

Manual sobre RECINTOS BLINDADOS

Comprende:

Guía de aplicaciones

Guía de procedimientos

Guía de fundamentos básicos

Abril 1996

IAEA-PRSM-2



MANUAL
PRACTICO DE
SEGURIDAD
RADIOLOGICA

Manual sobre RECINTOS BLINDADOS

Comprende:

Guía de aplicaciones

Guía de procedimientos

Guía de fundamentos básicos

**MANUAL PRACTICO
DE SEGURIDAD RADIOLOGICA**

**Manual sobre
RECINTOS BLINDADOS**

Comprende:
Guía de aplicaciones
Guía de procedimientos
Guía de fundamentos básicos

PREFACIO

El presente manual de la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA) debe ser considerado exclusivamente con carácter orientativo como apoyo para la formación del personal de las instalaciones radiactivas y la elaboración de sus procedimientos.

El CSN ha estimado conveniente su edición por su carácter eminentemente práctico. No obstante, lo recogido en este manual no sustituye los requerimientos de obligado cumplimiento establecidos en la reglamentación española aplicable y en las especificaciones de funcionamiento recogidas en las autorizaciones de las instalaciones radiactivas.

La utilización de fuentes de radiación de diversos tipos y actividades está muy difundida en la industria, medicina, investigación y enseñanza en prácticamente todos los Estados Miembros del OIEA, y va en aumento. Aunque en los últimos años algunos accidentes han atraído la atención del público, la amplia utilización de las fuentes de radiación ha mantenido generalmente un buen historial de seguridad. Sin embargo, el control de las fuentes de radiación no siempre es el adecuado. En algunos casos la pérdida de control de estas fuentes ha dado lugar a exposiciones imprevistas de trabajadores, pacientes y miembros del público, a veces con consecuencias mortales.

En 1990 el OIEA publicó un volumen de la Colección Seguridad (Vol. N° 102 de la Colección Seguridad) que ofrece orientación sobre la utilización y regulación seguras de las fuentes de radiación en la industria, medicina, investigación y enseñanza. No obstante, se estimó necesario contar con manuales prácticos de seguridad radiológica para diversos campos de aplicación, orientados primordialmente a las personas que manipulan corrientemente cada día fuentes de radiación, manuales que a la vez pudieran ser utilizados por las autoridades competentes como apoyo en su tarea de capacitación en materia de protección radiológica de los trabajadores o del personal médico auxiliar, o con objeto de ayudar a la dirección de centros locales a establecer normas de protección radiológica para su ámbito.

Por lo tanto, se ha creado una nueva serie de publicaciones. Cada documento constituye en sí mismo una unidad completa y comprende tres partes:

- **Guía de aplicaciones**, que corresponde específicamente a cada aplicación de las fuentes de radiación y describe la finalidad de la práctica, el tipo de equipo utilizado para la ejecución de la práctica y las precauciones que deben adoptarse.
- **Guía de procedimientos**, que incluye instrucciones sobre la forma en que ha de realizarse la práctica en las sucesivas etapas. En esta parte, cada etapa se ilustra con dibujos para estimular el interés y facilitar la comprensión.
- **Guía de fundamentos básicos**, que explica los principios fundamentales de las radiaciones, el sistema de unidades, la interacción de las radiaciones con la materia, la detección de las radiaciones, etc., y es común para todos los documentos.

Edición realizada por el CSN con la autorización del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA)

© OIEA, 1995

ISBN: 84-87275-61-3 (O.C)

ISBN: 84-87275-63-X (T.II)

Depósito Legal: M. 15.042-1996

Imprime: grafoffset sl

Impreso en papel reciclado

Los textos iniciales se elaboraron con la ayuda de S. Orr (Reino Unido) y T. Gaines (Estados Unidos de América) quienes actuaron como consultores, y con la ayuda de los participantes en la reunión de Grupo Asesor que se efectuó en Viena en mayo de 1989: F. Kossel (Alemania), J.C.E. Button (Australia), A. Mendonça (Brasil), J. Glenn (Estados Unidos de América), A. Olombel (Francia), Fatimah M. Amin (Malasia), R. Siwicki (Polonia), A. Jennings (Presidente; Reino Unido), R. Wheelton (Reino Unido), J. Karlberg (Suecia) y A. Schmitt-Hanning y P. Zúñiga de Bello (OIEA).

Estos proyectos fueron revisados por R. Wheelton, de la Junta Nacional de Protección Radiológica del Reino Unido, y B. Thomadsen, de la Universidad de Wisconsin, Estados Unidos de América. En una segunda reunión de Grupo Asesor, celebrada en septiembre de 1990, en Viena, los primeros seis textos ya revisados fueron revisados a su vez por P. Beaver (Reino Unido), S. Coornaert (Francia), P. Ferruz (Chile), J. Glenn (Estados Unidos de América), B. Holliday (Presidente; Reino Unido), J. Karlberg (Suecia), A. Mendonça (Brasil), M.A. Mohamad-Yusuf (Malasia), J.C. Rosenwad (Francia), R. Wheelton (Reino Unido), A. Schmitt-Hannig (Alemania), así como P. Ortiz y P. Zúñiga de Bello (OIEA). La finalización de los seis primeros manuales la efectuaron A. Schmitt-Hannig, de la Oficina Federal de Protección Radiológica (Alemania) y P. Zúñiga de Bello (OIEA).

INDICE

Guía de aplicaciones	7
Necesidad de los recintos blindados	7
Tipos de recintos blindados	8
Blindaje primario de los recintos	8
Blindaje secundario de los recintos	10
Aspectos relacionados con el diseño del recinto	13
Aspectos de diseño del blindaje	15
Control de acceso a los recintos blindados	17
Protección de los trabajadores	19
Medidas para casos de emergencia	20
Guía de procedimientos	23
Guía de fundamentos básicos para los usuarios de radiaciones ionizantes	35
Producción de radiación	36
Unidades de energía de radiación	38
Propagación de la radiación a través de la materia	38
Contención de las sustancias radiactivas	42
Actividad de las fuentes	44
Medición de las radiaciones	45
Radiación y distancia	48
Ejemplos de cálculos	51
Radiación y tiempo	52
Efectos de las radiaciones	53

GUIA DE APLICACIONES: RECINTOS BLINDADOS

Necesidad de los recintos blindados

En todas las aplicaciones de la radiación ionizante, la dosis de radiación de los usuarios y de otras personas que se encuentren en las proximidades debe mantenerse en el valor más bajo que pueda razonablemente conseguirse y, en todo caso, por debajo de los límites de dosis acordados a nivel internacional. Esto puede lograrse combinando los cuatro métodos siguientes:

- 1) Utilizando la fuente más adecuada para la aplicación de que se trate. Como las fuentes radiactivas selladas y los aparatos de radiaciones solo entrañan riesgos externos, son preferibles a las fuentes abiertas. Los riesgos pueden minimizarse aún más si se escoge una fuente de actividad suficiente y las energías de radiación más apropiadas para la aplicación.
- 2) Manteniendo en el mínimo tiempo posible la exposición del usuario y otras personas.
- 3) Manteniendo la distancia necesaria entre la fuente y el usuario y una distancia mayor entre la fuente y las demás personas.
- 4) Colocando materiales de blindaje adecuados de suficiente espesor en torno a la fuente o a la aplicación.

Existen medios físicos para asegurar un tiempo mínimo de exposición; que las barreras de protección permanezcan colocadas para mantener alejadas a las personas de las zonas peligrosas; y que los materiales de blindaje estén en sus lugares antes de la exposición a la fuente. Estos controles técnicos son preferibles a los controles administrativos, ya que éstos últimos dependen de que las personas obedezcan las instrucciones de no permanecer más tiempo del necesario cerca de las fuentes. de no traspasar las barreras y de utilizar materiales de blindaje.

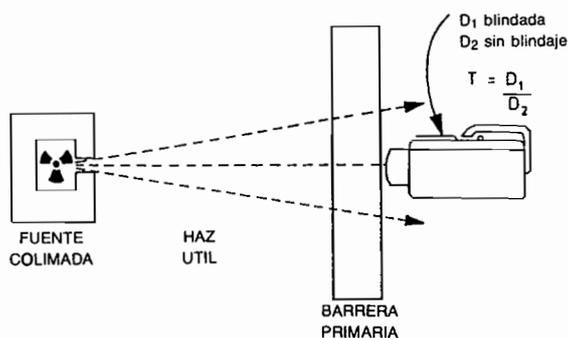
Tipos de recintos blindados

Recinto blindado es todo espacio cerrado construido para contener la radiación ionizante y proporcionar suficiente blindaje a las personas en las zonas contiguas. Su tamaño varía y puede abarcar desde pequeños gabinetes que contengan, por ejemplo, aparatos de rayos X para examinar paquetes postales y bultos cerrados, hasta instalaciones radiográficas con parades, y grandes salas para aplicar dosis muy altas en el tratamiento por irradiación tal como el aplicado en la desinfección, la esterilización y la inducción de cambios en el material irradiado, entre otros usos. Es indispensable disponer de un recinto blindado para trabajar con una fuente de radiación que origine altas tasas de dosis. Depender de la distancia como único factor para reducir la tasa de dosis requeriría una zona de exclusión excesivamente grande. Además, es preciso proporcionar blindaje adecuado a otras fuentes que se utilicen cerca de zonas ocupadas, o a las cuales las personas puedan tener acceso.

Todos los recintos tienen principios de diseño semejantes, aunque sus características pueden variar según se vayan a utilizar para radiaciones con rayos X, con rayos gamma o con neutrones.

Blindaje primario de los recintos

Deberá proveerse suficiente blindaje para reducir las tasas de dosis equivalentes accesibles y transmitidas a un nivel



El factor de transmisión indica el efecto de la barrera primaria.

aceptable, por ejemplo, $7,5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$. Tal vez sea necesario establecer una zona controlada fuera del recinto.

El espesor del blindaje necesario, y su consiguiente costo, pueden reducirse al mínimo limitando el número y área de las superficies interiores a las que está permitido que llegue la radiación primaria. Esta radiación de energía más alta requerirá barreras primarias comparativamente más gruesas o compuestas por materiales diferentes. Las restricciones suelen lograrse colimando la fuente de radiación, es decir, reduciendo la radiación a un haz útil que pueda dirigirse solamente hacia las barreras adecuadas.

