, esfregando papéis de filtro sobre uma área determinada, em geral de 100 cm<sup>2</sup>. O papel de filtro com a contaminação transferida é analisado.

As medidas da contaminação de superfície são obtidas em termos de atividade por unidade de área (Bq/cm<sup>2</sup>).

### 10.3 Sinais e avisos de radiação

Os equipamentos, os recipientes, as áreas ou os recintos, que possuam riscos potenciais de radiações ionizantes, devem ser marcados com sinais de advertência de radiação.

O sinal consiste de um trifólio que representa a radiação, juntamente com dizeres apropriados. Os dizeres mais comuns são:



**PERIGO: - ÁREA RADIOATIVA**

**PERIGO: - MATERIAL RADIOATIVO**

**PERIGO: - RISCO DE RADIAÇÃO**

Além de serem adequadamente sinalizadas, as áreas perigosas geralmente são isoladas por barreiras ou cordões e têm o acesso permitido só para pessoas especialmente autorizadas.

### 10.4 Classificação das áreas de trabalho

Toda área de trabalho deve ser classificada de acordo com os níveis de dose de radiação presentes.

Aquelas áreas, onde os níveis de radiação não ultrapassem o limite primário para indivíduos do público (1 mSv/ano), são denominadas áreas livres. Estas áreas são isentas de regras especiais de segurança.

As demais áreas são denominadas áreas restritas e são subdivididas em áreas controladas e supervisionadas.

As áreas supervisionadas são aquelas onde as doses de radiação são inferiores a 3/10 do limite primário para trabalhadores. Quando as doses puderem ultrapassar o valor de 3/10 deste limite, as áreas serão classificadas como áreas controladas.

Estes locais estão sujeitos a regras especiais de segurança.

## 11 CONTAMINAÇÃO RADIOATIVA E PROCEDIMENTOS DE DESCONTAMINAÇÃO

A contaminação radioativa pode ser definida como a presença de material radioativo indesejável em qualquer meio ou superfície podendo oferecer riscos à saúde das pessoas envolvidas que podem ser irradiadas externamente ou incorporar os radionuclídeos contaminantes. Além disso, ela pode interferir nos dados de trabalhos radiométricos, ou comprometer a qualidade de um produto.

A contaminação é considerada de superfície quando o contaminante radioativo estiver localizado na superfície dos objetos, das áreas de trabalho ou na pele das pessoas. É considerada “fixa” quando não for transferível de uma superfície contaminada para a outra não contaminada.

Os riscos apresentados por uma contaminação radioativa dependem do tipo e da quantidade dos radionuclídeos contaminantes e da facilidade com que eles podem ser transferidos para outros locais.

A transferência pode se dar pelo contato com a superfície contaminada ou pela suspensão dos contaminantes no ar.

As atividades que envolvem a utilização de materiais radioativos devem ser planejadas e executadas para se evitar ou reduzir a contaminação radioativa, quer seja dos trabalhadores, das áreas de trabalho ou do meio ambiente.

A descontaminação de superfície é o processo que tem como objetivo remover o material radioativo indesejável das superfícies contaminadas, tais como objetos, roupas, equipamentos, ferramentas, pisos, paredes e a pele das pessoas.

Num processo de descontaminação, o material radioativo não é destruído, porém apenas removido do local contaminado para outro. Por exemplo, ao descontaminar um objeto com uma solução aquosa, o material radioativo é removido do objeto para a solução, a qual pode exigir cuidados adicionais. Portanto, a descontaminação de superfície não é simplesmente um processo de limpeza, pois deve ser realizada com procedimentos próprios que não coloquem em risco a saúde dos trabalhadores nem disseminem a contaminação para outros locais ou ao meio ambiente.

Todos os trabalhadores que manuseiam os materiais radioativos devem manter o cuidado constante para que a contaminação radioativa seja evitada e conhecer os procedimentos básicos para se lidar com a contaminação, caso ela venha a ocorrer.

Neste capítulo, estão descritos os assuntos referentes à prevenção, o controle da contaminação de superfície e os procedimentos gerais de descontaminação.

### 11.1 Prevenção e controle da contaminação radioativa

Os materiais radioativos devem ser manuseados ou tratados em instalações apropriadas, procurando-se evitar a contaminação radioativa das pessoas ou do meio ambiente.

As medidas preventivas podem envolver o planejamento prévio do local de trabalho, o confinamento das áreas sujeitas à contaminação e o controle de acesso a essas áreas, bem como um programa efetivo de monitoração da contaminação.

Dependendo do material radioativo e do tipo de trabalho a ser realizado, podem ser necessárias instalações como capelas de laboratório, caixa de luvas (glove boxes) ou células blindadas.

O nível de contaminação das áreas de trabalho deve ser periodicamente verificado pela monitoração. Um aumento significativo da contaminação pode indicar uma possível falha no sistema de confinamento e a necessidade de reparo, ou a necessidade de se efetuar uma descontaminação da área.

A monitoração da contaminação de superfície é importante para se estabelecer se os objetos tais como ferramentas, peças, materiais de laboratório e roupas necessitam de descontaminação.

A contaminação de superfície é avaliada em termos da atividade do contaminante por unidade de área contaminada. A unidade normalmente empregada é “becquerel por centímetro quadrado” ( $Bq/cm^2$ ). Há dois métodos comumente utilizados para se avaliar a contaminação de superfície: o direto e o indireto.

A monitoração pelo método direto é feita com instrumentos que detectam as radiações emitidas pelos radionuclídeos, diretamente na superfície contaminada. Esses instrumentos geralmente são portáteis e são levados aos locais onde se deseja realizar a monitoração.

O método indireto consiste em se examinar a contaminação coletando-se amostras da superfície contaminada (teste de esfregaço).

O teste de esfregaço não detecta a contaminação fixa. Por sua vez, a monitoração direta não distingue a contaminação transferível da fixa. Portanto, para se avaliar a contaminação de superfície, normalmente são usados os dois métodos de monitoração.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) tem estabelecido os limites derivados para a contaminação de superfície. Esses valores são importantes para a interpretação dos resultados obtidos na monitoração da contaminação de superfície.

## 11.2 Descontaminação de superfície

### 11.2.1 Regras básicas

O procedimento a ser adotado para se descontaminar uma superfície depende das características da contaminação radioativa e da superfície contaminada. Certos tipos de contaminação exigem tratamentos especiais, porém, algumas regras são aplicáveis à maioria dos procedimentos de descontaminação. Por exemplo,

- Os métodos úmidos devem ser usados de preferência aos secos para não aumentar o risco de contaminação do ar.
- Procurar os métodos que gerem menor volume possível de rejeitos radioativos, para evitar os problemas de tratamento posterior.
- Os métodos suaves devem ser usados antes daqueles mais rigorosos que podem prejudicar as superfícies envolvidas.
- O processo de descontaminação não deve permitir o espalhamento da contaminação.
- Se possível, a superfície contaminada por radionuclídeos de meia-vida curta deve ser isolada, para permitir a seu decaimento natural.
- A descontaminação deve ser realizada tão logo seja viável. A contaminação pode se espalhar ou se fixar ainda mais na superfície, com o passar do tempo.

### 11.2.2 Métodos de descontaminação de superfície

A descontaminação de uma superfície pode ser realizada por processos físicos, químicos ou, geralmente, por aqueles que envolvem a combinação de ambos.

São considerados físicos os processos tais como a abrasão da superfície contaminada, a sucção das partículas contaminantes por aspiradores, limpeza por cavitacão ultra-sônica, etc.

Os processos químicos envolvem tratamento da superfície contaminada com solventes e soluções.

Para que a descontaminação seja efetuada com sucesso, a solução descontaminante deve ser capaz de dissociar o contaminante radioativo da superfície e mantê-lo na solução, contudo sem prejudicar demasiadamente a superfície. Entre os reagentes utilizados na descontaminação citam-se os ácidos, os álcalis, os agentes complexantes e os agentes tensoativos.

