

Manual sobre GAMMAGRAFIA INDUSTRIAL

Comprende:

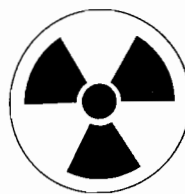
Guía de aplicaciones

Guía de procedimientos

Guía de fundamentos básicos

Abril 1996

IAEA-PRSM-1



MANUAL
PRACTICO DE
SEGURIDAD
RADIOLOGICA

Manual sobre GAMMAGRAFIA INDUSTRIAL

Comprende:

Guía de aplicaciones

Guía de procedimientos

Guía de fundamentos básicos

MANUAL PRACTICO DE SEGURIDAD RADIOLOGICA

Manual sobre GAMMAGRAFIA INDUSTRIAL

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 capacitación 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 registrado generalmente un buen historial de seguridad. Sin embargo, el control de las fuentes de radiación no siempre es el adecuado. La pérdida de control de las fuentes de radiación ha dado lugar a exposiciones imprevistas de algunos trabajadores, pacientes y personas del público, a veces con consecuencias fatales.

En 1990 el OIEA publicó un libro 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 de manera corriente manipulan día a día fuentes de radiación, manuales que a la vez pudieran ser utilizados por las autoridades competentes, de manera que representaran un apoyo para los esfuerzos que estas autoridades realizan con miras a la capacitación en materia de protección radiológica de los trabajadores o del personal médico auxiliar, o con el objeto de ayudar a los administradores locales a establecer sobre el terreno normas de protección radiológica.

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 del procedimiento, el tipo de equipo utilizado para ponerlo en práctica y las precauciones que deben adoptarse.
- **Guía de procedimientos**, que incluye instrucciones para cada etapa sobre la forma en que ha de aplicarse el procedimiento. 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.

Los textos iniciales se elaboraron con la asistencia 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-Bello (OIEA).

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

© OIEA, 1994

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

ISBN: 84-87275-62-1 (T.I)

Depósito Legal: M. 15.042-1996

Imprime: **grafoset sl**

Impreso en papel reciclado

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 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), P. Ortiz (OIEA), J.C. Rosenwald (Francia), R. Wheelton (Reino Unido), A. Schmitt-Hannig (Alemania) y P. Zúñiga-Bello (OIEA). Los seis manuales fueron terminados por A. Schmitt-Hannig, de la Oficina Federal de Protección Radiológica (Alemania), y P. Zúñiga-Bello (OIEA).

INDICE

Guía de aplicaciones	7
Radiografía	7
Radiaciones utilizadas para radiografía	7
Equipo utilizado para radiografía	8
Contenedores de proyección	12
Posibles problemas de los contenedores	13
Requisitos de los contenedores para exposiciones	14
Prueba de fugas para fuentes radiográficas	16
Almacenamiento del equipo	16
Procedimientos de radiografía	17
Actuación en caso de emergencia	19
 Guía de procedimientos	 23
 Guía de fundamentos básicos para los usuarios de radiaciones ionizantes	 42
Producción de radiaciones	42
Unidades de energía de radiación	44
Radiación que se propaga a través de la materia	44
Contención de sustancias radiactivas	48
Actividad de las fuentes	50
Medición de las radiaciones	51
Radiación y distancia	54
Ejemplos de cálculos	57
Radiación y tiempo	58
Efectos de las radiaciones	59

GUIA DE APLICACIONES: GAMMAGRAFIA

Radiografía

Un defecto de la soldadura entre dos secciones de una tubería o algún otro defecto en un componente fundido o de metal podría tener consecuencias catastróficas al iniciarse la utilización de esa tubería u objeto. La radiografía pone de manifiesto esas imperfecciones utilizando las propiedades únicas características de las radiaciones ionizantes para penetrar esos componentes importantes sin dañarlos. El radiógrafo produce una radiografía, que es un registro fotográfico permanente del ensayo no destructivo (END). El procedimiento se llama también ensayo de garantía de calidad (GC).

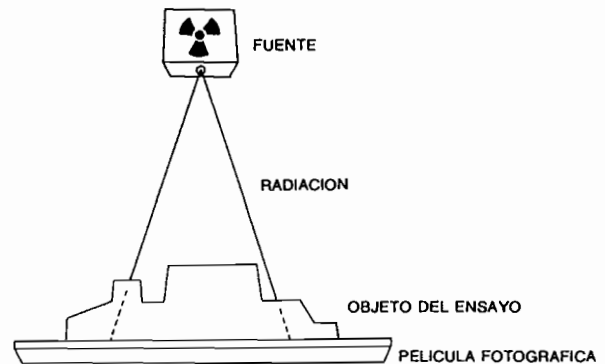


Diagrama de un dispositivo radiográfico.

Radiaciones utilizadas para radiografía

La gammagrafía utiliza radiaciones gamma. El equipo necesario es muy fácil de trasladar y resulta ideal para faenas de construcción a veces remotas y en condiciones de trabajo a menudo difíciles.

El iridio 192 es ideal para radiografía, pero pueden utilizarse otros radionucleidos según las características del material de que esté formado el objeto.

Radionucleido	Energías gamma (MeV)	Espesor óptimo del acero (mm)
Cobalto 60	Altas (1,17 y 1,33)	50-150
Cesio 137	Altas (0,662)	50-100
Iridio 192	Medias (0,2-1,4)	10-70
Iterbio 169	Bajas (0,008-0,31)	2,5-15
Tulio 170	Bajas 0,08	2,5-12,5

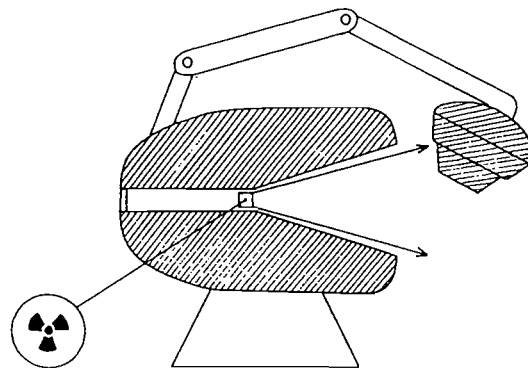
La radiación debe tener suficiente energía para penetrar directamente a través del objeto, pero con una atenuación suficientemente reducida al pasar a través de una fisura. El aumento de la transmisión a través de la fisura debe producir una imagen más oscura en la película revelada. La actividad de la fuente determina la cantidad de radiación disponible. Demasiada actividad pone un velo a la fotografía, oscureciéndola en toda su extensión y reduciendo la probabilidad de descubrir la fisura. También exige precauciones de seguridad en una zona más amplia. Una fuente de actividad baja requerirá más tiempo de exposición para permitir que una radiación suficiente llegue a la película para crear la imagen. Las exposiciones más prolongadas alargan la duración del trabajo y exigen que las precauciones de seguridad se mantengan por periodos más largos.

Equipo utilizado para radiografía

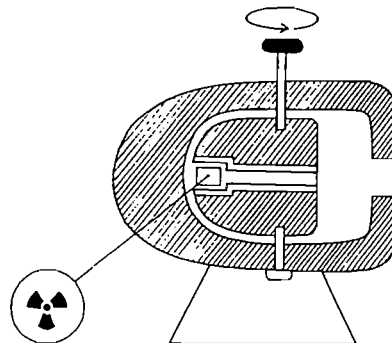
Las fuentes radiográficas selladas son cápsulas de acero inoxidable de forma especial que contienen una actividad alta. Emiten constantemente rayos gamma por lo que su transporte y traslado ha de efectuarse en contenedores especiales portátiles. Esos contenedores para exposición (en algunos países se les llama también cámaras) rodean totalmente la fuente con un blindaje, tal como plomo o, más eficazmente, uranio. Se fabrican muchos tipos de contenedores, pero no todos son utilizados o accesibles internacionalmente. Todos funcionan generalmente exponiendo las radiaciones útiles de una de las siguientes formas:

- 1) retiro de una parte del blindaje;
- 2) desplazamiento de la fuente a un canal deliberadamente estrecho del blindaje, pero permaneciendo dentro del contenedor; o
- 3) retiro completo de la fuente del contenedor.

A estos dos primeros tipos suele llamárseles contenedores de obturador o de haces. Estos contenedores coliman la radiación liberada, definiendo y limitando el tamaño de los haces que emergen.