Para estimar el espesor necesario de una barrera primaria se debe calcular primero su factor de transmisión T . Si D_1 es la tasa de dosis que se toma como base de diseño (por ejemplo, $7,5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$) en una posición cercana a la superficie exterior de la barrera y D_2 es la tasa de dosis en el mismo lugar sin la barrera, entonces T es igual a D_1 dividido entre D_2 . Para calcular D_2 , el diseñador del recinto necesitará parámetros de diseño, o sea, suposiciones básicas sobre:

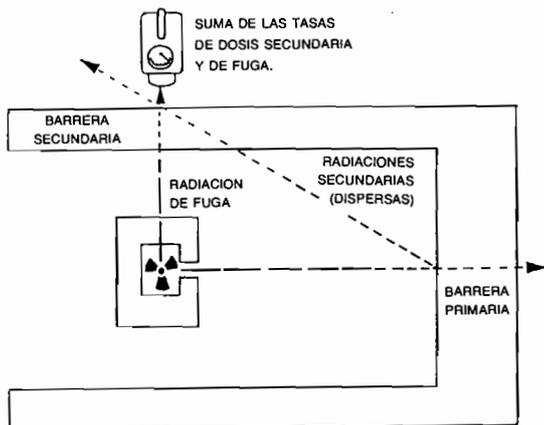
- qué radionucleidos o aparatos se habrán de utilizar;
- el límite superior de actividad de la fuente radiactiva o los parámetros eléctricos de los aparatos que pueden utilizarse; y
- las distancias mínimas entre la fuente de radiación y la superficie interior de la barrera.

Para calcular con exactitud el espesor del blindaje necesario se requieren los gráficos publicados de transmisión para los distintos radionucleidos (y los parámetros de los aparatos) y diferentes materiales de blindaje. No obstante, es posible hacer una estimación simplificada del espesor de la barrera primaria que represente un cálculo por exceso del espesor del blindaje. Si el factor de transmisión calculado, D_1/D_2 , es de un décimo, entonces se utiliza una barrera primaria equivalente a una capa de reducción a 1/10 o capa decimorreductora (CDR) (véase la Guía de fundamentos básicos); para obtener una reducción a un centésimo, se emplea el espesor equivalente a 2 CDR, y para una reducción a un milésimo, el espesor de 3 CDR; y así sucesivamente. La CHR (espesor de la capa hemirreductora cuya reducción equivale a la mitad) y el espesor de la CDR dependen de la energía de radiación primaria.

Fuente de radiación	Espesor típico de barrera primaria	
	Plomo (mm)	Hormigón (cm)
Rayos X para servicios odontológico o veterinario	0,5	5
Rayos X para diagnóstico médico	2	15
Rayos X para fines industriales (250 kV)	10	50
Iridio 192 (1 TBq)	70	60
Cobalto 60 (185 GBq)	180	80
Acelerador lineal (8 MV)	300	200

Blindaje secundario de recintos

Las barreras (a menudo denominadas barreras secundarias) proporcionan suficiente protección contra la radiación secundaria que se dispersa del haz útil y también contra la radiación de fuga transmitida por los lados del recipiente de la fuente radiactiva o el aparato de rayos X. Aunque la radiación secundaria tiene energías más bajas que la radiación primaria, la radiación de fuga (que no debe confundirse con las pruebas de fuga de sustancias radiactivas que se efectúan en las fuentes selladas) a veces tiene energías tan altas como la radiación primaria.



Las barreras secundarias se utilizan para atenuar las radiaciones secundarias.

Ello suele determinar el espesor del blindaje secundario requerido, que se calcula entonces de manera similar a la utilizada para calcular el espesor de la barrera primaria.

Hay varias normas que establecen límites para la radiación de fuga proveniente de la superficie de los aparatos de rayos X y de los contenedores de fuentes de gammagrafía. Estos últimos se utilizan para la radiografía industrial y se describen en la Guía de aplicaciones del Manual sobre gammagrafía industrial (IAEA-PRSM-1).

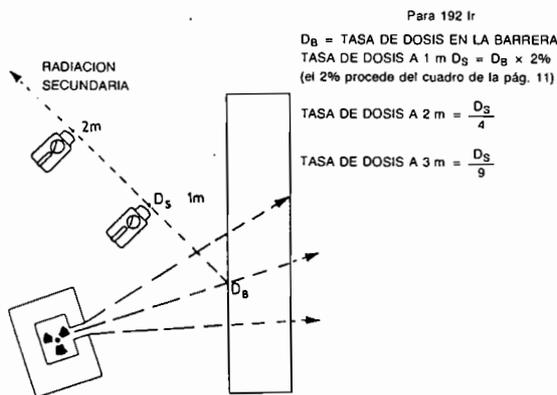
La radiación de fuga de un aparato de rayos X industrial no debe exceder de $10 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ a 1 m de distancia del foco del emisor de rayos X. Los aceleradores lineales y otros aparatos de muy alta tensión o potencial acelerador no deben tener una fuga que sobrepase un 0,1% de la tasa de dosis en el haz útil. Tales aparatos solo tienen fuga de radiación cuando se aplica tensión eléctrica. En cambio, siempre existirán tasas de dosis en las inmediaciones de los contenedores de fuentes radiactivas. Los contenedores pueden ser de Clase M (móviles) o de Clase F (fijos). Estos últimos sirven de blindaje contra actividades de fuentes mucho más altas que las que pueden utilizarse fuera de un recinto. Si se cumplen las especificaciones de construcción, las marcas y los límites de tasas de dosis que figuran en la ISO 3999-**** para Aparato de Gammagrafía, las tasas de dosis máxima en torno al contenedor de una fuente serán las siguientes:

Clase de contenedor de fuente	Tasa de dosis máxima ($\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$)		
	En la superficie exterior del contenedor	A 50 mm de la superficie exterior del contenedor	A 1 m de la superficie exterior del contenedor
Clase M	2000	o 1000	50
Clase F	2000	o 1000	100

Para obtener valores precisos de las tasas de dosis debidas a la radiación dispersa se deben hacer cálculos complejos en que se tome en cuenta la energía de la radiación antes de que comience a interactuar el tamaño del haz, la naturaleza del medio con que interactúa la radiación y la dirección de la dispersión. Con todo, para los haces primarios emitidos en amplias zonas se puede reali-

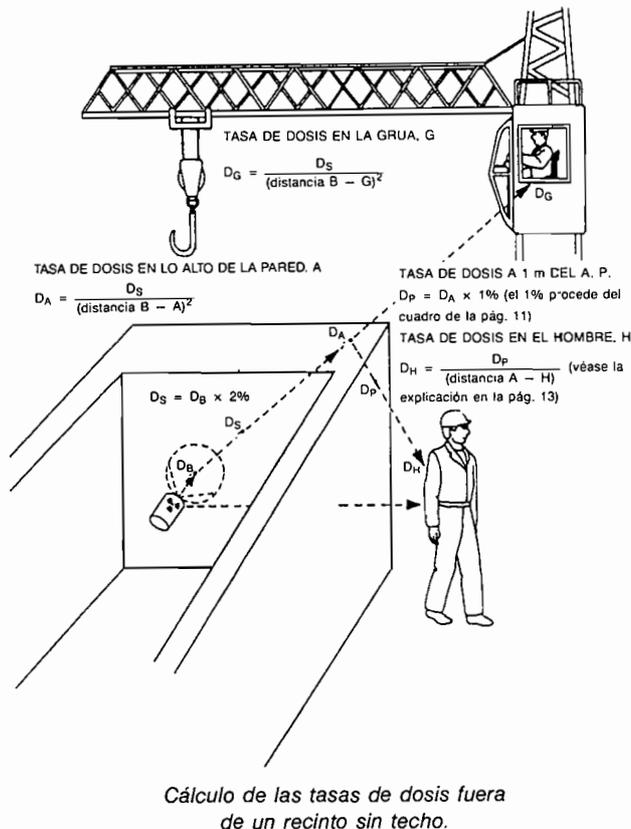
zar un cálculo mucho más simplificado de las tasas de dosis debidas a la radiación dispersa. Esto supone, asumir que la tasa de dosis a 1 m de distancia del punto de dispersión será un pequeño porcentaje fijo de la tasa de dosis en el punto de dispersión. Los valores siguientes representan un cálculo por exceso de las tasas de dosis dispersa:

Fuente de radiación	Dispersión máxima a 1 m del punto de dispersión (en %)
Rayos X para fines industriales (100 à 300 kV)	3,6
Radiaciones gamma de iridio 192	2
Radiaciones gamma de cobalto 60	1



Utilizando las cifras dadas para calcular la tasa de dosis dispersa a 1 m de la pared, del piso, del objeto radiografiado o de otro punto de dispersión, pueden calcularse tasas de dosis a mayores distancias en consecuencia, empleando la ley de la inversa del cuadrado.

En medios dispersantes muy amplios o de gran volumen, las mediciones de la radiación indican que la tasa de dosis disminuye solo en razón inversa a la distancia. En la ilustración se muestran los cálculos utilizados para obtener estimaciones de tasa de dosis fuera de un recinto, por ejemplo, en la posición que ocupa el operario en la grúa y a nivel del suelo.



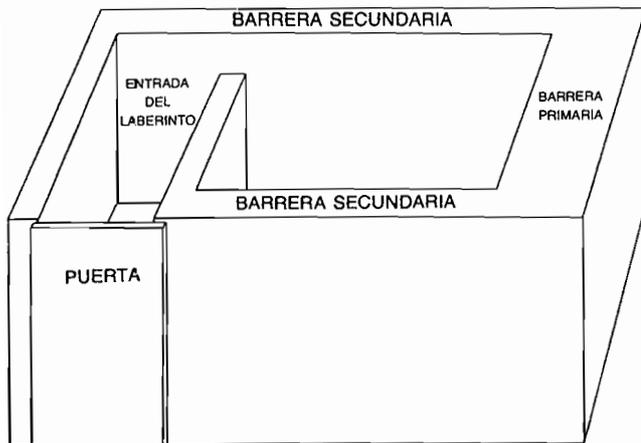
Aunque es difícil determinar la energía efectiva de la radiación dispersa debido a que los materiales de blindaje específicos atenúan con más eficacia este tipo de radiación cuando es de energía más baja, los espesores de blindaje requeridos son muy inferiores a los que se precisan para las energías de radiación primaria. Las barreras secundarias que protegen a la vez contra la radiación de fuga y la radiación dispersa por lo general tienen la mitad del espesor de las barreras primarias que se requieren para un recinto.

