

DIRECCIÓN NUCLEAR
División De Protección Radiológica
Radioterapia Y Medicina Nuclear

**Material de estudio examen de Acreditación de los
Conocimientos en Protección Radiológica**

REALIZADO POR:

Ameli Montero Reyes
Coordinadora
Radioterapia y Medicina Nuclear
Fecha: 26/09/2023

ÍNDICE

CAPITULO I. Temas Generales:	4
Radiactividad	4
Átomos	4
Radiactividad y radiación.....	4
Radiación y tejido biológico.....	5
Interacción entre la radiación y la materia	6
Mecanismos Básicos.....	6
Interacción de las partículas cargadas con la materia	6
Interacción de la radiación electromagnética con la materia.....	8
Interacción de neutrones con la materia	9
Fuentes de radiación	11
Fuentes Naturales De Radiación	11
Aplicaciones De Las Radiaciones Ionizantes.....	11
Magnitudes y Unidades Radiológicas	12
Generalidades Sobre Magnitudes Radiológicas.....	12
Dosimetría:.....	12
Radioprotección:	13
Magnitudes operacionales:.....	14
Efectos Biológicos de las Radiaciones Ionizantes	15
Relación Dosis-Efecto.....	15
Efectos de la Irradiación Celular a Nivel Molecular	16
Reacciones Bioquímicas con la Radiación Ionizante	17
Efectos de las radiaciones en los sistemas biológicos	20
Efectos somáticos estocásticos	22
Principios de Protección Radiológica	23
Protección Radiológica: del trabajador, del público y de los pacientes....	25
Clasificación de Áreas.....	28

Propuesta de clasificación de áreas para Radioterapia y Medicina Nuclear.....	29
Control de la exposición de mujeres, visitantes y trabajadores temporarios	31
Cultura de Seguridad	31
Cambio Cultural	32
Instrumentación y mediciones	34
Definiciones y conceptos necesarios.	34
Tipos de sistemas detectores de radiación.....	35
Detectores gaseosos.....	35
Dosimetría Personal	39
Selección de Instrumentos de Medición.....	40
Residuos Radiactivos	44
Fuentes Radiactivas Fuera De Uso	44
Fases de la gestión.....	46
Marco regulatorio nacional	49
Emergencias	53
Situaciones de emergencia.....	53
CAPITULO II. Temas de interés Radioterapia	54
Radioterapia	54
Aceleradores De Partículas.....	54
Unidad de cobalto - Cobaltoterapia	56
Equipos de última generación en radioterapia externa	56
Consideraciones Generales en Braquiterapia.....	62
Procedimiento de operación en Radioterapia	67
Análisis de situaciones accidentales en Radioterapia	69
CAPITULO III. Temas de interés Medicina Nuclear	70
Medicina Nuclear	70
Diagnóstico "In Vivo"	71
Diagnóstico In Vitro.....	72
Aplicaciones diagnósticas de la medicina nuclear:.....	74

Aplicaciones terapéuticas de la medicina nuclear:	74
Emergencias en Medicina Nuclear y Laboratorios.....	75
Bibliografía	77

CAPITULO I. Temas Generales:

Estos son los temas de interés general a ser evaluados en el examen de Acreditación de los Conocimientos en Protección Radiológica:

Radiactividad

Átomos

Toda la materia está formada por átomos. Cada átomo tiene un núcleo alrededor del cual se encuentran los electrones girando en determinadas órbitas. El núcleo contiene protones y neutrones. Todos los átomos de un mismo elemento químico tienen el mismo número de protones. Pueden, no obstante, tener diferente número de neutrones; entonces se llaman isótopos de ese elemento.

El hidrógeno, por ejemplo, tiene tres isótopos: hidrógeno, deuterio y tritio. Los átomos se identifican por el nombre del elemento y el número de protones más el de neutrones del núcleo.

Por ejemplo: litio-7 es el átomo del elemento que tiene cuatro protones y tres neutrones en su núcleo. Los átomos de este o de distinto elemento se pueden combinar formando moléculas; por ejemplo, un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno forman una molécula de agua: H₂O.

Radiactividad y radiación

Los núcleos de ciertos átomos son inestables y se transforman en otros núcleos más estables dando lugar, por lo tanto, a átomos más estables. Estas transformaciones (llamadas también desintegraciones) se caracterizan por la emisión de partículas o energía y este fenómeno se conoce con el nombre de radiactividad, descubierta por Becquerel en 1886.

Esas emisiones –también denominadas radiaciones– pueden ser principalmente de tres tipos: partículas alfa –constituidas por dos neutrones y dos protones–, partículas beta –electrones, tanto positivos como negativos, que se crean en el núcleo de los átomos mediante determinados procesos–, y finalmente la radiación gamma –constituida por fotones, es decir, radiación electromagnética similar a los rayos X y a la luz, pero más energética–.

Los rayos X, como hemos mencionado, son radiación electromagnética, de más baja energía, de origen atómico y se producen como consecuencia de una

reordenación de los electrones en las órbitas de la corteza, resultado de interacciones con origen en el exterior o en el interior del átomo.

Tanto las radiaciones ionizantes como los materiales radiactivos han formado siempre parte de nuestro entorno; no obstante, dada la incapacidad del ser humano para advertir su presencia mediante los sentidos, su descubrimiento no se produjo hasta finales del siglo XIX, época en la que comienza a disponerse de sistemas capaces de detectar su presencia; aprovechando el conocimiento de algunas de sus propiedades.

Electrón Neutrón Protón A las fuentes de radiaciones ionizantes como los rayos cósmicos, materiales radiactivos presentes en la corteza terrestre no alterada, en el aire o incorporados a los alimentos, e incluso sustancias radiactivas que se encuentran en el interior del organismo humano (K40, C14, etc.), se las denomina radiaciones de fondo o naturales. El ser humano, además de estar expuesto a la radiación de fondo natural, también está expuesto a fuentes artificiales de radiaciones.

La utilización de fuentes de radiaciones ionizantes, aparatos de rayos X, sustancias radiactivas naturales o radioisótopos producidos artificialmente, en actividades de la medicina, la industria, la agricultura o la investigación, reportan muchos beneficios a la humanidad, pero también da lugar a ciertos riesgos que no quedan limitados a un pequeño grupo de personas, sino que pueden incidir sobre grupos de trabajadores y sobre la población en su conjunto.

Radiación y tejido biológico

La radiación, cuando penetra en la materia, y sobre todo en el caso de partículas cargadas –alfa, protones, fragmentos de fisión y electrones–, fundamentalmente suele arrancar electrones de la corteza de los átomos circundantes dando lugar a un proceso que se conoce con el nombre de ionización.

La radiación electromagnética, tanto en la radiación gamma como en los rayos X, interaccionan con mecanismos más complejos pero que también producen finalmente pérdida de electrones en los átomos circundantes.

Los neutrones, que son partículas neutras (sin carga eléctrica) que se producen en determinados procesos, interaccionan con la materia mediante reacciones nucleares que pueden dar lugar, a su vez, a partículas cargadas y fotones. El final, sea cual sea, el tipo de radiación da lugar a partículas cargadas, por lo que el mecanismo fundamental de interacción con la materia es el de ionización. Esta es la razón por la que estas radiaciones se conocen con el nombre de radiaciones ionizantes.

En el caso de que la materia sea tejido biológico con un alto contenido de agua, la ionización de las moléculas de agua puede dar lugar a los llamados radicales libres que presentan una gran reactividad química, suficiente para alterar moléculas importantes que forman parte de los tejidos de los seres vivos. Entre esas alteraciones pueden incluirse los cambios químicos en el ADN, la molécula orgánica básica que forma parte de las células de nuestro cuerpo. Estos cambios pueden dar lugar a la aparición de efectos biológicos, incluyendo el desarrollo anormal de las células.

Interacción entre la radiación y la materia

Cuando se habla de **reacciones nucleares** se hace referencia a todo tipo de interacción con los núcleos atómicos. Un tema más general, que engloba las reacciones nucleares, es el de las interacciones producidas por los fotones y partículas (agrupados bajo la denominación común de radiación) cuando inciden sobre la materia e interactúan con los núcleos o con los electrones atómicos, lo que se conoce como **interacción de la radiación con la materia**.

Las radiaciones que más interesan son las constituidas por neutrones y fotones (neutros eléctricamente) y las constituidas por partículas cargadas (electrones, protones, partículas alfa, etc.). La diferenciación de ambos grupos es muy importante pues los mecanismos de interacción son completamente diferentes. Las radiaciones de neutrones y fotones, debido a la gran variedad de interacciones que producen y a su capacidad de penetración en la materia, son las de mayor interés.

Mecanismos Básicos

Las partículas neutras presentan la propiedad de interactuar con los electrones atómicos (fotones) y con los núcleos (fotones y neutrones) en un solo proceso, desapareciendo luego del haz original. Esto no excluye la existencia de efectos secundarios, como se verá más adelante, pero permite un tratamiento muy específico del tema. Las partículas cargadas, en cambio, lo hacen básicamente vía interacción coulombiana tanto con electrones como con núcleos atómicos, en procesos de múltiples etapas.

Interacción de las partículas cargadas con la materia

La radiación puede analizarse en base a los efectos que produce al atravesar la materia, los que dependen del tipo de radiación y de la energía de esta. Por ejemplo, cuando la radiación, partícula o fotón, arranca uno o más electrones orbitales de los átomos de la sustancia que atraviesa se produce la ionización de estos. Esta ionización, relacionada con la energía de la radiación incidente, puede medirse fácilmente expresando su intensidad mediante el número de pares iónicos, o sea de pares electrón-ión positivo, formados por unidad de recorrido del haz, lo que se conoce como **ionización específica**.

La radiación, al atravesar la materia, interactúa con ésta perdiendo energía en cada proceso de interacción. A la mínima distancia necesaria para detener la radiación se la denomina **alcance**. Éste es un concepto de gran utilidad para el estudio de haces de partículas cargadas que tienen un alcance bien definido en la materia ya que pierden energía en interacciones sucesivas.

Tipos de interacción de partículas cargadas con la materia

La interacción de partículas cargadas con la materia tiene lugar a través de colisiones elásticas o inelásticas con núcleos atómicos, con electrones orbitales o con cargas libres. Se dice que se tiene una **colisión elástica** cuando la energía cinética total del sistema, o sea del conjunto de partículas que intervienen, se mantiene constante. En cambio, la **interacción es inelástica** cuando esa energía no se conserva; o sea cuando parte de esta se transforma en algún otro tipo de energía. En términos generales las partículas cargadas interactúan con la materia por una de las cuatro alternativas siguientes:

- Colisión elástica con electrones atómicos: la partícula incidente es desviada por el campo coulombiano de los electrones orbitales perdiendo muy poca energía cinética en el proceso. Este tipo de interacción es importante sólo en el caso de que la radiación incidente sean electrones de baja energía (menos de 100 eV).
- Colisión elástica con núcleos: la partícula es desviada por la interacción con el campo coulombiano de las cargas positivas nucleares, cediendo una parte de su energía de movimiento. Ocurre también fundamentalmente con partículas beta.
- Colisión inelástica con electrones atómicos: parte de la energía cinética de la partícula incidente se emplea en excitar los electrones del átomo. Éstos vuelven posteriormente al estado fundamental emitiendo fotones con energías características del material excitado. Puede ocurrir también que la energía cedida sea lo suficientemente grande como para arrancar uno o varios electrones con lo cual el átomo queda ionizado formándose de esta manera un par iónico.
- Colisión inelástica con núcleos: la partícula incidente es acelerada o frenada por interacción con el campo coulombiano del núcleo cediendo parte de su energía que se emite como radiación electromagnética. En algunos casos, en lugar de emitirse radiación, la energía cedida por la partícula se emplea en excitar el núcleo.

- Radiación de frenado: Cuando una partícula cargada atraviesa un medio se dan, con distintas probabilidades, algunos de los cuatro procesos indicados. En todos ellos la partícula pierde energía cinética ya sea cediéndola como tal a los electrones o al núcleo con el que interacciona y transformándola en energía de excitación, o convirtiéndola en radiación electromagnética. Este fenómeno se conoce como **radiación de frenado** o **“Bremsstrahlung”** y constituye un importante mecanismo de pérdida de la radiación beta.

Interacción de la radiación electromagnética con la materia

La radiación electromagnética que nos interesa desde el punto de vista de su interacción con la materia es básicamente la radiación gamma y los rayos X. Ambas denominaciones abarcan a fotones con longitudes de onda menores que 1 \AA , aunque este límite es muy elástico. La única forma de interpretar adecuadamente la interacción de la radiación electromagnética con la materia es a través de su comportamiento corpuscular.

A diferencia de las partículas cargadas, que tienen alcances definidos relacionados con su energía inicial, la radiación electromagnética no presenta esta propiedad al atravesar la materia. Los fotones que componen el haz sufren choques efectivos mucho menos frecuentes que las partículas y son absorbidos por los átomos arrancando electrones o son dispersados cediendo energía a los electrones atómicos. O sea, van desapareciendo a lo largo de la trayectoria del haz en la materia o son eliminados por dispersión.

Para los fotones se puede hablar de un libre camino medio recorrido por el fotón antes de ser absorbido o dispersado.

Existen 3 mecanismos principales de absorción de los rayos gamma por la materia:

- Absorción o efecto fotoeléctrico
- Dispersión Compton
- Producción de pares

Cada uno de ellos puede caracterizarse por un coeficiente de absorción o por una sección eficaz. El coeficiente de absorción total, m , es la suma de los coeficientes correspondientes a los tres procesos. Ahora bien, tanto m como los m_i dependen de la energía de los rayos g incidentes y de la naturaleza del material absorbente, por lo que requieren cálculos separados y concretos. Cada uno de los tres mecanismos predomina, para un dado material, en determinado rango de energía de la radiación incidente. La figura 7 muestra la importancia relativa de estos procesos en función de la energía de los rayos gamma y del número atómico del absorbente.

- **Efecto fotoeléctrico**

Un electrón libre no puede absorber completamente a un fotón ya que de esa manera no se conservarían simultáneamente la energía y el impulso. Esto se ve fácilmente analizando la interacción de un fotón y un electrón libre que se desplazan uno al encuentro del otro. La energía del sistema antes de la interacción es $hn + mc^2$. Si el fotón fuese absorbido en el choque sin otra consecuencia, en el sistema centro de masa luego de la interacción sólo quedaría el electrón en reposo, o sea la energía final sería $m_0 c^2$. Por conservación de energía. De esta manera, en el proceso fotoeléctrico toda la energía del fotón incidente, hn , es cedida a un electrón ligado de un átomo que resulta expulsado del mismo con una energía cinética.

- **Efecto Compton**

A medida que la energía de la radiación incidente aumenta, su longitud de onda decrece y hay una mayor tendencia a interactuar con los electrones individuales y no con el átomo en su conjunto como en el caso del efecto fotoeléctrico. Los fotones muy energéticos "ven" a los electrones orbitales exteriores, débilmente ligados, prácticamente como partículas libres y la

interacción puede considerarse como una colisión elástica entre un fotón y un electrón libre. el fotón no puede absorberse totalmente existiendo por lo tanto un fotón dispersado que se mueve en distinta dirección a la del cuanto original, con una energía y una cantidad de movimiento también diferentes.

La conservación de estas magnitudes para el sistema en su conjunto la garantiza el electrón que dispersa el fotón retrocediendo con la velocidad y en la dirección apropiadas. Este proceso, conocido como **efecto Compton**, constituye el mecanismo de absorción más importante para radiación γ con energías entre los 0,5 y los 10 MeV.

- **Creación de pares**

Este tercer mecanismo de absorción de la radiación electromagnética por la materia aparece cuando la energía de los fotones incidentes alcanza al doble de la energía en reposo de los electrones, o sea cuando $hn = 2 \times 0,511 \text{ MeV} = 1,022 \text{ MeV}$ creciendo a partir de allí su importancia con el aumento de la energía de la radiación gamma. Consiste en la creación de un par electrón-positrón a partir de un fotón que desaparece en la interacción. Este proceso debe tener lugar en el campo eléctrico existente en la vecindad de un núcleo al que se le entrega cierta energía de retroceso y cierta cantidad de movimiento de forma tal que se cumplan los respectivos principios de conservación.

Interacción de neutrones con la materia

La interacción de neutrones con la materia difiere fundamentalmente de la interacción que tienen las partículas cargadas y los rayos gamma.

Las interacciones entre neutrones y núcleos se dividen en dos grandes grupos: interacciones de dispersión y absorción. En las primeras, el resultado de la interacción es el intercambio de energía entre las partículas que colisionan, permaneciendo libre el neutrón luego del proceso. En las reacciones de absorción el neutrón es retenido en el núcleo formándose una nueva partícula.

Desde el punto de vista de los reactores nucleares las reacciones de absorción más importantes son las de captura radiactiva (con formación de un núcleo compuesto y posterior emisión radiactiva) y las de fisión.

- **Captura radiactiva**

Se denominan de este modo a las reacciones del tipo (n, γ) . Se producen cuando el núcleo absorbe el neutrón y se forma un núcleo compuesto que queda excitado. El núcleo excitado emite el excedente de energía en forma de radiación gamma. El núcleo resultante puede ser radiactivo o no. En el primer caso lo más probable es que sea emisor beta negativo buscando la estabilidad alterada por la modificación de la relación A/Z causada por el neutrón absorbido.

Prácticamente todos los átomos, del Hidrógeno (H) al Uranio (U), exhiben captura radiactiva. En los materiales fisibles este proceso es competitivo con el de fisión.

- **Dispersión inelástica**

Cuando un neutrón rápido experimenta dispersión inelástica, en una primera etapa es absorbido por el núcleo formándose el núcleo compuesto excitado. Posteriormente es emitido un neutrón de energía cinética menor, quedando el blanco en un estado excitado. O sea, parte o toda la energía de movimiento del neutrón incidente es empleada en la excitación del núcleo blanco, el que a continuación emite uno o varios fotones denominados **rayos γ de dispersión inelástica**. En estos procesos la energía cinética del sistema no se conserva y como la energía cinética del blanco es en general despreciable en comparación con la del neutrón incidente, en una interacción inelástica la energía del neutrón incidente debe ser mayor que la energía del primer nivel excitado.

- **Dispersión elástica**

Los neutrones con energías menores a 0,1 MeV no pueden perder energía por colisiones inelásticas por lo que se vio anteriormente. Para el caso de interacciones de dispersión elástica la única condición es que satisfaga el principio de conservación de la energía cinética sin que existan limitaciones en cuanto a la forma en que se distribuye esta energía entre el neutrón y el núcleo.

