

Guia Definitivo de Radioproteção

Tudo que você precisa saber sobre
proteção radiológica



Guia Definitivo de Radioproteção

Seja bem vindo ao Guia Definitivo de Radioproteção da LinceRadio. Preparamos um material completo para você tirar todas as suas dúvidas sobre proteção radiológica.

Tratamos dos principais conceitos que envolvem a radioproteção: radiação ionizante, efeitos da radiação em humanos, plano de radioproteção e o mercado de trabalho em radioproteção.

A partir da leitura deste Guia você estará consciente de todos os riscos da radiação, mas também saberá exatamente como se proteger.

Tudo sobre os serviços de radioproteção que devem ser aplicados na sua empresa, setor ou atividade você vai encontrar aqui.

Aproveite a leitura e qualquer dúvida basta acessar o radioprotecaonapratica.com.br. Mantemos nosso blog ativo e atualizado com as principais novidades e informações acerca da radioproteção.



Este eBook é pra mim?

Radioproteção ou Proteção Radiológica é um conjunto de medidas que visam proteger o homem e o ecossistema de possíveis efeitos indesejáveis causados pelas radiações ionizantes.

Para isso, ela analisa os diversos tipos de fontes de radiação, as diferentes radiações e modos de interação com a matéria viva ou inerte, e as possíveis consequências e sequelas à saúde e riscos associados.

Se você é um profissional ou estudante da área de Segurança do Trabalho ou de radioproteção e tem que lidar com os controles de fontes de radiação, de áreas e de IOEs, esse eBook é pra você.



Sumário

O que é Radioproteção? 9

Entendendo o que é Radiação..... 11
 ESTRUTURA DA MATÉRIA 12

O que é um átomo? 14
 NÚCLEO DO ÁTOMO 14
 ELETROSFERA 15
 TRANSIÇÕES ATÔMICAS 16

Radiação Ionizante e Não ionizante 19
 TIPOS DE RADIAÇÃO 19
 RADIAÇÃO ALFA, BETA E GAMA 20

Poder de Penetração da Radiação 21

O que é Radioatividade?..... 22

Radiação Ionizante 24
 CONSTANTE DE DECAIMENTO RADIOATIVO E MEIASVIDAS..... 25

O que é Radioisótopo? 28
 UNIDADES DE RADIAÇÃO 28

Efeitos Biológicos da Radiação..... 31



De onde vem a radiação?	35
FORMAS E TIPOS DE IRRADIAÇÃO	41
DIFERENÇA ENTRE CONTAMINAÇÃO E IRRADIAÇÃO	41
EXEMPLOS DE EXPOSIÇÃO DE CORPO INTEIRO, PARCIAL OU COLIMADA	41
EXPOSIÇÃO A FEIXES INTENSOS, MÉDIOS E FRACOS	42
EXPOSIÇÃO A FÓTONS, PARTÍCULAS CARREGADAS OU A NÊUTRONS.....	43
DANOS CELULARES.....	44
Mutações.....	46
MODIFICAÇÃO CELULAR PELA RADIAÇÃO	46
MORTE CELULAR.....	47
DETRIMENTO.....	48
DETECTABILIDADE EPIDEMIOLÓGICA	48
CLASSIFICAÇÃO DOS EFEITOS BIOLÓGICOS.....	49
EFEITOS BIOLÓGICOS PRÉ-NATAIS	52
REVERSIBILIDADE, TRANSMISSIVIDADE E FATORES DE INFLUÊNCIA.....	53
USO DE EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO EM TERAPIAS.....	55
Radioproteção.....	57
O QUE É A CNEN?	60
PRINCÍPIOS DE RADIOPROTEÇÃO	60
O que é um IOE?	62
JUSTIFICAÇÃO	63
OTIMIZAÇÃO.....	63
LIMITAÇÃO.....	65
CUIDADOS DE RADIOPROTEÇÃO	67
TEMPO	67
DISTÂNCIA	67
BLINDAGEM	68
CAMADA SEMI-REDUTORA.....	68



Regras Práticas de Radioproteção	70
PLANO DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA.....	70
Atividades do Serviço de Proteção Radiológica	74
TRANSPORTE.....	79
CLASSIFICAÇÃO DAS ÁREAS DE TRABALHO.....	81
A Quantificação da Radiação Ionizante	83
CAMPO DE RADIAÇÃO	83
GRANDEZAS DOSIMÉTRICAS	84
GRANDEZAS LIMITANTES.....	84
GRANDEZAS OPERACIONAIS	85
Condições de Medição	86
ATIVIDADE.....	87
EXPOSIÇÃO.....	88
DOSE ABSORVIDA.....	89
DOSE EQUIVALENTE.....	90
DOSE EQUIVALENTE NUM TECIDO OU ÓRGÃO.....	90
DOSE EQUIVALENTE EFETIVA	91
Detectores de Radiação	92
PROPRIEDADES DE UM DETECTOR	92
EFICIÊNCIA DE UM DETECTOR.....	93
FATORES QUE DEFINEM A ESCOLHA DE DETECTORES	94
TIPO DA RADIAÇÃO	94
INTERVALO DE TEMPO DE INTERESSE	95
PRECISÃO.....	95
CONDIÇÕES DE TRABALHO DO DETECTOR	96



TIPO DE INFORMAÇÃO DESEJADA.....	96
CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS E CUSTO.....	96
MONITOR DE RADIAÇÃO.....	97
DOSÍMETRO.....	98
EMULSÕES FOTOGRÁFICAS.....	99
DETECTORES TERMOLUMINESCENTES(TLD).....	102
DETECTORES A GÁS.....	103
Câmaras de Ionização.....	107
CÂMARA DE IONIZAÇÃO DE AR LIVRE (FREE AIR CHAMBRE).....	108
CANETA DOSIMÉTRICA.....	108
CÂMARA DE IONIZAÇÃO PORTÁTIL.....	108
CÂMARA DE IONIZAÇÃO TIPO POÇO.....	108
DETECTORES PROPORCIONAIS.....	109
DETECTORES GEIGER-MÜLLER.....	109
DETECTORES A CINTILAÇÃO.....	111
VÁLVULA FOTOMULTIPLICADORA.....	111
MATERIAIS CINTILADORES.....	112
EMISSÃO DE LUZ EM MATERIAIS CINTILADORES ORGÂNICOS.....	113
CINTILADORES PLÁSTICOS.....	114
DETECTORES A CINTILAÇÃO LÍQUIDA.....	114
DETECTORES UTILIZANDO MATERIAIS SEMICONDUTORES.....	115
CALIBRAÇÃO DE DETECTORES: RASTREABILIDADE.....	117
INCERTEZAS ASSOCIADAS ÀS MEDIÇÕES.....	118
Mercado de Trabalho em Radioproteção.....	119
RADIOGRAFIA INDUSTRIAL.....	119
SUPERVISOR DE RADIOPROTEÇÃO.....	120
ENGENHEIRO DE RADIOPROTEÇÃO.....	121



Segurança do Trabalho	122
TÉCNICO EM SEGURANÇA DO TRABALHO.....	123
ENGENHEIRO DE SEGURANÇA DO TRABALHO.....	124
MÉDIA SALARIAL EM SEGURANÇA DO TRABALHO	125
CURSO SUPERIOR DE SEGURANÇA DO TRABALHO.....	126
FONTES	127



O que é Radioproteção?

Radioproteção é um conjunto de ações que visam proteger tanto as pessoas como o próprio meio ambiente de possíveis efeitos causados pelas radiações ionizantes.

O conceito de radioproteção foi estabelecido, no entanto você acha que essa breve descrição é suficiente? Quais ações protetivas são essas? O que é radiação ionizante? Meus amigos ou funcionários que trabalham em offshore estão protegidos da radioatividade? Calma.

Estamos aqui para explicar tudo o que você precisa saber sobre radioproteção, radiação e muito mais.

Veja só os principais assuntos que iremos abordar durante todo o texto:

- Radiação
- Efeitos da Radiação
- Radioproteção
- Normas e equipamentos em Radioproteção
- Mercado de Trabalho em Radioproteção

Buscamos responder ao questionamento que se impõe:



Afinal de contas, como e do que a radioproteção pode nos proteger?

O conceito de radioproteção apresentado aqui leva em conta os efeitos da radiação ionizante sobre as pessoas. Por isso precisamos esclarecer de que tipo de radiação estamos falando e o que ela pode causar no organismo dos seres humanos.

Começaremos tratando de radiação. Seu conceito e implicações práticas.

Entendendo o que é Radiação

Radiação é a propagação de energia, na forma de ondas eletromagnéticas ou de partículas. A onda eletromagnética é uma forma de energia, constituída por campos elétricos e campos magnéticos variáveis e oscilando em planos perpendiculares entre si, capazes de propagar-se no espaço. No vácuo, sua velocidade de propagação é de 300.000 km/s.

Os materiais radioativos e a sua decorrente radioatividade produzida existem no espaço sideral desde a origem do universo. Vários materiais radioativos fizeram parte da formação do planeta Terra e estão aqui até hoje.

Começamos a usar alguns desses elementos a partir do séc. XIX e não paramos até hoje. Sempre aprendendo e desenvolvendo ainda mais as suas potencialidades, mas nunca esquecendo dos seus perigos e cuidados necessários.

O conhecimento acerca de radiação passa por uma abordagem de algumas noções fundamentais sobre ciência. Somente revisando alguns conceitos básicos seremos capazes de estabelecer uma conversa esclarecedora sobre os níveis, efeitos e riscos da exposição à radiação.

Dessa forma precisamos falar sobre os principais componentes da matéria: os átomos.

Estrutura da Matéria

Você deve lembrar das suas aulas de ciências que todos os materiais existentes em todo o universo são constituídos de átomos.

A maneira como os átomos se combinam depende da sua natureza e das propriedades que as suas estruturas propiciam.

As substâncias mais simples são constituídas de átomos de um mesmo tipo. Quando essas simples estruturas se combinam formam-se moléculas. São substâncias compostas que se combinam a outras substâncias compostas formando, no caso dos seres vivos, células, tecidos, órgãos, ossos, praticamente tudo de um indivíduo.

Por muito tempo os pesquisadores acharam que o átomo era indivisível e que era a menor porção da matéria.

Mas sabemos que não é só isso.

Os átomos têm diversas partículas em sua composição. É essencial saber como cada uma destas pequenas partes do átomo funcionam para entender de onde vem a radiação emitidas a partir delas.

Por essa razão, vamos recordar cada elemento que

compõe o átomo.

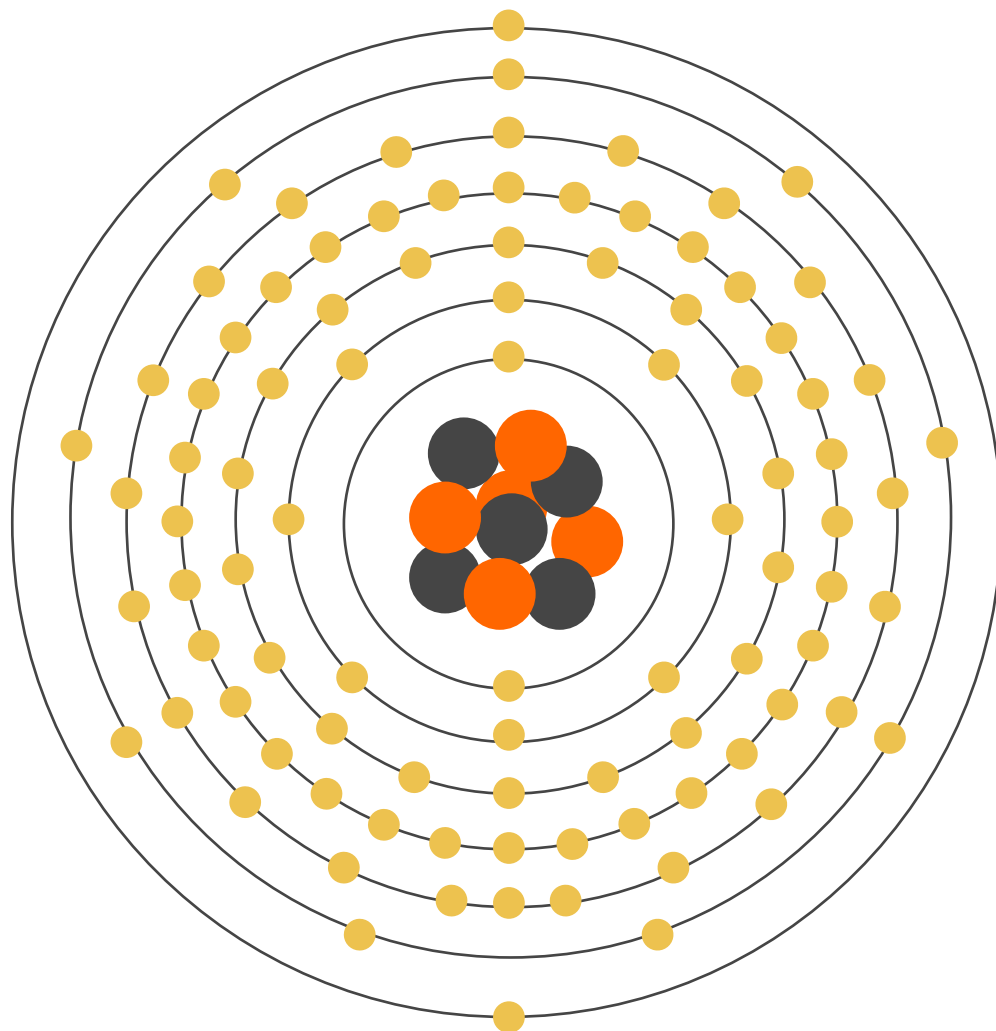


ILUSTRAÇÃO DETALHADA DE UM ÁTOMO

Número atômico

92

Símbolo

U

Nome

URÂNIO

● elétrons

● prótons

● nêutrons

O QUE É UM ÁTOMO?

Átomo é a menor parte capaz de identificar um elemento químico. É composto de um núcleo de nêutrons não carregados e de prótons positivamente carregados, rodeados por uma nuvem de elétrons negativamente carregados. Em átomos sem carga, o número de prótons e elétrons é igual, o que representa o número atômico do elemento.

NÚCLEO DO ÁTOMO

O núcleo de um átomo representa cerca de cem milésimos do seu tamanho. Mas não se engane por suas proporções. O núcleo é uma estrutura com tanta densidade que representa quase como a totalidade da massa do átomo.

O núcleo é normalmente um conjunto compacto formado de partículas, prótons e nêutrons, unidas firmemente umas às outras.

Os prótons possuem uma carga elétrica positiva, enquanto os nêutrons não possuem carga.

Os elementos químicos são determinados pelo número de prótons de seus átomos. Sim. Aquele número acima de cada símbolo da tabela periódica. O chamado

número atômico. Por exemplo, o Urânio tem 92 prótons em seu núcleo. Portanto o número atômico do Urânio é 92. Seu símbolo fica representado dessa maneira: U92.

Os elementos com o mesmo número de prótons, mas com diferente número de nêutrons são chamados isótopos. Assim, no caso do Urânio, temos o Urânio-235 e o Urânio-238. Esses dois tipos do elemento químico diferem entre si por causa de 3 nêutrons em seu núcleo.

Já os nêutrons, como o próprio nome indica, são partículas neutras, não têm carga elétrica. Não são positivos ou negativos. Sua principal função é diminuir a força de repulsão existente entre os prótons no núcleo do átomo. O dito popular tem fundamento científico. Os opostos se atraem e os iguais se repelem.

A massa dos nêutrons é quase equivalente à dos prótons. Ambas são iguais a 1. No entanto a massa de um nêutron deve ser sempre um pouco maior que a de um próton. Essa diferença é fundamental, pois sem ela os átomos não existiriam.

De modo geral, um átomo não é considerado como positivo ou negativo. Isto acontece porque o átomo possui o mesmo número de elétrons negativamente carregados e de prótons positivamente carregados.

ELETROSFERA

Eletrosfera é a região periférica atômica. Uma verdadeira nuvem onde os elétrons ficam girando ao redor do núcleo do átomo.

Os elétrons são distribuídos em camadas ou orbitais. Usualmente os elétrons não ocupam o mesmo espaço ao mesmo tempo. Somente dois elétrons podem ocupar a mesma região no espaço, mas eles devem ter características magnéticas diferentes.

Spin, “giro” em inglês, é o nome atribuído ao movimento angular do elétron. Tais movimentos são responsáveis pela transição de pequenas diferenças de energia.

Quanto mais elétrons possuir um elemento químico, mais camadas ou orbitais de spin ele deve ter e por sua vez mais complexa será a maneira como eles se acomodarão no entorno do núcleo atômico.

Os átomos fundamentalmente são neutros (sem carga elétrica), mesmo tendo em sua eletrosfera cargas negativas e em seu núcleo cargas positivas.

A explicação é simples.

Os átomos têm cargas neutras porque os átomos possuem a mesma quantidade de elétrons e de prótons. Isso significa que as cargas negativas dos elétrons anulam as cargas positivas dos prótons, ou seja, neutralizam a atividade atômica.

Contudo, quando os átomos realizam ligações químicas para formar as substâncias simples e compostas, formando moléculas, por exemplo, isso ocorre com os elétrons. Há então uma transferência ou um compartilhamento de elétrons entre dois ou mais átomos.

Agora vem a parte interessante para o estudo da radiação.

A inclusão ou retirada de elétrons de um átomo modifica seu raio, e o caracteriza como um íon.

O íon é um átomo ou conjunto de átomos que possuem uma modificação em sua estrutura por excesso ou carência de elétrons.

Portanto os íons não são neutros como os átomos comuns. Os íons têm carga elétrica, sendo assim classificados como positivos ou negativos.

O íon positivo é o cátion. Possui elétrons a menos em sua composição.

Já o íon negativo, denominado ânion, tem elétrons a mais no

seu arranjo atômico.

A falta de elétrons faz com que a carga nuclear do átomo atue acentuadamente sobre os elétrons que restam, reduzindo assim o raio.

O excesso de elétrons aumenta o raio, devido a atenuação da força de atração pelo núcleo e pelo aumento da repulsão entre os elétrons.

TRANSIÇÕES ATÔMICAS

Os átomos em equilíbrio têm os seus elétrons e seus nucleons (soma de prótons e nêutrons) em orbitais estacionários.

Sendo assim quando partículas ou ondas eletromagnéticas são lançadas contra um átomo, levando em consideração determinadas condições físicas, elas poderão colidir com alguns de seus elétrons ou com o seu núcleo.

Devido à disposição geométrica, ao número, à carga e ao movimento, a probabilidade de colisão com os elétrons é muitas vezes superior à probabilidade de colisão com o núcleo. No choque, a radiação gerada transfere parcial ou totalmente a sua energia que, se for superior a energia de ligação, provocará uma ionização ou uma reação nuclear, respectiva-

mente no átomo ou no núcleo.

Quando a energia absorvida for inferior à energia de ligação, ocorrerá um deslocamento da partícula alvo, para estados disponíveis nas estruturas eletrônica ou nuclear, gerando os denominados estados excitados eletrônicos ou nucleares.

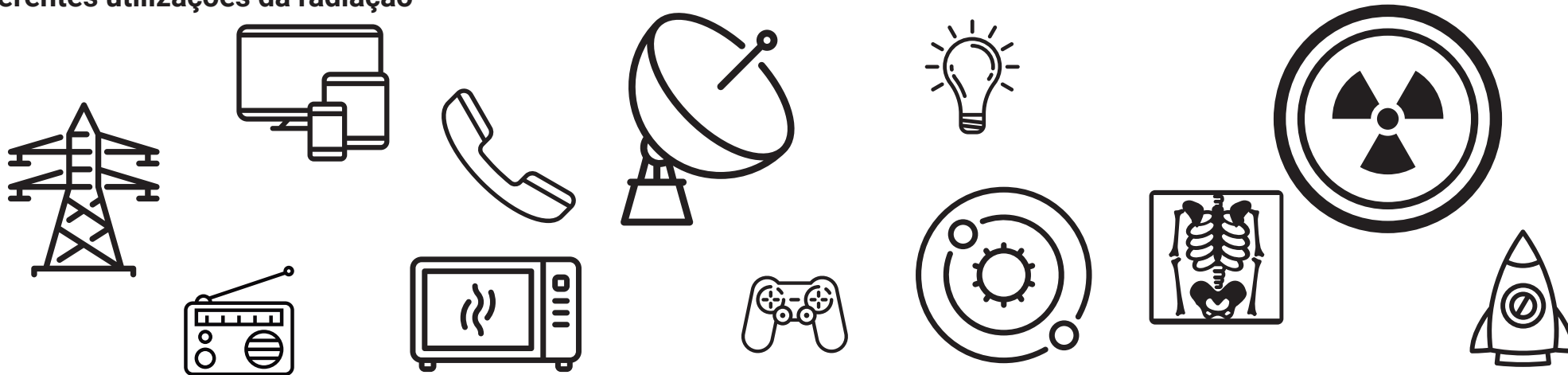
É possível classificar as transições atômicas em dois tipos diferentes.

O primeiro tipo envolve as transições de baixa energia(luz) que ocorrem entre os níveis ou subníveis de energia próximos do contínuo. O segundo, envolvendo os níveis ou subníveis mais internos de alta energia. Respectivamente, trata-se da radiação ionizante e não ionizante.

A radiação ionizante tem energia suficiente para liberar elétrons e deixar o átomo carregado; já a radiação não ionizante como, por exemplo, ondas de rádio, luz visível, ou radiação ultravioleta, não tem energia suficiente para arrancar os elétrons.

Entender as implicações da radiação ionizante e não ionizante é muito importante para entendermos onde a radioproteção atua e principalmente conhecer a radiação ionizante.

Diferentes utilizações da radiação



Ondas de rádio

Microondas

Infravermelho

Luz visível

Ultra-violeta

Raios X

Raios Gama

Raios cósmicos

Radiação não ionizante

Radiação ionizante



Frequência

Hz 10^4 10^5 10^6 10^7 10^8 10^9 10^{10} 10^{11} 10^{12} 10^{13} 10^{14} 10^{15} 10^{16} 10^{17} 10^{19} 10^{21} 10^{23}

Energia

eV 10^{10} 10^9 10^8 10^7 10^6 10^5 10^4 10^3 10^2 10^1 11 10^1 10^2 10^4 10^6 10^8 10^{10}

Radiação Ionizante e Não ionizante

As radiações são produzidas por processos de ajustes que ocorrem no núcleo ou nas camadas eletrônicas, ou pela interação de outras radiações ou partículas com o núcleo, ou também com o átomo por inteiro.

Tipos de Radiação

Como o próprio nome já remete, a radiação eletromagnética é formada pela vibração simultânea de campos magnético e elétrico. Tais vibrações são perpendiculares entre si, originadas durante o fenômeno da transição atômica, pela movimentação da carga e momento magnético da partícula, quando modifica seu estado de energia, tipificado pelo momento angular, spin e paridade.

Agora a radiação nuclear leva em consideração as partículas ou ondas eletromagnéticas emitidas pelo núcleo durante o processo de reestruturação interna, com o intuito de alcançar a estabilidade (alfa, beta, gama e nêutrons).

Por causa da intensidade das forças atuantes dentro do núcleo atômico, as radiações nucleares são altamente energéticas quando comparadas com as radiações eletromagnéticas.

É bom salientar que as radiações não são produtos

da desintegração nuclear, como se os núcleos instáveis estivessem se quebrando ou desmanchando. Pelo contrário.

A radiação nuclear indica o resultado das transformações do núcleo instável, na busca de estados de maior estabilidade e perfeição, ou seja, trata-se do produto da otimização de sua estrutura e dinâmica.

A energia da radiação e das grandezas ligadas ao átomo e ao núcleo é geralmente expressa em elétron-volt(eV).

Um eV é a energia cinética adquirida

Radiação Alfa, Beta e Gama

Existem três modalidades de radiações denominadas alfa, beta e gama que podem ser separadas por um campo magnético ou por um campo elétrico.

A Radiação Alfa (α), também chamada de partículas alfa ou raios alfa, nada mais são do que partículas carregadas por dois prótons e dois nêutrons, sendo, portanto, núcleos de hélio. Têm carga positiva +2 e número de massa 4.

Já a Radiação Beta (β), raios beta ou partículas beta, que podem ter elétrons, partículas negativas com carga -1 e número de massa 0; ou carga positiva (+), correspondente a um pósitron (anti elétron ou anti matéria).