Aspectos relacionados con el diseño del recinto

Las puertas utilizadas en las barreras secundarias para blindar las fuentes de radiografía industrial son muy pesadas y su construcción es costosa. Si los objetos que

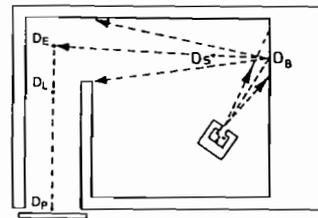
se van a radiografiar son pequeños o el recinto está desprovisto de techo a efectos de facilitar el uso de grúas para alzar los objetos que se hallan dentro del recinto, solo se necesitan puertas pequeñas. La altura del muro pasa a ser entonces un elemento importante del blindaje. Aunque este diseño es corriente, si no se aplican en la práctica los parámetros establecidos, se dispersará una radiación excesiva por toda la superficie de la pared. El diseño puede resultar inadecuado si, por ejemplo, se introduce radiografía con rayos X en un recinto diseñado solo para radiografía con rayos gamma, si el haz útil se lleva por encima de la horizontal o si no se mantiene la colimación. Los cambios que se efectúen en la parte alta del recinto, como la instalación de nuevos conductos de ventilación, también pueden alterar la cantidad de la dispersión. Los usuarios de estos recintos deben conocer si hay algún operario de grúa u otro tipo de personal trabajando por encima del nivel del suelo o si se prevé construir nuevos edificios de varios niveles en las inmediaciones del recinto.

La tasa de dosis en la puerta puede reducirse considerablemente incorporándole una entrada en forma de laberinto, aligerando así la construcción de la puerta. La tasa de dosis a 1 m del centro de la zona de la esquina del laberinto sobre la que incide radiación gamma es aproximadamente el 10% de la tasa de dosis en dicho centro y utilizando la ley del inverso del cuadrado de la distancia desde dicho centro y la puerta se puede calcular la tasa de



Recinto sin techo con entrada en forma de laberinto.

dosis en la puerta. También se produce un efecto semejante con otros tipos de radiaciones, aunque el porcentaje de dispersión puede ser mucho más alto, por ejemplo, en un 25% en el caso de la radiación neutrónica.



TASA DE DOSIS EN LA ESQUINA DEL LABERINTO, E

$$D_E = \frac{D_S}{(\text{distancia } B - E)^2}$$

TASA DE DOSIS A 1 m DEL CENTRO DE LA ZONA DE LA ESQUINA DENTRO DEL LABERINTO, L

$$D_L = D_E \times 10\% \text{ (véase la explicación sobre el 10\% en la pág. 14)}$$

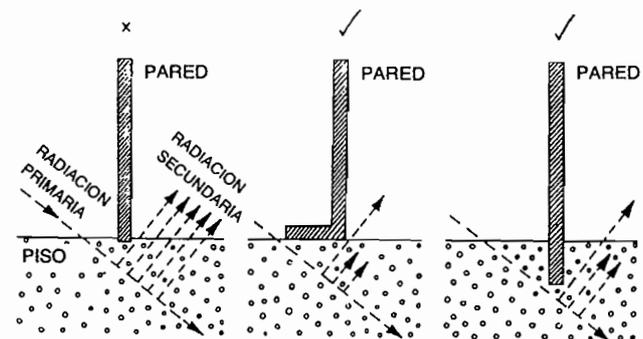
TASA DE DOSIS EN LA PUERTA, P

$$D_P = \frac{D_L}{(\text{distancia } E - P)^2}$$

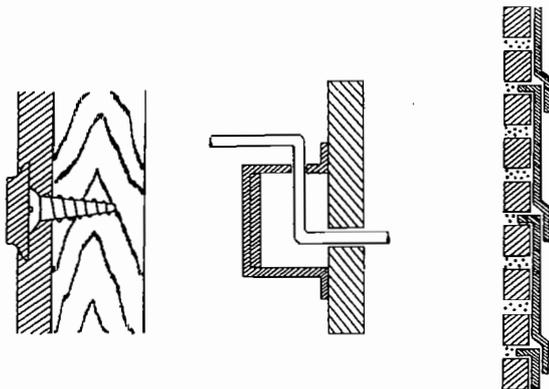
Cálculo de la tasa de dosis en la entrada del laberinto de un recinto.

Aspectos de diseño del blindaje

La radiación que penetra o se dispersa alrededor de los puntos débiles del blindaje puede hacer que se escape radiación y se produzcan altas tasas de dosis fuera del recinto. A menudo esos puntos débiles se presentan donde penetran tubos, o conductos o a través del blindaje y dispositivos de sujeción (por ejemplo, tornillos) en torno a puertas y ventanas, o en los lugares en que se apoyan los materiales de blindaje. Durante el diseño de la instala-



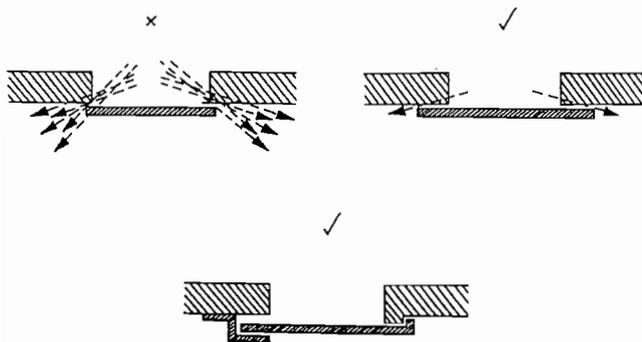
Métodos para impedir que la radiación se disperse por debajo de un muro.



Métodos para cerrar los puntos débiles del blindaje.

ción no siempre se prevén esos puntos débiles que a veces se presentan después de un período desgaste (por ejemplo, los soportes de las puertas), o con el deterioro del blindaje, su desplazamiento, o el asentamiento del edificio.

Para evitar esos puntos débiles pueden utilizarse varias técnicas de diseño. El uso de un monitor de tasa de dosis fuera del recinto y un servicio de mantenimiento periódico como medios de vigilancia radiológica permitirán detectar cualquier fallo antes de que se agrande.



Métodos para impedir que se escape radiación por las puertas.

Control de acceso a los recintos blindados

La instalación puede tener una zona controlada a la cual deba restringirse el acceso en todo momento. Sin embargo hay que garantizar que nadie quede inadvertidamente en su interior cuando vaya a originarse la exposición a un haz primario. También debe impedirse la entrada accidental de toda persona durante la exposición a un haz útil. Los dispositivos que se instalen para lograr estos objetivos deberán ser eficaces y funcionar de manera que tan pronto tengan un fallo, impidan o eliminen automáticamente el peligro de radiación.

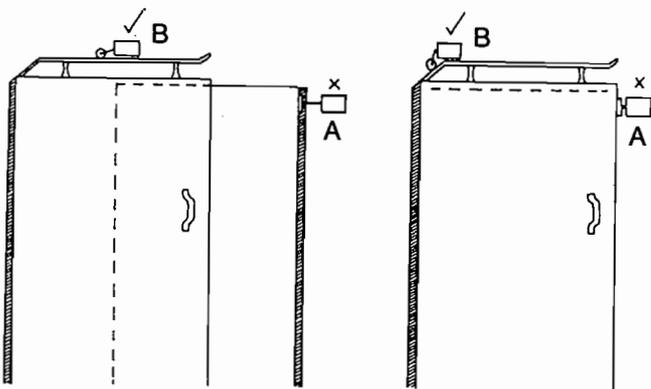
Cuando vaya a producirse la exposición a un haz primario, se deberá emitir una señal de aviso antes de la exposición tanto dentro como fuera del recinto, la que deberá durar al menos diez segundos para que todos los que, encontrándose dentro del recinto, escuchen o vean la señal puedan adoptar las medidas necesarias. Se colocarán letreros en que se explique el significado de la señal y las medidas que habrá que adoptar. Cuando la fuente de radiación sea un aparato o una fuente accionada con electricidad, se deberá instalar algún tipo de dispositivo de control para que cualquier persona que haya quedado dentro pueda cortar la alimentación eléctrica. Por ejemplo, se deberá instalar un botón o cable de parada de emergencia en un lugar al que pueda accederse sin tener que atravesar el haz primario. En otros casos, es preciso que la persona que haya quedado atrapada en el lugar pueda abandonar el recinto de inmediato o protegerse en una zona blindada, como la entrada a un laberinto, en que pueda comunicarse con las personas que se hallen en el exterior.

Tanto en el interior como en el exterior del recinto se deberán instalar señales de aviso de exposición con las correspondientes explicaciones para los casos en que se origine la exposición a un haz primario, las que deberán instalarse separadamente de las señales de preexposición para que puedan distinguirse de éstas. Un recinto pequeño, por ejemplo, de menos de $0,2 \text{ m}^3$, solo necesitará una señal de aviso de exposición sin ningún tipo de señal interna o dispositivo de control.

Deben instalarse enclavamientos adecuados para establecer una conexión mecánica o eléctrica entre el control de exposiciones y la puerta u otros medios de

acceso a un recinto. Esto impedirá que una persona entre durante una exposición o asegurará inmediatamente la fuente de radiación cuando la persona trate de entrar. Un dispositivo de este tipo de amplia aplicación es un enclavamiento mecánico conocido como sistema de llave cautiva. En su forma más sencilla, el sistema tiene un cerrojo con dos llaves que son ejemplares únicos: una llave de puerta y una llave de control, una de las cuales se mantiene siempre en el cerrojo. Cuando la puerta se cierra con cerrojo, la llave de la puerta queda atrapada, mientras que la llave de control puede extraerse y utilizarse para conectar la consola y producir el haz útil. La llave de control no puede extraerse del panel de control hasta que se haya eliminado la radiación. La llave de la puerta no puede hacerse girar para abrirla hasta que la llave de control se haya colocado de nuevo en el cerrojo. Cualquiera que entre en el recinto deberá tomar la llave de la puerta para impedir que se produzca un haz de radiación. Para emitir la señal de preexposición se puede utilizar la misma llave, lo que garantiza que pueda comprobarse que nadie haya quedado encerrado inadvertidamente en el recinto. Este tipo de dispositivo se conoce como sistema de búsqueda y cierre y resulta indispensable en las instalaciones con fuentes de radiación de muy alta energía.