Durante a descontaminação química, produz-se uma solução que contém o contaminante radioativo. Por causa disso, essa solução não deve ser simplesmente desprezada, mas armazenada para o tratamento posterior como rejeito radioativo.

### 11.3 Procedimentos de descontaminação

#### 11.3.1 Descontaminação pessoal

As pessoas que trabalham com materiais radioativos, quando deixarem seu local de trabalho, devem monitorar as partes expostas do corpo, principalmente as mãos, a roupa e a sola dos calçados, como hábito de sua rotina.

Se a pele for contaminada, o ideal é remover completamente a contaminação. Porém, as medidas muito drásticas podem prejudicar a pele, aumentando as chances de a contaminação penetrar no interior do corpo.

Portanto, os casos muito difíceis devem ser acompanhados por especialistas das áreas médica e da proteção radiológica.

O método geral para descontaminar as mãos e a pele do corpo é lavá-las com água corrente e um sabonete neutro, que não seja alcalino ou abrasivo.

Na descontaminação das mãos pode-se utilizar uma escova macia, dando uma atenção especial na região entre os dedos, ao redor das unhas e nas dobras da pele.

A aplicação repetida de lavagens com sabão ou detergente sobre uma mesma área da pele pode irritá-la ou ressecá-la. Portanto, recomenda-se utilizar produtos como a lanolina ou um creme cosmético para recompor a oleosidade da pele perdida na descontaminação.

A face deve ser lavada com sabonete e uma grande quantidade de água, tendo-se o cuidado de conservar os olhos e a boca bem fechados.

Os cabelos contaminados devem ser lavados várias vezes com um xampu, usando uma grande quantidade de água para enxaguar. Após as lavagens, deve-se avaliar a contaminação e verificar se não ficou retida nas orelhas ou na face. Se após várias lavagens, o nível de contaminação for significativo, pode ser necessário cortar a parte contaminada do cabelo.

#### 11.3.2 Descontaminação de roupas de proteção

As roupas pessoais e de proteção usadas em locais sujeitos à contaminação radioativa devem ser monitoradas rotineiramente, todos os dias ou ao término de um trabalho com material radioativo.

As roupas contaminadas ou sob suspeita de contaminação devem ser colocadas em recipientes apropriados, por exemplo em sacos plásticos, para que a contaminação não seja disseminada.

As roupas contaminadas devem ser marcadas para que possam ser identificadas quanto à procedência e à possível causa da contaminação e devem ser monitoradas e classificadas de acordo com o tipo e o nível da contaminação. As roupas com diferentes tipos de contaminação não devem ser lavadas juntas para evitar a contaminação cruzada. Aquelas excessivamente contaminadas ou inviáveis de serem descontaminadas devem ser dispostas como rejeito radioativo.

As roupas de tecido geralmente são descontaminadas utilizando soluções aquosas de detergentes e reagentes tais como o ácido cítrico e carbonato de sódio.

As luvas de borracha devem ser lavadas ao término de cada trabalho com material radioativo, preferencialmente pelo próprio usuário. Todo o cuidado deve ser tomado para evitar a transferência dos contaminantes para a parte interna da luva. A descontaminação deve ser certificada pela monitoração.

#### 11.3.3 Descontaminação das áreas de trabalho

As áreas que requerem a descontaminação devem ser claramente demarcadas e os procedimentos de descontaminação devem ser executados, evitando-se o espalhamento da contaminação.

Para remover a contaminação transferível, pode-se utilizar um aspirador de pó adaptado com filtros eficientes. Não se deve varrer ou sacudir a superfície para não suspender poeira radioativa no ar. Muitas vezes, prefere-se empregar algodão ou pano umedecido com soluções detergentes. Esses esfregões são periodicamente substituídos por novos. Os usados são descartados como rejeito radioativo.

O emprego de abrasivos pode ser útil no tratamento de contaminações fixas e localizadas. As pastas ou outros produtos abrasivos podem ser friccionados sobre a superfície contaminada e removidos posteriormente com pano ou papéis absorventes.

#### 11.3.4 Descontaminação de peças e utensílios

É praticamente impossível descrever um procedimento geral de descontaminação para materiais contaminados, por causa da variedade de materiais existentes e dos diferentes tipos de contaminação.

Em geral, as superfícies dos objetos podem ser classificadas em metálicas, vítreas e orgânicas.

As superfícies dos objetos metálicos, não pintadas ou galvanizadas, estão cobertas por uma camada de óxido. Normalmente, a descontaminação se procede com a remoção dessa camada. Para tanto, são utilizados os ácidos inorgânicos, agentes complexantes e abrasivos. Porém, deve-se tomar cuidado para não provocar uma corrosão desnecessária, tornando a superfície irregular e mais suscetível à contaminação.

Os objetos de vidro e porcelana podem ser descontaminados com ácidos minerais, citrato de amônio e bifluoreto de amônio. Este último reagente corrói o vidro.

Os objetos de plásticos ou pintados podem ser descontaminados com citrato de amônio, ácido diluído ou com solventes orgânicos.

Em todos casos, cabe a análise se vale a pena descontaminar ou substituir o objeto por um novo, descartando aquele contaminado como rejeito radioativo.

## 12 TRANSPORTE DE MATERIAIS RADIOATIVOS

O objetivo de todo sistema de transporte de materiais perigosos é assegurar o controle adequado sobre os riscos a que estão expostos as pessoas, os objetos e o meio ambiente durante o transporte de um material radioativo.



Todo o material radioativo, para ser transportado, deve ser acondicionado em uma embalagem apropriada. Esta embalagem é projetada e construída para ser uma barreira efetiva entre o meio ambiente e o material radioativo. O conjunto formado pelo material radioativo e sua embalagem é chamado de embalado.

Uma série de normas definem os requisitos para todas as modalidades de transporte de materiais radioativos, seja ele por via terrestre, aquática ou aérea, com veículos de qualquer tipo e inclui não somente o trânsito de materiais, mas também todas as operações envolvidas no transporte.

À medida que a quantidade, a concentração e o risco potencial do material radioativo aumentam, as exigências legais tornam-se mais restritivas.

Vários organismos possuem jurisdição durante o transporte de material radioativo de um local para outro. Os principais deles são:

- Comissão Nacional de Energia Nuclear
- Ministério dos Transportes
- Ministério da Marinha
- Ministério da Aeronáutica
- Organismos Internacionais que regulamentam o transporte seguro

## 12.1 Aplicação das exigências legais

Todo indivíduo autorizado, responsável pela transferência, embalagem e embarque de material radioativo deve estar familiarizado com os regulamentos existentes e estabelecer instruções em forma de procedimentos quanto à conduta a ser seguida pelos trabalhadores, com relação aos seguintes itens:

- Tipo e quantidade de material radioativo
- Tipo de embalado
- Selos, rótulos e etiquetas
- Níveis de dose nos embalados e veículos
- Documentação para embarque.

## 12.2 Embalados

Os tipos de embalados para material radioativo existentes listados em ordem crescente do risco potencial e, portanto, de aumento da integridade do embalado, são os seguintes:

- Embalado exceptivo
- Embalado industrial
- Embalado Tipo A
- Embalado Tipo B



As exigências de desempenho dos embalados refletem o grau de risco associado com o tipo, quantidade e outras características do material radioativo expedido.

Muitas expedições radioativas envolvem quantidades de radioatividade e níveis de exposição na superfície que são extremamente baixos. Tais expedições, denominadas expedições com quantidades limitadas, podem ser empacotadas em embalagens comuns utilizadas para qualquer tipo de material. O risco potencial radiológico oferecido por esse tipo de expedição é muito baixo.

Os materiais radioativos típicos expedidos em embalados com quantidades limitadas (embalados exceptivos) incluem certos conjuntos para diagnóstico médico, materiais de verificação usados na pesquisa e indústria, e dispositivos contendo material radioativo tais como detectores de fumaça, ponteiros luminosos de relógio, e instrumentos eletrônicos especiais. Tais materiais são expedidos rotineiramente por transportadoras comuns.

