

Manual sobre MEDIDORES NUCLEARES

Comprende:

Guía de aplicaciones

Guía de procedimientos

Guía de fundamentos básicos

Abril 1996
IAEA-PRSM-3



MANUAL
PRACTICO DE
SEGURIDAD
RADIOLOGICA

Manual sobre MEDIDORES NUCLEARES

Comprende:

Guía de aplicaciones

Guía de procedimientos

Guía de fundamentos básicos

**MANUAL PRACTICO
DE SEGURIDAD RADIOLOGICA**

**Manual sobre
MEDIDORES NUCLEARES**

Comprende:

Guía de aplicaciones

Guía de procedimientos

Guía de fundamentos básicos

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.

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: 84-87275-64-8 (T.III)

Depósito Legal: M. 15.042-1996

Imprime: **grafoffset sl**

Impreso en papel reciclado

PREFACIO

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. Nº 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).

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
Medidores nucleares	7
Tipos de medidores	7
Medidores de transmisión	9
Medidores de retrodispersión	11
Medidores reactivos	12
Equipo utilizado para medición	13
Protección radiológica en materia de medidores	14
Medidores portátiles	18
Manipulación de fuentes	20
Mantenimiento de los medidores	21
Almacenamiento y contabilidad	23
Protección de los trabajadores	24
Medidas en caso de emergencia	25
 Guía de procedimientos	 27
 Guía de fundamentos básicos para los usuarios de radiaciones ionizantes	 40
Producción de radiaciones	40
Unidades de energía de radiación	42
Radiación que se propaga a través de la materia	42
Contención de sustancias radiactivas	46
Actividad de las fuentes	48
Medición de las radiaciones	49
Radiación y distancia	52
Ejemplos de cálculos	55
Radiación y tiempo	56
Efectos de las radiaciones	57

GUIA DE APLICACIONES: MEDIDORES NUCLEARES

Medidores nucleares

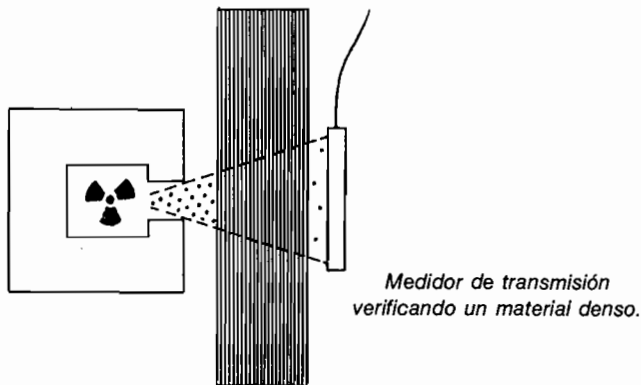
Los métodos de producción modernos, sobre todo los automáticos, deben someterse a una constante vigilancia para comprobar la calidad de los productos y controlar el proceso de producción. Ese tipo de vigilancia se realiza a menudo con dispositivos de control de calidad que utilizan las propiedades características de la radiación ionizante, conocidos con el nombre de medidores nucleares. Estos dispositivos no necesitan estar en contacto con el material que se examina y, por tanto, pueden utilizarse para controlar procesos de alta velocidad, materiales con temperaturas extremas o propiedades químicas nocivas, materiales susceptibles de dañarse por contacto y productos envasados. Las radiaciones beta, gamma y X que se utilizan no dañan ni modifican de ningún modo el material. En cambio, la radiación neutrónica puede utilizarse concretamente para inducir cambios como por ejemplo inducción de radiactividad como medio de detección

Tipos de medidores

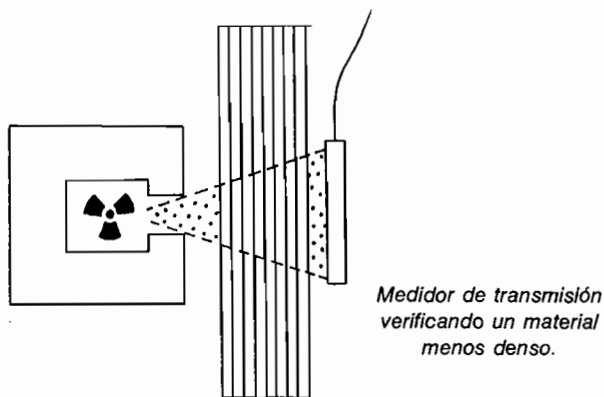
Por lo general, los medidores instalados funcionan automáticamente y son de tipo fijo o de barrido (con movimiento de avance y retroceso). Los medidores portátiles están diseñados para que puedan utilizarse en distintos lugares.

Todos los medidores instalados y portátiles están compuestos por un recipiente de la fuente desde donde se emite la radiación y al menos por un detector, que o mide la tasa de dosis después de que la radiación ha interactuado con el material o determina el tipo y energía de la radiación que le ha llegado. Los medidores pueden clasificarse según el proceso que experimenta la radiación antes de llegar al detector. Hay tres categorías:

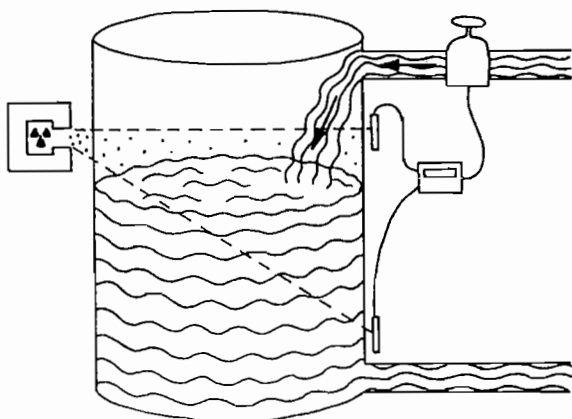
- 1) Medidores de transmisión
- 2) Medidores de retrodispersión
- 3) Medidores reactivos



Medidor de transmisión verificando un material denso.



Medidor de transmisión verificando un material menos denso.



Medidores de nivel de transmisión.

Medidores de transmisión

El recipiente de la fuente y el detector están situados en lados opuestos del material. La radiación se atenúa al desplazarse a través del material y el detector mide una tasa de dosis (o tasa de recuento).

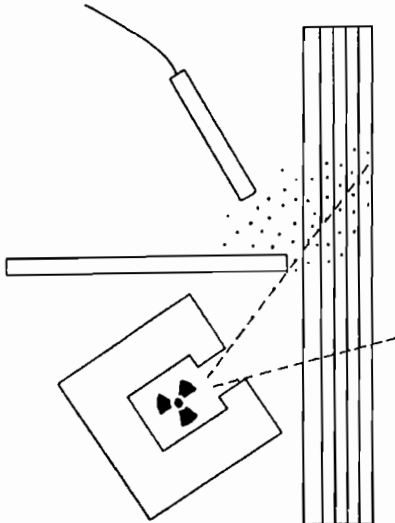
Si la geometría es constante, es decir, si la radiación pasa a través de un espesor constante del material o de una tubería o vasija, el detector medirá los cambios de densidad del material en que haya penetrado la radiación, o responderá a esos cambios. Si la radiación tiene que atravesar un material más denso, su grado de atenuación aumentará y la tasa de recuento se reducirá. El detector también percibe la disminución de densidad. Los medidores de densidad emplean este principio (por ejemplo, para controlar la densidad del cemento y de los lubricantes para taladrar que fluyen a través de las tuberías) y los medidores de nivel lo hacen para controlar el contenido mínimo y máximo de las vasijas.