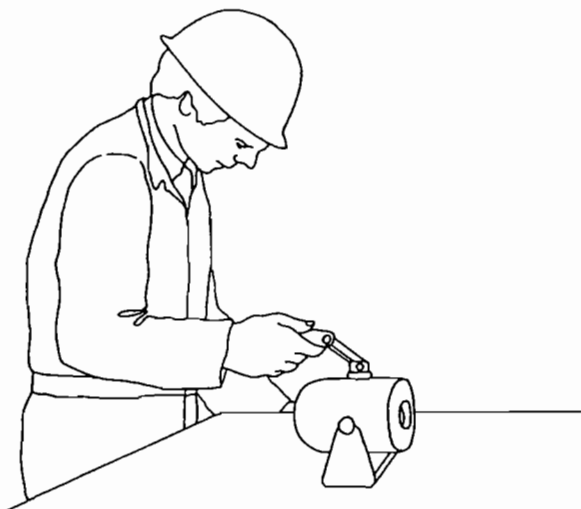


Contenedor de obturador removible.



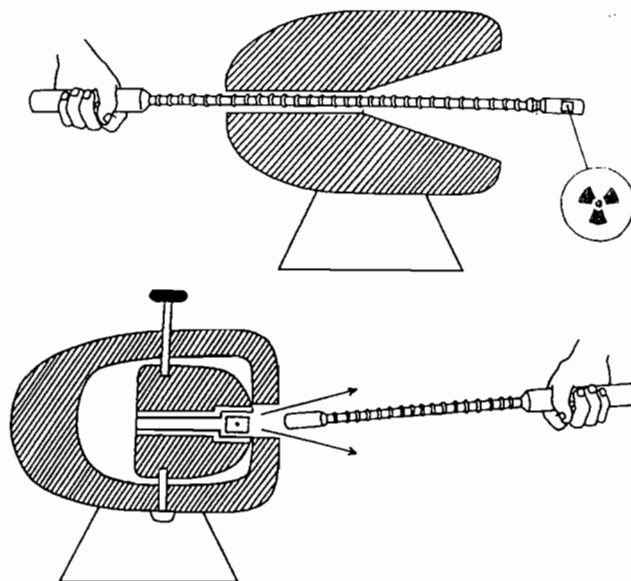
Contenedor de obturador rotatorio.

Los mecanismos del obturador a veces son automáticos y a veces manuales. En este último caso es importante que el radiógrafo permanezca detrás del contenedor, utilizando el blindaje de éste para reducir al mínimo la dosis de radiación que tiene probabilidad de recibir.



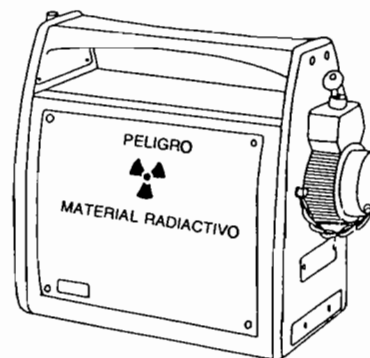
Un radiógrafo permanece detrás de un contenedor de obturador para utilizar su blindaje.

Se producen situaciones en que la radiografía de haces con empleo de contenedores de obturador no es posible. Esto puede deberse a que el contenedor no quepa en el espacio disponible o a que la superficie de la película que ha de exponerse exceda el tamaño del haz. Los fabricantes proporcionarán herramientas largas especiales diseñadas para retirar la fuente del contenedor. En esos casos, la fuente puede instalarse en un colimador adecuado o utilizarse para realizar radiografía panorámica. En este último caso, no hay restricciones en cuanto a la dirección de los haces. El radiógrafo recibe generalmente dosis más altas al realizar esta clase de trabajo. Se necesitan procedimientos estrictos para garantizar que la longitud de la herramienta, por ejemplo un metro, sea mantenida entre el radiógrafo y la fuente. El contacto con una fuente de actividad alta durante unos pocos segundos podría provocar una lesión del tejido no visible durante varias semanas.



Para retirar las fuentes de los contenedores de obturador a fin de tomar una radiografía panorámica se necesitan barras de manipulación especiales.

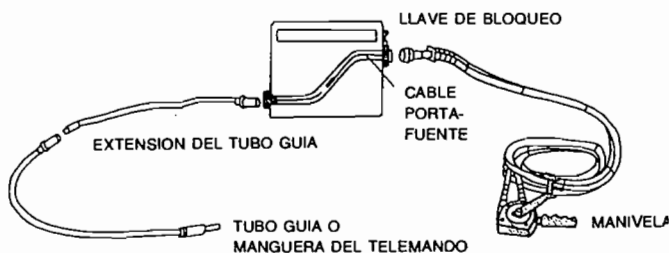
El equipo más ampliamente utilizado es en la actualidad el del tercer tipo. Se le llama contenedor de proyección o cámara de manivela exterior y su utilización se describe detalladamente más adelante en el presente manual. El diseño garantiza que el radiógrafo pueda casi siempre estar protegido al exponer la fuente desde cierta distancia.



Contenedor de proyección.

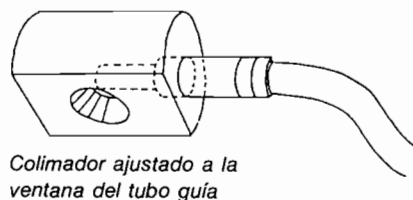
Contenedores de proyección

La fuente para el contenedor de proyección va ácoplada en el extremo de un cable flexible llamado cable portafuente. El extremo no activo del cable portafuente sobresale en parte del contenedor y se halla sujeto por un anillo fijador que mantiene la fuente en el centro del blindaje. El tubo en "S" que atraviesa el blindaje no permite a la radiación un camino corto y recto hacia el exterior. Un tapón de tránsito cierra el orificio de salida y evita que las partículas dañen el tubo en S. Entre los componentes auxiliares del contenedor se comprenden el cable de control y la manivela, el tubo guía y la extensión del tubo guía (que no siempre es necesaria). Diversos colimadores se ajustan al extremo del tubo guía: la ventana.

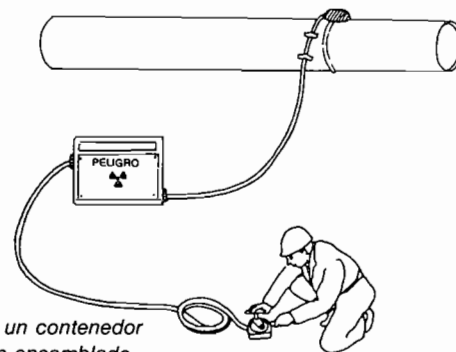


*Un contenedor de proyección
(el corte muestra el canal en S)
y sus componentes auxiliares.*

Para utilizar el contenedor la ventana se coloca cerca del objeto, el cable telemando se conecta al cable portafuente y la manguera del cable telemando y el tubo guía se conectan al contenedor. Para afianzar la manguera del cable en el contenedor se requiere rotar el anillo fijador que libera el cable portafuente. Al hacer girar la manivela, ésta arrastra el cable, haciendo que el cable portafuente asome del contenedor y se desplace a lo largo del tubo guía hasta que la fuente alcance la ventana. El tubo guía y el colimador deben sujetarse firmemente con una cinta o mantenerse con un soporte estable para evitar todo movimiento mientras la fuente entre en la ventana. Haciéndose girar la manivela en sentido inverso, la fuente se retrae.



*Colimador ajustado a la
ventana del tubo guía*



*El dispositivo de un contenedor
de proyección ensamblado,
durante su utilización.*

Posibles problemas de los contenedores

Es de importancia decisiva realizar un mantenimiento regular de todos los contenedores radiográficos y del equipo auxiliar de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Es útil mantener un registro de las comprobaciones y ensayos de mantenimiento que hayan sido necesarios y dejar constancia de que se hayan realizado con los intervalos apropiados. Los componentes accionados mecánica y automáticamente son los más vulnerables y pueden ser decisivos si su fallo tiene probabilidad de dejar la fuente fuera del blindaje. La experiencia del radiógrafo y los manuales técnicos para los operadores proporcionados con el equipo deben permitir el descubrimiento de los posibles fallos de funcionamiento y la elección de sus remedios. Por ejemplo, aunque los contenedores de proyección han demostrado ser muy fiables y han ayudado a reducir las dosis recibidas por los radiógrafos, pueden presentarse varios problemas:

- 1) El extremo del cable puede pasar de largo a través de la manivela debido a un fallo del cable o a no haberse afianzado el tubo guía o la ventana.
- 2) Es posible que se haga difícil o imposible girar la manivela debido a que ésta se haya ensuciado con partículas provenientes del cable o el contenedor.

