

Notas de Aula de Introdução à Física Nuclear (NHZ3026)

Prof. Dr. Marcelo Augusto Leigui de Oliveira
 Centro de Ciências Naturais e Humanas (CCNH)
 Universidade Federal do ABC (UFABC)
 Santo André - SP

AULA #18: RADIOPROTEÇÃO E EFEITOS BIOLÓGICOS DAS RADIAÇÕES

I. GRANDEZAS E UNIDADES DE DOSIMETRIA

- Atividade: número de desintegrações nucleares da fonte por unidade de tempo:

curie: $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$ = atividade de 1g de Ra;
 (no SI) becquerel: $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1} \Rightarrow 1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$.

- Exposição: quantidade de carga elétrica por unidade de massa produzida no ar por ionização devida a raios-X ou γ :

roentgen: $1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$;
 (no SI) C/kg.

→ radiografia do abdômen: $0,15 \text{ mC/kg} = 0,6 \text{ R}$.

Taxa de exposição: exposição por unidade de tempo:

$$\frac{dE}{dt} = \Gamma \frac{R}{d^2},$$

onde R é a atividade da fonte, d a distância até a fonte e Γ a *constante da taxa de exposição*, que depende da fonte radioativa:

| Fonte | ^{137}Cs | ^{57}Co | ^{60}Co | ^{22}Na | ^{222}Ra |
|--|-------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| $\Gamma \text{ (R}\cdot\text{cm}^2/\text{mCi}\cdot\text{h)}$ | 3,3 | 13,2 | 13,2 | 12,0 | 8,25 |

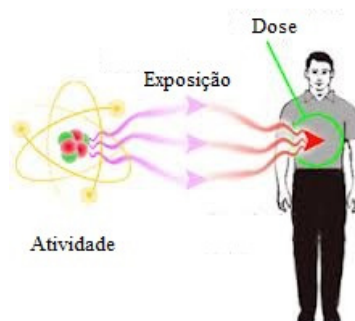


Figura 1: Atividade, exposição e dose.

- Dose absorvida: correspondente à energia absorvida por unidade de massa de tecido mole:

rad: $1 \text{ rad} = 0,01 \text{ J/kg}$ = dose absorvida pelo tecido mole devido à exposição de 1R;
(no SI) gray: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} \Rightarrow 1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$.

- Dose equivalente: Dose absorvida \times fator de qualidade (Q):

Q = 20 para nêutrons, α , núcleos pesados, etc;
= 10 para prótons ou partículas com $q = +e$ e $m > u$;
= 1 para raios-X, γ e elétrons.

rem: $1 \text{ rem} = 1 \text{ rad} \times Q$;

(no SI) sievert: $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} \times Q \Rightarrow 1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ (para $Q = 1$).

→ A dose equivalente anual devido à radiação natural:

$0,44 \text{ mSv}$ (raios cósmicos) + $0,40 \text{ mSv}$ (raios- γ externos) + $0,18 \text{ mSv}$ (radiação interna: ^{40}K , ^{14}C , ^{222}Ra) = $1,02 \text{ mSv}$.

→ A dose equivalente anual devido à radiação artificial:

$0,73 \text{ mSv}$ (radiação diagnóstica) + $0,04 \text{ mSv}$ (poeira radioativa) + $0,21 \text{ mSv}$ (outros) = $0,98 \text{ mSv}$.

Taxa de dose: dose por unidade de tempo.

A. Camada semi-redutora

Para raios- γ (ou raios-X) não há um equivalente para o alcance e um feixe pode somente ser atenuado exponencialmente: $N(x) = N_0 e^{-\mu x}$, onde μ é o *coeficiente de atenuação linear*. Agora, se tomarmos a espessura mássica, $t = \rho x$ (em g/cm^2), vem: $N(x) = N_0 e^{-(\mu/\rho)\rho x}$, onde μ/ρ é o *coeficiente de atenuação de massa*. Por exemplo, para fótons de 50 keV:

| Material | água | ar |
|---------------------------------------|----------------------|----------------------|
| μ (cm^{-1}) | $2,27 \cdot 10^{-1}$ | $2,07 \cdot 10^{-4}$ |
| μ/ρ (cm^2/g) | $2,27 \cdot 10^{-1}$ | $2,08 \cdot 10^{-1}$ |

