

Guía de Seguridad del CSN

GS-05.17

**Calibración y verificación de la instrumentación
de radioprotección para la medida de la radiación
y contaminación en instalaciones radiactivas**

7 de diciembre de 2022

Índice

Preámbulo.....	2
1. Objeto y ámbito de aplicación	3
1.1. Objeto.....	3
1.2. Ámbito de aplicación.....	4
2. Definiciones.....	4
3. Consideraciones generales	5
3.1. Calibración en un laboratorio acreditado	6
3.2. Calibración en un laboratorio certificado.....	8
3.3. Verificación	9
4. Métodos de verificación.....	10
4.1. Inspección visual	11
4.2. Prueba de verificación	11
4.2.1. Descripción.....	11
4.2.2. Fuente de referencia	12
4.2.3. Repetibilidad, reproducibilidad, geometría, distancia.....	14
4.2.4. Toma de medidas	14
4.2.5. Resultados.	16
5. Informe de verificación	17
6. Requisitos aplicables a las instalaciones radiactivas para la calibración y la verificación...17	
7. Referencias bibliográficas	19
Anexos	
I. Instrumentación de radioprotección.....	21
II. Verificación monitor radiación ambiental/contaminación fuente radiactiva encapsulada (decaimiento)	25
III. Verificación monitor radiación ambiental/contaminación fuente radiactiva encapsulada (sin decaimiento)	26
IV. Verificación monitor radiación con monitor de referencia	27
V. Verificación monitor contaminación superficial con monitor de referencia	28
VI. Verificación monitor constante gamma.....	30
VII. Verificación monitor radiación ambiental/contaminación superficial fuente radiactiva no encapsulada	31
VIII. Cálculo de la eficiencia en un monitor de contaminación superficial	32
IX. Procedimiento para calibración y verificación de la instrumentación de radioprotección.....	34

Preámbulo

En las instalaciones radiactivas se dispone de instrumentación específica para la detección y medida de la radiación y/o contaminación. Esta instrumentación se utiliza para fines como la medida de los niveles de radiación, comprobar la ausencia de contaminación después de una jornada de trabajo con fuentes no encapsuladas, delimitar zonas radiológicas, etc.

La calibración y verificación de esta instrumentación de radioprotección utilizada en las instalaciones radiactivas, tiene como objetivo principal asegurar que las medidas realizadas con la misma tienen una desviación aceptable y conocida respecto a un valor convencionalmente verdadero, conocido como valor de referencia. Con estas pruebas es posible detectar errores en el comportamiento de los monitores y anticiparse a un mal funcionamiento que diera lugar a medidas incorrectas.

Debido a ello, la realización de pruebas de calibración y verificación son un requisito fundamental desde el punto de vista de la protección radiológica en las instalaciones radiactivas. Para la elección de una adecuada calibración y de una correcta metodología de las verificaciones, han de considerarse distintos aspectos prácticos, operacionales y reglamentarios. La información relevante que resulte de cada prueba debe ser documentada, con la finalidad de mantener un registro trazable de la situación de cada monitor.

Esta Guía aporta recomendaciones sobre determinados aspectos relacionados con la elección de una adecuada calibración y de una correcta metodología para realizar las verificaciones del equipamiento de radioprotección, siendo de utilidad para las instalaciones radiactivas. Asimismo, pretende facilitar la vigilancia y el control que ejerce el Consejo de Seguridad Nuclear sobre este requisito.

La obligatoriedad de realizar este tipo de pruebas proviene de la especificación I.6 del anexo I de la Instrucción IS-28, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre las especificaciones técnicas de funcionamiento que deben cumplir las instalaciones radiactivas de segunda y tercera categoría, estableciendo que:

La vigilancia radiológica de la instalación se realizará mediante detectores de radiación/contaminación apropiados.

Se establecerá un programa de calibraciones y verificaciones de los sistemas de detección y medida de la radiación, teniendo en cuenta aspectos como recomendaciones del fabricante, recomendaciones del laboratorio de calibración que efectúe las mismas, resultados de las verificaciones periódicas, amplitud y severidad de uso, condiciones ambientales, exactitud buscada en la medida, etc. Para el establecimiento de este programa podrá tomar como base las recomendaciones contenidas en la norma UNE EN 30012-1 o su equivalente ISO 10012-1¹.

El programa de calibraciones y verificaciones periódicas quedará reflejado en un procedimiento, así como los criterios aplicados a la hora de establecer el mismo. La calibración se efectuará por un laboratorio legalmente acreditado.

1. Esta norma se encuentra anulada y sustituida por la UNE-EN-ISO 10012:2003

Se debe distinguir entre calibraciones y verificaciones. En cuanto a la calibración, esta guía de seguridad tiene la finalidad de aclarar conceptos y facilitar la elección, por parte de los titulares de las instalaciones radiactivas, de los organismos adecuados para realizarlas, así como del tipo calibración que deben aplicar a sus monitores. Respecto a la verificación, esta guía proporcionará los criterios mínimos para lograr establecer una metodología adecuada y común para los diferentes tipos de instalaciones radiactivas. De esta manera, se dispondrá de un documento que sirva como partida para poder establecer sus procedimientos de calibración y verificación de los monitores de radiación y/o contaminación.

Por otra parte, es necesario destacar que las metodologías recomendadas en esta guía son las más habituales que se utilizan en las instalaciones radiactivas, servicios de protección radiológica y organismos reguladores, considerándose igualmente aceptables los restantes métodos que sean presentados por los titulares de las instalaciones radiactivas y evaluados como adecuados por el CSN con la documentación de autorización.

1. Objeto y ámbito de aplicación.

1.1. Objeto.

El Objeto de esta guía es proporcionar recomendaciones y criterios para la elección adecuada, tanto de la calibración como de la metodología de las verificaciones a implantar. Así mismo, proporciona asesoramiento para la selección de los instrumentos de radioprotección adecuados por parte de los titulares de las instalaciones radiactivas.

En esta guía se incluyen:

- Información sobre los laboratorios acreditados y los laboratorios certificados para la calibración de los instrumentos de radioprotección.
- Los criterios para la elección del método de calibración más adecuado para cada tipo de instrumento de radioprotección e instalación radiactiva.
- Recomendaciones para el uso de los datos obtenidos en los certificados de calibración.
- Recomendaciones para el establecimiento de una metodología adecuada para la verificación.
- Recomendaciones para la elaboración de un procedimiento de calibración y verificación.
- Los datos a incluir en el registro de las verificaciones.
- Recomendaciones para la utilización de los resultados obtenidos en las verificaciones.
- Características de los instrumentos de radioprotección.
- Aspectos sobre los que el Consejo de Seguridad Nuclear se basa para informar favorablemente la autorización.

Con esta guía se pretende proporcionar indicaciones generales para el desarrollo de estas actividades, con la intención de que cada instalación adapte los criterios aquí expuestos a sus propias necesidades.

1.2. Ámbito de aplicación.

La presente guía es de aplicación en cuanto al establecimiento de los criterios aplicables para la elección de una calibración apropiada y la implantación de una metodología adecuada para las verificaciones, con el objetivo de asegurar el correcto funcionamiento de la instrumentación de radioprotección perteneciente a las instalaciones radiactivas.

Esta guía no es de aplicación a las pruebas que se realizan con carácter previo a la comercialización y puesta en servicio de la instrumentación, que deben ser llevadas a cabo por las empresas fabricantes de la misma.

Los dosímetros de lectura directa entran en el ámbito de esta guía, por lo que las instalaciones radiactivas donde se utilicen dichos dispositivos pueden seguir las recomendaciones indicadas en la misma para establecer los criterios específicos en el procedimiento de calibración y verificación, que será evaluado por el CSN.

Esta guía tiene en cuenta las recomendaciones nacionales e internacionales que existen en el momento de su redacción, pero todas las partes interesadas en los aspectos de la verificación y calibración de equipamientos de radioprotección necesitan mantenerse en “el estado del arte” debido a la constante innovación tecnológica.

2. Definiciones.

Dentro del contexto de esta guía, los términos siguientes se definen como sigue:

Instrumentos de radioprotección: instrumentos empleados para la medida y/o detección de radiación y/o contaminación, utilizados en las instalaciones radiactivas. Nombrados también como equipos, equipamiento, monitores, medidores, detectores, etc.

Calibración: conjunto de operaciones efectuadas por laboratorios de calibración, mediante las que se pueden establecer, en condiciones específicas, la relación entre los valores indicados por un instrumento o un sistema de medida, o los valores representados por una medida material, y los correspondientes valores conocidos de un patrón de referencia. Como resultado se emite un certificado que incluye, entre otros datos, incertidumbres, factores de calibración y coeficientes de conversión.

Verificación: conjunto de operaciones efectuadas para comparar las medidas proporcionadas por el instrumento con:

- a) Las de un equipo calibrado y de calidad metrológica igual o superior al equipo a verificar.
- b) Los valores de un patrón conocido, con el fin de confirmar que el equipo mide con un error menor al especificado por el fabricante o menor del requerido para la realización de un determinado trabajo.