- 3) Si el cable portafuente se retuerce, puede suceder que se debilite y se rompa.
- 4) La conexión cable-portafuente puede no ajustar debido a daños, desgaste o suciedad por partículas.
- 5) La manguera del cable telemando puede desconectarse del contenedor debido a un fallo o a una manipulación brusca.
- 6) Es posible que la manguera del cable se haya aplastado, bloqueando el cable.
- 7) El tubo guía puede estar aplastado o los conectores del tubo guía pueden resultar aplanados, atrapando la fuente o el cable portafuente.

El reconocimiento de la posibilidad de estos fallos puede ayudar a evitar que se produzcan. Es conveniente examinar regularmente el equipo y en caso de necesidad encomendar su reparación a un técnico competente o debe sustituirse el componente dañado antes de volver a usar el equipo.

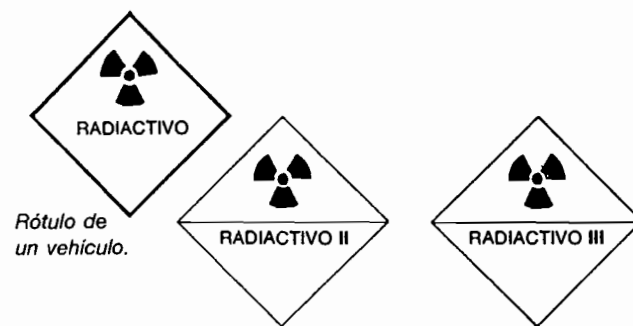
Requisitos de los contenedores para exposiciones

El equipo radiográfico que tiene un rótulo en que se deja constancia de que se ajusta a las especificaciones ISO 3999 —Aparatos para gammagrafía (ISO/TC 85.SC 2 N 78)— ha sido fabricado de acuerdo con el estándar más elevado posible y existen menos probabilidades de que cause problemas. Para tener la seguridad de que el contenedor sigue ajustándose a ese estándar debe mantenerse limpio de manera que el símbolo de advertencia del trébol y la palabra “radiactivo” sigan legibles. El cierre que bloquea la fuente debe mantenerse. La actividad de cualquier fuente nueva que se instale no debe exceder el valor límite especificado en el contenedor: por ejemplo, 4 TBq de iridio 192. El cumplimiento de lo anterior garantiza que no se excedan los siguientes límites de tasa de dosis (para un contenedor portátil clase P):

- 2000 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ (200 $\text{mR}\cdot\text{h}^{-1}$) en cualquier superficie del contenedor;
- 500 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ (50 $\text{mR}\cdot\text{h}^{-1}$) a 50 mm de cualquier superficie externa del contenedor;
- 20 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ (2 $\text{mR}\cdot\text{h}^{-1}$) a 1 m de cualquier superficie externa del contenedor.

Los datos de la fuente instalada, incluidos el nombre del radionucleido, su actividad en una fecha específica y su número de serie deben indicarse en una etiqueta en la parte exterior del contenedor.

Los contenedores que se ajustan a las ISO 3999-**** también se usan a menudo como contenedores de transporte. La mayoría de ellos se han ensayado y certificado conforme a la norma del contenedor de tipo B que ha de resistir fuerzas de impacto grave, fuerzas de aplastamiento, inmersión en líquido y tensión térmica sin pérdida de los contenidos radiactivos ni pérdida significativa del blindaje. Para su transporte estos contenedores solo necesitan una documentación apropiada y etiquetas que indiquen las tasas de dosis correspondientes a la categoría II o categoría III. Generalmente también es necesario que los vehículos utilizados exhiban los correspondientes rótulos.



Etiquetas de la categoría II y categoría III.

Categoría del contenedor de transporte indicada en la etiqueta	Tasas de dosis máximas permitidas $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ ($\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$)	
	En la superficie del contenedor	A 1 m de la superficie del contenedor
II	500 (500)	10 (10)
III	2000 (2000)	100 (100)

Las etiquetas de los contenedores deben marcarse con el nombre del radionucleido, la actividad contenida (por ejemplo 400 GBq) y el índice de transporte. El índice de transporte es la tasa de dosis máxima a 1 m de la superficie del contenedor medida en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ dividida por diez.

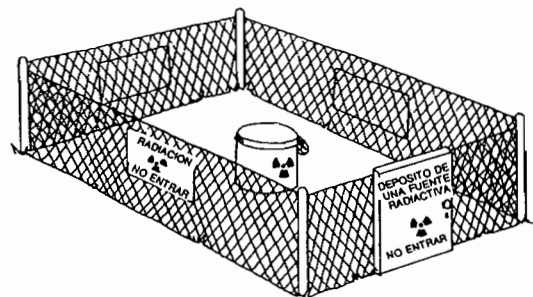
Por ejemplo, si $12 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ es la tasa de dosis máxima medida a 1 m del contenedor, su índice de transporte será de 1,2.

Prueba de fugas para fuentes radiográficas

Las pruebas de fugas deben realizarse de acuerdo con los intervalos requeridos por el órgano reglamentador o recomendados por el fabricante de la fuente o después de cualquier incidente en que la fuente pueda haber sido dañada. Estas pruebas pueden realizarse simplemente frotando con un material absorbente cualquier superficie que haya estado en contacto con la fuente, tal como el interior del tubo en S o el tubo guía y comprobando si hay alguna sustancia radiactiva en el paño. Para una comprobación mejor se requiere un tubo guía rígido corto como una embocadura que se ajuste directamente al contenedor. En el tubo corto se coloca un trozo de papel o tela absorbente y se hace asomar la fuente como si fuera a tomarse una radiografía, de manera que esta fuente presione suavemente en el material absorbente. Los materiales absorbentes solo deben manipularse empleando pinzas o tenazas. Se necesitan detectores de radiaciones sensibles para medir con exactitud la cantidad de sustancia radiactiva en el material absorbente, pero una contaminación importante producirá una tasa de dosis. Por ejemplo, una contaminación considerable que exceda los 600 kBq de cesio 137 o una cantidad muy inferior de iridio 192 y cobalto 60 producirá tasas de dosis medibles de por lo menos $5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ a 10 cm de distancia. La magnitud de una fuga aceptable es muy inferior.

Almacenamiento del equipo

Los contenedores para exposición solo tienen un blindaje suficiente para permitir que se les lleve durante breve tiempo y para ser transportados. Nadie debe estar cerca de dichos contenedores por más tiempo del necesario. Cuando una fuente se utiliza regularmente en un emplazamiento, debe reservarse un depósito especial para guardar el contenedor mientras no se le utiliza. Se necesita la cooperación de la dirección de la obra para que el depósito pueda aislarse y especialmente para que se le sitúe lejos de otros materiales peligrosos, tales como explosivos y sustancias corrosivas. El depósito debe



Depósito típico para contenedores.

exhibir letreros de advertencia y estar seco en su interior. Las tasas de dosis accesibles fuera del depósito deben ser tan bajas como sea razonablemente posible; menos de $7,5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ o, de preferencia, menos de $2,5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$

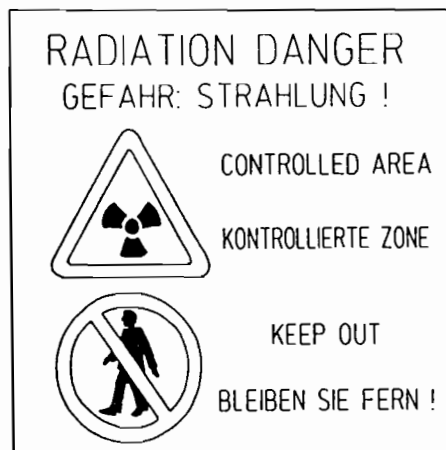
En la puerta debe haber un cerrojo para evitar la entrada de personas no autorizadas a la zona de tasas de dosis más altas o impedir que alguien toque el contenedor. La llave debe guardarse en lugar seguro.

Debe mantenerse un registro en que se indique en todo momento el lugar en que se encuentra la fuente. Los días en que la fuente y el contenedor no se utilicen debe realizarse un control para ver si siguen almacenados en forma segura.

Procedimientos de radiografía

Cuando una fuente radiográfica está sin blindar produce tasas de dosis superiores a $7,5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ en una zona muy amplia. Es posible calcular el tamaño máximo de la zona si se conocen el radionucleido y su actividad. En general esas zonas deben designarse como "áreas controladas" y el acceso a ellas debe prohibirse a toda persona, con excepción del radiógrafo y los ayudantes autorizados. A veces, en una obra de construcción el área controlada se extiende por debajo y por arriba del nivel en que está situado el equipo radiográfico.

La radiografía de haces da lugar a áreas controladas más pequeñas, especialmente si los haces se dirigen hacia abajo, en dirección al suelo. Otra forma de reducir el tamaño del área controlada consiste en colocar blindajes locales en torno a los objetos radiografiados para atenuar



aún más el haz cuando haya pasado a través de la película fotográfica. Esos detenedores de haces pueden fabricarse de plomo o cualquier metal pesado de ese tipo.