Si la densidad del material es constante, el detector medirá los cambios geométricos que se produzcan, como por ejemplo, en el espesor del material que pase entre la fuente y el detector, o responderá a esos cambios. El grado de atenuación aumentará con el espesor. Este principio lo utilizan los medidores de espesor, por ejemplo,

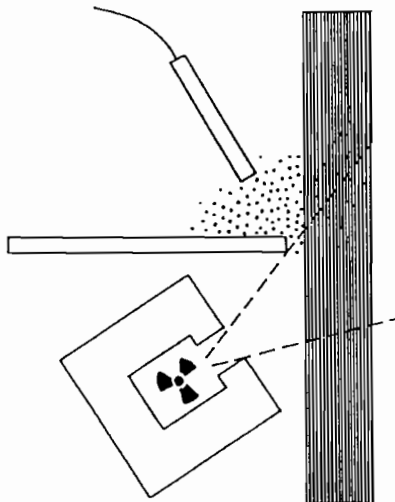
Fuente de radiación	Aplicaciones típicas de medidores de transmisión
Prometio 147 (beta)	Densidad del papel
Talio 204 (beta)	Espesor del papel, el caucho y los productos textiles
Kriptón 85 (beta)	Espesor del cartón
Estroncio/ itrio 90 (beta)	Espesor de metales delgados; contenido de tabaco de cigarrillos y paquetes
Rayos X	Acero de hasta 20 mm; nivel líquido en envases
Americio 241 (gamma)	Acero de hasta 10 mm; contenido de botellas
Cesio 137 (gamma)	Acero de 100 mm; contenido de tuberías/tanques
Cobalto 60 (gamma)	Contenido de hornos de coque, de hornos de ladrillos, etc.

para controlar la producción de metal laminado, en que la fuente de radiación se escoge para determinar el alcance y penetración necesarios.

Las actividades de las fuentes beta suelen variar entre 40 MBq y 40 GBq, mientras que las fuentes gamma contienen por lo general entre 0,4 y 40 GBq.



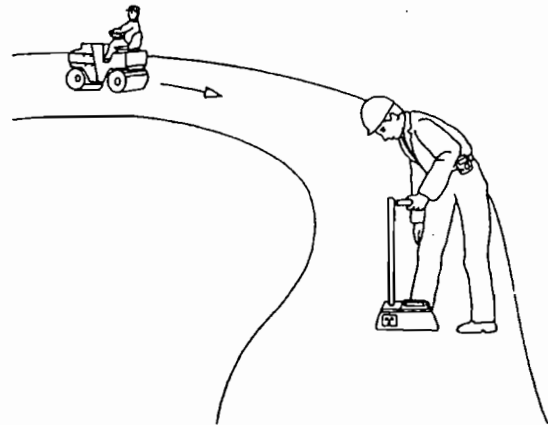
Medidor de retrodispersión verificando un material denso.



Medidor de retrodispersión verificando un material menos denso.

Medidores de retrodispersión

El detector y el recipiente de la fuente se instalan del mismo lado con respecto al material. El detector se protege contra la radiación primaria. La radiación penetra en el material e interactúa con los átomos y moléculas. La interacción será mayor en los materiales más gruesos o densos. El detector mide las radiaciones secundarias que se retrodispersan a partir de la interacción. En este caso también si hay una geometría constante el medidor indicará la densidad del material y si la densidad es constante, indicará el espesor del material.



Medidor de retrodispersión portátil verificando las características de la superficie de una carretera asfaltada.

La fuente de radiación se escoge cuidadosamente para la aplicación de que se trate. Los medidores de retrodispersión que utilizan rayos gamma y rayos X pueden ser más sensibles a la presencia de elementos más ligeros, como el carbono, que los medidores de transmisión que emplean la misma radiación primaria.

Si se utiliza la radiación neutrónica, el valor de la retrodispersión puede indicar la cantidad de átomos de hidrógeno presentes en el material. En este principio se basan, por ejemplo, los medidores de humedad en la producción de papel, los medidores de carreteras que determinan las características de las superficies asfaltadas, y los medidores de porosidad que determinan el contenido de agua o de hidrocarburos de las rocas del subsuelo.

Fuente de radiación	Aplicaciones típicas del medidor de retrodispersión
Prometio 147 (beta)	Espesor del papel; revestimiento de metal delgado
Talio 204 (beta)	Espesor del caucho delgado y los productos textiles
Estroncio/ Itrio 90 (beta)	Espesor del plástico, caucho, vidrio y de aleaciones delgadas y ligeras
Americio 241 (gamma)	Vidrio de hasta 10 mm y plástico de hasta 30 mm
Cesio 137 (gamma)	Vidrio de más de 20 mm; densidades de roca/carbón
Americio 241/berilio	Detección de hidrocarburos en rocas

Las actividades de las fuentes beta suelen oscilar entre 40 y 200 MBq, mientras que las fuentes gamma pueden contener hasta 100 GBq.

Medidores reactivos

Ciertos rayos gamma y rayos X de baja energía pueden ionizar átomos específicos y hacer que emitan rayos X fluorescentes con una energía característica. La medición con el detector de los rayos X fluorescentes no solo indica la presencia de los átomos específicos, sino también su cantidad en el material. En este principio se basan los medidores que analizan los elementos constitutivos de materiales como minerales y aleaciones, así como los medidores que miden el espesor de las capas de los sustratos de materiales distintos.

Se pueden utilizar generadores de neutrones de alta energía accionados con electricidad para transformar sustancias no radiactivas en radiactivas. Los radionucleidos que se forman emiten rayos gamma característicos que pueden identificarse por su energía. Estos medidores o instrumentos de referencia se utilizan en la prospección de petróleo.

Fuente de radiación	Aplicación del medidor reactivo
Hierro 55 (rayos X — 0,21 MeV)	Análisis: elementos de poca masa plástico de 0–25 μm sobre aluminio
Americio 241	Análisis: elementos de masa mediana zinc de 0–100 μm sobre hierro
Cadmio 109 (rayos X — 0.088 MeV)	Análisis: elementos de gran masa
Rayos X (hasta 60 kV)	Análisis: elementos diversos
Generadores de neutrones	Análisis de hidrocarburos en rocas

Las actividades de las fuentes utilizadas varían entre unos 200 MBq y 40 GBq.

Equipo utilizado para medición

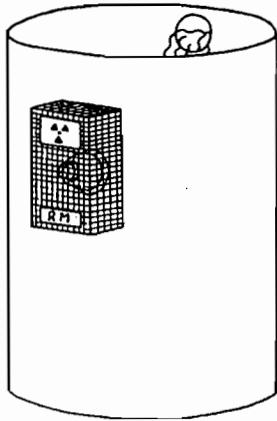
Las fuentes radiactivas cerradas que se emplean en los medidores a menudo se hallan en Forma Especial (véase la Guía de fundamentos básicos), sobre todo los emisores gamma. La fuente debe estar bloqueada en su recipiente, en muchos casos, un contenedor sellado y blindado.