Para expedições com risco potencial significativo (maior que no caso anterior), os embalados são projetados para evitar a liberação do material radioativo para o meio ambiente, tanto em condições normais de transporte como também em certas condições de acidente.

Não existem informações conhecidas sobre exposição à radiação, resultante de acidentes graves com transporte de material radioativo, apesar de serem feitas milhões de expedições por ano. Este registro excelente de segurança se deve ao controle efetivo sobre o transporte de embalados.

## 12.3 Informações exigidas no transporte de materiais radioativos

As informações exigidas no transporte de materiais radioativos que serão utilizadas tanto em situações normais como accidentais, incluem:

- Etiquetas do embalado
- Marcas do embalado
- Placas de sinalização do veículo
- Documentos de expedição.

### 12.3.1 Etiquetas do embalado



Todos os embalados devem exibir uma etiqueta indicativa de material radioativo, com exceção dos embalados com quantidade limitada (embalado excepcional).

Existem três tipos de etiquetas que são utilizadas para identificar os materiais radioativos. Todas estas etiquetas exibem o símbolo na forma de trifólio, que é a maneira universal para identificação de radioatividade ou radiação. As informações contidas na etiqueta de um embalado são suficientes para determinar o risco associado, sem o uso de um detector de radiação.

A etiqueta radioativa Branca-I é usada em embalados com uma taxa de dose máxima de 0,005 mSv/h ( 0,5 mrem/h ) sobre qualquer ponto encostado à superfície externa do embalado.

A etiqueta radioativa Amarela - II é usada em embalados que apresentam uma taxa de dose máxima de 0,5 mSv/h ( 50 mrem/h ) sobre qualquer ponto encostado à superfície externa do embalado. A etiqueta radioativa Amarela - III é usada em embalados com uma taxa de dose máxima de 2 mSv/h ( 200 mrem/h ) sobre qualquer ponto encostado à superfície externa do embalado.

As cores apresentadas nas etiquetas da figura ao lado são padronizadas internacionalmente. A cor do texto e do símbolo de radiação é preta, exceto a cor dos numerais I, II ou III que deve ser vermelha.

O tipo de etiqueta indica, rapidamente, para qualquer pessoa informada do público ou para autoridades, a taxa de dose próxima ao embalado, se o embalado não estiver danificado. Caso contrário, este valor deve ser avaliado.

As etiquetas indicam também o tipo de material radioativo contido no embalado e sua respectiva atividade. Estas informações são úteis para os especialistas de radioproteção, na determinação do grau de risco apresentado se o embalado for danificado e apresentar liberação de material radioativo.

Uma expedição sob uso exclusivo pode ser usada para expedir um embalado com uma taxa de dose máxima de 10 mSv/h ( 1000 mrem/h ) se as exigências especiais e instruções forem seguidas. Note que em todos os casos, a taxa de dose na superfície de um embalado não danificado não será maior que 1000 mrem/h.

### 12.3.2 Marcas do embalado

Geralmente, todos os embalados etiquetados como radioativo também trarão uma marca mostrando um certo nome próprio de expedição e um número de identificação das Nações Unidas contendo quatro dígitos. Por exemplo, a marcação ou embalado poderia mostrar as palavras *Material Radioativo, Baixa Atividade Específica - BAE* e o número *UN2912*. Com o nome próprio para expedição ou o número de identificação, as autoridades envolvidas em uma emergência podem determinar as ações de resposta adequadas a serem seguidas.

### 12.3.3 Placas de sinalização do veículo

Assim como as etiquetas e marcações são usadas para mostrar a quantidade de radioatividade e o nível de radiação emitida em um embalado, as placas são sinalizações padrões afixadas no exterior de um veículo ou na frente do recipiente, para identificar os riscos associados com a carga.

As placas são usados pelos transportadores de tal forma que os especialistas possam determinar as ações apropriadas a serem seguidas num cenário de acidente, tais como estratégias de contenção de incêndio, técnicas de confinamento de derramamento ou fugas, e atendimentos de primeiros socorros



Qualquer veículo transportando um embalado com etiqueta radioativo Amarela – II ou Amarela - III, ou uma mescla destas categorias deve exibir o cartaz mostrado a ao lado.

#### 12.4 Documentos de expedição

Os documentos de expedição listam todas as informações exibidas nas etiquetas e marcas do embalado. Também fornecem informações adicionais, incluindo a forma física e química do material, a classe de risco do material e o número de identificação do material.

Uma quarta fonte de informação a respeito da expedição de material radioativo disponível no cenário de um acidente de transporte são os documentos de expedição. Com certas exceções, os documentos para expedição que identificam os riscos oferecidos pelo material são exigidos para serem conservados:

- na cabina do veículo numa posição fácil de ser acessada pelo motorista
- com um membro da tripulação de um trem
- com um membro da tripulação de um navio
- com o piloto da aeronave

### 13 GERÊNCIA DE REJEITOS RADIOATIVOS

“Lixo atômico” é o termo popular empregado para designar o “lixo” radioativo gerado nos reatores nucleares e nas usinas de reprocessamento de elementos combustíveis queimados. Contudo, o termo mais adequado e utilizado pela comunidade científica é “rejeito radioativo” que abrange todos aqueles materiais gerados nos diversos usos dos materiais radioativos, já estudados no capítulo 4, que não podem ser reaproveitados e que contêm substâncias radioativas em quantidades tais que não podem ser tratados como lixo comum.

#### 13.1 Origem dos rejeitos radioativos

Os rejeitos radioativos são classificados em dois grupos principais: os rejeitos institucionais e os rejeitos do ciclo do combustível.

Os rejeitos institucionais originam-se nas instalações radiativas, ou seja, instituições de pesquisa, laboratórios de análises clínicas, hospitais, indústrias e universidades. Os materiais mais comuns que constituem esta categoria são: rejeitos sólidos, compostos de luvas, papéis, algodão, vidros e mais uma série de materiais comuns utilizados em laboratório que, pelo contato com substâncias radioativas, ficaram contaminados; e rejeitos líquidos, constituídos principalmente da água utilizada na descontaminação de instrumentos e das soluções que são utilizadas nas análises de laboratório.

Quase todas as substâncias radioativas utilizadas nestas instalações são produzidas artificialmente, a partir de substâncias não radioativas, em aceleradores de partículas ou, principalmente, em reatores nucleares os quais, para funcionarem, necessitam de combustível nuclear: o urânio.

Para poder ser utilizado nos reatores, o urânio é extraído de minérios, concentrado, purificado e processado. As instalações onde são realizados estes processos são chamadas de “instalações nucleares” e é nelas que são gerados os “rejeitos do ciclo do combustível”.

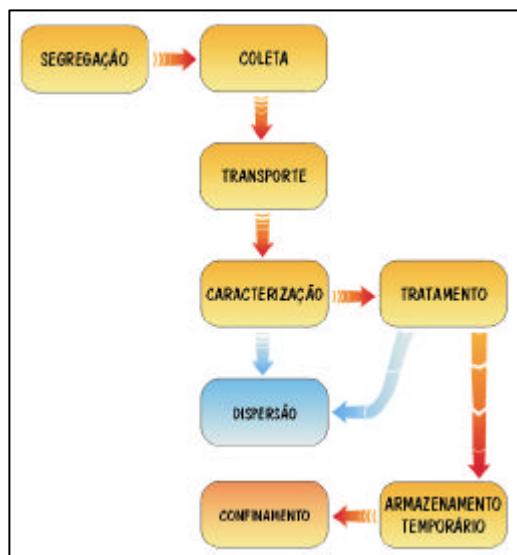
Estes rejeitos aparecem com volumes e atividades muito maiores que os rejeitos institucionais e têm, além disso, uma variedade de composição muito maior. Tanto podem ser as milhares de toneladas de material com baixa radioatividade das sobras do minério, como os poucos litros de líquido com altíssima radioatividade que resultam do reprocessamento do combustível nuclear após seu uso no reator.