Deben colocarse suficientes barreras y suficientes letreros de advertencia para marcar las fronteras de todas las áreas controladas. Los letreros de advertencia deben escribirse en el idioma del país de manera que cualquier persona de la vecindad comprenda lo que está sucediendo y por qué no está autorizada a traspasar las barreras. En todo caso, debe velarse por que haya suficientes ayudantes circulando fuera de las barreras para detener a las personas que quieran cruzarlas.

El radiógrafo debe emitir una señal sonora de advertencia antes de la exposición, tal como un silbido, para advertir a los ayudantes y a otras personas cuando esté a punto de exponer la fuente. Una luz, un letrero grande o alguna otra advertencia adecuada de la exposición debe colocarse lo más cerca posible de la posición de la fuente expuesta como advertencia adicional para cualquiera que haya dejado atrás a los ayudantes y las barreras. Es mejor realizar las radiografías cuando y donde sea menos probable que haya otras personas trabajando cerca.

El radiógrafo debe llevar un medidor de tasa de dosis que esté abierto permanentemente cuando transporte un contenedor para exposición, prepare una toma de radiografía o instale o retire las películas radiográficas. El radiógrafo y sus ayudantes deben usar dosímetros personales mientras trabajen cerca del contenedor y entren a las áreas controladas. Los trabajadores deben someterse regularmente a exámenes médicos o revisiones de salud, generalmente una vez al año, y es necesario mantener registros de las dosis que acumulen a lo largo de los años. No debe permitirse que la dosis acumulada anual que se haya medido en relación con todo el cuerpo exceda el límite.

Actuación en caso de emergencia

El radiógrafo debe estar permanentemente alerta al utilizar una fuente radiactiva. Si se perturba el procedimiento normal para producir radiografías o el equipo comienza a funcionar inadecuadamente, el radiógrafo debe retirarse en busca de asistencia y considerar las medidas que han

de adoptarse. Los planes para situaciones no usuales deben prepararse con anticipación sobre la base de la evaluación crítica que el radiógrafo haya hecho de esas situaciones. El ensayo de los planes para imprevistos indicará si ha de necesitarse algún equipo especial para hacer frente a los incidentes predecibles. Un juego de elementos de emergencia debe comprender cuatro bolsas de perdigones de plomo que contengan cada una 2 kg de blindaje, una tenaza con mango largo de 1 m o 1,5 m y un conjunto de herramientas de mano.

Para corregir un fallo puede ser necesario trabajar cerca de la posición de la fuente. A menos que el plan se haya elaborado en detalle y se cumpla eficientemente, podrían recibirse en poco tiempo dosis excesivas. La mayoría de las recuperaciones de fuentes realizadas por radiógrafos se han traducido en menos de 10 mSv de dosis de todo el cuerpo, lo que está por debajo de los límites de dosis anuales correspondientes.

Utilícese el blindaje disponible en el emplazamiento para cubrir la fuente cuando sea posible; manténgase al menos 1 m de distancia entre la fuente y las personas consideradas en el plan; y, si es posible, no se permita a nadie que se exponga por más tiempo que el que produciría una acumulación de 10 mSv a 1 m de distancia de la fuente que se ha de recuperar. Por ejemplo:

Actividad de una fuente de iridio 192 (TBq)	Tasa de dosis equivalente a 1 m ($\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$)	Tiempo para acumular 10 mSv a 1 m (min)
0,75	97,5	6,2
2,0	260	2,3
3,7	481	1,3

Las personas que participen no deben recibir dosis innecesariamente. Las tareas difíciles que exigen trabajar cerca de la fuente deben repartirse entre varias personas para distribuir la dosis. La fuente o cualquier parte del tubo guía que pueda contener la fuente no debe en circunstancia alguna entrar en contacto con el cuerpo de una persona. En algunos segundos puede recibirse una dosis suficiente para causar lesiones de los tejidos que no serían

¡NO!
No tome nunca la fuente



¡SI!
Mantenga distancia



No tome nunca una fuente radiográfica directamente con la mano.

visibles hasta dentro de varias semanas. En ninguna circunstancia debe adoptarse una medida que cree el riesgo de cortar o incluso de destruir la fuente.

Cualquier incidente que pueda haberse traducido en una dosis excesiva a una persona o cualquier dosis alta registrada en un dosímetro debe investigarse. Es importante determinar si la dosis sospechada o registrada fue recibida y si alguna parte del cuerpo recibió una dosis mucho más alta que pudiera traducirse en una lesión localizada del tejido.

Si se pierde una fuente radiactiva, incluso dentro de su contenedor, debe encontrársela lo antes posible. Se necesitarán instrumentos de vigilancia radiológica para ayudar a ubicar la fuente. Los instrumentos de alta sensibilidad (capaces de medir tasas de dosis o contaminación bajas) pueden ayudar a detectar las radiaciones de fuentes distantes o blindadas. Los instrumentos de baja sensibilidad (capaces de medir tasas de dosis altas) se necesitan cerca de las fuentes no blindadas. No busque "a ciegas" una fuente en una zona en que la tasa de dosis exceda la capacidad de los instrumentos disponibles. Retírese hasta que el instrumento esté nuevamente en condiciones de indicar la tasa de dosis y calcular la distancia de la fuente. Mediciones similares desde otras direcciones pueden ayudar a localizar la fuente con precisión.

Cuando una fuente radiográfica ya no cumple fines útiles debe evacuársela adecuadamente. Esto puede realizarse devolviéndola al país de origen o poniéndola bajo el cuidado de un receptor autorizado.

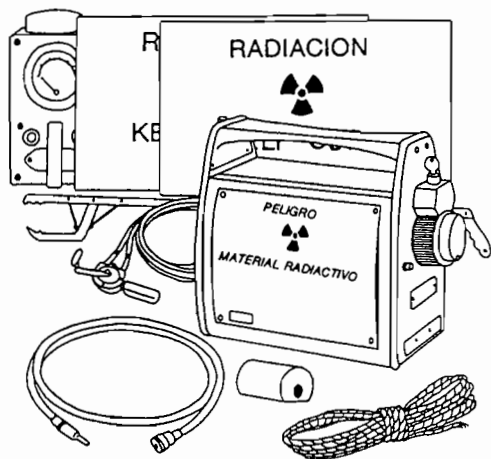
GUIA DE PROCEDIMIENTOS: GAMMAGRAFIA



Cuando haga gammagrafía cíñase a los procedimientos autorizados.

Solo los radiógrafos capacitados y los ayudantes autorizados que se hayan sometido a exámenes médicos y usen un dosímetro deben tomar radiografías. En circunstancias normales, esos trabajadores no deben haber recibido más que un límite de dosis (50 mSv en todo el cuerpo) en el año precedente.

Antes de realizar el trabajo lea estas guías de seguridad y haga preguntas al respecto. Estudie la contribución que cada uno de los trabajadores participantes hará a este importante trabajo.



Ensaye los procedimientos y utilice únicamente equipo fabricado específicamente para gammagrafía. El radiógrafo debe estar familiarizado con todo el equipo, su forma de utilización y los problemas posibles. Es especialmente importante conocer adecuadamente la fuente, su aspecto y la forma en que se expone.

Tome una radiografía únicamente cuando todo el equipo necesario esté disponible:

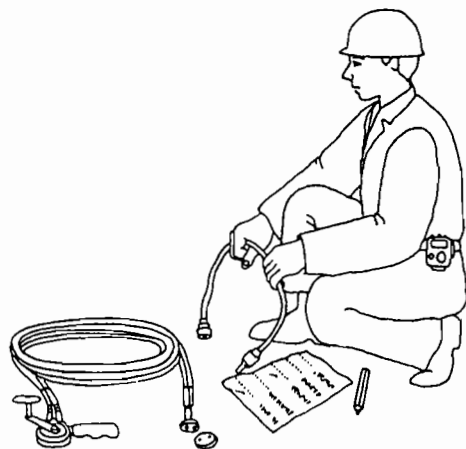
- una fuente adecuada albergada en un contenedor apropiado;
- tubos guía, cables de telemando y otras herramientas de manipulación de la fuente;
- colimadores; dispositivos para barreras;
- letreros y señales de advertencia;
- medidor de tasa de dosis;
- juego de elementos para emergencias.



