

EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO -DOSIMETRIA

A Quem Interessa a Dosimetria?

A avaliação de dose é objeto de interesse de vários profissionais e instituições, a saber:

- **Pesquisadores:** Que no desenho de uma nova investigação experimental desejam prever a dose proveniente de eventuais contaminações dos participantes da equipe experimental e dos pacientes que se submeterão às experiências com a incorporação e exposição de substâncias radioativas;
- **Comissões de Ética Profissional:** Formadas no âmbito de hospitais, universidades, institutos de pesquisas e do Ministério da Saúde com a finalidade de avaliar o cumprimento das regras da ética profissional nos projetos de pesquisas que utilizam substâncias radioativas e em função de suas conclusões aprovar ou desaconselhar o projeto. Uma das funções das comissões de ética profissional é elaborar e conferir as projeções das probabilidades de contaminação de trabalhadores, elementos do público e do meio ambiente.;
- **Médicos Nucleares:** Responsáveis por pacientes que incorporam material radioativo intencionalmente durante a realização de exames ou radioisotopoterapia^a e acidentalmente. Neste último caso o conhecimento do nível de dose do paciente indicará a conduta clínica do tratamento, por exemplo: a sugestão para ser efetuada um transplante de medula;
- **Serviços de Proteção Radiológica:** Utilizam a metodologia de cálculos dosimétricos para estimar a dose em trabalhadores, nos elementos do público e da própria população que acidentalmente possam ser contaminados com material radioativo derivado das atividades da instituição a que pertencem. Com esses dados orientam a direção da instituição a fim de cumprir as normas legais do uso de materiais radioativos mantendo os riscos operacionais tão baixos quanto possivelmente exequíveis.
- **Ambientalistas:** que avaliam o impacto produzido no meio ambiente pela liberação dos materiais radioativos (acidental^b ou intencional^c) e sua subsequente incorporação pelos elementos do ecossistema, principalmente pelo homem;
- **Peritos Forenses:** em causas judiciais relacionadas com idenizações e reclamações trabalhistas relacionadas com a negligência de empregadores no tocante às normas de radioproteção. Nesses casos o juiz poderá solicitar relatórios de peritos para averiguar a procedência, ou não, da ocorrência de exposição por dose interna (e externa) por parte do(s) reclamante(s).

A facilidade em efetuar a medida da radioatividade com precisão, sensibilidade e permitindo visualizar sua distribuição espacial nos vários compartimentos orgânicos faz dos

^a O termo radioisotopoterapia será utilizado para designar a técnica terapêutica que utiliza a incorporação por via injeção, ingestão ou inalação de uma substância radioativa para se obter a cura. O ¹³¹I, por exemplo, é utilizado para destruir o tecido da tireóide. Neste caso particular essa técnica é conhecida como radioiodoterapia.

^b Acidentes com reatores nucleares, irradiadores industriais e outros semelhantes ao acidente de Goiânia.

^c Experimentos bélicos - bombas atômicas.

traçadores radioativos um potente instrumento de investigação científica. Os radioisótopos são amplamente utilizados na Medicina Nuclear, nos estudos de: **bioquímica, nutrição, fisiologia** e na **biologia em geral**. Uma importante vantagem da utilização dos traçadores radioativos é poder acompanhar todos os processos físico-químicos e metabólicos de um sistema sem alterar a sua dinâmica^a. Outra de suas características é poder discriminar substâncias em baixíssimas concentrações, por exemplo, na incorporação de timidina no DNA.

Com tantas potencialidades as fontes radioativas estão incluídas hoje numa das principais ferramentas da investigação científica e dos processos de controle industrial. Entretanto, o uso dos radioisótopos exige algumas precauções que devem ser consideradas quanto a sua manipulação e guarda.

A radiação nuclear ao interagir com moléculas da estrutura celular dissipa sua energia e provoca danos que podem comprometer o estado de saúde de quem se expõe à radiação. Por essa razão deve-se ter conhecimento desses riscos e assim projetar o seu uso de modo seguro e otimizado.

Efeitos Estocásticos das Radiações.

Dados provenientes da irradiação de animais e do homem - das aplicações da radioterapia, dos acidentes nucleares ou da contaminação devido à ocupação profissional - mostram que as radiações podem produzir alterações gênicas e cromossômicas que aumentam a taxa de mutações nas próximas gerações e podem gerar câncer. Estes efeitos da radiação podem ser produzidos independentemente do nível da dose, isto é, são efeitos probabilísticos: podem ou não ocorrer e são tratados no campo da estatística.

Efeitos Somáticos das Radiações.

Outro aspecto das radiações é podem além de gerar mutações (efeito em outro ser) podem também apresentar feitos no soma (corpo), isto é, quando ocorre no tecido somático e não são transmitidas à descendência dos indivíduos irradiados. O câncer, a leucemia, eritemas e quistos servem como exemplos de efeitos somáticos das radiações..

Efeitos Não Estocásticos das Radiações.

Doses relativamente elevadas provocam efeitos clínicos mensuráveis no corpo. Por exemplo, doses de corpo inteiro acima de 3 Sv levam o paciente a apresentar vômitos, leucopenia severa, púrpura, hemorragia, infecção e epilação. Esses efeitos são denominados de efeitos não estocásticos, isto é, vão ocorrer quase que certamente.

Efeitos Deletérios das Radiações.

Em geral os efeitos produzidos pela radiação ionizante são de natureza deletéria, podendo provocar malformações congênicas, esterilidade, reduzir a fertilidade, provocar câncer, leucemia, catarata, acelerar o envelhecimento e causar a morte. Os riscos genéticos e somáticos associados

^a A quantidade relativa típica dos traçadores é da ordem de 10^{-9} em relação à substância teste.

às radiações ionizantes mostram que os efeitos produzidos são dependentes dos fatores discutidos a seguir:

Dose Absorvida. O Gray (Gy)

O efeito deletério das radiações está relacionado com a razão entre a quantidade de energia (Joules) da radiação transferida ao tecido e sua massa (kg). A razão entre a energia E (Joules) depositada numa massa m (kg) é denominada de **dose absorvida**, simbolizada por D , tendo no Sistema Internacional de Pesos e Medidas a dimensão de **Joules/kg**. Em função das características peculiares dos fenômenos da radiação, por exemplo a aleatoriedade da emissão das radiações, o Sistema Internacional dotou o conceito de dose absorvida de uma unidade especial associando: **1 Gray \equiv 1 Joule/kg**, ou abreviadamente, **1 Gy \equiv 1 J/kg**. O conceito de dose absorvida é estritamente físico e não permite inferir exatamente os efeitos biológicos que advem da energia absorvida.

Dose Equivalente - Associação de Parâmetros Físicos e Biológicos.

O Efeito da Taxa de Dose - Espaçamento da Irradiação no Tempo

O efeito biológico de duas doses de mesma intensidade, porém submetidas ao paciente diferentemente no tempo (agudamente ou espaçada no tempo) pode produzir efeitos diferenciados se administradas de forma crônica ou aguda.

As células germinativas quando irradiadas com doses crônicas (espaçadas ao longo do tempo) produzem menor taxa de mutação comparativamente quando são irradiadas com a mesma dose, mas de forma instantânea (dose aguda).