Também temos a Radiação Gama (γ) ou raios gama. O comprimento de onda deste tipo de radiação varia de 0,5 Å a 0,005 Å (unidade de medida: ångström).

Os raios gama são ondas eletromagnéticas, e possuem carga e massa nulas, emitem continuamente calor e têm a capacidade de ionizar o ar e torná-lo condutor de corrente elétrica.

Um núcleo radioativo emite radiação alfa ou beta, e a radiação gama está sempre presente. A partícula beta pode atingir uma velocidade de até 95% da velocidade da luz.

Já a partícula alfa é mais lenta e atinge uma velocidade de 20.000 km/s. Enquanto isso os raios gama atingem a velocidade das ondas eletromagnéticas(300.000 km/s). Para melhor compreender a velocidade e a potência das partículas alfa, beta e gama frente à matéria, segue alguns exemplos do poder de penetração das radiações:

PODER DE PENETRAÇÃO DA RADIAÇÃO

As partículas alfa são bastante energéticas, mas são facilmente barradas por uma folha de papel;

As partículas beta são mais penetrantes e menos energéticas que as partículas alfa, conseguem atravessar lâminas de chumbo de até 2 mm ou de alumínio de até 5 mm no ar, mas podem ser barradas até por uma placa de madeira com no mínimo 2,5 cm de espessura;

As partículas gama percorrem milhares de metros no ar, são mais perigosas, quando emitidas por muito tempo podem causar má formação nas células. Os raios gama conseguem atravessar chapas de aço de até 15 cm de espessura, mas são barradas por grossas placas de chumbo ou paredes de concreto.

Chegamos a conclusão de que as partículas alfa e beta possuem massa e carga elétrica relativamente maiores que as do raio gama, entretanto, são facilmente barradas.

No entanto, as partículas gama não são tão energéticas, mas são extremamente penetrantes, podendo atravessar o corpo humano. Os raios gama são bloqueados apenas por paredes grossas de concreto ou por alguns tipos de metais resistentes à radiação. Somente com essas formas de barreira é possível evitar os efeitos biológicos da radiação sobre as pessoas.

O QUE É RADIOATIVIDADE?

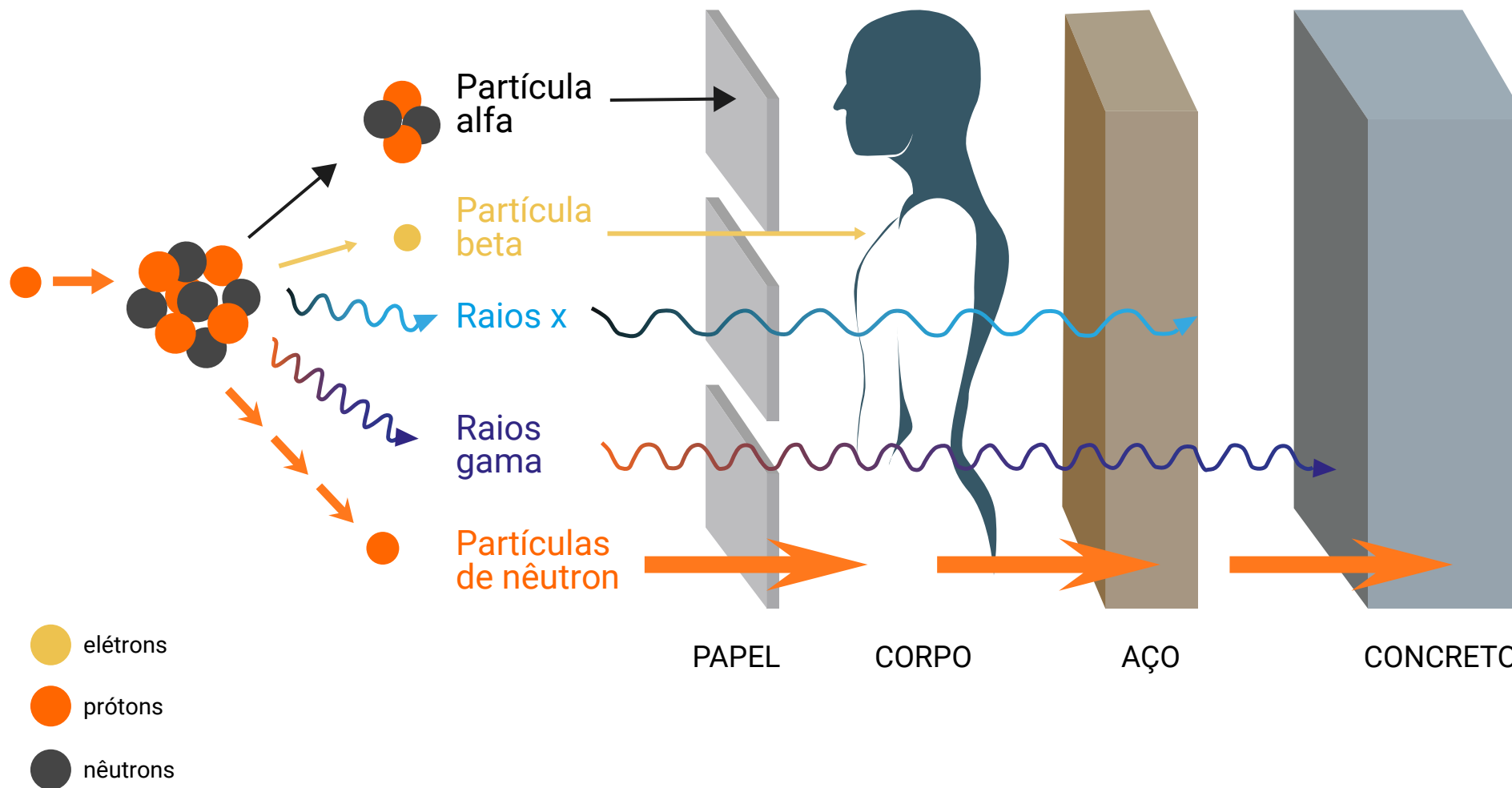
Radioatividade é o fenômeno pelo qual o núcleo de um átomo instável emite partículas e ondas para atingir a estabilidade. Para os átomos instáveis é uma busca constante se tornarem mais estáveis. Alfa, beta e gama são os principais tipos de radiação que o átomo emite na busca pela estabilidade.

A primeira noção de radioatividade surgiu a partir do esquecimento de uma pequena rocha de urânio sobre um filme fotográfico virgem. Após algum tempo depositada ali, percebeu-se que o filme foi velado (marcado) pela radiação que saía da rocha.

O fenômeno foi denominado radioatividade e os elementos que apresentavam essa propriedade foram chamados de elementos radioativos.

Outros elementos pesados, com massas próximas à do Urânio, como o Rádio(Ra) e o Polônio(Po), também tinham a mesma propriedade. Comprovou-se que um núcleo muito energético, por ter excesso de partículas ou de carga, tende a estabilizar-se, emitindo algumas partículas (partículas alfa, beta ou radiação gama).

PODER DE PENETRAÇÃO DA RADIAÇÃO



Radiação Ionizante

Os átomos podem ser naturalmente estáveis ou não. Como acabamos de ver, aqueles que têm o núcleo instável, os que se transformam espontaneamente, liberam energia na forma de radiação.

Os átomos instáveis são denominados de radionuclídeos. A energia liberada pelos radionuclídeos podem interagir com outros átomos e ionizá-los.

A ionização é o processo pelo qual os átomos se tornam positivamente ou negativamente carregados pelo ganho ou pela perda de elétrons.

A radiação ionizante transfere energia suficiente para expulsar os elétrons de sua órbita, resultando na criação de íons.

A emissão de dois prótons e de dois nêutrons refere-se ao decaimento alfa, e a emissão de elétrons ao decaimento beta. Os já citados raios alfa e beta.

Frequentemente, um nuclídeo instável é tão energizado que a emissão de partículas não é suficiente para estabilizá-lo. Este, então, libera uma explosão de energia na forma de ondas eletromagnéticas como fótons. É o caso dos raios gama.

Para você entender melhor, podemos exemplificar com os populares raios X.

Os raios X também são radiação eletromagnética, assim como os raios gama, mas com energia de fótons de menor intensidade. A maior vantagem dos raios X está na possibilidade de serem gerados artificialmente quando for preciso, o que faz serem bastante usados em aplicações industriais e médicas.

Mas por quanto tempo esse processo pode se manter?

Para responder essa e mais perguntas precisamos entender os conceitos de decaimento radioativo e meia-vida.

Constante de Decaimento Radioativo e Meias-vidas

Os átomos instáveis, de mesma espécie e contidos em uma mesma amostra, não realizam transformações para se estabilizarem ao mesmo tempo. Eles as fazem de modo aleatório.

Não se pode prever o momento em que um determinado núcleo irá se transformar por decaimento.

Entretanto, para uma boa parte dos átomos, o número de transformações por segundo é proporcional ao número de átomos que estão prestes a se transformar. Isto significa que a probabilidade de decaimento por átomo por segundo deve

ser constante, independente de quanto tempo ele tem de existência.

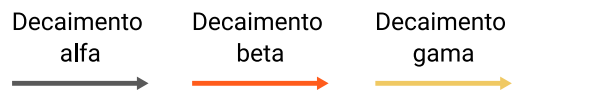
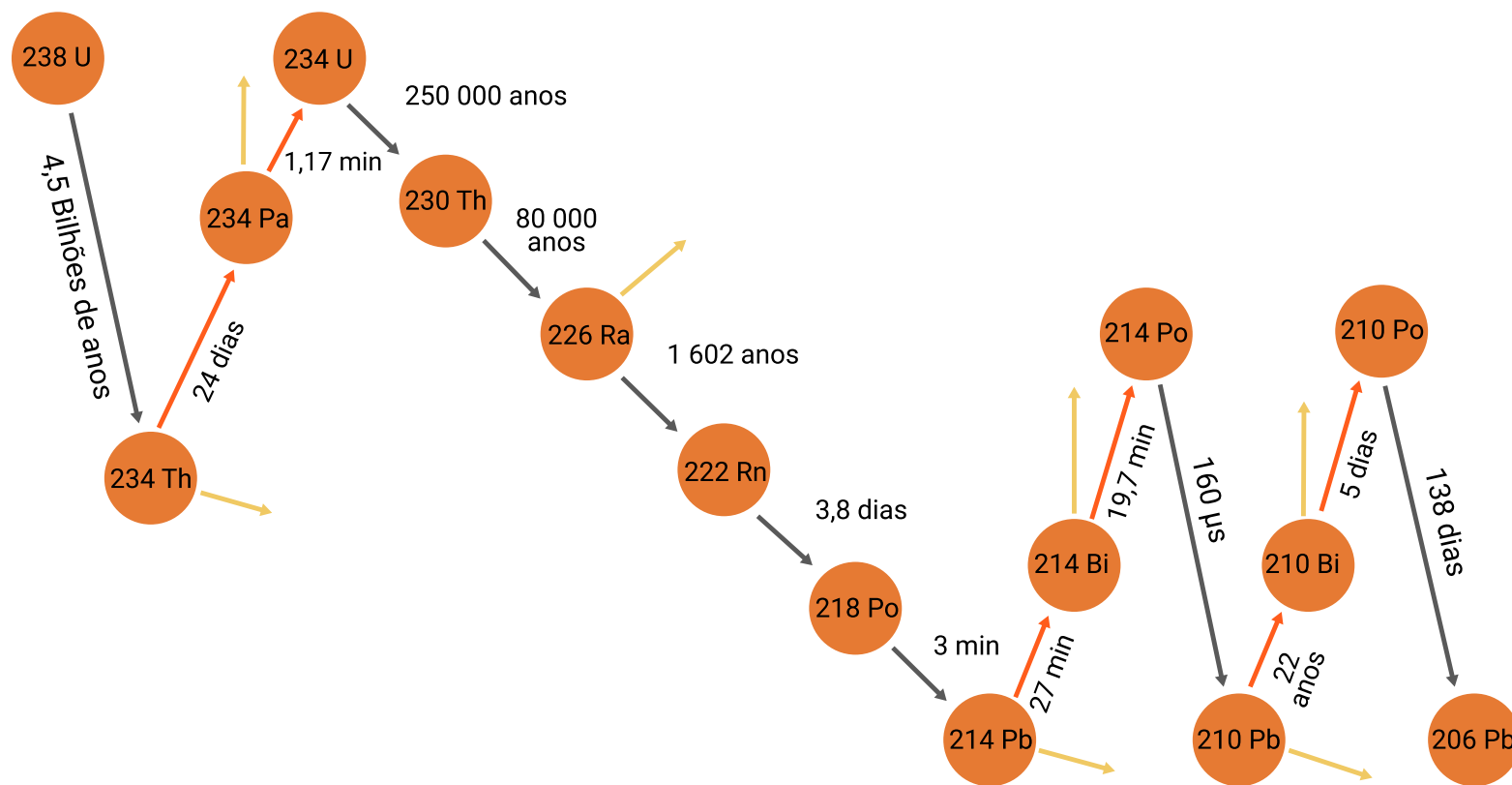
Esta probabilidade de decaimento por átomo por segundo é denominada de Constante de Decaimento (λ) e é característica de cada radionuclídeo.

Lembrando que embora todos os radionuclídeos sejam instáveis, alguns são mais instáveis que outros.

Por exemplo, as partículas do núcleo do átomo de Urânio-238 (com 92 prótons e 146 nêutrons) são apenas capazes de se agrupar. Eventualmente, um grupo de dois prótons e dois nêutrons escapará, deixando o átomo na forma de uma partícula alfa, transformando o Urânio-238 em Tório-234 (com 90 prótons e 144 nêutrons). Porém, o Tório-234 também é instável e se transforma através de um processo diferente.

Nesse processo, elétrons de alta energia são emitidos na forma de partículas beta, convertendo um nêutron em um próton e se transforma em um elemento chamado Protactínio-234, com 91 prótons e 143 nêutrons. Este, por sua vez, é extremamente instável e rapidamente se transforma em Urânio-234. Consequentemente, o átomo vai liberando partículas até finalmente se transformar no Chumbo-206, com 82 prótons e 124 nêutrons, que é estável.

URÂNIO - 238 - CADEIA DE DECAIMENTO RADIOATIVO



Diferentes tipos de decaimento e suas meias-vidas

Existem muitas sequências de transformação, ou simplesmente decaimento radioativo, como o processo de transformação também pode ser terminologicamente classificado.

A meia-vida de um elemento radioativo é o intervalo de tempo em que uma amostra deste elemento se reduz à metade. Este lapso temporal também é conhecido por período de semidesintegração.

À medida que os elementos radioativos vão se desintegrando, no decorrer do tempo, a sua quantidade e atividade vão reduzindo, tendo por consequência, a quantidade de energia emitida por ele, em razão da radioatividade, também é reduzida.

Uma característica interessante dos elementos radioativos é que em virtude da desintegração que eles sofrem, a massa que eles possuem é reduzida; nos períodos de semidesintegração, a massa é reduzida pela metade, deixando ainda a outra metade por se desintegrar, que também passará pelo período de semidesintegração e assim sucessivamente. E este processo vai acontecendo repetidamente de tal forma que a massa é reduzida, mas nunca chega a ser zero.

A título de exemplo, após uma meia-vida, de um total de um milhão de átomos em média 500 mil irão decair em outro elemento. Durante a próxima meia-vida, cerca de outros 250 mil átomos decairão e, assim, sucessivamente, até que todos tenham decaído. Depois de 10 meias-vidas, apenas cerca de mil átomos permanecerão na forma original (isto é, cerca de 0,1%).

A partir dessa exemplificação, levaria um pouco mais de um minuto para que a metade dos átomos de Protactínio-234 decaísse a Urânio-234. Em contrapartida, para o Urânio-238 levaria quatro bilhões e meio de anos (4.500.000.000) para que metade dos átomos decaísse a Tório-234.

Por isso, apenas poucos radionuclídeos ocorrem naturalmente no meio ambiente.

O QUE É RADIOISÓTOPO?

Radioisótopos são isótopos instáveis de um elemento que decaem ou se desintegram, emitindo radiação. Os isótopos de elementos radioativos são utilizados principalmente na medicina (diagnóstico e terapia), indústria e com finalidade de pesquisa.

Unidades de Radiação

Hoje sabemos que a energia da radiação pode danificar o tecido vivo. A quantidade de energia acumulada nesse tecido vivo é expressa em termos de uma unidade denominada DOSE.

A dose de radiação pode vir de qualquer radionuclídeo ou de um certo número de radionuclídeos, mesmo eles permanecendo fora do corpo ou irradiando por dentro. É o que acontece quando ocorre a inalação ou ingestão de material contaminado.

A quantidade de energia da radiação absorvida por quilograma de tecido é chamada de dose absorvida e é expressa em uma unidade denominada Gray(Gy), em homenagem ao físico inglês, Harold Gray, pioneiro em biologia da radiação.

A dose oriunda de partículas alfa pode causar muito mais dano do que aquela proveniente de partículas beta

ou de raios gama. Para comparar doses absorvidas resultantes de diferentes tipos de radiação, estas precisam ser calculadas por seu potencial de causar efeitos biológicos.

Podemos classificar as quantidades de doses de várias maneiras. O que deve ser levado em consideração é o quanto alguma parte do corpo ou todo o corpo, tenha sido irradiado, se uma ou muitas pessoas foram expostas e, também, o período de exposição.

Para comparar doses absorvidas resultantes de diferentes tipos de radiação, estas precisam ser ponderadas por seu potencial de causar certos tipos de danos biológicos.

A dose ponderada é denominada dose equivalente, a qual é avaliada em uma unidade chamada Sievert(Sv), em homenagem ao cientista sueco Rolf Sievert.

Um sievert equivale a 1.000 milisieverts, assim como um litro equivale a 1.000 mililitros e um metro a 1.000 milímetros.

O complexo sistema de quantidades de radiação é um ordenamento necessário para constituir uma estrutura coerente. Isto permite que os especialistas em radioproteção façam o registro das doses individuais de forma consistente e comparável. Tal registro e avaliação são de extrema importância para as pessoas que trabalham com radiação e que estão su-

jeitas à exposição devido a natureza de seu trabalho.

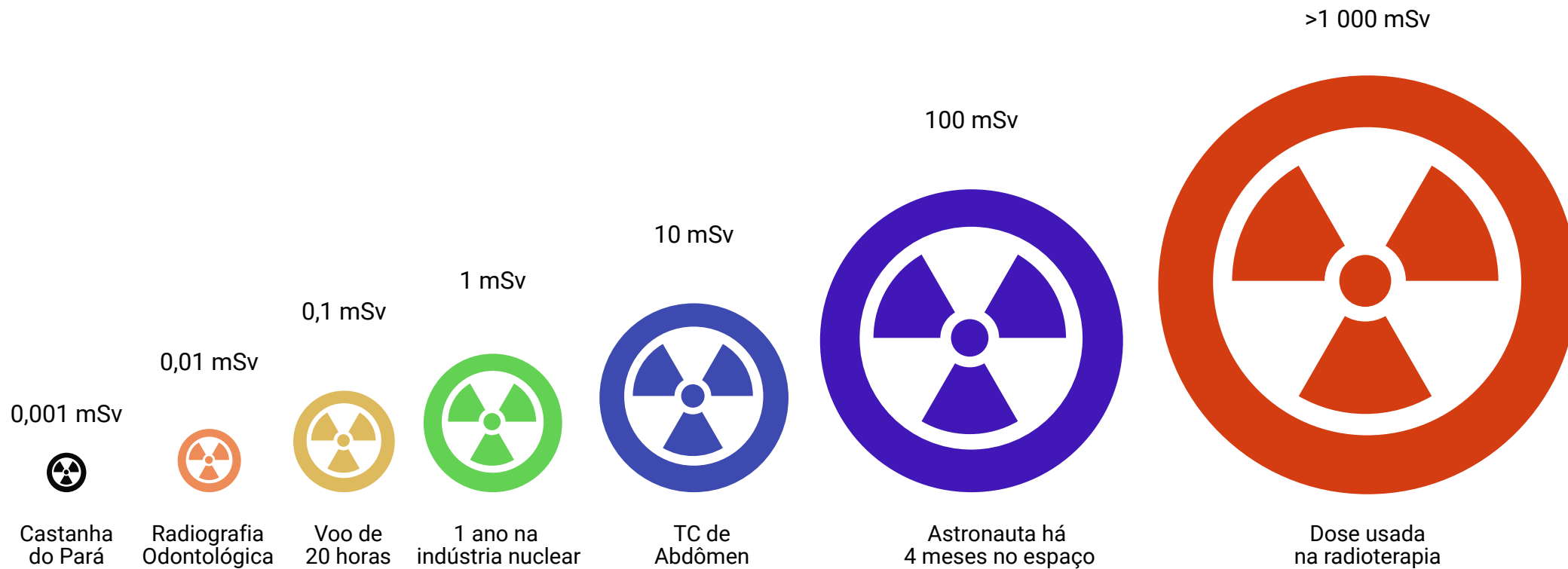
O registro da dose efetiva é um indicador da probabilidade de indução de câncer e de efeitos genéticos advindos de baixas doses, e não como medida da gravidade de efeitos para altas doses.

Para entendermos claramente as unidades de medida da radiação no organismo humano é necessário levar em consideração que algumas partes do corpo são mais vulneráveis que outras.

Por exemplo, uma dada dose equivalente de radiação é mais provável que possa induzir um câncer no pulmão do que no fígado, sendo os órgãos reprodutores os de particular preocupação devido ao risco de efeitos hereditários.

Portanto, a fim de comparar doses quando diferentes tecidos e órgãos são irradiados, as doses equivalentes para diferentes partes do corpo são também ponderadas, sendo o resultado denominado dose efetiva, também expressa em Sievert(Sv).

Quantidades de radiação



Efeitos Biológicos da Radiação

Desde a descoberta da radiação mais de um século de pesquisa tem fornecido grande conhecimento acerca dos mecanismos biológicos pelos quais esta pode afetar a saúde.

Sabe-se que a radiação pode produzir efeitos em nível celular, causando sua morte ou modificação, devido aos danos causados nas fitas do ácido desoxirribonucleico(DNA) em um cromossomo.

Quando o número de células afetadas ou até mesmo mortas for grande o suficiente, a radiação poderá resultar na disfunção e morte do órgão.

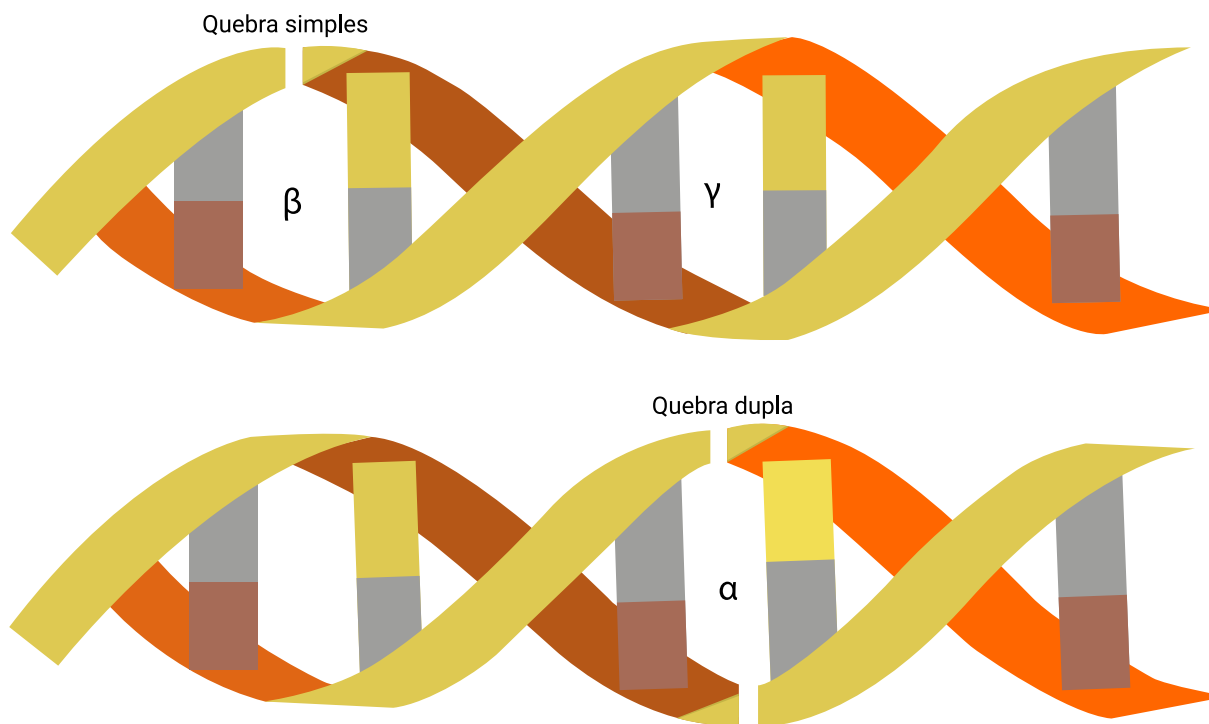
Outra influência da radiação ionizante sobre o DNA são os danos que não causam a morte celular. Esses tipos de dano são normalmente reparados por inteiro, mas caso isso não ocorra, a modificação resultante – conhecida como mutação celular – causará reflexo nas divisões celulares subsequentes. O resultado das mutações pode ser o câncer. Se as células modificadas forem aquelas que transmitem a informação hereditária aos descendentes, desordens genéticas podem surgir.