Registre el mantenimiento semanal realizado en el contenedor, como por ejemplo:

- 1) Limpie el contenedor, retirando las partículas y la humedad.
- 2) Para la limpieza y el mantenimiento de las partes móviles, use únicamente los lubricantes recomendados.
- 3) Compruebe el apriete de tornillos y tuercas y que no estén dañadas las roscas y arandelas.
- 4) Confirme que funcione el mecanismo de bloqueo de la fuente.
- 5) Retire la cubierta para examinar la punta del cable portafuente con el fin de observar si está limpio, gastado o dañado. Debe usarse un medidor de desgaste.
- 6) Conecte el cable de control al cable portafuente y, tirándolo o torciéndolo suavemente, compruebe que no se desconecte accidentalmente.
- 7) Con el tapón de tránsito todavía en su lugar, conecte la manguera del cable al anillo de fijación y asegure una conexión firme.
- 8) Desconecte la manguera y el cable, vuelva a fijar el cable portafuente y retire entonces el tapón de tránsito de la entrada del tubo guía.
- 9) Conecte el tubo guía comprobando que las roscas no estén desplazadas y que la conexión sea firme.
- 10) Retire el tubo guía y reemplace el tapón de tránsito.
- 11) Compruebe que las placas de advertencia y los datos de la fuente sean legibles.
- 12) Midan las tasas de dosis cerca de la superficie del contenedor.

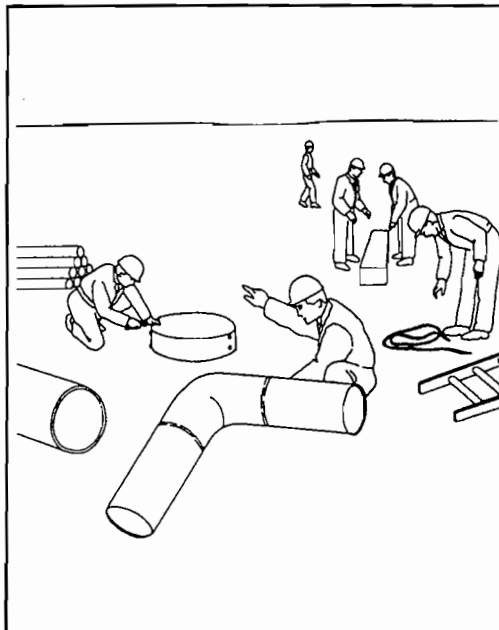
Informe de cualquier fallo a su supervisor.



Mantenga un registro para demostrar que se ha realizado el mantenimiento semanal del equipo auxiliar, por ejemplo:

- 1) Revise la manivela del cable de control y el anillo de conexión del contenedor y las demás herramientas de manipulación de la fuente para comprobar que no haya guarniciones sueltas.
- 2) En una zona limpia, desenrolle un trozo corto del cable para comprobar que no tenga torceduras y que el movimiento del brazo sea suave.
- 3) Utilice únicamente lubricantes recomendados para limpiar y hacer el mantenimiento de las partes móviles.
- 4) Examine la punta del cable para comprobar que no esté dañada ni desgastada. Debe utilizarse una galga para comprobar el desgaste.
- 5) Examine la manguera del cable de control para comprobar que no tenga desgarraduras, dientes u otros daños que puedan afectar al movimiento del cable.
- 6) Examine el tubo guía y los tubos de extensión para comprobar que no tengan roscas del conector aplastadas, dientes o partículas que puedan afectar al movimiento de la fuente.

Informe de cualquier fallo a su supervisor.



Prepare cada toma de radiografía por adelantado.

Considere la posibilidad de desplazar el objeto a un lugar apartado para hacer radiografías donde sea más fácil impedir el acceso o sea posible tomar radiografías sin perturbar otros trabajos de construcción.

Calcule la actual actividad de la fuente y los tiempos de exposición necesarios.

Si es posible, elija tomas que utilicen un haz colimado y determine qué direcciones del haz tienen menos posibilidades de estar ocupadas.

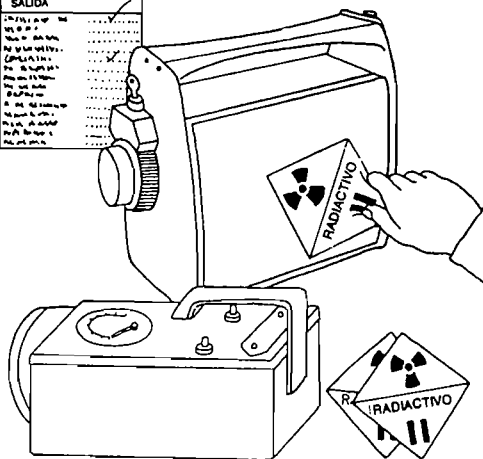
Examine si será posible utilizar un blindaje local.

Calcule dónde será necesario ubicar las barreras para marcar el área controlada y converse con la dirección de la obra sobre cuándo y por cuánto tiempo el área podrá quedar libre de otros trabajadores.



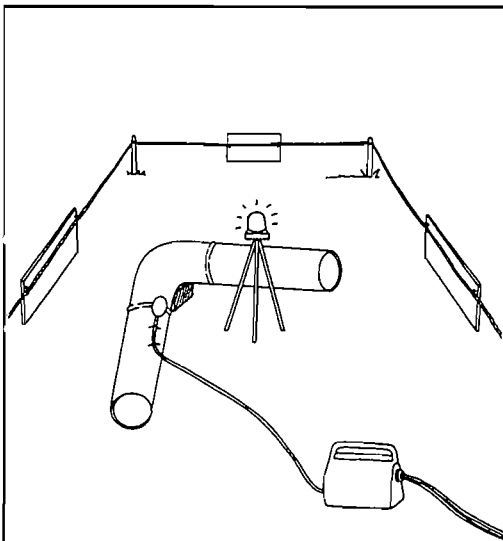
Comunique a la dirección de la obra de manera precisa cuándo y dónde se realizarán las radiografías. Solicite todos los permisos necesarios y recoja los documentos.

Lleve el equipo auxiliar al lugar con anticipación. Coloque las barreras antes del tiempo programado, especialmente si solo se reserva un período breve de tiempo (por ejemplo, una pausa para comer) para la realización de las radiografías.



Compruebe que el contenedor esté bloqueado y use un medidor de tasa de dosis para confirmar que la fuente esté blindada. Esto sirve también para comprobar el funcionamiento del medidor de tasa de dosis mediante la comparación del resultado con los obtenidos anteriormente.

Fije dos etiquetas de transporte en el contenedor y coloque carteles de advertencia en el vehículo. Adopte las medidas necesarias para que el contenedor esté separado de los ocupantes.



En el emplazamiento, en el momento previsto instruya a los ayudantes para que coloquen primero las barreras y los letreros de advertencia y luego revisen la zona con el fin de confirmar de que no haya en ella trabajadores. Entre tanto, coloque firmemente el colimador en posición y extienda el tubo guía por completo, comprobando que no se haya dañado en el desplazamiento.

Retire el tapón de tránsito del contenedor (manténgalo limpio y seguro) y conecte el tubo guía.

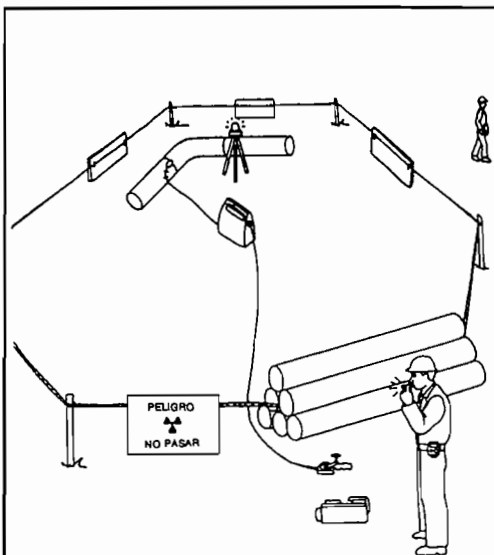
Coloque la manivela de control cerca del contenedor, desenrolle el cable de control y extiéndalo formando un amplio bucle, comprobando de nuevo que no se haya dañado durante el desplazamiento.

Abra el cierre del contenedor y retire la cubierta del cable portafuente. Haga girar la manivela de control para dejar al descubierto el cable y conecte el cable telemando al cable portafuente. Compruebe que la conexión esté bien hecha antes de hacer girar la manivela para que la manguera del cable telemando alcance el contenedor para ser fijada.

Extienda el cable telemando lo más derecho posible y coloque la manivela de control de preferencia fuera del área marcada, detrás de cualquier blindaje disponible.

Coloque una luz o un letrero de advertencia grande cerca del colimador para señalar la posición de la fuente expuesta.

El equipo está ahora listo para realizar una exposición de ensayo.