Existen diversos tipos de interruptores que se pueden montar de manera que sean accionados por la puerta del recinto (véase la figura). Los interruptores de pulsador (A)



*Sistema de seguridad contra fallos en el enclavamiento de una puerta:
a) abierta; b) cerrada.*

que se accionan por presión de la puerta no son muy fiables, ya que en caso de avería, por rotura de su muelle por ejemplo, el contacto queda en la posición insegura (como si la puerta estuviera siempre cerrada), permitiendo la irradiación aunque la puerta esté abierta. Es más eficaz el dispositivo B, de microinterruptor accionado por leva en el caso de una puerta de corredera. Si la lámina elástica accionada por la leva se estropea o se deforma, el contacto queda en posición segura (como si la puerta estuviera siempre abierta), no permitiendo la irradiación.

Es importante cuidar de que si la fuente de radiación se asegura con un enclavamiento de acción automática, este mecanismo se mantenga funcionando hasta que el operador del panel de control produzca la emisión del haz primario. El mero hecho de cerrar una puerta no basta para dar inicio a la exposición de un haz primario.

Cuando sea razonablemente factible, el puesto de control de todas las fuentes de radiación debe situarse fuera del recinto. Este es un requisito indispensable para las fuentes con una intensidad sumamente elevada, por ejemplo, de más de $10 \text{ mSv} \cdot \text{min}^{-1}$ a 1 m. En todo caso, la tasa de dosis en cualquier punto de control no debe exceder de $2 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ (esta tasa de dosis no es permanente, sino solo durante el tiempo de exposición).

Protección de los trabajadores

Cada vez que entre en un recinto después de haberse emitido un haz primario, el operador debe llevar consigo un monitor de tasa de dosis en funcionamiento. Las mediciones se deberán efectuar cerca del lugar donde se hallaría el haz primario para confirmar que se ha eliminado la radiación. Además, se puede instalar una alarma de tasa de dosis dentro del recinto para indicar cualquier fallo que se produzca.

A intervalos periódicos de quizá cuatro meses y siempre que el haz primario se utilice con una dirección no habitual, se deberá llevar a cabo una inspección de vigilancia radiológica y realizarse mediciones en las zonas circundantes al recinto. De ser posible, se deberán colocar restricciones físicas en el colimador para garantizar que el haz primario solo pueda utilizarse dentro de los límites de los parámetros del diseño.

Si el recinto ha sido bien diseñado y se conserva adecuadamente, el operador raras veces, si es que hay alguna, tendrá que trabajar con tasas de dosis superiores a $7,5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$. Es poco probable que el trabajador acumule más de unas décimas de cualquier límite de dosis en un año. No obstante, puede convenir que los trabajadores que tienen acceso regular a los recintos lleven puestos dosímetros personales.

Medidas para casos de emergencia

La alta intensidad de las fuentes de radiación que se suelen utilizar en las instalaciones puede provocar accidentes e incidentes de gravedad. Aun así, la estructura permanente de la instalación debería reducir estos riesgos. Aun cuando se presentara un problema, debería ser más fácil recuperar el control que en el caso de un equipo portátil.

Con todo, es menester hacer una evaluación minuciosa del equipo, el recinto y los procedimientos utilizados para descubrir cualquier posible anomalía. Es preciso elaborar planes de contingencia que puedan aplicarse con rapidez y eficacia para recuperar el control en caso de que surja un problema. Los planes de contingencia permitirán determinar si se requiere un equipo especial para hacer frente a incidentes razonablemente previsibles.

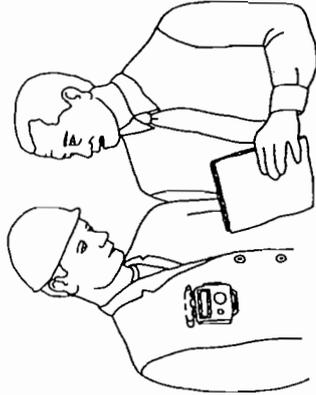
Los planes podrían servir, por ejemplo, para definir las medidas que se requerirían de inmediato para solucionar los problemas siguientes:

- daño físico a la carcasa que contiene la fuente que ha sufrido abolladuras o los efectos de un incendio o explosión;
- fuga de sustancia radiactiva de una fuente sellada;
- descubrimiento de tasas de dosis inaceptablemente altas que sean resultado de daños experimentados por el recinto o de la violación de los parámetros de diseño;
- exposición de una persona a causa de uno de los incidentes descritos o del fallo de un enclavamiento o de una señal de alarma;
- incapacidad de una fuente radiactiva para volver a su blindaje de seguridad.

El escape de una sustancia radiactiva de la fuente puede hacer que se contaminen las superficies que entren en contacto directo o indirecto con la sustancia radiactiva. En este caso deberán tomarse precauciones para impedir la ingestión de las sustancias radiactivas que hayan contaminado la ropa y las superficies del cuerpo. Para que la descontaminación resulte eficaz será necesario contar con la ayuda de especialistas.

Todo incidente que pudiese traducirse en una dosis interna o externa para una persona o toda dosis alta que se haya registrado en un dosímetro deben investigarse. Es importante determinar si la dosis sospechada o registrada fue recibida realmente y también si alguna parte del cuerpo ha recibido una dosis mucho más alta que pudiese traducirse en una lesión localizada de los tejidos.

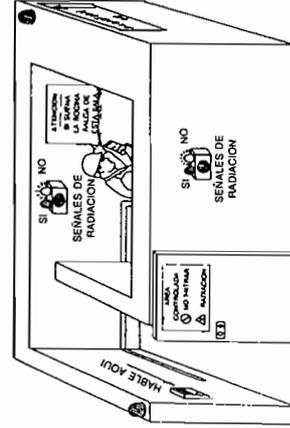
**GUIA DE PROCEDIMIENTOS:
RECINTOS BLINDADOS**



Utilice y conserve el recinto blindado para los fines a que se destinó.

Solo tendrán acceso al recinto los trabajadores cualificados y autorizados quienes, si procede, deberán someterse a exámenes médicos y llevar consigo un dosímetro.

Antes de comenzar a trabajar lea estas guías de seguridad y plantee sus dudas. Analice con sus colegas las ideas que tenga para apoyar este importante trabajo.



Examine el recinto y observe sus características principales, como por ejemplo, las barreras primarias y secundarias.

Lea los parámetros de diseño del recinto en caso de que se disponga de ellos, y compare la fuente de radiación en uso con la originalmente prevista. Compruebe que la intensidad máxima de la fuente en uso y su colimación cumplan con las especificaciones. Examine los obstáculos que existen en la dirección del haz y averigüe la carga de trabajo típica del último tiempo en las direcciones del haz que se utilizan normalmente.

Quizá sea prudente mostrar gráficamente los parámetros de diseño dentro del recinto.

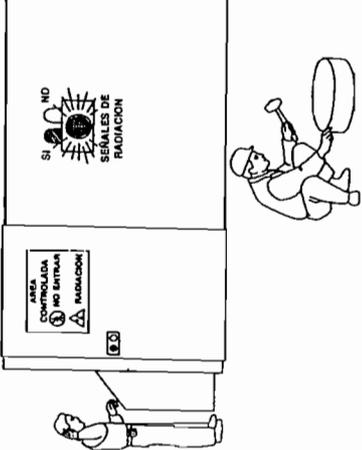


Diagram illustrating a radiation control area. A person is shown inspecting a control panel labeled "ÁREA CONTROLADA NO ENTRAR RADIACIÓN" (Controlled Area, No Entry, Radiation). The panel also features a radiation warning symbol and a "NO" sign. Another person is shown using a megaphone, indicating an announcement or warning.

Examine periódicamente las señales de alarma de preexposición y exposición. Compruebe que funcionen y que toda persona que se halle dentro del recinto siempre reciba el aviso cuando haya comenzado una secuencia de exposiciones. De ser necesario, se deberían instalar dos señales de exposición para que al menos una siempre funcione. Cerciórese de que las señales sonoras puedan escucharse cuando haya ruido de fondo y que las señales visuales estén bien a la vista.

Asegúrese de que en las señales se hayan colocado rótulos con indicaciones claras, de modo que tanto las personas autorizadas como las no autorizadas que se hallen dentro y fuera del recinto puedan comprender su significado y las medidas que deberán tomar al emitirse las señales.

Informe de cualquier fallo a su supervisor



Diagram illustrating a radiation control area. A person is shown inside the area, possibly performing a task. The control panel is labeled "SEÑALES DE RADIACIÓN" (Radiation Signals) and features a radiation warning symbol and a "NO" sign.

Examine los mecanismos de seguridad instalados, incluidos los medios con que se cuenta para que cualquier persona que quede encerrada dentro del recinto pueda interrumpir una exposición y establecer contacto con el exterior.

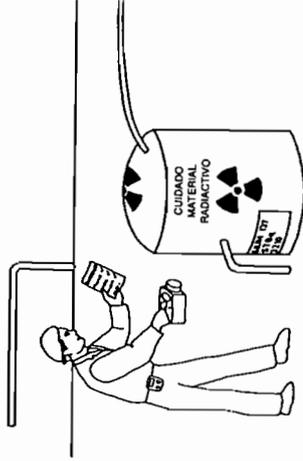
Compruebe que los enclavamientos funcionen de modo que impidan que alguien entre inadvertidamente o cancelen de inmediato una exposición que tenga lugar cuando la puerta esté abierta.