Com base na observação de sua ocorrência, efeitos na saúde advindos da exposição à radiação são definidos aqui tanto como efeitos imediatos à saúde, quanto tardios. Geralmente, efeitos imediatos à saúde são evidentes

através do diagnóstico de síndromes clinicamente verificadas nos indivíduos, e os efeitos tardios são verificados através de estudos epidemiológicos feitos pela observação do aumento da incidência da doença em uma população.

Mas como isso ocorre?

EFEITOS DA RADIAÇÃO NO DNA



α = partícula alfa, β = partícula beta e γ = raios gama.

A radiação pode provocar basicamente dois tipos de danos ao corpo, um deles é a destruição das células com o calor, e o outro consiste numa ionização e fragmentação (divisão) das células.

O calor emitido pela radiação é tão forte que pode queimar bem mais do que a exposição prolongada ao sol. Portanto, um contato com partículas radioativas pode deixar a pele do indivíduo totalmente danificada, uma vez que as células não resistem ao calor emitido pela reação.

A ionização e fragmentação celular implicam em problemas de mutação genética durante a gestação de fetos, que nascem prematuramente ou, quando dentro do período de nove meses, nascem com graves problemas de má formação.

Quimicamente falando, seria assim: as partículas radioativas têm alta energia cinética, ou seja, se movimentam rapidamente. Quando tais partículas atingem as células dentro do corpo, elas provocam a ionização celular. Células transformadas em íons podem remover elétrons, portanto, a ionização enfraquece as ligações. E o resultado? Células modificadas e, conseqüentemente, mutações genéticas.

Os efeitos radioinduzidos também podem receber denominações em função do valor da dose e forma de resposta. Assim, em função da dose e forma de resposta, são classificados em

estocásticos e determinísticos.

Os efeitos estocásticos são aqueles em que a probabilidade de ocorrência é proporcional à dose de radiação recebida, sem a existência de limiar. Isto significa que doses pequenas, abaixo dos limites estabelecidos por normas e recomendações de proteção radiológica, podem induzir tais efeitos. Entre estes efeitos, destaca-se o câncer.

A probabilidade de ocorrência de um câncer provocado pela radiação depende do número de clones de células modificadas no tecido ou órgão, uma vez que depende da sobrevivência de pelo menos um deles para garantir a progressão. O período de aparecimento (detecção) do câncer após a exposição pode chegar até 40 anos. No caso da leucemia, a frequência passa por um máximo entre 5 e 7 anos, com período de latência de 2 anos.

Os efeitos determinísticos são causados por irradiação total ou localizada de um tecido, gerando um grau de morte celular não compensado pela reposição ou reparo, com prejuízos detectados no funcionamento do tecido ou órgão.

Existe um limiar de dose, abaixo do qual a perda de células é insuficiente para prejudicar o tecido ou órgão de um modo detectável. Isto significa que os efeitos determinísticos são produzidos por doses elevadas, acima do

limiar, onde a severidade ou gravidade do dano aumenta com a dose aplicada.

A probabilidade de efeito determinístico, assim definido, é considerada nula para valores de dose abaixo do limiar, e 100%, acima.

Além da severidade, os efeitos determinísticos variam com a frequência em que um dado efeito, definido como condição patológica reconhecível, aumentando em função da dose, em uma população de indivíduos com diferentes susceptibilidades.

Qual é a dose de radiação necessária para afetar o organismo?

Geralmente, doses agudas maiores que 50 Gy danificam o sistema nervoso central de tal forma que a morte ocorre em poucos dias. Mesmo para doses inferiores a 8 Gy, as pessoas apresentam sintomas de doença causada por radiação, também conhecida como síndrome aguda da radiação, que podem incluir náusea, vômitos, diarreia, cólicas intestinais, salivação, desidratação, fadiga, apatia, letargia, sudorese, febre, dor de cabeça e pressão baixa.

O termo aguda refere-se a problemas médicos que ocorrem imediatamente após a exposição, em vez daqueles que se de-

envolvem após um período prolongado.

Ainda assim, as vítimas podem sobreviver no início, chegando a óbito por um problema gastrointestinal, uma ou duas semanas depois. Doses menores podem não causar danos gastrointestinais, mas ainda causam a morte após alguns meses, principalmente devido a danos na medula óssea. Mesmo doses menores irão retardar o início de doenças e produzirão menos sintomas severos. Cerca de metade daqueles que recebem doses de 2 Gy sofrem com vômitos cerca de três horas após a exposição, mas isso é raro com doses abaixo de 1 Gy.

Conferimos o que é radiação e seus efeitos na saúde das pessoas. O próximo passo que se impõe é saber de onde ela vem.

De onde vem a radiação?

A visão geral é que a radiação só está no contato direto com elementos brilhantes e altamente tóxicos. Já vimos que existem várias formas de radiação. Algumas são inofensivas e outras facilmente bloqueadas. O tempo de exposição ao material radioativo também é determinante. No entanto, temos que levar em consideração que estamos diariamente expostos à radiação proveniente das mais diversas fontes.

Todas as espécies da Terra têm existido e evoluído em ambientes nos quais têm sido expostos à radiação natural. Desde o século passado os humanos e outros organismos vivos têm sido também expostos a fontes artificiais desenvolvidas pelo próprio homem.

80% da exposição à radiação é proveniente de fontes naturais e apenas 20% de fontes artificiais feitas pelo ser humano, principalmente de aplicações da radiação na medicina.

A exposição à radiação pode ser classificada em razão de suas fontes, com foco no que a população em geral recebe.

As normativas em torno da radioproteção prevêm

que a exposição à radiação deve ser encarada por diferentes grupos. Por esta razão tornou-se obrigatório o fornecimento de informações adicionais a pacientes – os quais são expostos devido ao uso médico da radiação – e sobre pessoas expostas em seus locais de trabalho.

Outra maneira de classificar a exposição à radiação é verificar de que modo ela nos irradia. Substâncias radioativas e a própria radiação presentes em determinado ambiente podem irradiar ao nosso corpo de fora – externamente. Ou nós podemos inalar substâncias presentes no ar, ingerir na comida ou na água ou, ainda, absorver através da pele ou por ferimentos, sendo irradiados por dentro – internamente. De modo global, doses de exposições internas e externas são tratadas quase da mesma forma.

As fontes naturais de radiação levam em consideração que desde o surgimento do nosso planeta, o meio ambiente tem sido exposto à radiação cósmica, proveniente tanto do espaço quanto de materiais radioativos presentes na crosta e núcleo terrestre.

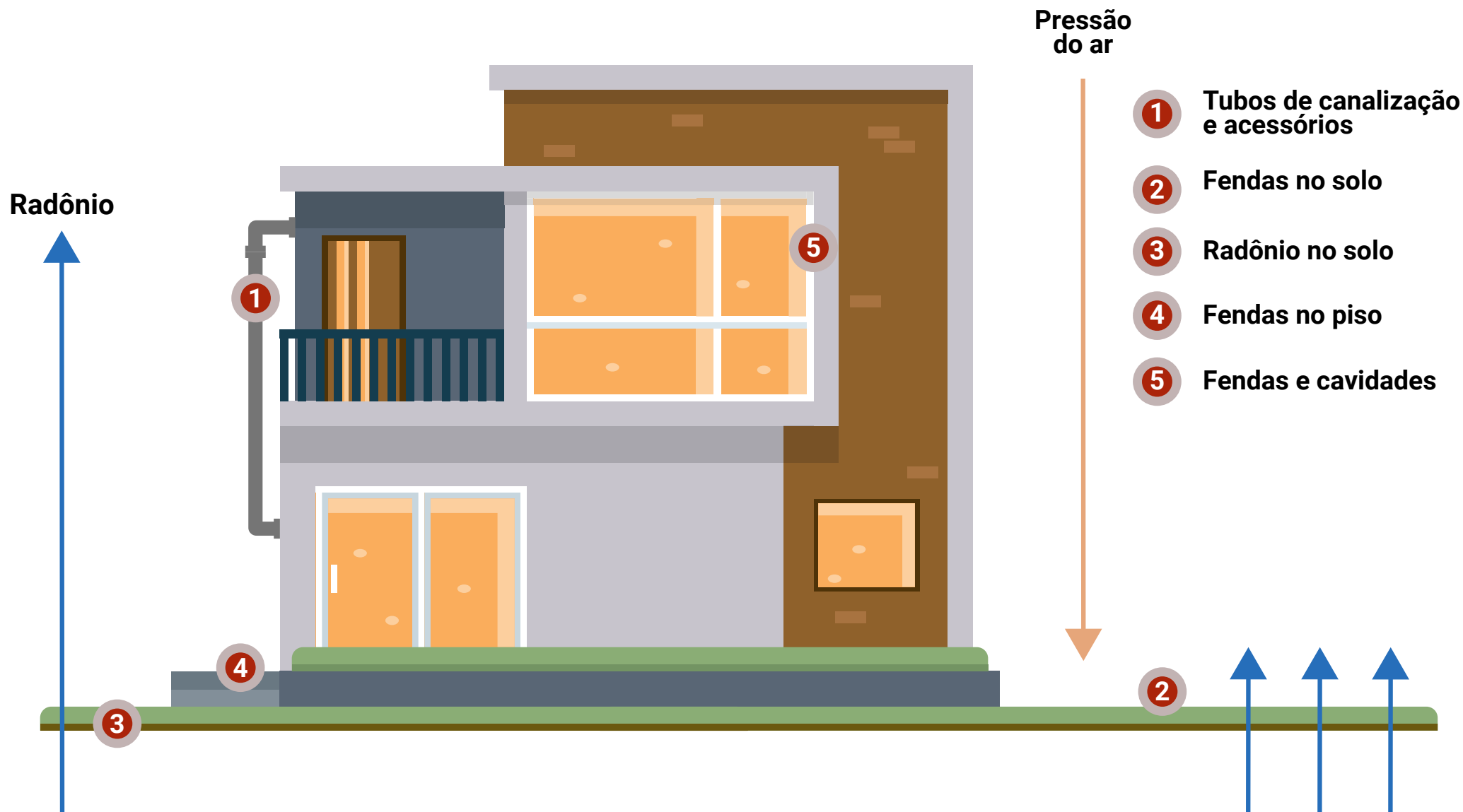
Não há maneira de evitar a exposição às fontes naturais, o que de fato causa a maior parte da exposição à radiação da população mundial.

A dose efetiva média anual global por pessoa é de cerca de 2,4 mSv, e varia em cerca de 1 mSv a mais de 10 mSv, dependendo do local onde as pessoas vivam. Se você mora no nível do mar você terá uma exposição diferente de radiação de quem mora em regiões mais elevadas.

Apesar da incidência das fontes naturais, nossa exposição pode ser modificada pelas escolhas que fazemos, como vivemos e onde moramos, ou o que comemos e bebemos.

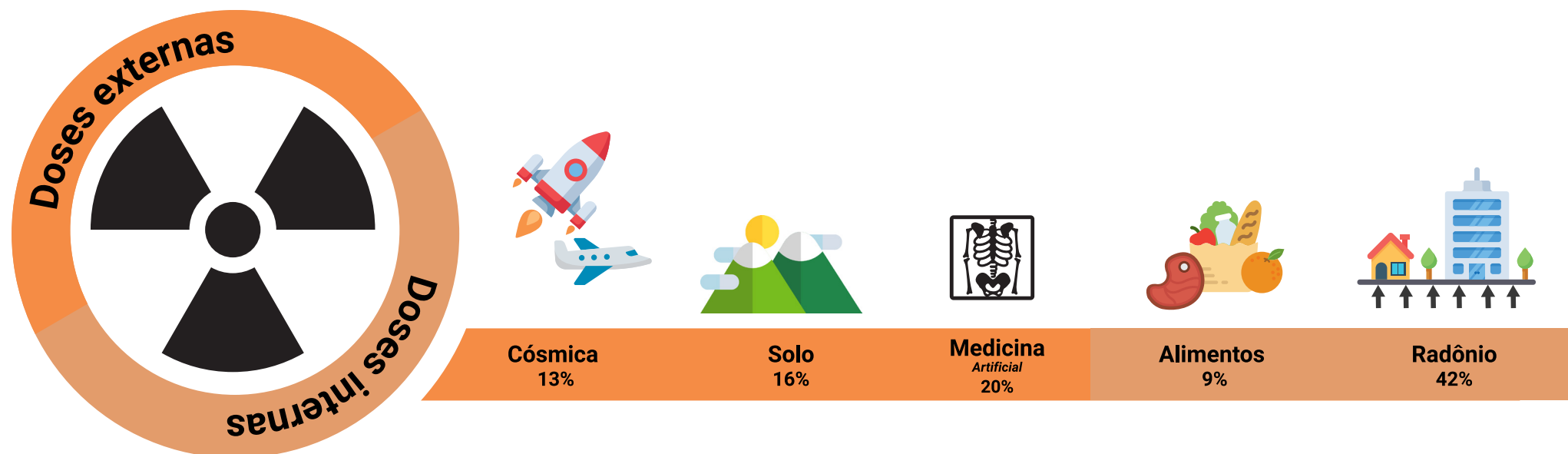
Os edifícios, por exemplo, podem apresentar um gás radioativo específico, chamado Radônio, ou os materiais que compõem o edifício podem conter radionuclídeos que aumentem a exposição à radiação.

RADÔNIO EM CONSTRUÇÕES



Os raios cósmicos são a maior fonte natural de exposição externa à radiação. A maioria desses raios tem origem no mais profundo espaço interestelar; alguns são liberados pelo sol durante as erupções solares. Esses irradiam a Terra diretamente e interagem com a atmosfera, produzindo diferentes tipos de radiação e de materiais radioativos.

Agora tratando-se de fontes artificiais de radiação, temos que as principais origens estão ligadas aos dispositivos de diagnóstico e terapia utilizados na área médica. São os aparelhos de controle, medidores e radiografia usados na indústria e comércio, as instalações do ciclo do combustível nuclear e as máquinas utilizadas na pesquisa científica.



No Brasil, nas instalações industriais destacam-se irradiadores de grande porte, sendo que grande parte deles é destinado à esterilização e uma minoria à irradiação de componentes para ração animal e de cosméticos.

Ressalta-se também o avanço na área de perfilagem de poços de petróleo onde já constam mais de vinte instalações distribuídas em diferentes regiões do país

Agora um paralelo entre a radiação por fontes naturais e artificiais é possível.

Usaremos o exemplo das offshores, empresas ligadas ao ramo petrolífero.

Na produção de óleo e gás, tipicamente o conteúdo de água de produção inicial de petróleo e de gás em um reservatório é baixo. Conforme a pressão natural dentro da formação cai, a água presente no reservatório aumenta proporcionalmente a produção. Esta formação de água contém sais minerais dissolvidos contendo naturalmente mais partículas radioativas.

É também uma prática normal desta indústria injetar água do mar tratada dentro do reservatório conforme as reservas de petróleo e gás são recuperadas, com a intenção de elevar a pressão na formação. Esta água do mar injetada pode ser mais salina que a água natural da formação e consequentemente pode dissolver sais radioativos adicionais de minerais

presente nos diversos estratos geológicos.



Exemplo de incrustação Norm.

Com isso o óleo e gás produzidos são extraídos passando por linhas de produção, filtros, tanques, vasos e demais partes. Fazem com que as partículas radioativas agregadas à água, sais e areia se acumulem nas paredes internas de todas as partes pelas quais circulam (incrustações). Estas incrustações são exemplo de acúmulo de um material chamado de TENORM. O TENORM pode causar graves danos à saúde humana e também ao meio ambiente.

Essas partículas atômicas instáveis estão distribuídas na natureza, acumulando-se conforme as formações rochosas e composição característica de cada ambiente. Esse acúmulo é conhecido como background e compõe o que chamamos de TENORM.

As exposições às radiações provenientes do NORM não sofrem restrições legais, dado que são provenientes da própria natureza. A partir do momento que estes isótopos são, de alguma forma manipulados pelo homem, o material passa a ser denominado TENORM, sendo então regulado pela CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear). Daí por diante toda exposição às radiações provenientes do TENORM precisam ser monitoradas e controladas.

O TENORM encontrado em petrolíferas é um bom exemplo de materiais radioativos de ocorrência natural.

A maior incidência de materiais radioativos em atividades econômicas ocorre nas indústrias de produção de energia, mineração, tratamento de água e produtos de consumo. No Brasil as principais empresas que devem estar preocupadas com os riscos dos efeitos radioativos são aquelas ligadas ao setores de carvão, óleo e gás. As indústrias que trabalham com Monazita, Óxido de titânio, Zircônio, Mineração de fosfato e produção de ácido fosfórico, Nióbio, Estanho e Cobre também devem estar atentas.

Formas e tipos de irradiação

DIFERENÇA ENTRE CONTAMINAÇÃO E IRRADIAÇÃO

A contaminação é a presença de um material indesejável em determinado local. A irradiação é a exposição de um objeto ou de um corpo à radiação. É possível haver irradiação sem existir contaminação.

A exposição do homem ou parte de seus tecidos à radiação, pode ter resultados bastante diferenciados, se ela ocorreu de uma única vez, de maneira fracionada ou se periodicamente.

As exposições únicas podem ocorrer em exames radiológicos, como por exemplo, uma tomografia. Nos tratamentos radioterápicos ocorrem exposições fracionadas. Já as exposições periódicas acontecem em determinadas rotinas de trabalho com material radioativo em instalações nucleares.

Para uma mesma quantidade, os efeitos biológicos da radiação resultantes podem ser muito diferentes. Assim, se ao invés de fracionada, a dose aplicada num paciente em trata-

mento de câncer, fosse dada numa única vez, a probabilidade de morte seria muito grande.

A exposição contínua ou periódica que o homem sofre da radiação cósmica, produz efeitos de difícil identificação. O mesmo não aconteceria, se a dose acumulada em 50 anos fosse concentrada numa única vez.

EXEMPLOS DE EXPOSIÇÃO DE CORPO INTEIRO, PARCIAL OU COLIMADA

- Um trabalhador que opera com material ou gerador de radiação ionizante pode expor o corpo todo ou parte dele, durante sua rotina ou num acidente.
- Um operador de gamagrafia sofre irradiação de corpo inteiro, na sua rotina de expor, irradiar a peça, recolher e transportar a fonte.
- Em alguns acidentes, como a perda e posterior resgate da fonte de irradiadores, expõe mais as extremidades do que as outras partes do corpo.
- Uma pessoa que manipula radionuclídeos, expõe bastante suas mãos.

• No tratamento radioterápico, a exposição do tumor a feixes colimados de radiação é feita com muita precisão e exatidão.

Uma dose altíssima de radiação instantânea pode causar a falência do sistema imunológico, enquanto a mesma quantidade distribuída em várias ocasiões não tem efeito danoso.

Fonte é um equipamento ou material que emite ou é capaz de emitir radiação ionizante ou de liberar substâncias ou materiais radioativos.

EXPOSIÇÃO A FEIXES INTENSOS, MÉDIOS E FRACOS

Na esterilização e conservação de frutas, especiarias, peixes e carnes, com radiação gama, as doses aplicadas chegam a 10 kilograys(kGy) e em radioterapia, a 2 Gy por aplicação. São feixes intensos e capazes de induzir à morte uma pessoa se fossem aplicados de uma única vez e no corpo todo.

Os feixes utilizados em radiologia são de intensidade média, comparativamente, pois atingem alguns miligrays(mGy), e não devem ser recebidos por uma pessoa com muita frequência, sob pena de acarretar algum dano biológico.

A radioatividade natural induz ao homem doses de radiação da ordem de 1 mGy por ano. Poucos são os efeitos identificáveis e atribuídos exclusivamente a este tipo de radiação.

EXPOSIÇÃO A FÓTONS, PARTÍCULAS CARREGADAS OU A NÊUTRONS

A grande maioria das práticas com radiação ionizante envolve fótons provenientes de fontes de radiação gama ou geradores de raios X. É o que acontece em radiodiagnóstico, radioterapia, radiografia industrial e medição de nível e densidade.

Nas instalações nucleares, mas precisamente em seus reatores, além dos fótons, existem fluxos de nêutrons gerados na fissão dentro dos elementos combustíveis que atingem as áreas de manutenção e operação da máquina.

Alguns medidores de nível, de densidade e instrumentos para prospecção de petróleo, utilizam fontes e geradores de nêutrons.

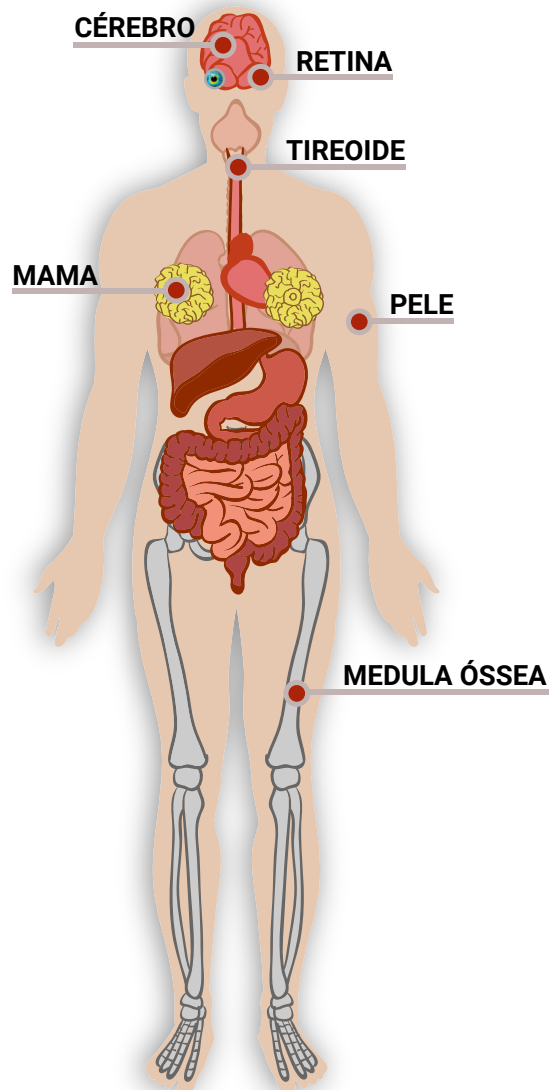
Os feixes de partículas carregadas têm nos aceleradores lineares de elétrons, nos cíclotrons com feixes de prótons e nos radionuclídeos emissores beta e alfa, os principais representantes.

Os fótons e nêutrons constituem as radiações mais penetrantes e causam danos biológicos diferentes conforme a taxa de dose, energia e tipo de irradiação. Os feixes de elétrons têm um poder de penetração regulável, conforme a energia esta-

belecida na máquina aceleradora.

A radiação beta proveniente de radionuclídeos em aplicadores oftalmológicos e dermatológicos tem alcance de fração de milímetro no tecido humano.

As radiações alfa são muito pouco penetrantes, mas doses absorvidas devido a radionuclídeos de meia-vida curta incorporados nos sistemas respiratório ou digestivo de uma pessoa podem causar danos 20 vezes maiores que iguais valores de doses de radiação X, gama ou beta.



Órgãos mais sensíveis a radiação

Danos Celulares

A radiação ionizante pode causar danos a células diretamente, quebrando ligações químicas de moléculas biológicas (quebra da molécula de DNA), ou indiretamente criando radicais livres nas moléculas de H₂O, que são as mais atingidas pela radiação.

O processo de ionização, ao alterar os átomos, também pode modificar a estrutura das moléculas que os contêm. Se a energia de excitação ultrapassar a energia de ligação entre os átomos, pode ocorrer quebra das ligações químicas e conseqüentes mudanças moleculares. De toda a energia transferida pela radiação ao tecido, metade dela induz excitações, cujas conseqüências são menores que as de ionização.