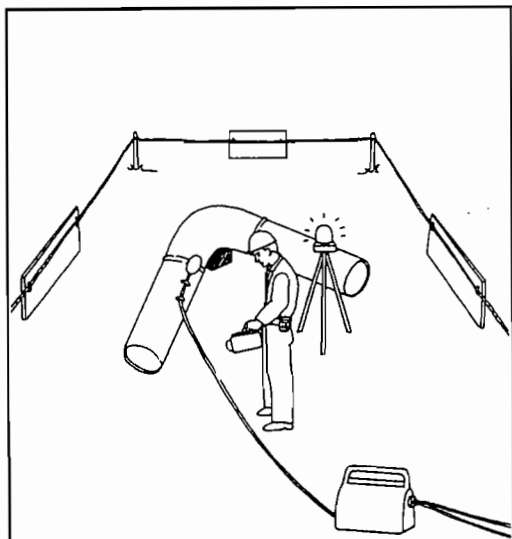
Cuando los ayudantes hayan comprobado que la zona está despejada y hayan ocupado sus posiciones en la barrera para evitar todo acceso no autorizado, emita una señal sonora convenida con anterioridad (por ejemplo, un silbido fuerte) para advertir a todas las personas que estén cerca del área controlada que la fuente está a punto de ser expuesta.

Gire la manivela rápidamente contando a la vez las revoluciones para asegurarse de que la fuente se desplace a todo lo largo del tubo guía y dentro del colimador.

Retírese del área controlada por el camino más seguro y, si es posible, más corto.

Mientras la fuente se desplace a lo largo del tubo guía, en las barreras se producirán brevemente tasas de dosis que excedan a $7,5 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$, pero cuando la fuente esté en el colimador la barrera debe marcar adecuadamente la extensión del área controlada.

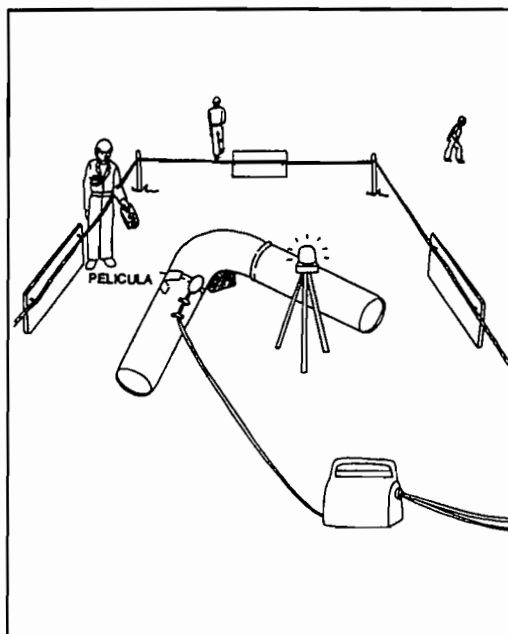
Use el medidor de tasa de dosis para comprobar que la barrera esté ubicada en el lugar correcto, especialmente a lo largo de la dirección del haz. Cambie las posiciones de la barrera si es necesario.



Regrese rápidamente al puesto de control y haga girar la manivela contando las revoluciones para asegurarse de que la fuente regrese por completo al interior del contenedor.

Use el medidor de tasa de dosis para controlar el tubo guía desde el colimador hasta el contenedor y finalmente verifique las tasas de dosis en el contenedor para confirmar que la fuente esté blindada de manera segura.

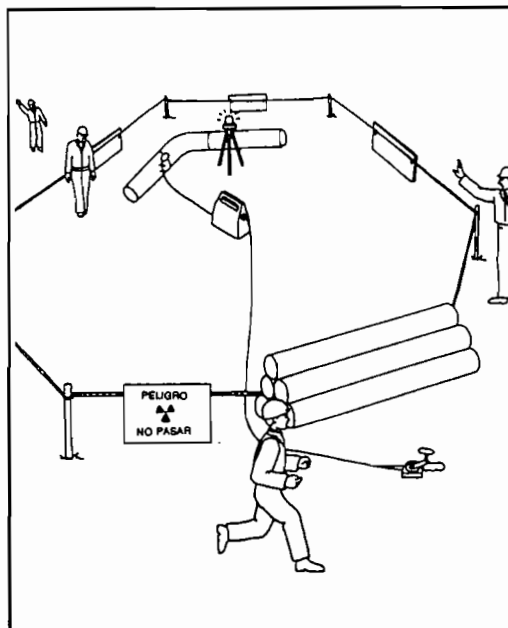
Ahora pueden colocarse las películas fotográficas y los marcadores de identificación de las películas.



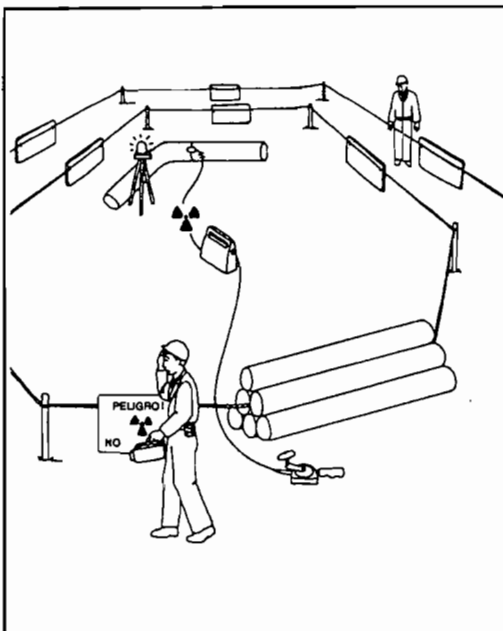
Exponga la fuente en la forma descrita anteriormente y fije el tiempo de exposición para producir la radiografía. Cuando los tiempos de exposición sean cortos es posible que no se pueda abandonar completamente el área controlada. Debe escogerse un punto en que la tasa de dosis medida sea lo más baja posible y en todo caso inferior $2 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$.

Después de cada exposición use el medidor de tasa de dosis para revisar el tubo guía desde el colimador hasta el contenedor y verifique finalmente la tasas de dosis en el contenedor para confirmar que la fuente se haya retraído en forma segura.

En ese momento es posible manipular y reubicar en forma segura el tubo guía y el colimador, junto con la próxima película y los nuevos marcadores de identificación.



Durante cada exposición permanezca alerta y utilice el medidor de tasa de dosis para confirmar que la exposición se realice normalmente. Si sucede algo inesperado, como por ejemplo si alguien entra en el área controlada o se produce una emergencia en el emplazamiento, regrese rápidamente al puesto de control y retraiga la fuente a su posición original.



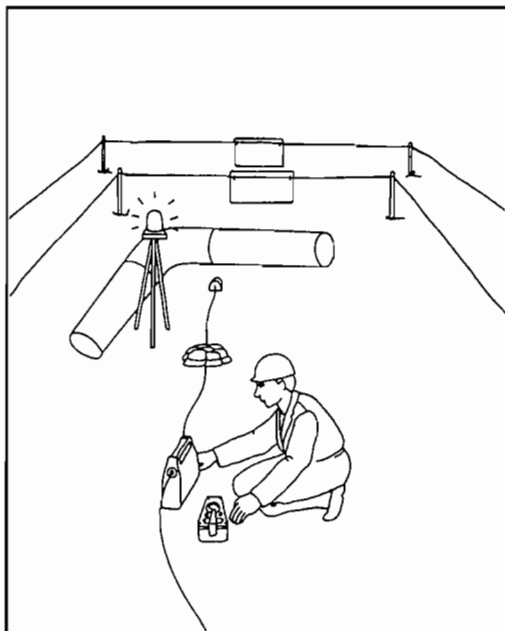
Si por cualquier razón la fuente no se retrae, mantenga la calma y aléjese de la barrera.

Mida las tasas de dosis y, si es necesario, reubique las barreras o instale barreras nuevas. Permanezca cerca de el área para evitar la entrada de gente y envíe ayudantes a informar a la dirección de la obra y a que traigan el juego de elementos para emergencias.

El plan para imprevistos debe ceñirse a estrictas directrices acordadas previamente, utilizando el tiempo, la distancia y el blindaje para limitar las dosis individuales.

Si la manivela no gira, puede ser necesario desarmar el sistema de control para recoger el cable telemando a mano.