Hay dos alternativas para este tipo de reacción: la formación o no del núcleo compuesto. En ambos casos el núcleo bombardeado permanece en su estado fundamental y todo el proceso puede analizarse como la interacción de dos partículas clásicas donde se conserva la energía y la cantidad de movimiento.

Fuentes de radiación

Fuentes Naturales De Radiación

Aún antes que se desarrollara la capacidad de utilizar fuentes de radiación con fines útiles, el hombre ha estado expuesto a radiaciones ionizantes debido a la presencia de sustancias radiactivas en la tierra y la radiación de origen cósmico.

Radiación Cósmica

Los procesos energéticos que ocurren en el Universo dan lugar a radiaciones de partículas de alta energía que alcanzan la atmósfera terrestre. Se la denomina **Radiación Cósmica Primaria** y se origina en las galaxias y en las erupciones del sol. La radiación de origen galáctico está constituida principalmente por protones, partículas alfa, algunos núcleos atómicos y electrones. La energía de estas partículas es muy elevada (hasta 10^{18} eV). Las radiaciones solares están constituidas principalmente por protones y partículas alfa pero de mucha menor energía.

La Radiación Cósmica Primaria al interactuar con los elementos de la atmósfera (nitrógeno, oxígeno, argón) genera la denominada **Radiación Cósmica Secundaria** consistente en protones, neutrones, piones, kaones, mesones que a su vez generan diversos nucleídos llamados **cosmogénicos** como ^3H , ^7Be , ^{14}C y ^{22}Na .

Radiación Terrestre

Pueden distinguirse una **Radiación Primordial** existente desde el origen de la Tierra, una **Radiación Cosmogénica** resultante de las interacciones de la Radiación Cósmica con la atmósfera y la radiación proveniente de fuentes terrestres cuya significación radiológica ha aumentado debido a incrementos de concentración ocurridos en procesos tecnológicos (**NORM**).

Fuentes Artificiales De Radiación

El descubrimiento de los rayos x, la radiactividad a fines del siglo 19 y las propiedades de las radiaciones ionizantes y los materiales nucleares durante el siglo 20, dio lugar a la aplicación creciente de las fuentes de radiación en muy diversos campos.

Aplicaciones De Las Radiaciones Ionizantes

Las radiaciones ionizantes poseen propiedades que posibilitan su aplicación en **Medicina, Industria, Agricultura, Investigación**, ciertos **Productos de Consumo**. En materia de **Energía** y **Usos Bélicos**, estas radiaciones están asociadas con los materiales y procesos nucleares que liberan energía juntamente con materiales radiactivos y radiaciones.

Magnitudes y Unidades Radiológicas

Generalidades Sobre Magnitudes Radiológicas

Todas las magnitudes en el campo de la Radiología se pueden clasificar en cinco categorías:

- a) Radiometría, que trata con magnitudes asociadas a un campo de radiación. Tales son, cantidad (fluencia de partículas) y calidad (distribución espectral) de un haz de radiación.
- b) Coeficientes de interacción (atenuación, absorción, etc.). Trata con magnitudes asociadas a la interacción de la radiación con la materia. Permiten relacionar las magnitudes radiométricas con las magnitudes dosimétricas. Por ejemplo, los factores de conversión de fluencia a dosis.
- c) Dosimetría, Trata con magnitudes relacionadas con la medida de la energía absorbida y de su distribución. Las magnitudes dosimétricas son generalmente producto de magnitudes de las dos categorías anteriores. Se conciben como una medida física que se correlaciona con los efectos reales o potenciales de la radiación. Dosis absorbida.
- d) Radiactividad, Trata de las magnitudes asociadas con el campo de radiación producido por las sustancias radiactivas.
- e) Radioprotección, donde las magnitudes están relacionadas con el efecto biológico de las magnitudes dosimétricas, y que atienden tanto al tipo de radiación como a la naturaleza del medio irradiado. En este caso distinguiremos entre magnitudes de protección y operacionales.

Dosimetría:

- **Exposición**

Se define esta magnitud, como el cociente $X = dQ/dm$, donde dQ es el valor absoluto de la carga total de todos los iones de un mismo signo producidos en aire, cuando todos los electrones liberados por los fotones absorbidos en la masa dm sean detenidos completamente en el aire.

La definición de la exposición implica una serie de restricciones y consideraciones:

- a) Es una magnitud definida exclusivamente para un haz o campo de fotones (radiación X o gamma) en un medio específico, el aire.
- b) El efecto medido, es la ionización del aire, cuando la magnitud de importancia radiobiológica es la energía absorbida. Es una magnitud de paso hacia la dosis absorbida.
- c) Con las técnicas actualmente en uso, es difícil medir la exposición para energías inferiores a unos pocos keV, y por encima de unos pocos MeV. La unidad en el SI de la exposición es

el culombio por kilogramo, C/kg La unidad antigua y hoy obsoleta es el roentgen, (R).

- **Kerma**

El nombre de esta magnitud radiológica deriva de las iniciales de la definición breve inglesa (Kinetic Energy Released per unit MAss), y se define como el cociente dE_{tr}/dm , donde dE_{tr} es igual a la suma de todas las energías cinéticas iniciales de todas las partículas ionizantes cargadas, liberadas por partículas ionizantes no cargadas, en un material de masa dm .

La unidad en el SI de kerma es el julio/kilogramo y su nombre especial es gray (Gy). La unidad antigua de kerma es el rad.

- **Dosis absorbida**

La dosis absorbida, D , en un material dado se define (ICRU, 1998b) como el cociente $d\epsilon/dm$ donde $d\epsilon$ es la energía media impartida por la radiación a un material de masa dm .

La dosis absorbida, que es la magnitud dosimétrica de más interés, resulta válida para cualquier tipo de radiación, y requiere especificar el material en el que se cede la energía.

- **Transferencia lineal de energía**

Se define la transferencia lineal de energía, $L\Delta$, de un material para partículas cargadas, como el cociente de dE por dl , donde dE es la energía disipada por una partícula cargada al atravesar la longitud dl a causa de aquellas colisiones con electrones en las que la pérdida de energía es menor que Δ . La unidad es el J/m.

Radioprotección:

- **Equivalente de dosis en un punto, H**

El concepto de equivalente de dosis en un punto se introdujo por primera vez en 1962 para tener en cuenta la distinta eficacia biológica relativa de los diferentes tipos de radiación ionizante en los niveles bajos de exposición. En su versión más reciente, el equivalente de dosis, H , en un punto de un órgano o tejido se define (ICRP, 1991; ICRU, 1993) como el producto: $H = Q \cdot D$, donde D es la dosis absorbida y Q es el factor de calidad en ese punto.

La unidad en el SI es $J\ Kg^{-1}$ y su nombre especial es sievert (Sv). La tasa de equivalente de dosis es el cociente dH entre dt .

- **Dosis equivalente en un órgano, HT**

La dosis equivalente en un órgano o tejido T debida a la radiación R, $H_{T,R}$, se define (ICRP, 1991; ICRU, 1993) como: $H_{T,R} = w_R D_{T,R}$ donde $D_{T,R}$ es la dosis absorbida media para la radiación R en el órgano o tejido T y w_R es el factor de ponderación para la radiación R.

- **Dosis efectiva, E**

La dosis efectiva, E, se define (ICRP, 1991; ICRU, 1993) como: $E = \sum_T H_{T,R} w_T$, donde $H_{T,R}$ es la dosis equivalente en el órgano o tejido T y w_T es el factor de ponderación para dicho órgano.

Magnitudes operacionales:

Las magnitudes operacionales recomendadas fueron introducidas por ICRU en 1985 para diferentes aplicaciones de dosimetría personal y ambiental. Una descripción detallada de las mismas puede encontrarse en el informe ICRU 51 (ICRU, 1993).

Para la vigilancia de área se han introducido dos magnitudes que enlazan la irradiación externa con la dosis efectiva y con la dosis en la piel y el cristalino. Son el equivalente de dosis ambiental, $H^*(d)$ y el equivalente de dosis direccional, $H'(d, \Omega)$. Para la vigilancia individual se recomienda el uso del equivalente de dosis personal, $H_p(d)$.

- **Equivalente de dosis ambiental**

El equivalente de dosis ambiental, $H^*(d)$, en un punto de un campo de radiación, es el equivalente de dosis que se produciría por el correspondiente campo alineado en la esfera ICRU2 a una profundidad d sobre el radio opuesto a la dirección del campo alineado. Unidad en el SI es el $J\ kg^{-1}$ y su nombre especial es el sievert (Sv).

Para radiación fuertemente penetrante, se recomienda una profundidad de 10mm, lo cual se expresa como $H^*(10)$, mientras que para la débilmente penetrante se emplean 0,07mm para la piel y 3mm para el cristalino.

- **Equivalente de dosis personal**

El equivalente de dosis personal, $H_p(d)$, es el equivalente de dosis en tejido blando, por debajo de un punto especificado del cuerpo y a una profundidad apropiada, d. Unidad en el SI es el $J\ kg^{-1}$ y su nombre especial es el sievert (Sv).

Efectos Biológicos de las Radiaciones Ionizantes

El efecto nocivo de niveles bajos de radiación en la salud humana ha sido extensamente estudiado. Los datos epidemiológicos provenientes de poblaciones expuestas a explosiones atómicas, a exposición médica (diagnóstico y terapia) y a exposición ocupacional son temas en constante revisión.

Dependiendo de muchos parámetros complejos, cuando la radiación ionizante transfiere energía a un sistema biológico, provocará uno o más resultados finales. La incidencia general y/o la severidad del resultado final estarán relacionadas con la dosis absorbida por el sistema. Para organismos complejos como el humano, hay dos tipos de efectos relacionados con la dosis: somáticos y genéticos.

El daño somático se refiere al daño ocurrido en los tejidos del individuo irradiado, mientras que el daño genético se refiere al daño que afectará las generaciones futuras.

Relación Dosis-Efecto

a) Efectos somáticos: involucran primariamente a las células diploides. El efecto somático se manifestará en el individuo que absorbe la dosis de radiación, pudiendo clasificarse en dos tipos: efectos de relativa certeza (efectos determinísticos) y los que ocurren al azar o estocásticos (efectos no determinísticos).

- Los efectos determinísticos involucran altas dosis sobre porciones grandes del cuerpo. Éstos se caracterizan por tener un umbral de dosis por debajo de la cual no se observa ningún efecto, un corto período de latencia y una severidad que depende de la dosis. Los efectos determinísticos se pueden categorizar en efectos tempranos y tardíos.
- Los efectos tempranos ocurren dentro del primer año de la exposición y están relacionados con el número de células muertas, la reparación del daño producido y la tasa de recambio de la línea celular irradiada. Algunos ejemplos incluyen el eritema, la caída del pelo, la neumonitis radica y la enfermedad de radiación. Los efectos determinísticos tempranos pueden ser alterados fraccionando la dosis o administrándola en una infusión continua pero lentamente; en general un tejido puede soportar una dosis mucho mayor si ésta es fraccionada.
- Los efectos tardíos ocurren luego del año de recibida la dosis, están relacionados con el daño inicial producido por la dosis y el deterioro debido

a los mecanismos de reparación. Algunos ejemplos incluyen la queratosis, la fibrosis pulmonar y las cataratas. Los efectos determinísticos tardíos son menos influenciados por fraccionamiento de la dosis y serán proporcionales a la dosis total.

- Los efectos no determinísticos ocurren a niveles bajos de exposición a la radiación, en cuyo caso el daño será estocástico o estadístico en naturaleza: es posible predecir la proporción de una población dada de personas expuestas que será afectada, pero imposible predecir precisamente qué individuo en particular sucumbirá. No existe una dosis umbral demostrable y el daño se presenta como un pequeño incremento en la incidencia normal o espontánea y se expresa luego de un largo período de latencia.

b) Efectos genéticos: Describen las alteraciones genotípicas hereditarias resultantes de mutaciones en los genes o cromosomas de células germinales. Los efectos genéticos involucran primariamente las células germinales haploides. Los efectos genéticos muestran una relación dosis-efecto similar a los efectos estocásticos en que la descripción de incidencia es sólo válida en grandes poblaciones de individuos expuestos. A nivel individual, el efecto es estocástico o incierto y sólo puede ser definido como el riesgo asociado a la dosis.

Efectos de la Irradiación Celular a Nivel Molecular

La absorción de energía por radiación ionizante produce daño a nivel molecular por acción directa o indirecta. Por acción directa el daño ocurre como resultado de la ionización de los átomos de moléculas claves para el sistema biológico. Esto causa inactivación o alteración funcional de la molécula. La acción indirecta involucra la producción de radicales libres reactivos cuyo daño tóxico en moléculas claves resultará en un efecto biológico.

- a) Acción directa: la ionización directa en átomos de moléculas ocurre como resultado de la absorción de energía por efecto fotoeléctrico e interacción Compton. La ionización ocurre con todos los tipos de radiación, pero el daño predominante es provocado por aquellas radiaciones con alta LET. La absorción de energía suficiente para remover un electrón puede causar rupturas de uniones.

También puede ocurrir la excitación de átomos en moléculas claves resultando en rupturas de uniones. En este caso, la energía puede ser transferida a un sitio de unión más débil de la molécula causando la ruptura. También pueden ocurrir cambios tautoméricos, donde la energía de excitación puede causar predominancia de una forma molecular.

b) Acción indirecta: involucra la transferencia de energía a un átomo con el subsiguiente decaimiento a una especie de radical libre. Un radical libre es un átomo eléctricamente neutro con un electrón no ocupado en la posición orbital. El radical es electrofílico y altamente reactivo.

Dado que la molécula predominante en los sistemas biológicos es el agua, ésta es usualmente el intermediario entre la formación de radicales y la propagación.

La molécula de agua absorbe energía y se disocia en dos radicales con electrones no compartidos en la capa de valencia.

Los radicales libres se recombinan rápidamente para neutralizarse electrónicamente y orbitalmente. Sin embargo, cuando se generan muchos como en los elevados flujos de radiación, la neutralidad orbital puede ser lograda por dimerización (H_2) de los radicales de hidrógeno y la formación de peróxido de hidrógeno tóxico (H_2O_2).

El radical también puede ser transferido a una molécula orgánica en la célula. La vida media de los radicales libres simples ($H\cdot$ ó $OH\cdot$) es muy corta, y aunque generalmente son altamente reactivos, no viven lo suficiente para migrar del sitio de formación al núcleo celular.

Reacciones Bioquímicas con la Radiación Ionizante

Existe considerable evidencia que sugiere que los ácidos nucleicos, especialmente el ADN, son el blanco primario de daño celular causado por la radiación ionizante.

Las rupturas en la cadena de ADN pueden interrumpir la función molecular de distintas maneras. Se puede alterar la transcripción del código genético, así como la síntesis de la cadena del código (la imagen duplicada en espejo de la secuencia de bases).

En muchos casos, la ruptura de la doble cadena de ADN puede ser reparada por enzimas como la ADN polimerasa y la ADN ligasa, las que detectan los sitios de ruptura y los corrigen.

Las rupturas tienen menos probabilidad de ser reparadas antes de la mitosis y durante la transcripción y replicación, cuando la molécula de ADN existe en forma de cadena simple. También puede ocurrir una reparación incorrecta cuando una base es reemplazada por otra diferente o cuando las enzimas reparadoras realizan una lectura incorrecta.

Existe también considerable evidencia que apoya que el daño por radiación producido a la estructura de la cromatina es el mayor factor en la muerte de células

reproductoras, así como de mutaciones que conducen a efectos genéticos y carcinogénicos.

Efecto De La Radiación A Nivel Celular

La radiosensibilidad del tejido depende de varios factores. De acuerdo con los primeros radiobiólogos, la respuesta del tejido a la radiación es función de:

- el número de células indiferenciadas en el tejido,
- el número de células mitóticas activas,
- la cantidad de tiempo que las células permanecen activas en proliferación.

No está claro por qué la falta de diferenciación celular resulta en radiosensibilidad. Ha sido demostrado que las células indiferenciadas o en proceso de diferenciación son fácilmente destruidas por la radiación. Cuanto más tiempo las células permanecen en proliferación activa, mayor es la sensibilidad a la radiación.

Modificación de la injuria por radiación

Existen varios factores ambientales que pueden modificar en general el grado de daño debido a radiación. Estos factores físicos incluyen tasa de dosis y fraccionamiento, calidad de la radiación y temperatura. Además, un número de sustancias químicas pueden modificar el efecto de la radiación.

- a) Tasa de dosis y fraccionamiento: en general, cuanto menor es la tasa de entrega de la dosis de radiación y mayor el tiempo transcurrido entre las exposiciones, más resistente se vuelve el sistema biológico. Se cree que pueden ocurrir reparaciones de las lesiones subletales antes que se adicione nuevas lesiones, cuya acumulación es letal.

Llevado a la estructura celular, los eventos de irradiación muy próximos entre sí probablemente producirán daño letal en el ADN o en la estructura de la cromatina.

En cambio, si los eventos están separados por un período suficientemente largo, ocurrirá la reparación natural y la célula sobrevivirá. En el ADN, una ruptura simple puede ser reparada pero una ruptura de ambas cadenas es en general irreparable. Sin embargo, si las dos rupturas ocurren suficientemente separadas en el tiempo la reparación es posible. Además, si la ruptura ocurre en diferentes puntos de la molécula, el ADN no se romperá y la reparación también será posible.

- b) Calidad de las radiaciones: dado que las radiaciones con una alta LET depositan grandes cantidades de energía por unidad de distancia en su travesía a través de la materia, la posibilidad de múltiples lesiones en un corto período en las proximidades es muy alta. Por lo tanto, para la misma dosis total, las radiaciones con un alto LET son más letales que aquellas con bajo LET.
- c) Temperatura: mientras que muchas células son sensibilizadas al daño por radiación a altas temperaturas, varias aberraciones cromosómicas aumentan a bajas temperaturas. Esto es probablemente debido a la supresión de los procesos de reparación a bajas temperaturas. A efectos de la destrucción celular, los tejidos a altas temperaturas son más radiosensibles.
- d) Modificaciones químicas: muchas sustancias químicas naturales o adicionadas pueden modificar la sensibilidad a la radiación, si se encuentran presentes en las células y tejidos en forma previa a la exposición:

- **Agentes radiosensibilizantes:** El oxígeno disuelto en los tejidos aumenta la estabilidad y toxicidad de los radicales. El tejido normal no es significativamente afectado por el aumento de la presión de oxígeno, sin embargo, las células tumorales existentes en varios estados de oxigenación, incluyendo una gran población en hipoxia, se sensibilizarán al aumentar la presión de oxígeno. Un problema práctico es que el oxígeno difunde solamente hasta 150 μm más allá de la pared capilar y por tanto será ineficiente al no poder alcanzar muchas células hipóxicas situadas a mayor distancia.