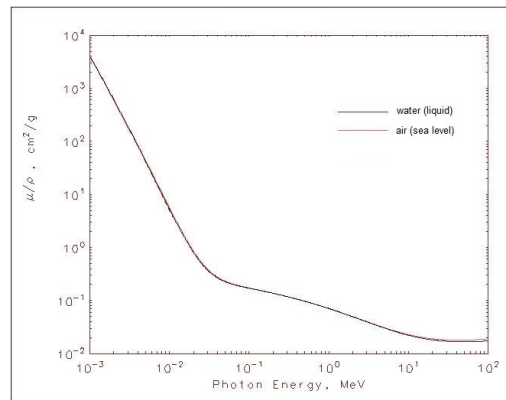


Figura 2: Coeficiente de atenuação de massa para a água e para o ar [Ref.: NIST (National Institute of Standards and Technology)].

Define-se, então, a *Camada Semi-Redutora* (CSR) como a espessura necessária para reduzir a intensidade à metade:

$$N/N_0 = e^{-\mu \cdot \text{CSR}} = 1/2 \Rightarrow \text{CSR} = \ln 2 / \mu.$$

| | | | | | |
|----------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Fonte | ¹³⁷ Cs | ⁶⁰ Co | ⁵⁹ Fe | ¹³¹ I | ¹⁹⁸ Au |
| CSR (cm de Pb) | 0,5 | 1,2 | 1,1 | 0,3 | 0,3 |

| | | | | | | | |
|------------------|------|------|-----|-----|-----|------|------|
| Fótons (MeV) | 0,01 | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 1 | 3 | 10 |
| CSR (cm de água) | 0,13 | 3,05 | 4,1 | 5,1 | 9,8 | 17,5 | 31,2 |

B. Fator-f

As definições de exposição e dose têm como pressupostos meios irradiados distintos: ar e tecido humano, respectivamente. Portanto, espera-se que o número de ionizações sejam diferentes em cada caso. O chamado *fator roentgen-rad*, ou simplesmente, *fator-f* é definido por:

$$\text{fator-f} = \frac{(\mu/\rho)_{\text{material}}}{(\mu/\rho)_{\text{ar}}}$$

onde μ/ρ é o coeficiente de atenuação de massa de cada meio.

| | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|
| Fótons (MeV) | 0,03 | 0,2 | 1,25 |
| fator-f (água) | 1,013 | 1,110 | 1,112 |
| fator-f (músculo) | 1,051 | 1,101 | 1,102 |
| fator-f (gordura) | 0,618 | 1,107 | 1,114 |
| fator-f (osso) | 6,962 | 1,124 | 1,03 |

A dose absorvida no ar para uma exposição de 1 R é de 8,76 mGy e em outros meios pode ser obtida pela multiplicação do fator-f.

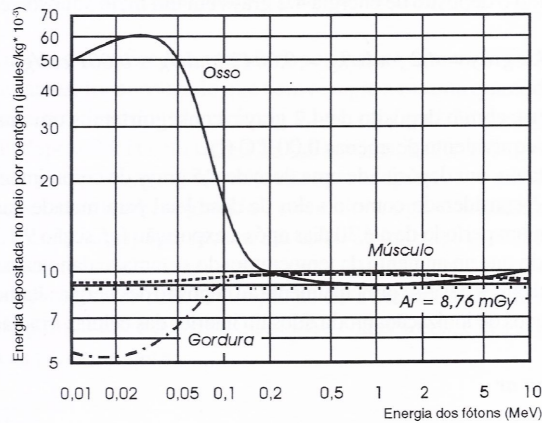


Figura 3: Depósito de energia por unidade de massa a exposição de 1 R a um feixe de raios-X.

II. PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

(1977) ICRP-26 definiu as diretrizes:

- Proteger os indivíduos, seus descendentes e toda a humanidade contra os efeitos danosos das radiações;
- Evitar efeitos não-estocásticos: gravidade do efeito é função direta da dose que é recebida acima de um limiar;
- Limitar a probabilidade de efeitos estocásticos: por menor que seja a dose, há chance de induzir dano.

E estabeleceu 3 princípios:

1. Justificação: qualquer aplicação deve ser justificada (benefício > dano);
2. Limitação: a exposição deve estar abaixo do valor máximo de dose aceitável;

Os limites primários, ou LAMA (Limites de dose Anuais Máximas Admissíveis), são¹:

→ Para trabalhadores: 0,15 Sv (olhos), 0,50 Sv (pele, mãos, pés), 0,05 Sv (corpo inteiro);

→ Para o público: 50 mSv (olhos), 50 mSv (pele, mãos, pés), 1 mSv (corpo inteiro).

Em caso de irradiação de partes do corpo, a *dose efetiva* é:

$$E = \sum_i H_i w_i < 50 \text{ mSv},$$

onde H_i é a dose equivalente máxima permissível e w_i é o fator de peso:

| Tecido | gônadas | mama | medula óssea | pulmão | tireóide | osso | restante |
|--------|---------|------|--------------|--------|----------|------|----------|
| w_i | 0,25 | 0,15 | 0,12 | 0,12 | 0,03 | 0,03 | 0,30 |

Ex.: medula óssea: $H \cdot 0,12 = 50 \text{ mSv} \Rightarrow H = 417 \text{ mSv}$

3. Otimização: ainda que a justificação e a limitação sejam obedecidas é necessário otimizar:

3 fatores:

1. Redução do tempo: $H \propto \Delta t$

Ex.: amostra com 0,2 mSv/h: 0,2 mSv (1ª hora), 0,4 mSv (2ª hora), etc

2. Aumento da distância: $H \propto 1/d^2$

Ex.: H_0 (d = 1 m), $H_0/4$ (d = 2 m), etc

3. Uso de blindagens adequadas

α : pouca penetração
 β : folha de chumbo de 1 cm
 γ ou X : camada semi-redutora

¹De acordo com o CNEN

III. EFEITOS BIOLÓGICOS DAS RADIAÇÕES

(1906) J. Bergonié e L. Tribondeau realizaram estudos expondo testículos de cabritos à radiação e formularam a *lei da radiosensibilidade*: “A radiosensibilidade das células é diretamente proporcional à sua capacidade de reprodução e inversamente proporcional ao seu grau de especialização”.

$$\text{Radiossensibilidade} \propto \frac{\text{Capacidade de reprodução}}{\text{Especialização}} \times f(^{\circ}\text{C}, \text{pH}, [\text{O}_2], \dots),$$

onde f é uma função de fatores que influenciam no aumento das reações químicas.

→ Células humanas mais radiosensíveis: basais da epiderme, eritoblastos (da medula óssea), espermatogônias, das criptas nas vilosidades intestinais e neoplásticas (tumores);

→ Células humanas mais radorresistentes: nervosas e musculares.

→ Exceções: linfócitos (diferenciadas, mas extremamente sensíveis) e oócitos (não-diferenciadas, mas resistentes).

A. O parâmetro LET

LET (Transferência Linear de Energia, na sigla em inglês):

$$\text{LET} \propto \frac{n^{\circ} \text{ de íons}}{\Delta x} \propto -\frac{dE}{dx},$$

e, pelo que já vimos (fator de qualidade):

$$\text{LET}_{\alpha} > \text{LET}_{\beta} > \text{LET}_{\gamma}$$

O que pode acontecer às células?