Los recipientes de fuentes gamma suelen tener blindaje de plomo para colimar la radiación en un haz primario y dirigirlo al material hacia el detector. El blindaje deberá, de preferencia, atenuar las tasas de dosis en toda zona fácilmente accesible fuera del recipiente de la fuente a menos de $7,5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$. En los casos en que ello sea imposible debido a las limitaciones de peso, la colocación de un simple dispositivo protector o barrera mecánica deberá impedir el acceso.

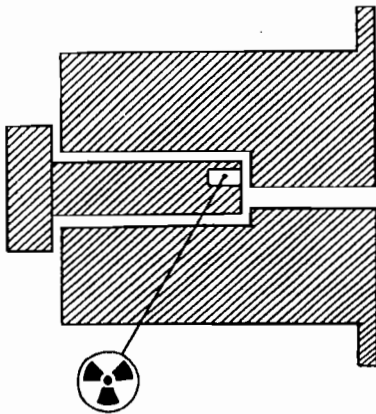
Se deberá instalar un obturador para que la fuente de radiación esté completamente blindada mientras no se utilice. En muchos casos el obturador puede concebirse de manera que se cierre automáticamente cuando no haya ningún material frente al medidor. Es preciso colocar y mantener una señal que indique claramente si el obturador está abierto o cerrado.

En la superficie exterior del recipiente de la fuente deberá colocarse una etiqueta con los datos de la fuente instalada, incluido el nombre del radionucleido, su actividad en una fecha especificada y su número de serie.

En el recipiente del medidor y en los dispositivos protectores deberán colocarse avisos adecuados que marquen los límites de una zona controlada.



Un dispositivo protector mecánico impide el acceso a tasas de dosis altas en la proximidad del recipiente de la fuente de un medidor de nivel.

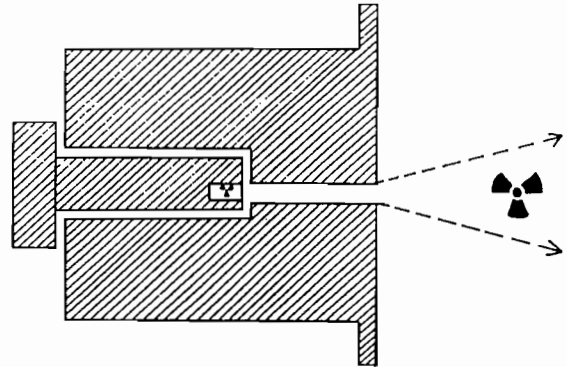


Recipiente de una fuente de rayos gamma con el obturador cerrado.

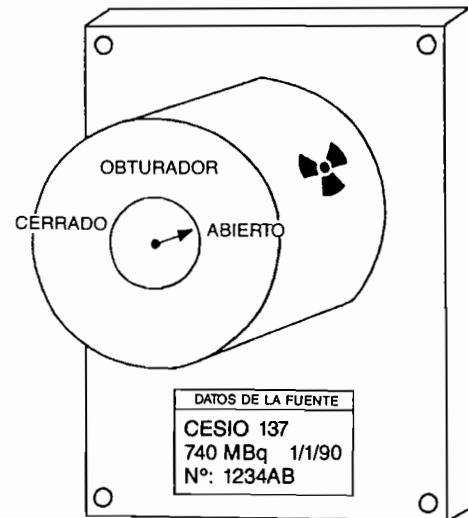
Protección radiológica en materia de medidores

El principal aspecto que hay que tener en cuenta en relación con los medidores, sobre todo los que contienen emisores beta, es impedir el acceso a las tasas de dosis muy altas que se encuentran normalmente en el haz primario, cerca de la superficie exterior del medidor. Esto puede lograrse preparando el material que vaya a medirse

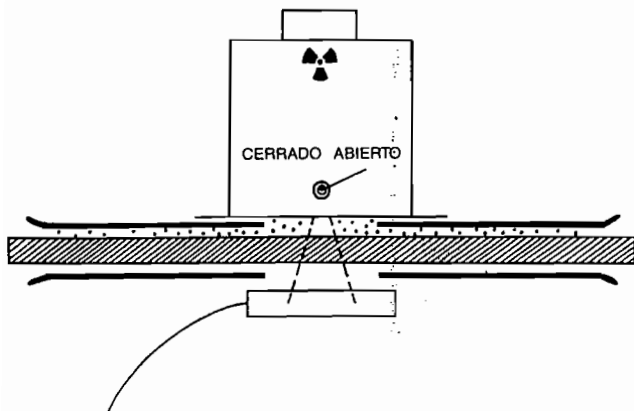
con el blindaje necesario e instalando obturadores automáticos que se cierran cuando no haya ningún material. Otra posibilidad es hacer físicamente imposible la entrada en esta zona de algo que no sea el material correspondiente.



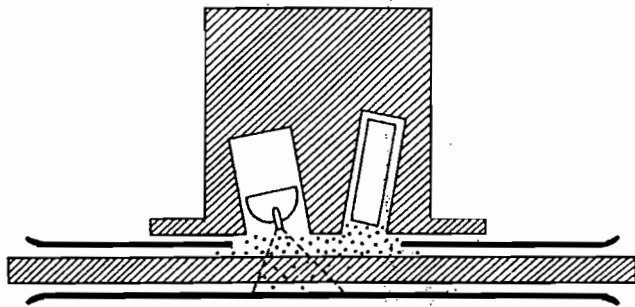
Corte del recipiente de una fuente de rayos gamma con el obturador abierto.



Indicaciones claras en el exterior del recipiente de la fuente del medidor.

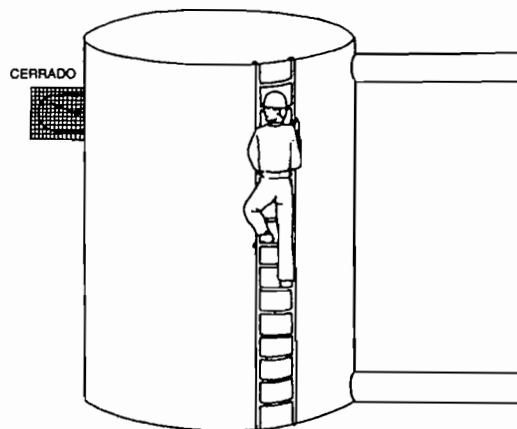


Blindaje de un medidor de transmisión para impedir el acceso al haz primario y la radiación dispersa.

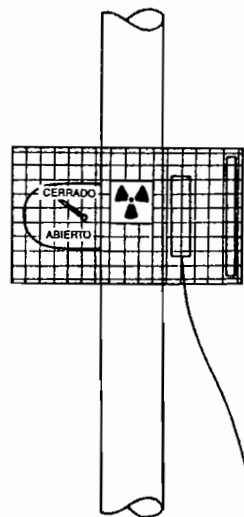


Corte que muestra el blindaje de un medidor de retrodispersión para impedir el acceso a la radiación retrodispersa y transmitida.

Puede ser necesario establecer zonas controladas a ambos lados del material de los medidores tanto de transmisión como de retrodispersión. El acceso a estas zonas, y al haz primario, puede impedirse colocando placas paralelas con escasa separación conocidas como placas de guía, a través de las cuales haya de pasar el material. El acceso al haz primario de un medidor de nivel instalado en una gran vasija solo será posible cuando el medidor se desmonte o cuando se abra la vasija para tener acceso a ella. Se deberán tomar suficientes precauciones para tener la seguridad de que el obturador del medidor esté cerrado antes de tomar estas medidas.