Otras sustancias químicas pueden aumentar el daño por radiación, por ejemplo, los nitroimidazoles que incrementan la radiosensibilidad celular. Si bien el potencial de sensibilización de los nitroimidazoles es menor que la del oxígeno, estos componentes pueden difundir mucho más allá de la pared capilar que el oxígeno y pueden ser introducidos en el volumen tumoral vía aguja o catéter, aunque se debe tener en cuenta que son neurotóxicos.

- **Agentes radioprotectores:** son aquellos que, cuando están presentes antes de la irradiación, disminuyen el efecto de esta. Se cree que protegen a las células removiendo los radicales libres y produciendo hipoxia, pero también inhiben temporariamente la síntesis de ADN

dando tiempo a las enzimas reparadoras a completar la reparación de daño subletal.

Efectos de las radiaciones en los sistemas biológicos

Las células indiferenciadas, con rápida división son las más sensibles a los efectos de la radiación.

a) Sistema hematopoyético: las células del sistema hematopoyético y el sistema linfático relacionado son altamente sensibles a la muerte por radiación. Las más sensibles son las células madre o precursoras ("stem cells") de la médula ósea, las que normalmente dan lugar a todas las células sanguíneas circulantes y plaquetas, así como el tejido linfático encontrado en el bazo, hígado, ganglios linfáticos y timo.

Los glóbulos rojos maduros y las plaquetas circulantes son particularmente resistentes, lo cual es probablemente debido a la pérdida del núcleo. Los linfocitos circulantes son bastante sensibles y una caída en el valor normal puede indicar los niveles de radiación. Los efectos por la muerte de las células precursoras no serán vistos hasta días o semanas después, cuando las células maduras (resistentes a la radiación) sean removidas de la circulación. El efecto es la pancitopenia (depresión de todos los tipos celulares), resultante en hemorragia (por reducción plaquetaria), infección (por depresión de los glóbulos blancos) y anemia (por la caída en la producción de glóbulos rojos).

b) Sistema reproductor: las células del sistema reproductor son altamente sensibles a los efectos de la radiación.

En el hombre, las células precursoras y la espermatogonia proliferativa en los testículos son altamente sensibles; sin embargo, el esperma maduro muestra una resistencia considerable. También son resistentes las células intersticiales de los testículos las cuales controlan la producción hormonal y los caracteres secundarios. Por lo tanto, una dosis esterilizadora no afectaría el comportamiento masculino.

La esterilidad no es vista en forma inmediata sino algunos meses después dado que la espermatogénesis lleva de 64 a 72 días y las formas maduras son resistentes, sin embargo, pueden sustentar daño genético hereditario. Aunque las dosis bajas pueden producir esterilidad, en general el efecto es temporal y el recuento de espermatozoides se normaliza luego de 1 o 2 años.

En la mujer, la radiación destruye a ambos, el óvulo y el folículo maduro, lo cual también reduce la producción hormonal. Por lo tanto, la esterilidad radiogénica puede ir acompañada de una menopausia artificial con efecto significativo sobre las características sexuales. La dosis total, la tasa de dosis y la edad son importantes; las mujeres jóvenes son más capaces de recuperar la fertilidad que las mayores.

- c) Sistema gastrointestinal (GI): el tracto GI es muy sensible a las radiaciones. Luego de una irradiación, el primer cambio observado ocurre en el revestimiento epitelial del intestino delgado. Los efectos del daño intestinal incluyen diarrea con la consiguiente pérdida de fluidos y electrolitos. Los efectos sobre el tracto GI superior incluyen vómitos y disminución de la secreción ácido-péptica. La destrucción del recubrimiento epitelial de la faringe y el esófago resulta en sequedad y dolor e inflamación de garganta.

- d) Piel: la piel es relativamente radiosensible. El efecto radiobiológico dependerá de la dosis total, la tasa de dosis y el tipo de radiación. Los efectos biológicos sobre la piel incluyen eritema y depilación temporal. A muy altas dosis ocurre depilación definitiva y destrucción de subórganos incluyendo vasos sanguíneos y glándulas sebáceas y sudoríparas. La respuesta de la piel a la radiación ionizante se conoce como dermatitis rádica.

- e) Sistema nervioso central: generalmente es resistente al efecto de las radiaciones. Se requieren de dosis muy altas para causar efectos en el cerebro y el sistema nervioso. El factor limitante para la irradiación al sistema nervioso central es la vasculatura. Los nervios periféricos son altamente resistentes a los efectos de la radiación.

- f) Cristalino: con dosis bajas puede ocurrir daño significativo al cristalino produciendo cataratas (opacificación definitiva del cristalino). El período de latencia es de 2 a 35 años.

- g) Otros órganos: la mayoría de las vísceras sólidas muestran en general una radioresistencia relativa. En general, las estructuras más sensibles de estos órganos son el tejido conectivo y el vascular, aunque se puede causar daño funcional con dosis altas.

- h) Feto: efectos sobre el feto se han visto con dosis relativamente bajas. El feto constituye un sistema altamente proliferativo con muchas células indiferenciadas, por lo tanto, es extremadamente sensible a los efectos de la radiación. El efecto no solamente depende de la dosis sino también de la edad gestacional al momento de la irradiación. Durante el primer trimestre el daño es mayor y a menudo causa aborto espontáneo. Durante el desarrollo y diferenciación de los órganos, la irradiación resultará en una mayor incidencia de anomalías orgánicas congénitas.
- i) Irradiación de cuerpo entero: en los humanos, la irradiación aguda prolongada de cuerpo entero resulta en un complejo conjunto de síntomas clínicos conocidos colectivamente como síndrome de irradiación aguda. La patología exacta es dosis dependiente. Se pueden reconocer 4 etapas:
- una fase inicial en la cual hay una respuesta de shock,
 - un período de latencia donde la población de células viables radioresistentes mantiene las funciones,
 - la enfermedad manifiesta donde aparecen los síntomas dado que la población de células viables disminuye como resultado de la muerte de las precursoras y la no renovación de la producción celular, y el desenlace, el cual consistirá en la recuperación o la muerte, dependiendo del grado de deterioro sufrido.

Efectos somáticos estocásticos

En organismos expuestos a radiaciones ionizantes se ha demostrado leucemia y tumores sólidos (malignos y benignos). El mecanismo exacto del cáncer radiogénico y en realidad de todos los cánceres, no es bien comprendido aún. Se han presentado muchas teorías, algunas de ellas basadas en que en todos los organismos existirían genes cancerígenos (oncogenes) y genes supresores que previenen su expresión. Las posibles causas de cáncer radiogénico incluyen:

El daño de los genes supresores radioactivos al azar podría permitir la expresión de los oncogenes.

Genes normales podrían mutar en oncogenes por daño subletal de la radiación. La supresión del sistema inmunitario por altas dosis de radiación, el cual normalmente neutraliza la formación de nuevas células cancerosas.

- a) Leucemia. La leucemia fue reconocida tempranamente en los primeros médicos radiólogos y en sobrevivientes de las bombas atómicas, como un

efecto crónico de la exposición a las radiaciones. Si bien no se ha demostrado una relación lineal entre bajas dosis e inducción de leucemia, como en el cáncer, se asume que esta relación existe.

- b) Tumores malignos. El desarrollo de tumores malignos sólidos luego de la exposición a la radiación es un efecto bien documentado. El riesgo no puede ser demostrado a bajas dosis por falta de datos, los números de riesgo han sido más bien derivados de poblaciones expuestas a altas dosis. Dado que el cáncer tiene una alta incidencia en la población y el cáncer radiogénico es bajo en frecuencia, para demostrar un aumento de la incidencia de cáncer se necesitarían grandes poblaciones de personas expuestas. Como además todos los cánceres asociados con radiaciones ocurren también en ausencia de radiación, es imposible demostrar una relación causa-efecto definitiva. Sin embargo, se asume que a dosis bajas la tasa de dosis no es relevante como factor de riesgo, sino que sólo la dosis total es importante. Esto implica que la dosis de radiación es acumulativa en su efecto respecto al cáncer.
- c) Efecto benéfico de la radiación a baja dosis. En los últimos años se viene debatiendo el posible efecto benéfico de la irradiación a bajas dosis, existiendo evidencia preliminar del mismo. Dicho efecto radicaría en que las dosis subletales permitirían desarrollar los mecanismos moleculares y enzimáticos de reparación, que luego serían más eficientes al enfrentar agresiones mayores, ya sean o no por irradiación.

Principios de Protección Radiológica

La protección radiológica tiene por finalidad la protección de los individuos, de sus descendientes y de la humanidad en su conjunto, de los riesgos derivados de aquellas actividades que debido a los equipos o materiales que utilizan suponen la exposición a radiaciones ionizantes.

El marco básico de la protección radiológica necesariamente tiene que incluir valoraciones tanto de tipo social como científicas, porque la finalidad principal de la protección radiológica es proporcionar un nivel apropiado de protección para las personas y el medio ambiente, sin limitar indebidamente los beneficios que se obtienen del uso de la radiación. Además, se debe suponer que incluso dosis pequeñas de radiación pueden producir algún efecto perjudicial.

Dado que existen umbrales (valores de la dosis por debajo de los cuales no se producen) para los efectos deterministas, es posible evitar dichos efectos limitando las dosis recibidas por las personas. No es posible, sin embargo, evitar del todo los efectos estocásticos porque no existe evidencia científica de un umbral para ellos, limitando las dosis sólo podemos reducir su probabilidad de aparición.

Como consecuencia del estado actual de conocimientos de los efectos biológicos de las radiaciones, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) **considera que el objetivo principal de la protección radiológica es evitar la aparición de efectos biológicos deterministas y limitar al máximo la probabilidad de aparición de los estocásticos.**

Desde 1928, existe un organismo internacional que se preocupa de la protección radiológica (protección de las personas y del medio ambiente contra los efectos de las radiaciones ionizantes): la ICRP, que emite una serie de recomendaciones. Los tres principios básicos de las recomendaciones actuales de la ICRP son los que se expresan a continuación.

Las Normas básicas internacionales de seguridad: Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación, se basan en los siguientes principios de seguridad establecidos en los Principios fundamentales de seguridad:

Principio 1: Responsabilidad de la seguridad

La responsabilidad primordial de la seguridad debe recaer en la persona u organización a cargo de las instalaciones y actividades que generan riesgos radiológicos.

Principio 2: Función del gobierno

Debe establecerse y mantenerse un marco de seguridad jurídico y gubernamental eficaz, que incluya un órgano regulador independiente.

Principio 3: Liderazgo y gestión en pro de la seguridad

Deben establecerse y mantenerse un liderazgo y una gestión que promuevan eficazmente la seguridad en las organizaciones que se ocupan de los riesgos radiológicos, y en las instalaciones y actividades que los generan.

Principio 4: Justificación de las instalaciones y actividades

Las instalaciones y actividades que generan riesgos radiológicos deben reportar un beneficio general.

Principio 5: Optimización de la protección

La protección debe optimizarse para proporcionar el nivel de seguridad más alto que sea razonablemente posible alcanzar.

Principio 6: Limitación de los riesgos para las personas

Las medidas de control de los riesgos radiológicos deben garantizar que ninguna persona se vea expuesta a un riesgo de daños inaceptable.

Principio 7: Protección de las generaciones presentes y futuras

Deben protegerse contra los riesgos radiológicos las personas y el medio ambiente del presente y del futuro.

Principio 8: Prevención de accidentes

Deben desplegarse todos los esfuerzos posibles para prevenir los accidentes nucleares o radiológicos y para mitigar sus consecuencias.

Principio 9: Preparación y respuesta para casos de emergencia

Deben adoptarse disposiciones de preparación y respuesta para casos de emergencia nuclear o radiológica.

Principio 10: Medidas protectoras para reducir los riesgos radiológicos existentes o no reglamentados

Las medidas protectoras para reducir los riesgos radiológicos existentes o no reglamentados deben justificarse y optimizarse.

Los tres principios generales de la protección radiológica, que se refieren a la justificación, la optimización de la protección y la aplicación de límites de dosis, se formulan en los principios de seguridad 4, 5, 6 y 10.

Protección Radiológica: del trabajador, del público y de los pacientes

Tipos de situación de exposición

A los efectos de establecer requisitos prácticos de protección y seguridad, se debe hacer una distinción entre tres tipos de situación de exposición: las situaciones de exposición planificadas, las situaciones de exposición de emergencia y las situaciones de exposición existentes:

La situación de exposición planificada es una situación de exposición que surge a raíz de la utilización planificada de una fuente o de una actividad planificada que tiene como resultado una exposición debida a una fuente. Puesto que pueden adoptarse disposiciones para la protección y la seguridad antes de iniciar la actividad en cuestión, las exposiciones conexas y la probabilidad de que se produzcan pueden limitarse desde el principio. Los principales medios de controlar la exposición en situaciones de exposición planificadas son el diseño apropiado de instalaciones, equipo y procedimientos operacionales, y la capacitación.

En las situaciones de exposición planificadas cabe prever que haya cierto grado de exposición. Cuando no existe la certeza de que la exposición se vaya a producir, sino que esta podría ser resultado de un accidente o deberse a un suceso o una serie de sucesos que podrían darse, pero no es seguro que así sea, esto se denomina "exposición potencial".

La situación de exposición de emergencia es una situación de exposición que se da como resultado de un accidente, acto doloso o cualquier otro suceso inesperado, y requiere la pronta adopción de medidas para evitar o reducir las consecuencias adversas. Deben estudiarse medidas preventivas y mitigadoras antes de que se presente una situación de exposición de emergencia. Sin embargo, una vez que esa situación se produce, las exposiciones solo pueden reducirse mediante la aplicación de medidas protectoras.

La situación de exposición existente es una situación de exposición que ya existe cuando tiene que tomarse una decisión sobre la necesidad de control. Entre las situaciones de exposición existentes figuran las situaciones de exposición a la radiación de fondo natural, así como las de exposición debida a materiales radiactivos residuales provenientes de prácticas anteriores que no estuvieron sometidas a control reglamentario o que permanecen una vez terminada la situación de exposición de emergencia.

El Programa de Protección y Seguridad Radiológica debe estructurarse en el marco del concepto de Cultura de la Seguridad. Esta expresión significa introducir pautas de comportamiento que en general implican un cambio cultural. En efecto, el ser humano no es proclive a pensar en los innumerables factores de riesgo que pueden afectar su vida o actividades y en la manera de prevenirlos. El trabajador y todos los involucrados en una instalación con fuentes de radiación deben desarrollar su actividad tomando conciencia de que su labor y responsabilidades están relacionadas con fuente de riesgos y que sus conductas, actitudes y previsiones pueden influir significativamente en la atenuación o agravamiento de tales riesgos.

El monitoreo ambiental y personal constituye un aspecto fundamental de cualquier sistema de protección radiológica porque, en última instancia, sólo puede medirse

su efectividad mediante la evaluación directa o indirecta de las dosis recibidas por los trabajadores a intervalos regulares de tiempo.

En el Programa de Protección y Seguridad Radiológica deben consignarse las responsabilidades de Empleadores, Personas Autorizadas, Oficial de Seguridad, del Comité en Protección Radiológica y de los Expertos Calificados.

Las Responsabilidades de los Empleadores y Personas Autorizados consisten en:

- Establecer una Política de Protección Radiológica, Procedimientos y Una Organización que facilite su implementación.
- Implantar el Sistema de Limitación y Restricciones de Dosis acentuando el énfasis en la Optimización de la Protección Radiológica
- Establecer procedimientos para el Registro de Decisiones sobre Protección Radiológica y la Comunicación a las partes interesadas.
- Priorizar toda concepción del Diseño y adopción de Medidas Técnicas que contribuya a aumentar el grado de seguridad intrínseca de la instalación durante su operación.
- Asegurar la correcta instalación, provisión, mantenimiento y control de calidad de los equipos y servicios de Protección Radiológica.
- Proveer Elementos de Protección Personal apropiados.
- Asegurar la disponibilidad de Instrumentos de Monitoreo y servicios de Dosimetría Personal.
- Asegurar la Capacitación y Entrenamiento en Protección Radiológica y aspectos técnicos inherentes a la práctica a desarrollar.
- Proporcionar un adecuado sistema de Vigilancia de la Salud.
- Organizar el mantenimiento de Registros.
- Coordinar acciones con los representantes laborales.
- Promover la Cultura de la Seguridad.

Son Responsabilidades de los Trabajadores:

- Cumplir los procedimientos y reglas correspondientes a cada área.
- Utilizar los elementos de monitoreo personal.
- Utilizar los elementos de protección Personal.
- Cooperar con el empleador en lo relativo a Protección Radiológica.
- Facilitar información sobre su trabajo.
- Evitar cualquier acción contraria a la PSR.
- Recibir entrenamiento.

Clasificación de Áreas

Clasificación de Zonas

El Supervisor Protección Radiológica (SPR) realizará la clasificación de los lugares de trabajo de acuerdo con la evaluación de las dosis anuales previstas, el riesgo de dispersión de la contaminación y la probabilidad y magnitud de exposiciones potenciales.

A tal efecto, se identificarán y delimitarán todos los lugares de trabajo en los que exista la posibilidad de recibir dosis superiores a los límites de dosis establecidos para los miembros del público, y se establecerán las medidas de Protección Radiológica aplicables. Dichas medidas deberán adaptarse a la naturaleza de las instalaciones y de las fuentes, así como a la magnitud y naturaleza de los riesgos.

El alcance de los medios de prevención y vigilancia, así como su naturaleza y calidad, deberán estar en función de los riesgos vinculados a los puestos de trabajo que impliquen una exposición a las radiaciones ionizantes.

- Zona vigilada Aquella en la que existe probabilidad de recibir dosis superiores a los límites de dosis para los miembros del público, siendo muy improbable recibir dosis efectivas superiores a 6 mSv o dosis equivalentes superiores a los 3/10 de los límites de dosis equivalentes para el cristalino, piel y extremidades.
- Zona controlada Aquella en la que existe probabilidad de recibir dosis efectivas superiores a 6 mSv o dosis equivalentes superiores a los 3/10 de los límites de dosis equivalente para el cristalino, piel y extremidades. En esta zona será necesario establecer procedimientos de trabajo con objeto de reducir la exposición a la radiación ionizante, evitar la contaminación radiactiva o prevenir y limitar la probabilidad y magnitud de accidentes radiológicos o sus consecuencias. Dentro de las zonas controladas pueden existir algunas que, por sus características y en función del riesgo radiológico, requieran una clasificación más restrictiva, como la considerada en los apartados siguientes:
 - Zona de permanencia limitada Aquella en que existe un riesgo de recibir una dosis superior a los límites de dosis si se permanece en ella durante toda la jornada laboral completa (50 semanas / año, 5 días / semana y 8 horas / día).
 - Zona de permanencia reglamentada Aquella en que existe riesgo de recibir dosis superiores a cualquiera de los límites de dosis en cortos períodos de tiempo y que requiere prescripciones especiales desde el punto de vista de la optimización.