Qualidade da radiação

A intensidade dos efeitos deletérios das radiações ionizantes depende da sua energia, da sua estrutura particulada ou eletromagnética, da sua massa ou da carga e depende principalmente do rendimento de transferência da energia por milímetro de percurso (LET) no tecido orgânico. Radiações eletromagnéticas como os Raios X e os raios γ são pouco eficientes para transferir suas energias para o tecido, sendo por isso menos mutagênicos que a radiação α . Esta mostra alta eficiência na transferência da energia para os compostos orgânicos. O fator de qualidade Q para cada tipo de radiação em função da intensidade de transferência linear de energia (LET) é mostrado na Tabela 1. Quando o espectro de energia é complexo ou não se conhece as características do LET da radiação os técnicos da Comissão Internacional de Radiodosimetria e Proteção^(ICRP n° 26) recomendam utilizar o valor de Q mostrado na Tabela 2. Devido as dificuldades de se avaliar o LET das radiações costuma-se utilizar diretamente os valores de Q obedecendo diretamente os valores contidos na Tabela 2. Praticamente todos os radioisótopos utilizados nos experimentos da Medicina Nuclear e nos estudos biológicos são emissores de radiação beta ou gama e assim o valor de $Q = 1$ com exceção do ^3H (trício). A rotina MIRD (opção **I** do programa AnaComp™) segue esse critério utilizando o $Q = 1$ no cálculo da dose equivalente dos 72 radioisótopos disponíveis.

DOSE (Sv)	0 a 1Sv SUBCLÍNICA	1 A 10 Sv - TERAPÊUTICA			> 10 Sv - LETAL	
		1 a 2 Sv	2 a 6 Sv	6 a 10 Sv	10 a 50 Sv	> 50 Sv
VÔMITOS	Não	1Sv→ 5% 2Sv→ 50%	3Sv→100%	100%	100%	
LATÊNCIA	-	3 h	2 h	1 h	30min	
TECIDO CRÍTICO	-		•Hematopoiético		Gastrointestinal	Nervoso Central
SINAIS	-	•Leucopenia moderada	•Leucopenia severa •Púrpura •Hemorragia •Infecção •Epilação		•Diarréia •Febre •Distúrbio •Eletrolítico	•Convulsão •Tremores •Letargia
PERÍODO CRÍTICO	-	-	4 a 6 semanas		5 a 14 dias	1 a 48 horas
TERAPIA	-	•Hemograma	•Transfusão •Antibiótico	•Transplante da medula	•Cuidar do equilíbrio eletrolítico	•Sedativos
PROGNÓSTICO	Excelente	Excelente	Bom	Incertezas	Sem esperança	
CONVALESCÊNCIA	-	Semanas	1 a 12meses	Longo	-	
% MORTE	-	-	0 a 80%	80 a 100%	90 a 100%	
MORTE EM:	-		2 meses		2 semanas	2 dias
CAUSA MORTIS	-		•Hemorragia, •Infecção		•Colapso circulatório	•Parada respiratória •Edema cerebral

Tabela 1 - Valores do fator de qualidade da radiação, para a água, em função da transferência linear de energia (LET)

LET (Transferência Linear de Energia, na água) (keV/μm)					
	< 3,5			1	
3,5	a	7	1	a	2
7	a	23	2	a	5
23	a	53	5	a	10
53	a	175	10	a	20

Tabela 2 - Valores do fator de qualidade Q sugerida para ser utilizados pela ICRP e ICRU

TIPO DE RADIAÇÃO	FATOR DE QUALIDADE Q	
	ICRP n° 26	ICRU n° 40
Raios γ e X	1	1
Elétrons e partículas β com energia ≥ 30 keV	1	1
Elétrons e partículas β com energia < 30 keV	1	
Partículas β do Trício (³ H)		2
Neutrons		25
Neutrons Térmicos	2,3	
Neutrons rápidos rápidos e prótons	10	
Prótons e Íons Pesados		25
Íons Pesados	20	25
Partículas α	20	25

ICRP International Comision on Radiological Protection, publicação n° 26

ICRU International Comision on Radiation Unit and Measurement, publicação n° 40

Radiosensibilidade das Células

Os efeitos das radiações sobre um organismo dependem do tipo das células irradiadas, como também do estágio do desenvolvimento celular. Há células mais sensíveis às radiações do que outras. Os espermatozóides quando irradiados com a mesma dose fornecida a espermatogônias e oócitos apresentam maior capacidade de reparação do material genético danificado, em contrapartida, as espermatogônias tem capacidade intermediária e os espermatozóides praticamente não conseguem reparar os danos produzidos pelas partículas ionizantes.

As diferenças de radiosensibilidade entre diferentes células segue a lei de **Bergonie** e **Tribondeau** a qual prevê que: **A radiosensibilidade das células é diretamente proporcional a sua capacidade de reprodução e inversamente proporcional ao seu grau de especialização.**

Genericamente pode-se prever que todos os fatores que contribuem para aumentar a velocidade das reações químicas no interior das células também irão contribuir para o aumentar a

radiosensibilidade celular, por exemplo: o calor, o pH, a concentração de reagentes específicos (O_2). Esquemáticamente, a radiosensibilidade celular poderá ser representada por:

$$\text{Radiosensibilidade} \propto \frac{\text{Capacidade de Reproducao} \cdot f(^{\circ}\text{C}, \text{pH}, [O_2], \dots)}{\text{Especializacao}}$$

onde $f(^{\circ}\text{C}, \text{pH}, [O_2], \dots)$ é uma função dos componentes que contribuem no aumento das reações químicas no interior das células.

Dose e Seu Efeito Relacionado ao Sexo e a Idade

As mutações induzidas pelas radiações apresentam efeitos diferentes dependendo do sexo do indivíduo. A irradiação de homens poderá provocar um aumento na proporção sexual secundária entre seus filhos e a irradiação de mulheres poderá provocar uma variação no sentido inverso. Essas diferenças são explicadas pela produção de mutações letais no cromossoma X, que em homens irradiados tende a ser dominante causando maior mortalidade de filhas. Por outro lado, em mulheres, as mutações são geralmente recessivas e assim tendem a viabilizar principalmente fetos masculinos. Os efeitos produzidos por radiações ionizantes também dependem do estágio de desenvolvimento do organismo ou da sua idade.

A ação da radiação sobre os embriões e fetos pode causar aborto, natimortalidade, processos teratogênicos e malformações congênitas, como a microcefalia e a anecefalia (ausência de cérebro).

Em indivíduos jovens e adultos poderá provocar uma série de patologias com conseqüências imediatas para o indivíduo, como também reduzir a taxa de fertilidade devido a mutações letais em células de linhagem germinativa.

A Capacidade Diferenciada das Radiações Transferirem sua Energia - O LET

Há um esforço em estimar o efeito deletério das radiações por meio de uma fórmula contendo fatores físicos e biológicos. Entretanto, os fenômenos biológicos são muito complexos para que seus parâmetros participem de uma fórmula matemática que seja simples e capaz de prever os efeitos biológicos da deposição da energia no tecido.

Dentre os parâmetros que interferem na intensidade do efeito deletério da radiação sabe-se que os diferentes tipos de radiações (α , β , γ , X) durante o seu trajeto no tecido produzem ions e excitações nos orbitais eletrônicos e que são responsáveis pela geração de danos no tecido.