Obturador de medidor de nivel cerrado antes de efectuarse el mantenimiento dentro de la vasija.



Un dispositivo protector mecánico y un dispositivo de detención del haz impiden el acceso al haz primario de un medidor de densidad de transmisión.

Se fijará en el lugar apropiado el blindaje local que haya sido necesario añadir a un medidor, como por ejemplo, un bloque atenuador de haz, para reducir su intensidad después de que haya pasado a través del detector.

Cuando sea factible, el blindaje esencial deberá estar enclavado con el obturador del medidor, de modo que al acoplarse mecánica o eléctricamente el blindaje con el obturador, este último se cierre automáticamente al desmontarse el blindaje. En el blindaje esencial se colocará un aviso con el símbolo del trébol y un texto adecuado.

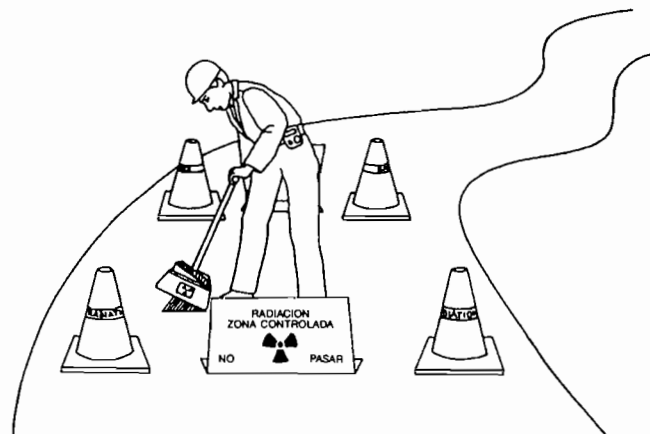
El material de blindaje dependerá del tipo y la energía de la radiación que vaya a atenuar. Es probable que los medidores con emisores beta necesiten también blindaje contra los rayos X (bremsstrahlung) que se generen cuando las partículas beta sean absorbidas por los materiales pesados circundantes. Midiendo el alcance de la radiación o la capa hemirreductora se podrán determinar el tipo y espesor de los materiales de blindaje que tendrán que utilizarse.

La distancia puede ser al menos tan eficaz como los materiales de blindaje para reducir la tasa de dosis. Se requiere un dosímetro adecuado tanto para fines de vigilancia como para comprobar que los niveles de radiación sean satisfactorios.

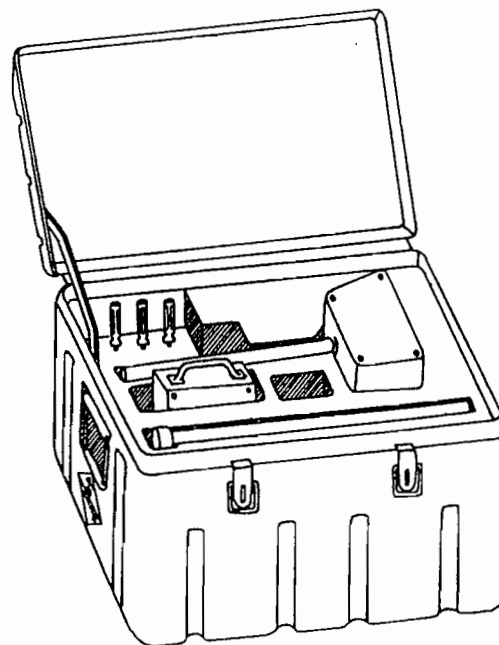
Medidores portátiles

No siempre es posible instalar un obturador enclavado en el recipiente de la fuente de un medidor portátil y es preciso tomar precauciones adicionales para garantizar que el haz útil no se dirija hacia el operador. Cuando el obturador está abierto las tasas de dosis en las inmediaciones del medidor pueden ser tales que requieran establecer una zona controlada, la que deberá indicarse con una barrera, avisos adecuados u otros medios.

Los medidores portátiles deben transportarse de conformidad con los reglamentos de transporte. En caso de que el recipiente del medidor no cumpla estos requisitos, el medidor deberá colocarse en un contenedor adecuado. En general, los contenedores del tipo A resultan adecuados para los medidores que contienen actividades relativamente bajas, pero si la actividad excede de los límites especificados en el Reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos, entonces se deberá utilizar un contenedor del tipo B. Estos últimos se someten a un proceso de ensayo y certificación más riguroso. Además de la documentación apropiada que deberá acompañarle,



Zona controlada en que se utiliza un medidor de retrodispersión portátil.



Contenedor para el transporte de un medidor portátil.

el embalaje deberá llevar rótulos con inscripciones que indiquen si las respectivas tasas de dosis corresponden a la categoría I, II o III:

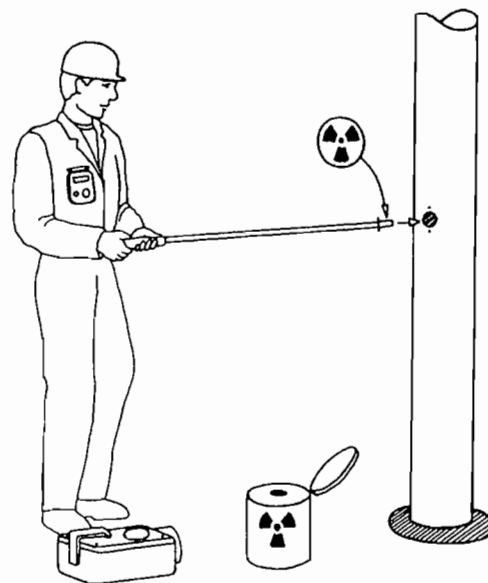
Categoría del contenedor de transporte indicada en el rótulo	Tasa de dosis máxima permitida ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)	
	En la superficie del contenedor	A 1 m de la superficie del contenedor
I	5	—
II	500	10
III	2000	100

En los rótulos se deberá indicar el nombre del radionucleido y la actividad contenida (por ejemplo, 200 MBq). Los rótulos de las categorías II y III deberán marcarse con el índice de transporte, que es la tasa de dosis máxima a 1 m de la superficie del contenedor medida en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ dividido por 10. Por ejemplo, si $12 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ es la tasa de dosis máxima medida a 1 m de un contenedor, su índice de transporte será 1,2.

Manipulación de fuentes

Algunos medidores, como por ejemplo, los medidores reactivos, requieren el cambio periódico de las fuentes. Otros, como por ejemplo los medidores de retrodispersión (instrumentos de referencia) utilizados en diferentes lugares para medir las características de las rocas del subsuelo, requieren que la fuente y el recipiente del medidor se transporten por separado. Para éstas y otras operaciones de cambio de fuente se precisan útiles especiales de mango largo. Su longitud estará comprendida entre 10 cm y más de 1 m, según la naturaleza de las fuentes radiactivas que se manipulen y la frecuencia del trabajo.

El operador deberá tener fácil acceso a un monitor de tasa de dosis adecuado con el cual pueda controlar los procedimientos de manipulación de la fuente.