- Zona de acceso prohibido Aquella en que existe riesgo de recibir, en una exposición única, dosis superiores a los límites de dosis.

Es útil clasificar las áreas de trabajo de acuerdo con las precauciones a adoptar para mantener un adecuado nivel de Protección y Seguridad Radiológica, no tanto en función de las dosis que los trabajadores pueden recibir sino en función de la influencia que el desempeño de estos pueda tener en la Protección y Seguridad Radiológica.

Requerimientos para Áreas Controladas

Limitación de acceso mediante barreras físicas e interlocks.

en los casos de fuentes móviles se deben emplear barreras móviles. debe existir una adecuada señalización e instrucciones para el acceso.

el acceso debe restringirse exclusivamente a personas apropiadamente entrenadas y autorizadas. los procedimientos deben ser controlados. en la entrada se deben proveer monitores, ropa protectora si se trata de áreas en las que se opere con fuentes abiertas.

En tal caso a la salida deben efectuarse controles de contaminación y debe disponerse de duchas y lavabos. estas áreas deben contar con monitoreo ambiental y personal.

Requerimientos para Áreas Supervisadas

Estas áreas requieren una vigilancia periódica y en general es suficiente el control de las dosis a través de Monitoreo Ambiental.

Propuesta de clasificación de áreas para Radioterapia y Medicina Nuclear.

Teleterapia:

Cuando los equipos están en funcionamiento la clasificación de las zonas es:

- Zona vigilada: Puesto de control.
- Zona de acceso prohibido: Interior de la sala.

Cuando los equipos no están en funcionamiento se deben clasificar como:

- Zona de libre acceso: Puesto de control.
- Zona controlada: Interior de la sala.

Braquiterapia:

- Zona controlada: gammateca y acceso a las habitaciones.

- Zona de permanencia limitada: habitaciones con pacientes portadores de fuentes.

Medicina Nuclear:

- Zona vigilada: almacén de residuos radiactivos.
- Zona de permanencia limitada: habitaciones con pacientes en tratamiento metabólico.
- Zona controlada: cámara caliente, áreas de administración de dosis, y zonas de circulación y estancia de pacientes inyectados.

Señalización

El riesgo de irradiación vendrá señalizado mediante su símbolo internacional: un "trébol" enmarcado por una orla rectangular del mismo color y de idéntica anchura que el diámetro del círculo interior del mismo.

Cuando exista solamente riesgo de radiación externa y el riesgo de contaminación sea despreciable, el "trébol" vendrá rodeado de puntas radiales.

Si el riesgo es de contaminación y el de radiación es despreciable el "trébol" irá sobre campo punteado. Si existen ambos riesgos irá rodeado de puntas radiales y sobre campo punteado. Además, en la parte superior de la señal, una leyenda nos indicará el tipo de zona, y en la inferior otra el tipo de riesgo.

Los colores de los "tréboles" indicarán la clasificación de la zona, en orden creciente al riesgo asociado, éstos son:

- Gris azulado: Zona vigilada.
- Verde: Zona controlada.
- Amarillo: Zona de permanencia limitada.
- Naranja: Zona de permanencia reglamentada.
- Rojo: Zona de acceso prohibido.

Las señales se colocarán bien visibles a la entrada de las correspondientes áreas y en los lugares significativos de ellas. En las zonas que no tienen una clasificación permanente se colocará junto a la señal preceptiva un cartel indicando las restricciones aplicables.

Control de la exposición de mujeres, visitantes y trabajadores temporarios

El control de la exposición ocupacional de mujeres embarazadas, o de las que se presume su gravidez, debe brindar un nivel de protección para el embrión comparable al proporcionado para los miembros del público.

La ICRP considera que esa condición se cumple, si la exposición de la madre previa a la

confirmación del embarazo se produce en el marco del sistema de protección recomendado por dicha Comisión. En base a lo expresado se reitera que la ICRP no recomienda ningún límite de dosis ocupacional especial para la mujer hasta tanto se tenga la presunción de su embarazo.

Una vez confirmado el embarazo, se debe proteger al embrión mediante la aplicación de un límite de dosis equivalente de 2 mSv en la superficie del abdomen de la mujer embarazada y la limitación de las incorporaciones de radionucleidos a 1/20 del Límite Anual de Incorporación (ALI).

Los **visitantes** se considerarán miembros individuales del público. Aunque no se requiere su control radiológico es aconsejable alguna dosimetría externa individual sencilla y la verificación de la contaminación.

Los trabajadores temporarios, tales como becarios, investigadores, estudiantes y contratistas, que realicen trabajos que implique exposición a las radiaciones se deberán someter, por lo menos, a las mismas normas de control radiológico que se aplican a los trabajadores permanentes

Cultura de Seguridad

La naturaleza del concepto de cultura de la seguridad, firmemente basada en elementos y enfoques de la sociología y la psicología del comportamiento de los individuos y las organizaciones, obliga a remitirse al significado y alcance del concepto de cultura, en sentido amplio y general. Es necesario partir de una comprensión del concepto de cultura, de sus particularidades y sus métodos y formas de transformación para aplicarlos adecuadamente al entorno tecnológico en que operan la protección y seguridad radiológica y física de las fuentes de radiación y producir al mismo tiempo el cambio cultural deseado.

La cultura es un concepto complejo, como se desprende de la abundante información e investigación que existe en este campo y de las numerosas definiciones que pueden encontrarse según el contexto o la perspectiva desde la que se aborde. Palabras como 'valores', 'creencias', 'actitudes', 'percepciones',

'comportamientos', 'conocimientos', 'hábitos', 'tradiciones', 'rituales' son frecuentemente utilizadas para definir la cultura.

La definición de la cultura como 'la forma en que hacemos las cosas' es una de las más simples y difundidas. La cultura se asocia con las prácticas comunes, los valores compartidos y las percepciones que van a influir en la elección de los comportamientos que se adoptarán en un entorno determinado, sea laboral o fuera de éste.

Una de las primeras definiciones de la cultura fue la formulada por el etnólogo Edward B. Tylor en 1871, a saber: "Cultura.... es aquel TODO complejo que incluye el conocimiento, las creencias, el arte, la moral, el derecho, las costumbres, y cualesquiera otros hábitos y capacidades adquiridos por el hombre..."

De las definiciones existentes de la cultura, la que más ha influido en el desarrollo del concepto de cultura de la seguridad es, probablemente, la del psicólogo social Edgar Schein, que dice: "La cultura es un patrón de suposiciones básicas inventadas, descubiertas o desarrolladas por un grupo dado según las fue aprendiendo al enfrentar los problemas de la adaptación externa (la supervivencia) y de la integración interna (la convivencia), que ha evolucionado con el tiempo y se ha transmitido de generación en generación".

La cultura no debería entenderse como algo simple o de fácil interpretación. Los comportamientos y las actitudes que frecuentemente observamos son solo manifestaciones visibles de la cultura, pero no su esencia. Son el 'qué o cómo', pero no el 'por qué'.

Cambio Cultural

El proceso de cambio cultural se subordina a una serie de particularidades de la cultura que se tendrán en cuenta en los esfuerzos de fomento y desarrollo de la cultura de la seguridad en cualquier sector, a saber, que la cultura:

- a) Es un fenómeno profundo que opera en tres niveles, siendo el de las suposiciones básicas el nivel determinante. Por lo tanto, su abordaje y transformación no son procesos simples ni superficiales;
- b) Es estable, puesto que se basa en creencias arraigadas en el tiempo por convencimiento, conveniencia o por haber funcionado bien en el pasado. En consecuencia, su cambio o modificación puede generar resistencia y ansiedad;
- c) Se basa en patrones asumidos y compartidos por un grupo y, en consecuencia, la modificación de antiguos patrones, hábitos o costumbres requiere que el grupo perciba las nuevas propuestas como beneficiosas y

- convenientes, a fin de asumirlas y compartirlas colectivamente como organización. El cambio de unos pocos no significa un cambio cultural en la organización. Se requiere un efecto colectivo o al menos mayoritario;
- d) Está relacionada con el entorno para adecuarse o adaptarse, y sobrevivir. Esto sugiere que la modificación de los entornos puede favorecer el cambio cultural deseado;
 - e) Es un elemento social para la interacción y convivencia con sus semejantes. De ahí que los miembros de una organización pueden ejercer un efecto transformador de la cultura;
 - f) Opera de forma inconsciente, es decir, que para producir un cambio cultural será preciso descifrar fundamentos no conscientes de la actuación;
 - g) Evoluciona, no es estática, lo que hace posible trabajar sobre la cultura y cambiarla; 17 (h) Se aprende, no se determina genéticamente, lo que permite el proceso de inducirlo;
 - h) Se trasmite con el tiempo, lo que asigna un papel importante a los líderes, fundadores, formadores y otros agentes de cambio como transmisores de valores;
 - i) No es un ente aislado, rara vez es homogéneo, lo que obliga a tomar en consideración que incluso una cultura dominante puede verse afectada por otras culturas o subculturas, tanto internas como externas;
 - j) Es amplia y multifactorial, por lo que descifrar todos los elementos de la cultura puede ser una tarea ardua e interminable, siendo conveniente enfocar los esfuerzos en determinadas aristas de la cultura que se consideran importantes para el cambio, de forma que esta tarea se pueda realizar más fácilmente;
 - k) Es de lenta modificación, lo que significa que no se pueden anticipar o esperar cambios a nivel cultural de forma inmediata ni a corto plazo, ni siquiera cuando son inducidos por una acción consciente externa, pues dependen de que emerjan o se descubran, se desarrollen y se asuman nuevas suposiciones o creencias básicas sobre la forma de hacer las cosas, mejor y diferente a como se venían haciendo.

La cultura de la seguridad en las organizaciones que realizan actividades con fuentes de radiación es el conjunto de características y actitudes, en las organizaciones, sus directivos y sus trabajadores, que aseguran que, como prioridad absoluta, las cuestiones de seguridad reciben la atención que merecen debido a su importancia.

Conviene destacar que la cultura de la seguridad:

- Abarca tanto el componente individual (los directivos y trabajadores) como el componente colectivo (la organización) en su relación con la seguridad;
- Se basa en la características y actitudes, que incluyen tanto el entorno de seguridad creado en la organización, como la actitud de los individuos para responder a ese entorno y beneficiarse de él en aras de la seguridad;
- Establece el carácter absoluto de la prioridad de la seguridad con respecto a otros intereses y objetivos que pueda tener la organización o sus directivos y trabajadores;
- Abarca los aspectos tanto de la protección y seguridad radiológica como de la seguridad física de las fuentes de radiación.

Instrumentación y mediciones

Las radiaciones ionizantes, por su naturaleza, requieren para su detección el empleo de sistemas de detección. Estos ponen en evidencia la presencia de un campo de radiaciones, mediante la generación de algún tipo de señal que el observador pueda comprender, brindándole consecuentemente información cualitativa o cuantitativa acerca de las radiaciones de interés.

Definiciones y conceptos necesarios.

Potencial de ionización: Es la energía mínima requerida para remover un electrón externo de los átomos o moléculas.

Energía de ionización: La energía promedio necesaria para remover un electrón. La radiación ionizante también remueve electrones de los niveles internos.

Modo de Operación

a. Pulso: Para tasa de contaje baja. Espectroscopia.

b. Corriente: Para Tasa de contaje alta.

Modelo de un detector ideal:

- Consiste en una cierta cantidad de materia sobre la que incide la radiación a observar.
- La radiación incidente interactúa sobre el trozo de material según los procesos estudiados.
- El resultado de dicha interacción es la aparición de una magnitud medible.
- Esta magnitud se puede correlacionar con una carga eléctrica.
- La carga eléctrica da lugar a una señal eléctrica (un pulso de tensión o una corriente)
- La señal contiene información de la calidad y cantidad de energía depositada en el material.

Ejemplo: Una persona es un detector ideal.

Variables a tener en cuenta en un sistema de detección. G-M; contador proporcional y cámara de ionización.

- Calidad de la radiación.
- Sección eficaz del material (ventana, gas).
- Tensión de polarización.
- Volumen del detector.
- La densidad del material.
- Procesos de colección incompleta.

Tipos de sistemas detectores de radiación

- Gaseosos
- Semiconductores
- Por centelleo
- Por trazas
- Detección de Neutrones
- Por gas radón
- Tipo film (emulsión fotográfica)
- Termoluminiscentes
- Radiofotoluminiscientes

Detectores gaseosos

Inmediatos y por ionización:

- Cámara de ionización
- Contador proporcional
- Geiger Müller

Los detectores gaseosos están básicamente constituidos por un recinto, el cual contiene un gas, sometido a un campo eléctrico producido por una diferencia de potencial aplicada entre dos electrodos (uno de los cuales, el cátodo, contiene ese gas).

cuando dicho dispositivo se expone a un campo de radiación, la interacción de las partículas ionizantes con el gas que llena el recinto o con el material de sus paredes hace que se generen pares de iones (uno de carga eléctrica positiva y otro de carga eléctrica negativa).

Estos iones, en presencia del campo eléctrico, se aceleran en dirección a los electrodos polarizados eléctricamente con signo contrario.

Después de haber recorrido la distancia que los separa de los respectivos electrodos, las cargas eléctricas circulan por el circuito exterior de polarización, configurando la señal eléctrica correspondiente.

Cámara de Ionización

La cámara de ionización está constituida por un recipiente lleno de gas, en el que se disponen dos electrodos separados una cierta distancia y sometidos a una diferencia de potencial.

Estos monitores suelen suministrarse con una doble cubierta, es decir, además de la pared de la cámara, tienen una cubierta suplementaria separable del detector. La cubierta separable, equivale por sus características a los primeros milímetros de tejido humano (piel), por lo que el detector recibirá, con este aditivo colocado, sólo la radiación más penetrante que llega a la profundidad del organismo, obteniéndose la llamada DOSIS PROFUNDA. Esta dosis es casi siempre inferior al valor que se mide cuando la cubierta equivalente a la piel se retira, pues en ese momento llega al detector toda la radiación y se habla de la obtención de la dosis piel o superficial.

Las cámaras de ionización se clasifican, atendiendo a la forma de los electrodos, en planas o cilíndricas, según estén dotadas de electrodos planos-paralelos, o cilíndricos (formados por un electrodo en forma de cilindro hueco y el otro, un alambre o varilla en disposición coaxial).

Para el llenado de las cámaras se usan varios tipos de gases, desde aire a la presión atmosférica, hasta gases nobles, en especial argón.

La corriente generada en la cámara es generalmente muy pequeña, por lo que necesita de una posterior amplificación antes de su medida, utilizando para ello un circuito electrónico alimentado por las propias baterías de la cámara.

Respecto al campo de utilización de las cámaras de ionización debe decirse, que se usan

preferentemente para la detección de fotones (radiación X y gamma) y partículas beta. La detección de partículas beta se alcanza a través de ventanas suficientemente delgadas.

El rendimiento (fracción de radiación que detecta respecto del total que atraviesa el volumen útil del detector) de detección se aproxima al 100% para partículas alfa y beta. En cambio, para fotones sólo se logran rendimientos del 1%. La visualización de la medida se realiza en un microamperímetro o en una pantalla digital de cristal líquido, dando en ambos casos las lecturas en unidades de tasa de dosis ó de dosis integrada. Los visualizadores digitales llevan incorporados un indicador del estado de las baterías.

Contadores proporcionales

Al aumentar la tensión de una cámara de ionización por encima del límite superior de la zona de saturación, se presenta un fenómeno de multiplicación de carga, al unirse a la ionización primaria la secundaria, originada por los electrones que, acelerados hacia el ánodo, ganan energía suficiente para ionizar por impacto moléculas de gas neutras.

Tanto en contadores proporcionales como en Geiger, se emplea por lo general una geometría coaxial, de cátodo cilíndrico y ánodo en forma de hilo metálico muy fino.

De esta forma, el campo eléctrico en las proximidades del hilo es ya suficientemente intenso para alcanzar las zonas Geiger o proporcional, aplicando una tensión de polarización del orden de KV. El factor de multiplicación gaseosa depende de la tensión de polarización, pudiendo variar en el intervalo entre 1 y 107.

El orden de magnitud de los impulsos de tensión generados por un contador proporcional es de 0.1 voltio, que, aunque mucho mayor que en la cámara de ionización, requiere como en esta una amplificación de la señal.

El contador proporcional trabaja satisfactoriamente como espectrómetro (detector de partículas o fotones, y, además, mide la energía de los eventos ionizantes), siempre que la partícula ionizante disipe la totalidad de su energía en el volumen sensible del detector.

La resolución en energía, debido a fluctuaciones en el factor de multiplicación, es sensiblemente inferior a la de la cámara de ionización.

En la práctica el contador proporcional encuentra un gran número de aplicaciones, como por ejemplo medidas de actividades muy bajas en muestras ambientales o como detectores de neutrones.

Contadores Geiger – Müller

al elevar la tensión de polarización por encima de la zona de proporcionalidad limitada, los impulsos resultantes alcanzan toda la misma amplitud, independientemente de la ionización primaria debida a la partícula detectada. Se dice entonces que la modalidad de funcionamiento del contador corresponde a la zona Geiger.

En esta zona se presenta un fenómeno peculiar consistente en la propagación de la descarga lo largo del hilo. Este fenómeno se debe a que en los procesos atómicos de desexcitación se emiten fotones ultravioletas, que, por efecto fotoeléctrico, liberan en zonas vecinas nuevos electrones, capaces de cebar avalanchas adicionales.

Una vez finalizada la descarga, los electrones liberados son capturados, en un tiempo corto, por el hilo central. Los iones, que son mucho más lentos por su mayor masa, quedan momentáneamente formando una vaina positiva alrededor del hilo,

lo cual hace disminuir el campo eléctrico en la vecindad del ánodo. El gas de llenado de un Geiger suele estar constituido por una mezcla de argón y otro gas, llamado extintor, que suele ser cloro o bromo. La necesidad de incorporar un gas extintor se debe, a que los iones de argón, al llegar al cátodo y neutralizarse, quedan en estado excitado. La energía de excitación sólo se libera en forma de fotones ultravioleta, que al propagarse y absorberse en el gas o paredes del contador producen fotoelectrones capaces de cebar nuevas avalanchas. Así, en un contador que funcione con argón puro, cada impulso genuino vendrá seguido de un tren de impulsos espurios. Esta circunstancia resulta indeseable, ya que el número total de cuentas registrado será erróneo.