Há ainda um terceiro grupo, constituído dos rejeitos radioativos que são gerados quando as instalações do ciclo do combustível são desmontadas ao fim da sua vida útil. São compostos, na maior parte, de metais e materiais de construção contaminados ou que ficaram ativados. A maior parte vem da desmontagem dos reatores nucleares.

## 13.2 Gerência dos rejeitos radioativos

Os rejeitos radioativos precisam ser cuidados de forma adequada para não causarem danos ao homem e ao meio ambiente, da mesma forma que qualquer resíduo convencional. Cuidar convenientemente dos rejeitos radioativos significa realizar uma série de ações que vai desde a coleta dos rejeitos no ponto onde são gerados, até seu destino final, obedecendo-se aos requisitos de proteção aos trabalhadores, aos indivíduos, do público e ao meio ambiente.

A esta série de ações dá-se o nome de "Gerência de Rejeitos Radioativos". Ela inclui a coleta, a segregação dos diversos tipos de rejeitos, o transporte, a caracterização, o tratamento, o armazenamento e a disposição final (dispersão ou confinamento).



### 13.2.1 Coleta



É a colocação dos rejeitos em recipientes adequados, separados dos resíduos comuns e feita por quem gera os rejeitos, no local onde são gerados (figura ao lado).

### 13.2.2 Segregação

Significa a separação física de cada tipo de rejeito no momento da coleta de modo a facilitar e permitir o tratamento posterior. Ela é feita de acordo com a natureza física, química e radiológica dos materiais presentes no rejeito e reflete também a infra-estrutura de tratamento existente na instituição que vai tratá-lo. De modo a orientar a segregação, estabelece-se, em geral, uma classificação para os diferentes tipos de rejeitos.

As classificações mais comuns são:

**Pelo estado físico dos rejeitos:**

- sólidos: que podem subdividir-se, em função do tratamento que podem sofrer, em: compactáveis ou não compactáveis, incineráveis ou não incineráveis, biológicos, fontes seladas, sólidos úmidos etc.
- líquidos: que podem subdividir-se, em função da natureza química, em: orgânicos ou inorgânicos, ácidos ou alcalinos, inflamáveis ou não inflamáveis etc.
- gasosos: que podem subdividir-se, em função de sua constituição, em: gases ou aerossóis.

**Pela natureza radiológica dos rejeitos:**

- em função da sua atividade: baixa, média ou alta. Os rejeitos de baixa atividade são aqueles que não necessitam blindagem para serem manipulados; os de média atividade requerem o uso de blindagens para proteção dos operadores; e os de alta atividade requerem, além da blindagem, o constante resfriamento para remover o calor que geram continuamente. Os rejeitos institucionais e os rejeitos da desmontagem das instalações são quase todos de atividade baixa; os rejeitos do ciclo do combustível são de atividade baixa, média ou alta, dependendo do processo em que se originam.

- em função da meia-vida: curta, intermediária e longa. Os rejeitos de meia-vida curta são aqueles que decaem com meia-vida de até poucos anos; os de meia-vida intermediária são aqueles com meia-vida de poucas dezenas de anos; e os de longa são os restantes. Um exemplo do primeiro é o rejeito gerado no uso do radioisótopo Iodo-131 em diagnóstico de doenças, o qual tem meia-vida de 8 dias; um exemplo do segundo é o rejeito da operação dos reatores, que contém Césio-137, com meia-vida de 30 anos; um exemplo do terceiro é o rejeito do reprocessamento do combustível nuclear que contém Plutônio-239, cuja meia-vida é 24.000 anos.
- em função do tipo de radiação que emitem: emissores beta/gama, emissores alfa. Esta distinção é importante porque os emissores alfa são quase sempre mais radiotóxicos que os emissores beta/gama.

### 13.2.3 Tratamento

É o processamento físico e químico dos rejeitos para deixá-los numa forma adequada aos processos das etapas posteriores da gestão.

### 13.2.4 Armazenamento

É a guarda temporária dos rejeitos já tratados na própria instalação de tratamento.

### 13.2.5 Disposição final

É a colocação dos rejeitos no meio ambiente de forma controlada, não recuperável e definitiva. A disposição final dos rejeitos radioativos de forma segura, à luz do atual desenvolvimento científico e tecnológico, permite duas formas possíveis de destinação final: a dispersão imediata no meio ambiente ou o confinamento definitivo nos chamados repositórios.



A dispersão é o processo pelo qual os rejeitos radioativos, após um devido tratamento físico-químico, são lançados diretamente nos vários compartimentos do ecossistema: na atmosfera em se tratando de rejeitos gasosos, em cursos d'água em se tratando de líquidos e em aterros sanitários convencionais no caso de rejeitos sólidos. A dispersão é adotada somente quando estudos prévios asseguram que os riscos ecológicos e à saúde humana decorrentes de tal prática são inferiores àqueles cotidianamente aceitos pela sociedade e aprovados pelas autoridades. Estes estudos normalmente envolvem a utilização de códigos computacionais para a formulação de modelos matemáticos que simulam os caminhos percorridos pelos elementos radioativos no meio ambiente até seu possível contato com o homem e o cálculo da probabilidade de ocorrência de danos biológicos. Denomina-se *efluente radioativo* o rejeito a que se pode dar este tipo de disposição final.

Os riscos associados à dispersão imediata dos rejeitos no meio ambiente, acima de certos níveis de radioatividade, são inaceitáveis e, em consequência, estes rejeitos precisam ser confinados definitivamente nos repositórios.

O confinamento implica no isolamento dos rejeitos dentro dos repositórios, por longos períodos de tempo - da ordem de centenas a milhares de anos, dependendo da meia-vida. Os repositórios são construções, em geral subterrâneas, projetadas e realizadas de modo a minimizar o contato antecipado do rejeito com a biosfera.

Após esta breve descrição dos aspectos relevantes da Gerência de Rejeitos, são detalhados nos capítulos seguintes as etapas consideradas mais importantes e que mais preocupação causam ao público: o tratamento e o confinamento dos rejeitos.

### **13.3 Tratamento de rejeitos radioativos**

O tratamento dos rejeitos é realizado com o objetivo de promover transformações nas propriedades físicas e químicas dos rejeitos, que resultam em um aumento da segurança e numa redução dos custos de transporte e disposição final. O tratamento de rejeitos emprega, em geral, processos bem estabelecidos nas indústrias convencionais, adaptados para as condições de trabalho com radiação.

Alguns processos de tratamento são específicos para certas classes de rejeitos enquanto que outros podem ser utilizados para vários tipos diferentes. A seguir são apresentados os principais processos de tratamento para as classes mais comuns de rejeito.

#### **13.3.1 Tratamento de rejeitos sólidos**

Rejeitos sólidos são gerados em grandes quantidades tanto nas instalações nucleares como nas instalações radiativas. Em geral, são constituídos de materiais descartados em laboratórios, como luvas, papéis, algodão, vidros, peças de roupa, máscaras, filtros etc. Demandam muito espaço de estocagem, o que representa um custo muito alto de operação das instalações. Estes rejeitos contêm, entretanto, grandes quantidades de materiais inertes o que justifica o uso de processos para redução de volume.

Os métodos de redução de volume mais empregados são: a compactação e a incineração.

No processo de compactação, os rejeitos que geralmente são recolhidos em sacos de papel ou plástico, são prensados dentro de um tambor metálico de 200 L, que será a embalagem definitiva; o fator de redução de volume é da ordem de 4.

Na incineração, os rejeitos são queimados em fornos especiais até se converterem em cinzas; o fator de redução de volume pode chegar a 80.