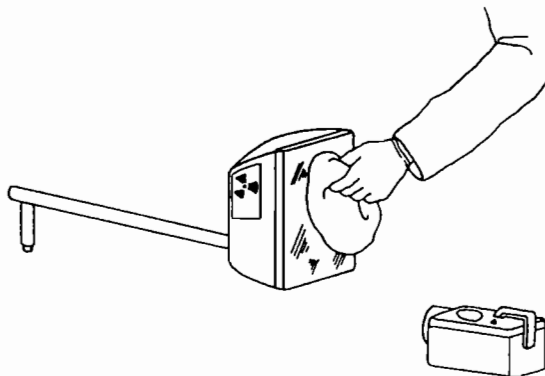


Herramienta de mango largo para transferir una fuente de rayos gamma de su contenedor de transporte al medidor.

Mantenimiento de los medidores

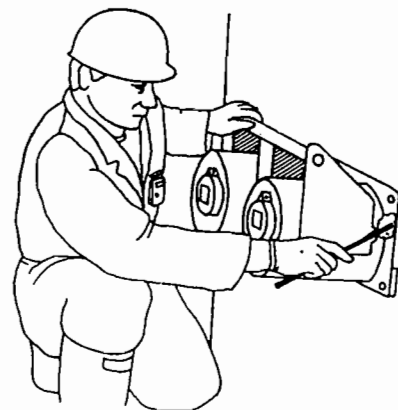
Los medidores suelen instalarse en plantas industriales y exponerse a la intemperie y otras condiciones que pueden deteriorar considerablemente las marcas hechas en el contenedor e, incluso, el mecanismo del obturador. Por lo tanto, es especialmente importante dar mantenimiento periódico a las piezas móviles y renovar lo que sea necesario. Para ese trabajo no tendrá que desmontarse la fuente.

Los medidores portátiles también pueden deteriorarse fácilmente cuando se utilizan en el terreno, como los medidores de carreteras y de análisis de minerales. La limpieza diaria y el mantenimiento periódico son elementos fundamentales. Antes de efectuar estas operaciones deberá utilizarse un dosímetro para confirmar que el obturador esté cerrado.



Comprobación para garantizar que esté cerrado el obturador antes de dar mantenimiento principal a un medidor.

Es probable que la fuente funcione de manera fiable durante varios años. Se deberán realizar pruebas de fuga en los intervalos que exija la autoridad reglamentadora o que recomiende el fabricante, o después de cualquier incidente en que la fuente pueda haberse dañado. Las fuentes instaladas con carácter permanente por lo general no están sometidas a condiciones tan duras pero, aun así, deberán comprobarse al menos cada dos años. No es necesario frotarlas directamente. Se puede utilizar un trozo de papel o paño humedecido para frotar la superficie del contenedor por la que podría esperarse que escapara la sustancia radiactiva en caso de fuga de la fuente. Las fuentes que se manipulen o se sometan a condiciones más adversas deberán someterse a pruebas de fuga con mucha más frecuencia, por ejemplo, dos veces al año. Generalmente se hace la comprobación más directamente frotando una superficie que haya estado en contacto directo con la fuente. Es preciso prestar atención a las fuentes selladas que emiten radiación de baja energía. El frotamiento directo de la superficie de la fuente podría dañar una "ventana" delgada de salida de la radiación. El material que se utilice para el frotamiento deberá solo manipularse con pinzas o tenazas. Es preciso utilizar detectores sensibles para medir con exactitud la cantidad de sustancia radiactiva presente en el material utilizado para frotar la fuente, aunque posiblemente la contaminación bruta producirá una tasa de dosis considerable. Por



Prueba de fuga en un medidor instalado con una fuente alojada permanentemente en el recipiente.

ejemplo, la contaminación bruta de 600 kBq del cesio 137 o mucho menor del cobalto 60 producirá a 10 cm tasas de dosis apreciables de al menos $5 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. La cantidad de fuga aceptable es muy inferior a esta cifra.

Almacenamiento y contabilidad

Los medidores que estén en espera de ser instalados, así como los medidores portátiles y las fuentes intercambiables, pueden estar provistos únicamente de blindaje suficiente para ser transportados por breves períodos y más tarde definitivamente. Nadie deberá permanecer en su cercanía ni manipularlos más tiempo del necesario. Se deberá proveer un depósito especial reservado para esos fines para conservar los medidores y sus fuentes cuando no estén en uso. Este depósito no deberá contener otros materiales peligrosos como productos químicos o gases comprimidos y deberá ser seco y, de ser necesario, ventilado. Se deberán colocar avisos de advertencia en lugares visibles. Las tasas de dosis en el exterior deberán en general ser inferiores a $7,5 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$, o, preferiblemente, menores de $2,5 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$.

El depósito deberá mantenerse cerrado para impedir el acceso de personas no autorizadas a las zonas de tasa de

dosis más alta en el interior del local, o el contacto con un medidor o sus fuentes. La llave deberá mantenerse en un lugar seguro.

Deberá mantenerse un registro que indique dónde se halla siempre cada fuente. Se realizará una comprobación semanal de los medidores y fuentes portátiles para cerciorarse de que estén almacenados en condiciones de seguridad. En el caso de los medidores instalados, puede que convenga realizar una comprobación menos frecuente, quizá una vez al mes.

Protección de los trabajadores

Es poco probable que los trabajadores de las zonas en que hay instalados medidores estén expuestos a niveles significativos de radiación, de ahí que no necesiten llevar dosímetros.

Los cambios de fuente pueden hacer que el operador acumule una dosis durante un breve intervalo de tiempo. Es preciso mantener la dosis en el valor más bajo que sea razonablemente posible utilizando los útiles provistos y aplicando procedimientos eficientes que reduzcan al mínimo el tiempo de exposición. Por consiguiente, quizá



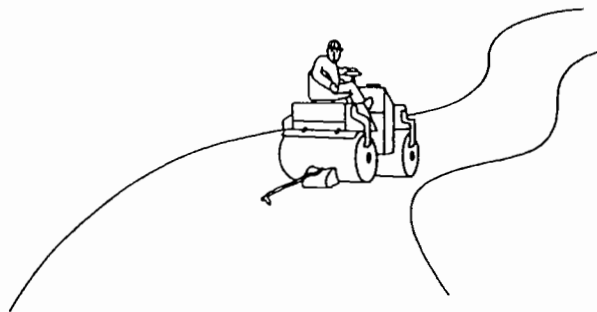
Devolución de un medidor portátil al depósito de la fuente.

sea necesario que el operador lleve consigo un dosímetro personal mientras trabaje cerca del contenedor de la fuente. En la manipulación de fuentes que emitan radiación de corto alcance, tal vez sea necesario también medir las dosis en las manos para velar porque los trabajadores no acumulen una dosis muy alta.

Medidas en caso de emergencia

Es importante poder precisar los problemas que puede presentar un medidor nuclear y estar además preparado para enfrentarlos. Un análisis minucioso del equipo y del uso que se le ha de dar permitirá prever las situaciones anormales que podrían presentarse. Es preciso elaborar planes para situaciones no usuales que puedan aplicarse con rapidez y eficacia para recuperar el control en caso de que surja un problema. Por ejemplo, en los planes se podrían definir medidas inmediatas para hacer frente a las siguientes situaciones:

- pérdida o robo de un medidor o de una fuente;
- daño físico al recipiente de una fuente que haya sido aplastado o afectado por un incendio o explosión;
- fuga de sustancias radiactivas de una fuente sellada;
- descubrimiento de tasas de dosis inaceptablemente altas después de que haya fallado un obturador o una señal de alarma;
- exposición de una persona a causa de un fallo del equipo o error de procedimiento.