Informe de cualquier fallo a su supervisor

En el caso de las fuentes selladas, utilice un dosímetro para comprobar que la fuente haya quedado blindada en condiciones de seguridad antes de llevar a cabo el mantenimiento ordinario en el contenedor de la fuente. Lleve un registro para demostrar la realización de los servicios de mantenimiento periódico (semanal, mensual, anual o bienal), como por ejemplo:

- 1) Limpieza del contenedor, eliminando cualquier suciedad o humedad.
- 2) Utilización de los lubricantes recomendados para limpiar y dar mantenimiento a las piezas móviles.
- 3) Comprobación de que estén bien apretados los tornillos y tuercas, y verificación del buen estado de las roscas y los muelles.
- 4) Confirmación de que funcione el mecanismo de bloqueo de la fuente.
- 5) Comprobación de que el depósito de la fuente exhiba el símbolo del trébol y un aviso adecuado; el nombre del radionucleido que contenga; la actividad y fecha de referencia de las fuentes selladas; y los números de identificación del contenedor y las fuentes.
- 6) Realización, en los intervalos recomendados y solo cuando se esté cualificado y autorizado para hacerlo, de diversas pruebas para determinar la posible fuga de sustancias radiactivas de la manera que exige la autoridad reguladora o recomienda el fabricante de las fuentes selladas que se estén utilizando.

Informe de cualquier fallo a su supervisor

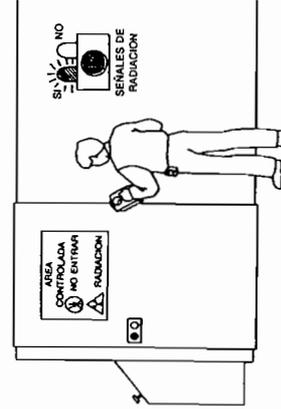


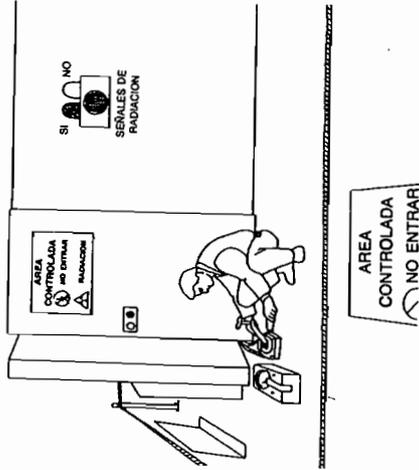
Inspeccione el recinto con suficiente frecuencia, como por ejemplo, cada tres meses, para determinar posibles daños de las puertas, las cajas blindadas de tubos y cables, u otros defectos de blindaje.

Mida las tasas de dosis accesibles durante las exposiciones a fuentes normales. Tenga presente que si no se irradia todo el detector, por ejemplo, cuando se realizan mediciones cerca de los intersticios de las puertas, la lectura puede indicar tasas de dosis inferiores a las reales. Además, la radiación dispersa sobre un muro puede sumarse a la radiación transmitida (de fuga y primaria) dando una lectura máxima a varios metros de distancia de las superficies externas del recinto.

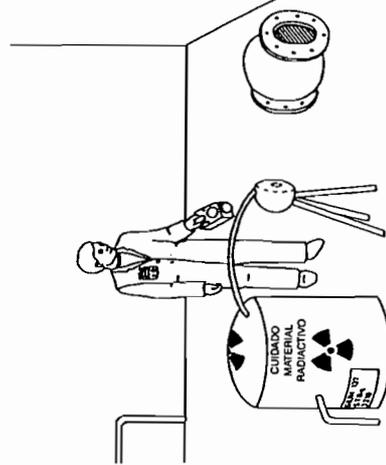
Las mediciones de la tasa de dosis deben efectuarse por encima del nivel del suelo e incluso a alguna distancia del recinto.

Repita las mediciones cada vez que se utilice un haz útil en situaciones anormales o se haga funcionar en el límite de los parámetros de diseño.





Si es imposible utilizar un recinto completamente cerrado, es decir, si se adapta un recinto existente para realizar una gammagrafía utilizando un contenedor de fuente portátil tipo proyector con el puesto de control fuera del recinto, asegúrese de que la tasa de dosis en el puesto de control siempre sea inferior a $2 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$. Deberán colocarse barreras y avisos para marcar todas las áreas controladas cerca de la puerta o en otro lugar, y deberán utilizarse los demás procedimientos descritos en la Guía de procedimientos.

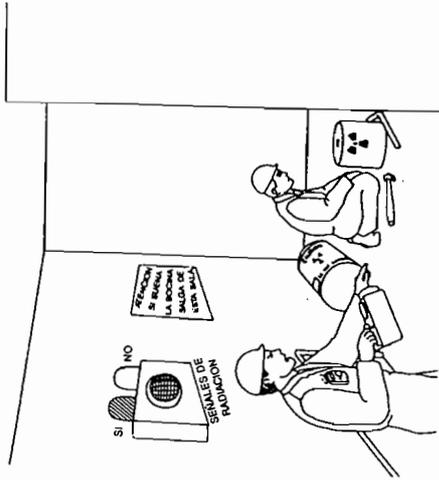


Al final de una exposición con temporizador automático, o después de accionar el control para terminar la exposición, entre cuidadosamente en el recinto con el monitor de tasa de dosis funcionando.

Haga las mediciones cerca de donde está previsto que se halle el haz primario y luego alrededor del contenedor de la fuente para confirmar que ésta se encuentre totalmente blindada de manera segura.

Los objetos o tubos irradiados a través de los cuales se desplazan las fuentes selladas pueden ya manipularse con seguridad.

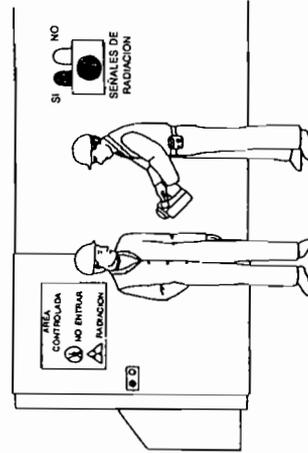
Mantenga el monitor de tasa de dosis funcionando hasta que abandone el recinto.



Si la fuente de radiación, o el recinto, presenta un fallo o se hace evidente un incidente mientras alguien se encuentra dentro del recinto, mantenga la calma. La persona deberá abandonar el recinto de inmediato.

De ser posible, deberán utilizarse los controles para devolver la fuente a su posición blindada. Si esto no puede hacerse, mida la tasa de dosis en las inmediaciones del recinto e instale barreras para marcar el alcance de las áreas controladas.

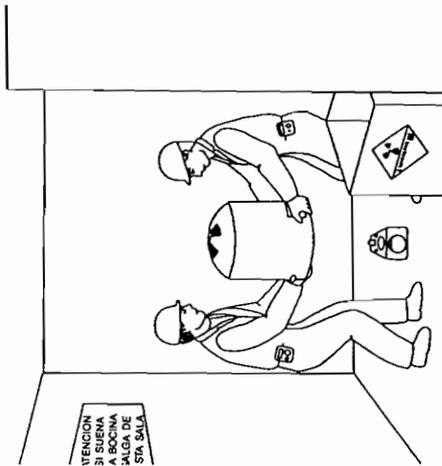
Si es posible hacerlo sin recibir dosis innecesarias, selle la puerta del recinto y manténgase cerca de la zona para impedir la entrada de personal. Envíe a alguien para que comunique la situación a su supervisor.



Analice detenidamente la situación antes de aplicar cualquier plan para corregir un fallo o recuperar las fuentes selladas que, aunque blindadas, hayan quedado expuestas en el recinto. Pueden existir varias opciones que entrañan un mínimo riesgo o dosis mínimas para las personas afectadas.

Debe procurarse el asesoramiento del fabricante del equipo o de otro especialista cualificado.

El examen de un equipo que sea similar puede ofrecer una solución para el problema o indicar la conveniencia de utilizar instrumentos especiales.



Tan pronto deje de utilizarse la fuente radiactiva o el equipo que la contiene, es conveniente devolverla al fabricante o proveedor. Si se utiliza un método de evacuación, éste debe ajustarse a las normas legales del gobierno de su país en relación con ese método en particular.

Las sustancias radiactivas que se envíen para su evacuación deberán embalsarse y transportarse adecuadamente conforme a lo dispuesto en el Reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos del OIEA.

GUIA DE FUNDAMENTOS BASICOS PARA LOS USARIOS DE RADIACIONES IONIZANTES

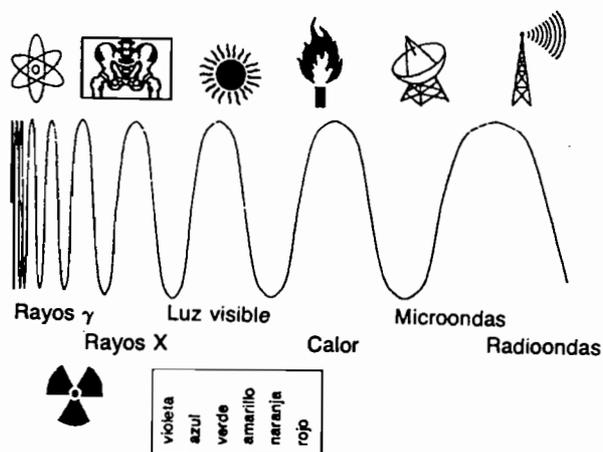
GUIA DE FUNDAMENTOS BASICOS PARA LOS USARIOS DE RADIACIONES IONIZANTES

Producción de radiación

Las sustancias radiactivas son emisores de energía predecibles y continuos. La energía emitida puede serlo en la forma de partículas alfa (α), partículas beta (β) y rayos gamma (γ). La interacción entre estas radiaciones y la materia puede, en ciertas circunstancias, dar lugar a la emisión de rayos X y neutrones.

Los rayos gamma y X consisten en entidades físicas denominadas fotones que se comportan como partículas colisionando con otras partículas cuando interactúan con la materia. Sin embargo, los fotones en grandes cantidades se comportan, en conjunto, como ondas de radio o luminosas. Cuanto más corta es su longitud de onda, más alta es la energía de cada fotón.

La energía de los rayos gamma y su capacidad para penetrar la materia se debe a que sus longitudes de onda son mucho más cortas.