Fuente de referencia: fuente radiactiva certificada o conocida (con medida tomada inicialmente), o equipo emisor de radiación que servirá como patrón interno en el proceso de verificación.

Laboratorio de calibración acreditado: laboratorios que garantizan la trazabilidad y fiabilidad de los resultados de las calibraciones al haber sido acreditados por un organismo nacional de acreditación en la Norma internacional “Requisitos generales relativos a la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración (ISO/IEC 17025)” o que dispongan de acreditación internacional (Anexo A, sección A.3. de la norma nombrada) emitida por el BIMP (Oficina Internacional de Pesas y Medidas), EURAMET, etc.

3. Consideraciones generales.

El objetivo de las calibraciones y verificaciones es comprobar el funcionamiento de la instrumentación de radioprotección y después determinar si es correcto y cumple para la función que fue designado.

Las calibraciones y las verificaciones son procesos que no son equivalentes, pero sí complementarios. Tanto los procedimientos como las condiciones de ambos procesos son diferentes. Con carácter previo a la adquisición, los fabricantes de este tipo de equipamiento realizan una calibración anterior a la venta, que puede ser electrónica y/o frente a fuentes radiactivas. A la hora de adquirir un instrumento de radioprotección es necesario asegurarse de que la calibración en origen se ha realizado, como mínimo, frente a fuentes radiactivas y a diferentes escalas de medida. Esto permitirá al equipo mantener la periodicidad de calibración establecida en el procedimiento de la instalación.

A partir de este momento es cuando la aplicación de esta guía proporciona los medios adecuados para facilitar todos los procesos relacionados con la calibración y verificación.

El primer paso de este proceso, que es uno de los más importantes, comienza con la elección adecuada del instrumento de radioprotección a adquirir, teniendo en cuenta el tipo de aplicación para la que vaya a ser destinado. Entre otros parámetros (que se desarrollan más ampliamente en el anexo I) habrá que considerar las siguientes características:

- Los monitores deben medir en unidades del sistema internacional.
- Tipo de radiación detectada.
- Rango de energía/Respuesta de energía
- Rango de medida.
- Tiempo de respuesta.
- Respuesta angular.

El diseño y características de la instrumentación, deben cumplir con los requisitos establecidos en las normas IEC 60846 (Medidores y/o monitores de -tasa de- equivalente de dosis ambiental y/o direccional para la detección de radiación beta, X y gamma), IEC 60325 (Medidores y monitores de contaminación alfa, beta y alfa/beta), IEC 61005 (Medidores y/o monitores de tasa de dosis equivalente ambiental de neutrones) e IEC 61526 (Dosímetros individuales de lectura directa de dosis equivalente y/o de tasa de dosis equivalente).

En el caso de instalaciones (por ejemplo, laboratorios) donde se trabaje con un conjunto variado de radionucleidos y que abarque diferentes tipos de radiación y diferentes energías, se deberá disponer de la suficiente instrumentación que permita una adecuada detección y medida de todos ellos.

En el caso de instrumentación con unidades de medida en cuentas por segundo (cps) se debe disponer del dato de sensibilidad cps/ μ Sv/h para radiación o coeficientes de calibración (“coeficiente de conversión”) para obtener la actividad superficial (Bq/cm²) de un radionucleido dado.

Una vez seleccionado el instrumento correcto de radioprotección, éste debe seguir el procedimiento de calibración y verificación establecido en la instalación. Para la elaboración de este procedimiento hay que tener en cuenta las recomendaciones del organismo regulador y del fabricante, recomendaciones del laboratorio de calibración que efectúe las mismas, resultados de las verificaciones periódicas, amplitud y severidad de utilización, las condiciones de uso (campo, taller, laboratorio, etc.), exactitud buscada en la medida, riesgo de la práctica, tipo de radiación, fuente de referencia, etc.

3.1. Calibración en un laboratorio acreditado.

Para la elección de una adecuada calibración en un laboratorio acreditado se deben tener en cuenta los siguientes factores:

- El laboratorio de calibración debe estar acreditado en la Norma ISO/IEC 17025 o equivalente, o disponer de “acreditación supranacional” (como, por ejemplo, la emitida por la Oficina Internacional de Pesos y Medidas – BIMP). Para saber si un laboratorio dispone de acreditación y que alcance tiene, se puede acudir a la página web de ENAC (Entidad Nacional de Acreditación en España) que dispone de un buscador de entidades acreditadas o a ILAC (Organización Internacional para Organismos de Acreditación), en caso de necesitar información sobre laboratorios acreditados de otras naciones.
- El laboratorio de calibración dispondrá de alguna de las fuentes radiactivas de referencia (gamma, beta, neutrones y fuentes de referencia para contaminación) y/o calidades de haces de rayos X.
- Elección del radioisótopo o calidad de haz de rayos X igual a la principal fuente radiactiva/equipo emisor de radiación presente en la instalación (en caso de disponer de una fuente radiactiva de ¹³⁷Cs se deberá seleccionar la calibración en ese radioisótopo, y en caso de no disponer los laboratorios acreditados de los radioisótopos o calidades de haces de rayos X necesarios, se elegirá el tipo y la energía de radiación más próxima al de interés en la instalación). Por ello, resulta indispensable conocer con antelación la relación de radioisótopos con los que trabajan en cada uno de los laboratorios de calibración. Cabe indicar que para los equipos diseñados bajo las normas IEC y para medida de $\dot{H}^*(10)$, en caso de calibrar frente a una fuente encapsulada de ¹³⁷Cs, si la respuesta del monitor está dentro de tolerancias, se puede afirmar con cierta seguridad que lo será también para el rango de energía para el que ha sido diseñado.

En algún equipamiento de radioprotección podría suceder que, debido a la actividad de la fuente, se supere el rango de medida del equipo si este es muy corto y se deba usar otro radioisótopo que no sea el mismo que se usa mayoritariamente en la instalación o del mismo rango de energía.

- Seleccionar calibraciones para los rangos o escalas de medida con presencia o potencial presencia en la instalación. En algunos laboratorios se solicita seleccionar dicha característica. En caso de no disponer de esta información, se puede calibrar en el último tercio de escala.
- Seleccionar calibraciones para tasa de dosis y/o dosis acumulada. En los laboratorios se puede optar por elegir tasa de dosis o ambas opciones.

Una vez obtenido el certificado de calibración, el titular de la instalación deberá analizar los resultados para tener en cuenta las desviaciones y/o eficiencias del monitor a la hora de medir tasa de dosis equivalente ambiental $\dot{H}^*(10)$, tasa de dosis equivalente direccional $\dot{H}'(0,07)$ y/o contaminación superficial. En cuanto a tasa de dosis equivalente ambiental y direccional, la variación de la respuesta del equipo no debería superar el -15% y +22% (factor de calibración 0,85 y 1,22) para radiación debida a partículas beta y fotones, y -17% y +25% (factor de calibración 0,83 y 1,25) para neutrones, del valor convencionalmente verdadero establecido por el laboratorio, y si es así, habrá que prestar atención al comportamiento del equipo y tomar las acciones oportunas (comprobar anteriores calibraciones para comparar con la desviación inicial, mandar a reparar al fabricante, seguimiento periódico, disminución de los periodos de calibración, aumento de la periodicidad en verificación...). Si se supera el 40% se debe enviar el monitor al fabricante a reparar o darlo de baja. Para monitores de contaminación, la respuesta respecto a la tasa de emisión superficial no debería diferir en más de un 20% (conjunto de detección/monitor más sonda) -25% (monitor de contaminación) del valor fijado por el fabricante para el radionucleido especificado y en las mismas condiciones de uso.

Los valores respecto al porcentaje de desviación están establecidos en las normas UNE-EN 60846, UNE-EN 60325 y UNE-EN 61005.

Para establecer la periodicidad de la calibración hay que tener en cuenta una amplia diversidad de factores, entre los que se pueden destacar los siguientes:

- Recomendaciones del fabricante.
- Condiciones ambientales de uso.
- Riesgo radiológico asociado al tipo de trabajo.
- Lugares de uso del equipo (laboratorio, fábricas, campo...).
- Alcance de uso (vigilancia radiológica ambiental, detectar contaminación, altas radiológicas hospitalarias...).
- Intensidad de uso.
- Tasas de dosis máximas a cuantificar (desde instalaciones con valores de unidades de $\mu\text{Sv/h}$ hasta instalaciones donde se pueden llegar a mSv/h o valores superiores).
- Fiabilidad de la verificación periódica.

En la evaluación de los procedimientos de calibración y verificación llevada a cabo en el CSN, se comprueban los periodos establecidos y se requiere en caso necesario su modificación. Por ejemplo, en el caso de monitores usados como equipo de referencia

(denominados normalmente como “equipo patrón” en las instalaciones radiactivas) en instalaciones con riesgo radiológico “alto” como gammagrafía, la periodicidad de calibración recomendada debe ser reducida (uno o dos años); en instalaciones con riesgo radiológico muy bajo, poco uso, y tasas de dosis bajas, el periodo de calibración puede ser más amplio (cuatro o seis años). En el caso de equipamiento usado para búsqueda de fuentes, estados de fuente fuera/fuente dentro (braquiterapia de alta tasa), comprobación de acelerador irradiando o parado, etc., sólo es necesaria la calibración en origen y una verificación funcional.