Eficiencia de los contadores Geiger-Müller

En general, estos contadores se usan para detectar radiación beta o fotónica. Dado el gran poder de penetración de los fotones, las paredes del tubo pueden ser de vidrio o metal relativamente gruesos, no así en el caso de las partículas beta (son rápidamente frenadas en un material denso) donde es necesario que disponga de una ventana fina que permita el ingreso de las partículas beta.

Para que tenga lugar la detección de un fotón X y gamma, debe por lo menos liberarse un electrón secundario, lo cual puede realizarse por interacción tanto con el gas de llenado como con el material de las paredes (cátodo) o del ánodo.

El electrón liberado debe a su vez, alcanzar el volumen sensible del contador (volumen delimitado por el campo eléctrico, donde tiene lugar la multiplicación de iones) e iniciar una avalancha. La eficiencia intrínseca (relación entre el número **Z** de las partículas contadas y de las que llegan al detector) de un contador Geiger-Müller para radiación fotónica en general no pasa del 1 ó 2%.

En el caso de la radiación beta, dado su elevado poder de ionización, si el espesor de la ventana es suficientemente delgado, el valor de la eficiencia intrínseca del detector puede llegar hasta el 90%.

Cuando se emplea un contador G-M para medir intensidad de campo de radiación fotónica a través de la magnitud Exposición, caracteriza el efecto de las radiaciones ionizantes mediante la medida de la cantidad de carga eléctrica que producen en una unidad de masa de aire seco en condiciones estándar de presión y temperatura (1 atm y 20 °C), debe considerarse la variación de la sensibilidad de respuesta (expresada en cuentas por unidad de exposición) en función de la energía de la radiación. La variación de sensibilidad con la energía representa un inconveniente cuando se desea medir exposición en un campo de fotones multienergéticos.

En estos casos se recurre a la utilización de contadores Geiger-Müller ecualizados en energía. La ecualización consiste en revestir el contador con blindajes de bajo número atómico (tal como aluminio o lucite), que aplanan la curva de sensibilidad.

Dosimetría Personal

Dosímetros De Termoluminiscencia (TLD)

Los fenómenos luminiscentes ya fueron observados desde hace muchos años. En particular la emisión de luz por efecto de estimulación térmica, o termoluminiscencia, fue observada por Sir Robert Boyle en 1663; pero no fue hasta 1883, en que Becquerel descubrió el fenómeno de la luminiscencia, siendo posteriormente estudiada por multitud de científicos

Los materiales termoluminiscentes se caracterizan por ser capaces de ceder en forma de energía luminosa, parte de la energía que absorben cuando son irradiados por radiación ionizante. Esta emisión de luz se producirá al calentarlos, con posterioridad a la irradiación.

La intensidad de la luz emitida está directamente relacionada con la dosis de radiación recibida por el material, por lo que dichos materiales son utilizados como dosímetros.

Existen diferentes tipos de material termoluminiscentes. Todos constan en esencia de un material base dopado con impurezas de ciertos átomos. Los más usados son los de Fluoruro de Litio dopado con magnesio y titanio y los de Sulfato de Calcio activado con disprosio. Estas impurezas en el material base, dan lugar a la existencia de ciertos niveles energéticos, denominados pozos o trampas, en los cuales quedan atrapados los electrones liberados por el paso de la radiación. Cuando se calienta el material, estos electrones regresan a sus estados energéticos originales en la estructura cristalina, emitiendo luz en el proceso.

1. Mantener la retención de portadores capturados tiempos suficientemente largos, a la temperatura existente en los puntos de medida.
2. Alta intensidad de emisión de luz termoluminiscente.
3. Respuesta lineal en un amplio intervalo de dosis.
4. Puesta a cero completa, para facilitar el uso repetitivo.
5. N° atómico(Z) efectivo análogo al tejido biológico.

Dosímetros de Película Fotográfica

El principio en el que se basan los dosímetros fotográficos es que la exposición de una emulsión fotográfica por radiación, seguido del revelado, provoca un ennegrecimiento que medido mediante un microdensitómetro es proporcional a la dosis de radiación a la que hayan estado sometidas.

Los dosímetros fotográficos constan de una película especial, envuelta en una funda de papel opaca, montada en un soporte provisto de una pinza que permita llevar el instrumento sobre la bata o ropa de trabajo. El bastidor del soporte está dotado de una serie de ventanas y filtros que permiten la determinación simultánea de una serie de datos radiológicos de interés.

Este tipo de dosimetría personal presenta como principales ventajas:

- Las películas reveladas, constituyen una prueba documental permanente y pueden archivarse para formar parte del historial dosimétrico del trabajador. Esto permite posteriores lecturas de comprobación.
- Posibilidad de determinar la dirección del haz incidente de radiación sobre el dosímetro, por la imagen proyectada por los filtros sobre la película fotográfica.
- En el caso de instalaciones en que se pueda dar contaminación por radionúclidos, se puede investigar la existencia de contaminaciones superficiales, por las manchas de ennegrecimiento que produce en la zona de la película más próxima a donde se produjo ésta.
- Los principales inconvenientes que se pueden reseñar son:
 - El umbral de detección y la sensibilidad hacen que no sea el sistema idóneo para medir dosis muy bajas o elevadas, incluso utilizando película de doble emulsión.
 - La dependencia energética hace que sean necesarios los filtros para corregir la medida.
 - La manipulación de gran número de dosímetros es engorrosa.
 - No son de material equivalente a tejido biológico.

Selección de Instrumentos de Medición

¿Qué es un detector portátil de radiación?

- Un instrumento que se puede llevar de un lugar a otro.
- Un instrumento que no necesita alimentación eléctrica externa.
- Un instrumento que mide radiación (alfa, beta, gamma, X ó neutrónica).
- Un instrumento que nos puede ser muy útil si lo supimos elegir, si lo sabemos operar y sabemos interpretar su información.

¿Qué esperamos de un detector portátil de radiación?

Adecuado para las tareas a realizar

- Fácil de operar
- Robusto
- Alta autonomía
- Liviano
- Pequeño
- Bajo mantenimiento

¿Cómo elegimos el tipo de detector?

- Según la calidad de la radiación
- Según la intensidad de la radiación a medir
- Según la ubicación de la fuente
- Según el tipo de información que queremos obtener

Selección, Uso Y Mantenimiento De Instrumentos Portátiles

Selección:

La selección de un instrumento puede resultar confusa y dependerá de la naturaleza y calidad de la radiación y del estado físico y químico de la contaminación. La habilidad de los distintos instrumentos de detección de la radiación, en detectar los radioisótopos de interés, varía con el instrumento y su fabricante.

Los detectores pueden trabajar en el modo pulso o en el modo de corriente, dependiendo del tipo de detector que utilicemos y del tipo de aplicación que se requiere.

- Modo en que trabaja nuestro detector
- Tipo de información que deseamos obtener
- Pulso Corriente
- Tasa Integración

Según el tipo de aplicación, la electrónica del instrumento estará orientada a ofrecer el resultado más conveniente.

Uso del Instrumento

Zonas de medición

Las zonas que han de ser monitoreadas deben ser enumeradas o indicadas en un plano del área de trabajo. Estas zonas deberían incluir las superficies de trabajo (mesadas, bajo-mesadas, campanas, etc.), áreas de almacenaje (estanterías, gavetas, etc.) y superficies tales como el piso, instrumentos, picaportes, llaves de luz, teléfonos, canillas, zonas de drenaje, etc.

También es conveniente realizar mediciones en forma aleatoria sobre otros sitios, pues, el ser muy rígido en las zonas de medición podría llevarnos a pasar por alto algún problema en el área monitoreada.

Medición de la contaminación con un instrumento portátil

- Realice la verificación operacional del instrumento. Anote los resultados del chequeo.
- Seleccione la velocidad más baja de respuesta (si el instrumento posee esta función) y realice la medición de tasa de contaje del fondo (de ser necesario realícelo fuera del área y registre este valor).
- Seleccione la velocidad de respuesta más rápida y comience a monitorear las superficies enumeradas o indicadas en el plano del área de trabajo.
- Comience desde un extremo con la sonda de medición a 1cm de la superficie. Utilice la técnica de pincelado (ver diagrama), esto permitirá asegurar que toda la superficie es monitoreada. Recuerde que la habilidad de los distintos instrumentos de medición de la radiación, en detectar los radioisótopos de interés, varía con el instrumento y su fabricante.
- Movimiento debe ser lento a efectos de dar tiempo suficiente al instrumento para responder (aproximadamente de 5 a 10 cm/s, dependiendo del instrumento utilizado).
- Cuando un incremento en la tasa de contaje es detectado, puede ser necesario realizar un cambio de escala, vuelva hacia atrás en la medición y mueva la sonda lentamente a fin de localizar en forma precisa la zona o punto contaminado. Si la zona contaminada resultara muy extensa se podrá realizar un barrido en forma de cruz a efectos de evaluar su extensión.
- Si los niveles de contaminación gamma y beta son altos, ellos podrán causar que la sonda saturé (fuera de escala). Esto indicaría que una medición de tasa de dosis podría ser necesaria.

Eficiencia de detección:

La eficiencia de detección depende de:

- el tipo de detector utilizado (GM, Nal, Proporcional)
- el tamaño y forma del detector
- la distancia del detector al material radiactivo
- el radioisótopo y la calidad de la radiación medida (alfa, beta, gamma y sus energías)
- a absorción de la radiación antes de llegar al detector (aire, folia protectora, etc.)

Mantenimiento

El instrumental deberá ser mantenido adecuadamente a efectos que cumpla con el propósito para el cual fue pensado. Todos los instrumentos tienen sus ventajas y sus debilidades y requieren de un cuidado razonable en el uso.

Los usuarios deberán:

- Mantener el equipo limpio, reparar los daños menores (tornillos perdidos, patas de goma) tan pronto como sea posible y guardar el equipo en su estuche o gabinete.
- Revisar regularmente las llaves o botones, las conexiones, los cables y los detectores (prestar atención al estado de tapas del detector y a la folia cuando corresponda). Las sondas y sus cables de interconexión son frágiles y requieren un cuidadoso manipuleo. Un conector defectuoso o un cable dañado frecuentemente causan una alta respuesta intermitente. Un pequeño agujero en la folia frontal de un detector de centelleo podrá resultar en una muy alta lectura o una ausencia de ella. Suciedad o pliegues en una folia traerán aparejados una reducción en el conteo de partículas de baja energía alfa o beta.
- Revisar regularmente el estado de los conectores y cables de las baterías a efectos que no se produzcan lecturas falsas, chequear la no existencia de corrosión en los conectores de batería y que estos realicen un buen contacto.
- Remueva las baterías si el equipo no será utilizado por un largo tiempo.
- Evitar cambios bruscos de temperatura y las temperaturas extremas. La condensación puede producir fallas electrónicas y los que poseen cámara de ionización son particularmente susceptibles.
- Proteger el equipamiento del ambiente de trabajo, una pequeña contaminación en la cara frontal del detector frecuentemente es evidenciado como un alto valor de fondo.
- No efectuar ajustes al instrumento si no está entrenado y calificado para hacerlo.
- Verificar el correcto funcionamiento y asegurarse que se haya realizado una verificación si el equipo fue reparado.
- Verificar el estado de las baterías, fondo de radiación, contaminación y funcionalidad del instrumento antes de ser usado. Una prueba apropiada deberá incluir:
 - Prefijación del “cero”
 - Verificar signos visibles de daño.
 - Respuesta del instrumento con una fuente de control
- Es conveniente repetir esta prueba luego de realizada la medición en el área.

- Respetar las instrucciones de uso y mantenimiento recomendadas por el fabricante si no existiera un procedimiento para ese instrumento.

Residuos Radiactivos

Las fuentes radiactivas empleadas en instalaciones médicas, cuando alcanzan el final de su vida útil, se convierten en residuos radiactivos que precisan ser gestionados y eliminados en condiciones seguras. Además, como consecuencia de la utilización de radionucleidos, también se puede producir contaminación radiactiva de materiales diversos, sólidos, líquidos y gaseosos.

La gestión de esos materiales contaminados, así como la de las propias fuentes cuando han dejado de ser útiles, debe llevarse a cabo con arreglo a los principios generales de Protección Radiológica y, en el caso de residuos sólidos, siguiendo las recomendaciones de la Guía de Seguridad del CSN "Gestión de materiales residuales sólidos con contenido radiactivo generados en instalaciones radiactivas".

Fuentes Radiactivas Fuera De Uso

Las fuentes utilizadas en Radioterapia o en Medicina Nuclear se convierten en residuos radiactivos sólidos cuando, por descenso inaceptable de su actividad, deterioro u otra causa, no resultan ya aptas para el uso clínico.

En ocasiones, la actividad de estas fuentes es elevada y se precisan medidas relativamente complejas para su gestión. Por esa razón, y dadas las características de las instalaciones médicas, es deseable reducir al mínimo las operaciones que con dicho tipo de residuos se lleven a cabo.

Retirada de fuentes por el suministrador

El procedimiento normal de gestión de las fuentes agotadas o fuera de uso será la retirada por la propia entidad que en su momento las suministró.

En el caso de fuentes radiactivas con periodo de semidesintegración medio o largo, los centros e instalaciones prestarán especial atención, en el momento de establecer los acuerdos de adquisición, para que los contratos correspondientes incluyan una cláusula que comprometa a los suministradores a su retirada posterior, tanto si la fuente ha de ser sustituida por otra semejante como si no es éste el caso. Este criterio será aplicable a todas las fuentes empleadas en Teleterapia y Braquiterapia y también se extenderá al caso de los generadores de Mo-99 o fuentes similares.

Se tomarán medidas para minimizar el tiempo que transcurre desde que la fuente afectada queda fuera de uso clínico y el momento de la retirada por el suministrador.

Durante ese periodo, la fuente se mantendrá en el mismo contenedor que la aloja durante su uso normal, o en otro equivalente, con blindaje o dispositivos similares para reducir al mínimo el riesgo de dispersión del material o de contaminación de terceros.

Retirada de fuentes por una empresa autorizada Cuando el procedimiento previsto en no sea posible, habrá que concertar con una empresa la retirada de las fuentes en desuso. Para ello, el centro sanitario habrá de mantener en vigor el correspondiente contrato.

Registros, archivos e informes

Cualquiera que sea la vía de eliminación de las fuentes radiactivas que han estado en uso en una instalación, se llevará a cabo con arreglo a procedimientos establecidos y con la supervisión del SPR o UTPR correspondientes o, en su defecto, del Supervisor o persona a quién se encomienden las labores de Protección Radiológica.

Se mantendrá un registro de todas las evacuaciones de fuentes que se lleven a cabo en una instalación, registro que contendrá, al menos, los siguientes parámetros:

- Tipo de la fuente
- Código de identificación
- Radionucleido contenido en ella
- Fecha de retirada del uso clínico.
- Actividad original y fecha
- Actividad medida o calculada en la fecha de retirada
- Tasa de dosis en contacto y a 1 metro del contenedor
- Identificación del responsable de la evacuación
- Identificación del receptor

Materiales Residuales Sólidos Con Contenido Radiactivo

Además de lo referido a las fuentes radiactivas fuera de uso, encapsuladas o no, en las instalaciones radiactivas médicas se generan, como consecuencia del uso de fuentes no encapsuladas, materiales residuales sólidos que contienen radionucleidos de muy baja actividad y de periodo de semidesintegración corto.

La gestión adecuada de esos materiales constituye uno de los elementos más importantes de la optimización global de la instalación desde el punto de vista de la seguridad y la Protección Radiológica.

Gestión de materiales sólidos En función del radionucleido se puede determinar el modo de gestión más conveniente. Es obvio que el criterio general será que la gestión que se lleve a cabo no suponga riesgos radiológicos inaceptables para los trabajadores expuestos, la población o el medio ambiente.

La gestión de estos materiales residuales sólidos con contenido radiactivo comprende el conjunto de actuaciones técnico-administrativas que, desde su generación hasta su destino final. El responsable de ese conjunto de actuaciones será el SPR o la UTPR correspondiente o, en su defecto, el Supervisor o persona a quién se encomienden las labores de Protección Radiológica. El destino final de los materiales a los que aquí se hace referencia puede ser la evacuación como residuo convencional o como residuo radiactivo.

Los criterios básicos para decidir uno u otro destino son los siguientes:

- Si el nivel de actividad A contenido en el material residual es muy bajo, de forma que no se supera un determinado valor N, el residuo se evacuará por vía convencional, con arreglo a la legislación general que le sea aplicable.
- Si el nivel de actividad A contenido en el material residual supera el valor N, dicho material habrá de considerarse como residuo radiactivo y ser gestionado por una empresa autorizada. En muchos casos, aunque el nivel de actividad inicial A supere el valor N, tras un periodo de decaimiento adecuado se reducirá lo suficiente para poder ser evacuado por vía convencional.

Fases de la gestión

Un principio básico que ha de aplicarse en el trabajo con material radiactivo es minimizar la generación de residuos. Las normas y procedimientos pertinentes afectan a las sucesivas fases de la gestión que, a efectos prácticos, pueden identificarse como las siguientes: segregación, control de la actividad, almacenamiento, chequeo y evacuación.

Caracterización y segregación

El primer paso en la gestión de los residuos que se producen en una instalación es la segregación de estos, la cual incluye:

- La separación de los materiales residuales con contenido radiactivo de aquellos sin él.
- La separación, según su naturaleza, de los materiales residuales con contenido radiactivo, en función de su vía de gestión.

Existirán en la instalación sistemas adecuados para la recogida de los residuos y procedimientos para la segregación. Cuando la evacuación final sea por vía

convencional, la segregación se realizará en función del radionucleido y de la naturaleza del material, separando los que puedan evacuarse directamente de los que necesitan un tiempo de decaimiento.

Los recipientes de recogida y almacenamiento (contenedores, bolsas de plástico,) se identificarán y señalarán convenientemente. Cuando el recipiente esté lleno se procederá a su cierre, sellado y etiquetado.

En la etiqueta deberá figurar la fecha de cierre, los radionucleidos presentes y una estimación de su actividad. En el caso de que la vía de evacuación final sea la retirada por una empresa autorizada para su gestión como residuo radiactivo, la segregación se hará de acuerdo con los criterios de aceptación que establezca dicha empresa.