Espectro de las radiaciones similares a los rayos gamma.

Los rayos X son producidos por una máquina de rayos X solo cuando el tubo de rayos X recibe una alimentación de miles de voltios. Aunque son similares a los rayos gamma, los rayos X tienen habitualmente longitudes de onda mayores y por lo tanto portan menos energía y son menos penetrantes. (Sin embargo, los fotones de rayos X producidos por aceleradores pueden sobrepasar las energías de la radiación gamma y su capacidad de penetrar los materiales.) Las máquinas de generar rayos X producen una cantidad de radiación generalmente cientos o incluso miles de veces mayor que la radiación gamma emitida por una fuente radiactiva industrial típica. No obstante, la actividad de las fuentes típicas de teleterapia suele ser miles de veces mayor que la de las fuentes de radiografía industrial.

Los rayos gamma provenientes del iridio 192 (^{192}Ir) tienen menos energía que los producidos por el cobalto 60 (^{60}Co). Se trata de diferencias útiles que permiten escoger entre una amplia gama de radionucleidos artificiales aquél que emite las radiaciones que más convienen para una aplicación determinada.

Las partículas beta son electrones y también pueden tener una gama de diferentes energías. Por ejemplo, las partículas beta producidas por un radionucleido como el hidrógeno 3 (^3H) son más lentas y por lo tanto tienen casi una centésima parte de la energía de las partículas beta de radionucleidos diferentes, tales como el fósforo 32 (^{32}P).

La radiación formada por neutrones puede generarse de diversas maneras. La más común consiste en mezclar una sustancia radiactiva, tal como el americio 241 (^{241}Am), con berilio. Cuando las partículas alfa emitidas por el americio 241 colisionan con el berilio, se produce una reacción especial emitiéndose neutrones rápidos (de alta energía). El americio 241 también emite rayos gamma y de esa manera la fuente compuesta de americio 241/berilio produce neutrones y rayos gamma. Otra manera de generar neutrones es la utilización de una máquina generadora de radiaciones con una combinación de alta tensión eléctrica y blancos especiales (ánodos). Las sustancias especiales situadas dentro de la máquina, combinadas con altas tensiones, pueden generar gran número de neutrones de energía sumamente alta.

Las partículas alfa en general son más lentas que las partículas beta, pero como se trata de partículas más pesadas son emitidas generalmente con una mayor energía. Las partículas alfa se usan en aplicaciones que requieren una ionización intensa en distancias cortas, tal como los eliminadores de carga estática y los detectores de humos.

Unidades de energía de radiación

Para expresar la energía de esos diferentes tipos de radiación se utiliza una unidad llamada el electronvoltio (eV). Un electronvoltio es la energía adquirida por un electrón acelerado mediante una tensión de un voltio. De este modo, 1000 voltios crearían un espectro (gama) de energías de hasta 1000 eV. Diez mil voltios crearían rayos X de hasta 10 000 eV. Una forma práctica de expresar estos números tan elevados es usar prefijos, como por ejemplo, en lugar de:

1000 eV puede escribirse 1 kiloelectronvoltio (1 keV);

10 000 eV puede escribirse 10 kiloelectronvoltios (10 keV);

1 000 000 de eV puede escribirse 1 megaelectronvoltio (1 MeV);

5 000 000 de eV puede escribirse 5 megaelectronvoltios (5 MeV).

Propagación de la radiación a través de la materia

Cuando la radiación se propaga a través de la materia colisiona e interacciona con los átomos y moléculas que la componen. En una sola colisión o interacción la radiación generalmente cederá sólo una pequeña parte de su energía al átomo o molécula. El átomo o molécula será alterado y se convertirá en un par de iones. La radiación ionizante deja una traza formada por esos átomos y moléculas ionizados, cuyo comportamiento puede entonces modificarse.

Después de sucesivas colisiones una partícula alfa pierde toda su energía y deja de moverse, habiendo creado una traza iónica corta y densa. Esto ocurrirá en un recorrido de unos pocos centímetros en el aire, en el espesor de un trozo de papel o tela o en la capa exterior de la piel de una persona. En consecuencia, los radionucleidos que emiten partículas alfa no constituyen un peligro externo.

Esto significa que las partículas alfa no pueden causar daño si el emisor alfa está fuera del cuerpo. En cambio, los emisores alfa que han sido ingeridos o inhalados representan un grave peligro interno.

Según cuál sea su energía, las partículas beta pueden propagarse como máximo a unos pocos metros en el aire y a unos pocos centímetros en sustancias como un tejido o un plástico. Finalmente, a medida que pierde energía la partícula beta, se hace considerablemente más lenta y es absorbida por el medio. Los emisores beta representan un peligro interno y aquellos que emiten partículas beta de alta energía constituyen también un peligro externo.

Radionucleido	Tipo de radiación	Gama de energías (MeV)
Americio 241	alfa	5,5 a 5,3
	gamma	0,03 a 0,37
Hidrógeno 3	beta	0,018 máximo
Fósforo 32	beta	1,7 máximo
Yodo 131	beta	0,61 máximo
	gamma	0,08 a 0,7; 0,36
Tecnecio 99m	gamma	0,14
Cesio 137	beta	0,51 máximo
(Bario 137m)	gamma	0,66
Iridio 192	beta	0,67 máximo
	gamma	0,2 a 1,4
Cobalto 60	beta	0,314 máximo
	gamma	1,17 y 1,33
Americio 241/ berilio	neutrónica	4 a 5
	gamma	0,06
Estroncio 90/ (Itrio 90)	beta	2,27
	beta	2,26
Prometio 147	beta	0,23
Talio 204	beta	0,77
	beta	0,96
Oro 198	gamma	0,41
	gamma	0,41
Yodo 125	rayos X	0,028
	gamma	0,035
Radio 226	alfa	4,59 a 6,0
	beta	0,67 a 3,26
	gamma	0,2 a 2,4

Los átomos más pesados, como los del plomo, absorben una parte mayor de la energía beta en cada interacción, pero como resultado de ello los átomos producen rayos X denominados radiación de frenado (Bremsstrahlung). Entonces el blindaje se convierte en un emisor de rayos X, por lo que se requiere aumentar el blindaje. Los materiales de peso ligero (densidad baja) son por lo tanto los blindajes más eficaces de la radiación beta, aunque hacen necesario un espesor mayor del material.

Radionucleido	Energía máxima de las partículas beta (MeV)	Alcance máximo			
		Aire (mm)	Plástico (mm)	Madera blanda (mm)	Aluminio (mm)
Prometio 147	0,23	400	0,6	0,7	0,26
Talio 204	0,77	2400	3,3	4,0	1,5
Fósforo 32	1,71	7100			
Estroncio 90/ Itrio 90	2,26	8500	11,7	14,0	5,2

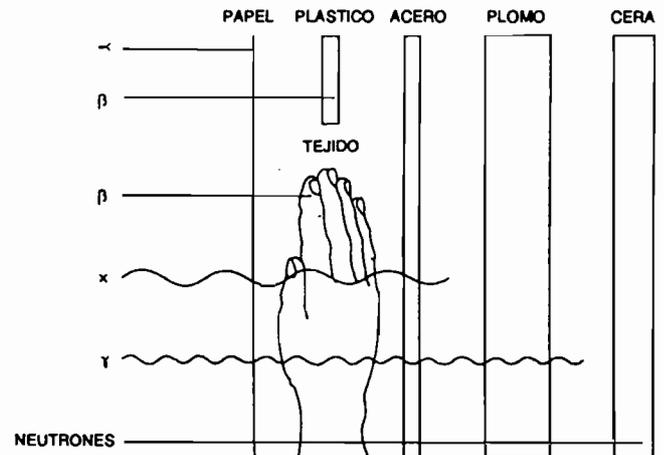
Los rayos gamma y rayos X son más penetrantes. Sin embargo, al causar ionización pueden ser eliminados del haz o perder su energía. De ese modo, pierden progresivamente su capacidad de penetración y su número se reduce, vale decir, se atenúan, hasta que dejan de representar un peligro externo grave.

Existe una manera de expresar la calidad o capacidad de penetración de los rayos gamma y X que es también un medio útil para calcular el espesor apropiado de los blindajes. El espesor hemirreductor o capa hemirreductora (CHR) es el espesor del material que cuando se interpone en la trayectoria de la radiación la atenúa a la mitad de su valor original. El espesor que de modo similar reduce la radiación a un décimo de su valor original es la capa decimorreductora (CDR).

Emisor de radiación	CHR y CDR (cm) en diversos materiales					
	Plomo		Acero		Hormigón	
	CHR	CDR	CHR	CDR	CHR	CDR
Tecnecio 99m	0,02					
Yodo 131	0,72	2,4			4,7	15,7
Cesio 137	0,65	2,2	1,6	5,4	4,9	16,3
Iridio 192	0,55	1,9	1,3	4,3	4,3	14,0
Cobalto 60	1,1	4,0	2,0	6,7	6,3	20,3
Rayos X de 100 kV _p	0,026	0,087			1,65	5,42
Rayos X de 200 kV _p	0,043	0,142			2,59	8,55

Los materiales que contienen átomos y moléculas pesados, tales como el acero y el plomo, ofrecen los blindajes más eficaces (más delgados) para la radiación gamma y los rayos X.

Los neutrones se comportan de manera compleja cuando se propagan a través de la materia. Al colisionar con átomos y moléculas de mucha más masa, los neutrones rápidos se dispersan (son desviados) sin perder mucha energía. Sin embargo, en una colisión entre un neutrón y un átomo o molécula de poca masa, el átomo o molécula absorbe una parte de la energía del neutrón. El átomo que menos masa tiene, el de hidrógeno, es capaz de causar la mayor reducción de energía.



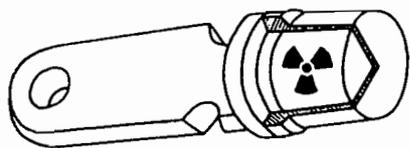
Propiedades de penetración de las radiaciones ionizantes.

