

"Documento original en mal estado"

CURSO REGIONAL SOBRE EMERGENCIAS RADIOLOGICAS
Lima, 12-23 Agosto 1991

CONCEPTOS GENERALES DE PROTECCION RADIOLOGICA

Fis. Francisco VIDARTE GARCIA

Instituto Peruano de Energía Nuclear

I. RADIOMETROLOGIA

En el mundo la población crece y aumenta la aspiración a una calidad de vida mejor. Para satisfacer esta demanda, las sociedades desarrollan una multiplicidad conexa de actividades que contribuyen a tal fin. En ellas el hombre interactúa con agentes físicos -v.g. las radiaciones ionizantes-, químicos o biológicos, pero a la vez, si estos se utilizan inapropiadamente son capaces de causar daños al ser humano. En el caso de las radiaciones para evitar estos daños, no es ideal considerar "per se" tener que desechar las actividades que involucren el uso de estas, sino más importante es minimizar los riesgos, enmarcado en el concepto de riesgo aceptable, contrapuesto a la utopía de riesgo nulo. Y usufructuar del beneficio que aportan las radiaciones ionizantes a la humanidad.

La ciencia que trata las medidas de las radiaciones ionizantes es la metrología de las radiaciones ionizantes.

1. CONCEPTOS BASICOS

Ionización, es el proceso por el que un átomo, una molécula o cualquier otro sistema ligado pierden uno o varios electrones.

Excitación, es el proceso por el cual un átomo u otro sistema ligado alcanza un estado energético diferente al estado fundamental. Este proceso puede originar consecuencias físicas, químicas y biológicas.

Radiación ionizante, son partículas con o sin carga capaces de causar ionización en un medio material, mediante procesos primarios o secundarios.

Radiación Directamente Ionizante, son partículas cargadas tales como electrones (negativos y positivos), protones, partículas alfa u otros iones pesados, que tienen suficiente energía cinética como para producir ionización por colisión en un medio material.

Radiación Indirectamente Ionizante, son partículas no cargadas tales como fotones y neutrones, que pueden liberar radiaciones indirectamente ionizantes o iniciar la desintegración nuclear en un medio material.

Interacción de la radiación con la materia, se refiere a los procesos por los cuales se altera la energía, y/o la dirección de una partícula incidente en un medio material. La interacción puede ser seguida de la emisión de una o varias partículas secundarias.

Evento de deposición de energía, es un evento en el cual la energía es impartida a un medio material, en un volumen específico, por una partícula ionizante o un grupo de partículas ionizantes (secundarias) asociadas a ella.

2 MAGNITUDES Y UNIDADES RADIOLÓGICAS

2.1 MAGNITUDES Y UNIDADES EN RADIATIVIDAD

Los materiales radiactivos generan campos de radiación, y las magnitudes que caracterizan el fenómeno de radiactividad son:

Constante de Decaimiento (λ), de un nucleido radiactivo en un estado particular de energía es la probabilidad (dp) de que un núcleo determinado experimente una transición nuclear espontánea desde dicho estado de energía en el intervalo de tiempo ($t, t+dt$) por unidad de tiempo.

$$\lambda = \frac{dp}{dt} \quad \text{Unidad: } s^{-1}$$

Actividad (A) de una cantidad de nucleido radiactivo en un estado particular de energía en un instante determinado, es el valor esperado del número de transiciones nucleares espontáneas que parten de ese estado de energía en el intervalo de tiempo ($t, t+dt$) por unidad de tiempo

$$A = \frac{d\langle N \rangle}{dt} \quad \text{Unidad bequerel (Bq = } s^{-1}\text{)}$$

La unidad especial de actividad es el curi (Ci)

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

Por la definición de λ , resulta que la actividad de una dada cantidad (N) de un nucleido radiactivo será:

$$A = \lambda N$$

Semi Vida ($T_{1/2}$) de un nucleido radiactivo, es el tiempo que debe transcurrir para que la actividad de una cantidad dada del nucleido en cuestión disminuya hasta la mitad de su valor inicial.