Hay casos muy específicos como podría ser un laboratorio donde se usa ^{14}C no encapsulado. En este tipo de instalación y teniendo en cuenta la baja eficiencia de los monitores de contaminación para el ^{14}C , si se aplican procedimientos de vigilancia radiológica mediante frotis y se dispone de un adecuado procedimiento de verificación (con baja periodicidad y con disponibilidad de fuente encapsulada de ^{14}C , la calibración podría usarse únicamente en caso de que las verificaciones resulten en desviaciones por encima de los valores establecidos, o incluso, prescindir de la misma.

Por lo tanto, aunque se pueden agrupar los requisitos de periodicidad por tipo de instalación (gammagrafía, control de procesos, etc.), en muchas ocasiones hay que usar criterios específicos para cada tipo de instalación.

Cabe destacar que un instrumento de radioprotección calibrado asume la propiedad de ser trazable metrológicamente a una referencia nacional y/o internacional y con un grado de incertidumbre que permite al usuario determinar ésta, en las medidas que con él realice. Es necesario aclarar que en el proceso de calibración no se ajusta el equipamiento, siendo sólo el fabricante el que puede llevar a cabo dicha operación. En algunos equipos se permite un ajuste externo a realizar por el usuario y especificado en el manual, sobre todo en equipos de medida de la contaminación, en los cuales se pueden actualizar los factores de calibración.

3.2 Calibración en un laboratorio certificado.

Existen a nivel nacional, pero sobre todo a nivel internacional, laboratorios de metrología para las radiaciones ionizantes (en la mayoría de los casos asociados a fabricantes), que sin estar acreditados en la Norma ISO/IEC 17025, están especializados en la realización de calibraciones “certificadas”. Los criterios generales de trabajo de estos laboratorios se basan en la norma ISO/IEC 17025 (o en la norma ANSI/NCSL-Z-540.3), disponen de certificación de sus sistemas de gestión de calidad (ISO 9001) en calibración de instrumentos de medida de radiaciones ionizantes, certificados de conformidad de laboratorios metrológicos nacionales, etc.

Estos laboratorios disponen de una instalación radiactiva con la autorización para la calibración de monitores de radiación, patrones referenciados a patrones primarios (con certificado de trazabilidad metrológica a patrón primario que asegura la trazabilidad posterior y disminuye los errores del proceso) y personal con licencia y formación. En algunos casos son inspeccionados por organismos de metrología de sus naciones o regiones para certificar que cumplen con ciertos criterios dando seguridad al consumidor de dichos servicios.

Además, calibran a diferentes escalas de medida, desde tasas de dosis muy bajas a tasas de dosis altas. Este aspecto es de importancia, porque sólo este tipo de laboratorios junto con los acreditados disponen de las fuentes y metodologías necesarias para poder calibrar en todo o en la mayor parte del rango de medida de la instrumentación. Estas fuentes radiactivas también corresponden al tipo de radioisótopo recomendado por las normas de calidad para la realización de algunas calibraciones.

Los certificados emitidos por estos laboratorios no pueden utilizarse en sustitución de las calibraciones acreditadas establecidas en el programa de calibración de la instalación.

3.3 Verificación.

El proceso de la verificación debe llevarse a cabo mediante un método apropiado, tal y como se describe en el apartado 4. Como resultado de esta actividad, se deben generar una serie de documentos inherentes al proceso e imprescindibles para el control posterior de la instrumentación de radioprotección. Para la elaboración de esta documentación con los resultados de la verificación se incluyen en los anexos II, III, IV, V, VI y VII de la presente guía, unos modelos en función del tipo de monitor y fuente de referencia.

Estas pruebas garantizan que las medidas realizadas con los instrumentos de radioprotección en las actividades rutinarias de la instalación, se puedan aceptar como valores válidos y permiten conocer si éstos sufren algún desperfecto por desgaste, envejecimiento, mal mantenimiento, golpes, ambientes extremos, etc. Aseguran también un conocimiento aproximado de la desviación del monitor respecto de los valores obtenidos en la calibración y que el instrumento sigue midiendo de una manera estable.

El personal técnico que realice o supervise las pruebas de verificación debe disponer de una formación adecuada en materia de protección radiológica. La toma de las medidas debe ser realizada por personal técnico que conozca el procedimiento de verificación establecido en la instalación y disponga de un adecuado conocimiento en el uso del instrumento a verificar (las características principales como geometría del detector, fondo radiológico ambiental medido por el mismo, unidades de medida, escala de medida, etc.). La experiencia y familiaridad que tenga el personal técnico con el instrumento aporta fiabilidad al proceso de verificación.

Por otra parte, es indispensable disponer de los medios materiales necesarios y adecuados para efectuar las medidas. A tal efecto, antes de realizar una verificación, deben conocerse las características de la fuente de referencia sobre la que se va a llevar a cabo la verificación y disponer del material necesario para asegurar la reproducibilidad y repetibilidad del proceso. En este sentido, es muy importante establecer desde el principio unas pautas que garanticen que la toma de medidas se hace en igualdad de condiciones entre una verificación y otra, como por ejemplo el establecimiento de las distancias respecto a la fuente a las cuales se va a medir o realizarlo siempre en el mismo lugar para evitar diferencias en el fondo radiológico ambiental. Todo ello con el objetivo de definir la dotación de medios que resulte más apropiada para llevar a cabo la verificación

Si durante el proceso pudiera haber riesgo radiológico, se debe aplicar el criterio ALARA, para mantener tan bajas como sean razonablemente posible las dosis de radiación a las que se van a exponer el personal. Así, por ejemplo, cuando la prueba se realice sobre fuentes de referencia con altos valores de actividad, es imprescindible la utilización de

herramientas que permitan tomar las medidas a distancia, de forma que se consiga proteger al personal técnico responsable. Por otra parte, la manipulación de las fuentes de referencia debe realizarse con cuidado para evitar daños o desperfectos durante la realización de la verificación, tanto en las mismas, como en los equipos o recipientes que las puedan contener.

Como medida de protección radiológica, si durante el proceso puede darse el riesgo de contaminación, debe manejarse la fuente radiactiva como si esta estuviera realmente contaminada, utilizando equipamiento de radioprotección, tales como guantes, y herramientas que permitan una manipulación a distancia, evitando de este modo, siempre que sea posible, el contacto directo con la fuente.

En cualquier caso, las verificaciones deben ser llevadas a cabo por trabajadores expuestos a las radiaciones ionizantes, que estén sometidos al control dosimétrico reglamentario.

En caso de que exista la sospecha de que el monitor sufra algún deterioro o daño, o haya dado un valor inesperado, se deberá realizar una verificación para determinar su estado.

4. Métodos de verificación.

Existen distintos métodos de verificación. En esta Guía se detallan únicamente los métodos de verificación que se vienen utilizando con mayor frecuencia en las instalaciones radiactivas, Servicios de Protección Radiológica (SPR) y Unidades Técnicas de Protección Radiológica (UTPR).

Las UTPR y SPR que realizan verificaciones, disponen de los medios técnicos y humanos, así como de procedimientos específicos para dicha tarea.

En el caso de la verificación realizada internamente en una instalación radiactiva, el procedimiento concreto que se debe aplicar en cada caso, depende de la fuente de referencia disponible. Es primordial definir cuál es la fuente radiactiva o equipo emisor de rayos X que servirá como “patrón interno” de referencia en la instalación.

Existen instalaciones radiactivas (como comercializadoras o empresas de asistencia técnica) que no poseen fuentes radiactivas o equipos emisores de radiaciones ionizantes, o que, poseyéndolas, no disponen de las características suficientes para poder verificar la instrumentación. En tales casos, se podrá acudir a una UTPR, adquirir fuentes radiactivas exentas, disminuir los periodos de calibración, solicitar al CSN la autorización para disponer de fuentes no exentas para verificación, etc. También se pueden utilizar las fuentes radiactivas o equipos emisores de rayos X de instalaciones radiactivas clientes, siempre previo acuerdo escrito con el titular. Otra opción sería el uso de material radiactivo de origen natural que esté presente en la instalación, como en el caso de instalaciones radiactivas situadas en centros de investigación y/o de docencia. Un factor importante a tener en cuenta a la hora de establecer la verificación y su periodicidad, es el riesgo de la instalación radiactiva. En aquellas con muy bajo riesgo radiológico se pueden seguir criterios más laxos.

Para aquella instrumentación de radioprotección de posicionamiento fijo, como la de aceleradores en instalaciones médicas o en salas de braquiterapia de alta tasa, hay que tener en cuenta que la finalidad es saber si la fuente está fuera del equipo o en su interior o si el equipo está emitiendo radiación o no. En el caso de los monitores que se usan para

encontrar fuentes, como por ejemplo semillas de I-125, no se necesita una medida exacta. La verificación en estos casos consiste en saber si son funcionales con una prueba sencilla de mide\ no mide, con las consideraciones pertinentes respecto al valor esperado. En todo caso, la estabilidad de la respuesta del instrumento puede ser comprobada al poder reproducir medidas con la misma fuente de referencia y la misma geometría.