Em ambos os casos, os radionucléidos não são removidos do rejeito. Na incineração, a maior parte dos radionucléidos se concentra nas cinzas e o restante, que é transportado com a fumaça, fica retido nos filtros. O rejeito compactado ou as cinzas são então armazenados e depois transportados para o repositório final.

Os rejeitos sólidos que não podem ser compactados e que não são incineráveis são simplesmente acondicionados em tambores ou caixas metálicas, armazenados e depois transportados para o repositório.

Quando estes rejeitos são de média atividade, são antes “encapsulados” dentro dos tambores ou caixas, vertendo-se sobre eles uma pasta de cimento, betume fundido ou outro agente solidificante para se obter um bloco monolítico.

#### **13.3.2 Tratamento de rejeitos líquidos**

O tratamento de rejeitos líquidos consiste em uma ou mais etapas de condicionamento físico-químico, com o objetivo de reduzir o volume dos rejeitos e adequá-los às etapas seguintes da gerência dos rejeitos, diminuindo os custos e aumentando a segurança.

Os processos e os métodos de tratamento são muito variados porque os rejeitos líquidos produzidos tanto nas instalações do ciclo do combustível como nas instalações radiativas variam muito em volume, atividade e características químicas. Os processos mais comuns são: a neutralização para condicionar quimicamente o rejeito; a precipitação, a evaporação e a troca iônica para reduzir o volume pela eliminação do solvente não radioativo; e a imobilização ou solidificação, para transformar o rejeito líquido em um bloco sólido, adequado aos requisitos de segurança do transporte, armazenamento e disposição final.

A neutralização consiste em ajustar o pH dos rejeitos ácidos ou básicos, os quais são incompatíveis com os processos de imobilização; são também mais agressivos quimicamente e por isso mais difíceis de armazenar com segurança; por fim, para serem liberados no meio ambiente precisam ter pH neutro.

A precipitação é um processo em que são adicionados produtos químicos que reagem com as substâncias presentes nos rejeitos, formando sais insolúveis que vão para o fundo do recipiente. Isto permite uma separação fácil do precipitado, os sais que vão para o fundo, do sobrenadante, o líquido limpo que sobra. O precipitado, separado do sobrenadante, apresenta um volume muito menor que o rejeito original e contém quase toda a atividade inicial. Este precipitado pode ser estocado para decaimento e posterior liberação ou pode ser imobilizado para confinamento prolongado. O sobrenadante descontaminado pode, após monitoração, ser lançado no meio ambiente como resíduo convencional. Caso ainda esteja contaminado, mais etapas de tratamento são utilizadas.

A evaporação é um processo de concentração no qual o rejeito é aquecido para permitir a evaporação da água ou outro solvente, até restar um concentrado que se assemelha a uma lama; os radionuclídeos presentes não se evaporam. Esta lama resultante tem um volume muito menor que o volume do rejeito inicial e tem o mesmo destino que a lama resultante da precipitação.

Os rejeitos líquidos que requerem muito tempo de confinamento devido à presença de radionuclídeos de meia-vida intermediária ou longa precisam ser imobilizados antes de irem para a disposição final, para minimização do risco da dispersão antecipada ao meio ambiente. Isto pode ser conseguido transformando estes rejeitos em materiais sólidos, por meio dos chamados "processos de imobilização".

Estes processos consistem na incorporação dos rejeitos em materiais que têm a propriedade de formar blocos sólidos e manter sua estrutura estável por muito tempo. Exemplos típicos são o cimento, o material mais utilizado para a imobilização, o betume (asfalto), o vidro, os materiais cerâmicos e vários polímeros. Estes materiais são chamados "matrizes de imobilização".

O cimento, o betume e os polímeros são empregados para a imobilização de rejeitos de atividade baixa ou média. O vidro e as cerâmicas, que possuem excelentes propriedades de imobilização, são restritos aos rejeitos de atividade alta devido à complexidade e ao custo elevado do processo de imobilização.

### 13.3.3 Tratamento de rejeitos gasosos

Os rejeitos gasosos são formados por misturas de gases radioativos ou por partículas de materiais radioativos em suspensão no ar. Os rejeitos gasosos são, portanto, mistura de gases radioativos ou aerossóis radioativos no ar.

Estes rejeitos se formam continuamente durante as operações que envolvem a manipulação de substâncias radioativas e estão presentes não só no interior dos ambientes confinados onde são manipuladas estas substâncias como também escapam para o ambiente de trabalho. Eles devem ser continuamente removidos desses locais para se manter as concentrações em níveis seguros para os trabalhadores. Isto é feito por meio de exaustores que conduzem o ar contaminado por uma tubulação para fora da instalação.

Antes porém de serem lançados na chaminé, estes rejeitos precisam passar por processos de tratamento para retenção dos radionuclídeos de modo a proteger o meio ambiente. Os dois processos mais empregados são a filtração e a lavagem de gases.

A filtração é um processo comum, sendo empregado com eficiência nas instalações nucleares. O ar contaminado passa através do filtro que retém as substâncias radioativas e deixa passar ar limpo que é descarregado na atmosfera. O que diferencia um filtro de qualidade nuclear de um filtro de uso comum é o material utilizado como meio filtrante e a eficiência de retenção das partículas. A eficiência dos filtros de qualidade nuclear deve chegar próximo a 100% e os materiais devem suportar condições adversas como temperatura elevada, altos graus de umidade e presença de agentes agressivos, de modo a garantir proteção adequada sob as mais diversas condições. O meio filtrante mais utilizado para a filtração de gases é um adsorvedor feito com carvão ativado. O filtro mais empregado para a retenção de aerossóis é um papel de filtro feito de fibras microscópicas de vidro.

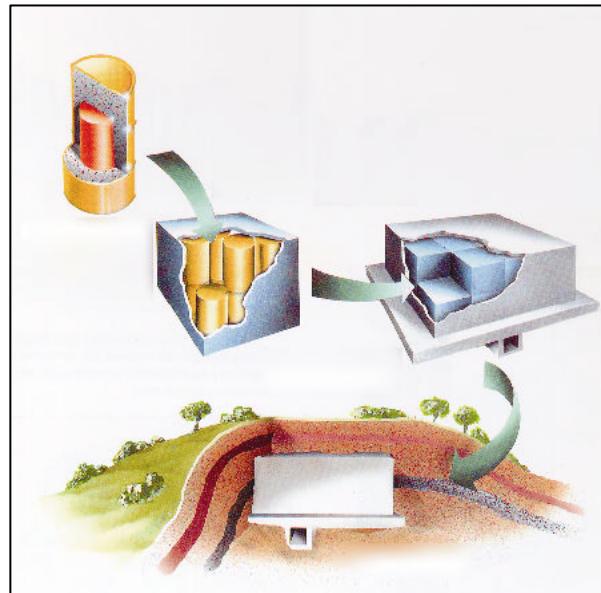
A lavagem de gases é muito usada no controle da poluição na indústria convencional. É a passagem dos gases por uma solução líquida com propriedades químicas apropriadas para reter as partículas de poeira em suspensão e absorver os gases poluentes. Quando a capacidade de retenção desta solução líquida se esgota, ela é tratada como rejeito radioativo líquido por algum dos processos já descritos.

### 13.4 Confinamento

Como foi visto anteriormente, os rejeitos radioativos que não podem ser eliminados diretamente no meio ambiente são confinados nos chamados repositórios.

Os rejeitos contendo radionuclídeos de meia-vida intermediária ou longa e atividade baixa ou média são dispostos em repositórios construídos a pouca profundidade, em geral da ordem de até 30 metros. Os locais onde são construídos estes repositórios são selecionados de tal forma que, mesmo nas décadas ou séculos em que os rejeitos ficarão estocados, o risco para as populações presentes ou futuras seja mínimo. São locais afastados de centros urbanos, com baixa probabilidade de ocupação para a exploração mineral, agropecuária ou de outra natureza, distantes de rios e lagos, com água subterrânea ausente ou profunda, e sem atividade sísmica.