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad \text{Unidad: s}$$

2.2 LEY DEL DECAIMIENTO RADIATIVO

Si se asume que en un instante t_0 , N_0 es la población inicial de átomos de un nucleido radiactivo específico, cuya constante de decaimiento es λ . La población final en un instante t , luego de transcurrir un período de tiempo Δt será

$$N = N_0 \exp(-\lambda \Delta t)$$

En el instante t , la actividad de la sustancia radiactiva será

$$A = A_0 \exp(-\ln 2 \cdot \Delta t / T_{1/2})$$

donde

A_0 : actividad inicial de la sustancia radiactiva

$T_{1/2}$: semi vida del nucleido radiactivo específico.

Δt : periodo de tiempo transcurrido entre los instantes t_0 y t .

2.1 MAGNITUDES DE CAMPO

La determinación de un campo de radiación requiere distintas formas de especificación en los puntos de interés, por ejemplo conocer el número de partículas que ha incidido en él, así como su tipo y energías. Con este objeto, la publicación 33 de la ICRU define una serie de magnitudes físicas, entre ellas:

Para partículas se define:

Número de partículas (N), es el número de partículas que se emiten, transfieren o reciben. Unidad: 1

Flujo de Partículas (\dot{N}), es el número de partículas (dN) que en un intervalo de tiempo (t, t+dt) inciden sobre una esfera de sección transversal de área elemental (da) por unidad de tiempo.

$$\dot{N} = dN / dt \qquad \text{Unidad: } s^{-1}$$

Fluencia (Φ), es el número de partículas (dN) que inciden sobre una esfera de sección transversal de área elemental (da) por unidad de área.

$$\Phi = dN / da \qquad \text{Unidad: } m^{-2}$$

Tasa de Fluencia ($\dot{\Phi}$), es el número de partículas (dN) que en un intervalo de tiempo (t, t+dt) inciden sobre una esfera de sección transversal de área elemental (da) por unidad de área y por unidad de tiempo.

$$\dot{\Phi} = d\Phi / dt \qquad \text{Unidad: } m^{-2} s^{-1}$$

Para las energías se define:

Energía Radiante (R), es es la energía de las partículas (excluyendo la energía de la masa en reposo) que se emiten, transfieren o recibe Unidad: J

Flujo de Energía (\dot{R}), es la energía radiante que en un intervalo de tiempo (t, t+dt) incide sobre una esfera de sección trasversal de de área elemental (da) por unidad de tiempo

$$\dot{R} = dR / dt \qquad \text{Unidad: } J s^{-1}$$

Fluencia de Energía (Ψ), es la energía radiante (dR) que incide sobre una esfera de sección transversal de elemental (da) por unidad de área

$$\Psi = dR / da \qquad \text{Unidad: } J m^{-2}$$

Tasa de Fluencia de Energía ($\dot{\Psi}$), es la energía radiante (dR) que incide sobre una esfera de sección transversal de área elemental (da) por unidad de área y por unidad de tiempo

$$\dot{\Psi} = d\Psi / dt \qquad \text{Unidad: } J m^{-2} s^{-1}$$

2.2 COEFICIENTES DE INTERACCION

Los fenómenos de la interacción de la radiación con la materia se expresan por medio de los coeficientes de interacción, característicos del material sobre el cual incide la radiación y, del tipo y energía de la radiación incidente.