Comparadas entre si, cada tipo de radiação mostra diferenças na capacidade de produzir ions e excitações no tecido durante a sua trajetória no mesmo. A quantidade de ions por milímetro percorrido gerados pela radiação é uma função complexa em relação a cada tipo de radiação e do nível de energia E(eV). Para relacionar a quantidade de ions produzidos por milímetros percorridos pela radiação utiliza-se o parâmetro

$$LET^a \propto N^{\circ} \text{ Ions/mm} = -dE/dx$$

^aLET sinónímia de trasferência linear de energia, termo originado da abreviação inglesa *Linear Energy Transference*. Será mantido no presente texto a abreviação de origem inglesa por se tratar de um jargão.

onde dE/dx é a taxa da perda de energia por espaço percorrido (milímetros). Maior detalhamento da expressão matemática do LET foge ao escopo deste texto. Este detalhamento é encontrado nos textos de Física que tratam da interação da radiação com a matéria. Entretanto, para uma adequada compreensão dos princípios do cálculo de dose interna é suficiente saber que:

$$LET \text{ para partículas } \alpha > LET \text{ para partículas } \beta > LET \text{ para fotons } \gamma \text{ ou } X$$

ou seja, para as radiações α , β , γ e X , com níveis semelhantes de energia, as partículas α produzem mais ionizações por milímetro do que as partículas β e finalmente as radiações eletromagnéticas γ e X são relativamente menos ionizantes.

Os estudos da medicina orto-molecular tem mostrado que os radicais livres produzidos no interior das células, quando em excesso, são danosos à saúde. Os radicais livres estão associados à indução de cancer, diminuição da resistência imunológica e ao envelhecimento precoce do corpo e seus sintomas. Finalmente, estaria a radiação associada aos radicais livres?

Interação da Radiação nos Tecidos e a Produção de Radicais Livres

A ação deletéria da radiação sobre as células ocorre predominantemente por processos indiretos ^{Butler}, ou seja, não é o impacto direto da radiação que danifica a célula mas sim os produtos tóxicos gerados secundariamente no seu interior. Sendo a água o principal constituinte do corpo humano e da célula, correspondendo a aproximadamente 3/4 da massa corpórea, é nesse compartimento onde ocorre a maior quantidade das interações primárias da radiação. Quando a radiação interage com moléculas da água é desencadeada uma série de fenômenos físico-químicos que geram os radicais livres ionizados e energeticamente excitados (spins elevados a níveis singletos e tripletos) os quais produzem os danos celulares irreparáveis.

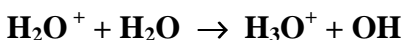
A radiação interage inicialmente por processos físicos com os átomos dos tecidos orgânicos e na sequência ocorre a transferência da energia da radiação para os constituintes do corpo. A Tabela 2 ilustra as principais ocorrências dos fenômenos de interação, sua escala de tempo de ação e as possíveis ações para minimizar os efeitos deletérios produzidos.

A sequência de eventos da interação da radiação com a água pode ser esquematizada como segue:

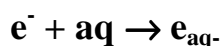
(1) moléculas de água são ionizadas;



(2) o radical H_2O^+ reage com outra molécula de água;



(3) o elétron e^- forma o elétron solvatado ou aquoso;



Mecanismos de Ação das Radiações.

TEMPO	FENÔMENO	EVENTO
10^{-16} a 10^{-12} seg	Físico	Absorção de energia
10^{-8} a 10^{-4} seg	Físicoquímico	Degradação da Energia
10^{-4} seg a várias horas	Químicos	<p>Direto</p> <p>Alterações Químicas</p> <p>Indireto</p> <p>H₂O radicais</p> <p>Moléculas das células</p>
Minutos - horas	Nível Celulas (Metabolismo)	<p>Metabólicas</p> <p>Defeitos Genéticos (DNA)</p> <p>Alterações De Funções</p> <p>Morte Intergase</p> <p>Morte Reprodução</p>
Horas - Dias	Organismo	Síndromes Clínicas
Dias - Meses		<p>Recuperação</p> <p>Danos Permanentes</p> <p>Morte</p>

Radiólise da Água e seus Efeitos

REAÇÕES PRIMÁRIAS:

$\text{H}_2\text{O} + $  $\rightarrow \{$	$\text{H}_2\text{O}^* \rightarrow \text{H} + \text{OH}$
	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{e}^- \rightarrow \text{e}_{\text{th}}^- + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{e}_{\text{aq}}^-$
	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}$

REAÇÕES SECUNDÁRIAS

:	PRODUTOS	CONSTANTE DE REAÇÃO k ($\text{dm}^3 \text{mol}^{-1} \text{s}^{-1}$)
$\text{H}_{\text{aq}}^+ + \text{OH}_{\text{aq}}^-$	$\rightarrow \text{H}_2\text{O}$	1.4×10^{11}
$\text{H} + \text{H}$	$\rightarrow \text{H}_2$	1.0×10^{10}
$\text{H} + \text{OH}$	$\rightarrow \text{H}_2\text{O}$	2.0×10^{10}
$\text{H} + \text{e}_{\text{aq}}^-$	$\rightarrow \text{H}_2 + \text{OH}_{\text{aq}}^-$	2.5×10^{10}
$\text{OH} + \text{OH}$	$\rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	6×10^9
$\text{e}_{\text{aq}}^- + \text{e}_{\text{aq}}^-$	$\rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}_{\text{aq}}^-$	2.5×10^{10}
$\text{H} + \text{OH}_{\text{aq}}^-$	$\rightarrow \text{e}_{\text{aq}}^-$	2.5×10^7

NA PRESENÇA DE O_2	PRODUTO	CONSTANTE DE REAÇÃO k ($\text{dm}^3 \text{mol}^{-1} \text{s}^{-1}$)
$\text{H} + \text{O}_2$	$\rightarrow \text{H}_2\text{O}$	1.4×10^{11}
$\text{e}_{\text{aq}}^- + \text{O}_2$	$\rightarrow \text{O}_2^{\cdot -}$	2.1×10^{10}

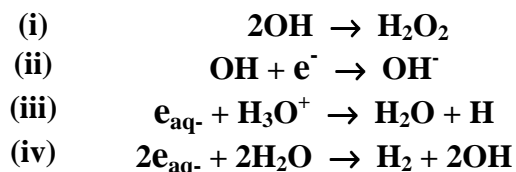
NA PRESENÇA DE N_2O	PRODUTO	CONSTANTE DE REAÇÃO k ($\text{dm}^3 \text{mol}^{-1} \text{s}^{-1}$)
$\text{e}_{\text{aq}}^- + \text{N}_2\text{O}$	$\rightarrow \text{OH} + \text{OH}^- + \text{N}_2$	0.91×10^{10}

NA PRESENÇA DE H_2	PRODUTO	CONSTANTE DE REAÇÃO k ($\text{dm}^3 \text{mol}^{-1} \text{s}^{-1}$)
$\text{OH} + \text{H}_2$	$\rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}$	3.5×10^7

PRODUTOS	e_{aq}^-	H	OH	H₂	H₂O₂	H_{aq}⁺	OH_{aq}⁻
G ($\mu \text{mol J}^{-1}$)	0.28	0.062	0.29	0.047	0.072	0.332	0.052
G (N molec/100 eV)	2.7	0.6	2.8	0.45	0.7	3.2	0.5

$G = n^\circ$ de moléculas modificadas/100 eV (1.6×10^{-17} J) da energia absorvida.