Além destas características favoráveis do local, os repositórios são dotados de "barreiras de engenharia", com o objetivo de aumentar a sua segurança.



Estas barreiras são constituídas de camadas de concreto, argila e outros materiais impermeáveis ao redor das embalagens contendo o rejeito. Elas dificultam a entrada de água no repositório e a saída das substâncias radioativas, aproveitando a baixa permeabilidade do concreto e a capacidade da argila de absorver os radionuclídeos eventualmente liberados das embalagens. Desta forma retarda-se o contato das substâncias radioativas com o meio ambiente. A figura ao lado apresenta uma ilustração de um repositório construído a pouca profundidade e as diversas barreiras de engenharia colocadas entre o rejeito e o meio ambiente.

**Para os rejeitos de atividade alta contendo radionuclídeos de meia-vida longa, o isolamento deve ser mais prolongado e por isso a disposição deve ser feita em profundidades de centenas de metros ou mais, em um meio geológico estável e com baixa permeabilidade à água.**



Um exemplo de meio geológico de grande estabilidade são as minas de sal a centenas de metros de profundidade, pois a própria existência da mina comprova que o local permaneceu intacto e sem contato com água por milhões de anos. A figura ao lado mostra um repositório profundo.

Em qualquer tipo de repositório, o risco de que ocorra algum dano biológico no homem pelo escape de material radioativo deve ser minimizado e independente do tempo. Para isso, as barreiras de engenharia e o meio geológico devem impedir o escape do material radioativo para o meio ambiente enquanto a atividade presente nos rejeitos for elevada. Num futuro remoto, o meio geológico sofrerá alterações e os materiais das barreiras de engenharia vão se degradar deixando as substâncias radioativas presentes nos rejeitos escapar para a biosfera. Quando isto acontecer, a radioatividade já deverá ter decaído para níveis semelhantes à da radiação natural. Nos repositórios construídos a pouca profundidade, este tempo é da ordem de alguns séculos. Nos repositórios profundos, o tempo de confinamento é de centenas de milhares de anos.

A garantia de que o confinamento é um processo seguro, do ponto de vista radiológico, é obtida portanto pela conjugação dos diversos requisitos de segurança citados: localização adequada do repositório, matrizes de imobilização e embalagens que mantenham sua integridade pelo tempo de contenção necessário, existência de barreiras naturais e artificiais no local de disposição e supervisão durante e após a operação do repositório.

### 13.5 Panorama dos rejeitos radioativos no Brasil

Atualmente, todos os rejeitos gerados no Brasil estão armazenados nos seguintes locais:

- ❑ Institutos de pesquisa subordinados à Comissão Nacional de Energia Nuclear (IPEN, CDTN e IEN), onde são tratados os rejeitos gerados nos próprios institutos e aqueles recolhidos de hospitais, clínicas, indústrias e outras instituições;
- ❑ Central Nuclear de Angra, onde estão armazenados os rejeitos de atividade baixa e média gerados na própria usina.
- ❑ Complexo Industrial de Poços de Caldas, onde estão armazenados os rejeitos gerados na purificação de concentrados de urânio e tório.
- ❑ Depósitos da antiga Usina Santo Amaro em São Paulo e Botuxim (SP), onde estão armazenados os rejeitos gerados na purificação de terras raras extraídas da monazita.

- ❑ Repositório de Abadia de Goiás. Os rejeitos provenientes do acidente radiológico de Goiânia constituem-se em um caso particular, já definitivamente solucionado. Foi construído um repositório em Abadia de Goiás (GO) para receber os rejeitos que foram gerados na descontaminação das áreas atingidas pelo acidente. A figura ao lado mostra o repositório de Abadia de Goiás (colina verde ao fundo).



## 14. CONTROLE RADIODÉGICO AMBIENTAL

A liberação de materiais radioativos decorrente de atividades humanas envolvendo radiações ionizantes pode eventualmente elevar os níveis de radioatividade no meio ambiente e aumentar a dose de radiação dos indivíduos expostos, atingindo valores que podem ser considerados significativos.

As doses individuais decorrentes de fontes artificiais de radiação variam consideravelmente. A maior parte da população está sujeita a uma quantidade relativamente pequena de fontes artificiais de radiação, entretanto algumas pessoas estão sujeitas a quantidades várias ordens de grandeza superiores às decorrentes de fontes naturais.

Como já citado anteriormente, a radiação natural é responsável pela maior parte da dose de radiação recebida pela população mundial; entretanto, os órgãos nacionais e internacionais elaboraram normas e padrões específicos que limitam somente as doses decorrentes de fontes de radiação artificial. Essas normas estabelecem um sistema de limitação de dose aplicável para qualquer instalação em condições normais de operação.

O projeto de uma instalação deve, portanto, garantir que, em condições normais de operação, a descarga de material radioativo para o meio ambiente não resulte em doses nos indivíduos do público acima dos limites máximos admissíveis.

Cabe à Proteção Radiológica da instalação estabelecer um programa de análise ambiental visando controlar a descarga de efluentes radioativos para o meio ambiente, bem como verificar se as concentrações dos radionuclídeos liberados, que tenham se concentrado no solo, vegetação, alimentos etc. estão abaixo dos limites pré-estabelecidos.

A elaboração desse programa envolve a especificação do tipo e a frequência de medidas, procedimentos de amostragem, análises em laboratório, testes estatísticos e técnicas de tratamento, assim como do registro desses dados. A parte final deste programa irá envolver a estimativa da dose equivalente e a comparação com os limites máximos admissíveis recomendados pelas normas de proteção radiológica.

O programa a ser estabelecido dependerá do tipo de instalação, sua localização, e características do seu ambiente circunvizinho.

O programa de análise ambiental deverá ser realizado em duas etapas diferentes. A primeira deverá ser antes da instalação entrar em funcionamento (fase pré-operacional), visando principalmente medir os níveis de radiação natural da região. Os resultados obtidos servirão como referência para comparação com aqueles obtidos durante o funcionamento da instalação, de forma a avaliar qualquer alteração futura. A segunda etapa de um programa de análise ambiental será feita durante o funcionamento da instalação (fase operacional), com a finalidade de se avaliar os níveis de radiação recebidos pela população.

## **14.1 Programa de monitoração ambiental**

### **14.1.1 Programa de monitoração ambiental pré-operacional**

Como vimos, o objetivo de um programa de monitoração ambiental pré-operacional é a obtenção de informações sobre o meio ambiente de uma futura instalação. Para tanto, devem ser conhecidos:

- os níveis de radiação natural e artificial da região próxima à instalação
- os fatores de diluição e de concentração dos radionuclídeos nas trajetórias seguidas no meio ambiente
- a distribuição da população de acordo com a idade, o sexo, a dieta, a ocupação doméstica e recreativa nas circunvizinhanças da instalação
- a utilização desse ambiente pelo homem, ou seja, sua agricultura, sua indústria e sua pesca
- os grupos homogêneos na população que poderão receber as maiores doses de radiação (grupo crítico)

O programa de monitoração pré-operacional deve ser iniciado no mínimo um ano, ou de preferência dois a três anos antes do início da operação da instalação e antes do manuseio de material radioativo no local.

### **14.1.2 Programa de monitoração ambiental operacional**

A análise ambiental de uma instalação deve ser feita de forma rotineira.

Os objetivos principais do programa de monitoração ambiental operacional são:

- controlar as descargas de material radioativo no meio ambiente
- avaliar a “exposição potencial” do homem à radiação e materiais radioativos eliminados pela instalação
- demonstrar obediência aos regulamentos e outros limites operacionais
- possibilitar a detecção de algumas mudanças no ambiente resultantes da instalação, após esta ter entrado em operação
- verificar se os dados utilizados na avaliação pré-operacional não estão se modificando

Para o cumprimento desses objetivos é necessário estabelecer um programa de análise ambiental apropriado ao tipo da instalação, às características e aos hábitos da região, à distribuição da população e aos tipos e às quantidades de radionuclídeos cujas liberações podem ser previstas.