Se as moléculas alteradas compõem uma célula, esta pode sofrer as conseqüências de suas alterações, direta ou indiretamente, com a produção de radicais livres, íons e elétrons. Os efeitos da radiação dependem da dose, taxa de dose, do fracionamento, do tipo de radiação, do tipo de célula ou tecido e do indicador(endpoint) considerado.

Tais alterações nem sempre são nocivas ao organis-

mo humano. Se a substância alterada possui um papel crítico para o funcionamento da célula, pode resultar na alteração ou na morte da célula. Em muitos órgãos e tecidos o processo de perda e reposição celular, faz parte de sua operação normal. Quando a mudança tem caráter deletério, ela significa um dano.

Dos danos celulares, os mais importantes são os relacionados à molécula do DNA. As lesões podem ser quebras simples e duplas da molécula, ligações cruzadas (entre DNA-DNA, entre DNA-proteínas), alterações nos açúcares ou em bases (-substituições ou deleções).

As aberrações cromossômicas são o resultado de danos no DNA, principalmente devido às quebras duplas, gerando os dicêntricos ou os anéis.

As células danificadas podem morrer ao tentar se dividir, ou conseguir realizar reparos mediados por enzimas. Se o reparo é eficiente e em tempo curto, o DNA pode voltar à sua composição original, sem consequências posteriores. Num reparo propenso a erros, pode dar origem a mutações na sequência de bases ou rearranjos mais grosseiros, podendo levar à morte reprodutiva da célula ou a alterações no material genético das células sobreviventes, com consequências a longo prazo.

MUTAÇÕES

As mutações nas células somáticas(do corpo) ou germinativas(das gônadas) podem ser classificadas em 3 grupos:

- Mutações pontuais(alterações na sequência de bases do DNA);
- Aberrações cromossômicas estruturais(quebra nos cromossomos);
- Aberrações cromossômicas numéricas(aumento ou diminuição no número de cromossomos).

MODIFICAÇÃO CELULAR PELA RADIAÇÃO

A partir do ciclo celular e as fases do ciclo mitótico é possível compreender que as células não apresentam a mesma resposta à radiação, levando em conta a interferência dos diversos tipos de interação radioativa nos diferentes cenários da vida celular.

As situações de maior complexidade ou que exigem acoplamentos finos de parâmetros físico-químicos ou biológicos, devem ser mais vulneráveis às modificações induzidas pela radiação. Isto significa que, num tecido onde as células componentes vivem aleatoriamente diferentes fases, as consequências das interações de uma mesma radiação, podem ser diferentes em locais diferentes do mesmo tecido.

Assim, quando se fala num determinado efeito biológico induzido por radiações, está embutida uma avaliação estatística da situação.

As mudanças na molécula de DNA podem resultar num processo conhecido como transformação neoplásica. A célula modificada, mantendo sua capacidade reprodutiva, potencialmente, pode dar origem a um câncer. O aparecimento de células modificadas, pode induzir o sistema imunológico a eliminá-las ou bloqueá-las. Entretanto, as células sobreviventes, acabam por se adaptar, devido a modificações estimuladas por substância promotora. A multiplicação deste tipo de célula dá origem a um tumor, num estágio denominado de progressão.

Após período de latência, se as células persistirem na reprodução, superando as dificuldades de divisão celular, os possíveis desvios de percurso devido a diferenciações e mecanismos de defesa do organismo, originam o tumor cancerígeno.

MORTE CELULAR

Quando a dose de radiação é elevada (vários Gy), muitas células de tecido atingidas podem não suportar as transformações e morrem, após tentativas de se dividir. O aumento da taxa de perda pode às vezes ser compensado com o aumento da taxa de reposição. Neste caso, haverá um período de transição, onde a função do tecido ou órgão foi parcialmente comprometida e posteriormente reposta.

A perda de células em quantidade considerável, pode causar prejuízos detectáveis no funcionamento do tecido ou órgão. A severidade do dano caracteriza o efeito determinístico, uma vez que o limiar de dose que as células do tecido suportam, foi ultrapassado.

As células mais radiosensíveis são aquelas integrantes do ovário, dos testículos, da medula óssea e do cristalino (olho).

DETRIMENTO

O conceito de detrimento utilizado em proteção radiológica envolve a combinação da probabilidade de ocorrência, severidade (gravidade) e tempo de manifestação de um determinado dano.

Detrimento nada mais é do que a estimativa do prejuízo total que eventualmente seria experimentado por um grupo ou pessoa expostos à radiação, inclusive seus descendentes.

Detectabilidade Epidemiológica

É comum as pessoas atribuírem certos tipos de efeitos em uma pessoa, ou grupo de pessoas, à radiação ionizante. Isso ocorre devido ao temor difundido que as pessoas possuem e é potencializado pelos meios de comunicação.

Contudo, para estabelecer uma atribuição com certo grau de credibilidade, é necessário que o número de pessoas atingidas com certos valores de dose de radiação ultrapasse marcadores mínimos para cada tipo de ocorrência, para se poder afirmar, em termos epidemiológicos, a possibilidade de ocorrência.

Estes valores de dose absorvida ou dose efetiva recebida e

também o número requerido para a garantia de ocorrência de determinado tipo de efeito é denominado de detectabilidade epidemiológica.

Há que ressaltar situações específicas em que pequenos valores de dose podem induzir efeitos biológicos indesejáveis e até letais como o câncer, conforme definição de efeitos estocásticos.

Em termos de população e indução epidemiológica dos efeitos, isto requer estatisticamente um tamanho da amostra em função do tipo de efeito.

Classificação dos Efeitos Biológicos

Os efeitos radioinduzidos podem receber denominações em função do valor da dose e forma de resposta, em função do tempo de manifestação e do nível orgânico atingido. Assim, em função da dose e forma de resposta, são classificados em estocásticos e determinísticos; em função do nível de dano, em somáticos e genéticos(hereditários); em termos do tempo de manifestação, em imediatos e tardios.

Anteriormente já vimos que os efeitos estocásticos e determinísticos estão associados às doses e as formas de resposta do organismo em relação à exposição radioativa.

Doses abaixo dos limites preestabelecidos para radioproteção podem ocasionar efeitos estocásticos como o câncer. Além da dose, tudo depende da maneira que o organismo responde à radiação ionizante.

Os efeitos determinísticos dizem respeito a doses elevadas de radiação. Alguns exemplos desse tipo de efeito na pele humana são: eritema e descamação seca para doses entre 3 e 5 Gy, com sintomas aparecendo após 3 semanas; descamação úmida acima de 20 Gy, com bolhas após 4 semanas; necrose para dose acima 50 Gy, após 3 semanas.

Outro tipo de efeito da radiação são os chamados efeitos somáticos. Surgem do dano nas células do corpo e o efeito aparece na própria pessoa irradiada. Dependem da dose absorvida, da taxa de absorção da energia da radiação, da região e da área do corpo irradiada.

Também em relação aos danos da irradiação temos os efeitos genéticos ou hereditários. Trata-se dos efeitos que se manifestam nos descendentes da pessoa irradiada. É o resultado do dano produzido pela radiação em células dos órgãos reprodutores, as gônadas. Têm caráter cumulativo e independente da taxa de absorção da dose.

Para finalizar, temos os efeitos relacionados ao tempo de manifestação. São os efeitos imediatos e tardios.

Os efeitos imediatos são os primeiros efeitos biológicos causados pela radiação. Podem ocorrer em um período de poucas horas ou mesmo algumas semanas após a exposição, como é o caso da radiodermite.

Os efeitos que aparecem depois de anos ou mesmo décadas são chamados de efeitos retardados ou tardios, como é o exemplo do câncer.

Quando as doses são muito altas, predominam os efeitos imediatos, e as lesões são graves e podem

levar até mesmo à morte. Para doses intermediárias, predominam os efeitos imediatos com grau de severidade menor, e não necessariamente permanentes. Poderá haver, entretanto, uma probabilidade grande de lesões severas a longo prazo. Para doses baixas, não haverá efeitos imediatos, mas há possibilidade de lesões a longo prazo.

Os efeitos retardados, principalmente o câncer, complicam bastante a implantação de critérios de segurança no trabalho com radiações ionizantes. Não é possível, por enquanto, usar critérios clínicos, porque quando aparecem os sintomas o grau de dano causado já pode ser severo, irreparável e até letal.

Em princípio, é possível ter um critério biológico e espera-se algum dia ser possível identificar uma mudança biológica no ser humano que corresponda a uma mudança abaixo do grau de lesão. Por enquanto, utilizam-se hipóteses estabelecidas sobre critérios físicos, extrapolações matemáticas e comportamentos estatísticos.

TECIDOS E EFEITO	LIMIAR DE DOSE (Sv)		
	DOSE EQUIVALENTE TOTAL		DOSE EQUIVALENTE ANUAL CONTÍNUA
	ÚNICA	FRACIONADA	
Gônadas - Esterilidade temporária - Esterilidade Permanente	0,15 3,5 a 6,0	ND ND	0,40 2,00
Ovários - Esterilidade Permanente	2,5 a 6,0	6	>0,2
Cristalino - Opacidade Detectável - Catarata	0,5 a 2,0 5,0	5 >8	>0,1 >0,15
Medula Óssea - Depressão da Hematopoiese	0,5	ND	>0,4

Efeitos Biológicos Pré-natais

Um outro efeito biológico da radiação que é importante frisar diz respeito ao período de gravidez. A radiação ionizante também pode afetar as crianças que ainda estão na barriga das mães.

Por isso, para fins de Proteção Radiológica, a publicação N° 89 da ICRP, de 2001) estabelece os valores de referência para as dimensões, massas, conteúdo de todas as fases do corpo humano, desde a fase embrionária até a adulta.

Os efeitos biológicos pré-natais induzidos pela radiação ionizante podem ser avaliados em duas situações. Em primeiro lugar os induzidos por radionuclídeos ingeridos ou inalados pela mãe e transferidos ao embrião ou feto. Secundariamente os induzidos pela radiação externa, durante o período de gravidez.

No relatório da UNSCEAR de 1986, denominado Genetic and Somatic Effects of Ionizing Radiation, foram avaliados dados de experimentos com animais e das pessoas expostas em Hiroshima e Nagasaki, e enfocados, principalmente, os temas:

- Efeitos letais no embrião;
- Malformação e outras alterações estruturais e de crescimento;
- Retardo mental;
- Indução de doenças, incluindo a leucemia;
- Efeitos hereditários.

Na publicação N° 60 da ICRP, de 1990, a questão da irradiação do feto durante o período de gestação foi estudada onde os valores das probabilidades de indução de efeitos por radiações de baixo LET foram determinados.

A Publicação No.88 da ICRP de 2001, intitulada: “Dose to the Embryo and Fetus from Intake of Radionuclides by the Mother”, apresenta um estudo aprofundado sobre a questão, levando em conta a transferência de radionuclídeos pela placenta, distribuição e retenção no tecido fetal.

São apresentados os modelos Biocinéticos e Dosimétricos para o cálculo das doses no embrião, no feto e recém-nascido resultantes da ingestão ou inalação de radionuclídeos pela mãe, antes ou durante a gravidez. São exibidas as tabelas para cada radionuclídeo, órgão ou sistema do corpo humano.

Para a avaliação das doses, foram considerados três períodos: o período de pré-implantação, com duração de 0 a 8 dias; o período embrionário de organogênese, com duração de 9 a 56 dias e; o período fetal de crescimento, com duração de 57 a 266 dias.

ICRP – International Commission on Radiological Protection

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica é uma organização independente, internacional e não governamental, com a missão de fornecer recomendações e orientações sobre proteção contra radiações.

Reversibilidade, transmissividade e fatores de influência

No decorrer da vida celular ocorrem uma série de danos provenientes de substâncias químicas, variações da concentração iônica no processo de troca de nutrientes e dejetos junto à membrana celular, danos físicos produzidos por variações térmicas e radiações. Mesmos os danos mais profundos, como aqueles produzidos no DNA, podem ser reparados ou compensados. Tudo depende do tempo e das condições disponíveis.

Por essa razão é que um tecido atingido por uma dose de radiação única e de baixo valor tem muitas condições de recuperar sua integridade, mesmo que nele haja um certo percentual de morte celular.

Em geral toda célula tem vários mecanismos de reparo.

O organismo tende a repor as células e retomar o seu ritmo de operação. Nestas condições, pode-se dizer que o dano foi reversível. Entretanto, para efeito de segurança, em radioproteção, considera-se que o efeito biológico produzido por radiação ionizante é de caráter cumulativo, ou seja,

despreza-se o reparo do dano.

Outra questão importante é que o dano biológico da radiação produzido numa pessoa não se transmite. O que pode eventualmente ser transmitido é um efeito de doses elevadas que, lesando significativamente as células reprodutivas, pode resultar num descendente portador de defeito genético.

Não há relação nenhuma entre a parte irradiada numa pessoa e o local de aparecimento do defeito no organismo de um filho, por exemplo.

Uma pessoa afetada pela radiação, mesmo exibindo sintomas da síndrome de irradiação aguda, pode ser manuseada, medicada e transportada como um doente qualquer, pois sua condição não é transmissível, uma doença que não pega.

O cuidado deve ser voltado apenas ao tratamento destas pessoas. É responsabilidade dos médicos, enfermeiros, demais pessoas e instalações que farão o acolhimento dessa pessoa a não contaminá-la por vírus ou bactérias por eles portados, uma vez que, a resistência imunológica está muito baixa.

As pessoas que sofreram contaminação com radionuclídeos (interna ou externa) é que precisam ser manuseadas com cuidado, pois tais radionuclídeos podem estar presentes no suor,

na excreta e muco das vítimas.

Um exemplo bem marcante na história do país é o acidente de 1987 com Césio em Goiânia. As vítimas do acidente com o ^{137}Cs tiveram que ficar isoladas e, durante o tratamento especial, os técnicos tiveram que usar macacões, luvas, máscaras e sapatilhas para não se contaminar radioativamente e não contaminar biologicamente os enfermos.

Uso de Efeitos Biológicos da Radiação em Terapias

As radiações penetrantes como os raios X e gama induzem danos em profundidades diferentes do organismo humano causando a morte de células. E isso é bom, quando utilizado como tratamento.

É o caso das radioterapias de combate ao câncer.

Com o auxílio da radioterapia tumores profundos podem ser destruídos ou regredidos sob a ação de feixes de radiação gama adequadamente aplicados. Como a intensidade do feixe decai exponencialmente com a espessura de tecido penetrado, a dose e a correspondente quantidade de dano produzido, são maiores na superfície de entrada do que no ponto de localização do tumor.

Para minimizar os efeitos, focaliza-se sempre o tumor, e aplica-se o feixe de radiação em diferentes direções, movendo o irradiador ou o paciente, de modo que a dose suscite à morte de células do tumor e o tecido sadio irradiado seja naturalmente repostado.

O uso de raios X é semelhante, com a diferença que se pode variar o poder de penetração da radiação e a intensidade de

feixe.

Para tumores localizados em certas regiões do corpo é preferível utilizar fontes de radiação gama aplicadas diretamente sobre eles, numa técnica conhecida como Braquiterapia.

Dependendo da situação, podem-se embutir fontes perto do local afetado, como as antigas agulhas de ^{226}Ra e as sementes de ^{137}Cs , ^{60}Co e ^{192}Ir , ou irradiar o tumor com uma fonte próxima, por meio de um aplicador.

Em alguns tratamentos pós-cirúrgicos, pode ser utilizado um aplicador radioisótopo do tipo oftalmológico ou dermatológico, cujas radiações causam dano superficial devido à baixa penetração da radiação. Isto pode danificar um pouco a lente dos olhos ou a pele da pessoa, mas, em compensação, o efeito de cauterização resultante pode acelerar a cicatrização, evitar a hemorragia ou a formação de queloides (cicatrizes protuberantes), respectivamente.

O último efeito biológico que iremos trazer diz respeito à aplicação de radiofármacos.

Na obtenção de imagens de órgãos, tecidos e sistemas do corpo humano, podem ser utilizados feixes externos de raios X ou as radiações gama emitidas por radioisótopos neles incorporados, utilizando radiofármacos opor-

tunos.

Nestes exames de radiodiagnóstico, o tempo de exposição varia de fração de segundos até algumas horas. O dano causado depende da dose absorvida, que é acumulativa, mas de valor muito menor quando comparada com as aplicadas em radioterapia.

Radioproteção

Radioproteção ou Proteção Radiológica é um conjunto de medidas que visam proteger o homem e o ecossistema de possíveis efeitos indesejáveis causados pelas radiações ionizantes.

Para isso ela analisa os diversos tipos de fontes de radiação, as diferentes radiações e modos de interação com a matéria viva ou inerte, as possíveis consequências e sequelas à saúde e riscos associados.

Para avaliar quantitativa e qualitativamente esses possíveis efeitos, necessita-se definir as grandezas radiológicas, suas unidades, os instrumentos de medição e detalhar os diversos procedimentos do uso das radiações ionizantes.

Bastante coisa, não é?! Por isso algumas companhias preferem terceirizar esse cuidado tão específico. Existem instituições especializadas em consultoria e serviços de radioproteção.

Quem contrata um serviço de radioproteção está pensando em reduzir custos, pois transfere parte sua responsabilidade pelo cuidado e manuseio de material radioativo para uma empresa com expertise para tal serviço. Evitando assim problemas com mão de obra fixa e com a legislação que é bastante dura no que diz respeito à radiação.

As normas regulatórias, os limites permissíveis e um Plano de Proteção Radiológica para as instalações que executam práticas com radiação ionizante, tem por objetivo garantir o seu uso correto e seguro.

Procedimentos para situações de emergência também devem ser definidos para o caso do desvio da normalidade de funcionamento de uma instalação ou prática radiológica.

Os conceitos, procedimentos, grandezas e filosofia de trabalho em proteção radiológica são continuamente detalhadas e atualizadas nas publicações da ICRP(International Commission on Radiological Protection). Existe também a ICRU(International Commission on Radiation Units and Measurements), que cuida das grandezas e unidades, seu processo de aperfeiçoamento e atualização.

Os parâmetros estabelecidos nas publicações da ICRP e ICRU constituem recomendações internacionais. Cada país, pode ou não adotá-las parcial ou totalmente, quando do estabelecimento de suas normas de radioproteção. Tudo depende do estágio de desenvolvimento do país, da capacidade ou viabilidade de execução, em cada área de aplicação.

A preocupação que a proteção radiológica tem com o meio ambiente sempre focou nas pessoas que nele e dele vivem. Quando se faz uma avaliação dos níveis de radioatividade

natural, de dispersão de material radioativo por instalações do ciclo do combustível nuclear, principalmente das áreas de mineração e beneficiamento de material radioativo, a preocupação sempre será voltada para os níveis de exposição ou contaminação a que as pessoas podem estar expostas, direta ou indiretamente, apresentando doses de radiação e riscos adicionais de dano à sua saúde.

Assim, há muito tempo existem os programas pré-operacionais e operacionais de monitoração ambiental, de avaliação de impacto ambiental ou de risco de acidentes possíveis, modelos de dispersão e vias de exposição por material radioativo em acidentes, no licenciamento e implementação de instalações envolvendo material radioativo.

No Brasil, os procedimentos, os critérios científicos e metodológicos estão bem detalhados na Posição Regulatória 3.01/008:2011 da CNEN que trata do Programa de Monitoração Radiológica Ambiental.

O impacto ambiental radiológico é percebido, entre outros indicadores, pelo aumento da radioatividade nos meios físico e biológico, pelo:

- Aumento da concentração de radionuclídeos no meio ambiente;
- Transferência e acumulação em diversos meios através de fenômenos de transporte;
- Bioacumulação e adsorção.



Símbolo de advertência de radiação ionizante (IAEA)

O QUE É A CNEN?

CNEN é uma autarquia federal vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), criada em 1956. É a Comissão Nacional de Energia Nuclear, instituição responsável por regular e fiscalizar o uso da energia nuclear no Brasil. Investe também em pesquisa e desenvolvimento, buscando um uso cada vez mais amplo e seguro das técnicas do setor. Suas 14 unidades estão distribuídas por nove estados brasileiros e a sede localiza-se no Rio de Janeiro.

Princípios de Radioproteção

Segurança é fundamental quando falamos de radioproteção. É necessário estabelecer uma verdadeira cultura de segurança, que inclua estrutura, organização, prática, habilidade, treinamento e conhecimento. Sem ter esse tipo de consciência fica difícil instituir um nível de proteção adequado.

A implementação de um sistema de segurança possibilita a atividade apropriada da proteção pretendida. Por exemplo, num sistema de blindagem multicamadas de um reator nuclear, a proteção da população e ecossistema fica mais fácil de ser garantida. Obviamente ela depende da correta execução dos procedimentos, do treinamento e engajamento dos operadores da instalação.

O entendimento coletivo para a execução rigorosa das tarefas programadas e definidas pelo programa de qualidade de operação, unifica e expressa a cultura de segurança dos trabalhadores da instalação.

Em muitas situações, as medidas de Segurança Física e Segurança do Trabalho coincidem com as de proteção radiológica. No entanto, em certas situações as exigências de radioproteção são mais rigorosas.

A filosofia por trás dos limites de doses máximas permissíveis, para as diversas práticas e situações que, embora seguros, a proteção radiológica exige uma ordem de grandeza abaixo em seus valores, para tranquilizar as pessoas sobre o risco do uso da radiação nuclear, que muitos temem.

Em segurança do trabalho e de operação de muitas instalações, os níveis de insalubridade e periculosidade, quando ultrapassados podem já causar danos perceptíveis nos indivíduos. Em radioproteção, quando os limites máximos per-

missíveis são ultrapassados, dificilmente algum dano é constatado; somente a probabilidade de ocorrência é que aumenta de valor.

QUE É UM IOE?

IOE é o Indivíduo Ocupacionalmente Exposto. Sua prática diz respeito à exposição normal ou potencial do indivíduo a toda atividade humana que introduz fontes de exposição, vias de exposição adicionais ou estende a exposição a mais pessoas. Também está relacionada modificação do conjunto de vias de exposição de vida a fontes existentes, aumentando a probabilidade de exposição de pessoas ou o número de pessoas expostas.

A regulação da segurança radiológica é estabelecida em bases legais, governamentais e técnicas. As empresas que lidam com materiais radioativos mesmo que não como produto, mas como parte ou consequência da dinâmica da atividade são obrigadas a seguir as normas da CNEN se quiserem continuar em atividade.

Por essa razão é fundamental seguir os princípios e cuidados normatizados pela instituição que regulamenta e fiscaliza toda ocorrência dentro e fora do âmbito profissional acerca de materiais radioativos.

Os 3 princípios fundamentais da radioproteção estão ligados à justificação, otimização e limitação dos efeitos da radiação ionizante.

Justificação

Os objetivos da proteção contra as radiações são a prevenção ou a diminuição dos seus efeitos somáticos e a redução da deterioração genética dos povos, onde o problema das exposições crônicas adquire importância fundamental. Considera-se que a dose acumulada num período de vários anos seja o fator preponderante, mesmo que as doses intermitentes recebidas durante esse período sejam pequenas.

As doses resultantes da radiação natural e dos tratamentos médicos com raios X, não são consideradas nas doses acumuladas. Por esse motivo, recomenda-se aos médicos e dentistas que tenham o máximo cuidado no uso dos raios X e demais radiações ionizantes, para evitar exposições desnecessárias. Mesmo assim, pesquisas e avaliações das doses e efeitos sobre a radioatividade natural e o uso das radiações ionizantes em Medicina e outras áreas de aplicação, são contínuas e crescentemente realizados.

Assim, qualquer atividade envolvendo radiação ou exposição deve ser justificada em relação a outras alternativas e produ-

zir um benefício líquido positivo para a sociedade.

Otimização

O princípio básico da proteção radiológica ocupacional estabelece que todas as exposições devem ser mantidas tão baixas quanto razoavelmente exequíveis (ALARA – As Low As Reasonably Achievable).

Estudos epidemiológicos e radiobiológicos em baixas doses mostraram que não existe um limiar real de dose para os efeitos estocásticos. Assim, qualquer exposição de um tecido envolve um risco carcinogênico, dependendo da radiosensibilidade desse tecido por unidade de dose equivalente (coeficiente de risco somático). Além disso, qualquer exposição das gônadas (testículos e ovários) pode levar a um detrimento genético nos descendentes do indivíduo exposto.