2.2.1 INTERACCION DE LA RADIACION DIRECTAMENTE IONIZANTE

Poder de Frenado Másico de Colisión ($S/\rho]_{col}$) de un material de densidad ρ , es la energía perdida (dE) por una partícula cargada a causa de aquellas colisiones con los electrones -originando ionización o excitación- de los átomos, al penetrar una distancia elemental (dl) de dicho material, por unidad de longitud.

$$S/\rho]_{col} = 1/\rho \cdot dE/dl]_{col} \quad \text{Unidad } J \ m^2 \ kg^{-1}$$

Poder de Frenado Másico Radiativo ($S/\rho]_{rad}$) de un material de densidad ρ , es la energía perdida (dE) por una partícula cargada a causa de la producción de bremsstrahlung -emisión de fotones-, al penetrar una distancia elemental (dl) de dicho material, por unidad de longitud

$$S/\rho]_{rad} = 1/\rho \cdot dE/dl]_{rad} \quad \text{Unidad. } J \ m^2 \ kg^{-1}$$

Poder de Frenado Másico Total (S/ρ) de un material de densidad ρ , es la energía perdida (dE) por una partícula cargada, al penetrar una distancia elemental (dl) de dicho material, por unidad de longitud.

$$S/\rho = S/\rho]_{col} + S/\rho]_{rad} \quad \text{Unidad: } J \ m^2 \ kg^{-1}$$

Poder de Frenado Lineal (S) de un material, es la energía perdida (dE) por una partícula cargada, al penetrar una distancia (dl) en dicho material, por unidad de longitud.

$$S = dE / dl \quad \text{Unidad } J \ m^{-1}$$

Transferencia Lineal de Energía (L_{Δ}) de un material, es la energía perdida por una partícula cargada al penetrar una longitud (dl) a causa de aquellas colisiones con electrones en las que la pérdida de energía en cada colisión es menor que un límite de energía prefijado Δ , por unidad de longitud

$$L_{\Delta} = \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\Delta} \quad \text{Unidad } J \ m^{-1}$$

Cuando se contabiliza en dE la energía perdida en todas las colisiones con electrones se denota L_{α}

En el trabajo práctico de la protección radiológica es generalmente usado

$$L_{\alpha} = S_{col}$$

Energía Media Disipada en un Gas por Par Iónico Formado (w)

$$w = E / \langle N \rangle \quad \text{Unidad: } J$$

donde $\langle N \rangle$ es el número medio de pares iónicos que se formaran cuando la energía cinética E de una partícula cargada se ha disipado por completo en el seno del gas.

Para electrones hasta de 50 MeV y como gas el aire seco, se admite que w es constante y su valor es 33,97 eV.

Por lo tanto: $w/e = 33,97 \pm 0,06 \ J/C$

2.2.2 INTERACCIÓN DE LA RADIACION INDIRECTAMENTE IONIZANTE

Coefficiente Másico de Atenuación (μ/ρ) de un material de densidad ρ , es la fracción de partículas que experimentan interacciones al atravesar una distancia elemental (dl) en dicho material, por unidad de longitud.

$$\mu/\rho = \frac{dN/N}{\rho \cdot dl} \quad \text{Unidad: m}^2 \text{ kg}^{-1}$$

Coefficiente Másico de Transferencia de Energía (μ_{tr}/ρ) de un material de densidad ρ , es la fracción de energía de las partículas incidentes que es transferida como energía cinética de las partículas cargadas producidas en las interacciones que ocurren cuando atraviesan una distancia elemental (dl), por unidad de longitud.

$$\mu_{tr}/\rho = \frac{d\epsilon_{tr} / E}{\rho \cdot dl} \quad \text{Unidad: m}^2 \text{ kg}^{-1}$$

Coefficiente Másico de Absorción de Energía (μ_{en}/ρ) de un material de densidad ρ , es:

$$\mu_{en}/\rho = (1 - g) \cdot \mu_{tr}/\rho \quad \text{Unidad: m}^2 \text{ kg}^{-1}$$

donde g es la fracción de la energía de las partículas cargadas, liberadas por la radiación incidente y de las secundarias, que se disipa en el medio material por producción de bremsstrahlung

2.3 MAGNITUDES DOSIMETRICAS

Para Radiaciones Indirectamente Ionizantes:

Kerma (K) en un punto de interés de un medio material de masa (dm) contenida en un volumen finito V , es el valor esperado de la energía transferida ($d\langle\epsilon_{tr}\rangle$) por las partículas no cargadas a las partículas cargadas por unidad de masa.

$$K = d\langle\epsilon_{tr}\rangle / dm \quad \text{Unidad: gray (Gy = J kg}^{-1} \text{)}$$

Kerma de Colisión (K_{col}), una de las parte del kerma que considera la energía disipada por los electrones en interacciones de colisión para crear excitaciones o ionizaciones.

$$K_{col} = (1 - g) K \quad \text{Unidad: Gy}$$

Kerma Radiativo (K_{rad}), una de las partes del kerma que considera la energía disipada en la producción de bremsstrahlung.

$$K_{rad} = K - K_{col} \quad \text{Unidad: Gy}$$

La Tasa de Kerma (\dot{K})

$$\dot{K} = dK / dt \quad \text{Unidad: Gy s}^{-1}$$

donde dK es el incremento de kerma en el intervalo de tiempo ($t, t+dt$)

Tasa de Kerma para una fuente -radiactiva, tipo puntual- gamma
 Con el objeto de calcular la tasa de kerma en un punto de interés localizado -en un medio material de densidad ρ sobre la superficie de una esfera centrada en la fuente puntual gamma y con un radio d.

$$S = 4 \pi d^2 \quad \text{Superficie de una esfera de radio d}$$

Consideramos la distribución espectral de los fotones emitidos por la fuente puntual gamma, obteniendo para cada población de fotones monoenergéticos de energía E_i :

$$R_i = E_i \cdot p_i \cdot A \quad \text{tasa de energía radiante para la i-ésima población de fotones}$$

$$\psi_i = \frac{\sum_i R_i}{S} \quad \text{tasa de fluencia de energía para la i-ésima población de fotones}$$

$$K_i = \frac{\mu_{tr}}{\rho}(E_i) \cdot \psi_i \quad \text{tasa de Kerma para la i-ésima población de fotones}$$

$$K = \sum_i K_i \quad \text{tasa de kerma en el punto de interés}$$

$$K = \left(\frac{1}{4 \pi} \sum_i \frac{\mu_{tr}(E_i)}{\rho} \cdot E_i \cdot p_i \right) \frac{A}{d^2}$$

A : Actividad de la fuente

d : Distancia de la fuente al punto de interés del medio material de densidad ρ .

p_i : Probabilidad de emisión para el i-esimo tipo de fotón.

E_i : Energía de la i-ésima población monoenergética de fotones

$\frac{\mu_{tr}}{\rho}$: Coeficiente másico de transferencia de energía en el medio material de densidad ρ , para i-ésimo fotón.

MAGNITUDES EXCLUSIVAS PARA FOTONES Y AIRE:

Exposición (X) en un punto de interés del aire de masa (dm) contenida en un volumen finito V, es el valor absoluto de la carga total de los iones de un mismo signo (dQ) producidos en V cuando todos los electrones liberados por los fotones, en dicha masa de aire, han sido detenidos por completo, por unidad de masa.

$$X = dQ / dm \quad \text{Unidad: C kg}^{-1}$$

La unidad tradicional de exposición es el roentgen (R), siendo.

$$1 R = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C kg}^{-1}$$

Tasa de Exposición (X)

$$\dot{X} = dX / dt \quad \text{Unidad: } C \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

donde dX es el incremento de la exposición en el intervalo de tiempo $(t, t+dt)$.

Relación Exposición - Kerma

Si se supone que un haz de fotones monoenergéticos que incide en un volumen finito de aire seco, da origen a un conjunto de electrones en condiciones de equilibrio de partículas cargadas, se cumple:

$$X = \frac{1}{w/e} \frac{1}{J_{\text{aire}}} [1 - \xi_{\text{aire}}(E)] K_{\text{aire}}$$

E = Energía de los fotones

$$X = \frac{1}{w/e} \frac{1}{J_{\text{aire}}} K_{\text{col, aire}}$$

MAGNITUDES PARA TODO TIPO DE RADIACIONES IONIZANTES

Energía Impartida (ϵ) por la radiación ionizante a un medio material, en un volumen finito V , es definida como.

$$\epsilon = R_e - R_s + \Sigma Q \quad \text{Unidad: } J$$

donde R_e : energía radiante que incide sobre el volumen.