En el caso de los dosímetros de lectura directa, hay que tener en cuenta su finalidad, medir dosis personal acumulada, $H_p(10)$ y/o $H_p(0.07)$. Se deberían verificar las dosis acumuladas por periodos de tiempo.

Los procedimientos de calibración y verificación son evaluados en el proceso previo a la autorización de una instalación radiactiva, por lo que éstos pueden ser valorados en función del riesgo y necesidades de la misma e implementar criterios diferentes.

4.1. Inspección visual del equipamiento de radioprotección.

Antes de realizar la verificación debe efectuarse una inspección visual del instrumento de radioprotección con el objetivo de detectar posibles defectos exteriores o malfuncionamientos que comprometan la fiabilidad y seguridad de la medida, como degradación de materiales (conexiones, cableados, baterías, interruptores), daños físicos visibles en pantallas y zonas de detección, obstrucciones de agujas en instrumentos analógicos, estado de la lámina de la ventana en detectores beta/alfa, señales luminosas y/o acústicas, funcionamiento del selector de escalas, etc. Estas operaciones se pueden incluir en los formatos de verificación con casillas de chequeo rápido. Igualmente se confirmará que la fuente de referencia no presenta desperfectos. Se comprobará también el estado de las baterías, asegurando que tienen suficiente carga.

Para aquellos equipos analógicos, tipo detector Geiger Müller, se deberá comprobar el ajuste de cero. En caso de estar desajustado, se deberá enviar al suministrador y/o fabricante a reparar.

En las instalaciones donde los equipos puedan estar contaminados, será necesario confirmar la ausencia de ésta.

Si se observa algún defecto, se debe anotar el mismo en el registro de verificación. En caso de que el daño observado sea de tal magnitud que pudiera llegar a afectar a la toma de medidas, se constatará mediante la realización de las mismas, y se procederá a evaluar la necesidad de reparación o recambio.

4.2. Prueba de la verificación.

4.2.1. Descripción.

La verificación consiste en la toma de una serie de medidas, ya sean de tasa de dosis ($\mu\text{Sv/h}$), contaminación superficial (Bq/cm^2 o Ci/cm^2) o actividad (cps), manteniendo siempre la misma geometría entre equipo y fuente de referencia, y la distancia entre ambos. Con los resultados obtenidos se deberá calcular posteriormente los parámetros operativos (como la eficiencia en el caso de medida de actividad y/o contaminación) así como la desviación del monitor respecto al valor de referencia que determinemos. El

establecimiento de los valores de referencia y la verificación, se deben realizar tras la calibración en laboratorio o tras la adquisición del equipamiento.

Hay que resaltar que, en relación a la verificación de los monitores de contaminación, lo que se comprueba a la vez que se verifica, es que la eficiencia del monitor para uno o varios radioisótopos dados, se mantiene dentro de los rangos determinados por el fabricante y/o por los calculados en el inicio de su uso en la propia instalación.

4.2.2. Fuente de referencia.

Para realizar la verificación es fundamental definir qué fuente de referencia usaremos durante el proceso. Se debe elegir aquella que nos dé la medida más estable posible. El posicionamiento respecto al monitor debe asegurar la repetibilidad y reproducibilidad del proceso, y con una geometría y una distancia tal que se favorezca la medición a la vez que se asegura la seguridad radiológica del personal técnico responsable.

En el caso de uso de fuentes radiactivas como fuente de referencia, es importante que las mismas dispongan de un certificado de actividad. De esta manera no sólo nos aseguramos la actividad de la fuente, sino también del error asociado a ese valor o la trazabilidad. También pueden dar información sobre la geometría de la tasa de emisión, que puede ser 2π o 4π , e incluso de la variación de la eficiencia debido a la retrodispersión (partículas detectadas por el monitor que en el momento de la emisión disponen de una dirección opuesta al mismo, pero al contactar con un material se redirigen hacia el detector). En caso de no disponer del certificado, se puede utilizar como medida de constancia teniendo en cuenta el decaimiento de la fuente.

En determinadas instalaciones radiactivas se dispone de fuentes de referencia muy adecuadas para llevar a cabo el proceso.

En las instalaciones con equipos medidores de densidad y humedad de suelos, la fuente radiactiva encapsulada de ^{137}Cs tiene una actividad conocida, suficiente y con un periodo de decaimiento a largo plazo. Esta situación se repite en aquellas instalaciones que dispongan de fuentes radiactivas encapsuladas que compartan las características mencionadas anteriormente. A pesar de su “largo” periodo de decaimiento, el ^{137}Cs decae alrededor de un 2% por año, por lo que es un dato que en función del tipo de instalación y la metodología de verificación a aplicar, puede ser de una importancia significativa. A continuación, se muestra la fórmula para aplicar el factor de corrección por decaimiento:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

A: Actividad absoluta

A_0 : Actividad inicial de la fuente

λ : Constante de semidesintegración

t: Tiempo transcurrido desde la fecha de calibración en origen de la fuente hasta el momento de su contaje

En caso de disponer de una fuente radiactiva encapsulada con un periodo de semidesintegración “corto”, hay que tener en cuenta en los cálculos el decaimiento radiactivo de la fuente.

Si se dispone de una fuente radiactiva encapsulada gamma con suficiente actividad, se puede utilizar la constante específica gamma (Γ). Esta constante, característica para cada radionucleido, indica el valor de la tasa de dosis en Sv/h que genera una fuente puntual a un metro de distancia por unidad de actividad. En esta metodología hay que tener en cuenta variables de cierta importancia, como las debidas a la curva de eficiencia de detección frente a energías, errores debidos a una distancia no exacta, dispersión, error de actividad de la fuente, etc. Como ejemplo, a distancias pequeñas y dependiendo de las dimensiones de la fuente radiactiva, las desviaciones asociadas a la hipótesis de fuente puntual pueden aumentar. La complejidad de esta metodología hace que sea uno de los procesos de verificación menos usados en instalaciones radiactivas.

Por otra parte, es preciso considerar que el dato que se muestra en la pantalla de un monitor depende del radioisótopo. Algunos monitores (generalmente de contaminación) permiten seleccionar el radioisótopo al tener una librería preconfigurada, por lo que es crucial, en ese caso, seleccionar el radioisótopo que se corresponda con la fuente de referencia que se esté empleando. Lo habitual en los monitores para medida de tasa de dosis es que aplique únicamente los factores de conversión del ^{137}Cs .

En instalaciones con equipos emisores de rayos X de cierta potencia e intensidad (rayos X industriales, aceleradores, etc.) se dispone de una fuente de referencia estable y cuyas características de disparo pueden ser ajustadas y reproducidas por el personal técnico a las necesidades del proceso de verificación. En el caso de equipos emisores de rayos X que se encuentran en cabina, surge el inconveniente de la colocación y distancia respecto al monitor, siendo necesario definir si en alguna posición y con determinadas características de disparo el instrumento de radioprotección toma medidas que sean útiles o se satura impidiendo la implementación de una adecuada verificación. En algunos laboratorios con este tipo de equipos, de baja intensidad y con haz muy colimado, las posibilidades prácticas de definir un punto para tomas de medidas son de alta dificultad.

En las instalaciones médicas que no dispongan de fuentes radiactivas encapsuladas o equipos emisores de rayos X, pero usen fuentes radiactivas no encapsuladas, éstas pueden ser utilizadas como fuente de referencia. Por ejemplo, las actividades de los radioisótopos recibidas en instalaciones de medicina nuclear suelen ser similares o variar en poca actividad en los diferentes envíos, así como las monodosis que se usan tanto para tratamiento como para diagnóstico. Tienen una actividad conocida y suficiente para la finalidad de una verificación. También se puede establecer un procedimiento con una "contaminación controlada" (actividad de un radioisótopo conocida a través del activímetro) y realizar las medidas y cálculos oportunos. En instalaciones de laboratorios donde se usen radioisótopos no encapsulados se puede proceder de la misma manera.

En las instalaciones donde sea necesaria la medida de neutrones, surgen también ciertas especificidades y complicaciones asociadas a la radiación neutrónica. Si se dispone de una fuente radiactiva encapsulada con un período de desintegración largo (Am-241/Be , de 432,2 años) se dispondría de una fuente de referencia adecuada. Para fuentes encapsuladas con periodos de decaimientos "cortos", se podrían definir fechas de verificación que coincidan con actividades conocidas en cada periodo de funcionamiento de esas fuentes, tener en cuenta la relación entre la radiación neutrónica y gamma que se definen en los certificados de las fuentes, etc. Si la verificación se va a hacer por comparación con un monitor de neutrones de distinta marca y/o modelo es fundamental conocer el centro de referencia para la medida del detector.