O princípio ALARA estabelece, portanto, a necessidade do aumento do nível de proteção a um ponto tal que aperfeiçoamentos posteriores produziram reduções menos significativas do que os esforços necessários. A aplicação desse princípio requer a otimização da proteção radiológica em todas as situações onde possam ser controladas por medidas de proteção, particularmente na seleção, planejamento de equipamentos, operações e sistemas de proteção.

Os esforços envolvidos na proteção e o detrimento da radiação podem ser considerados em termos de custos; desta forma uma otimização em termos quantitativos pode ser realizada com base numa análise custo-benefício.

Limitação

Um dos objetivos da proteção radiológica é a de manter os limites de dose equivalente anual para os tecidos. Os níveis precisam estar abaixo do limiar do detrimento para os efeitos não-estocásticos para o tecido.

Dessa forma impõe-se que as doses particulares de Indivíduos Ocupacionalmente Expostos (IOE) e de indivíduos do público não devem exceder os limites anuais de doses estabelecidos.

LIMITE DE DOSE ANUAIS			
GRANDEZA	ÓRGÃO	IOE	PÚBLICO
DOSE EFETIVA	Corpo inteiro	20mSv	1 mSv
	Cristalino	20mSv	15 mSv
	Pele	500mSv	50 mSv
DOSE EQUIVALENTE	Mãos e pés	500mSv	---

A radioproteção também tem como função limitar a probabilidade de ocorrência de efeitos estocásticos.

A limitação de dose para efeitos estocásticos é baseada no princípio de que o detrimento deve ser igual, seja para irradiação uniforme de corpo inteiro, seja para irradiação não uniforme.

Os fatores de peso para os vários tecidos ou órgão usados para o cálculo da Dose Efetiva ou de Corpo Inteiro, estão recomendados nas publicações N° 26 e 60 da ICRP. Os fatores da ICRP 60 são os estabelecidos na Norma CNEN-NN-3.01, de 2011. Em condições de exposição rotineira, nenhum IOE pode receber, por ano, doses efetivas ou equivalentes superiores aos limites primários estabelecidos por essa norma.

Os valores dos limites variam com o tempo. Eles dependem do estado de desenvolvimento da prática de radioproteção no mundo ou num determinado país, dos limites de detecção dos equipamentos que medem as grandezas operacionais vinculadas às grandezas primárias estabelecidas em norma e das prioridades estabelecidas pelos grupos humanos em determinada época.

Os limites secundários são utilizados para irradiações externa e interna. No caso de irradiação externa aplica-se o índice de dose equivalente de 20 mSv/ano. Para a irradiação interna, os limites são os anuais para a absorção de material radioativo

via inalação ou ingestão, referidos ao Homem de Referência.

O Homem de Referência nada mais é do que alguém que serve de base para saber se o nível de radiação de um determinado grupo de pessoas, normalmente em razão ocupacional, está aumentando ou diminuindo em relação ao parâmetro estabelecido como referência.

Cuidados de Radioproteção

As radiações externas podem ser controladas operando-se com três parâmetros fundamentais: tempo, distância e blindagem.

Tempo

A dose acumulada por uma pessoa que trabalha numa área exposta a uma determinada taxa de dose é diretamente proporcional ao tempo em que ela permanece na área. Essa dose pode ser controlada pela limitação desse tempo:

$$\text{DOSE} = \text{Taxa} \times \text{Tempo}$$

Como o tempo de permanência em áreas de trabalho nas quais existem materiais radioativos ou fontes de radiação, conforme o tipo de tarefa a ser realizada, devem ser empregadas procedimentos de redução na dose do IOE.

Os recursos mais utilizados são: o aumento da distância ou a introdução de material de blindagem entre o homem e a fonte de radiação.

Deve-se sempre ter em mente que quanto menor o tempo de

exposição, menores serão os efeitos causados pela radiação. Porém, o recurso mais eficaz de redução do tempo de execução de uma tarefa é o treinamento do operador, a otimização de sua habilidade.

Distância

Para uma fonte puntiforme, emitindo radiações em todas as direções, o fluxo, que é proporcional à taxa de dose numa determinada distância r da fonte, é inversamente proporcional ao quadrado dessa distância.

Cabe lembrar que essa relação somente é verdadeira para uma fonte puntiforme, um detector puntiforme e absorção desprezível entre a fonte e o detector. Isto porque ela se baseia no ângulo sólido definido pela fonte (puntiforme) e a superfície de uma calota esférica definida pela distância r , entre fonte e objeto alvo, durante o tempo t de exposição. A lei do inverso do quadrado é dada por:

$$\frac{D1}{D2} = \frac{(r2)^2}{(r1)^2}$$

onde é a taxa de dose na distância r^1 da fonte e é a taxa de dose na distância r^2 da fonte.

Note-se que duplicando a distância entre a fonte e o detector, reduz-se a taxa de dose a 1/4 de seu valor inicial. Dessa forma, o modo mais fácil de evitar exposição às radiações ionizantes é ficar longe da fonte.

Blindagem

As pessoas que trabalham com fontes ou geradores de radiação ionizante devem dispor de procedimentos técnicos bem elaborados de modo que o objetivo da tarefa seja concretizado e sua segurança esteja garantida contra exposições desnecessárias ou acidentais.

Os cuidados mencionados anteriormente, fatores de tempo e distância em relação às fontes radioativas estão implícitos na habilidade e destreza de um técnico bem treinado para a tarefa.

Por não apresentar hesitações durante sua execução, sua duração é mínima(tempo); por dominar todos os elementos do processo, não comete enganos, se posiciona no lugar adequado(distância) e com a postura correta.

Entretanto, em certas situações, principalmente quando se opera com fontes intensas ou níveis elevados de radiação, além de colimadores, aventais, labirintos e outros artefatos,

é necessário introduzir outro fator de segurança: a blindagem ou barreira.

A escolha do material de blindagem depende do tipo de radiação, atividade da fonte e da taxa de dose que é aceitável fora do material de blindagem.

CAMADA SEMI-REDUTORA

O coeficiente de atenuação total μ depende do material atenuador e da energia do feixe incidente.

No caso de uma fonte que emite fótons de várias energias, deve-se utilizar diferentes valores de μ , correspondentes às diversas energias do feixe e às diversas taxas de emissão de cada radiação. Como a intensidade de um feixe de fótons não pode ser totalmente atenuada pela blindagem, utiliza-se um parâmetro experimental, denominado de camada semi-redutora(HVL = Half Value Layer), definido como sendo a espessura de material que atenua à metade a intensidade do feixe de fótons. A relação entre μ e HVL é dada por:

$$\mu = \frac{\ln 2}{HVL}$$

Assim, a lei de atenuação exponencial pode ser escrita como:

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

Da mesma forma que o HVL, outro parâmetro muito utilizado no cálculo de espessura de blindagem é a camada deci-reduzora (TVL = Tenth Value Layer) definido como sendo a espessura de material que atenua de um fator de 10 a intensidade do feixe de fótons.

RAIONUCLÍDEO	CAMADA SEMI-REDUTORA (CM)				
	Chumbo	FerroA	Alumínio	Água	Concreto
Co-60	1,0	1,66	4,65	10,99	5,20
Se-75	0,12	0,62	1,79	4,26	2,01
Tc-99 ^m	0,07	0,39	1,13	2,68	1,27
Cs-137	0,53	1,19	3,35	8,20	3,77
U-235	0,09	0,46	1,35	3,19	1,51
Am-241	0,01	0,04	0,12	0,30	0,14

Os valores recomendados para camadas semi e deci redutoras estão descritos na publicação TECDOC-1162 da

IAEA.

Regras Práticas de Radioproteção

A regulação da segurança radiológica é estabelecida em bases legais, governamentais e técnicas.

A proteção radiológica não é somente aplicada na operação de reatores nucleares, mas também para garantir a proteção e a segurança nas diferentes aplicações da radiação ionizante na indústria, medicina e agricultura e no controle do material radioativo, do gerenciamento de rejeitos radioativos, do transporte de materiais radioativos e de minérios e minerais nucleares.

Dentre as principais boas práticas em radioproteção destaca-se a elaboração de um plano formal e detalhado para a proteção radiológica da atividade.

Plano de Proteção Radiológica

Toda instalação que opera com material radioativo deve preparar um documento descrevendo as diretrizes de proteção radiológica que serão adotadas por toda a instalação.

Plano de Proteção Radiológica é o nome dado ao documento redigido com todas as orientações a serem seguidas tanto pela equipe de radioproteção como todos que estiverem li-

gados direta ou indiretamente à atividade exposta à radiação.

TODO BOM PLANO DE RADIOPROTEÇÃO DEVE COMPREENDER:

- A identificação da Instalação e de seu Titular(Direção);
- A função, classificação e descrição das áreas da instalação;
- A descrição da equipe, das instalações e equipamentos do Serviço de Proteção Radiológica;
- A descrição das fontes de radiação, dos sistemas de controle e de segurança e de sua aplicação;
- A função e a qualificação dos IOE;
- A descrição dos programas e procedimentos de monitoração individual, das áreas e do meio ambiente;
- A descrição do sistema de gerência de rejeitos radioativos, estando a sua eliminação sujeita a limites estabelecidos em norma específica;
- A estimativa de taxas de dose para condições de rotina;

- A descrição do serviço e controle médico dos IOE, incluindo planejamento médico em caso de acidentes;
- O programa de treinamento dos IOE e demais trabalhadores da instalação;
- Os níveis de referência, limites operacionais e limites derivados, sempre que convenientes;
- A descrição dos tipos de acidentes admissíveis, do sistema de detecção correspondente e do acidente mais provável ou de maior porte, com detalhamento da árvore de falhas;
- O planejamento de interferência em situações de emergência até o restabelecimento da normalidade;
- As instruções de proteção radiológica e segurança fornecidas, por escrito, aos trabalhadores.

Além disso, o Plano de Proteção Radiológica deve descrever as atribuições do Titular(direção) da Instalação, do Supervi-

Instalação.

Cada um deve ter suas responsabilidades devidamente detalhadas no plano.

Responsabilidade do Titular da Instalação e dos IOE da

O registro de usos, ocorrências e das doses individuais dos trabalhadores da instalação, devem estar sempre atualizados no Serviço de Proteção Radiológica.

RESPONSABILIDADE DO TITULAR(DIREÇÃO) DA INSTALAÇÃO

Ao Titular da instalação cabe:

- Licenciar a instalação junto à CNEN;
- Ser responsável pela segurança e proteção radiológica da instalação;
- Reduzir a probabilidade de acidentes, autorizar as exposições de emergência e estabelecer limites derivados e operacionais;

- Implantar um Serviço de Proteção Radiológica, com pelo menos um Supervisor de Proteção Radiológica;
- Estabelecer e submeter à CNEN o Plano de Proteção Radiológica e suas revisões;
- Instalar e manter um serviço médico adequado;
- Instruir os IOE sobre os riscos inerentes às suas atividades e Situações de Emergência;
- Estabelecer acordos com organizações de apoio para as emergências;
- Notificar à CNEN sobre as ocorrências de acidentes que possam resultar em doses em IOE e/ou indivíduos do público, e submeter um relatório com análise de causas e consequências;
- Implementar um Plano Anual de Auditoria e Garantia da Qualidade;
- Garantir livre acesso à instalação, dos inspetores

da CNEN.

RESPONSABILIDADE DO SUPERVISOR DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA (SPR)

O Supervisor de Proteção Radiológica deve:

- Implementar e orientar o Serviço de Proteção Radiológica;
- Assessorar e informar o Titular da Instalação sobre assuntos relativos à proteção radiológica;
- Fazer cumprir as normas e recomendações da CNEN bem como o Plano de Proteção Radiológica;
- Treinar, reciclar, orientar e avaliar a equipe do Serviço de Proteção Radiológica e demais IOE envolvidos com fontes de radiação;
- Designar um substituto capacitado e qualificado em seus impedimentos.

RESPONSABILIDADE DOS IOE DA INSTALAÇÃO

Aos IOE da instalação cabem duas atribuições fundamentais:

- Executar as atividades de rotina em conformidade com regulamentos de segurança e proteção radiológica estabelecidos pelo Titular (Direção) da Instalação;
- Informar ao Serviço de Proteção Radiológica e aos seus superiores, qualquer evento anormal que possa acarretar níveis de exposição ou risco de ocorrência de acidentes.

Atividades do Serviço de Proteção Radiológica

O Serviço de Proteção Radiológica é o responsável por efetuar o Controle dos IOE, o Controle das Áreas, o Controle das Fontes de Radiação, o Controle dos Equipamentos e manter atualizados os Registros.

O Controle dos IOE é efetuado por meio da Monitoração Individual dos IOE, avaliando as doses que cada um dele recebeu durante o período de trabalho. Além disso, o Serviço de Proteção Radiológica deve acompanhar a supervisão médica dos IOE da instalação.

O Controle de Áreas é feito pela avaliação e classificação periódica das áreas da instalação, passando pelo controle de acesso, execução de um programa de monitoração e sinalização das áreas.

O Controle das Fontes de radiação de uma instalação deve ser feito por meio de um programa de controle físico, com a consequente verificação da integridade das fontes, quanto a possíveis vazamentos.

Os equipamentos geradores de radiação devem passar por programas de inspeção periódica enquanto que os instrumentos utilizados para a proteção radiológi-

ca devem ser calibrados com a periodicidade estipulada em norma específica.

EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES

Procedimentos básicos para uso e manutenção de mecanismos em radioproteção.

- Utilizar o equipamento de proteção individual adequado: luvas, avental, óculos, máscara, etc.;
- Utilizar os instrumentos de monitoração durante todo o trabalho: caneta dosimétrica, monitor individual(filme ou TLD), monitor de área, monitor de contaminação superficial, etc.;
- Manter limpo e em ordem a área(ou laboratório) onde se trabalha com material radioativo;
- As áreas onde se trabalha com material radioativo devem ser isoladas e bem sinalizadas;
- Manipular o material radioativo em local adequado e com sistema de exaustão apropriado: capelas, células quentes, caixas de luvas, etc.;
- Utilizar os instrumentos de manipulação adequados: pinças, porta-fontes, castelos, etc.;

- Manipular fontes abertas(pó, líquido) sobre bandejas de material liso(aço inox, teflon) forradas com papel absorvente;
- Proteger as bancadas com material apropriado e de fácil remoção, como papel absorvente sobre plástico impermeável ou folha de alumínio, caso haja possibilidade de contaminação superficial;
- Trabalhar em lugar com iluminação e ventilação adequadas.

PLANEJAMENTO DA ATIVIDADE

Medidas fundamentais para o bom andamento das atividades dentro das áreas de trabalho envolvendo radiação ou exposição à radiação.

- Conhecer antecipadamente as características do material radioativo com o qual irá trabalhar;
- No caso de material de alta atividade ou de difícil manipulação, simular todas as operações com material de mesmas características, mas inerte, antes de iniciar o trabalho;
- Trabalhar com as menores atividades possíveis de material radioativo;
- Somente o material radioativo que vai ser utilizado deve estar no local de manipulação;
- Manter o responsável pela proteção radiológica informado sobre todo o transporte de radioisótopos, bem como sobre a chegada e saída dos mesmos.

PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS

Precauções básicas para radioproteção.

- Não comer, beber ou fumar na área(ou laboratório) ou durante o trabalho com material radioativo;
- Não portar nem armazenar alimentos em local em que se trabalha com material radioativo;
- Em todo o trabalho com material radioativo, ter sempre em mente os três parâmetros básicos de proteção radiológica: tempo, distância e blindagem;
- No trabalho com fontes abertas, ter sempre a companhia de outra pessoa igualmente qualificada;
- Não permitir que pessoas não treinadas manipulem material radioativo;
- Usar blindagem o mais próximo da fonte;
- Nunca pipetar material radioativo com a boca;

- Fazer medições dos níveis de radiação no local, antes, durante e após a realização dos trabalhos;
- Após trabalhar com material radioativo, descartar as luvas de proteção e lavar bem as mãos e unhas com água e sabão e submetê-las a um medidor de contaminação;
- Qualquer transporte de material radioativo de um lugar para outro deve ser feito com todos os cuidados possíveis;
- Executar todos os procedimentos recomendados para a prática específica.

GERÊNCIA DE REJEITOS

- Medidas fundamentais para a operação de rejeitos radioativos.
- Saber antecipadamente a destinação dos rejeitos provenientes do trabalho a ser executado, se houver; Separar, embalar e identificar, conforme sua categoria, o material classificado como rejeito;
- Não jogar material radioativo nas vias de esgoto normal, a não ser que atenda aos limites definidos pelas normas específicas;
- Se um material estiver contaminado, avaliar se o custo e o esforço para descontaminá-lo compensam ou se é melhor considerá-lo como rejeito;
- Os recipientes devem portar de maneira visível, o símbolo da presença de radiação;
- O armazenamento provisório deve ser em local incluído no projeto da instalação;
- A segregação de rejeitos deve ser feita no local

em que foram produzidos;

- Os rejeitos devem ser identificados em categorias segundo o estado físico, tipo de radiação, concentração e taxa de exposição;

- Rejeitos eliminados devem ser registrados em formulário próprio;

- Os recipientes devem ser adequados às características físicas, químicas, biológicas e radiológicas dos rejeitos e condições asseguradas de integridade;

- Os recipientes destinados ao transporte interno devem atender aos limites máximos para contaminação externa;

- Os veículos para transporte interno devem ter meios de fixação adequada para as fontes de radiação;

- Após cada serviço de transporte devem ser monitorados e se necessário, descontaminados;

- O transporte externo é regulado por norma da CNEN;

- O local de armazenamento deve dispor de barreiras físicas e radiológicas para conter com segurança os rejeitos, evitar sua dispersão para o ambiente e minimizar a exposição de trabalhadores;

- O tratamento e a eliminação estão sujeitos às normas da CNEN;

- Os registros e inventários devem ser mantidos atualizados.

SEGURANÇA E ACIDENTES

- Providências para a manutenção de um ambiente seguro e sem riscos de acidentes.
- Todas as possibilidades de acidente devem ser analisadas antes de se iniciar um trabalho;
- Qualquer evento relevante, não enquadrado no planejamento ou nos procedimentos operacionais, deve ser registrado para correção posterior;
- No caso de desvio de procedimento técnico envolvendo contaminações ou aumento de dose, o fato deve ser registrado e comunicado ao serviço de proteção radiológica ou de emergência da instalação;
- No caso de acidente mais grave, com perda de controle da situação, é necessário acionar o serviço de proteção radiológica ou de emergência da instalação;
- Ter sempre em mente que o melhor processo de descontaminação consiste em evitar a contaminação.

Transporte

O uso de material radioativo muitas vezes requer o seu transporte entre instalações. Para isso ele deve ser acondicionado em uma embalagem apropriada que é projetada e construída para ser uma barreira efetiva entre ele e o meio ambiente. O conjunto formado pelo material radioativo e sua embalagem é chamado de embalado.

Para que o transporte seja realizado de forma segura para pessoas, objetos e o próprio meio ambiente foram criadas normas internacionais que servem como base para os regulamentos nacionais. Na classificação internacional de produtos perigosos, da Organização das Nações Unidas(ONU), os materiais radioativos são incluídos na Classe 7.

Os requisitos de transporte se aplicam a todas as modalidades de transporte de materiais radioativos, ou seja, terrestre, aquático(fluvial e marítimo) e aéreo. Englobam todas as operações e condições relativas ao transporte, tais como desenho, fabricação, manutenção e reparo de embalagens, descarga, recepção, armazenamento em trânsito, entre outras. Sempre que possível, deve-se evitar requisitos aplicáveis a um só meio de transporte, de forma a facilitar o transporte multimodal.



No Brasil, a regulamentação sobre o transporte de materiais radioativos é feita pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, através da Norma CNEN-NE-5.01, e por outros organismos que regulam o transporte modal no país. Esses organismos possuem regulamentos para o transporte de material radioativo, em consonância com as normas e regulamentos da CNEN:

- ANTT – Agência Nacional de Transporte Terrestre – Resolução 420;
- ANTAQ – Agência Nacional de Transporte Aquático – Resolução 2239;
- ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil – RBAC 175;
- MARINHA DO BRASIL – NORMAM 01;
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente – Resolução 237 LC140, IN 05;
- MTE – Ministério do Transporte – NR 29.

A Norma CNEN-NE-5.01 de 01/08/1988 estabelece os requisitos de segurança e proteção radiológica para o TRANSPORTE DE MATERIAIS RADIOATIVOS, a fim de garantir um nível adequado de controle da eventual exposição de pessoas, bens e meio ambiente à radiação ionizante, compreendendo:

- Retenção do conteúdo radioativo para evitar a dispersão de material radioativo e sua possível ingestão ou inalação, tanto durante o transporte normal, como também em caso de acidente;
- Controle do nível de radiação externa para reduzir o perigo devido à radiação emitida pelo embalado;
- Prevenção de criticalidade para impedir o surgimento de uma reação nuclear em cadeia;
- Prevenção de danos causados por calor para impedir a exposição do embalado a temperaturas elevadas e a consequente degradação do material radioativo.

A Norma CNEN-NE-5.01 estabelece que a expedição de materiais radioativos deve ser precedida de um Plano de Transporte que pode ser usado pelo mesmo expedidor para várias expedições da mesma espécie. No caso de transporte de material físsil, deve ser também apresentado um Plano de Proteção Física, elaborado em conformidade com norma específica da CNEN.

Algumas companhias terceirizam o trabalho de transportar as cargas com material ionizante. Trata-se de um serviço que requer cuidado e atenção. Contratar uma empresa de radioproteção para fazer o transporte é o ideal para diminuir custos e

riscos em qualquer que seja a atividade geradora de material radioativo.

Classificação das Áreas de Trabalho

As áreas de trabalho com material radioativo ou geradores de radiação são classificadas de acordo com a norma CNEN-NN-3.01. A normativa dispõe as seguintes categorias de área de trabalho.

- Área Controlada: tem regras especiais de proteção e segurança, com a finalidade de controlar as exposições normais, prevenir a disseminação de contaminação radioativa e prevenir ou limitar a amplitude das exposições potenciais.
- Área Supervisionada: suas condições de exposição ocupacional são mantidas sob supervisão, mesmo que medidas de proteção e segurança específicas não sejam normalmente necessárias.
- Área Livre: todas que não sejam classificadas como área controlada ou supervisionada.

As áreas controladas devem ser restritas, estar sinalizadas com o símbolo internacional das radiações ionizantes, os trabalhadores devem estar individualmente identifica-

dos e monitorados e, na maioria das vezes, portando equipamento de proteção individual(EPI).

Uma área para ser considerada controlada pela radioproteção deve apresentar, em média, um nível de exposição maior que 3/10 do limite máximo permitido pela norma da CNEN.

Em algumas instalações, as áreas controladas podem ter requisitos adicionais de proteção e segurança visando, como ocorre, por exemplo na guarda de segredos industriais ou militares.

Os perímetros supervisionados têm o dever de possuir monitores de área, controle de acesso e nível de exposição maior que 1 mSv/ano.

As áreas consideradas livres devem apresentar um nível de exposição menor do que 1 mSv/ano.

Todas essas medidas são fundamentais para a segurança em radioproteção.

Mas qual é a hora de usar as medidas de segurança em radioproteção?

Quais são os parâmetros a serem seguidos? O que é um Plano de Proteção Radiológica? Uma pessoa contaminado por radiação pode passar essa radiação para outra pessoa? A seguir vamos tirar essa e outras dúvidas específicas sobre contaminação radioativa. Absolutamente tudo que você precisa saber sobre radioproteção.

A Quantificação da Radiação Ionizante

O primeiro passo da proteção radiológica é saber com o que estamos lidando. É necessário quantificar a radiação que iremos estar expostos durante a atividade.

Uma das questões iniciais da radioproteção é saber como realizar uma medição de quantidades de radiação ionizante utilizando a própria radiação ou os efeitos e subprodutos de suas interações com a matéria.

O desafio da medição está ligado às suas propriedades, pois elas são invisíveis, inodoras, insípidas, inaudíveis e indolores. Além disso, elas podem interagir com os instrumentos de medição modificando suas características.

Outra dificuldade é que nem todas as grandezas radiológicas definidas são mensuráveis.

Campo de Radiação

Uma abordagem intuitiva seria medir quantas radiações são emitidas. Ou seja, você pode calcular a radioatividade em um intervalo de tempo ou observar quantas radiações atravessam determinada seção ou área.

São dois bons exemplos de grandezas radiológicas associadas ao campo de radiação. Contabilizando o número

de radiações relacionado à alguma outra grandeza do sistema de medição tradicional (tempo e área) é possível estabelecer parâmetros de grandeza do tipo Atividade de um material radioativo, ou Fluência de partículas de um acelerador.