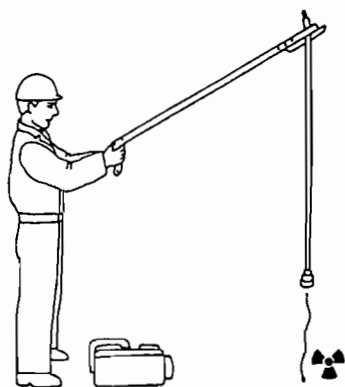
Si el alambre portafuente se ha soltado del cable o la fuente se ha atascado en el tubo guía, será necesario primero ubicar la fuente. Es posible que haciendo girar el cable hacia afuera la fuente sea arrastrada de vuelta al colimador.



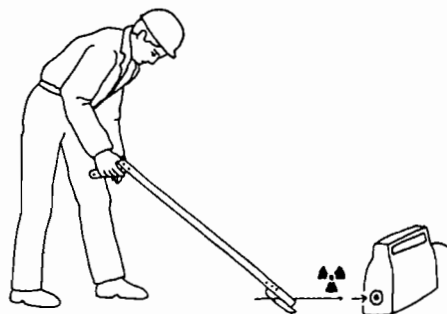
Si el blindaje se sitúa sobre el tubo guía cerca del contenedor y la manguera del cable telemando se tira hacia atrás, la parte del tubo guía que contiene la fuente será arrastrada finalmente bajo el blindaje.

Entonces, la tasa de dosis medida a cierta distancia decrecerá.

La colocación de más blindaje sobre la fuente permitirá acercarse más para desconectar el tubo guía del contenedor o para cortar cuidadosamente la envoltura de plástico y aplicar una torsión inversa a la pared del tubo guía.

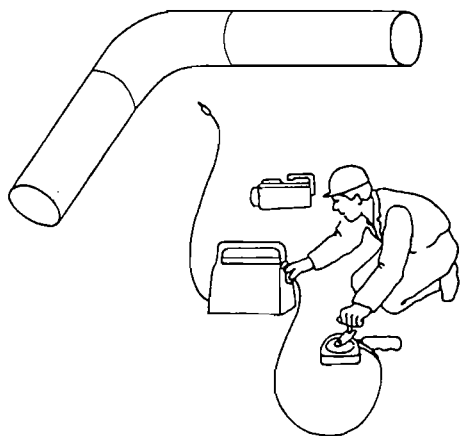


Para alzar un extremo del tubo guía de manera que el cable portafuente se deslice hacia afuera sobre una superficie sólida, pueden utilizarse tenazas de manipulación.



Empleando las tenazas de manipulación es posible tomar el cable portafuente y colocarlo de vuelta en el contenedor.

**NO DEBE PERMITIRSE EN CIRCUNSTANCIA ALGUNA QUE
LA FUENTE ENTRE EN CONTACTO CON LAS MANOS
O CON OTRA PARTE DEL CUERPO.**



Después de la exposición final o cuando sea necesario trasladar el equipo de radiografía a otra zona, este equipo debe ser desmontado.

Utilice el medidor de tasa de dosis para hacer un control del tubo guía desde el colimador hasta el contenedor y mida finalmente las tasas de dosis en el contenedor para confirmar que la fuente esté blindada en forma segura.

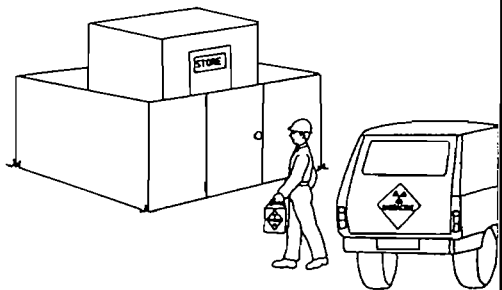
Coloque el cable de control de manera que forme un amplio bucle, manteniendo la manivela cerca del contenedor.

Mantenga el medidor de tasa de dosis en funcionamiento junto a usted y desconecte del contenedor la manguera del cable, para lo cual si es necesario haga girar ligeramente la manivela.

Encierre el cable portafuente dentro del contenedor y haga girar la manivela para hacer aparecer la conexión entre el cable telemando y el cable portafuente. Desconecte el cable y ajuste la cubierta del cable portafuente.

Enrolle el cable telemando y póngalo a un lado. Desconecte el tubo guía del contenedor y encaje en su lugar el tapón de tránsito.

Deje la fuente bloqueada dentro del contenedor.



Compruebe que el contenedor siga exhibiendo dos etiquetas de transporte legibles. Lleve el contenedor de vuelta en condiciones de seguridad al depósito de la fuente. Si se utiliza un vehículo éste debe exhibir rótulos de advertencia y el contenedor debe mantenerse alejado de los ocupantes.

Limpie el contenedor antes de alojarlo en el depósito y deje constancia en el libro de registro de su devolución en condiciones de seguridad.

Vuelva a depositar la llave en un lugar seguro y mantenga la seguridad del depósito en forma permanente.

GUIA DE FUNDAMENTOS BASICOS PARA LOS USARIOS DE RADIACIONES IONIZANTES

Producción de radiaciones

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, grandes cantidades de fotones se comportan, en general, como ondas de radio o luz. Cuanto más corta es su longitud de onda, más alta es la energía de los fotones considerados individualmente.

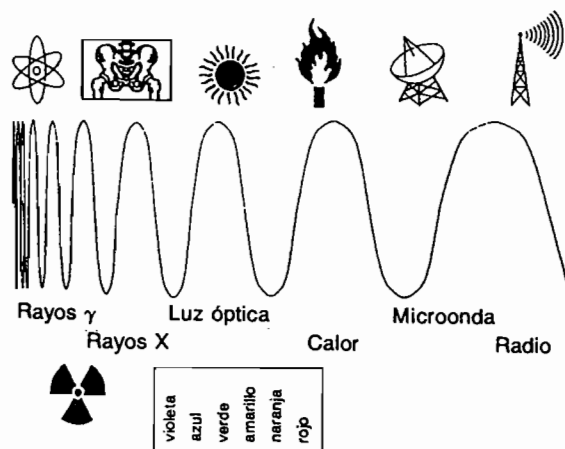
La energía muy alta de los rayos gamma y su capacidad para penetrar la materia se debe a que sus longitudes de onda son mucho más cortas.

Los rayos X son producidos por una máquina de rayos X solo cuando ésta 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 transportan menos energía y son menos penetrantes. (Sin embargo, los rayos X producidos por aceleradores lineales pueden sobrepasar las energías de la radiación gamma en cuanto a 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 en general es 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 provenientes de 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 provenientes de radionucleidos diferentes, tales como el fósforo 32 (^{32}P).

La radiación de neutrones puede generarse diversas maneras. La más común consiste en mezclar una sustancia radiactiva, tal como el americio 241 (^{241}Am), con berilio. Cuando las partículas alfa 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 con una energía sumamente alta.



Espectro de las radiaciones similares a los rayos gamma.

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 describir 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 conveniente de expresar estos números de gran magnitud consiste en usar prefijos, como por ejemplo:

1000 eV puede escribirse como 1 kiloelectronvoltio (1 keV);
 10 000 eV puede escribirse como 10 kiloelectronvoltios (10 keV);
 1 000 000 de eV puede escribirse como 1 megaelectronvoltio (1 MeV);
 5 000 000 de eV puede escribirse como 5 megaelectronvoltios (5 MeV).

Radiación que se propaga a través de la materia

Como la radiación se propaga a través de la materia colisiona e interactúa 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 ion. 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 dentro 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 del cuerpo 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. No obstante, 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 tejidos y plásticos. 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 gamma	5,5 a 5,3 0,03 a 0,37
Hidrógeno 3	beta	0,018 máximo
Fósforo 32	beta	1,7 máximo
Yodo 131	beta gamma	0,61 máximo 0,08 a 0,7; 0,36
Tecnecio 99m	gamma	0,14
Cesio 137	beta	0,51
(Bario 137m)	gamma	0,66
Iridio 192	beta gamma	0,67 máximo 0,2 a 1,4
Cobalto 60	beta gamma	0,314 máximo 1,17 y 1,33
Americio 241/ berilio	neutrónica gamma	4 a 5 0,06
Estroncio 90/ (Itrio 90)	beta beta	2,27 2,28
Prometio 147	beta	0,23
Talio 204	beta	0,77
Oro 198	beta gamma	0,96 0,41
Yodo 125	rayos X gamma	0,028 0,035
Radio	alfa beta gamma	4,59 a 6,0 0,67 a 3,26 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, debido a su menor densidad.