Algunas instalaciones con fuentes radiactivas encapsuladas beta, como en las de control de procesos, la verificación frente a la radiación beta es compleja. En situación normal la radiación que se mide es secundaria (rayos X) debido a la interacción de las partículas Beta con el “blindaje” del equipo. En este tipo de instalaciones la posibilidad de medir tasa de dosis debido a radiación beta sólo es posible en caso de mantenimientos donde se extrae la carcasa del equipo y con obturador abierto, si se daña la misma, se aproxima el monitor lo máximo posible al obturador abierto en funcionamiento, etc. Por lo tanto, las verificaciones conllevan mayor complejidad y se deberían alternar calibraciones con fuente gamma y con fuente beta.

Ya se ha comentado en el apartado 3 las posibilidades existentes para aquellas instalaciones que no dispongan de una fuente de referencia, necesaria para llevar a cabo una verificación que cumpla con los requisitos mínimos.

4.2.3. Repetibilidad, reproducibilidad, geometría, distancia.

Asegurando los criterios de repetibilidad, reproducibilidad, geometría y distancia, obtenemos:

Repetibilidad: se garantiza que el proceso se realice siempre en las mismas condiciones.

Reproducibilidad: se garantiza que, independientemente del personal técnico que realice el proceso, éste es realizado de la misma manera.

Geometría y distancia: se debe disponer de los medios necesarios que aseguren que los posicionamientos de los materiales y equipos para la verificación mantienen las mismas condiciones cada vez que se hace una verificación. En el caso de verificación en tasa de dosis, distancias muy próximas entre la fuente de referencia y la instrumentación pueden provocar que errores de posicionamiento pequeños den errores de medida considerables en fuentes con poca actividad. Para las fuentes con una actividad mayor, pequeños errores de posicionamiento a distancia, dan desviaciones de medida más pequeñas. En el caso de comparación con un monitor de referencia, lo idóneo es disponer de fuentes con cierta actividad para poder posicionar el instrumento a tal distancia que aseguremos la medición con la misma geometría, teniendo en cuenta también la posición del detector dentro de los equipos.

En el caso de verificaciones en contaminación, la distancia debe ser pequeña, de pocos milímetros (entre 5 y 10 mm).

En relación a la colocación del instrumento, es necesario conocer la geometría del detector del mismo para que el posicionamiento sea óptimo, que es un aspecto relacionado también con la dependencia angular (respuesta del detector en función del ángulo de incidencia de la radiación).

4.2.4. Toma de medidas.

Esta fase es especialmente relevante en el método de verificación, ya que determina la fiabilidad del resultado obtenido.

La periodicidad recomendada con la que deben realizarse las verificaciones es semestral y tras calibración o reparación. La periodicidad puede modificarse en función de los resultados obtenidos y otros factores como el tipo de riesgo presente en la instalación,

periodicidad de uso, exactitud buscada en la medida, etc. El periodo máximo establecido no debe superar el año.

Se debe asegurar la ausencia de cualquier otra fuente radiactiva que distorsione la lectura del monitor.

El número de medidas realizadas debe ser tal que ayude a disminuir los posibles errores cometidos durante el proceso de posicionamiento y las variaciones en las medidas que son intrínsecas al proceso. Se necesitarían entre 5 y 10 medidas por cada uno de ellos.

Es de mucha utilidad incluir más de un punto de medida, ya que de esa manera podemos conocer el funcionamiento del monitor a diferentes rangos de escala. Igualmente, si en la instalación se trabaja con más de una fuente de referencia, es muy recomendable la verificación con cada una de ellas.

Otro factor a tener en consideración, es la dispersión, que aumenta con la distancia de separación entre la fuente de referencia y el instrumento. En otras metodologías, como la comparación de medidas con un equipo de referencia, no es un factor a tener en cuenta.

Una estrategia para reducir la dispersión de la radiación y aproximarse a lo que es una fuente puntual, es introducir la fuente en un bote blindado con un solo orificio de salida sin blindaje de forma que el haz de radiación sea más colimado.

Resulta importante si se comparan monitores, el tamaño de sus detectores (volumen activo). En función del mismo, hay una distancia mínima a la que se ha de situar la fuente para que el detector vea un haz uniforme. Por ello se debe elegir una distancia de verificación tal que nos sirva para ambos equipos. Si un detector es grande y la fuente está muy cerca, no es uniformemente irradiado y esto puede dar lugar a un mal resultado en la comparación.

Tras encender el instrumento de radioprotección se debe esperar un tiempo para que la medida del fondo radiológico ambiental sea estable, asegurando una distancia suficiente respecto a la fuente de referencia para evitar su influencia en la medida del mismo. Entre las tomas de medidas también hay que dar un “tiempo de reposo” al instrumento para que vuelva a la medida de fondo antes de volver a situarlo en la posición de verificación. Ese “tiempo de reposo” debe ser suficiente para que las medidas sean estadísticamente independientes.

Téngase también en cuenta, a la hora de anotar la lectura en cada medición que el monitor de radiación en condiciones fijas no ofrece un valor constante (estático), sino que se está produciendo constantemente una fluctuación. Por ejemplo, se puede anotar en cada medición “un valor medio” entre las lecturas reflejadas en la pantalla en un periodo de 10 segundos, tomando éstas cada dos segundos.

En función del tipo de fuente de referencia e instrumento de radioprotección, puede ser necesario, si así lo determina el personal técnico en función de su experiencia, descartar las medidas que sean muy elevadas o muy bajas respecto a la media observada.

Con estos detalles se disminuyen las posibilidades de eventos que puedan falsear las medidas.

El proceso de toma de medidas en la verificación consta de los siguientes pasos:

1. Inspección visual.
2. Posicionamiento del instrumento.
3. Anotación de los valores medidos de fondo radiológico ambiental. Determinar la media aritmética del fondo. Las medidas de fondo se realizarán de manera continua y sólo una vez. La media aritmética de estos valores se aplicará para los resultados de las diferentes fuentes.
4. Colocación de la fuente de referencia en posición de verificación. Uso de medios de radioprotección en caso necesario.
5. Comprobación de geometría y distancia.
6. En caso de equipos emisores de rayos X, selección de las condiciones de disparo.
7. Anotación de los valores obtenidos en las diferentes tandas de medición.
8. Cálculo de la media aritmética de las distintas tandas de medición.
9. Cálculo de la actividad de la fuente radiactiva, en caso necesario.
10. Corrección de los valores medidos en relación al fondo radiactivo.
11. Cálculo de la desviación respecto al valor de referencia determinado y de los parámetros operativos en caso necesario.

Se debe prestar especial atención a las unidades en las que se está midiendo, ya que algunos equipos permiten varias, así como la escala. Muchos equipos permiten cambios de escala de forma que si por ejemplo está activada la opción "x 10" el valor real de la medida es el que muestra la pantalla multiplicado por un factor 10.

Para el cálculo de la eficiencia de un monitor de contaminación, en el anexo VIII se establece una de las metodologías existentes para su cálculo.

4.2.5. Resultados de la verificación.

Esta fase es fundamental para comprobar el estado de la instrumentación respecto a las medidas que se toman con la misma y asegurar que no se desvían en un porcentaje respecto al valor que tomemos como referencia.

Para este proceso es conveniente anotar los siguientes datos:

- Identificación del equipo.
- Fecha.
- Nombre del personal técnico.
- Identificación de la fuente de referencia (para fuentes radiactivas encapsuladas anotar radioisótopo, número de serie, fecha y actividad; para fuentes radiactivas no encapsuladas, radioisótopo, fecha y actividad; y para equipos emisores de rayos X, número de serie, equipo y condiciones de disparo).
- Medidas y desviaciones obtenidas.

A la hora de tratar los datos es necesario establecer los valores de referencia frente a los que vamos a comparar los resultados. Hay opciones diversas en función de las distintas fuentes de referencia e instrumentación disponibles.

En el caso de disponer de varios instrumentos de radioprotección, si uno de los mismos se establece como equipo de referencia y es calibrado periódicamente en un laboratorio de calibración, las medidas obtenidas con los instrumentos no calibrados pueden compararse con la medida obtenida por el de referencia y calcular la desviación respecto a éste último.

De esta manera el equipo de referencia también es verificado, al tener valores periódicos de verificación y poder contrastarlos. En el ámbito de las instalaciones radiactivas esta prueba suele denominarse como intercomparación.

Otra opción es usar los resultados obtenidos y compararlos con el valor inicial obtenido en la primera verificación tras la adquisición del instrumento, y calcular la desviación observada. Como se mencionó en el apartado 4.2.2., en el caso de fuentes radiactivas encapsuladas, habría que tener en cuenta el decaimiento de la fuente, si fuera necesario. Por ello, en ese caso, sucedería que los valores obtenidos serían distintos respecto a la verificación inicial sin que ello implicara una avería o mal funcionamiento del equipo.

Si se dispone de fuentes radiactivas no encapsuladas que se renuevan periódicamente y que suelen mantener la misma actividad, se obtendría un valor de referencia estable en el tiempo y los cálculos serían “sencillos”, comparando los valores obtenidos periódicamente con los tomados como referencia inicial.

Los criterios respecto a los resultados obtenidos deben quedar reflejados en el procedimiento de calibración y verificación.