Valoración de la actividad Una vez segregados los materiales residuales con contenido radiactivo de los que no lo tienen, se determinará o estimará la concentración de actividad de aquellos, para definir la vía de evacuación a seguir. Se aplicará el procedimiento correspondiente para esa determinación o estimación. No es admisible en ningún caso la mezcla con material inactivo para reducir la concentración en un determinado material residual.

Cada procedimiento contendrá, como mínimo, lo siguiente:

- Método de medida o estimación utilizado. Se indicará si la actividad del material se determinará mediante medidas directas o por muestreo, en cuyo caso se indicarán los criterios para la selección de las muestras y para fijar el número de muestras.
- Equipos de medida utilizados. Se incluirán referencias a la sensibilidad del equipo, a su eficiencia, fondo asociado, tiempo de contaje y error asociado a la medida.
También se considerará la calibración y/o verificación de los equipos y los procedimientos de chequeo de la instrumentación.
- Lugar de la medida. Se indicará en qué lugar de la instalación se realizarán las medidas, lugar que deberá presentar un bajo nivel de radiación.

Almacenamiento

Cada instalación dispondrá de un lugar adecuado para albergar los materiales residuales con contenido radiactivo que se generen, con las medidas de seguridad establecidas por el SPR.

Se dispondrá de un almacén específico cuando se necesite almacenar temporalmente los materiales residuales, bien por ser necesario un tiempo de desintegración para su evacuación por vía convencional, bien por estar a la espera de su retirada como residuo radiactivo.

El almacén puede ser único y centralizado para varias instalaciones ubicadas en un mismo centro. El SPR establecerá la gestión de este almacén central.

Los procedimientos relativos al almacenamiento contemplarán al menos los siguientes aspectos:

- Personas que realizarán los traslados
- Medios de transporte que utilizarán
- Rutas por seguir
- Medidas de Protección Radiológica
- Aspectos administrativos (registros, controles, etc). El almacén estará señalizado de conformidad con el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes, como zona controlada con riesgo de contaminación e irradiación externa, y su acceso estará controlado bajo llave.

Evacuación

En todos los casos deberá quedar identificado el destino de los residuos, se haga la evacuación por vía convencional o como residuo radiactivo.

Para los materiales que vayan a ser evacuados por vía convencional, se realizarán una serie de controles previos a su evacuación, tales como:

- Se inspeccionarán visualmente los materiales residuales a evacuar a fin de comprobar la correcta segregación de estos.
- Se hará una medida de los niveles de radiación en contacto y a 1 m. y de contaminación superficial antes de la evacuación.
- Se eliminará toda señalización indicativa de radiactividad en los materiales para evitar errores en la percepción de riesgos y alarmas sociales innecesarias.
- Se cumplimentarán los registros correspondientes en el Diario de Operación de la instalación donde proceden los residuos.

En el caso de que los materiales residuales deban ser gestionados como residuos radiactivos, los controles a efectuar en la instalación, previamente a su salida de esta, serán los que establezca la empresa gestora de dichos residuos y deberán conservarse en la instalación los correspondientes albaranes de retirada.

Marco regulatorio nacional

- 1957 miembro Fundador del OIEA y se crea la “Comisión Nacional de Investigaciones Atómicas”, Decreto 3432.
- 1964 cambia el nombre a “Comisión Nacional de Asuntos Nucleares,” decreto 1680 del 31 de octubre de 1964.
- 1991 se reafirman las funciones de la CNAN (Decreto 414-91).
- 1991 se crea el Consejo Nacional de Protección Radiológica (413-91) inicia sus operaciones regulares
- aprueban Reglamento de Protección Radiológica (Decreto 244-95)
- 2006 se transfieren las funciones de la CNAN a la CNE (Ley 496-06). se crea la Gerencia de Energía Nuclear
- 2012 se modifica el nombre de Gerencia Nuclear a Dirección Nuclear, se promulga la ley: 100-13, que crea el Ministerio de Energía y Minas
- 2012 (MEM) y son traspasadas las funciones y responsabilidades de la CNE, al MEM.
- 2023 resolución CNE-AD-0006-2023 Norma de Protección Radiológica de Autorizaciones Para Las Practicas Asociadas Al Uso De Radiaciones Ionizantes.

Dirección Nuclear

Asesorar a la Dirección Ejecutiva, así como proponer y ejecutar los procedimientos y medidas para el ordenamiento, supervisión, regulación y control de las actividades que involucren la utilización de sustancias radiactivas o de aparatos generadores de radiaciones ionizantes, así como promover y difundir la aplicación de tecnología nuclear en la industria, agricultura, salud e investigación en el país.

Control y Regulación

Reglamento de Protección Radiológica (Decreto 244-95) Norma para la Autorización de Prácticas Asociadas al Empleo de Radiación Ionizante.

Resolución CNE-AD-0006-2023 Norma de Protección Radiológica de Autorizaciones Para Las Practicas Asociadas Al Uso De Radiaciones Ionizantes.

Guías

- Guía de Seguridad y Protección Radiológica para la Práctica de Medicina Nuclear
- Guía de Seguridad y Protección Radiológica para la Práctica de Radioterapia
- Guía de Seguridad y Protección Radiológica para la Práctica de Diagnóstico con Rayos X
- Plan de Respuesta a Emergencia Radiológica (PRER)
- Guía de Seguridad y Protección Radiológica para la práctica Industrial (ARCAL XX)
- Reglamento Transporte Seguro de Materiales Radiactivos (TS-R-1) (Adoptado)

Infraestructura Reguladora

- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ley General sobre Medio Ambiente y Recursos Naturales (64-00)
- Norma para la Gestión Ambiental de Desechos Radiactivos
- Comisión Nacional de Energía, Dirección de Energía Nuclear LEY 496-06

División de Protección Radiológica

Objetivo General: Planificar, dirigir y coordinar las labores relativas a las autorizaciones, inspecciones y evaluaciones técnicas de las entidades que utilizan fuentes de radiaciones ionizantes en el país, con el objeto de garantizar la seguridad y protección del personal, la población y el medio ambiente.

Las secciones técnicas: Industria, Medicina Nuclear, y Radioterapia Y Radiodiagnóstico, realizan labores de inspección y evaluación a las solicitudes de autorización de las entidades que utilizan fuentes de radiaciones ionizantes.

División de Seguridad Física

Objetivo General: Planificar, dirigir y coordinar las labores relativas a la supervisión de las medidas de seguridad tendentes a la prevención de robo, sabotaje, acceso no autorizado y transferencia ilegal de fuentes radiactivas en el país, con el objetivo de garantizar la seguridad de la fuente.

Tipos de Autorizaciones

- Licencias
 - Institucionales
 - Construcción
 - Operación
 - Cierre definitivo
- Personales
- Inscripción en Registro
- Permisos

Clasificación de las Prácticas

a) Prácticas Tipo I

- Irradiadores en los que la fuente sale de su blindaje durante la operación.
- Aceleradores de partículas.
- Producción de radionucleidos.
- Gammagrafía industrial portátil.
- Tele terapia (Co-60 y Cs-137).
- Braquiterapia de alta tasa.

- Perfilaje de Pozos.
- Medicina Nuclear terapéutica.

b) Prácticas Tipo II

- Almacén de decaimiento para desechos radiactivos.
- Medidores industriales.
- Irradiadores Auto blindados.
- Registros Geofísicos.
- Terapia Rayos X.
- Gammagrafía industrial fija.
- Radiografía Industrial por Rayos X.
- Manejo de fuentes no selladas.
- Uso de fuentes en investigación o calibración de equipos (fuentes selladas).
- Rayos X de uso diagnóstico médico.
- Equipos de rayos X de diagnóstico dental panorámicos.
- Realización de trabajos con técnicas de activación y/o captura neutrónica.
- Tomografía dental.
- Rayos X de uso veterinario.
- Medicina nuclear diagnóstica.
- Braquiterapia de baja tasa.

c) Prácticas Tipo III

- Medidores industriales fijos de baja actividad (< 1 Curie).
- Difractómetros.
- Densitómetros.
- Fluorescencia de Rayos-X.
- Rayos X de diagnóstico dental periapical.
- Aplicadores oftálmicos.
- Equipos de análisis (blindados).
- Rayos X con fines de aduana.
- Rayos X industriales de baja energía.

d) Práctica Tipo IV

- Radioinmunoanálisis

- Uso de fuentes en docencia, o fuente para calibración del orden de los Kilo Becquerelios.

Emergencias

En las instalaciones médicas que utilizan radiaciones ionizantes, el plan de emergencia establece el conjunto de actuaciones a desarrollar para el caso en que se produzca un incremento del riesgo radiológico para los trabajadores expuestos, los pacientes, o el público en general. En él se incluye la descripción de las situaciones de emergencia previsibles, las medidas a tomar en cada caso, los datos e informes correspondientes y los responsables de ejecutar cada actuación.

Situaciones de emergencia

Accidentes e incidentes Clasificamos como accidente todo suceso no planificado durante el cual es probable que se superen los límites de dosis reglamentados y como incidente todo suceso no planificado durante el cual es probable que se superen las dosis recibidas normalmente. Si tomamos como referencia las personas objeto de diagnóstico o tratamiento con radiaciones, tales sucesos se producen cuando la dosis recibida no concuerda con la planificada, dentro del margen de tolerancia prefijado.

Su clasificación como incidente o accidente resulta más compleja y deberá efectuarse para cada caso. La consecuencia inmediata de estos sucesos son las situaciones de emergencia. En dichas situaciones se seguirán los planes de emergencia propios de cada instalación y si las consecuencias lo requieren o en situación de catástrofe el Plan de Emergencia general del Centro.

Ante un caso de incendio, inundación u otra catástrofe se dará prioridad a la seguridad de las personas. Una vez dominada la situación, el SPR procederá a la evaluación de sus consecuencias sobre la seguridad radiológica de la instalación y actuará en consecuencia.

Línea de autoridad Ante cualquier incidencia que afecte a las condiciones de seguridad radiológica de la instalación, el Operador o profesional que la detectase estará obligado a ponerlo en conocimiento del Supervisor que hará una primera valoración de la que se derivarán las actuaciones inmediatas a seguir. Se informará al SPR y en función del grado de afectación de la seguridad radiológica con mayor o menor urgencia al Titular y a la autoridad competente. En todo caso se registrará en el Diario de Operaciones y en la Memoria Anual que se ha de remitir a la autoridad competente.

Datos e informes En todos los casos de emergencia radiológica, el SPR correspondiente, con los datos recogidos y la colaboración del Supervisor, determinará su importancia y alcance desde el punto de vista de la Protección

Radiológica, siguiendo en todo momento la Instrucción Técnica complementaria a la autorización de la instalación por la autoridad competente.

En su caso, elaborará un informe detallado del suceso que comprenda la causa, si es conocida, desarrollo y consecuencias; la relación de posibles afectados con sus niveles de exposición y/o contaminación; las actuaciones desarrolladas y/o programadas sobre personas e instalación; y la propuesta de medidas para prevenir la causa y evitar la reincidencia remitiendo copias al titular de la Instalación y a la autoridad reguladora.

CAPITULO II. Temas de interés Radioterapia

Radioterapia

Aceleradores De Partículas

Los aceleradores de partículas son muy utilizados en medicina, en aplicaciones industriales, en investigación de procesos de alta energía, y en la producción de radioisótopos.

Toda partícula con carga eléctrica puede ser acelerada dado que es susceptible de interactuar con campos eléctricos y magnéticos. Tal es el caso de electrones, protones, deuterones, partículas alfa y iones pesados. Los neutrones por el contrario no pueden ser acelerados debido a su neutralidad eléctrica, aunque si pueden ser frenados o moderados.

Cuando una partícula adquiere alta energía cinética por efecto de la aceleración es capaz de provocar reacciones nucleares de interés científico o tecnológico.

El rango de energías de las partículas emitidas por los materiales radiactivos que no supera unos pocos MeV. Los aceleradores han extendido este valor hasta algunos cientos de GeV.

Los primeros aceleradores electrostáticos incrementaban la velocidad de las partículas mediante un campo eléctrico establecido entre los extremos de una trayectoria lineal por una fuente de diferencia de potencial. El campo eléctrico establecido en el tubo vacío del acelerador provoca aceleración de las partículas cargadas por atracción o repulsión o combinaciones de ambos efectos. Pero este sistema encontró un límite en la posibilidad de lograr la generación de diferencias de potencial muy elevadas (hasta 20 MV).

Acelerador Lineal

Esa limitación se superó mediante la subdivisión del acelerador en multitud de pequeñas unidades de aceleración, empleando electrodos dispuestos a lo largo de

la trayectoria de las partículas. En cada una de estas unidades se aplica una diferencia de potencial que cambia alternativamente de polaridad de acuerdo con un oscilador de radiofrecuencia. De tal modo, aplicando sucesivamente un mismo campo eléctrico que avanza con la partícula un alto número de veces, se logran energías sólo limitadas por la longitud del acelerador.

El acelerador lineal de protones de Los Álamos tiene una longitud de 874 m y la energía alcanza el valor de 800 MeV. El acelerador lineal de electrones de Stanford tiene una longitud de 3,2 Km y los electrones adquieren una energía de 20 GeV.

La limitación de espacio indujo a idear trayectorias circulares para las partículas que deben acelerarse. Para ello debió recurrirse a campos magnéticos que son capaces de inducir fuerzas centrípetas sobre las partículas de modo de generar trayectorias curvas.

Conceptos Generales de Radioterapia

Terapia Radiante o Radioterapia es el término genérico con el que se conoce el procedimiento, con objetivo terapéutico, mediante el cual se deposita una dosis de radiación ionizante adecuada en un volumen definido de un paciente.

Dos métodos principales:

- Teleterapia
- Braquiterapia o Curieterapia

Teleterapia

Es la radioterapia de haces externos, consiste en dirigir haces de radiación, generados en el exterior del paciente hacia la zona a tratar, estos haces se producen normalmente en un equipo acelerador lineal o una unidad de cobalto.

Braquiterapia

Es la radioterapia que coloca pequeñas fuentes radiactivas selladas directamente dentro o cerca del volumen a tratar

Objetivos:

- Controlar la progresión local de la patología o paliar un síntoma.
- Suministrar la dosis de prescripción al volumen blanco en la cantidad de fracciones indicada con una precisión mejor al 5%
- Dar la menor dosis posible en los tejidos periféricos sin superar la dosis tolerable

Reseña histórica:

- 1900 equipos de Rx

- 1940 los reactores nucleares y se pueden crear isotopos artificiales (cobalto 60) útiles en terapia.
- 1950 inicia la era de los aceleradores lineales
- 1970 planificación computarizada
- 1990 terapia conformal y la IMRT (intensidad modulada)
- 2000 radiocirugía, RT estereotáxica

Unidad de cobalto - Cobaltoterapia

- Fuente de muy alta actividad (>1000Ci)
- Casi todas Co-60
- Algunas unidades viejas emplean Cs-137
- Energía fotones de Co-60 aprox. 1.25 MeV
- Fotones: 1.17 MeV y 1.33 MeV
- Energía fotones aprox. 1.25MeV
- Actividad específica suficientemente grande para FSD* de 80 cm o incluso 100 cm
- Por tanto, resulta posible configuración isocéntrico

Equipos de última generación en radioterapia externa

Son actualmente el equipamiento básico de la mayoría de los centros de radioterapia. Son máquinas tecnológicamente sofisticadas controladas por ordenador, que proporcionan haces de electrones y de RX de alta energía; el rango clínico va desde unos pocos MeV (mega electronvoltios) hasta la veintena de MeV. Entre los accesorios con los que vienen equipados destacan el colimador multiláminas, MLC, que se usa para colimar el haz de radiación a formas irregulares y consiste en dos carros opuestos de láminas en los que cada lámina se puede mover independientemente. Otro accesorio destacable es el detector electrónico de imagen portal (EPID), usado para obtener imágenes digitales de los campos de tratamiento.

Los haces de electrones tienen un alcance de unos pocos centímetros en el interior del paciente y sólo se utilizan en el tratamiento de tumores superficiales y en técnicas intraoperatorias.

Los haces de fotones de RX de alta energía es la radiación más utilizada en radioterapia externa. Uno o varios haces son dirigidos desde el exterior hacia la zona del paciente que queremos tratar: en su trayectoria van interaccionando con las células de los diferentes tejidos u órganos que atraviesan. Para cuantificar la interacción y valorar el daño ocasionado a las células, tanto tumorales como sanas, empleamos la magnitud dosimétrica de la dosis absorbida.

El objetivo de la radioterapia es irradiar con dosis suficientemente altas el volumen tumoral como para conseguir su control manteniendo en niveles aceptables las dosis a los tejidos sanos que inevitablemente se irradian tanto alrededor del volumen tumoral como a la entrada y salida de los haces de tratamiento. La introducción de cualquier avance tecnológico que potencie este objetivo supondrá un nuevo paso para la radioterapia.

Aceleradores lineales (LINAC).

Los aceleradores lineales de electrones son unidades capaces de emitir múltiples energías de electrones y de rayos X, para seleccionar la más adecuada a cada tratamiento.

Las tasas de dosis absorbida a la que pueden trabajar son mayores que las de las unidades de cobalto, lo que permite acortar los tiempos de tratamiento.

- Diferentes diseños
- Forma común de nombrarlos "linac"
- Existe actualmente 2 fabricantes: Varian y Elekta

Radioterapia conformada tridimensional, 3D-CRT

Un avance tecnológico, que supuso un cambio radical en la radioterapia, fue la incorporación de los ordenadores y las herramientas informáticas a la radioterapia allá por los años 1980 y 1990, posibilitando la obtención y transferencia de imágenes médicas digitales y el desarrollo de potentes sistemas de planificación de tratamiento radioterápico, de tal manera que posibilitó la transición de una radioterapia 2D basada en placas de RX a una radioterapia en 3D basada en imágenes volumétricas de tomografía computarizada, TC.

Se realiza una adquisición de datos anatómicos del paciente. Esta información se obtiene mediante un estudio de tomografía computarizada (TC) realizado en la posición de tratamiento y adicionalmente se puede realizar fusión con otras modalidades de imagen como pueden ser la resonancia magnética (RM) o la tomografía por emisión de positrones (PET).

En los sistemas de planificación se delimitan los volúmenes blancos, la extensión palpable o visible del tumor maligno, que constituye el Volumen de Tumor Macroscópico^{2,3} (GTV, Gross Target Volumen), el GTV y un margen local de enfermedad subclínica constituyen un Volumen Blanco Clínico (CTV, Clínica Target Volumen). Se definen también los órganos de Riesgo (OAR, Organ at Risk), que son tejidos normales cuya sensibilidad a la radiación y su localización en la vecindad del CTV podrían influir significativamente en la planificación o el nivel de dosis absorbida que se empleará.