Incidente que puede traducirse en la liberación de sustancias radiactivas y la consiguiente contaminación de la superficie.

En caso de que se pierda una fuente radiactiva, aun cuando se encuentre dentro de su recipiente, será preciso tratar de hallarla a la mayor brevedad posible. Los instrumentos de vigilancia radiológica de alta sensibilidad, capaces de medir bajas tasas de dosis o de contaminación, pueden ayudar a detectar la radiación proveniente de la fuente, sobre todo si no está blindada.

Cuando se sospeche que una fuente pueda presentar una fuga de sustancias radiactivas debe aislársela tan pronto como sea posible. Deberá evitarse todo contacto directo con la fuente y su recipiente. Las superficies que entren en contacto directo o indirecto con la fuente radiactiva que presente una fuga quedarán contaminadas. Deberán adoptarse medidas para impedir la ingestión de sustancias radiactivas como resultado de la contaminación de la ropa y las superficies del cuerpo. Se necesitará ayuda de especialistas y el uso de medidores de contaminación de la superficie a fin de determinar las superficies afectadas y aplicar procedimientos eficaces de descontaminación.

Cualquier accidente que haya originado la exposición de una persona a una dosis interna o externa deberá investigarse. Es importante determinar si una dosis presunta o notificada se recibió efectivamente y si alguna parte del cuerpo ha recibido una dosis mucho más alta que pudiera provocar una lesión localizada en los tejidos.

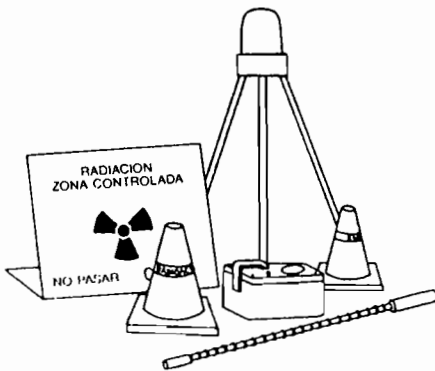
GUIA DE APLICACIONES: MEDIDORES NUCLEARES



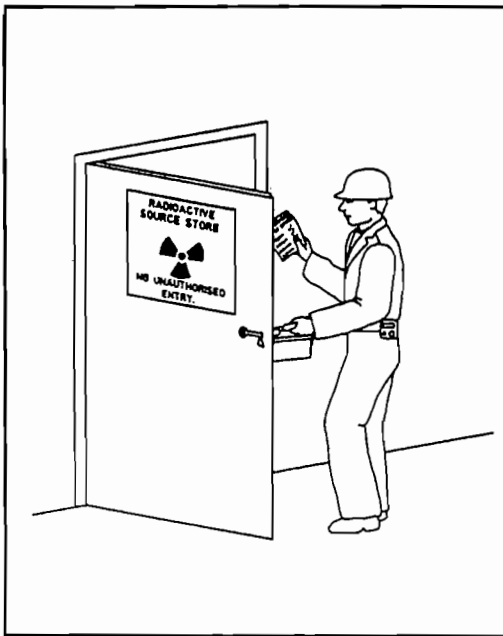
Cíñase a los procedimientos autorizados para trabajar con los medidores nucleares.

Solo trabajadores calificados y autorizados deberán llevar a cabo los trabajos. Si procede, los trabajadores deberán someterse a exámenes médicos y llevar puestos dosímetros.

Antes de comenzar a trabajar, lea estas guías de seguridad y plantee sus dudas. Analice con sus colegas las contribuciones que puede hacer a este importante trabajo.



Utilice solo los métodos establecidos, el equipo adecuado y una fuente sellada de una actividad apropiada para los fines con que se ha concebido el medidor. Solo deberá utilizarse un medidor portátil cuando se disponga de todo el equipo auxiliar necesario que se relacione con el medidor de que se trate. Este equipo podría incluir instrumentos para manipular la fuente, barreras, avisos y señales y un dosímetro.



Mantenga convenientemente almacenado contra todo riesgo:

- cualquier fuente o recipiente que esté en espera de ser instalado;
- cualquier recipiente de fuente que haya sido retirado de la instalación; o
- cualquier medidor portátil que no se esté utilizando por el momento.

Haga anotaciones periódicas en un registro, por ejemplo, a intervalos semanales, cada vez que se realice una comprobación de los artículos almacenados.

Mantenga un registro en que se indique la ubicación de los medidores instalados.

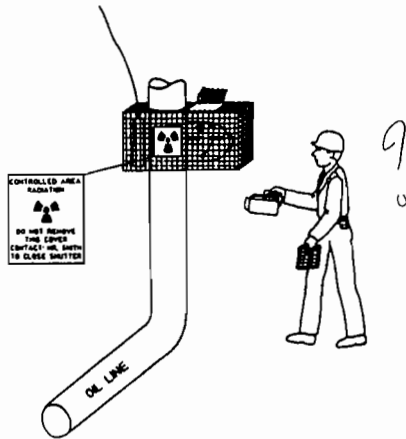


Guarde la llave del depósito de la fuente en un lugar seguro.

Antes de extraer del depósito un medidor o una fuente intercambiable, recuerde anotar el nombre de la persona que lo tiene en su poder y el lugar a que se va a trasladar.

Compruebe que el contenedor esté herméticamente a cerrado y utilice un dosímetro para confirmar que la fuente esté blindada. Esto también servirá para comprobar el dosímetro.

Coloque dos rótulos de transporte en el contenedor y carteles de advertencia en el vehículo. Mantenga el contenedor separado de los ocupantes.



Compruebe periódicamente los medidores instalados, por ejemplo, mensualmente, para confirmar que permanecen instalados en condiciones de seguridad. Mida las tasas de dosis accesible y asegúrese de que se haya marcado en una barrera física el límite de las zonas controladas.

Bloquee cualquier abertura del blindaje que pueda ser inaccesible para el dosímetro, pero no para los dedos y manos. Esto resulta especialmente importante si las aberturas dan acceso al haz primario.

Compruebe que el blindaje esté firmemente asegurado.

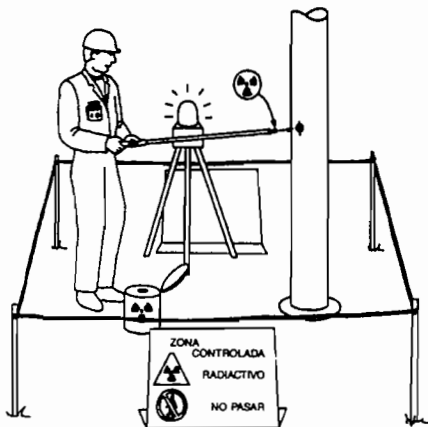
Compruebe que las señales de aviso sean legibles, sobre todo en el blindaje y en las puertas de acceso y los tableros.

Deberá recordarse a los trabajadores de mantenimiento el nombre de la persona con quien deberán tomar contacto para tener la seguridad de que el obturador esté bloqueado en la posición cerrada antes de que entrar en una zona de este tipo.



Antes de utilizar un medidor portátil o trabajar con un medidor instalado, instale una barrera y coloque signos de advertencia para marcar el límite de la zona controlada o indicar a otras personas de las inmediaciones que se mantengan alejadas. Mantenga una vigilancia constante en la zona controlada.