nada < danificada, mas reparada < núcleo lesado: reprodução modificada <

< núcleo lesado: incapacidade de reprodução < morte celular

B. Mecanismos de ação das radiações

| Fenômeno (estágio) | tempo | evento | evento |
|--------------------|-------------------------|-----------------------------------|--|
| Físico | $10^{-18} - 10^{-13}$ s | absorção de energia | (ionização, etc) |
| Físico-Químico | $10^{-13} - 10^{-5}$ s | degradação da energia | |
| Químico | 10^{-5} s - horas | (direto) ↓ alterações químicas | (indireto) ↘ radicais de H ₂ O |
| Celular | min - horas | ↓ alterações metabólicas | ↓ defeitos no DNA |
| | | ↓ alterações de funções | ↓ mutações, incapacidade de reprodução, morte celular |
| Organismo | horas - dias | ↓ síndromes (câncer) | ↙ |
| | dias - anos | ↙ recuperação | ↘ morte |
| | | ↓ danos permanentes | |

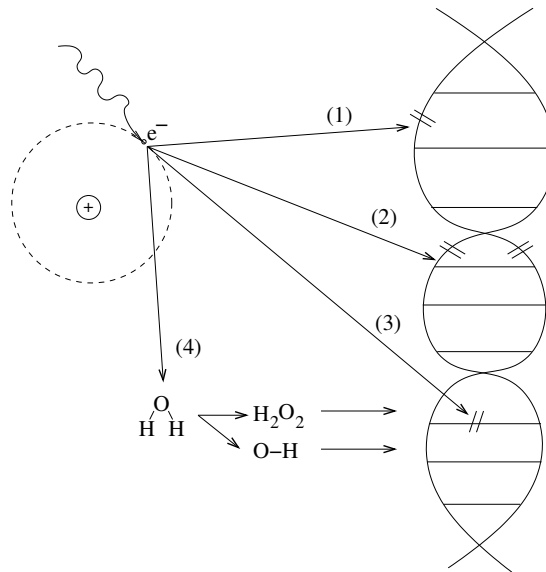
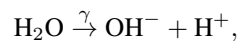


Figura 4: (1) quebra simples da hélice; (2) quebra dupla da hélice; (3) deleção de uma base; (4) mecanismo indireto.

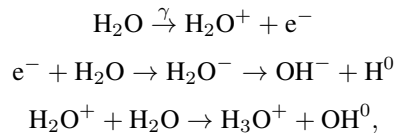
A fita de DNA partida pode ser recomposta diferente gerando uma sequência alterada → alteração na síntese de proteínas → mudança ou perda de capacidade metabólica ou fisiológica.

Mecanismo indireto: formação de radicais livres, moléculas com elétrons desemparelhados, sendo altamente reativas.

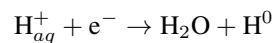


onde o íon hidrogênio (H^+) é um agente redutor e a hidroxila (OH^-) é um agente oxidante.

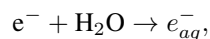
Radiólise da água:



onde $\text{H}_3\text{O}^+ = \text{H}_{\text{aq}}^+$ é o *hidrogênio aquoso*.



Analogamente, há a formação do *elétron aquoso*, se $K_e < 100$ eV, pela colisão:



com $t_{1/2} = 2,3 \cdot 10^{-4}$ s.

Os radicais livres atacam o DNA produzindo quebras e *crosslinking* → mutações genéticas, aberrações cromossômicas → ativação de oncogenes, desativação de genes supressores → neoplasia (aceleração da divisão celular) → câncer.

IV. EXERCÍCIOS

1. O tecido vivo absorve 93 ergs/g para 1 R de radiação γ . Qual a taxa de dose recebida por trabalhar com uma fonte de ^{22}Na de 100 μCi a uma distância de 50 cm?
2. Calcule a dose absorvida no ar para 1 R de raios γ . Assuma a energia média para a criação de pares elétron-íon no ar de 33,7 eV.
3. Uma fonte de ^{60}Co com 8,44 GBq de atividade está sendo manipulada a uma distância de 1 m. Calcule a dose absorvida após 8 h de trabalho. Se o pesquisador estiver à mesma distância, mas agora atrás de um biombo de chumbo de 5 cm de espessura, recalcule a dose após 8 h de trabalho. Tome a absorção pelo tecido vivo de 93 ergs/g para raios- γ por unidade de exposição (1 R).