Los materiales ricos en hidrógeno, tales como el agua, petróleo, cera y polietileno constituyen por lo tanto los mejores blindajes neutrónicos. Existe una complicación por el hecho de que un neutrón, cuando ha perdido casi toda su energía, puede ser "capturado", vale decir, absorbido en su totalidad por un núcleo. A menudo el nuevo núcleo formado resulta ser un radionucleido, el cual en muchos casos puede emitir un rayo gamma de energía sumamente alta. Los blindajes especiales de hidrógeno capaces de absorber neutrones contienen una pequeña cantidad de boro que favorece la absorción de neutrones.

El daño causado a los tejidos humanos por la radiación ionizante es función de la energía cedida al tejido. Ello depende del tipo y de las energías de la radiación que se utilicen. Por lo tanto, las precauciones necesarias para trabajar con diferentes radionucleidos dependen también del tipo y de la energía de la radiación.

Contención de las sustancias radiactivas

Las sustancias radiactivas pueden producirse en cualquier forma física, gaseosa, líquida o sólida. En muchas aplicaciones médicas y la mayoría de las aplicaciones industriales se utilizan fuentes en que la sustancia radiactiva se ha sellado en una cápsula metálica o ha sido encerrada entre capas de materiales no radiactivos. A menudo esas fuentes se encuentran en "forma especial", lo que significa que se han diseñado y fabricado para resistir las pruebas más rigurosas, incluidas fuerzas de impacto especificadas, fuerzas de aplastamiento, inmersión en líquidos y tensión térmica, sin que se produzca fuga de la sustancia radiactiva.



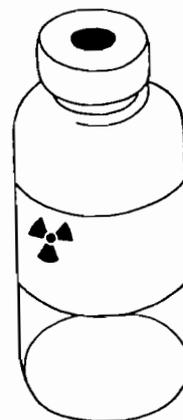
0 1cm

Una fuente sellada en que aparece la sustancia radiactiva encapsulada.

Todas las fuentes selladas se prueban para comprobar la ausencia de fugas después de su fabricación y la prueba (llamada también prueba de frotamiento) debe repetirse periódicamente durante la vida útil de la fuente. Ensayos más frecuentes se requieren para las fuentes selladas que se utilizan en medios ambientes rigurosos o en aplicaciones que puedan dañarlas. La mayoría de las fuentes selladas puede permanecer sin fugas y prestar servicios adecuados y fiables durante muchos años, pero finalmente deben ser evacuadas en forma segura y reemplazadas debido a que su actividad ha disminuido por debajo de los niveles que permiten su utilización.

Las fuentes selladas presentan únicamente un peligro externo. A condición de que la fuente no tenga fugas, no hay riesgo de que la sustancia radiactiva sea ingerida, inhalada o se introduzca en el cuerpo de una persona de algún otro modo.

Es probable que en el momento de su entrega las sustancias radiactivas no selladas, tales como líquidos, polvos y gases, se contengan por ejemplo dentro de un frasco o cilindro, pero en el momento de su utilización es preciso extraerlas de allí y manipularlas. Algunas fuentes no selladas permanecen dentro del recipiente, pero la contención es intencionalmente débil de modo que permita la salida de la radiación. Las sustancias radiactivas no selladas presentan peligros externos e internos.



Frasco de líquido radiactivo.

El tapón de caucho que cierra el frasco puede retirarse o perforarse para extraer el líquido.

Actividad de las fuentes

La actividad de una fuente se mide en becquerelios (Bq) e indica el número de átomos del radionucleido que se desintegran por segundo (dps o s^{-1}).

1 Becquerelio equivale a 1 átomo desintegrado por segundo

Las aplicaciones industriales y médicas requieren habitualmente fuentes selladas con actividades de miles o millones de becquerelios. Una forma práctica de expresar números tan elevados es usar prefijos, como por ejemplo, en lugar de:

1 000 becquerelios se escribe 1 kilobecquerelio (1 kBq);

1 000 000 de becquerelios se escribe 1 megabecquerelio (1 MBq);

1 000 000 000 de becquerelios se escribe 1 gigabecquerelio (1 GBq);

1 000 000 000 000 de becquerelios se escribe 1 terabecquerelio (1 TBq).

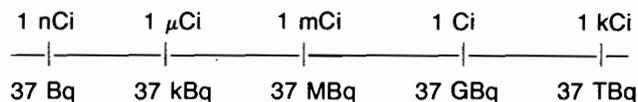
La actividad de una fuente depende del período de semi-desintegración del radionucleido de que se trate. Cada radionucleido tiene su período de semidesintegración característico, que es el tiempo que tarda la actividad de la fuente en disminuir a la mitad de su valor original. Los radionucleidos con períodos de semidesintegración cortos son los escogidos generalmente para fines médicos que implican la introducción en el cuerpo por vía oral, inyección o inhalación, mientras que los de período de semi-desintegración relativamente largo son a menudo útiles para aplicaciones médicas terapéuticas (externas o como inserciones temporales) e industriales.

Cuando las sustancias radiactivas se dispersan en otros materiales o se dispersan sobre otras superficies en forma de contaminación, las unidades de medida usadas más corrientemente son las siguientes:

- | | | |
|----|--|--------------------|
| a) | para la dispersión en líquidos | $Bq \cdot mL^{-1}$ |
| b) | para la dispersión en sólidos | $Bq \cdot g^{-1}$ |
| c) | para la dispersión en gases
(muy particularmente el aire) | $Bq \cdot m^{-3}$ |
| d) | para la dispersión sobre superficies | $Bq \cdot cm^{-2}$ |

Una unidad de actividad más antigua que se sigue usando, el curio (Ci), se definió originalmente como la actividad de un gramo de radio 226. En términos modernos:

Un curio equivale a 37 000 000 000 dps, es decir, 37 GBq:



Radionucleido	Período de semi-desintegración	Aplicación
Tecnecio 99m	6,02 h	Producción de imágenes para diagnóstico médico
Yodo 131	8,1 d	Diagnóstico/terapia (incorporado) de carácter médico
Fósforo 32	14,3 d	Terapia médica (incorporado)
Cobalto 60	5,25 a	Terapia médica (externo) Medición/radiografía industrial
Cesio 137	28 a	Terapia médica (inserciones temporales) Medición/radiografía industrial
Estroncio 90	28 a	Medición industrial
Iridio 192	74 d	Radiografía industrial o terapia médica
Radio 226	1620 a	Terapia médica (inserciones temporales)
Yodo 125	60 d	Diagnóstico/terapia médica
Americio 241	458 a	Medición industrial
Hidrógeno 3	12,3 a	Medición industrial
Iterbio 169	32 d	Radiografía industrial
Prometio 147	2,7 a	Medición industrial
Talio 204	3,8 a	Medición industrial
Oro 198	2,7 d	Terapia médica
Tulio 170	127 d	Radiografía industrial

Medición de las radiaciones

Las radiaciones ionizantes no pueden verse, ni sentirse, ni percibirse por el cuerpo de otras maneras y, como se ha observado, el daño al tejido humano depende de la energía absorbida por el tejido como resultado de la ionización.

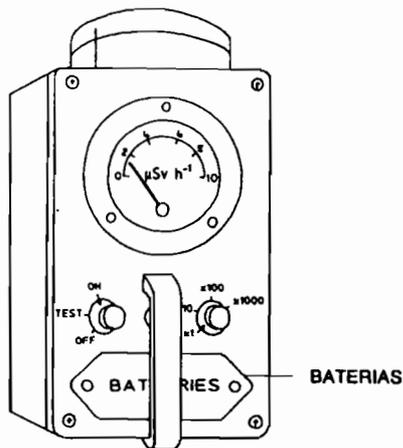
El término utilizado para expresar la absorción de energía en una parte o partes determinadas del cuerpo humano es "dosis".

La unidad moderna de dosis es el gray (Gy). Sin embargo, en protección radiológica práctica, para tener en cuenta ciertos efectos biológicos, la unidad utilizada más a menudo es el sievert (Sv). En el caso de los rayos X y la radiación gamma y beta, un sievert corresponde a un gray. Para el usuario, la parte más importante del equipo es un dispositivo de vigilancia radiológica. Existen instrumentos y otros dispositivos que dependen de la respuesta de una película o detectores de estado sólido (por ejemplo, los dosímetros de película o los dosímetros termoluminiscentes).

Existen dos tipos de instrumentos: medidores de tasa de dosis (también llamados medidores de vigilancia) y dosímetros.

Los medidores de tasa de dosis modernos se calibran generalmente para que indiquen los datos en microsieverts por hora ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$). Sin embargo, muchos instrumentos siguen usando la unidad más antigua de milirem por hora ($\text{mrem}\cdot\text{h}^{-1}$). Diez $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ equivalen a 1 $\text{mrem}\cdot\text{h}^{-1}$.

La radiación neutrónica solo puede detectarse utilizando medidores de tasa de dosis especiales.



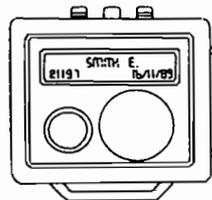
Un medidor de tasa de dosis típico.

La mayoría de los medidores de tasa de dosis reciben electricidad de batería y algunos tienen una posición del interruptor que permite al usuario controlar el estado de la batería, vale decir, verificar que ésta conserve suficiente carga para dar energía al instrumento. También es importante que se instruya a los usuarios para que no dejen el interruptor en la posición de comprobación de batería durante mucho tiempo y que pongan el interruptor en posición desconectada cuando el medidor no esté en uso. De otro modo las baterías se gastarían innecesariamente.

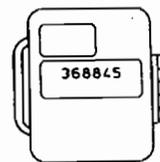
Puede comprobarse que el instrumento funciona poniéndolo cerca de una pequeña fuente blindada; algunos instrumentos tienen una pequeña fuente de comprobación incorporada. La utilización de estas fuentes debe enseñarse a los trabajadores, pues las comprobaciones regulares no solo contribuirán a un aumento de su propia experiencia, sino que les infundirán confianza y les darán un rápido indicio de cualquier fallo. Es importante que los usuarios tengan conciencia del gran peligro de confiar en mediciones realizadas empleando un instrumento defectuoso.



a) Dosímetro electrónico



b) Dosímetro termoluminiscente



c) Dosímetro de película

Dosímetros personales.