Mientras trabaje con un medidor, lleve consigo un monitor de tasa de dosis en posición conectada. Utilícelo para comprobar que el obturador haya sido cerrado después de haber utilizado un medidor portátil. Asimismo, compruebe que el obturador haya quedado bloqueado en la posición cerrada antes de retirar de un lugar un medidor instalado.



A menos que esté debidamente calificado y autorizado para hacerlo:

- nunca trate de extraer una fuente de su recipiente; y
- nunca trate de modificar o reparar el recipiente.

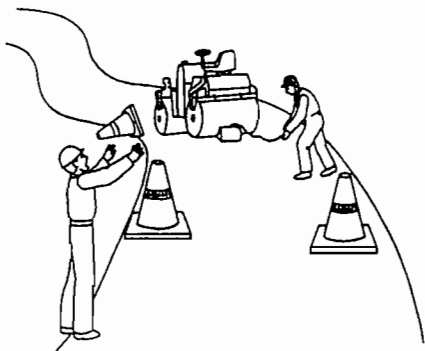
Las personas encargadas de manipular las fuentes deberán utilizar instrumentos de manipulación apropiados y procedimientos aprobados. No se deberá permitir que una fuente haga contacto con ninguna parte del cuerpo.



Lleve a cabo el mantenimiento ordinario necesario. Es probable que el medidor portátil requiera atención después de cada uso pero, antes de examinarlo detenidamente, acuérdesese de utilizar el dosímetro para comprobar que el obturador haya quedado cerrado o que la fuente tenga otro tipo de blindaje de seguridad. Los medidores instalados necesitarán menos atención. Mantenga un registro con información sobre el mantenimiento periódico que se haya dado, como por ejemplo:

- 1) Limpiar el exterior del recipiente para eliminar el polvo y la humedad.
- 2) Comprobar que las superficies exteriores del medidor se mantengan en buenas condiciones y que sigan siendo legibles los rótulos, las señales de advertencia y la etiqueta que contienen datos de la fuente.
- 3) Utilizar los lubricantes recomendados para limpiar y dar mantenimiento a las piezas móviles.
- 4) Examinar los tornillos y tuercas para comprobar que están bien apretados.
- 5) Comprobar que la fuente esté bien sujeta a su recipiente y que puedan medirse tasas de dosis uniforme en todas las superficies exteriores del recipiente.
- 6) Examinar las herramientas de manipular la fuente para determinar si han sufrido daños sus muelles, las roscas de los tornillos u otros elementos.
- 7) Llevar a cabo pruebas de fuga en los plazos recomendados y de la manera prescrita.

Informe de cualquier fallo a su supervisor.



Mantenga la calma si un medidor interviene en un accidente o incidente.

Si el medidor no ha sufrido daños, haga lo necesario para conservar su integridad. Por ejemplo, utilizando un monitor de tasa de dosis, confirme que esté cerrado el obturador y coloque el medidor en su contenedor de transporte.

Si el recipiente parece haber sufrido daños, aléjese de él y mantenga a los demás alejados. Mida las tasas de dosis e instale una barrera que marque la zona controlada.

Si se sospecha que la fuente ha recibido graves daños, impida el acceso a las superficies que pudieran haber quedado contaminadas por la sustancia radiactiva. Aísle a cualquiera que haya recibido una dosis de radiación o estado en contacto con una superficie contaminada. Manténgase cerca, pero fuera de la zona marcada y envíe a alguien para que notifique el suceso a su supervisor y consiga ayuda. La prueba de fuga indicará si una fuente ha recibido daños graves. Un medidor que pueda haber sido dañado no deberá volver a utilizarse hasta que haya sido examinado y, de ser necesario, reparado por un técnico competente y autorizado.

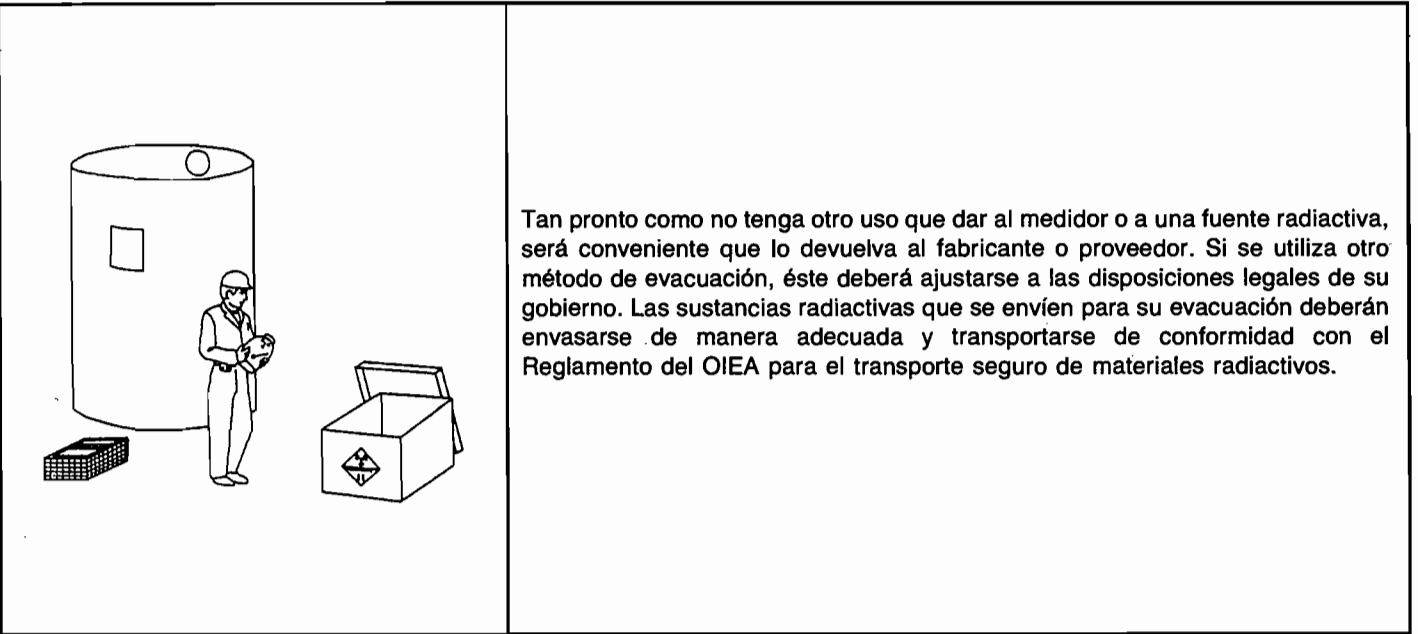


Cuando haya finalizado el trabajo con medidores portátiles o fuentes intercambiables, utilícese un monitor de tasa de dosis para confirmar que las fuentes estén provistas de un blindaje seguro.

Cerciórese de que en cada contenedor se hayan colocado dos rótulos de transporte legibles. Si se utiliza un vehículo, éste deberá llevar letreros de advertencia para transportar el contenedor de vuelta al depósito de la fuente.

Deberá anotarse en el libro de registro el momento en que se han devuelto las fuentes.

En caso de pérdida o robo de una fuente, comuníquelo de inmediato a su supervisor.