(4) os produtos assim formados reagem entre si ou com outros compostos presentes no meio, resultando em :



O parâmetro “G” permite prever a concentração final dos produtos da radiólise.

Os radicais hidroxil e peróxidos são fortes agentes oxidantes enquanto o elétron hidratado é um poderoso agente redutor. Esses radicais reagem com substâncias importantes da estrutura celular como os aminoácidos, as proteínas, os lípides, as membranas, as bases nitrogenadas e o próprio DNA. Os elétrons hidratados deaminam os aminoácidos como a glicina e a alanina. A H_2O_2 (água oxigenada) interage com moléculas de ferro gerando mais radicais OH contribuindo para o processo de envelhecimento precoce.

Tabela - Rendimento radioquímico G(1 Gy/10⁻⁸ mol/L), em função do LET (Linear Energy Transfer) de alguns radicais e espécies moleculares formados na radiólise da água.

LET (keV × μm ⁻¹)	G						
	H ₂ O	e _{aq} ⁻	OH _•	H _•	H ₂	H ₂ O ₂	HO ₂ _•
0,23	4,08	2,63	2,72	0,55	0,45	0,68	0,008
12,3	3,46	1,48	1,78	0,62	0,68	0,84	
61	3,01	0,72	0,91	0,42	0,96	1,00	0,05
108	2,84	0,42	0,54	0,27	1,11	1,08	0,07

Vários estudos mostram que as proteínas quando irradiadas formam ligações covalentes intermoleculares e são precipitadas em forma de agregados. Experimentos evidenciam que as proteínas quando irradiadas perdem sua atividade e também produzem alterações no transporte dos elétrons da cadeia respiratória na mitocôndria.

No DNA os radicais livres aumentam a ocorrência de reações que levam a sua degradação liberando suas bases, produzindo quebras simples ou duplas na fita do DNA e "crosslinking". Esses efeitos geram a morte celular e mutações genéticas, somáticas (câncer).

Essas evidências ressaltam a importância dos processos químicos no efeito biológico da dose radiológica. Ao mesmo tempo, “trivializa” o conceito da radiodosimetria posicionando-a ao mesmo nível dos demais estudos da toxicologia geral. O caráter especial das radiações nucleares é a quantidade de energia inicialmente disponível. As reações químicas ocorrem com dispêndio de energia da ordem de algumas frações de eV^a, ao contrário, a disponibilidade de energia das radiações nucleares está ao nível de dezenas de milhares de eV e mesmo de milhões

^a1 eV (eletro-volt) é uma unidade utilizada para expressar energias relacionadas com o microcosmo atômico. 1 eV ≡ 1,602x10⁻¹⁹ Joules.

de eV de energia. Visto por outro ângulo, quando a radiação interage, num curto espaço do tecido vivo, como é o caso das células, limitadas a um diâmetro da ordem de μm , é capaz de produzir vários milhares e mesmo milhões de radicais tóxicos.

O Conceito de Dose Equivalente e sua Fórmula de Cálculo - O Sievert (Sv)

Considerando que os diferentes tipos de radiações^a possuem maior ou menor potencial para gerar os radicais livres em função do seu **LET**(eV/mm)^b portanto este parâmetro deve estar presente, de algum modo, na fórmula para expressar o efeito deletério das radiações. Neste sentido foi definido o conceito de dose equivalente “**H**” definido matematicamente por:

$$\mathbf{H}(\text{Sv}) = \mathbf{D}(\text{Gy}) \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{N}$$

onde **Q** = $f(\text{LET})$ é um fator implícito do **LET** da radiação e **N** = $f(t, \text{idade}, \text{sexo}, \dots)$ outro fator utilizado na fórmula para representar todos os demais parâmetros biológicos capazes de influenciar o efeito da dose. O valor de **N** é função da idade, do sexo, da distribuição do tempo “t” de exposição e das características da irradiação (dose crônica ou aguda). Sendo estes parâmetros muito complexos, no estágio atual de conhecimento, **N** é adotado indistintamente como sendo igual a unidade. A dose equivalente **H** tem a pretensão de ser uma grandeza híbrida, constituída por fatores físicos e biológicos e, até o momento, a dose equivalente **H** é ainda calculada essencialmente por parâmetros físicos, pois os dois primeiros componentes da fórmula, **D**(Joules/kg) e **Q** = $f(\text{LET})$, são fatores puramente físicos. O fator predominante correlacionado com os efeitos deletérios da radiação continua sendo a quantidade de energia **E**(Joules) depositada na massa **m**(kg) do tecido.

A unidade de dose equivalente no Sistema Internacional é o Sievert ou abreviadamente Sv. Para a radiação γ e X e praticamente para todas radiações β o fator **Q** é igual a unidade e assim a dose absorvida **D**(Gy) e a dose equivalente **H**(Sv) são numericamente idênticas.

^a radiações α , β , γ , neutrons, protons dentre outras.

^b transferência linear de energia é a relação entre a energia transferida ao tecido a cada milímetro, simbolicamente:
LET = $-dE(\text{eV})/dx(\text{mm})$

Dose Equivalente Efetiva

Sob o ponto de vista de proteção radiológica e com o objetivo de limitar o risco de efeitos estocásticos, a ICRP, em sua Publicação 26, introduziu o conceito de limitação da exposição ponderada média em todo o corpo. Esta está baseada no princípio de que para um certo nível de proteção, o risco deve ser o mesmo se o corpo inteiro for irradiado uniformemente, ou se a irradiação é parcial ou não uniforme.

Esta condição é satisfeita aplicando a limitação à seguinte expressão:

$$H_E = \sum_T \cdot W_T \cdot H_T$$

onde:

W_T é um fator que representa a proporção do risco devido a efeitos estocásticos resultantes no tecido ou órgão, T, com relação ao risco total por efeitos estocásticos quando o corpo inteiro é irradiado uniformemente. Os valores de W_T recomendados são apresentados na tabela a seguir:

TECIDO	W_T
Cólon	0,18
Estômago	0,16
Gônadas	0,13
Pulmões	0,12
Medula óssea vermelha (1)	0,12
Mamas, seios	0,05
Esôfago	0,05
Bexiga	0,04
Fígado	0,03
Tireóide	0,02
Superfície óssea	0,01
Pele	0,01
Restante do corpo (2)	0,07

(1) Inclui uma ponderação por um fator 2 para a latência média a curto prazo para leucemia

(2) A dose equivalente no restante é a dose equivalente média estimada no corpo todo excluindo os tecidos e órgãos já citados.

Existem limites especiais para várias categorias de pessoas tais como: mulheres com capacidade de procriação, mulheres grávidas, estudantes estagiários, visitas.

No caso das mulheres com capacidade de procriação a dose máxima admissível no abdômen será limitada a 10mSv em qualquer período de 3 meses consecutivos.

No caso de gestantes, estas não devem trabalhar em áreas controladas. Com relação à gravidez, uma vez constatada a concepção a dose no feto não deve exceder a 1 mSv.