Grandezas Dosimétricas

Outra maneira de quantificar a radiação ionizante é por meio da avaliação dos efeitos da interação da radiação com um determinado material, utilizando algum efeito ou subproduto.

Por exemplo, utilizando a carga elétrica dos elétrons ou íons produzidos pela ionização, a energia transferida ao material pela radiação, a energia absorvida pelo material, a luminescência, a alteração da condutividade elétrica, o calor produzido, o defeito cristalino, a alteração química.

De modo semelhante, utilizando relações com a massa ou volume, podem-se definir grandezas radiológicas como, Exposição, Kerma e Dose Absorvida.

Trata-se de grandezas dosimétricas porque estão associadas à quantidade de radiação que um material foi submetido ou absorveu.

Grandezas Limitantes

Quando os efeitos das interações acontecem no organismo humano e se as suas consequências podem ser prejudiciais à saúde, podem-se definir grandezas limitantes.

As grandezas limitantes servem para indicar o risco à saúde humana devido à radiação ionizante. Como as radiações apresentam diferenças na ionização, penetração e, consequente dano biológico produzido, introduz-se fatores de peso associados às grandezas dosimétricas e, assim, se obtém a dose equivalente.

Como o conceito de dose equivalente não utiliza somente as grandezas básicas na sua definição podem surgir uma variedade de grandezas limitantes dependendo do propósito de limitação do risco.

Desta maneira temos definições como: dose equivalente no órgão, dose equivalente efetiva, dose equivalente comprometida, dose efetiva, etc.

Grandezas Operacionais

Levando em consideração as atividades de proteção radiológica, podem-se definir grandezas radiológicas mais consistentes ou úteis nas práticas. Isto porque as grandezas limitantes não são mensuráveis ou de fácil estimativa. São as chamadas grandezas operacionais.

Desta maneira, aparecem grandezas muito específicas como: Equivalente de dose ambiente e Equivalente de dose pessoal.

Condições de Medição

Nem sempre o modo de operação dos detectores, o material de que são constituídos e os parâmetros que eles medem correspondem às grandezas radiológicas anteriormente mencionadas.

Por isso é necessário apresentar fatores de conversão que consideram variações de interação radioativa com um gases, semicondutores, emulsões, tecidos humanos ou órgãos. Também é preciso observar as condições de medição: se foram realizadas por meio de ar, fantoma, campos alinhados ou expandidos, nas condições de temperatura e pressão padronizadas.

A conversão, por exemplo, de uma densidade óptica de uma emulsão em dose equivalente, necessita de curvas de calibração obtidas com irradiações de filmes do mesmo lote, com valores conhecidos de dose absorvida, para cada valor de energia e, para a mesma dose, diferentes energias dos fótons, em feixes padronizados, denominados de qualidades de feixe.

Dessa forma, por intermédio das relações entre os valores das densidades ópticas nas regiões sem e com filtro, dos filmes dosimétricos é possível obter-se o valor da energia efetiva e da dose absorvida.

O valor obtido pode sofrer pequenas modificações

devido a fatores de correção, provenientes das dependências energética, angular, direcional, etc. Como o fator de qualidade é igual a um, obtém-se o valor da dose equivalente.

Este mesmo procedimento é utilizado para converter as grandezas básicas Dose Absorvida, Fluência e Exposição, que possuem padrões nacionais, para as grandezas operacionais, todas mensuráveis.

Uma questão que pode causar dificuldades é o fato de muitas grandezas diferentes, possuírem a mesma unidade.

Por exemplo, a Dose Absorvida e o Kerma são medidos em Gray(Gy), a Dose Equivalente, Dose Efetiva, Dose Equivalente Comprometida, são avaliadas em Sievert(Sv).

Isto se deve ao fato das diferenças entre elas serem constituídas por fatores de conversão adimensionais, envolverem estimativas de exposições externas e internas ou avaliarem frações de energia absorvidas ou transferidas.

Atividade

A atividade de um material radioativo é expressa pelo quociente entre o número médio de transformações nucleares espontâneas e o intervalo de tempo decorrido. Matematica-

mente é dada por:

$$A = \frac{dN}{dt} \quad (\text{Bq} = \text{s}^{-1})$$

onde N é o número de núcleos radioativos contidos na amostra ou material.

Segundo a definição da ICRU, a Atividade é o quociente dN/dt , de uma quantidade de núcleos radioativos num estado de energia particular, onde dN é o valor esperado do número de transições nucleares espontâneas deste estado de energia no intervalo de tempo dt .

Sua unidade, o Becquerel(Bq), corresponde a uma transformação por segundo, ou s^{-1} . A unidade antiga, Curie(Ci) é ainda utilizada em algumas situações, e corresponde ao número de transformações nucleares por unidade de tempo de 1 grama de Ra-226, sendo $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

É bom lembrar que, uma transformação por segundo não significa a emissão de uma radiação por segundo, pois, numa transformação nuclear, podem ser emitidas várias radiações de vários tipos e várias energias.

Muitas vezes uma transformação nuclear é confundida com uma “desintegração nuclear”, devido ao antigo conceito de radioatividade que imaginava que, quando o núcleo emitia radiações, ele estava se desintegrando, se destruindo. Hoje se sabe que o núcleo só emite radiações para se auto organizar, aperfeiçoar sua estrutura e dinâmica.

Na prática, devido a hábitos estabelecidos, uma desintegração/segundo é equivalente a uma transformação/segundo e, ao Becquerel.

A razão básica é que o tempo de ocorrência da transformação nuclear é tão curto, de 10^{-9} a 10^{-13} segundos, que não existe ainda detector capaz de discriminar radiações emitidas neste intervalo de tempo, de modo que tudo resulta numa contagem ou num pulso.

Contudo, mesmos que as radiações sejam emitidas em todas as direções e sentidos, é possível conhecer a atividade da fonte comparando-a com uma fonte de referência, de mesma geometria e matriz físico-química.

Para facilitar a compreensão, é muito comum em garrafas de água mineral, a radioatividade ser expressa numa unidade antiga denominada mache. Ela corresponde a $12,802 \text{ Bq L}^{-1}$.

A atividade é medida de forma absoluta em um sistema de coincidência $4\pi\beta\text{-}\gamma$, onde um dispositivo detecta a radiação

beta em coincidência com pelo menos uma radiação gama coletada num outro detector, emitidas pelo mesmo núcleo em transformação.

Exposição

É o quociente entre dQ por dm, onde dQ é o valor absoluto da carga total de íons de um dado sinal, produzidos no ar, quando todos os elétrons (negativos e positivos) liberados pelos fótons no ar, em uma massa dm, são completamente freados no ar, ou seja,

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (\text{C} \times \text{Kg}^{-1})$$

Devido à necessidade de se conhecer perfeitamente a massa do volume de material atingido e de coletar toda a carga de mesmo sinal num eletrodo, a medição da Exposição só é factível numa câmara de ionização a ar, a câmara de ar livre (free-air). Isto significa que esta grandeza só pode ser definida para o ar e para fótons X ou gama.

As radiações alfa não conseguem penetrar na câmara para ionizar o ar, e as radiações beta não permitem con-

dições de homogeneidade ou equilíbrio eletrônico na coleta dos elétrons. Além do mais, estas radiações representam elétrons adicionais (carga) ou núcleos de hélio que podem capturar elétrons do ar.

A unidade especial roentgen (R) está relacionada com a unidade do SI, coulomb/quilograma (C.kg⁻¹), por:

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

Dose Absorvida

Outro efeito da interação da radiação com a matéria é a transferência de energia.

Como o próprio nome já diz a Dose absorvida sempre é absorvida totalmente. Isso acontece devido à variedade de modos de interação e à natureza do material.

Assim, por exemplo, uma quantidade da energia transferida pode ser captada no processo de excitação dos átomos, ou perdida por radiação de freamento (raios X), cujos fótons podem escapar do material. A fração absorvida da energia transferida corresponde às ionizações dos átomos, quebra de

ligações químicas dos compostos e incremento da energia cinética das partículas (correspondente à conversão em calor).

A relação entre a energia absorvida e a massa do volume de material atingido é a base da definição da grandeza Dose absorvida.

Entretanto, para especificar melhor as variações espaciais e evitar a variação da quantidade de energia absorvida em diferentes pontos do volume do material, a Dose absorvida é definida como uma função num ponto P, de interesse, ou seja,

$$D = \frac{\overline{d\varepsilon}}{dN} \quad (\text{Jx Kg}^{-1} = \text{gray} = \text{Gy})$$

onde $\overline{d\varepsilon}$ é a energia média depositada pela radiação no ponto P de interesse, num meio de massa dm.

A unidade antiga de dose absorvida, o rad (radiation absorbed dose), em relação ao gray, vale,

$$1\text{Gy} = 100\text{ rad}$$

A dose absorvida pode ser medida de modo absoluto utilizando-se um calorímetro de grafite.

Dose Equivalente

Esta grandeza, definida no Brasil como Dose Equivalente, é uma tradução equivocada de Dose Equivalent das recomendações da ICRP 26. Esta grandeza, assim denominada, ficou estabelecida nas normas da CNEN-NE-3.01(1988), e no vocabulário dos usuários.

A tradução correta seria Equivalente de dose, pois o conceito definido foi de equivalência entre doses de diferentes radiações para produzir o mesmo efeito biológico.

A Dose Equivalente, H, é obtida multiplicando-se a dose absorvida D pelo Fator de qualidade (Quality factor), Q, ou seja,

$$H = D \times Q \quad (\text{J.Kg}^{-1} = \text{Sievert} = \text{Sv})$$

A unidade antiga da dose equivalente denominava-se rem (roentgen equivalente men), sendo que $1\text{ Sv} = 100\text{ rem}$.

O fator de qualidade Q é adimensional e constitui um fator de peso proveniente da simplificação dos valores da Efetividade (ou Eficácia) Biológica Relativa (Relative Biological Effectiveness) – RBE – dos diferentes tipos de radiação, na indução de determinado tipo de efeito biológico.

Na equivalência, as diferenças entre as radiações foram expressas pelos diferentes valores do LET (Linear Energy Transfer), ou seja, o valor de Q foi obtido em função do LET

Dose equivalente num tecido ou órgão

A Dose Equivalente num órgão ou tecido é a dose absorvida D média em um tecido específico T, multiplicada pelo fator de qualidade Q da radiação R, expressa por:

$$HT = DT \times Q \quad (\text{J.Kg}^{-1} = \text{Sievert} = \text{Sv})$$

onde Q é o fator de qualidade da radiação e DT é a dose absorvida no tecido T.

Dose equivalente efetiva

A Dose Equivalente Efetiva HE, também denominada de Dose Equivalente de Corpo Inteiro (Whole body dose equivalent) H_{WB} , é obtida pela relação,

$$HE = H_{WB} \sum_T W_T H_T \quad (J.Kg^{-1} = \text{Sievert} = Sv)$$

onde W_T é o fator de peso do tecido ou órgão (Tissue weighting fator) T relevante e H_T é a dose equivalente no órgão ou tecido T.

Os valores de W_T estão associados à radiosensibilidade do órgão à radiação.

BOX ÓRGÃO OU TECIDO FATOR DE PESO

ÓRGÃO OU TECIDO	FATOR DE PESO (ICRP 60)
Gônadas	0,20
Medula Óssea	0,12
Cólon	0,12
Pulmão	0,12
Estômago	0,12
Bexiga	0,05
Mama	0,05
Fígado	0,05
Esôfago	0,05
Tireóide	0,05
Pele	0,01
Restantes	0,05

Esta grandeza não é mensurável. Assim, para as aplicações práticas, a ICRU 39 introduziu grandezas operacionais mensuráveis relacionadas à Dose equivalente efetiva (Effective dose equivalent) H_E , como Equivalente de Dose Ambiente (Ambient dose equivalent) $H^*(d)$, Equivalente de Dose Direcional (Directional dose equivalent) $H'(d, \Omega)$ e Equivalente de Dose Pessoal (Personal dose equivalent) $H_p(d)$.

Detectores de Radiação

Detector de radiação é um dispositivo que, colocado em um meio onde exista um campo de radiação, seja capaz de indicar a sua presença.

Existem diversos processos pelos quais diferentes radiações podem interagir com o meio material utilizado para medir ou indicar características dessas radiações. Entre esses processos os mais utilizados são os que envolvem a geração de cargas elétricas, a geração de luz, a sensibilização de películas fotográficas, a criação de traços (buracos) no material, a geração de calor e alterações da dinâmica de certos processos químicos.

Usualmente um detector de radiação é constituído de um elemento ou material sensível à radiação e um sistema que transforma esses efeitos em um valor relacionado a uma grandeza de medição dessa radiação.

Propriedades de um detector

Um detector deve ser um dispositivo que, além dos dispositivos básicos de mensuração específicos para a função, trabalha para apresentar em suas sequências de medição as seguintes características.

- Repetitividade, definida pelo grau de concordância dos resultados obtidos sob as mesmas condições de medição;
- Reprodutibilidade, grau de concordância dos resultados obtidos em diferentes condições de medição;
- Estabilidade, aptidão do instrumento em preservar consistência nas suas características de medição ao decorrer do tempo;
- Exatidão, grau de concordância dos resultados com o “valor verdadeiro” ou valor de referência a ser determinado;
- Precisão, grau de concordância dos resultados entre si, normalmente expresso pelo desvio padrão em relação à média;
- Sensibilidade, razão entre a variação da resposta de um instrumento e a correspondente variação do estímulo;
- Eficiência, eficiente capacidade de converter em sinais de medição os estímulos recebidos.

Juntamente às características mencionadas de medição incluem-se a manutenção do mesmo método, procedimento experimental, instrumento, condições de operação, local, condições ambientais e a repetição em curto período de tempo. Na definição da exatidão está envolvido o valor verdadeiro ou valor de referência.

Obviamente que este valor é desconhecido ou indeterminado, pois sua existência implicaria numa incerteza nula. Assim, existe o valor verdadeiro convencional de uma grandeza, que é o valor atribuído e aceito, às vezes, por convenção, como tendo uma incerteza apropriada para uma dada finalidade e obtida com métodos de medição selecionados.

Eficiência de um detector

A eficiência de um detector está ligada ao tipo e à energia da radiação. Trata-se basicamente da capacidade do detector de registrar a radioatividade. Sua eficiência é definida de duas maneiras: eficiência intrínseca e eficiência absoluta.

O registro de cada radiação no detector representa um sinal, seja ele em forma de pulso, buraco, sinal de luz ou outro tipo qualquer. Leva em consideração a forma pela qual a radiação interage com o detector e dos subprodutos mensuráveis gerados.

Um detector pode ser considerado um transdutor, pois transforma um tipo de informação (radiação) em outro, que pode ser um sinal elétrico, luz, reação química, etc.

O tipo e a energia de radiação, normalmente, são fatores ligados às características intrínsecas do detector. A eficiência intrínseca pode ser escrita como:

$$\epsilon_{\text{intr}} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de sinais registrados}}{\text{N}^\circ \text{ de radiações incidentes no detector}}$$

Os fatores que influenciam a eficiência intrínseca do detector diferem para cada tipo. Entre eles estão o número atômico do elemento sensível do detector, estado físico do material, tensão de operação (para detectores que usam campo elétrico), sensibilidade da emulsão fotográfica (para filmes) e outros parâmetros que são ligados às características físico-químicas dos seus materiais constituintes.

A eficiência absoluta está relacionada não só com as suas características de construção, mas também com a fonte de radiação que está sendo medida, com o meio e com a geometria de medição. Pode ser escrita como:

$$\epsilon_{\text{abs}} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de sinais registrados}}{\text{N}^\circ \text{ de radiações emitidas pela fonte}}$$

Entre os fatores que influem na eficiência absoluta estão a distância do emissor, o tipo do feixe emitido (radial, colimado), o meio entre o detector e a fonte emissora, além daqueles que influenciam na eficiência intrínseca do detector.

Fatores que definem a escolha de detectores

Os fatores determinantes na escolha de detectores para proteção radiológica passam pelo tipo de radiação, intervalo de tempo de interesse, precisão, portabilidade, autonomia, finalidade e custo.

Tipo da Radiação

Vimos na introdução deste Guia que as radiações interagem com a matéria de várias maneiras. A escolha do detector depende do tipo de radiação que se quer medir, seja radiação eletromagnética, partículas carregadas leves, partículas carregadas pesadas ou nêutrons.

Em geral, um detector que mede com grande efici-

ência um determinado tipo de radiação pode ser totalmente inadequado para medir outro tipo.

Por exemplo, um detector para radiação de alta energia como os fótons não é o mais adequado para medir partículas alfa, radiação de baixa energia.

Intervalo de Tempo de Interesse

Algumas vezes o objetivo pretendido pode ser a medição instantânea da radiação, ou seja, o número médio de radiações em um intervalo de tempo bastante rápido.

Outras vezes a finalidade é registrar a radiação acumulada durante um período de tempo determinado, como quando é necessário marcar o tempo de exposição de um trabalhador.

Vale ressaltar que para cada finalidade deve ser utilizado um detector apropriado.

No primeiro caso, são utilizados os detectores de leitura direta, ou ativos, tais como os detectores a gás para medição da taxa de dose, os cintilômetros, os detectores a semicondutor.

No segundo caso estão incluídos os detectores passivos, que registram os eventos e podem ser processados posteriormente, como as emulsões fotográficas, os detectores de traço, os

dosímetros termoluminescentes e citogenéticos.

Outro fato importante a considerar é como a radiação é emitida. Assim, no caso de raios X gerados por tubos que dispõem somente de um sistema de retificação no circuito de saída do transformador de alta tensão, deve-se utilizar um detector integrador, uma vez que a radiação é gerada de modo pulsado.

Para uma fonte radioativa comum é melhor utilizar um medidor de taxa de exposição ou de dose, uma vez que o fluxo de radiação é praticamente contínuo.

Para medições com espectrometria gama, de soluções de amostras ambientais, em que a atividade do radionuclídeo é muito baixa, na maioria das vezes é necessário acumular um espectro por um período de várias horas, e até mesmo de vários dias, mesmo utilizando uma geometria de fonte apropriada.

Precisão

Dependendo da utilização, a escolha do detector e do método de medição pode variar em relação ao grau de precisão, exatidão e resolução dos resultados desejados. Está relacionado às diversas incertezas envolvidas no processo de medição e nas outras atividades associadas.

Resultados com incertezas de 20% podem ser con-

siderados aceitáveis em medições ambientais, contudo, para trabalhos de produção de padrões de medições de atividade, uma incerteza de 0,5% pode ser considerada muito grande.

A precisão de um dispositivo de detecção está sempre relacionada ao tipo de detector, método de medição e finalidade do exame.

Condições de Trabalho do Detector

O detector utilizado em trabalho de campo tem que ter condições de robustez, portabilidade e autonomia diferentes das necessárias aos detectores operados em ambientes controlados de laboratório.

Detectores muito sensíveis a choques mecânicos ou que sofrem influência significativa de fatores ambientais, não são recomendados para medições em unidades móveis.

Em situações extremas de ambiente, como por exemplo, dentro do circuito primário de um reator, somente detectores especiais têm condições de operar. Essas condições de operação do detector irão muitas vezes determinar os materiais utilizados em sua construção.

Tipo de Informação Desejada

O processamento das informações a serem colhidas depende do detector escolhido e do mecanismo pelo qual a informação é coletada.

Levando em consideração a finalidade da coleta, pode-se desejar somente informações sobre o número de contagens, ou energia da radiação detectada. Em alguns casos se busca a relação com a dose absorvida, tempo vivo de medição ou distribuição em energia.

Características Operacionais e Custo

Outros fatores determinantes na escolha do detector ideal para radioproteção são a simplicidade de operação, facilidade e disponibilidade de manutenção e, finalmente, o custo do detector.

De maneira geral pode-se estabelecer a relação apresentada a seguir para a escolha do detector.

TABELA DETECTORES DE RADIAÇÃO

RADIAÇÃO	DETECTOR
Alfa	Proporcional Cintilador
Beta	Geiger Müller Proporcional Câmara de Ionização
X e Gama	Geiger Müller Proporcional Cintilador
Nêutrons Rápidos	Proporcional Câmara de Ionização
Nêutrons Térmicos	Proporcional

De todos os detectores de radiação o mais utilizado em radioproteção para monitoração de área é o Geiger-Müller por poder ser construído em diversas formas, ser barato, robusto e responder rapidamente ao campo de radiação.

Monitor de Radiação

O monitor de radiação é um detector construído e adaptado para radiações e finalidades específicas e deve apresentar as seguintes propriedades, regidas por normas da IEC 731 ou ISO 4037-1:

- Limite de detecção adequado;
- Precisão e exatidão;
- Reprodutibilidade e repetitividade;
- Linearidade;
- Estabilidade a curto e longo prazo;
- Baixa dependência energética;
- Baixa dependência direcional, rotacional;
- Baixa dependência dos fatores ambientais;
- Baixa dependência com a taxa de exposição.

Difícilmente um detector consegue satisfazer a todas essas características elencadas. Dessa forma, deve-se ter em mente que para cada tipo de finalidade existem atributos específicos. O mesmo ocorre para a possibilidade de introdução de fatores de correção e também para algumas características que integram o elenco de suas deficiências.

A relevância de cada grupo destes atributos depende muito do tipo de grandeza ou medição proposta na atividade.

de. Muitas das deficiências são contornadas com a padronização do uso e do processamento dos dados experimentais.

Existem três tipos fundamentais de monitores de radiação. São eles os monitores individuais, monitores de área e monitores ambientais.

Dentre os monitores individuais mais utilizados constam o filme dosimétrico, o dosímetro termoluminescente (TLD), o de silício e o de albedo. Alguns destes dispositivos, além de alarmes para valores de taxa ou de dose acumulada, apresentam a facilidade de leitura direta, possibilidade de transmissão de dados para um sistema ou estação de monitoração.

Os monitores de área podem ser fixos ou portáteis. Dentre os monitores fixos, existem os do tipo portal, de mãos e pés, ou de medição constante da taxa de dose em determinada área.

Já os monitores utilizados na monitoração ambiental, podem ser estações de monitoração, contendo diversos dispositivos de detecção, como filtros, detectores de traço, TLD, detectores ativos.

Dosímetro

Dosímetro é um tipo de monitor que mede determinadas grandezas radiológicas ou operacionais, mas com resultados relacionados ao corpo inteiro, órgão ou tecido humano.

Além das propriedades gerais de um monitor de radiação o dosímetro deve ter as seguintes características:

- Resultados em dose absorvida ou dose efetiva (ou taxa);
- Ser construído com material tecido-equivalente;
- Possuir fator de calibração bem estabelecido;
- Suas leituras e calibrações são rastreadas a um laboratório nacional e à rede do BIPM(International Bureau of Weights and Measures);
- Incertezas bem estabelecidas e adequadas para sua aplicação;
- Modelo adequado para cada aplicação;
- Modelo adequado para cada tipo e intensidade de feixe.

O dosímetro pode ser utilizado em medições absolutas, como por exemplo, em câmaras de ar livre, câmaras cavitária de grafite ou câmaras de extrapolação.

Nas medições relativas, onde é necessário conhecer

o fator de calibração (rastreamento metrológico), são muito utilizadas as câmaras tipo dedal para fótons e elétrons, câmaras de placas paralelas para raios X de baixa energia e elétrons de alta energia, as câmaras esféricas de grande volume para proteção radiológica.

Estes modelos descritos podem atuar como padrões de laboratórios, sendo usados em clínicas de radioterapia ou para dosimetria de feixes ou de indivíduos.

Emulsões Fotográficas

As emulsões fotográficas são normalmente constituídas de cristais (grãos) de haletos de prata (normalmente brometo) dispersos em uma matriz de gelatina. Cada grão tem aproximadamente 10^{10} átomos de Ag^+ .

As emulsões fotográficas utilizadas para detecção de radiação são similares às utilizadas em filmes fotográficos comuns, sendo que nas primeiras a concentração dos grãos de brometo de prata é várias vezes superior. A presença da prata metálica (Ag) remanescente após o processo de revelação está relacionada à quantidade de radiação a que foi submetida a emulsão.

A ação da radiação na emulsão é semelhante a que ocorre com a da luz visível em chapas fotográficas comuns. A radiação, ao interagir com elétrons de átomos do brometo de prata (AgBr) faz com que apenas alguns átomos no grão sejam sensibilizados pela sua passagem, transformando os íons Ag^+ em Ag metálica.