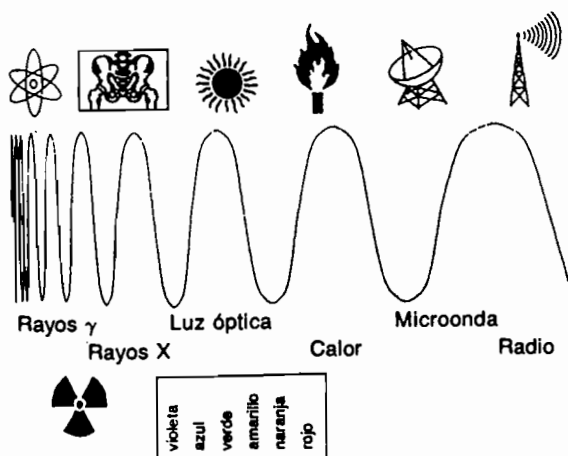
GUIA DE FUNDAMENTOS BASICOS PARA LOS USARIOS DE RADIACIONES IONIZANTES

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.



Espectro de las radiaciones similares a los rayos gamma.

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 tiene 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.

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	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
(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	2,28
Prometio 147	beta	0,23
Talio 204	beta	0,77
	beta	0,96
Oro 198	gamma	0,41
	gamma	0,028
Yodo 125	rayos X	0,028
	gamma	0,035
Radio	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, 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

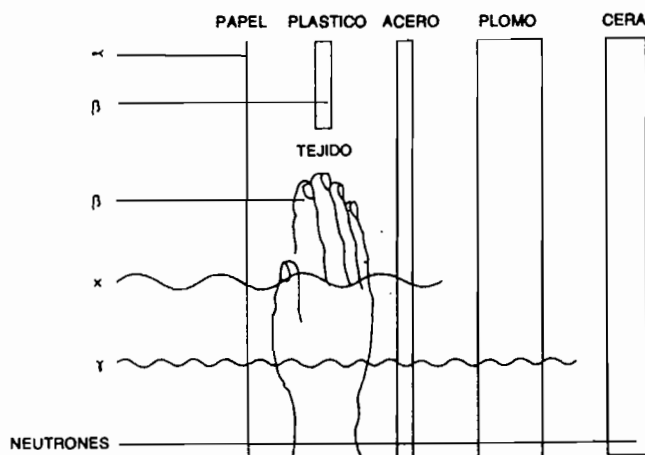
Los rayos gamma y rayos X son más penetrantes. Sin embargo, al ionizar pueden ser retirados del haz o perder su energía. De ese modo, pasan a ser progresivamente menos capaces de penetrar la materia y su número se reduce, vale decir, se atenúan, hasta que dejan de representar un peligro externo grave.

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 decimo-reductora (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.



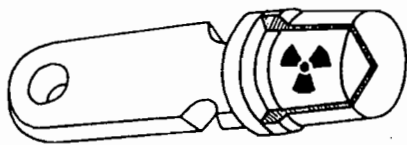
Propiedades de penetración de las radiaciones ionizantes.

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.



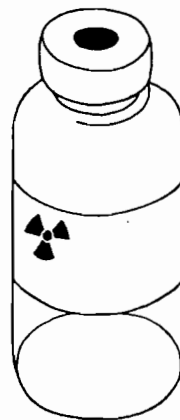
0 1cm

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).

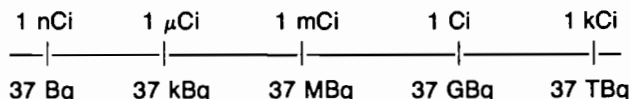
La actividad de una fuente depende del período de semi-desintegración del radionucleido de que se trate. Cada radionucleido tiene su propio y particular período de semi-desintegración, que es el tiempo que tardará la actividad de la fuente en disminuir a la mitad de su valor original. Los radionucleidos 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.

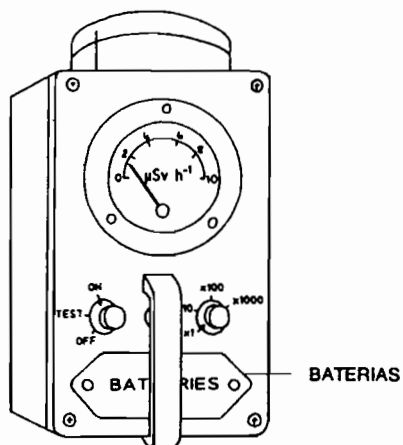
El término utilizado para describir la absorción de energía en una parte o partes determinadas del cuerpo humano es "dosis".

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 microsievts 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.



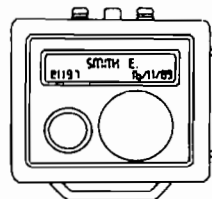
Un medidor de tasa de dosis típico.

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.

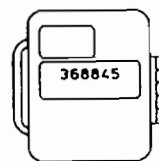
Puede comprobarse que el instrumento esté funcionando poniéndolo cerca de una pequeña fuente blindada; algunos instrumentos tienen una pequeña fuente de ensayo incorporada. La utilización de las fuentes de ensayo debe enseñarse a los trabajadores, pues las comprobaciones regulares no solo contribuirán 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 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 para medir la cantidad de sustancia radicativa 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

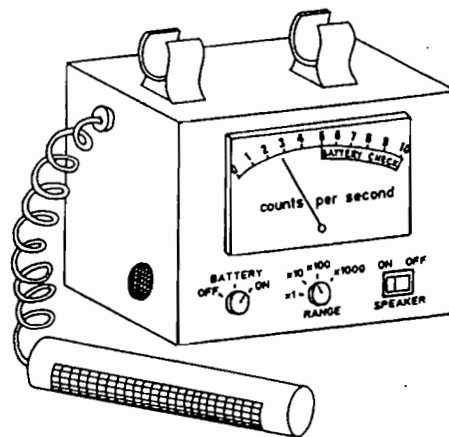
La radiación ionizante en el aire se propaga en línea recta. En esas circunstancias la radiación diverge simplemente de una fuente radiactiva y la tasa de dosis disminuye según la inversa del cuadrado de la distancia medida desde la fuente.

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.

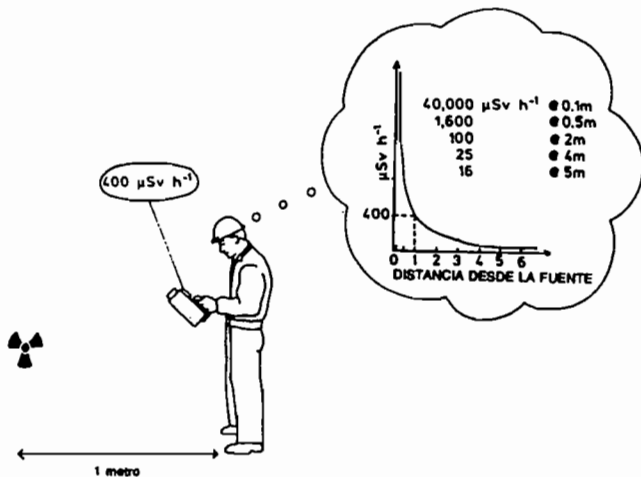
La distancia tiene un efecto decisivo en cuanto a reducir la tasa de dosis.

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 $\text{mGy} \cdot \text{h}^{-1}$. ¿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.

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