Se debería tomar como tolerancia para comprobar el estado de un instrumento, una desviación máxima de +/- 20% del valor de referencia. En caso de superarse, y dependiendo del valor, se deberán tomar medidas como aumentar la periodicidad de la verificación, probar a distintas distancias y con distintas fuentes, llevar el instrumento a calibrar o enviarlo a revisar/ reparar o recalibrar por el fabricante.

5. Informe de verificación.

Una vez obtenidos los resultados de la prueba de verificación, se debe emitir un informe que refleje, al menos, los datos obtenidos, personal técnico implicado, fecha, fuente de referencia, equipo de referencia, conclusiones, las acciones que se deban llevar a cabo en caso de obtener resultados no adecuados, etc.

En los anexos II, III, IV, V, VI y VII de esta guía se aportan varios modelos para la toma de datos.

6. Requisitos aplicables a las instalaciones radiactivas para la calibración y la verificación.

Es necesario que toda instalación que lleve a calibrar sus monitores y efectúe pruebas de verificación a la instrumentación de radioprotección, cumpla con los requisitos que se mencionan a continuación.

Se debe establecer un procedimiento técnico (se adjunta modelo en anexo IX) para el desarrollo de las calibraciones y de las pruebas de verificación en el que se contemplen, entre otros, los siguientes criterios:

- Calibración: periodicidad, entidad, fuentes patrón o calidades de haz, criterios de aceptación y acciones a tomar en caso de valores no aceptables.

- Verificación: establecer la fuente de referencia (si es fuente radiactiva, definir características; y si es un equipo emisor de rayos X, definir características y condiciones de disparo), la metodología que utilizan, la periodicidad, la instrumentación de radioprotección disponible en la instalación o al menos los modelos disponibles, personal técnico implicado y tareas asociadas, criterios de aceptación, las acciones a tomar en función de los resultados obtenidos, etc.

Se debe disponer de recursos humanos cualificados y con una formación apropiada en materia de protección radiológica. Es necesario que el personal técnico que realiza la verificación dispongan de la formación adecuada inicial y periódica con una evaluación por parte del supervisor de la instalación radiactiva o jefatura de PR, o por una adecuada calificación de una empresa formadora. Asimismo, es aconsejable que la persona responsable de la protección radiológica de la instalación revise los resultados.

Se debe mantener un registro de las verificaciones realizadas y de los resultados obtenidos, e informar de los mismos al Consejo de Seguridad Nuclear a través de los informes anuales correspondientes.

Se debe desarrollar una sistemática de trabajo que garantice la fiabilidad de los métodos empleados y de las mediciones realizadas.

El personal técnico debe disponer de información suficiente sobre el lugar donde están instaladas o almacenadas las fuentes de referencia sobre las que realizan las verificaciones, así como conocer la utilización concreta de cada una de ellas.

Definir en el procedimiento, en caso necesario, los riesgos asociados a la manipulación de las fuentes de referencia y las medidas de protección necesarias a adoptar durante el proceso.

7. Referencias bibliográficas.

1. Instrucción de 22 de septiembre de 2010 del Consejo de Seguridad Nuclear, IS-28, sobre las especificaciones de funcionamiento de instalaciones radiactivas.
2. Norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2017 “Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración”.
3. Norma UNE-EN 60846-1:2014 “Instrumentación de radioprotección. Medidores y/o monitores de (tasa) dosis equivalente ambiente y/o direccional para las radiaciones beta, X y gamma. Parte 1: Instrumentos de medida y control portátiles para lugares de trabajo y el medioambiente.
4. Norma UNE-EN 60846:2009 “Instrumentación de radioprotección. Medidores y/o monitores de (tasa) dosis equivalente ambiente y/o direccional para las radiaciones beta, X y gamma.
5. Norma UNE-EN 61005:2017 “Instrumentación de radioprotección. Medidores de dosis equivalente ambiental de neutrones (o de tasa de dosis equivalente).
6. Norma UNE-EN 60325:2005 “Instrumentación de radioprotección. Medidores y monitores de contaminación alfa, beta y alfa/beta (energía de las betas > 60 keV)”.
7. Norma UNE-EN 61526:2013 “Instrumentación de radioprotección. Medida de dosis individuales equivalentes Hp (10) y Hp (0,07) para radiaciones X, gamma, neutrónica y beta. Dosímetros individuales de lectura directa de dosis equivalente y/o de tasa de dosis equivalente”.
8. Norma Oficial Mexicana NOM-012-NUCL-2016 “Requisitos y criterios de funcionamiento que deben cumplir los instrumentos de medición de radiación ionizante y los dosímetros de lectura directa”. 2016.
9. IAEA Safety Standards Series No SSG.8 “Radiation safety of gamma, electron and x ray irradiation facilities”. 2019.
10. IAEA General Safety Guide No. GSG-7 “Occupational Radiation Protection”. 2018.
11. IAEA Practical radiation technical manual. Workplace monitoring for radiation and contamination. 2004.
12. IAEA Safety Reports Series No.16 “Calibration of radiation protection monitoring instruments”. 2000.
13. NCR 10 CFR 20 “Standards for protection against radiation”.
14. NCR Library. Questions. 17 Radiation survey instrument calibration and maintenance procedures Texas Department of State Health Services.
15. NRC Docs M11229A690 “Calibration of survey meters and measurements of contamination”. 2011.

16. NRC Docs ML12220A264. "Test and calibration of radiation protection instrumentation". 1984.
17. NRC Docs ML11229A684. "Survey Instruments". 2010.
18. NRC Docs ML11229A691. "Radiation surveys". 2011.
19. NRC Docs ML11229A672. "Radiation detectors". 2010.
20. DOE G 441.1-1C, RADIATION PROTECTION PROGRAMS GUIDE FOR USE WITH Title 10, Code of Federal Regulations, Part 835, Occupational Radiation Protection. 2011.
21. NPL "Good practice guide No.14. "The Examination, Testing and Calibration of Portable Radiation Protection Instruments". Issue 2. 2014.
22. "Necesidades de calibración en el ámbito hospitalario español y en las distintas áreas de aplicación de las radiaciones ionizantes". Foro sobre protección radiológica en el medio hospitalario. Consejo de Seguridad Nuclear, Sociedad Española de Protección Radiológica y Sociedad Española de Física Médica. Rev. 2, diciembre 2002.
23. CSN. Informe CSN/TGE/APRT/0106/1440. "La calibración de los sistemas de detección y medida de la radiación y de la contaminación en España". 2001.
24. ANSI-Z540.3 "Requirements for the Calibration of Measuring and Test Equipment".

Anexo I – Instrumentación de radioprotección.

1. Características básicas de los instrumentos de radioprotección.

Los instrumentos de radioprotección se deben seleccionar en función del tipo y características de la emisión radiactiva principal en la instalación, teniendo en cuenta por lo tanto el tipo de radiación que el equipo puede medir, el rango energético que es capaz de detectar, rango de medida (debería cubrir hasta los potenciales riesgos radiológicos que puedan ocurrir en la instalación), la eficiencia (respuesta en función de la energía y/o radioisótopo), la respuesta angular, magnitud de medida buscada (tasa de dosis equivalente ambiental/direccional para vigilancia radiológica con monitores de radiación o dosis equivalente personal para vigilancia dosimétrica personal en dosímetros de lectura directa). Otras características a tener en cuenta son el tiempo de respuesta, sensibilidad, factor de conversión, geometría de eficiencia (2π o 4π), límite de escala en unidades, saturación, escala logarítmica o lineal y analógica o digital, facilidad de uso, iluminación, audio, respuesta a diferentes ambientes (temperatura, humedad, campos magnéticos, radiofrecuencias, etc.), batería, tamaño, peso, portabilidad, robustez, fiabilidad, utilidad y costes de mantenimiento.

Deben mostrar las medidas en unidades del sistema internacional, tal y como se establece en las normas UNE de instrumentación de radioprotección, así como por el establecimiento de dicha característica desde 1986 en la Unión Europea.

Cada equipo de medida debe ir acompañado de un certificado. La información que debe incluir está establecida en las normas IEC mencionadas en esta guía.

Los instrumentos de radioprotección deben tener una sensibilidad mínima de detección adecuada a las medidas que se pretenden realizar

Se debe considerar también la importancia buscada en la exactitud de la medida. En algunas instalaciones radiactivas es un factor determinante.

Hay que tratar de seleccionar aquel equipo de medida cuya curva de respuesta (eficiencia) respecto a la radiación predominante en la instalación (tipo y energía) sea lo más próxima a la unidad, para así asegurar una medición lo más fidedigna posible.

La respuesta angular es una característica del detector de suma importancia. Nos da la dependencia de la medida en función de la dirección de la radiación incidente. El desconocimiento de dicha característica puede provocar errores significativos en la toma de medidas.

En el caso de los monitores para la medida de la contaminación, los factores de conversión para pasar de cps a Bq/cm² suelen ser proporcionados por el fabricante para un número determinados de radioisótopos. Estos factores pueden volver a ser calculados en la propia instalación tanto para los radioisótopos informados como para los que no (se proporciona una metodología para conversión de cps a Bq/cm² en el anexo VIII).