Un dosímetro mide la dosis total acumulada por el detector en un período de tiempo. Por ejemplo, un dosímetro registrará $20 \mu\text{Sv}$ si se le ha expuesto a $10 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ durante dos horas. Algunos dosímetros pueden indicar de inmediato la dosis. Otros, como el dosímetro de película y el dosímetro termoluminiscente (DTL) solo pueden indicar resultados después de haber sido procesados por el laboratorio.

Los usuarios de fuentes no selladas necesitarán un tercer tipo de instrumento: un medidor de contaminación de superficies. Este suele ser simplemente un detector más sensible que debe usarse para vigilancia de posibles derrames. Cuando el detector se coloca cerca de una superficie contaminada, el medidor normalmente solo arroja datos en cuentas por segundo (cps o s^{-1}) o a veces en cuentas por minuto (cpm o min^{-1}). Necesita ser calibrado para los radionucleidos que se utilicen de manera que los datos puedan interpretarse de forma que permita medir la cantidad de sustancia radiactiva por unidad de superficie ($\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$). Hay muchos medidores de contaminación de superficies de sensibilidades muy diferentes. Los instrumentos más sensibles indicarán una tasa de recuento muy alta en presencia, por ejemplo, de $1000 \text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$ de yodo 131, pero diferentes detectores que midan la contaminación de la misma superficie presentarán datos inferiores o posiblemente no darán respuesta alguna. Al elegir un detector lo mejor es optar por uno que tenga una buena eficiencia de detección para el radionucleido que se utilice y dé una indicación audible. El peligro de contaminación interna creado por pequeños derrames podrá entonces descubririrse y será posible mantener una zona de trabajo segura.

Radiación y distancia

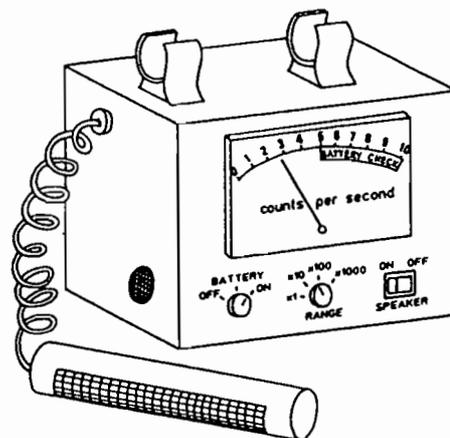
La radiación ionizante en el aire se propaga en línea recta. En esas circunstancias la radiación es emitida por una fuente radiactiva en direcciones divergentes y la tasa de dosis disminuye en proporción inversa al cuadrado de la distancia medida desde la fuente.

Por ejemplo:

Si la tasa de dosis medida a 1 m es de $400 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$;
la tasa de dosis esperada a 2 m será de $100 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$;
la tasa de dosis esperada a 10 m será de $4 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$;
la tasa de dosis esperada a 20 m será de $1 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$;
etc.

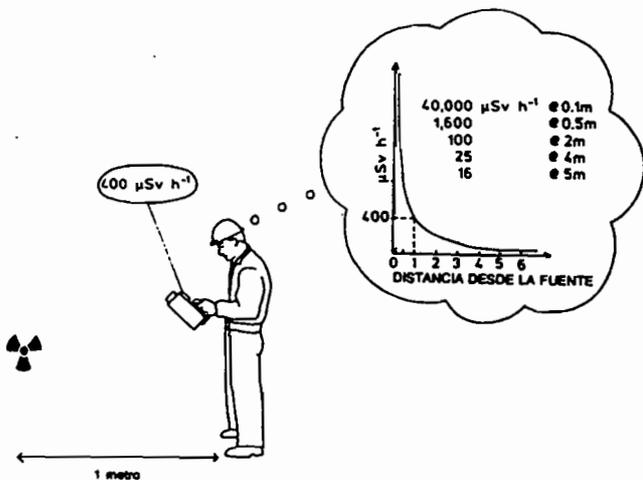
La distancia tiene un efecto decisivo en cuanto a reducir la tasa de dosis.

Los blindajes sólidos situados en la trayectoria de la radiación la atenuarán y también la dispersarán en diversas direcciones. La tasa de dosis real en un punto situado a cierta distancia de la fuente no se deberá únicamente a la radiación primaria que llegue desde la fuente sin interacción. La radiación secundaria que se haya dispersado también contribuirá a la tasa de dosis.



Un medidor de contaminación de superficies típico.

Sin embargo, es fácil calcular la tasa de dosis a una distancia determinada de la fuente. Las energías de la radiación primaria serán constantes y conocidas si se indica el radionucleido.



Después de medir la tasa de dosis, pueden estimarse las tasas de dosis a diferentes distancias de la fuente.

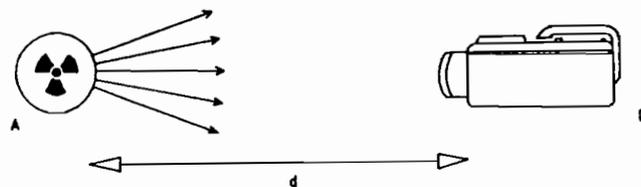
La tasa de dosis se obtiene aplicando la fórmula siguiente:

$$\text{Tasa de dosis} = \frac{\text{Factor gamma} \times \text{actividad de la fuente}}{(\text{distancia})^2}$$

El factor gamma (Γ) es la tasa de dosis absorbida en $\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ a 1 m de 1 GBq del radionucleido; La actividad de la fuente se expresa en gigabequerelios; La distancia se expresa en metros desde la fuente hasta el punto de interés.

Radionucleido emisor gamma	Factor gamma Γ
Iterbio 169	0,034
Tecnecio 99m	0,022
Tulio 170	0,0007
Cesio 137	0,081
Iridio 192	0,13
Cobalto 60	0,351

Sin embargo, la mejor forma de determinar la tasa de dosis de la fuente es utilizar un medidor de tasa de dosis fiable.



Esquema para los ejemplos de cálculos.

Ejemplos de cálculos

- 1) ¿Cuál será a 5 m la tasa de dosis de 400 GBq de iridio 192?

$$\begin{aligned} \text{Tasa de dosis} &= \frac{\Gamma \times A}{d^2} = \frac{0,13 \times 400}{5^2} \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1} \\ &= 2,08 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1} \end{aligned}$$

- 2) A 15 cm de una fuente de cesio 137 se mide una tasa de dosis de $1 \text{ mGy} \cdot \text{h}^{-1}$. ¿Cuál es la actividad de la fuente?

$$\begin{aligned} \text{Tasa de dosis} &= 1 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1} \\ &= \frac{0,081 \times \text{actividad}}{0,0225} \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1} \end{aligned}$$

$$\text{Actividad} = \frac{1 \times 0,0225}{0,081} \text{ GBq} = 0,278 \text{ GBq}$$

- 3) Una tasa de dosis de $780 \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ se mide a partir de 320 GBq de cobalto 60. ¿A qué distancia está situada la fuente?

$$\begin{aligned} \text{Tasa de dosis} &= 0,78 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1} \\ &= \frac{0,351 \times 320}{d^2} \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1} \end{aligned}$$

$$\text{Distancia} = \sqrt{\frac{0,351 \times 320}{0,78}} \text{ m} = 12 \text{ m}$$

- 4) Se utiliza una fuente de iridio 192 de 1,3 TBq. ¿Qué distancia reducirá la tasa de dosis a $7,5 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$?

$$\text{Tasa de dosis} = 0,0075 \text{ mGy}\cdot\text{h}^{-1}$$

$$= \frac{0,13 \times 1,3 \times 1000}{d^2}$$

$$\text{Distancia} = \sqrt{\frac{0,13 \times 1,3 \times 1000}{0,0075}} \text{ m} = 150 \text{ m}$$

- 5) Una tasa de dosis de $3 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$ se mide a 4 m de una fuente emisora gamma. ¿A qué distancia la tasa de dosis se reducirá a $7,5 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$?

$$\text{Tasa de dosis} = \frac{\text{Factor gamma} \times \text{actividad}}{(\text{distancia})^2}$$

El factor gamma \times la actividad es la tasa de dosis de la fuente a un metro de distancia y será constante. Por lo tanto, la tasa de dosis \times (distancia)² será constante.

$$\text{En consecuencia, } 0,0075 \times d^2 = 3 \times 4^2$$

$$d = \sqrt{\frac{3 \times 4^2}{0,0075}} \text{ m}$$

$$d = 80 \text{ m}$$

Radiación y tiempo

La dosis de radiación es proporcional al tiempo pasado en el campo de radiación. El trabajo en un área de radiación debe realizarse rápida y eficientemente. Es importante que los trabajadores no se distraigan en otras tareas ni en conversaciones. Sin embargo, un trabajo demasiado rápido puede provocar errores. Debido a esto el trabajo se prolonga más, lo que se traduce en una mayor exposición.

Efectos de las radiaciones

Los usos industriales y médicos de las radiaciones no presentan riesgos sustanciales para los trabajadores y no deben dar lugar para esos trabajadores a una exposición a las radiaciones que alcance un nivel que se considere inaceptable.

Los posibles efectos de las radiaciones que han sido estudiados por los órganos internacionales (por ejemplo, la Comisión Internacional de Protección Radiológica, el Organismo Internacional de Energía Atómica) son:

- Efectos a corto plazo tales como quemaduras de la piel y cataratas en los ojos;
- Efectos a largo plazo tales como un aumento de la predisposición a la leucemia y a los cánceres sólidos; y
- Efectos hereditarios.

Las actuales recomendaciones en materia de limitaciones de dosis figuran en el Vol. N° 115 de la Colección Seguridad del OIEA. En resumen, esas recomendaciones son las siguientes:

- No debe realizarse una aplicación de radiaciones a menos que esté justificada;
- Todas las dosis deben reducirse al valor más bajo que sea posible, teniendo en cuenta los factores económicos y sociales; y
- En cualquier caso, toda las dosis deben mantenerse por debajo de los límites de dosis.

A títulos de referencia, los principales límites de dosis especificados en el Vol. N° 115 de la Colección Seguridad del OIEA son los siguientes:

Trabajadores adultos	20 mSv por año (promediados a lo largo de cinco años)
Individuos del público	1 mSv por año