No caso de estudantes e estagiários cujas atividades não envolvam o emprego de radiação, bem como visitantes, as doses anuais não devem exceder aos limites primários para indivíduos do público, e para cada exposição independente não devem superar a 1/10 dos limites citados anteriormente. Já nas situações em que suas atividades envolvam o emprego com radiação, e estes encontrem em um dos três casos seguintes os limites de dose serão de:

- (a) menores de 16 anos não devem receber, por ano, doses superiores aos limites primários para indivíduos do público, e em exposições independentes não devem exceder a 1/10 destes limites.
- (b) entre 16 e 18 não devem receber, por ano, doses superiores a 3/10 dos limites primários para trabalhadores.
- (c) maiores de 18 anos não devem receber, por ano, doses maiores que os limites primários para trabalhadores.

A ICRP em sua publicação-26, revisada em outubro de 1990, recomenda como limites de dose os seguintes valores apresentados na tabela 5.

LIMITES DE DOSES RECOMENDADOS PELA ICRP

Dose Equivalente Efetiva H_E	Para Trabalhador	Para Público
		100 mSv em 5 anos Máximo 50 mSv por ano
DOSE EQUIVALENTE ANUAL		
Cristalino dos olhos	150 mSv	15 mSV
Pele - 100 cm ²	500 mSv	50 mSv
Mãos	500 mSv	50 mSv
Dose Equivalente média no feto	5 mSv após o diagnóstico	

Com relação à dose equivalente efetiva para trabalhador são fornecidas as seguintes alternativas:

- A dose em 5 anos não deve exceder a 100 mSv, com um limite máximo de 50 mSv num único ano.
- O limite de dose por ano para cumprir com os 100 mSv em 5 anos passa a ser de 20 mSv.

O limite de dose numa emergência não deve ser maior que 500 mSv, ou 5 Sv para a pele, exceto quando se trata de salvar vidas.

Com relação à mulher grávida, uma vez constatada a gravidez a dose não deve exceder a 5 mSv para o resto dos meses. Da 8ª a 15ª semana após a concepção a dose não pode exceder a 1 mSv.

Correlações entre as Unidades de Dose: Absorvida, Efetiva e o Roentengen

Os radiologistas estão acostumados a expressar a exposição de seus pacientes na unidade Roentengen, abreviadamente **R**. Um **R** é definido como a quantidade de radiação X ou γ capaz de criar $2,58 \cdot 10^{-4}$ Coulombs de um mesmo ion (p.ex. e^-) na massa de 1 kg de ar. Como a carga de um e^- é igual a $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb então $2,58 \cdot 10^{-4}$ Coulombs, gerados em 1 kg de ar criam $1,61 \cdot 10^{15}$ ions e^- . Em média, para ser produzido um par de ions em moléculas de ar são necessários 33 eV e portanto a quantidade de energia dispendida em 1 **R**. será igual a:

$$1\mathbf{R} \equiv 1.61 \cdot 10^{15}(\text{ions } e^-) \cdot 33(\text{eV/ion } e^-) \cdot 1.602 \cdot 10^{-19}(\text{J/eV}) = 0,0085 \text{ J/kg}$$

ou em termos aproximados:

$$1 \mathbf{R} \cong 10 \text{ mGy}^a$$

ou ainda:

$$1 \text{ Gy} \cong 100 \mathbf{R}$$

Para as radiações X e γ o fator de qualidade $Q = 1$ e então relaciona-se:

$$\mathbf{10 mSv} \equiv \mathbf{10 mGy} \cong \mathbf{1 R}$$

ou:

^aA precisão das estimativas de doses é da ordem de 20%.

$$1 \text{ Sv} \equiv 1 \text{ Gy} \cong 100 \text{ R}$$

Correlação entre a Dose Equivalente e a Incidência de Câncer

É costume dividir a curva de dose (Sv)→resposta(incidência de Câncer) em tres segmentos de acordo com o perfil da curva experimental discriminando-a em três níveis de acordo com o nível da dose, a saber: níveis de dose baixos, médios e altos. Para doses com intensidade média a curva de dose-resposta tem o perfil linear. Para doses elevadas tem comportamento **quadrático** ou **exponencial**. Estes dois comportamentos são explicados pela teoria do alvo. Pressupõe-se que o interior das células contenha regiões estruturais que representam “alvos” e que ao serem atingidos produzem mutações ou morte celular. Para uma população de alvos basta um golpe (*hit*) de radiação para danificar o “alvo” ou a estrutura. Com doses muito elevadas é provável que ocorram repetidos golpes no mesmo alvo e assim não aumentam a freqüência dos efeitos pois o “alvo” já estaria destruído no primeiro golpe (*hit*) (**resposta exponencial**, Efeito = $a_0 - a_1 \cdot e^{-\lambda \cdot D}$). Alternativamente, se existirem alvos que necessitam de dois “hits” simultâneos para serem sensibilizados então com o aumento da dose D cresce também a probabilidade de sucesso da ocorrência dos dois “hits” e como consequência a curva apresentará um perfil **quadrático** (função matemática dependente da dose D elevada ao quadrado), ou seja,

$$\text{Efeito} = a_0 + a_1 \cdot D + a_2 \cdot D^2.$$

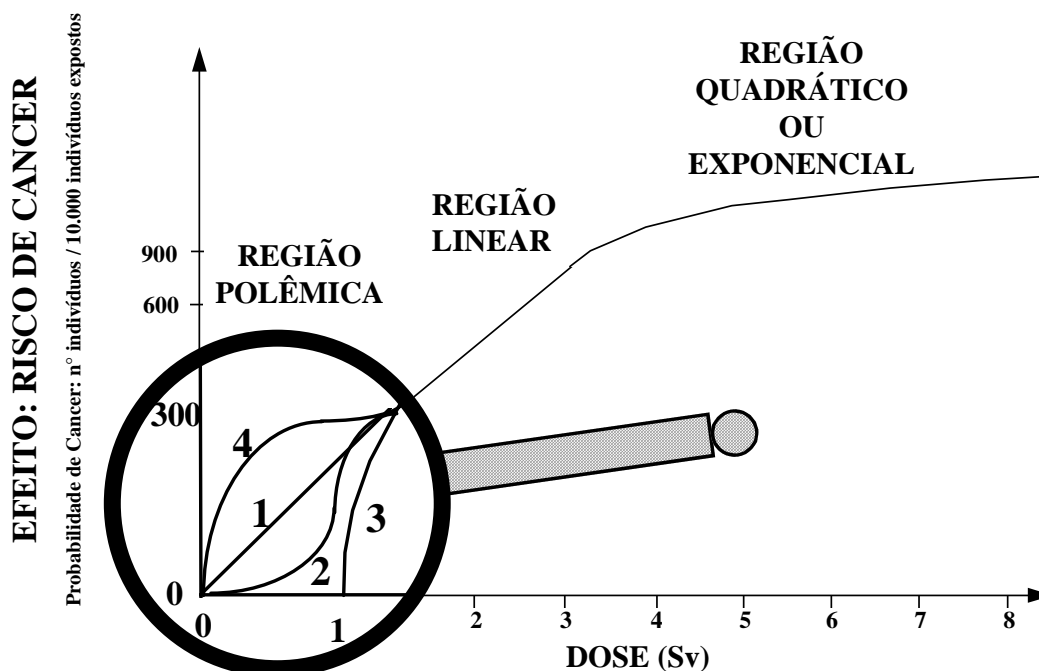


Figura 1 - Modelo de Curvas de Dose → Efeito (risco de cancer) e suas regiões. Esta figura é uma interpretação do Appendix 8.29 do U.S. Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide (July 1981).