O programa de análise ambiental de uma instalação, em condições normais de operação deve ser feito de duas maneiras distintas, uma dentro do próprio estabelecimento e outra externa a ele. A primeira é chamada de análise preventiva e a segunda de análise confirmatória.

Dentro da instalação deve ser feito o controle da liberação dos efluentes radioativos gerados, antes de sua descarga para o meio ambiente. Neste caso, é necessário conhecer a quantidade e o tipo de material radioativo lançado no ambiente (termo fonte), para a contabilização da descarga. De forma a garantir que os limites de dose nos indivíduos do público não serão ultrapassados devem ser determinados previamente os limites derivados de descarga. Estes são definidos como sendo a atividade anual de material radioativo de composição especificada que resultará numa dose equivalente efetiva no grupo crítico igual ao limite de dose recomendado pelas normas específicas.

A liberação de gases radioativos por meio das chaminés pode ser conhecida colocando-se monitores de radiação em locais estratégicos e, quando necessário, filtros absolutos para pó ou outros filtros, como o de carvão ativo para gases.

Controla-se a liberação dos efluentes líquidos radioativos ao meio ambiente efetuando-se medidas de sua radioatividade e concentração antes de sua descarga.

Para se ter certeza de que o controle da descarga de material radioativo no meio ambiente é bem conduzido e para se detectar possíveis liberações não planejadas, acima dos limites operacionais pré-estabelecidos, faz-se também medidas de amostras provenientes do meio ambiente sob influência da instalação.

A quantidade de medidas necessárias, sua frequência e importância dependem do programa estabelecido para cada instalação. De maneira geral, os principais tipos de medidas, sem levar em conta sua importância relativa são:

- medidas do ar atmosférico, particulados e gases
- medidas das condições meteorológicas do ambiente, direção e velocidade dos ventos, pluviometria etc
- medida da atividade na água da chuva
- medida da atividade das águas de rios e córregos da redondeza
- medida da atividade das águas subterrâneas
- medida da radioatividade do solo
- medida da radioatividade da fauna e flora da redondeza
- medida da radioatividade nos alimentos consumidos pela população local

É evidente que essa análise ambiental externa pode ser simplificada criteriosamente se forem estudadas as vias críticas de transferência e os grupos críticos da população.

Para se avaliar o impacto ambiental radiológico decorrente da liberação de efluentes radioativos de uma instalação é imprescindível estimar a dose de radiação recebida pelos indivíduos do público e da população em geral.

Para assegurar que os valores encontrados não irão ultrapassar os limites estabelecidos, deve-se tomar o cuidado de incluir a contribuição de outras instalações, que eventualmente possam estar causando dose no mesmo grupo considerado.

O controle ambiental externo, por outro lado, permite avaliar a dose, considerando-se todas as possíveis fontes de radiação.

O programa de análise ambiental deve ser examinado periodicamente para garantir que esteja adequadamente formulado e que atinja seus objetivos. Mudanças na operação do estabelecimento ou nas características do meio ambiente receptor, que possam alterar a exposição da população, requerem modificações do programa.

Se as descargas para o meio ambiente são triviais ou quando a experiência indica que dados suficientes têm sido acumulados, o controle das descargas pode, em certos casos, ser feito unicamente pela monitoração contínua dos efluentes. Quando os estudos das vias de transferência do material radioativo liberado no meio ambiente confirmam os processos pelos quais o material radioativo será diluído ou concentrado até chegar ao homem, pode-se então optar pela monitoração dos efluentes e dispensar as medidas ambientais.

A prática tem mostrado que a reavaliação do programa tende a reduzir a escala de rotina de monitoração ambiental sem perda de informações científicas.

#### **14.2 Comportamento dos radionuclídeos no ecossistema**

A descrição de liberação de radionuclídeos no meio ambiente é conhecida como termo fonte. Esta descrição inclui o conhecimento de tipo de radionuclídeo e sua forma físico-química, da quantidade liberada por unidade de tempo e da configuração geométrica da descarga.

Os radionuclídeos liberados no meio ambiente percorrem diversos caminhos, por meio de vias preferenciais de transferência, até chegarem ao homem. Este movimento pode ser descrito matematicamente por meio de modelos de compartimento. As vias de transferência que contribuem para a maior dose de radiação no homem são conhecidas como vias críticas e são características para cada instalação e meio ambiente receptor.

Portanto, o controle das descargas de materiais radioativos para o meio ambiente e das vias críticas de transferência assegura que a população está sendo adequadamente protegida das radiações ionizantes.

### **15 EMERGÊNCIAS RADIOLÓGICAS**

A CNEN tem a responsabilidade de exercer o monopólio da União sobre as atividades nucleares no País. Toda pessoa física ou jurídica que deseje ou necessite realizar atividades envolvendo fontes de radiação deve ser licenciada pela CNEN.

O processo de licenciamento de uma instalação envolve várias etapas mesmo antes de se adquirir, importar, ou receber em doação, as fontes de radiação. Como parte desse processo, a instalação deve elaborar um plano de radioproteção onde descreve, para condições normais de trabalho, todos os procedimentos relativos ao transporte, posse, uso, armazenamento, processamento e descarte das fontes de radiação, bem como a descrição dos sistemas de segurança e do treinamento do pessoal da instalação. Neste plano também devem constar os tipos de acidentes admissíveis com as fontes de radiação, com destaque para o acidente mais provável e o de maior porte, incluindo um estudo da probabilidade de ocorrência e a maneira como seriam detectados esses acidentes.

Entre os acidentes propostos podem estar desde pequenos derramamentos de substâncias radioativas até o roubo ou extravio do material radioativo da instalação. Também são considerados os eventos de grandes proporções que podem afetar os níveis de segurança das fontes, como incêndios, enchentes e explosões.

Quando ocorre um incidente ou acidente, dependendo de suas características, os trabalhadores e os membros do público podem ser expostos a vários riscos radiológicos, como irradiações e contaminações. Essas situações, fora das condições normais de trabalho, em que se perde o controle da fonte de radiação, e que requerem medidas urgentes para se restabelecer a segurança, são denominadas "Emergências Radiológicas".

A CNEN, além de solicitar uma série de precauções para que se evite a ocorrência de acidentes, exige que, após uma avaliação detalhada dos riscos, a instalação prepare um Plano de Emergência Radiológica, onde devem estar descritos os procedimentos de emergência para limitar a exposição tanto individual como coletiva, recuperar o controle da fonte de radiação, restabelecer as condições de segurança e tratar os feridos e sobreviventes.

#### **15.1 Plano de emergência radiológica**

Um plano de emergência radiológica deve contemplar, no mínimo, as seguintes informações:

- Estrutura organizacional: nem sempre a hierarquia gerencial é mantida em uma situação de emergência radiológica. Um trabalhador, com maiores conhecimentos técnicos da parte de segurança da instalação, pode ser definido como coordenador das ações do atendimento da emergência. Devem estar definidas as tarefas e responsabilidades de cada participante do plano, inclusive citando os meios de notificação das pessoas e das entidades que podem ser acionadas.

- Infra-estrutura: previsão, na instalação, de pronta disposição de equipamentos e dispositivos de emergência, incluindo monitores de radiação, pinças, garras, blindagens, placas de sinalização, etc., para fazer frente ao incidente ou acidente.
- Procedimentos de emergência: procedimentos escritos a serem adotados, para cada cenário postulado, na avaliação da situação, nas medidas iniciais de proteção, nas medidas iniciais de correção, e nas ações de recuperação. Estes procedimentos devem ser constantemente reavaliados e atualizados, considerando as alterações organizacionais, de infra-estrutura e as experiências adquiridas ao longo do tempo.
- Programa de treinamento: o plano deve prever disposições para ensaiar, por meio de exercícios periódicos, todas as pessoas envolvidas em ações e tarefas previstas nos procedimentos.
- Apoio: para fazer face a situações emergenciais como incêndio, roubo, extravio, colisão, etc., a instalação deve contar com o apoio de autoridades locais para tomar as medidas corretivas necessárias e desejáveis. Para isso, o plano deve conter os endereços e telefones dessas autoridades, bem como de instalações hospitalares e de seus supervisores de proteção radiológica.