Otro aspecto de importancia es la geometría de la eficiencia en 2π o 4π . La mayor parte de los fabricantes de monitores para la medida de la contaminación proporcionan el dato de eficiencia de calibración 2π respecto a una fuente plana puntual de referencia.

Si se coloca una fuente puntual en mitad del aire se puede asumir que la mitad de las partículas se dirigirán hacia el plano superior, mientras que la otra mitad se dirigirá hacia el plano inferior. Si colocáramos un detector sobre dicha fuente, el máximo de actividad que se podrá detectar es la mitad de la tasa de desintegración de la fuente (2π). Por ejemplo: los certificados de fuentes suelen dar una tasa de emisión de 2π . Esto significa que la fuente ha sido calibrada basándose únicamente en las partículas emitidas desde una superficie de la fuente. Si introducimos la tasa de emisión 2π en nuestra configuración de calibración en el monitor, obtenemos una calibración 2π para ese monitor. Una calibración de eficiencia 2π del 74% para Sr-90 sería lo mismo que una calibración de eficiencia 4π del 37% para Sr-90.

Este concepto es de suma importancia a la hora de calcular cuantitativamente una contaminación radiactiva superficial (actividad por unidad de área - Bq/cm²), ya que de manera general, con los monitores se obtendrá un valor que debe ser multiplicado por un factor de dos para radioisótopos gamma y α (poca retrodispersión). Para partículas beta el factor podría variar hasta 1,60 debido a la alta retrodispersión de algunas de ellas.

En estos cálculos hay incertidumbres asociadas como la distancia del detector a la fuente, la autoabsorción, la retrodispersión, etc.

El manual de operación del equipo debe estar disponible, puesto que contiene las indicaciones sobre la eficiencia del detector, los factores de conversión, eficiencias, tiempo de respuesta, respuesta angular, etc. En particular, debe conocerse perfectamente la respuesta del equipo a radiaciones de distintas energías y/o radioisótopos (curva de eficiencia de detección para distintas energías).

2. Instrumentación de radioprotección en función del tipo de radiación y/o contaminación.

2.1. Radiación de fotones (Gamma y rayos-X).

Para medir las tasas de dosis de fotones se fabrican detectores con tecnologías variadas, que incluyen cámaras de ionización, tubos Geiger-Müller, contadores proporcionales, detectores de centelleo y semiconductores.

Respecto a instalaciones con equipos de rayos X, hay que diferenciar, principalmente, entre los equipos industriales y médicos. Para los primeros, las tecnologías de los detectores son similares a los apropiados para radiación gamma. En el caso de los equipos de rayos X de uso médico, son fundamentales los parámetros de kilovoltaje e intensidad de voltaje, tiempo de disparo, radiación pulsada o continua, energías bajas en dispersión, energías altas en haz directo o próximo, etc. A pesar de que hay diversas tecnologías de detección como las cámaras de ionización o semiconductores, sí es cierto que pocos tipos de detectores cumplen con todas las características necesarias para un uso general en las diversas condiciones y equipos que se pueden dar en instalaciones médicas. Los detectores de semiconducción pueden cumplir con la mayoría de los requisitos necesarios. En el caso de haces pulsados las cámaras de ionización también presentan sus ventajas.

2.2. Radiación de partículas beta (β).

Para medir la radiación debida a partículas β se utilizan una amplia variedad de detectores, cámaras de ionización de ventana fina, tubos Geiger-Müller de ventana fina, contadores proporcionales y detectores de centelleo.

Muchos medidores de tasa de dosis β se pueden usar también para la medición de la tasa de dosis X y γ . En esos casos, es conveniente recordar usar el dispositivo que suelen incorporar dichos equipos para poder diferenciar la contribución de cada tipo de radiación a la medida.

2.3. Radiación neutrónica.

Los instrumentos para medir la tasa de dosis de neutrones consisten convencionalmente en un sensor de neutrones térmicos en el centro de una esfera o cilindro moderador de polietileno. El sensor central puede ser un contador proporcional o de centelleo, o incluso una cámara de ionización. En geometría cilíndrica es crucial saber que sólo mide bien cuando los neutrones inciden en una dirección determinada, generalmente perpendicular al eje. En otras direcciones hay una pérdida importante de respuesta. También se usan semiconductores.

2.4. Contaminación alfa.

Estos instrumentos, normalmente, disponen de detectores de centelleo, contadores proporcionales, semiconductores (de estado sólido) y Geiger-Müller tipo pancake o con ventana muy fina (su eficiencia de detección puede ser bastante baja y la presencia de radiación beta o gamma puede interferir en el resultado).

2.5. Contaminación β .

Los instrumentos utilizados para medir y detectar la contaminación β en el lugar de trabajo disponen de detectores de tres categorías principales: detectores Geiger-Müller (de ventana fina y de pared delgada, y tipo pancake), contadores proporcionales, y contadores de centelleo. La radiación gamma interfiere con todos los detectores beta y la radiación alfa puede llegar a interferir al utilizar tubos Geiger de ventana fina y en los contadores proporcionales según el espesor de la ventana y capacidad de discriminación.

2.6 Contaminación alfa y β .

Algunos instrumentos están diseñados para responder y discriminar entre la contaminación alfa y β . Estos instrumentos muestran las cuentas alfa y β en canales separados. Una característica fundamental de estos instrumentos es que la contribución de la radiación β al canal alfa debe ser insignificante.

2.7. Contaminación gamma.

Algunos de los radionucleidos emisores de fotones también emiten partículas α o β . En estos casos, en la vigilancia de la contaminación hay que tener en cuenta la presencia de otros tipos de partículas. Para radionucleidos emisores de fotones puros, o donde la componente α o β está atenuada, se pueden emplear las emisiones de fotones para conocer la contaminación.

Las tecnologías utilizadas en este caso, suelen basarse en contadores proporcionales, detectores de centelleo y Geiger-Müller de ventana gruesa (la eficiencia de estos detectores para la contaminación gamma pura es muy baja).

ANEXO II

VERIFICACIÓN DE MONITOR DE RADIACIÓN AMBIENTAL/CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL CON FUENTE RADIATIVA ENCAPSULADA (DECAIMIENTO)

Marca: _____; modelo: _____; n° de serie: _____					
Identificación de la fuente radiactiva: n° de serie, radioisótopo, actividad y fecha a la que corresponde. La fuente radiactiva siempre es la misma. Si la fuente radiactiva cambia, el proceso se debe reiniciar. Distancia fuente-centro referencia del detector.					
Patrón de referencia: Valor esperado. Lectura de referencia inicial, añadiendo decaimiento en caso necesario.					
Este proceso se puede aplicar a un monitor de contaminación, con el cambio a las unidades correspondientes.					
Si la fuente utilizada tiene un $T_{1/2}$ no despreciable, se deberá corregir la última lectura de referencia, R:					
$R_c = R \times e^{(-0.693 t/T_{1/2})}$					
siendo: $T_{1/2}$ el periodo de semidesintegración, en días; t el n° de días desde la fecha de obtención del último valor de referencia hasta la de lectura. Como ejemplo, en los valores de esta tabla suponemos que utilizamos una fuente de ^{22}Na ($T_{1/2} = 951$ días) fabricada el 4-05-10.					
Fecha y Operador	Fondo, valor medio ($\mu\text{Sv/h}$)	Lectura, valor medio ($\mu\text{Sv/h}$)	Lectura neta, Ln ($\mu\text{Sv/h}$)	Lectura de referencia corregida, Rc ($\mu\text{Sv/h}$)	Desviación = $100(\text{Ln}-R_c)/R_c$ (%)
01-05-10	Calibración				
05-05-10 ADG	0,3	70,3	70,0	70,0	Lectura de Referencia = 70
03-11-10 CCD	0,3	66,3	66,0	61,4	7,4
10-05-11 BCD	0,2	55,2	55,0	53,6	2,6
24-10-11 CCD	0,4	48,4	48,0	47,6	0,9
10-05-12 ABC	0,3	45,3	45,0	41,2	9,1
25-10-12 ABB	0,4	38,4	38,0	36,6	3,9
01-05-13	Calibración				
02-05-13 VBC	0,3	30,3	30,0	30,0	Lectura de referencia = 30
02-11-13 FRG	0,4	25,4	25,0	26,3	-5,0

ANEXO III

VERIFICACIÓN DE MONITOR DE RADIACIÓN AMBIENTAL/CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL
CON FUENTE RADIATIVA ENCAPSULADA (SIN DECAIMIENTO)