Em princípio, essa quantidade de Ag transformada pode permanecer indefinidamente, armazenando uma imagem latente da trajetória da partícula na emulsão. No processo subsequente de revelação, uma solução reveladora tem a

propriedade de converter todos os grãos de brometo de prata em prata metálica. Esse processo, no entanto, ocorre com velocidade muito maior nos grãos que já possuem alguns átomos sensibilizados, e o processo pode então ser interrompido após algum tempo, quando todos os grãos sensibilizados previamente já foram revelados. Isso é feito através do banho com uma solução fixadora, que contém ácido acético diluído, que interrompe rapidamente o processo.

Nessa mesma solução, é colocado tiosulfato de sódio(hipo) que é utilizado para remover os grãos de AgBr não revelados, que são aqueles que não contém a imagem latente. Por fim, o filme é colocado em um banho de água, que tem a finalidade de remover a solução fixadora sendo posteriormente levado à secagem.

Se a chapa radiográfica for revelada muito tempo após sua exposição, parte da informação armazenada pode desaparecer gradualmente num processo denominado de desvanecimento (fading) devido à recombinação química que naturalmente ocorre no colóide de que é feita a emulsão fotográfica.

Os filmes fotográficos utilizados para monitoração pessoal têm dimensão reduzida, da ordem de alguns centímetros quadrados (por exemplo, 3 cm x 4 cm). São acondicionados em envelopes à prova de luz.

Para a monitoração, um ou mais filmes são colocados em monitores (ou badges), normalmente feitos de plástico, com algumas partes das áreas sensíveis cobertas por filtros de cobre e chumbo.

Normalmente são colocadas em um monitor dois tipos de emulsão, uma mais sensível (para baixas doses) e outra menos sensível (para altas doses), para ampliar a capacidade de detecção dos fótons em quantidade e em energia.

Os filtros metálicos são necessários para a determinar a energia efetiva dos fótons, utilizada nas curvas de calibração de densidade ótica x dose absorvida. Isto porque a densidade ótica pode variar para a mesma dose absorvida, para diferentes valores de energia dos fótons.

Além disso, durante o período de monitoração (um mês), o IOE recebe fótons de origem e energia variáveis, cujo modo e tempo de exposição, normalmente são desconhecidos, para cada tipo de radiação.

Como os fótons que atingem o filme exposto possuem a mesma energia efetiva que os que atravessam os filtros metálicos de diferentes naturezas e espessuras, as razões entre as várias densidades óticas das partes recobertas do filme permitirão determinar o seu valor, devido à dependência dos diferentes coeficientes de atenuação li-

neares totais de cada filtro com a energia.

A avaliação da dose utilizando dosímetros fotográficos é feita pela comparação da densidade ótica do filme após a revelação com a densidade ótica de outros filmes que foram irradiados com doses conhecidas com feixes padronizados.

O equipamento utilizado é um densitômetro ótico. Consiste basicamente na medida da opacidade ótica do filme à transmissão da luz. A densidade ótica é uma medida da atenuação da luz transmitida pelo filme em relação à intensidade da luz incidente.

Normalmente o monitor é substituído a cada mês. O filme substituído é então processado e a dose acumulada no período é o objeto de avaliação.

As emulsões fotográficas são utilizadas também para a obtenção de radiografias utilizadas em diagnósticos médicos. Como a atenuação e absorção da radiação com os materiais dependem do Z do material e de sua densidade, a radiação que atravessa diversos tipos de tecido irá interagir de forma diferente com eles, permitindo uma discriminação da composição do interior do corpo examinado por meio do feixe atenuado transmitido, o qual irá formar uma imagem latente na chapa fotográfica. Dessa forma é possível verificar fraturas em ossos, que atenuam mais a radiação que o tecido mole,

identificar materiais estranhos no corpo e alterações de tecido provocadas por câncer.

Atualmente, muitos dos aparelhos que usavam chapas radiográficas como detectores, foram substituídos por detectores de estado sólido, como os de silício, e tem a informação processada com técnicas digitais, produzindo imagens diretamente em uma tela de computador.

Apenas alguns anos após terem sido inventados, os aparelhos de raios X já eram utilizados nos hospitais juntos aos campos de batalha para auxiliar na retirada de fragmentos de metal em ferimentos causados por balas e granadas.

De forma semelhante à utilizada para raios X diagnóstico, feixes de raios γ são usados para avaliação de estruturas na construção civil, na siderurgia e metalurgia. A radiação é mais absorvida na matéria mais densa e com mais alto Z e permite verificar a existência de bolhas e falhas no interior de grandes estruturas metálicas e de concreto, sem a necessidade de destruí-las. Normalmente são utilizadas fontes de Co-60, de Cs-137 e de Ir-192, Cobalto, Césio e Iridio, respectivamente.

Também podem ser utilizados também aparelhos de raios X de alta energia (acima de 400 keV). Técnica utilizada principalmente em experimentos em biologia e pesquisa com plantas. A radioautografia consiste na coloca-

ção de uma emulsão fotográfica em contato com o material a ser analisado, que foi inoculado com a substância radioativa. Esse método permite o estudo da dinâmica de processos biológicos. Normalmente são utilizados como marcadores o C-14 e o H-3. A radiação β emitida por esses radioisótopos permite mapear estes processos.

Detectores Termoluminescentes(TLD)

O volume sensível de um material termoluminescente consiste em uma massa pequena (aproximadamente 1 a 100 mg) de um material cristalino dielétrico contendo ativadores convenientes. Esses ativadores que podem estar presentes em quantidades extremamente pequenas (da ordem de traço, por exemplo), criam dois tipos de imperfeições na rede cristalina: armadilhas para elétrons, que capturam e aprisionam os portadores de carga e centros de luminescência.

A radiação ionizante, ao interagir com os elétrons do material, cede energia aos mesmos pela ionização, que são aprisionados pelas armadilhas. Se o material é submetido a um aquecimento programado os elétrons aprisionados nas armadilhas são liberados, fazendo com que percam a energia nos centros de luminescência. A diferença de energia entre esses dois níveis é emitida através de um fóton na faixa da luz visível, da ordem de alguns eV.

Para alguns materiais as armadilhas resistem bem à temperatura ambiente por períodos de tempo relativamente longos (maiores que 30 dias, por exemplo), ou seja, só liberam os elétrons e emitem luz após um tratamento térmico de algumas centenas de graus Celsius.

Como o sinal luminoso pode ser proporcional à ra-

dição incidente, esses materiais são bastante convenientes para serem utilizados como dosímetros, principalmente pela sua característica de reutilização antes de apresentarem fadiga expressiva.

Ainda que somente uma parte pequena da energia da radiação depositada no material seja transformada em luz, com controle adequado do processo, é possível se obter boa reprodutibilidade na avaliação da dose acumulada.

As principais substâncias utilizadas como materiais termoluminescentes para dosimetria são o $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ (sulfato de cálcio dopado com disprósio), o $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$ (dopado com manganês); o LiF (fluoreto de lítio) e a CaF_2 (fluorita). No Brasil, o $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ (produzido no IPEN/CNEN-SP) e o LiF , são os mais utilizados.

As pedras semipreciosas, em sua maioria, apresentam propriedades termoluminescentes. Algumas podem até ser utilizadas como dosímetros em certas situações.

O instrumento utilizado para avaliar a dose em função da luz emitida é denominado leitor (ou leitora) TLD. É composto de um sistema que faz um aquecimento controlado, de uma válvula fotomultiplicadora, que transforma o sinal luminoso em um sinal elétrico amplificado, e de um sistema de processamento e apresentação (display) do sinal.

Detectores a Gás

Os detectores à gás constituem os tipos mais tradicionais e difundidos de monitores de radiação. São utilizados desde as primeiras experiências com radiação ionizante.

A interação das radiações com os gases provoca principalmente excitação e ionização dos seus átomos. Na ionização formam-se pares elétron-íon que dependem de características dos gases utilizados e da radiação ionizante.

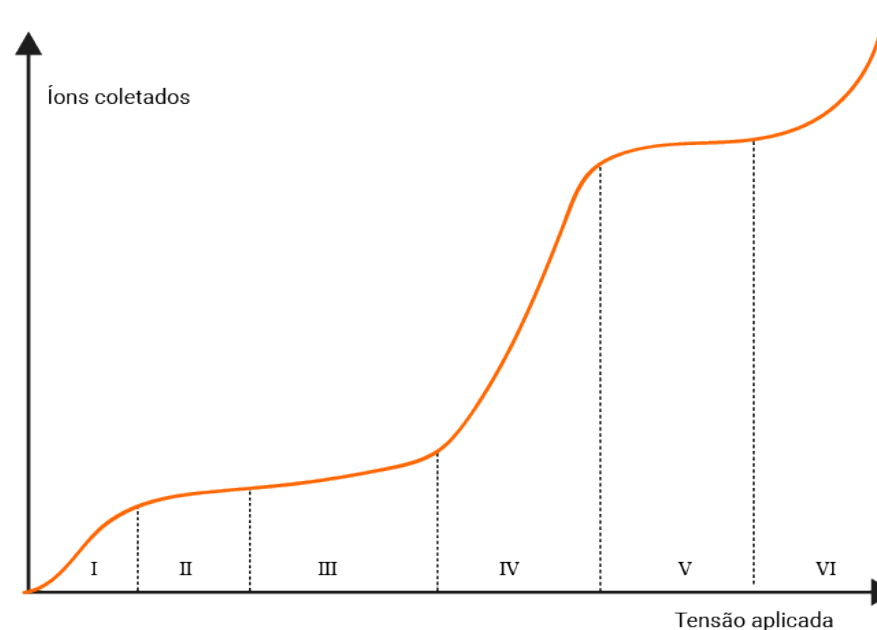
A coleta dos elétrons e dos íons positivos formados no volume sensível do detector é feita por meio de eletrodos que estabelecem campos elétricos e dispositivos apropriados e servem como uma medida da radiação incidente no detector.

Quando uma radiação interage com um gás, ionizando-o, os elétrons arrancados pertencem normalmente às últimas camadas, com energias de ligação da ordem de 10 a 20 eV. Como nem toda interação resulta em ionização e o elétron atingido nem sempre pertence à última camada, o valor da energia média para formação de um par de íons (W) em um gás varia em torno de 20 a 45 eV para os gases mais utilizados.

Nos detectores a gás, a carga gerada pelos pares de

íons é coletada por meio do campo elétrico criado de forma conveniente por um circuito elétrico. A carga, ao atingir o eletrodo, produz uma variação na carga do circuito, detectada e transformada em um sinal elétrico. Essa carga coletada no intervalo de tempo de medição corresponde a uma corrente, avaliada utilizando-se eletrômetros. O modo de operação que mede a corrente média gerada em um intervalo de tempo é denominado modo de operação tipo corrente.

REGIÕES DE OPERAÇÃO PARA DETECTORES A GÁS



A probabilidade de interação da radiação com o gás, resultando na formação de pares de íons, varia de acordo com o campo elétrico aplicado (ou diferença de potencial aplicada) ao gás dentro do volume sensível. Pode-se separar o intervalo de variação do campo elétrico em seis regiões, pelas características específicas de geração e coleta de carga.

A Região Inicial Não-proporcional (I) é a região onde os pares de íons são formados, mas como o campo elétrico é muito fraco, ocorre um processo de recombinação

dos íons e somente parte das cargas geradas é coletada. À medida que a diferença de potencial cresce, os íons são atraídos para os pólos elétricos e não têm condições de se recombinar. Nessa região é gerada uma carga, mas a amplitude do pulso pode variar sem proporcionalidade com a quantidade ou a energia da radiação incidente. Essa região não é conveniente para a operação de detectores.

Na Região de Saturação de Íons (II), após um determinado valor do campo elétrico todos os íons formados são coletados. O sinal é então proporcional à energia da radiação incidente. O valor do sinal permanece o mesmo para um intervalo de variação do campo elétrico. A coleta das cargas não traz nenhum processo adicional. Nessa região de campo elétrico é que operam os detectores tipo câmara de ionização.

Na Região Proporcional (III), com o aumento do campo elétrico, os elétrons acelerados têm energia suficiente para arrancar elétrons de outros átomos e, dessa forma, criar novos pares de íons. Ocorre então uma multiplicação, que é linearmente proporcional ao número de pares de íons gerados pela radiação primária. O sinal inicial é multiplicado por um fator de 10^2 a 10^4 vezes, dependendo do gás e da tensão aplicada. O sinal coletado na maioria das vezes precisa ser pouco amplificado, o que facilita seu processamento. Essa região é também chamada de região de proporcionalidade verdadeira, onde operam os detectores proporcionais.

O campo elétrico continua a aumentar na Região de Proporcionalidade Limitada (IV). A multiplicação do gás passa a sofrer efeitos não-lineares, contudo não guardando mais a relação de proporcionalidade com o número de pares de íons gerados inicialmente. Os elétrons criados pela multiplicação são rapidamente coletados no ânodo, enquanto que os íons positivos se movem mais lentamente para o cátodo. A concentração dessa nuvem de íons positivos tem como efeito criar uma carga espacial próxima ao cátodo, alterando a forma do campo elétrico no detector. Como as multiplicações subsequentes dependem do valor do campo elétrico surgem as não-linearidades que afetam a proporcionalidade. Nessa região os detectores não operam.

Se a voltagem aplicada for suficientemente alta, a carga espacial criada pelos íons positivos passa a ser tão grande que a perturbação que cria no campo elétrico interrompe o processo de multiplicação. Nesse caso o número de pares de íons criados passará a ser sempre da mesma ordem, independentemente do número de pares criados originalmente e, portanto, o sinal será independente da energia da radiação. Esta região é utilizada para operar os detectores do tipo Geiger-Müller, por isso é conhecida como Região Geiger-Müller (V).

A última região é a Região de Descarga Contínua (VI). Nela ocorre um aumento ainda maior no valor

do campo elétrico, ocasionando o surgimento de centelhas, não havendo mais relação com o número de íons formados. Nessa região não operam os detectores e, se operados nessa região, podem ser até mesmo danificados.

Câmaras de Ionização

A câmara de ionização opera na região de saturação de íons e para cada par de íons gerado pela partícula no interior do volume sensível do detector gasoso um sinal é coletado.

Apesar disso, a corrente coletada é muito baixa, normalmente da ordem de pico ampére (10^{-12} A), e precisam ser utilizados amplificadores para que o sinal possa ser convenientemente processado.

As câmaras de ionização trabalham normalmente no modo corrente e são capazes de medir diretamente a grandeza exposição, isso se convenientemente construídas e utilizando o ar como elemento gasoso.

Em função de sua grande estabilidade ao longo do tempo (da ordem de 0,1 % de variação ao longo de muitos anos), as câmaras de ionização são muito utilizadas também como instrumentos de referência para calibração, pois eliminam a necessidade de recalibrações frequentes.

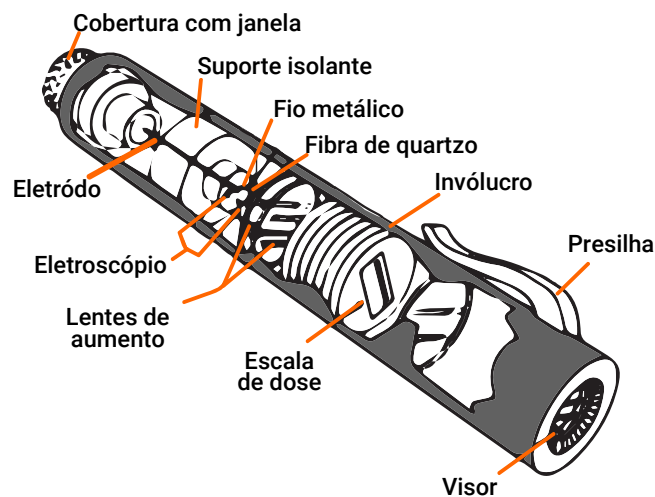
Alguns tipos de detectores especiais funcionam dentro do modo de câmara de ionização. Entre eles podem ser citados:

CÂMARA DE IONIZAÇÃO DE AR LIVRE (FREE AIR CHAMBRE)

Câmara de Ionização de Ar Livre é uma estrutura aberta para que o contato com radiação é medida diretamente no ar. O volume sensível do detector é menor que o do recipiente em que está contido. A camada de ar entre o volume sensível e as paredes da câmara faz com que o detector não sofra influência da interação da radiação com as paredes.

CANETA DOSIMÉTRICA

Caneta dosimétrica é uma câmara de ionização muito utilizada em monitoração pessoal. A caneta dosimétrica tem um fio de quartzo que serve como indicador de exposição ou dose acumulada.



O funcionamento da caneta dosimétrica se dá pelo entrega de uma carga elétrica máxima. Esta carga vai se esvaindo com o surgimento dos elétrons e íons formados pela radiação dentro do volume da câmara da caneta. Assim, o fio de quartzo vai se aproximando do eletrodo de carga de mesmo sinal e, pela lente, observa-se a leitura da exposição ou dose absorvida.

CÂMARA DE IONIZAÇÃO PORTÁTIL

Nada mais é do que uma câmara de ionização a ar ou gás sob pressão. Serve para medições de taxas de exposição; taxa de dose e dose acumulada; para radiações X e gama; e, às vezes, beta. É construída de material de baixo Z ou tecido-equivalente. É um equipamento reservado à medida da exposição ou taxa de exposição, bem como dose absorvida no ar. Com o uso de uma capa de material tecido-equivalente adicional de build-up, esta câmara permite determinar a dose absorvida no tecido ou mesmo a dose efetiva, dependendo da escala.

CÂMARA DE IONIZAÇÃO TIPO POÇO

Montada de forma que a fonte radioativa a ser medida possa ser introduzida no poço criando uma condição de eficiência de praticamente 100%. É muito utilizada na medição de atividade de fontes radioativas, na guarda dos fatores de

calibração em um laboratório nacional de calibração de radio-nuclídeos e na determinação da atividade de radiofármacos em clínicas de medicina nuclear.

Detectores Proporcionais

Os primeiros detectores proporcionais surgiram no início dos anos 1940.

Detector proporcional é um aparelho que opera quase sempre no modo pulso e se baseia no fenômeno de multiplicação de íons no gás para amplificar o número de íons originais criados pela radiação incidente.

Os pulsos originados são muitas vezes maiores do que aqueles das câmaras de ionização. Por esse motivo os detectores proporcionais são muito convenientes para as medições de radiação onde o número de pares de íons é muito pequeno para permitir uma operação satisfatória de uma câmara de ionização.

Uma das aplicações importantes de detectores proporcionais é a detecção e espectroscopia de raios X, elétrons de baixa energia e radiação alfa.

Os contadores proporcionais são também largamente apli-

cados na detecção de nêutrons, utilizando reações nucleares tipo (n, p) , (n, α) . O material que reage com os nêutrons é colocado dentro do proporcional, podendo ser o próprio gás de preenchimento.

O formato dos detectores proporcionais são cilíndricos. São assim porque para uma mesma tensão, o uso de fios finos como anodos pode criar campos elétricos muito maiores que se forem utilizados anodos em forma de placas.

Alguns tipos especiais de detectores proporcionais são de grande utilidade para usos específicos. Um deles é o detector 4π , onde a fonte é totalmente inserida dentro do volume sensível, o que permite uma eficiência de contagem de praticamente 100% para radiações de baixa energia (ordem de até dezenas de keV).

Detectores Geiger-Müller

Os detectores Geiger-Müller(GM) foram introduzidos em 1928 e, em função de sua simplicidade, baixo custo, facilidade de operação e manutenção, são utilizados até hoje.

Como apresenta o pulso de saída de igual amplitude, independentemente do número de íons iniciais, o detector GM funciona como um contador, não sendo capaz de

discriminar energias. Para cada partícula que interage com o volume sensível do detector, é criado um número da ordem de 10^9 a 10^{10} pares de íons.

Assim, a amplitude do pulso de saída formado no detector é da ordem de volt, o que permite simplificar a construção do detector, eliminando a necessidade de um pré-amplificador.

Para a contagem de partículas carregadas, a maior dificuldade é a sua absorção nas paredes do detector. Por esse motivo, são feitas janelas de material leve e fino, que permitem que elétrons e partículas α (alfa) penetrem no volume sensível do detector.

Para radiação γ (gama), a resposta do detector ocorre de forma mais indireta, através das interações da radiação incidente com as paredes do detector, gerando radiação secundária (normalmente elétrons) que vai interagir com o volume sensível do detector.

Normalmente os detectores GM não são utilizados para a detecção de nêutrons, em função da baixa seção de choque de interação dos gases comumente utilizados para nêutrons.

Além disso, detectores proporcionais têm geralmente melhor resposta e permitem a espectroscopia dessas partículas. Embora os GMs não tenham condições de medir nenhuma

grandeza radiológica e nem a energia das radiações, eles podem ser utilizados para estimar grandezas como dose e exposição, ou suas taxas, utilizando artifícios de instrumentação e metrologia. Nesse caso, são normalmente calibrados para uma energia determinada (por exemplo, a do ^{60}Co) e os valores dessas grandezas são calculados através da fluência.

Na maioria dos casos, suas escalas, por exemplo, para medição de dose absorvida ou taxa de dose absorvida, são construídas utilizando-se uma câmara de ionização que mede esta grandeza ou a sua taxa e, para cada ponto, substituída pelo GM, onde é anotado o valor da grandeza ou taxa.

No uso como monitores de área, são calibrados normalmente para taxa de exposição, mas sob certas circunstâncias (energias diferentes da utilizada para calibração ou campos mistos de radiação, por exemplo) suas leituras podem ter um erro de 2 a 3 vezes o valor real da medição.

Detectores a Cintilação

A utilização de materiais cintiladores para detecção de radiação é muito antiga e continua sendo uma das técnicas mais úteis para detecção e espectroscopia de radiações.

Alguns atributos são importantes para os materiais cintiladores. Tais como:

- Transformar toda energia cinética da radiação incidente ou dos produtos da interação em luz detectável;
- Produzir luz proporcional à energia depositada;
- Ser transparente ao comprimento de onda da luz visível que produz;
- Ter boa qualidade ótica, com índice de refração próximo ao do vidro (aprox. 1,5);
- Ser disponível em peças suficientemente grandes para servir para construção de detectores; e
- Ser facilmente moldável e/ou usável para construir geometrias adequadas de detectores.

Como era de se esperar, é difícil ter um material que reúna todas essas condições ideais, mas alguns materiais apresentam boas características para sua utilização.

Válvula fotomultiplicadora

Um dispositivo fundamental para a utilização dos detectores à cintilação é a fotomultiplicadora, que transforma os sinais luminosos produzidos pela radiação, usualmente muito fracos, em sinais elétricos com intensidade conveniente para serem processados em um sistema de contagem ou de espectroscopia.

Os dois elementos principais são o fotocátodo e a estrutura de multiplicação de elétrons. A função do fotocátodo, que é acoplado ao detector onde ocorre a cintilação (no caso, o cristal detector), é transformar em elétrons os sinais luminosos originados pela interação com a radiação.

Os fótons produzidos no cristal pela interação de uma partícula são pequenos (algumas centenas), conseqüentemente o número de elétrons gerados pelo fotocátodo também é muito pequeno. Por essa razão o número de elétrons produzidos originalmente pelos fótons no fotocátodo é então multiplicado pelo conjunto de dinodos adequadamente arranjados.

Cada dinodo funciona como um elemento de multiplicação: o elétron que sai do estágio anterior, é acelerado pelo dinodo seguinte, ganha energia, e ao colidir com a superfície do dinodo arranca um número maior de elétrons, que são

atraídos e acelerados para o próximo estágio e assim sucessivamente.

Um conjunto típico de dinodos consegue a multiplicação por um fator de 10^5 a 10^6 , com a produção de 10^7 a 10^9 elétrons, carga suficiente para gerar um pulso de tensão ao ser coletada no anodo da fotomultiplicadora. O fenômeno de multiplicação de elétrons é também conhecido como emissão secundária.

Materiais cintiladores

Iodeto de sódio, iodeto de céσιο, germanato de bismuto e sulfeto de zinco são os principais materiais cintiladores utilizados na monitoração de radioatividade.

O iodeto de sódio ativado com o tálio – NaI(Tl) – é um dos materiais mais utilizados devido tanto pelas suas características de resposta à radiação como também pela facilidade de obtenção do cristal em peças grandes e de se obter o cristal dopado com tálio. Além de sua capacidade de produção de luz visível, o NaI(Tl) responde linearmente num grande intervalo de energia para elétrons e raios γ (gama). O iodeto de sódio é um material altamente higroscópico, e para evitar sua deterioração pela umidade, é encapsulado, normalmente com alumínio. Com este encapsulamento o detector perde a capacidade de detectar elétrons, uma vez que estes não conseguem atravessá-lo.