A radiação se assemelha às substâncias químicas que produzem cancer. A estimativa do risco de cancer para baixos níveis de radiação é polêmica e suas estimativas são calculadas por extrapolação dos dados de pacientes submetidos aos radiodiagnósticos na Medicina Nuclear, na Radiologia e dos radioacidentados, todos eles submetidos a níveis médios ou altos de doses. O comportamento gráfico das curvas de dose-resposta para níveis baixos é portanto sujeita a polêmica (região ampliada na Figura 1). A teoria mais aceita para estimar a probabilidade de risco de cancer, para níveis baixos de radiação utiliza o modelo linear (curva 1 da Figura 1). Projeções de risco de cancer para doses abaixo de 1 Sv não são exatas e definitivas devido aos poucos dados epidemiológicos disponíveis. Além do mais, comparativamente com as outras causas de indução do cancer a radiação, em si, contribui com parcela relativamente pequena em relação às outras causas e assim o seu efeito é “*mascardo*” pelas outras componentes.

De estimativas da *American Cancer Society* é previsto que **25%** da população, entre **20 a 65 anos**, desenvolvam cancer durante o transcorrer de suas vidas. As prováveis causas dessa incidência incluem o tabagismo, os aditivos e contaminantes presentes nos alimentos, o alcoolismo, as drogas, os poluentes do ar e também a radiação de fundo. Portanto num grupo de 10.000 pessoas provavelmente 2.500 (25%) serão acometidos de cancer. Se 10.000 pessoas se submeterem a uma dose ocupacional de 0,01 Sv espera-se que haja um aumento de 3 indivíduos naquela estatística, isto é a incidência de 2.500/10.000 passa a ser 2.503/10.000.(25,03%) Adotando o modelo linear, se a dose ocupacional for aumentada para 0,1 Sv a frequência passará a ser provavelmente de 2.530/10.000 (25,3%) e na mesma linha de raciocínio para dose ocupacional de 1 Sv a expectativa será de 28% contra os 25% da ocorrência considerada natural.

Em função de aparecer maior quantidade de dados epidemiológicos muitos cientistas acreditam existir riscos de desenvolvimento de cancer mesmo para níveis baixos de radiação e usam em suas projeções as curvas n° 1 ou n° 2 mostradas na Figura 1. Entretanto, fundamentados na pequena contribuição da incidência de câncer para níveis baixos de doses um certo número de cientistas, classificados como mais liberais, sugerem a existência de um limiar de dose para que seja capaz de disparar os efeitos deletérios da radiação (curva 3 na Figura 1). Outros cientistas, denominados mais conservadores, pressupõem que o risco das radiações ocorrem mesmo para níveis muito baixos, só deixando de ser expressivo quando próximo dos valores ambientais (curva 4 na Figura 1).

Polêmica ! : Existe algum benefício de exposição à radiação ?

Embora muitas desvantagens estejam associadas com doses elevadas de radiações existem evidências que doses baixas de radiação, como aquelas encontradas naturalmente em regiões ricas em minério radioativo ou em regiões topograficamente mais elevadas e portanto mais expostas às radiações cósmicas, podem aumentar a expectativa de vida e diminuir a incidência de câncer.

Os organismos internacionais (ICRP) padronizaram o limite máximo permitido de radiação ionizante para trabalhadores durante um ano em 50 mSv, para ingestão ou inalação do material radioativo. A estimativa dessa dose é baseada no homem padrão, com características fisiológicas e anatômicas definidas na publicação da ICRP n° 23, levando em conta a

possibilidade da radiação produzir câncer e doenças hereditárias. Doses superiores a 4 Sv, conhecida como **dose letal 50%** (DL₅₀), são fatais para 50% de uma população exposta. Doses acima de 7 Sv são praticamente fatais.

Os estudos de nutrição com radiotraçadores são de grande utilidade para os cálculos da radiodosimetria, pois utilizam os mesmos modelos matemáticos para descrever os fenômenos biológicos. Modelos matemáticos propostos a partir do uso de radiotraçadores auxiliam o pesquisador a acompanhar a trajetória dos nutrientes orgânicos e inorgânicos no trato gastrointestinal, e deste para os outros órgãos pela via dos fluídos de transferência (sangue, plasma, linfa) e pelas vias de excreção. Com os protocolos adequados pode-se estudar com precisão os fenômenos de digestão, absorção e utilização biológica (biodisponibilidade) dos alimentos.

Interação da Radiação com a Matéria

A radiação interage com a matéria por processos físico-químicos que ocorrem durante a transferência da energia da radiação para os constituintes do organismo. A Tabela 1 ilustra as principais ocorrências dos fenômenos de interação, a escala de tempo de ação e a eventual conduta para minimizar seus efeitos deletérios.

Unidade de Atividade Radioativa

A atividade da fonte radioativa é expressa no SI em unidades Bequerel (Bq). Um Bq representa 1 desintegração por segundo, abreviadamente **dps**.

Dose Equivalente Comprometida

Os limites da dose equivalente para trabalhadores que estão expostos a radiação ocupacional tem sido estabelecidos pela Agencia Internacional de Energia Atômica e no Brasil pela Comissão de Energia Nuclear (CNEN). A Tabela 3 mostra os limites máximos de exposição para trabalhadores, baseados na estimativa da **Dose Equivalente Comprometida** definida pela equação:

$$\frac{\int D_{50} \cdot Q \cdot N \cdot dm}{\int dm}$$

onde D_{50} é a dose absorvida total durante um período de 50 anos após a incorporação do radionuclídeo no corpo e nos órgãos individualmente e dm é um elemento infinitesimal da massa irradiada.

Limite Anual de Incorporação

O limite de incorporação anual (ALI) de um radionuclídeo é um limite secundário que estabelece os limites básicos para incorporação ocupacional durante um ano de trabalho. Os valores de ALI são tabelados no ICRP-30.

Para ilustrar esses conceitos analisaremos o seguinte caso:

Um pesquisador pesando 70 kg, 63 kg de tecido mole ($m =$ massa), contaminou-se com $6 \times 10^9 \text{ Bq}$ ($I_0 =$ incorporação inicial) de trício (^3H). Sabe-se que a meia vida biológica do trício no corpo humano é de aproximadamente 10 dias ($\mu_B = 0,693/10$), a meia vida física de 4475 dias ($\mu_R = 0,693/4475$) e a energia média das partículas β do trício é de 6 keV (E_{med}). Supondo que o material radioativo se distribuiu uniformemente por todo o tecido mole, calcular a dose absorvida e a dose equivalente neste acidente.