Os cenários, durante o atendimento de uma emergência radiológica, dependem muito da sequência de eventos e da eficácia das medidas tomadas para mitigar seus efeitos. Não são raras as ocorrências onde surgem componentes complicadores durante as ações de recuperação. Por isso é importante que os procedimentos de emergência sejam montados com instruções fáceis de serem entendidas e executadas e que todo o trabalhador esteja familiarizado com esses procedimentos, de forma que ele possa se adaptar aos novos cenários e minimize sua exposição à radiação.

A resposta a uma emergência, dependendo da evolução verificada, pode se dar nos mais diversos níveis; por isso, estar preparado para uma emergência é de importância fundamental. Isto se aplica a cada trabalhador e a todos os níveis hierárquicos de uma instituição. O primeiro passo é conhecer os procedimentos gerais de emergência.

## 15.2 Procedimentos de emergência

Os procedimentos de emergência são instruções documentadas que detalham a implementação de ações e métodos exigidos para obter os objetivos do plano de emergência.

Esses procedimentos devem descrever quais os indicativos de uma situação de emergência, especificando claramente as ações imediatas a serem aplicadas para minimizar a exposição à radiação.

Aqui são considerados os procedimentos gerais de emergência. Os procedimentos específicos e mais complexos devem ser consultados nos planos de emergência elaborados para cada uma das instalações radiativas ou nucleares do País.

O pessoal de radioproteção é responsável pela determinação das doses de radiação e dos níveis de contaminação durante o transcorrer de um evento. Esse grupo também providencia o isolamento e o controle de acesso nas áreas afetadas para minimizar as irradiações e a dispersão de contaminação radioativa, porém, imediatamente após a ocorrência do incidente ou acidente, certos procedimentos, como descritos abaixo, podem ser seguidos. Apesar de cada incidente ser único, e alguns dos passos seguintes poderem não ser aplicáveis, as ações listadas a seguir provêm respostas preliminares adequadas.

### 15.2.1 Derramamento de pequena quantidade de material radioativo

Quando a quantidade de material derramado não é suficiente para causar riscos de doses externas e internas significativas, e que não há risco de contaminação do ar, pode-se tomar as seguintes medidas:

- Informar todas as pessoas do recinto sobre o derramamento;
- Tomar as medidas corretivas rapidamente para evitar o espalhamento da contaminação, por exemplo, colocando um papel mata-borrão sobre o líquido;
- Avisar as pessoas não envolvidas no derramamento para deixarem o local;

- Solicitar a remoção da roupa contaminada e lavar a parte atingida do corpo com bastante água;
- Isolar e sinalizar a área do derramamento;
- Não permitir que as pessoas envolvidas deixem o local sem monitoração e liberação da equipe de proteção radiológica;
- Anotar o nome das pessoas envolvidas no derramamento.

### **15.2.2 Derramamento de material radioativo**

Quando a quantidade de material derramado é suficiente para causar riscos de doses externas e internas significativas, ou que há risco de contaminação do ar, pode-se tomar as seguintes medidas:

- Orientar todas as pessoas não envolvidas no derramamento para deixarem o recinto imediatamente.
- Utilizando-se de luvas ou pinças, tomar as medidas corretivas rapidamente para evitar o espalhamento da contaminação, por exemplo, levantando o frasco e colocando um papel mata-borrão sobre o líquido.
- Descartar as luvas e retirar as peças de roupa contaminadas (avental, etc.).
- Lavar a parte atingida do corpo com bastante água.
- Sair do recinto e sinalizar ao acesso para que ninguém entre no mesmo.
- Não permitir que as pessoas envolvidas se movimentem para fora de uma determinada área para não espalhar a contaminação.
- Não permitir que as pessoas envolvidas deixem a área determinada sem monitoração e liberação da equipe de proteção radiológica.
- Anotar o nome das pessoas envolvidas no derramamento.

### **15.2.3 Acidentes com a contaminação do ar**

A contaminação do ar pode ocorrer devido à evaporação, vaporização, explosão, combustão, formação de fumaça, escape de gás, etc. Nestes casos pode-se tomar as seguintes medidas:

- Avisar as pessoas para deixarem o local imediatamente.
- Uma medida simples de proteção respiratória é colocar sobre a boca e o nariz um lenço, panos ou toalhas úmidos, dobrado várias vezes e respirar através deles. A redução da contaminação interna que pode ser obtida com esta prática é de 1/10.
- Tomar as medidas possíveis no momento para evitar a dispersão da contaminação (desligar exaustão externa, etc.).
- Sair rapidamente e fechar todos os acessos ao recinto.
- Sinalizar o recinto e providenciar para que ninguém entre no mesmo.
- Reunir todas as pessoas que estiverem sob suspeita de contaminação em uma área próxima para serem monitoradas e descontaminadas. Somente em caso de atendimento médico permitir que uma pessoa não monitorada deixe a área.
- Anotar o nome das pessoas envolvidas no derramamento.

#### **15.2.4 Perda ou extravio de fontes de radiação**

- Avisar as pessoas para que mantenham distância do local onde a fonte possa estar, isolar e sinalizar a área.
- Acionar imediatamente o serviço de proteção radiológica para realizar um levantamento radiométrico e rastrear a fonte.
- Antes de tomar as medidas corretivas providenciar blindagem ou recipiente adequado para o transporte da fonte, pinças e garras para remover a fonte.
- Deve-se fazer uma estimativa da dose que possa ser recebida pelos indivíduos durante a operação de resgate, e deve-se controlar o tempo gasto na recuperação.
- A fonte recuperada deve ser colocada em um recipiente ou em uma blindagem, que deve ser adequadamente sinalizada.
- Caso não seja possível localizar a fonte, a CNEN deve ser avisada imediatamente.
- Preparar um relatório da ocorrência.

#### **15.2.5 Incêndios em locais com material radioativo**

- Avisar todas as pessoas para deixarem o local.
- Caso não haja risco com o fogo ou a fumaça, remover os embalados em bom estado da área de incêndio.
- Não remover embalados que já tenham sido danificados.
- Combater o fogo à maior distância possível.
- Avisar os bombeiros e outras pessoas da segurança local sobre a existência de fonte radioativa no local.
- Orientar o combate ao fogo e as atividades de emergência (distância, água em neblina).
- Encaminhar para monitoração e descontaminação todas as pessoas envolvidas na emergência.
- Providenciar a descontaminação após a ação reparadora.
- Preparar o relatório sobre o acidente.

### **15.3 Procedimentos básicos de emergência**

No caso de uma pessoa envolvida necessitar de auxílio médico urgente, deve-se atendê-la prontamente. Não é por ela estar possivelmente contaminada que se atrasará o seu atendimento. Porém, os médicos devem ser informados que a vítima pode estar contaminada.

No caso de ingestão de radioisótopos, a não ser que o vômito seja contra-indicado, deve-se provocar o vômito na vítima. Pode-se fornecer um copo de água para a vítima e repetir processo.

Depois de tomadas as medidas de recuperação da situação, a área deve ser monitorada para que se tenha a certeza de que as providências tomadas foram eficazes.

Para a aplicação das medidas de controle necessárias deve ser usado o menor número de trabalhadores possível e estabelecer um procedimento de tal forma que as doses recebidas sejam as menores possíveis, ou seja, elas devem ser otimizadas.

Após o término da situação de emergência, é aconselhável que os dosímetros de leitura indireta de todos os trabalhadores envolvidos sejam encaminhados para processamento e avaliação.