R_s : energía radiante que sale del volumen.

ΣQ : suma de todas las variaciones que se produzcan en la energía correspondiente a la masa en reposo de los núcleos y de las partículas elementales contenidas en el volumen, como consecuencia de cualquier transformación nuclear que ocurra dentro de él

Dosis Absorbida (D) en algún punto P de un medio material de masa (dm) contenida en un volumen finito V , es el valor esperado de la energía impartida ($d\langle\epsilon\rangle$) por la radiación ionizante al medio, por unidad de masa.

$$D = d\langle\epsilon\rangle / dm \quad \text{Unidad: gray } (Gy = J/kg)$$

Tasa de Dosis Absorbida (\dot{D}), es incremento de la dosis absorbida (dD) en el intervalo de tiempo $(t, t+dt)$ por unidad de tiempo

$$\dot{D} = dD / dt \quad \text{Unidad: } Gy \text{ s}^{-1}$$

RELACIONES ENTRE MAGNITUDES

Relación Dosis Absorbida - Kerma de Colisión

Bajo las condiciones de equilibrio de partículas cargadas y para volúmenes significativamente pequeños se tiene que

$$D \stackrel{\text{EPC}}{=} K_{\text{col}}$$

Relación Dosis Absorbida - Exposición

$$D_{\text{aire}} = \frac{w}{e} J_{\text{aire}} \cdot X$$

$$D_{\text{aire}} = 0,876 \frac{X}{R}$$

cGy

Relación Dosis Absorbida - Fluencia de Partículas Cargadas

$$D = \Phi \frac{\overline{S_{\text{col}}}}{\rho}$$

$$\frac{\overline{S_{\text{col}}}}{\rho} = \frac{\int_0^{E_{\text{max}}} \Phi_E \frac{S_{\text{col}}}{\rho} dE}{\int_0^{E_{\text{max}}} \Phi_E dE}$$

Φ Fluencia de las partículas cargadas

Φ_E Distribución diferencial de la fluencia con respecto a la energía de las partículas.

$\frac{\overline{S_{\text{col}}}}{\rho}$: Poder de frenado másico de colisión medio

Relación Dosis Absorbida en Tejido - Dosis Absorbida en Aire

Para Radiaciones Directamente Ionizantes

$$D_{\text{Tejido}} = \frac{\frac{\overline{S_{\text{col}}}}{\rho} \text{ Tejido}}{\frac{\overline{S_{\text{col}}}}{\rho} \text{ aire}} D_{\text{aire}}$$

Para Radiaciones Indirectamente Ionizantes

$$D_{\text{Tejido}} = \frac{\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \text{ Tejido}}{\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \text{ aire}} D_{\text{aire}}$$

2.4 MAGNITUDES EN PROTECCION RADIOLOGICA

Dosis Equivalente (H) en un punto de interés del tejido se define como:

$$H = D Q \quad \text{Unidad: sievert (Sv = J kg}^{-1}\text{)}$$

donde D es la dosis absorbida y Q el factor de calidad en dicho punto. Q tiene en cuenta la diferente eficacia de los distintos tipos de radiación ionizante en la producción de efectos deletéreos. Esta eficacia está relacionada con las diferencias microscópicas o submicroscópicas en la distribución de la energía absorbida.

Tasa de Dosis Equivalente (\dot{H}) se define como:

$$\dot{H} = dH / dt \quad \text{Unidad: Sv. s}^{-1}$$

donde dH es el incremento de dosis en el intervalo de tiempo (t, t+dt).