A estratégia de cálculo deve seguir as seguintes etapas:

1. Transformar a **atividade** incorporada I_0 na mesma unidade de tempo da meia vida ($t_{1/2}$) fornecida.
2. Calcular o **número de transformações** ocorridas no corpo ao longo do tempo, usando a expressão:

$$U \text{ (desintegrações)} = I_0 / \Sigma\mu$$

onde $\mu = 0,693/t_{1/2}$ (para $t_{1/2}$ biológico e radioativo)

3. Transformar a E_{med} expressa em eV para Joules usando as relações: $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Joules}$; $1 \text{ keV} = 1,6 \times 10^{-16} \text{ Joules}$ e $1 \text{ MeV} = 1,6 \times 10^{-13} \text{ Joules}$

4. Calcular a **energia total** das N desintegrações usando a expressão:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{med}} \text{ (Joules)} \times U \text{ (desintegrações)}$$

5. Calcular a **dose absorvida** usando a definição: $\text{Dose (Gy)} = E_{\text{total}} / m$ onde m é a massa do tecido irradiado expresso em kg.
6. Calcular a **dose equivalente** multiplicando a dose absorvida pelos fatores Q (qualidade) e N (modificador), $\text{Dose (Sv)} = \text{Dose (Gy)} \times Q \times N$, onde Q é fornecido na tabela 2 e N é geralmente igual a um.

De acordo com esse esquema a estimativa de dose do exemplo acima será:

1º Passo Unidade de $t_{1/2}$ do ^3H fornecido em dias portanto,
 $I_0(\text{desint/dia}) = 6 \times 10^9 \text{ (dps)} \times 86400 = \mathbf{5,18 \times 10^{14} \text{ desint/dia}}$

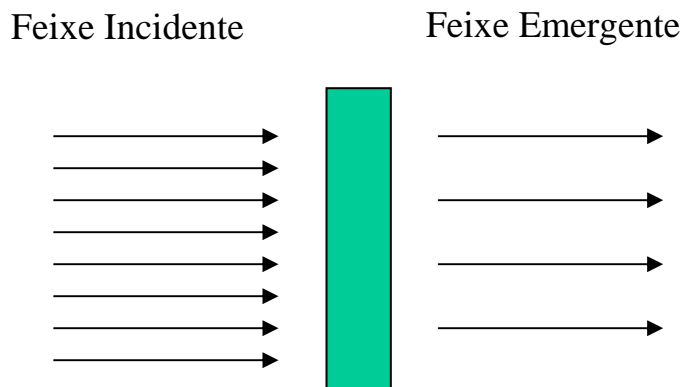
- 2º Passo O número total de desintegrações ocorridas:
 $U(\text{desintegrações}) = 5,18 \times 10^{14} / 0,0693 = \mathbf{7,48 \times 10^{15} \text{ desintegrações}}$
- 3º Passo A energia média da partícula β do trício de 6keV equiivale a $6 \times 1,6 \times 10^{-16}$
 Joules = $\mathbf{9,6 \times 10^{-16} \text{ Joules}}$
- 4º Passo A energia total dissipada ao longo do tempo será:
 $E_{\text{total}} = 7,48 \times 10^{15} \times 9,6 \times 10^{-16} = \mathbf{7,18 \text{ Joules}}$
- 5º Passo A dose absorvida: dose(Gy) = $7,18\text{J}/63\text{kg} = \mathbf{0,11\text{Gy}}$
- 6º Passo Da tabela 2 Q=1 para partículas β e assumindo N=1:
 Dose (Sv) = $0,11 \times 1 \times 1 = \mathbf{0,11 \text{ Sv}}$

Conforme a Tabela 3 a dose radiológica recebida por este pesquisador ultrapassou aproximadamente 2 vezes a dose anual máxima estabelecida pelos organismos regulamentadores. Em consequência deste acidente, o trabalhador deve ser poupado do contato com material radioativo durante dois anos, como também deve ter acompanhamento hematológico e clínico.

As normas básicas de proteção radiológica podem ser consultadas na Resolução 6/73 da CNEN.

Cálculo de Blindagem

Algumas situações de cálculos de blindagem podem ser resolvidos pelo conhecimento dos processos pelos quais as radiações eletromagnéticas (X e γ) interagem com a matéria.



Três processos pelos quais as radiações eletromagnéticas cedem energia na blindagem são:

- Efeito Fotoelétrico
- Efeito Compton
- Produção de Pares

Em cada um desses processos a radiação irá perder fótons do feixe incidente e portanto contribuem para a diminuição do feixe emergente.

Atenuação \Rightarrow Processo exponencial em função da espessura da blindagem

$$I = I_0 e^{-\mu X}$$

I = Intensidade do feixe emergente (Exposição, n° de fótons)

I_0 = Intensidade do feixe incidente (Exposição, n° de fótons)

μ_L = coeficiente de atenuação linear (cm^{-1}) \Rightarrow é uma função da radiação incidente e do material da blindagem. $\mu_L = \Sigma$ efeitos fotoelétrico, Compton, Produção de pares.

X = espessura da blindagem

Camada semi-redutora (CSR)

Uma camada semi-redutora reduz a intensidade do feixe à metade.

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

Cálculo do n° de CSR

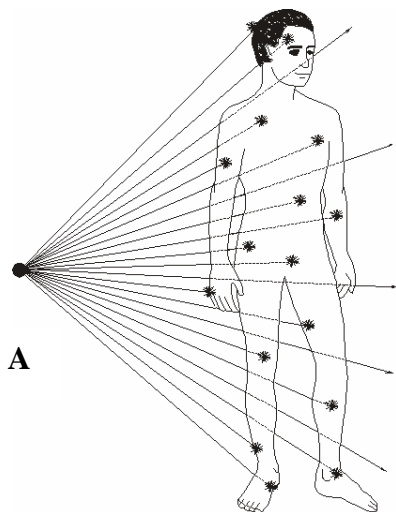
$$\frac{T_{\text{Exp}(0)}}{T_{\text{Exp}(x)}} = 2^n$$

$T_{\text{Exp}(0)}$ = sem barreira

$T_{\text{Exp}(x)}$ = com a barreira

N = n° de CSR

Fórmula para Avaliar a Dose de Exposição Externa.



$$\text{Dose} = \Gamma \frac{A \times t}{d^2}$$

Γ = gamão, constante específica da radiação,
taxa de kerma no ar. (valores tabelados)

A = Atividade da Fonte (mesma unidade de
definição de Γ)

d = distância do ponto de interesse.

T = tempo que o paciente ficou exposto

Lei do Inverso do quadrado da distância

Conhecida a Taxa de exposição em um ponto pode-se calcular a tx. Exp em outro ponto pela relação:

$$\frac{T_{\text{Exp1}}}{T_{\text{Exp2}}} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

Regras Básicas da Radioproteção (Dosimetria Externa)

1. Distância	↑ distância	↓ dose
2. Tempo	↓ Tempo exposto	↓ dose
3. Barreira	↑ Barreira	↓ Dose
4. Decaimento	↑ Tempo de decaimento	↓ Dose