Con esta información se genera una representación 3D de los volúmenes del paciente y se realiza una planificación del tratamiento adaptado a cada caso, seleccionando diferentes parámetros como son el número de haces, su ángulo de incidencia, su apertura, energía, etc. Esta forma de planificar se denomina planificación directa, ya que el usuario elige todos los parámetros del tratamiento y luego calcula la distribución de dosis y decide si es aceptable o no.

La 3D-CRT se ha convertido en el estándar del tratamiento radioterápico, sin embargo, cada vez más, se están introduciendo técnicas más complejas que permiten alcanzar distribuciones de dosis adaptadas al tumor con un mayor control y precisión en el posicionamiento del paciente y en la administración de las dosis. Estas nuevas modalidades son la radioterapia con intensidad modulada y la radioterapia guiada por la imagen.

Radioterapia con modulación de intensidad (IMRT)

Aunque se empezó a desarrollar hace tiempo, uno de los primeros artículos en el que se introducen los conceptos de intensidad modulada y planificación inversa es de Brahme y col4 en 1982. No obstante, es en estos últimos años cuando los tratamientos con intensidad modulada se han extendido entre los servicios de radioterapia.

La IMRT permite generar distribuciones de dosis ajustadas a la forma tridimensional del tumor mediante la modulación o control de la intensidad de los haces de radiación. Al mismo tiempo se logra disminuir la exposición a dosis altas de los órganos críticos cercanos, consiguiendo una menor toxicidad en el tratamiento que en ocasiones puede permitir un incremento en las dosis aplicadas al volumen blanco para conseguir una mayor probabilidad de control tumoral, lo que se conoce como escalada de dosis.

La planificación de los tratamientos con IMRT se realizan mediante objetivos de dosis, se establecen dosis mínimas y máximas admisibles en el volumen blanco de tratamiento, restricciones de dosis para los diferentes órganos de riesgo, se prioriza la consecución de unos u otros objetivos y se inicia un cálculo iterativo hasta conseguir el plan óptimo de tratamiento. A esta forma de cálculo se le denomina planificación inversa.

El desarrollo en la fiabilidad y precisión de los algoritmos de planificación inversa ha sido determinante para lograr la implementación clínica de las técnicas de IMRT. Son estos sistemas de planificación los que calculan la modulación necesaria en los haces de tratamiento para conseguir las distribuciones de dosis que mejor se adaptan a los objetivos de cálculo. Posteriormente, los equipos de tratamiento deberán ser capaces de modular la intensidad calculada y de administrarla correctamente. Es un proceso complejo que requiere un programa minucioso de aseguramiento de la calidad.

IMRT con campos de ángulos fijos

A pesar de que los primeros trabajos sobre IMRT fueron sobre la técnica rotacional⁴, la IMRT con campos de ángulos fijos es ahora la modalidad de IMRT más utilizada. Ésta se implementó clínicamente por primera vez en 1995^{6,7}.

Esta técnica utiliza aceleradores convencionales dotados de colimador multiláminas (MLC). Usando varios haces con intensidad modulada desde ángulos fijos, sin giro, se pueden generar distribuciones de dosis altamente conformadas. Cada uno de los haces de los que consta el tratamiento se divide en subhaces o segmentos; la intensidad de cada segmento se ajusta individualmente hasta conseguir la fluencia de dosis planificada.

Existen dos modalidades para conseguir modular la fluencia de un haz de RX mediante un colimador multiláminas: una es la basada en múltiples segmentos estáticos, también llamada step-and-shoot, que mediante una superposición de subcampos o segmentos estáticos -sin radiación entre segmento y segmento-, consigue crear la fluencia planificada, y la otra es la técnica de multiláminas dinámico (dMLC), en la que durante la irradiación las láminas se mueven, realizan un barrido unidireccional desde un lado del campo hasta el opuesto, a velocidades y distancias entre láminas variables, consiguiendo crear la fluencia planificada. En general se requiere de tiempos de radiación más largos que en 3D-CRT.

Tomoterapia

La tomoterapia es una técnica de tratamiento rotacional, en la que se administra la radiación usando un haz estrecho en forma de abanico, *fan-beam*, que gira alrededor del paciente y su intensidad se modula de manera diferente para diferentes intervalos angulares.

Tomoterapia axial

Mark Carol, fundador de NOMOS Corporation (North America Scientific, Chatsworth, CA, USA) presentó el concepto de tomoterapia axial en el congreso de la Asociación Americana de Física Médica (AAPM) de 1992. Meses después, ese mismo año, presentó su primer prototipo⁸ y en 1994 ya estaba disponible comercialmente el MIMiC®. Se trataba de un dispositivo capaz de implementarse en cualquier acelerador convencional de cualquier fabricante.

Básicamente consta de colimador multiláminas binario, compuesto de dos carros de 20 hojas de 1 cm de anchura en isocentro, en el que sus láminas sólo pueden estar en dos posiciones, posición de haz abierto o posición de haz cerrado, tapando o no la parte correspondiente del haz estrecho producido por el acelerador. La intensidad del haz en abanico se modula dependiendo del tiempo que cada hoja está dentro del campo. Durante la irradiación de cada arco, la mesa de

tratamiento no se mueve. Un tratamiento completo consta de varios arcos en el que cada uno trata cortes contiguos del paciente hasta cubrir la longitud total del volumen de tratamiento. Actualmente el nombre comercial del equipo es nomosSTAT con el sistema de planificación inversa CORVUS.

Durante el periodo de 1992-1997 el uso del MIMiC fue dominante en la práctica clínica de la IMRT.

Tomoterapia helicoidal

Se comenzó a desarrollar en la Universidad de Wisconsin en el año 1993, el primer paciente se trató en el 2002, el equipo lo comercializa Tomotherapy Inc (Madison, WI, USA) con el nombre de TomoTherapy® Highly Integrated Adaptive Radiotherapy (HI-ART). Se puede describir como una combinación de un CT helicoidal con un acelerador lineal.

Su diseño se aparta del de un acelerador convencional y nos recuerda más a un equipo de tomografía axial computarizada^{10,11}, un gantry en forma de Donut y en su interior un acelerador lineal compacto que puede girar continuamente, y que genera un haz de RX de energía nominal de 6MV.

El haz se colima en forma de abanico, su anchura puede ser de 1, 2,5 ó 5 cm; lateralmente la fluencia se puede modular mediante un colimador multiláminas binario, compuesto por 64 hojas de espesor nominal 6,25 mm en isocentro. Las hojas operan de manera binaria, es decir con dos posiciones, completamente abierto o cerrado. La modulación de intensidad se consigue variando la fracción de tiempo en el que las diferentes hojas están abiertas. El acelerador irradia y gira a una velocidad constante mientras la mesa y paciente se desplazan longitudinalmente hasta completar la irradiación del volumen blanco.

CyberKnife

El sistema CyberKnife desarrollado por Accuray Inc. (Sunnyvale, CA, USA) inicialmente para aplicaciones de radiocirugía estereotáxica, es un sistema que consta de un acelerador compacto de 6MV montado en un brazo robotizado¹²⁻¹⁵, que permite unas posibilidades de movimiento mayores que las que tienen los aceleradores convencionales, pudiendo irradiar al volumen blanco casi desde cualquier dirección.

El sistema proporciona haces colimados circularmente, desde un diámetro de 5 mm hasta 60 mm, pero su fluencia no es modulada, sin embargo, puede conseguir distribuciones espaciales de dosis similares a los sistemas de IMRT como superposición de un gran número de haces estrechos, incidiendo desde un gran rango de posiciones y ángulos, que puede ser considerada como una IMRT espacial.

Intensidad modulada volumétrica en arcoterapia, VMAT

Se trata de aceleradores dotados de MLC capaces de realizar tratamientos rotacionales modificando continuamente tanto la apertura del haz, la velocidad de giro y la tasa de dosis. Se consiguen distribuciones de dosis conformadas en tiempos de tratamientos inferiores al de otras técnicas de IMRT. A diferencia de la tomoterapia en la que la irradiación se realiza corte a corte, con esta técnica -en una sola rotación- se trata el volumen blanco completamente, además puede utilizar arcos coplanares y no coplanares. Comercialmente están disponibles los sistemas Elekta VMAT[®] (Elekta, Crawley, UK) y RapidArc[®] (Varian Medical Systems, Palo Alto, Calif, USA).

Radioterapia guiada por la imagen (IGRT)

En la planificación de los tratamientos radioterápicos se deben añadir márgenes alrededor del CTV para asegurar una adecuada irradiación de los volúmenes tumorales. Se define el margen interno con el fin de tener en cuenta las variaciones en el tamaño, forma y posición del CTV. Se define también el margen de configuración (SM, Setup Margin) que se añade para tener en cuenta todas las incertidumbres en el posicionamiento haz/paciente. El Volumen Blanco Clínico expandido con estos márgenes constituye el Volumen Blanco de Planificación (PTV, Planning Target Volume).

Las nuevas técnicas de IMRT, en las que la dosis se conforma muy ajustada al PTV y podemos encontrar regiones de alto gradiente de dosis en la cercanía de órganos de riesgo, son mucho más sensibles a estas incertidumbres geométricas. Por otra parte, los tratamientos de IMRT suelen durar más tiempo, lo que hace más probable que el paciente se mueva a lo largo de una sesión de tratamiento.

Para paliar este problema, se han diseñado máquinas de tratamiento con sistemas de imagen integrados y de esta manera ha surgido la radioterapia guiada por la imagen, IGRT.

La hipótesis de la IGRT es la posibilidad de reducir los márgenes de configuración y poder realizar un manejo más preciso de los movimientos internos. La IGRT asociada con la IMRT puede posibilitar un incremento de dosis que consiga mejorar los objetivos clínicos de la radioterapia¹⁶⁻¹⁹; por otro lado, junto con elementos de inmovilización adecuados se puede facilitar el paso de radiocirugía craneal a radiocirugía extracraneal.

El concepto de radioterapia guiada por la imagen, se puede decir que es una evolución de lo que ya se venía utilizando, simuladores de RX, imágenes portales de los campos de tratamiento, sistemas de posicionamiento por ultrasonido etc.

Sin embargo, el desarrollo de equipos de tratamiento con imagen integrada, bien en el propio brazo del acelerador -On-Board Imaging (OBI)- o en la sala de tratamiento y de equipos con posibilidad de imagen volumétrica tridimensional de tejido blando, incluido el tumoral, ha resultado en el desarrollo de esta nueva técnica, la radioterapia guiada por la imagen.

Equipos con imagen integrada, IGRT

Existen equipos que integran imagen tomográfica de kilovoltaje mediante la técnica de reconstrucción llamada cone beam CT (CBCT), por ejemplo Elekta Synergy (Elekta, Crawley, UK) y Trilogy (Varian Medical Systems, Palo Alto, Calif, USA), que montan un tubo de rayos X y un detector digital en brazos replegables como puede verse en la imagen

El equipo Tomotherapy HiArt dispone de imagen tomográfica de megavoltaje, el mismo acelerador que se utiliza para tratamiento puede emitir en modo de baja energía a unos 3,5MV de energía nominal y en este modo realizar una adquisición de imagen tomográficas.

Hay sistemas que usan proyecciones radiográficas biplanares, que consiguen con tubos de RX y detectores digitales situados en techo y suelo de la sala de tratamiento, por ejemplo, el equipo CyberKnife o el sistema de radiocirugía NovalisTX ExacTrack de brainLAB.

Consideraciones Generales en Braquiterapia

Técnica de tratamiento en que se colocan fuentes radiactivas no dispersables dentro o muy próximos al volumen de tejido a tratar.

La braquiterapia emplea fuentes radiactivas encapsuladas para entregar una alta dosis a los tejidos cercanos a la fuente:

- Braqui (del griego) = corta (la distancia)
- La ley del cuadrado inverso determina la mayor parte de la distribución de dosis
- Se caracteriza por fuertes gradientes de dosis
- Los implantes son altamente personalizados según el paciente

Fuentes selladas

OIEA. NBS. Glosario: "Material radiactivo que a. permanentemente encerrado en una cápsula, o b. estrechamente envuelto y en forma sólida."

En otros términos: la actividad está confinada en su portador y la contaminación del ambiente no es posible mientras la fuente se mantenga íntegra. Tienen una actividad que puede ser derivada a partir de un certificado de calibración y del período de semidesintegración del isótopo (nada se perdió).

Su integridad DEBE verificarse periódicamente un buen procedimiento para esto son las pruebas de frotis

Clasificación en términos de:

- Duración del tratamiento:
 - Implantes Transitorios: La dosis es impartida durante un periodo finito de tiempo
 - Implantes Permanentes: La dosis es impartida en un tiempo infinito

- Posicionamiento de las fuentes:
 - Intersticial: fuente se aplica en el tumor
 - Intracavitaria: fuente se coloca en cavidades naturales
 - Superficial: fuente se coloca en contacto con la superficie del tumor o lesión

- Método de carga de las fuentes:
 - Precargadas
 - Pos carga Manual
 - Pos carga Remota (afterloaded)

- Tasa de dosis:
 - Baja Tasa de Dosis (LDR): 0.4 - 2 Gy/h
 - Mediana Tasa de Dosis (MDR) : 2 - 12 Gy/h
 - Alta Tasa de Dosis (HDR): mayor a 12 Gy/h

La fuente ideal para braquiterapia:

- Emisor gamma puro porque los beta o alfa resultan demasiado cortos su alcance.
- Energía gamma media Suficientemente alta para tratar el blanco con una dosis homogénea
- suficientemente baja para evitar los tejidos normales y reducir los requerimientos de blindaje.
- Actividad específica alta
- Conveniente también para las aplicaciones de alta tasa de dosis
- Tamaño pequeño
- Producto de desintegración estable

- Para los implantes temporales: período de semidesintegración largo permite re uso económico de las fuentes
- Para los implantes permanentes: período de semidesintegración medio.

Una variedad de tipos de fuentes están actualmente en uso ejemplo :Cs 137, Ir 192

Difieren para las diferentes aplicaciones por

- Período de semidesintegración
- Tamaño (actividad específica) y
- Energía de la radiación

Cuando se decide sobre una fuente también hay que tener presente los requisitos para el blindaje.

Fuentes de braquiterapia:

Radionucleido	T1/2	Energía de los Fotones (MeV)	HVL (mm Plomo)
Ra-226	1600 a	0.047 –2.45 (0.83 prom)	8.0
Co-60	5.26 a	1.17, 1.33	11.0
Cs-137	30.0 a	0.662	5.5
Ir-192	74.2 d	0.136 –1.06 (0.38 prom)	2.5
Au-198	2.7d	0.412	2.5
I-125	60.2 d	0.028 prom	0.025

Pd-103	17.0 d	0.021 prom	0.008
--------	--------	------------	-------

Fuentes populares:

Cs 137: Baja tasa de dosis

- Sustituto principal del radio
- Mayormente usado en las aplicaciones ginecológicas
- Período de semidesintegración largo de 30 años necesaria corrección del decaimiento cada 6 meses
- Las fuentes son caras y deben ser sustituidas cada 10 o 15 años.

Ir-192: Alta tasa de dosis

- Múltiples formas disponibles
- La fuente más importante para las aplicaciones de alta tasa de dosis
- Período de semidesintegración medio (75 días) corrección del decaimiento necesaria para cada tratamiento
- Se necesita sustituir cada 3 o 4 meses para mantener la actividad eficaz y con ello un tiempo del tratamiento aceptable

Fuente de Ir-192 de HDR

- 10 Ci (370GBq)
- Diámetro del orden de 1mm
- Longitud del orden de 10mm
- Doble encapsulado
- Acoplada a un cable de acero

I-125: Baja tasa de dosis

- Energía muy baja -por tanto, el blindaje resulta fácil y la radiación desde un implante es fácilmente absorbida en el paciente: son posibles los implantes permanentes
- Principalmente usado en la forma de semillas.

Semillas del-125, objetivos y características del diseño:

- Fuente sellada
- Encapsulado no tóxico, compatible con el tejido
- Distribución isotrópica de dosis
- Radio opacidad para su Localización

Fuente de Co-60: Alta tasa de dosis

- Transitorios
- Intracavitaria /Intersticial
- Retrocarga Remota

Braquiterapia de baja tasa de dosis

- Fuentes populares usadas son Cs 137 y I 125
- Las fuentes de Cs 137 aplicaciones temporales
- Las fuentes de I 125 por lo general son implantes permanentes
- Requiere internación de 50 a 60 horas para Cs 137.
- Para implantes de I 125 se requiere del uso de un quirófano
- Las salas de internación de aplicaciones temporales requieren una evaluación de blindaje.
- Difícil uniformidad de la dosis en el tiempo

Braquiterapia de alta tasa de dosis

- Fuentes populares usadas son I 192 y Co 60
- Son aplicaciones temporales
- No requiere internación dado que el tiempo de tratamiento es de 5min a 20 min.
- Las salas aplicación requieren una evaluación de blindaje.
- Optimización en la distribución de dosis y protección de órganos de riesgo
- Menor exposición del personal
- Mayor confort del paciente

Procedimiento de operación en Radioterapia

Complejidad de la Radioterapia. Fases de la planificación. Colaboración y responsabilidad de la Unidad de Radiofísica:

- Imágenes 3D, 4D, PET-TC, RM, posicionamiento y accesorios.
- Determinación del volumen blanco, volumen tumoral y volumen planificado.
- Definición de dosis.
- Conformación de campos. Colimadores multiláminas.
- Cálculo 3D distribución de dosis.
- Corrección según heterogeneidad de los tejidos.
- Selección del plan de irradiación según histograma dosis-volumen.
- Verificación por imágenes, antes y durante el tratamiento una vez aprobado el mismo.

Equipo multidisciplinario

- Radioterapeuta
- Físico Médico
- Dosimetristas y técnicos operadores
- Titular de la Licencia de Operación

Consulta: Medico

Efectúa un examen físico y analiza los estudios previos que lleva el paciente. Definir el tipo de protocolo a ser aplicado

Preplanificación: Médico y Físico Médico

- Dosis total y fraccionada a entregar, - Fraccionamiento óptimo,
- Haces (fotones y electrones)
- Técnica de tratamiento, energías, etc.

Simulación: Médico - Físico Médico - técnico – dosimetrista

- Campos, Ángulos Cortes: central y extremos.
- Marcarán las zonas a proteger
- Posicionamiento-Se define accesorios a usarse
- Marcas de tinta y tatuajes sobre la piel del paciente indicando los límites del campo y la ubicación de los láseres localizadores
- Marcación de Isocentros Tentativos

Registro y Documentación

- Incidencias del haz,
- Tamaños del campo,
- Distancias,
- ángulos,
- Posicionamiento,
- Energía a utilizar en cada incidencia,
- Dosis diaria y
- Dosis total.