Os detectores de NaI(Tl) são muito utilizados em laboratórios de pesquisa, compondo vários sistemas de calibração, sendo também utilizados como detectores e sondas portáteis em Proteção Radiológica. Como ele pode ser construído em vários formatos e dimensões, cristais de grandes dimensões são utilizados em gama-câmaras, em clínicas de medicina nuclear.

Já o iodeto de céσιο ativado com tálio ou com sódio – CsI(Tl) e CsI(Na) – tem como sua principal qualidade em relação ao iodeto de sódio, o maior coeficiente de absorção em relação à radiação gama. Tal qualidade permite a construção de detectores mais compactos. Além disso, tem grande resistência a choques e a vibrações, em função de ser mais maciço e assim pouco quebradiço.

O detector de germanato de bismuto ou BGO – $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ – tornou-se disponível no final dos anos 1970 e rapidamente passou a ser utilizado em um grande número de aplicações. A principal vantagem do BGO é sua alta densidade ($7,3 \text{ g/cm}^3$) e o elevado número atômico do bismuto. Isto faz dele o detector com maior probabilidade de interação por volume entre os mais comumente utilizados.

Outra característica do BGO é ser um cintilador inorgânico puro. Não necessita de um ativador para promover o processo de cintilação. Isso ocorre porque a luminescência está associada à transição ótica do Bi^{3+} . Comparado ao iodeto de sódio, tem, além disso, boas propriedades mecânicas e de resistência à umidade. As principais desvantagens do cristal de BGO são: sua baixa produção de luz, aproximadamente 10 a 20% daquela produzida em iguais condições pelo iodeto de sódio e seu custo, que é duas a três vezes o deste último.

Finalmente, o sulfeto de zinco ativado – $\text{ZnS}(\text{Ag})$. Trata-se

de um dos cintiladores inorgânicos mais antigos. Tem alta eficiência de cintilação, comparável à do $\text{NaI}(\text{Tl})$, mas só é disponível como pó policristalino, sendo seu uso limitado a telas finas, por ser opaco à luz, utilizadas principalmente para partículas α e íons pesados.

EMISSÃO DE LUZ EM MATERIAIS CINTILADORES ORGÂNICOS

Outra informação importante sobre os detectores de cintilação é a emissão de luz em materiais cintiladores inorgânicos.

O mecanismo de cintilação em materiais inorgânicos depende dos estados de energia definidos pela rede cristalina do material. Dentro dos materiais isolantes ou semicondutores, os elétrons têm disponíveis para ocupar somente algumas bandas discretas de energia. A banda de valência representa os elétrons que estão essencialmente ligados aos sítios da rede cristalina, enquanto que a banda de condução representa os elétrons que têm energia suficiente para migrar livremente através do cristal.

Existe uma banda de energia intermediária, denominada banda proibida, onde os elétrons não deveriam ser encontrados. Quando determinadas substâncias são introduzidas no cristal (ainda que em quantidades muito peque-

nas) são criados sítios especiais na rede cristalina dentro da chamada banda proibida.

Os elétrons da banda de valência ao receberem energia suficiente da radiação, ocupam os níveis de energia criados pela presença do ativador. Ao se desexcitarem e retornarem aos níveis de valência, os elétrons emitem a energia referente à diferença dos níveis, na forma de fótons, que são então propagados pela estrutura cristalina. A produção dos fótons é proporcional à energia da radiação e a eficiência de detecção irá variar com a radiação e com o material utilizado como cintilador.

CINTILADORES PLÁSTICOS

Os cintiladores plásticos tornaram-se uma forma extremamente útil de cintiladores orgânicos porque podem ser facilmente moldados e fabricados. O preço baixo e facilidade de fabricação tornaram sua escolha praticamente exclusiva quando se necessita de cintiladores sólidos de grande volume.

DETECTORES A CINTILAÇÃO LÍQUIDA

Uma solução cintiladora ou coquetel de cintilação é constituído por duas ou mais substâncias que possuem a função de produzir fótons. Tem comprimentos de onda adequados à máxima sensibilização do tubo fotomultiplicador utilizado e ao mesmo tempo servem de suporte de fonte para a amostra radioativa que se deseja medir.

Um coquetel de cintilação deve ser composto por frasco de cintilação, solvente e cintilador primário.

O frasco de cintilação possui a função de conter a solução cintiladora, assegurando-lhe estabilidade durante o tempo que for necessário. Deve ser mantido hermeticamente fechado.

O solvente é usualmente composto de hidrocarbonetos aromáticos com a finalidade de absorver a energia liberada pelas partículas, que por sua vez são transferidas para outras moléculas existentes no coquetel de cintilação, assim emitindo os fótons desejados.

O tolueno é o principal solvente utilizado por ter baixo ponto de solidificação, custo reduzido, fácil disponibilidade no mercado e elevado rendimento luminoso. O benzeno

não é utilizado porque possui um rendimento luminoso muito baixo e um ponto de solidificação elevado.

A função principal do cintilador primário é absorver a excitação das moléculas do solvente e emitir esta energia absorvida em forma de luz. Deve emitir fótons em grande quantidade, em curta duração e faixa de frequência adequada à máxima sensibilidade da fotomultiplicadora que estiver sendo utilizada; ser suficientemente solúvel nas condições de trabalho exigidas; e ser quimicamente estável, não reagindo com os outros componentes da solução.

As principais substâncias básicas usadas nos melhores cintiladores primários são as de natureza aromática, como bifenil, oxidiazol, naftaleno, oxazol e fenil.

DETECTORES UTILIZANDO MATERIAIS SEMI-CONDUTORES

Em materiais cristalinos, pode-se dizer, de forma simplificada, que há três bandas de energia em relação à condutividade de elétrons: a banda de valência, de energia mais baixa, onde os elétrons normalmente se encontram em um material não excitado; a banda de condução, por onde os elétrons normalmente migram, e uma banda proibida, que é uma região onde os elétrons não são permitidos popularem.

A largura em energia da banda proibida é o que caracteriza os materiais isolantes, os semicondutores e os condutores.

Quando a largura é muito grande (maior que 5 eV) os elétrons têm pouca possibilidade de alcançar a banda de condução e, portanto, o material oferece grande resistência à passagem de corrente; nesse caso o material é um isolante.

Quando a largura da banda é muito pequena, até mesmo a agitação térmica à temperatura ambiente faz com que os elétrons tenham energia para chegar à banda de condução, e nesse caso o material é um condutor.

Em alguns casos, a energia da banda proibida não é nem tão grande, nem tão pequena (é, por exemplo, da ordem de 1 eV), mas, em determinadas circunstâncias é possível fazer com que os elétrons alcancem a banda de condução e que o material se comporte como condutor; são materiais semicondutores.

Em um material, o número de elétrons é suficiente para preencher exatamente a banda de valência. Se o material é excitado com energia adequada, elétrons podem ser retirados da banda de valência e serem alçados à banda de condução. O elétron retirado provoca um desequilíbrio na carga da estrutura da banda de valência, que, pela ausência do elétron, pode ser representado como um buraco, com carga positiva. Da mesma forma que um campo elétrico

aplicado ao material pode fazer o elétron se mover na banda de condução, o buraco irá se mover no sentido oposto.

A passagem da radiação por um material semicondutor com estrutura de bandas provoca a criação de um grande número de pares elétrons-buracos ao longo da trajetória da partícula, que são coletados pelo campo elétrico aplicado ao material.

A energia média gasta para criar um par elétron-buraco é denominada energia de ionização e depende do tipo e energia da radiação incidente.

A principal vantagem dos semicondutores reside na pouca energia necessária para criar um par elétron-buraco (em torno de 3 eV para o germânio), quando comparada com aquela necessária à criação de um par de íons nos gases (em torno de 30 eV para um detector típico à gás).

O grande número de pares criados propicia duas vantagens aos detectores semicondutores sob ponto de vista de resolução: diminui a flutuação estatística e diminui a influência do ruído eletrônico, levando a uma melhor relação sinal-ruído.

Os detectores de diodo de silício constituem o principal tipo utilizado para partículas carregadas pesadas, como prótons, alfas e fragmentos de fissão. As principais vantagens dos detectores de diodo de silício são a resolução excepcional, a boa estabilidade, o excelente tempo de coleta de carga, a pos-

sibilidade de janelas extremamente finas e a simplicidade de operação. Os detectores de diodo de silício são normalmente de tamanho pequeno, da ordem de 1 a 5 cm² de área.

Os detectores de germânio dopado com lítio – Ge(Li) – foram largamente utilizados devido sua resolução na espectroscopia gama. No entanto têm sido substituídos, principalmente por causa das dificuldades operacionais, pois exigem que sejam mantidos em refrigeração à temperatura do nitrogênio líquido (770 K), mesmo quando não estão em funcionamento, para evitar danos em sua estrutura com a migração do lítio no material.

Os substitutos preferidos têm sido os detectores de germânio de alta pureza – HPGe – também denominados de germânio hiperpuros ou de germânio intrínseco. Estes apenas necessitam de refrigeração quando em funcionamento, podendo manter-se na temperatura ambiente pelo período de muitos dias. Tudo isso sem danos ou mudanças em suas condições.

Os detectores de germânio para espectroscopia gama são construídos geralmente na geometria cilíndrica ou coaxial, o que permite a obtenção de volumes maiores, necessários para espectrometria gama.

Os detectores de germânio constituem um dos tipos

mais utilizados em laboratórios para medição de emissores gama com baixa atividade e para identificação de radioisótopos presentes em materiais, em uma grande faixa de energia (alguns keV a 10 MeV). Alguns detectores podem identificar radiação de baixa energia do tipo raios X e radiação gama e são denominados de GMX.

Calibração de Detectores: rastreabilidade

Por causa das propriedades e efeitos biológicos das radiações ionizantes, os resultados das medições das chamadas grandezas radiológicas devem ser extremamente confiáveis. Esta credibilidade necessária é difícil de se obter. A quantidade de grandezas radiológicas utilizadas nas diversas aplicações das radiações ionizantes é grande. Também existe uma expressiva variedade de radiações e energias produzidas pelos vários radioisótopos e dispositivos geradores de radiações.

Os detectores que são utilizados em campo tendem a sofrer alterações em seu funcionamento e devem ser calibrados de tempos em tempos. A periodicidade da calibração de detectores é definida pelos órgãos reguladores. Tudo para manter suas propriedades de medição devidamente calibradas.

A calibração de detectores é feita comparando-se suas características de medição com aparelhos padrões nacionais, sob condições rigorosamente controladas. Essas condições são estabelecidas nos laboratórios da rede de calibração, os quais são rastreados ao sistema internacional de metrologia, por meio de calibrações frequentes dos padrões nacionais em relação aos internacionais, programas de comparação interlaboratorial e de manutenção de padrões.

Lembre-se: como a calibração de detectores é feita com feixes de radiação e energias especificados e padronizados, a utilização de um detector para condições diferentes daquelas em que foi calibrado só pode ser feita com a utilização de fatores de conversão adequados.

Incertezas Associadas às Medições

Em todas as medições de uma grandeza o resultado deve ser expresso pelo valor obtido, com sua respectiva unidade, acompanhado do valor da incerteza expressa com um determinado intervalo de confiança. Isto significa que, um resultado de medição sem a sua incerteza não possui valor e nem qualidade metrológica.

A origem da incerteza está acoplada à precisão dos equipamentos, repetitividade e reprodutibilidade das medições e, quando comparada com um padrão, à exatidão e rastreabilidade. As principais propriedades de um detector.

Para cada tipo de aparelho e aplicação técnica existe uma faixa apropriada ou aceitável do valor da incerteza da grandeza medida. Por exemplo, na determinação de uma taxa de dose efetiva em um programa de monitoração ambiental, um valor entre 10% e 20% já é considerado muito bom. Enquanto que em uma calibração absoluta da Atividade, com valor de 0,5%, o valor de incerteza é considerado elevado para determinados

radionuclídeos.

Assim, em todas as medições, principalmente as mais complexas e importantes, além dos registros dos valores das medições, uma planilha contendo os diversos componentes de incerteza, com seus respectivos valores, deve estar sempre acompanhada de seus devidos resultados.

Além das incertezas determinadas para cada “ponto” de medição, existem as contribuições das incertezas devidas aos ajustes, extrapolações e interpolações, com inclusão das incertezas experimentais, propostos pelos métodos de medição utilizados.

Para determinar, propagar, classificar e compor os diversos tipos de incerteza, os operadores devem seguir os procedimentos do Guia para a Expressão da Incerteza de Medição estabelecido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) no Brasil, após padronização internacional pela *International Organization for Standardization (ISO)*, na publicação *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* em 1995.

Mercado de Trabalho em Radioproteção

Como vimos ao longo de todo Guia, a proteção radiológica atua em diversas áreas. Cada uma tem profissionais específicos. Agora chegou a vez de falar dos principais ramos de atuação e principalmente do mercado de trabalho em radioproteção.

Radiografia Industrial

Existem diversas aplicações das radiações ionizantes no setor industrial. Seja em radiografia industrial, em medidores nucleares, na irradiação industrial, entre outras. Para se trabalhar nestas áreas é necessário ter conhecimentos teóricos e práticos de proteção radiológica.

As áreas de Radiografia Industrial, Inspeção de cargas e contêineres precisam de profissionais com conhecimentos em radioproteção. Os profissionais ideais são os técnicos e tecnólogos em radiologia.

A área de atuação de técnicos e tecnólogos com conhecimentos de proteção radiológica é bastante vasta. Os setores que mais se destacam são o petroquímico e petrolífero, metalúrgico, automotivo, mineração, papel e celulose, siderúrgico, bélico, naval, segurança em portos e fronteiras, eletromecânico, entre outros.

Os tecnólogos em radiologia ainda podem atuar como supervisores de radioproteção em serviços de proteção radiológica em instalações radiativas que atuam nas práticas de medidores nucleares, irradiação industrial, técnicas analíticas ou serviços de manutenção de equipamentos de raios X.

O profissional precisa conhecer os fundamentos da física atômica e nuclear; princípios de dosimetria e radioproteção; equipamentos de radiografia industrial; normas da CNEN; e as várias aplicações das radiações ionizantes no setor industrial.

Existem cursos específicos de Proteção Radiológica em Radiografia Industrial e Proteção Radiológica em Aplicações Industriais. O curso de Proteção Radiológica em Radiografia Industrial prepara o Técnico ou Tecnólogo em Radiologia para atuar em Radiografia Industrial. Já o curso de Proteção Radiológica em Aplicações Industriais habilita o profissional para atuar como Técnico de Radioproteção (Técnico em Radiologia) ou Supervisor de Radioproteção Substituto (Tecnólogo em Radiologia) em outras Aplicações Industriais.

Supervisor de Radioproteção

O supervisor de radioproteção é o profissional que possui conhecimentos de proteção radiológica para a elaboração do plano de radioproteção, implantação do serviço de radioproteção e trabalho seguro envolvendo as radiações ionizantes em empresas que executam serviços com fontes radioativas e aparelhos de raios X industriais.

A qualificação deste profissional passa pela aprovação em avaliação junto ao CNEN. Trata-se de uma especialização, por isso quem deseja se tornar um supervisor de radioproteção deve possuir o diploma de curso superior de graduação (Bacharelado, Tecnólogo ou Licenciatura) reconhecido pelo MEC (Ministério da Educação) nas áreas tecnológica, biomédica ou científica, com formação acadêmica compatível com a área pretendida.

Os profissionais mais adequados à almejar a carreira de supervisor em proteção radiológica são técnicos em radioproteção ou segurança do trabalho e engenheiros de segurança do trabalho ou radioproteção.

O mais comum é que os profissionais de segurança do trabalho se especializem em supervisão de radioproteção.

Engenheiro de Radioproteção

Não se deve confundir as funções de um supervisor de radioproteção com a elaboração de laudos técnicos e execução de serviços de engenharia, que servem de fundamento para as atividades de um Serviço de Proteção Radiológica. O engenheiro é profissional essencial para a proteção dos trabalhadores e da sociedade.

Por exemplo: não incluir o engenheiro de segurança do trabalho pode levar a segregação entre o Serviço de Radioproteção e o SESMT (Serviço Especializado em Engenharia de Segurança e em Medicina do Trabalho). Consequentemente pode resultar em processos judiciais caros e desnecessários. Não incluir o engenheiro eletricitista pode significar métodos de mensuração e avaliação inapropriados no controle de qualidade de equipamentos eletro-médicos emissores de raios X, com conclusões falaciosas e maior dose para o IOE e o paciente. Indispensável, portanto, o trabalho do engenheiro.

Todos estes serviços derivam de atribuições garantidas por lei federal, porém o engenheiro, constantemente e em detrimento da sociedade, necessita prestar esclarecimentos a algumas autoridades, ou mesmo entrar na justiça, para fazer valer o direito de exercer sua profissão em Proteção Radiológica.

Segurança do Trabalho

O mercado de Segurança do trabalho é bastante vasto. A Classificação Brasileira de Ocupações(CBO) elaborada e atualizada pelo Ministério do Trabalho e Emprego(MTE) aponta vários profissionais que atuam no âmbito da Segurança do Trabalho.

A CBO traz as ocupações de Engenheiro de produção, Engenheiro de organização e métodos, Engenheiro de organização industrial, Engenheiro de planejamento industrial, Engenheiro de processamento, Engenheiro de processos, Engenheiro de controle de qualidade Engenheiro de qualidade, Especialista em controle de qualidade e planejamento, Planejador de controle de qualidade, Engenheiro de segurança do trabalho, Engenheiro de segurança industrial, Engenheiro de riscos, Engenheiro de tempos e movimentos, Engenheiro de análise de trabalho, Tecnólogo em produção industrial, Tecnólogo em gestão dos processos produtivos do vestuário, Tecnólogo em produção de vestuário, Tecnólogo em produção gráfica, Tecnólogo em produção joalheira, Tecnólogo em produção moveleira, Tecnólogo em segurança do trabalho, Higienista ocupacional e Higienista industrial.

A descrição da atividade pela CBO traz que o profissional de segurança do trabalho deve controlar perdas de processos, produtos e serviços ao identificar; determinar e analisar causas de perdas, estabelecendo plano de ações preventivas e corretivas; desenvolver, testar e supervi-

sionar sistemas, processos e métodos produtivos; gerenciar atividades de segurança no trabalho e do meio ambiente; gerenciar exposições a fatores ocupacionais de risco à saúde do trabalhador; planejar empreendimentos e atividades produtivas; coordenar equipes; realizar treinamentos e atividades de trabalho.

As principais funções em Segurança do Trabalho relacionadas à Proteção Radiológica são aquelas realizadas pelos técnicos em segurança do trabalho, tecnólogos em segurança do trabalho e engenheiros em segurança do trabalho. Respetivamente, tratam-se de cursos técnico, superior técnico e superior. Todos esses profissionais estão inseridos no Plano de Proteção Radiológica.

Técnico em Segurança do Trabalho

O técnico em segurança do trabalho é uma profissão em alta. Além de ser um dos cursos mais procurados no Sistema de Seleção Unificada da Educação Profissional e Tecnológica (Sisutec). O mercado continua aquecido e a maioria dos alunos termina o curso técnico já com emprego ou estágio garantido.

O salário do técnico em segurança do trabalho, que pode chegar a mais de R\$ 6.000 e a curta duração do curso (menos de dois anos), também são alguns dos atrativos dessa carreira profissional.

De acordo com o Catálogo Nacional de Cursos Técnicos, publicado pelo MEC, as principais funções de um técnico em segurança do trabalho são:

- Investigar, analisar e recomendar medidas de prevenção e controle de acidentes;
- Executar programas de prevenção de riscos ambientais;
- Desenvolver ações educativas na área de saúde e segurança do trabalho;
- Orientar o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) e Equipamentos de Proteção Coletiva (EPC).

é definido pelos sindicatos da categoria e pode variar de acordo com a cidade ou estado e o setor de atuação.

Alguns sindicatos estabelecem pisos salariais diferenciados para técnicos em segurança do trabalho que atuam em offshore, hospitais, engenharia, comércio, construção civil e indústria.

Engenheiro de Segurança do Trabalho

A engenharia de segurança do trabalho é uma área exigida em praticamente todas as indústrias e empresas em geral, o que cria um mercado bastante amplo. Para garantir a qualidade dos profissionais, entretanto, é preciso que os engenheiros e arquitetos dessa área tenham especialização específica, o que só pode ser conseguido com uma pós-graduação.

A lei 7.410/85 estabelece que somente profissionais habilitados e registrados no CREA (Conselho Regional de Engenharia e Agronomia) ou no CAU (Conselho de Arquitetura e Urbanismo) e com comprovação de especialização na área podem desempenhar a atividade.

Dentre outras atribuições especificadas na Resolução 359/91 da CONFEA (Conselho Federal de Engenharia e Agronomia), a atividade do engenheiro de segurança do trabalho consiste em:

- Gerenciar e promover a segurança;
- Realizar vistorias e manutenções diversas;
- Desenvolver programas e ações efetivas para a segurança dos trabalhadores
- Coordenar a Comissão Interna de Prevenção de Acidentes (CIPA);

- Oferecer treinamentos, dar palestras diversas e coordenar os programas exigidos pela legislação, como PPRA (Programa de Prevenção de Riscos Ambientais), PCM-SO (Programa de Controle Médico de Saúde Ocupacional), PCMAT (Programa de Condições e Meio Ambiente do Trabalho na Indústria da Construção), entre outros.

O engenheiro de segurança do trabalho é habilitado para realizar todas as tarefas do técnico de segurança do trabalho, mas o contrário não. Os laudos técnicos e pareceres finais, por exemplo, só podem ser emitidos e assinados por um engenheiro de segurança do trabalho responsável.

Média Salarial em Segurança do Trabalho

De acordo com pesquisa salarial do site de empregos Catho, um coordenador de segurança do trabalho pode ganhar até R\$ 8.500. Veja a média salarial nacional para alguns cargos relacionados à área de segurança do trabalho:

Estágio em Segurança do Trabalho: R\$ 860
Auxiliar Técnico em Segurança do Trabalho: R\$ 1.374
Assistente em Segurança do Trabalho: R\$ 1.523
Professor de Segurança do Trabalho: R\$ 1.414
Analista de Segurança do Trabalho: R\$ 2.977
Técnico em Segurança do Trabalho: R\$ 2.611
Analista de Qualidade, Segurança, Meio Ambiente e Saúde: R\$ 2.777
Supervisor de Segurança do Trabalho: R\$ 4.152
Coordenador de Segurança do Trabalho: R\$ 4.869
Coordenador de Saúde, Segurança e Meio Ambiente: R\$ 7.042

De acordo com a Federação Nacional dos Técnicos em Segurança do Trabalho, existem 339.559 profissionais cadastrados no Brasil.

Curso Superior de Segurança do Trabalho

Para técnicos em Segurança do Trabalho que pretendem turbinar a carreira e para interessados em ingressar nesse mercado com um diploma de nível superior, existe o curso de Tecnólogo em Segurança no Trabalho.

Conheça algumas instituições autorizadas pelo MEC a oferecer o curso superior de Tecnologia em Segurança do Trabalho.

Universidade Norte do Paraná(UNOPAR)
Universidade Estácio de Sá(UNESA)
Universidade Cidade de São Paulo(UNICID)
Universidade Cruzeiro do Sul(UNICSUL)
Faculdade Unime(UNIME) – BA
Faculdade Pitágoras(PITÁGORAS) – MG

FONTES

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear
Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
IAEA – International Atomic Energy Agency
UNEP – United Environment Programme
UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

Quer fazer sua Radioproteção com a LinceRadio?

Fale agora com um consultor

Estamos ajudando a construir um Brasil onde a segurança das pessoas e a operação eficiente das instalações industriais são dois lados da mesma moeda.

Da burocracia documental até a execução dos serviços obrigatórios, descomplicamos sua relação com a Radioproteção e exigências regulatórias da CNEN.

A Lince Radioproteção é resultado de mais de 30 anos de experiência do grupo Lince na fabricação e operação de fontes radioativas, sem qualquer acidente ou autuação pela CNEN. É esse modelo de gestão que levamos à sua empresa.

Para empresas que levam a sério a segurança e saúde de seus funcionários, somos a maior e melhor empresa de Radioproteção do Brasil.

Visite nosso site e conheça nossas soluções customizadas para a sua operação.