Cálculo do n° de CSR

$$\frac{T_{\text{Exp}(0)}}{T_{\text{Exp}(x)}} = 2^n$$

$T_{\text{Exp}(0)}$ = sem barreira

$T_{\text{Exp}(x)}$ = com a barreira

N = n° de CSR

Tabela - Valore de Γ (gamão) de alguns radioisótopos

Nuclídeo	$\Gamma\left(\frac{C}{GBq \cdot h} \cdot m^2 \cdot 10^{-6}\right)$	$\Gamma\left(\frac{R \cdot m^2}{Ci \cdot h}\right)$	$\Gamma\left(\frac{mGy \cdot m^2}{GBq \cdot h}\right)$
¹¹ C	4.11	0.59	0.1595
¹⁴¹ Ce	0.24	0.035	0.0095
¹³⁷ Cs	2.30	0.33	0.0892
⁵⁷ Cr	0.11	0.016	0.0043
⁵⁷ Co	0.63	0.09	0.0243
⁵⁸ Co	3.84	0.55	0.1486
⁶⁰ Co	9.20	1.32	0.3568
⁶⁴ Cu	0.84	0.12	0.0324
⁶⁷ Ga	0.77	0.11	0.0297
¹⁹⁸ Au	1.60	0.23	0.0622
¹²⁵ I	0.49	0.07	0.0189
¹³¹ I	1.53	0.22	0.0595
⁵⁹ Fe	4.46	0.64	0.1730
⁸⁵ Kr	0.03	0.004	0.0011
⁵⁴ Mn	3.28	0.47	0.1270
⁹⁹ Mo	1.26	0.18	0.0486
⁴² K	0.98	0.14	0.0378
⁴³ K	3.90	0.56	0.1514
²²⁶ Ra	5.75	0.825	0.223
⁸⁶ Rb	0.35	0.05	0.0135
²² Na	8.37	1.20	0.343
²⁴ Na	12.83	1.84	0.4973
⁸⁵ Sr	2.09	0.3	0.0811
¹³³ Xe	0.07	0.01	0.0027

Exercícios de Fixação

1. Qual a dose máxima acumulada na vida de um trabalhador adulto do sexo masculino de 43 anos de idade? Resp _____ mSv
2. Qual é a dose anual máxima permissível (corpo total) para trabalhadores com radiação? Resp _____ mSv
3. Qual a espessura de chumbo que reduzirá a 1/10 a intensidade de um feixe de radiação gama monoenergética de energia 1.5MeV (dado $\mu = 0.6 \text{ cm}^{-1}$) Resp _____ cm
4. Um farmacêutico que trabalha na presença de uma fonte radioativa de ^{131}I de 5 mCi a uma distância de um metro estará sujeito a uma exposição de: Resp _____ mR/h
5. Um Farmacêutico-Bioquímico trabalha com ^{131}I durante uma hora. Verificou que esteve exposto a 0.96 R/h. Como poderá expor-se a somente 30 mR durante aquela hora. Que espessura de chumbo deverá interpor entre ele e a fonte? (Dado $\text{CSR}_{\text{Pb}}=1.1\text{cm}$) R: _____ cm.
6. Um feixe de radiação γ teve sua intensidade diminuída para 12.5% da inicial ao atravessar uma espessura de material de 36 cm. Qual a CSR desse material? Resp _____ cm.
7. Qual a taxa de exposição em R/h de uma fonte de ^{60}Co com atividade de 100 mCi a 64 cm de distância? Dados: $\Gamma_{^{60}\text{Co}} = 1.32$. Resp: _____ R/h
8. Qual é a relação entre as exposições tomadas nas mãos de um trabalhador se este pegar diretamente um vidro contendo material radioativo (supor que a distância entre a superfície da mão e do vidro sejam 1mm), ou se usar uma pinça de 31.623 cm de comprimento? Resp.: Fator de redução = _____ vezes
9. Suponhamos que um indivíduo tenha que trabalhar durante 4 horas num local onde a exposição é de 50 mR/h. Suponhamos, ainda que ele poderá tomar somente 10 mR durante as 4 horas de trabalho. Qual deverá ser a espessura da blindagem de chumbo a ser interposta entre a fonte e seu local de trabalho? ~ ~
CSR dp Pb para a radiação em questão = 0.5 cm Resp: _____ cm
10. Qual a taxa de exposição, em mR/h, medida a 1 m de distância de uma fonte de ^{131}I que tinha 10 dias antes, uma atividade de 500 mCi? Resp: _____ mR/h
11. Qual é a atividade máxima de uma fonte de ^{125}I que permite um operador trabalhar 40 horas/semana a uma distância de 40cm sem ultrapassar a dose máxima permissível?
12. A 10 cm de uma fonte de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ é liberada 252000 cpm. Se a distância é diminuída para 2 cm, qual será o n° de cpm por minuto? Resp: _____ cpm

13. Uma fonte libera 800 mR/h a 2 cm. A que distância "d" um técnico receberá a dose máxima permissível? (Máximo permissível/h = 2.5R/h) Resp: _____ cm

BIBLIOGRAFIA

- 1- ADANS, N. & FELL, T.P. Recycling and metabolic models for internal dosimetry: with special reference to iodine. **Radiation Protection Dosimetry**. **22**:3, 179-82, 1988.
- 2 American Cancer Society. 1979 Cancer Facts and Figures, 1978.
- 3- BUTLER, J.; LAND, J.E. & SWALLOW, A.J. Chemical mechanisms of the effects of high energy radiation on biological systems. **Radiat. Phys. Chem.** **24**:3/4 273-282, 1984.
- 4- CNEN/SP Noções básicas de radioproteção. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, São Paulo, 1988.
- 5- FEDBERG, R.S. & CAREW, J.A. Water radiolysis products and nucleotide damage in gama-irradiated DNA. **Int. J. Radiat. Biol.** **40**:1, 11-7, 1981.
- 6- FREIRE-MAIA, N. Radiogenética Humana. Ed. Edgard Blucher Ltda & Ed. USP, 1972.
- 7- FREMLIN, J.H. Can radiation be good for us? **The Nuclear Engineer**, **25**:4, 102-9, 1983.
- 8- FURCHNER, J.F. & RICHMOND C.R. Effect of dietary zinc on the absorption of orally administered ⁶⁵Zn. **Health Physics** Perg. Press 8:35-40, 1962.
- 9 GETOFF, N. Radiation-Induced degradation of water pollutants – State of the art. **Radiat. Phys. Chem.** **47**, 581-93. 1996.
- 10- GIMENEZ, J.C. Publicação da CNEA-AC/87. Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes. **Comission Nacional de Energia Atomica**, Univ. Buenos Aires, Minist. Salud y Accion Social, Buenos Aires, 1987.
- 11- ICRP Publicação N° 30. Radiation Protection: Limits for intakes of radionuclides by works. **Part 1. International Commission on Radiological Protection**. Pergamon Press, Oxford, 1979.
- 12- INGLET, G.E. (editor) Nutritional Bioavailability of zinc. ACS Symposium Series 210. American Chemical Society, Washington, D.C., 1983.
- 13- LESSARD, E.T.; YIHUA, X.; SKRABLE, K.W.; CHABOT, G.E.; FRENCH,

C.S.; LABONE, T.R.; JOHNSON, J.R., FISHER, D.R., Interpretation of bioassay measurements. Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, 1973.

- 14- MIDDLESEWORTH, L.V. Nuclear reactor accidents and the thyroid. **Thyroid today**. **10**:2, 1-5, 1987.
- 15- NCRP REPORT Publicação N° 84. General concepts for the dosimetry of internally deposited radionuclides. **Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements**. Bethesda, MD. 20814, 1985.
- 16- ROLLO, F.D. Nuclear medicine physics, instrumentation and agents. The C. V. Mosby, Saint Louis, 1977.
- 17- SHAPIRO, J. Radiation protection. A guide for scientists and Physicians. Harvard Univ. Press. England, 2^a edition, 1972.
- 18- WACHSMANN, F. Are small doses really so dangerous? **Eletromedicine**, **55**:3, 86-90, 1987.
- 19- WANG, C.H. & WILLIS, D.L. Radiotracer methodology in biological science. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, 1965.