Radionucleido	Energía de partículas beta máxima (MeV)	Gama máxima			
		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

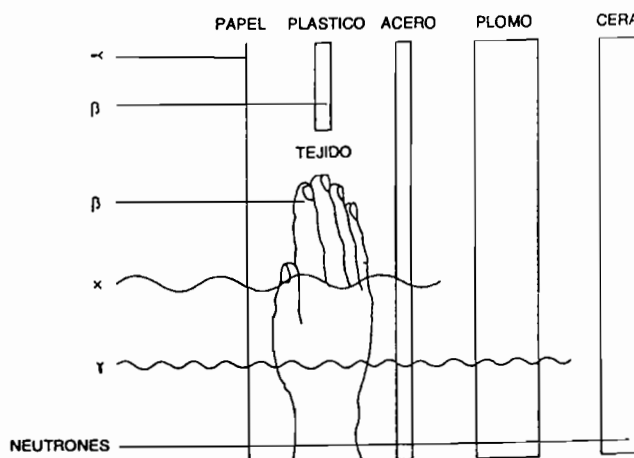
Los rayos gamma y rayos X son más penetrantes. Sin embargo, al ionizar pueden ser retirados del haz o perder su energía. De ese modo, pasan a ser progresivamente menos capaces de penetrar la materia y su número se reduce, vale decir, se atenúan, hasta que dejan de representar un peligro externo grave.

Existe una manera de expresar la calidad o capacidad de penetración de los rayos gamma y X que ofrece 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 al ser colocado en el camino de la radiación la atenuará 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).

Productor de radiaciones	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 no pierden 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.



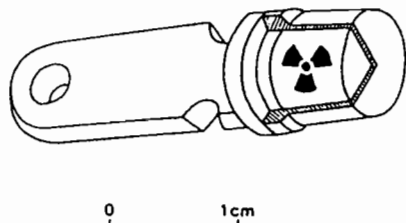
Propiedades de penetración de las radiaciones ionizantes.

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. Esto se traduce a menudo en que el núcleo recién formado se transforme en un radionucleido, el cual en muchos casos será capaz de emitir un rayo gamma o energía sumamente alta. Los blindajes especiales de hidrógeno capaces de absorber neutrones contienen una pequeña cantidad de boro que ayuda a absorber los neutrones.

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

Contención de sustancias radiactivas

Las sustancias radiactivas pueden producirse en cualquier forma física: gaseosa, líquida o sólida. Muchas aplicaciones médicas y la mayoría de las aplicaciones industriales 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 intensas, incluidas fuerzas de impacto especificadas, fuerzas de aplastamiento, inmersión en líquidos y tensión térmica, sin que se produzca fuga de la sustancia radiactiva.

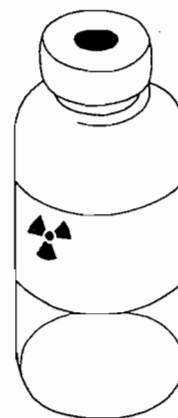


Una fuente sellada en que aparece la sustancia radiactiva encapsulada.

Todas las fuentes selladas se han probado 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 pueden 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 ingrese al 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 una botella 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 presente una ventana para que emerja la radiación. Las sustancias radiactivas no selladas presentan peligros externos e internos.



Botella de líquido radiactivo. La tapa de caucho que sella la botella 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. Un método conveniente para expresar números tan grandes consiste en la utilización de prefijos, como por ejemplo:

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).

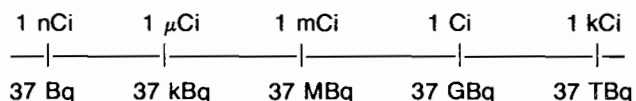
La actividad de una fuente depende del período de semi-desintegración del radionucleido de que se trate. Cada radionucleido tiene su propio y particular período de semi-desintegración, que es el tiempo que tardará la actividad de la fuente en disminuir a la mitad de su valor original. Los radionucleidos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

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

- | | |
|---|--------------------|
| a) para dispersión a través de líquidos | $Bq \cdot mL^{-1}$ |
| b) para dispersión a través de sólidos | $Bq \cdot g^{-1}$ |
| c) para dispersión a través de gases
(muy particularmente el aire) | $Bq \cdot m^{-3}$ |
| d) para 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.

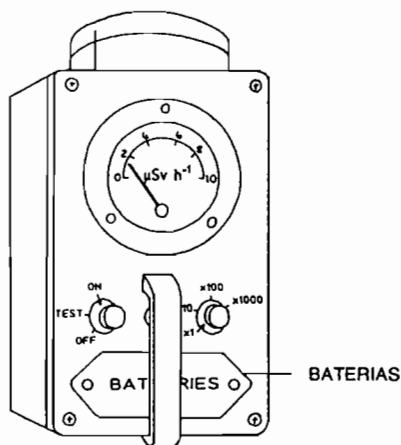
El término utilizado para describir la absorción de energía en una parte o partes determinadas del cuerpo humano es "dosis".

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). Para 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, el dosímetro de película 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.



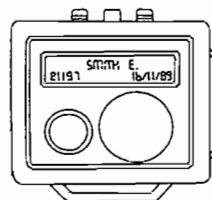
Un medidor de tasa de dosis típico.

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 las condiciones 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 control 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.

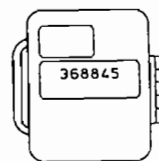
Puede comprobarse que el instrumento esté funcionando poniéndolo cerca de una pequeña fuente blindada; algunos instrumentos tienen una pequeña fuente de ensayo incorporada. La utilización de las fuentes de ensayo debe enseñarse a los trabajadores, pues las comprobaciones regulares no solo contribuirán 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 con empleo de 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 periodo 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 para 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 arrojarán datos inferiores o posiblemente no darán respuesta alguna. Al elegir un detector lo mejor es emplear 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 descubrirse y será posible mantener una zona de trabajo segura.

Radiación y distancia

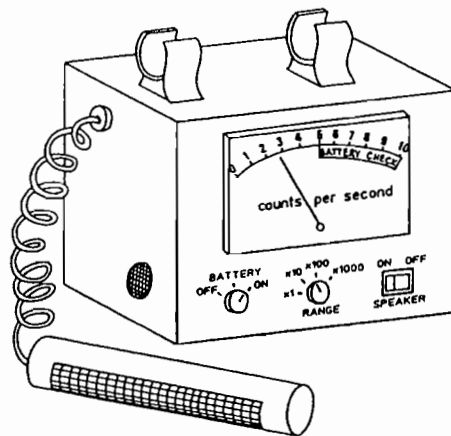
La radiación ionizante en el aire se propaga en línea recta. En esas circunstancias la radiación diverge simplemente de una fuente radiactiva y la tasa de dosis disminuye según la inversa del cuadrado de la distancia medida desde la fuente.

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.

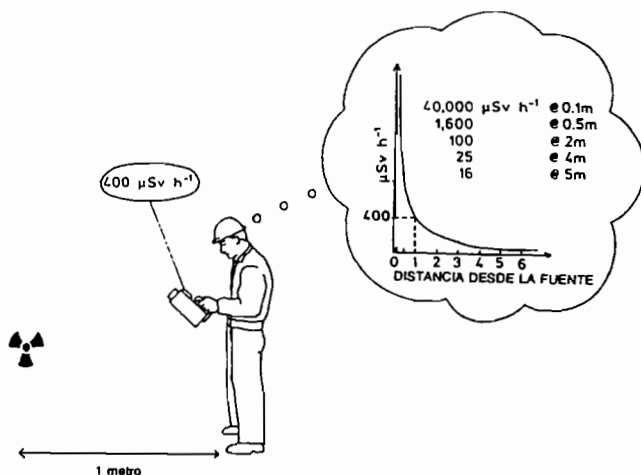
La distancia tiene un efecto decisivo en cuanto a reducir la tasa de dosis.

Los blindajes sólidos situados en el camino 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 simple 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 utilizando la ecuación siguiente:

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

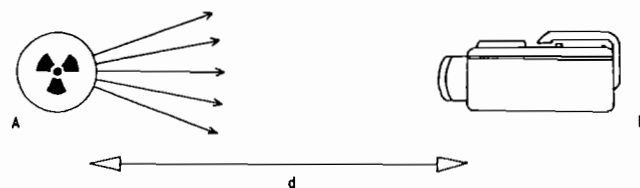
El factor gamma (Γ) es la tasa de dosis absorbida en $\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ a 1 m de 1 GBq del radionucleido;

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 tasa de dosis de la fuente se determina mejor utilizando 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 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 de radiación para los trabajadores y no deben dar lugar para esos trabajadores a una exposición a las radiaciones que alcance un nivel que se consideraría 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 de corto plazo tales como quemaduras de la piel y cataratas de los ojos;
- Efectos de largo plazo tales como un aumento de la disposición 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 mantenerse lo más bajas posibles, teniendo en cuenta los factores económicos y sociales; y
- En cualquier caso, toda las dosis deben mantenerse por debajo de los límites de dosis.

Para 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