Determinación de volúmenes: Medico

- Volumen de Planificación
- Órganos de riesgo
Se dibuja los órganos de riesgo y por último los volúmenes involucrados,

Planificación: Físico Medico

Sistema computarizado que es capaz de generar distribuciones de dosis (isodosis) en pacientes.

Curvas de isodosis:

- Conjunto de líneas que unen puntos de igual dosis en una región de interés.
- Se crean para representar como varía la dosis absorbida en un volumen.
- Su valor en Gy en un porcentaje con respecto a un valor de referencia.
- Unir puntos de igual suma de porcentaje de dosis
- Entregar la mayor cantidad de dosis a la zona clínica a tratar, pero limitar la dosis a los órganos en riesgos.

Bloques conformadores y filtros

- Fabricación de protecciones
- Fabricación de filtros compensadores de cerrobend para IMRT
- Verificación Tratamiento
- Fundamental para la optimización del tratamiento en radioterapia
- Verificación de bloques
- verificación campos
- Verificación de campos en el CT simulador
- Verificación de: campos de tratamiento, planificación aprobada, dosis a entregar.

Aseguramiento de la Calidad en Radioterapia (QA) son todos los procedimientos que aseguran la consistencia de la prescripción médica y el cumplimiento seguro de esa prescripción radiante

Tratamiento

Primer tratamiento: participación del médico, físico médico, dosimetrista y técnico operador:

- Repetir exactamente el posicionamiento de simulación
- Verificar cada uno de los volúmenes (imágenes radiográficas)
- Realizar modificaciones de isocentros.

Control del Tratamiento

Revisión periódica del medico

- Se realizan nuevamente imágenes
- Se verifican las zonas en tratamiento y posibles reacciones tisulares

Análisis de situaciones accidentales en Radioterapia

Emergencias en Radioterapia

En general, situaciones de anormalidad en el uso terapéutico de las radiaciones ionizantes se deben a una pérdida de control de los emisores o del acceso a los mismos.

- Fallo en el mecanismo de recogida de la fuente en unidades de Tele cobaltoterapia.
- Pérdida de control de los parámetros que caracterizan los haces generados en aceleradores.
- Pérdida de estanqueidad de fuentes encapsuladas.
- Fallos de los mecanismos de manipulación a distancia de las fuentes de braquiterapia.
- Errores importantes en alguno de los parámetros críticos en la planificación o en la aplicación del tratamiento.
- Pérdida de fuentes radiactivas. β Incendio, inundación u otra catástrofe.
- Presencia inadvertida de personas dentro del búnker durante la irradiación.

Simulacros

La realización de ejercicios y simulacros de situaciones de emergencia que se pueden presentar, anteriormente citadas, con relativa frecuencia supone el entrenamiento del personal que trabaja en las instalaciones cuyo fin último es ensayar la respuesta en estas situaciones para evitar fallos y reducir en lo posible las exposiciones potenciales que se recibirían en estos casos.

Tales ejercicios periódicos deben ser dirigidos por el SPR, debiendo quedar registrado en el Diario de Operación.

Ver Enlace para radioterapia:

El siguiente link del Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA, podrá encontrar otras presentaciones de interés Radioterapia:

https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content-es/AdditionalResources/Training/1_TrainingMaterial/Radiotherapy.htm

CAPITULO III. Temas de interés Medicina Nuclear

Medicina Nuclear

Definida como una rama de la medicina que emplea los isótopos radiactivos, las radiaciones nucleares, para la prevención, diagnóstico, terapéutica e investigación médica.

Un 30 % de sus aplicaciones se emplean en oncología. Utiliza dosis bajas o muy bajas en diagnóstico y más elevadas en terapia.

Los isótopos radiactivos son producidos en reactores nucleares. El primero de ellos data de 1946.

Se emplean como radiotrazadores asociados a moléculas transportadoras, formando un complejo que se denomina radiofármaco.

Los radiofármacos se definen como la combinación de especies orgánicas o inorgánicas, que unidas al elemento radiactivo, sirven de agente transportador y de depósito de este emisor de radiación al órgano o espacio a estudiar y poder ser detectado desde el exterior por las maquina adecuadas, gammacámaras, tomógrafos, generando imágenes o curvas de función, dependiendo del objetivo del estudio.

Los radiofármacos son habitualmente inyectados por vía venosa y no tienen acción farmacológica alguna. En casos puntuales el isótopo radiactivo empleado llega por sí mismo al objeto del estudio. Es el caso del I-131, cuyo comportamiento metabólico es idéntico al Iodo estable, que se almacena en la glándula tiroidea. Así puede utilizarse para medir su acumulación representando esa curva la función tiroidea o la distribución en la glándula y permitiendo obtener imágenes, gammagrafías tiroideas.

En Medicina Nuclear se emplean fuentes abiertas con radioisótopos de corta vida que se administran por inoculación u oralmente al paciente con fines de diagnóstico o tratamiento. Deben además considerarse los estudios “in vitro”.

Diagnóstico “In Vivo”

Emisores Gamma

Cámara Gamma – Sistemas Tomográficos

Se administra al paciente radioisótopos bajo formas químicas apropiadas. Los procesos metabólicos dan lugar a una concentración preferencial de los radioisótopos en los órganos cuyo estudio interesa.

La radiación proveniente de un órgano dado contribuye a formar imágenes estáticas o dinámicas según el propósito el estudio.

A tal fin se emplean Cámaras Gamma y Sistema Tomográficos como los SPECT (Tomografía Computada por Emisión de Fotones Únicos).

Ejemplos:

RADIOISÓTOPO	T1/2	ENERGÍA (MeV)	ÓRGANO
Tecnecio Tc-99m	6 h	0,141	Tiroide
Yodo I-131	8 d	0,637	Tiroide
Talio Tl-201	73 h	0,167	Corazón
Yodo I-123	13 h	0,160	Riñón
Actividades administradas: 10 KBq - 100 MBq			

Emisores de Positrones

Tomografía por Emisión de Positrones (PET)

Los emisores de positrones son de muy corta vida.

Deben ser producidos en el lugar en que se utilizarán mediante ciclotrones.

Lo positrones se aniquilan con electrones generándose en cada aniquilación dos fotones de 0,511 MeV.

Se logra así que el órgano elegido para el estudio irradie fotones de energía significativa que son captados por un sistema tomográfico de cámaras dispuestas anularmente.

Ejemplos:

RADIOISÓTOPO	T1/2	ENERGÍA (MeV)	TÉCNICA
Carbono C-11	20 m	0,99	PET
Nitrógeno N-13	12 m	1,22	PET
Oxígeno O-15	2 m	1,72	PET

Actividades administradas: hasta 100 MBq

Diagnóstico In Vitro

Emisores Beta

Radio Inmuno Análisis (RIA)

Las técnicas de **Radio Inmuno Análisis (RIA)** consisten en la marcación de antígenos con la finalidad de detectar la presencia de ciertas sustancias en el organismo humano. Se trata de una técnica radiactiva de valor diagnóstico en la que el paciente no es irradiado.

Ejemplos:

RADIOISÓTOPO	T1/2	ENERGÍA (MeV)	APLICACIÓN
Tritio H-3	12,4 a	0,018	RIA
Carbono C-14	5760 a	0,16	RIA
Fósforo P-32	14,3 d	1,7	RIA

Actividades administradas: hasta hasta 40 KBq

Terapia Metabólica

Se administra al paciente compuestos químicos que contienen radioisótopos emisores beta o beta – gamma, con el propósito de que la energía de la radiación provoque una acción terapéutica.

Ejemplos:

RADIOISÓTOPO	T1/2	EMISIÓN y ENERGÍA (MeV)	APLICACIÓN
Yodo I-131	8 d	Beta 0,61 Gamma 0,637	Cáncer de Tiroides Hipertiroidismo
Itrio Y-90	2,67 d	Beta 2,28	Artropatías
Estroncio Sr-89	50,5 d	Beta 1,49	Metástasis óseas

Actividades administradas: Para la mayoría de los tratamientos 200 – 400 MBq
Cáncer de Tiroides 3 – 8 GBq

Equipos utilizados en Medicina Nuclear

Los equipos utilizados son históricamente detectores de radiación gamma, gammacámaras que sustituyeron a los antiguos gammágrafos lineales. En la actualidad dos son los instrumentos de detección más utilizados para técnicas diagnósticas. La gammacámara SPECT y el tomógrafo PET.

- **Gammacámara SPECT**, Tomografía por emisión de fotón simple.

La más utilizada, tipo Anger, está formada básicamente por un sistema de detección de la radiación fotónica, emitida por el radiofármaco introducido en el organismo y depositado en el órgano o área anatómica en estudio y un sistema informático cada vez más sofisticado.

La detección se realiza mediante detectores de centelleo, colimador y cristal de centelleo de Ioduro sódico más talio y tubos fotomultiplicadores que conducen estos fotones detectados en forma de corriente eléctrica, posteriormente ampliada en un amplificador y transportada a un analizador de pulsos.

El objetivo es generar una imagen proporcional a lo detectado en el detector de centelleo. Esta información va a ser digitalizada y transformada en imágenes generalmente tridimensionales.

Este equipo SPECT puede acoplarse a un TC, dando lugar a un equipo híbrido, que no solo capta y reproduce la imagen gammagráfica, sino que la sitúa en el espacio anatómico donde se produce esta emisión.

- **PET- TC.** Tomografía por emisión de positrones asociado a tomógrafo computarizado.

La personalidad de este equipo se la proporciona el tipo de radiofármaco utilizado, emisor de positrones, electrones positivos. Sabido es que estas partículas son aniquiladas por electrones negativos, generando dos fotones gamma en sentidos opuestos.

Por un sofisticado sistema de detección en detectores enfrentados, produciéndose en un circuito de coincidencia, pudiendo así localizarse exactamente el lugar de emisión de los dos fotones y trasmitirla a un tomógrafo donde su reconstrucción tridimensional demostrará gráficamente el depósito del radiofármaco y la TC asociada, lo situará en su localización anatómica.

Estos equipos se utilizan en la detección de procesos inflamatorios, infecciosos o tumores generalmente malignos.

El radiofármaco utilizado habitualmente es la desoxi-fluoro-glucosa, FDG, marcada con Flúor 18, radioisótopo emisor de positrones y de un periodo de semidesintegración muy corto (109,7 minutos). La glucosa asociada al 18F lo transporta a procesos con metabolismo celular aumentado y con aumento de su demanda, muy característico de los tumores malignos en desarrollo.

- **Detectores de radiación asociados a sistemas de registros gráficos para estudios funcionales.**

Curvas de acumulación eliminación renal por separado. Perfusión pulmonar. Estudio de la función tiroidea según acumulación de I-131, etc.

Aplicaciones diagnósticas de la medicina nuclear:

- Tiroides. estudios funcionales y morfológicos, rastreo corporal a la búsqueda de posibles metástasis de cáncer bien diferenciado del tiroides.
- Pulmón. Estudios de ventilación y vascularización, perfusión, morfología. tromboembolismo pulmonar.
- Renal-urinario. función y morfología renal individual, eliminación ureteral, acumulación vesical.
- Cardiovascular. Perfusión, función ventricular, infarto de miocardio.
- Osteoarticular-articular. metástasis óseas, procesos inflamatorios y degenerativos.
- Sistema nervioso central. Vascularización y metabolismo cerebral, morfología.
- estudios de procesos inflamatorios, linfomas.
- Localización de tumores primitivos y metastásicos, FDG 18F, Colina 18F, PET-TAC-RM.
- Estudio del ganglio centinela. Uso fundamental en cáncer de mama para evitar innecesarias linfadenectomías axilares, en ORL y en melanoma de extremidades.
- Técnicas de radioinmunoensayo. Marcado con sustancias radiactivas de fluidos o células, reacción antígeno anticuerpo, datos cuantitativos, estudios hormonales.

Aplicaciones terapéuticas de la medicina nuclear:

- Terapia metabólica. Indicación fundamental en el tratamiento del cáncer bien diferenciado de tiroides, folicular, papilar o mixto.
 - Radioisótopo I-131, Hipertiroidismo, Adenoma tiroideo tóxico, Enfermedad de Graves Basedow, Radio embolización.
 - Radioisótopo, Itrio 90 (90Y). Indicaciones hepatocarcinoma, metástasis hepáticas.
- Anticuerpos monoclonales marcados. Ibritumomab 90Y. Cuvatuzumab 90Y. Indicaciones, linfoma no Hodgkin. Adenocarcinoma de páncreas metastásico.
- Terapia del dolor. Samario 153, 153Sm; Estroncio 89, 89Sr. Metástasis óseas.
- Sinoviortesis. Itrio 90, 90Y; Renio 156, 156Rn; Erblio 169, 169Er. Artropatías dolorosas.

- Tumores neuroendocrinos. MIBG 131I. Meta-yodo-bencil-guanidina I-131. fibrocitomas, paragangliomas, neuroblastomas, ca. medular de tiroides, tumor carcinoide.

Emergencias en Medicina Nuclear y Laboratorios

Accidentes e incidentes previsible

Estas instalaciones se caracterizan por el uso de fuentes radiactivas no encapsuladas generalmente en estado líquido y de periodo de semidesintegración corto.

Presentan riesgo de irradiación externa y de contaminación por radionucleidos y para minimizarlo se deberá actuar en todo momento de acuerdo con el Reglamento de Funcionamiento de la Instalación, y el Programa de Garantía de Calidad.

Los accidentes e incidentes previsible en estas instalaciones, el lugar donde es más factible se produzca y sus causas son los siguientes:

- Escape de gases radiactivos: Genera inhalación y consecuente contaminación interna. Es muy improbable por las características de las fuentes, el diseño de la instalación y los procedimientos establecidos.
- Derrame de líquidos: Se puede dar en las distintas zonas de manipulación y movimiento de las monodosis, siendo su consecuencia la contaminación y la irradiación externa.
- Incendio de la instalación: Es la situación de mayor riesgo potencial ya que provoca la liberación de gases y líquidos que pueden conducir a exposiciones y/o contaminaciones.
- Robo o pérdida de sustancias radiactivas: Origen de cualquiera de los riesgos anteriormente indicados, potenciados por el desconocimiento de los afectados.
- Error en la administración de los radiofármacos a los pacientes: Puede suponer una irradiación interna no justificada.
- Inundación: Pudiendo provocar una contaminación de suelo y superficies.

Todos estos sucesos mencionados pueden conducir a situaciones de:

- Contaminación.
- Incendio u otra catástrofe.
- Incorporación no deseada de material radiactivo.

La contaminación puede producirse sobre superficies de trabajo y pavimentos, equipos y materiales, ropas de trabajo y personas.

Según el tipo de radiación emitida, podemos clasificar los radionucleidos en emisores de partículas alfa, beta o energía electromagnética, y, según la relación entre contaminante y contaminado hablamos de contaminación fija o desprendible.

La dispersión de la contaminación está en relación con la forma física del contaminante y es fundamental evitar que pase de zonas activas a zonas inactivas. Para detectarla se pueden utilizar métodos directos con equipos adecuados o indirectos mediante frotis. Con carácter general se adoptarán, entre otras, las siguientes medidas: - descontaminación de equipos y materiales

- descontaminación de superficies y pavimentos
- descontaminación de personas

El SPR o en su defecto el propio Supervisor, instruirá a los servicios de extinción sobre las particularidades, naturaleza y nivel de riesgo que implican las fuentes radiactivas existentes.

Tras la extinción, el SPR evaluará el estado de las dependencias, equipos y material respecto del riesgo radiológico, y actuará procurando restablecer la situación de normalidad en la Instalación. Todas las personas afectadas serán sometidas a estudio y convenientemente informadas, y atendidas de acuerdo con su estado.

En cualquier otra situación de catástrofe se tendrán las mismas prioridades. Actuaciones ante la administración errónea de radionucleidos. Se actuará de manera que se reduzca la absorción y se facilite la eliminación. Se estimará la dosis recibida por el órgano o sistema más expuesto.

Ver Enlace Medicina Nuclear.

El siguiente enlace del Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA, podrá encontrar otras presentaciones de interés Medicina Nuclear:

https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content-es/AdditionalResources/Training/1_TrainingMaterial/NuclearMedicine.htm

https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content-es/AdditionalResources/Training/1_TrainingMaterial/NuclearMedicine.htm

https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content-es/AdditionalResources/Training/1_TrainingMaterial/PETCT.htm

Bibliografía

González Farfan, Rafael. "Interacción de partículas con la materia". 2004.
http://casanchi.com/casanchi_2001/materia01.htm

Kaplan, Irving. "Física Nuclear". Trad. Rodríguez Pasqués, G. Editorial Aguilar, Madrid, 1970. Cap. 2 y 10 a 152. ed. 797 p.

Tipler, Paul. "Física moderna". Reverté, Barcelona, 1994. 550 p.

ICRP (1996). Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74. Annals of the ICRP 26 (3-4). Pergamon Press.

ICRU (1993). Quantities and units in radiation protection dosimetry. ICRU Report 51. International Commission of Radiation Units and Measurements, Bethesda, Maryland.

IAEA-TECDOC-1995 Cultura de la seguridad en las organizaciones, instalaciones y actividades vinculadas al uso de fuentes de radiación ionizante.

Nyström H, Thwaites D. Physics and high-technology advances in radiotherapy: ¿Are they still worth it? Radiother Oncol 2008; 86: 1-3.

Anales Sis San Navarra vol.32 supl.2 Pamplona 2009 Descripción de equipos de última generación en radioterapia externa, S. Pellejero, S. Lozares, F. Mañeru. Servicio de Radiofísica y Protección Radiológica. Hospital de Navarra. Pamplona.

Evaluación de la exposición externa e interna, Evaluación de la exposición ocupacional- exposición externa. 2018. Centro de capacitación regional para latino América y el caribe.

Control De Calidad De Radiofarmacos, E. Silvia Verdera - Silvia Gómez de Castiglia - Marycel Figols de Barboza Comité De Radiofarmacia Asociación Latinoamericana De Sociedades De Biología Y Medicina Nuclear. 2011.

Recursos técnicos para reducir la exposición externa, Exposición Dr. Jorge Carelli. 2018. Centro de capacitación regional para latino América y el caribe.

IAEA Guía de Seguridad SG RS-G-1.1 "Protección Radiológica de los Trabajadores"

IAEA Guía de Seguridad SG RS-G-1.2 "Monitoreo de la Exposición por Irradiación Externa"