Marca: _____; modelo: _____; nº de serie: _____				
Identificación de la fuente radiactiva: nº de serie, radioisótopo, actividad y fecha a la que corresponde. Este modelo se puede aplicar cuando la fuente radiactiva se renueva periódicamente (dando la posibilidad de verificar siempre frente a la misma actividad) o cuando el periodo de decaimiento es muy largo. Patrón de referencia: Valor esperado. Lectura de referencia inicial. Distancia fuente-centro referencia del detector. Este proceso se puede aplicar a un monitor de contaminación, con el cambio de unidades correspondiente. Se pueden usar varios radioisótopos para conocer la respuesta del monitor a diferentes energías. Como buena práctica se pueden añadir medidas a distintas distancias.				
Fecha y Operador	Fondo, valor medio (µSv/h)	Lectura, valor medio (µSv/h)	Lectura neta, Ln (µSv/h)	Desviación =100(Ln-R)/R (%)
01-05-10	Calibración			
05-05-10 ADG	0,3	70,3	70,0	Lectura de Referencia, R=70
03-11-10 CCD	0,3	71,3	71,0	1,4
10-05-11 BCD	0,2	69,2	69,0	-1,4
24-10-11 CCD	0,4	68,4	68,0	-2,8
10-05-12 ABC	0,3	71,3	71,0	1,4
25-10-12 ABB	0,4	72,4	72,0	2,8
01-05-13	Calibración			
02-05-13 VBC	0,3	70,3	70,0	Lectura de Referencia, R=70
02-11-13 FRG	0,4	69,4	69,0	-2,80
01-05-14 SRB	0,2	72,2	72,0	-2,8

ANEXO IV

VERIFICACIÓN DEL MONITOR DE RADIACIÓN AMBIENTAL CON MONITOR DE REFERENCIA

Marca: _____; modelo: _____; n° de serie: _____

Identificación de la fuente radiactiva encapsulada/equipo emisor de rayos X: radioisótopo, n° de serie, y actividad a fecha de verificación/modelo, n° de serie, condiciones de disparo.

Distancia fuente-centro referencia del detector.

Identificación del monitor de referencia. Valor de referencia: lectura neta del monitor referencia.

Como buena práctica se pueden añadir medidas a distintas distancias y añadir distintas fuentes.

Fecha y Operador	Fondo, valor medio del monitor a verificar ($\mu\text{Sv/h}$)	Lectura, valor medio del monitor a verificar ($\mu\text{Sv/h}$)	Lectura neta, del monitor a verificar ($\mu\text{Sv/h}$) L_n	Fondo, valor medio del monitor referencia ($\mu\text{Sv/h}$)	Lectura, valor medio del monitor referencia ($\mu\text{Sv/h}$)	Lectura neta, del monitor referencia ($\mu\text{Sv/h}$) L_p	% desviación respecto a la lectura neta del monitor referencia $100(L_n-L_p)/L_p$
01-05-10	Calibración						
05-05-10 ADG	0,3	70,3	70,0	0,2	71,2	71,0	-1,4%
03-11-10 CCD	0,3	66,3	66,0	0,3	68,3	68,0	-2,9
10-05-11 BCD	0,2	55,2	55,0	0,3	58,3	58,0	-5,17
24-10-11 CCD	0,4	48,4	48,0	0,4	51,4	51,0	-5,88

ANEXO V

VERIFICACIÓN DE MONITOR DE CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL CON MONITOR REFERENCIA

Marca: _____; modelo: _____; n° de serie: _____

Siempre que se disponga del factor de conversión de cps a Bq/cm², se podrán realizar las medidas de contaminación de la instalación y las verificaciones en esas unidades.

Identificación de la fuente radiactiva: radioisótopo, n° de serie o referencia, y actividad a fecha de verificación.

Identificación del monitor de referencia. Valor de referencia: lectura neta del monitor de referencia.

Como buena práctica se pueden añadir medidas con distintas fuentes.

Tabla 1. En caso de que los monitores sean iguales o la eficiencia de detección/geometría fuente-detector, sea la misma.

Tabla 2. En caso de monitores con eficiencias de detección diferentes, pero geometría de detección iguales, habrá que tener en cuenta el factor Ef. Puede que sea necesario incluso obviar la superficie de detección del monitor y sólo usar la superficie de la fuente radiactiva. En algunos casos, incluso no se podrá usar la metodología del monitor de referencia.
 $Ef = \% Ef \text{ referencia} - \% Ef \text{ monitor a verificar}$. Aplicaremos al ejemplo un Ef para el radioisótopo de interés de: $20\% - 10\% = 10\%$. En el caso que la eficiencia del monitor de referencia sea menor, habrá que restar ese porcentaje al salir un valor negativo. La tabla que representa este proceso, se encuentra en la página 2 de este anexo.

Tabla 3. En caso de monitores distintos y con diferentes geometrías de detección, se puede establecer un primer valor de referencia, a partir del cual se tendrá que calcular las posteriores diferencias en las siguientes verificaciones. Si tras la compra o calibración la desviación calculada es de -10%, en las posteriores verificaciones las desviaciones no podrán superar el -35% o 15%.

Tabla 1

Fecha y Operador	Fondo, valor medio del monitor a verificar (Bq/cm ²)	Lectura, valor medio del monitor a verificar (Bq/cm ²)	Lectura neta, del monitor a verificar (Bq/cm ²) Ln	Fondo, valor medio del monitor referencia (Bq/cm ²)	Lectura, valor medio del monitor referencia (Bq/cm ²)	Lectura neta, del monitor referencia (Bq/cm ²) Lp	% desviación respecto a la lectura neta del monitor referencia $100(Ln-Lp)/Lp$.
01-05-10	Calibración						
05-05-10 ADG	3	433	430	2	442	440	-2,27
03-11-10 CCD	3	423	420	3	433	430	-2,32
10-05-11 BCD	2	432	430	3	443	440	-2,27
24-10-11 CCD	4	424	420	3	434	431	-2,55

Tabla 2

Fecha y Operador	Fondo, valor medio del monitor a verificar (Bq/cm ²)	Lectura, valor medio del monitor a verificar (Bq/cm ²)	Lectura neta, del monitor a verificar (Bq/cm ²)Ln	Fondo, valor medio del monitor referencia(Bq/cm ²)	Lectura, valor medio del monitor referencia (Bq/cm ²)	Lectura neta, del monitor referencia (Bq/cm ²)Lp	% desviación respecto a la lectura neta del monitor referencia {100(Ln-Lp)/Lp}+Ef.
01-05-10	Calibración						
05-05-10 ADG	3	399	396	2	442	440	0
03-11-10 CCD	3	389	386	3	433	430	-0,23
10-05-11 BCD	2	379	377	3	443	440	-4,31
24-10-11 CCD	4	374	370	3	434	431	-4,15

Tabla 3

Fecha y Operador	Fondo, valor medio del monitor a verificar(Bq/cm ²)	Lectura, valor medio del monitor a verificar (Bq/cm ²)	Lectura neta, del monitor a verificar (Bq/cm ²)Ln	Fondo, valor medio del monitor referencia(Bq/cm ²)	Lectura, valor medio del monitor referencia (Bq/cm ²)	Lectura neta, del monitor referencia (Bq/cm ²)Lp	% desviación respecto a la lectura del monitor referencia 100(Ln-Lp)/Lp
01-05-10	Calibración						
05-05-10 ADG	3	399	396	2	442	440	Lectura de referencia, R (porcentaje de desviación inicial). -10
03-11-10 CCD	3	410	407	3	433	430	-5,34
10-05-11 BCD	2	420	418	3	410	407	2,70
24-10-11 CCD	4	374	370	3	434	431	-14,15

ANEXO VI

VERIFICACIÓN DEL MONITOR CON CONSTANTE GAMMA

Marca: _____; modelo: _____; n° de serie: _____

Identificación de la fuente radiactiva: radioisótopo, número de serie y actividad inicial en fecha origen, actividad en fecha de verificación, constante gamma-tasa de exposición, constante gamma-tasa de exposición a las diferentes distancias a verificar y en la fecha concreta.

Patrón de referencia. Valor de referencia: valor esperado por constante gamma (Γ) a la fecha de verificación (Lectura esperada).

Distancia fuente-centro referencia del detector.

En el caso de verificar un monitor de contaminación, se podrá realizar el mismo proceso si éste mide en cps y se dispone del dato de sensibilidad gamma (equivalencia cps- μ Sv/h). Los datos se obtendrían en cps que se pasarían a μ Sv/h, para el cálculo de la desviación.

Para radioisótopos gamma con emisión beta, será necesario una pantalla de material de blindaje para este tipo de emisión.

Se pueden usar varios radioisótopos para conocer la respuesta del monitor a diferentes energías.

Como buena práctica se pueden añadir medidas a distintas distancias y con distintas fuentes.

Fecha y Operador	Lectura, valor medio (restando fondo radiológico ambiental) Lm (μ Sv/h)	Lectura esperada Le por la Γ (μ Sv/h)	Desviación respecto a lectura esperada = $100(Lm-Le) / Le$ (%)
01-05-10	Calibración		
05-05-10 ADG	30,2	30	0,6
03-10-10 CCD	28,2	29,9	-5,68
10-05-11 BCD	32,2	29,8	8,05
24-10-11 CCD	31,3	29,7	5,38
10-05-12 ABC	29,2	29,6	-1,35
25-10-12 ABB	29,2	29,5	-1,01
02-05-13 VBC	30,3	29,4	3,06
02-10-13 FRG	28,8	29,3	-1,70

ANEXO VII

VERIFICACIÓN DEL MONITOR DE CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL/RADIACIÓN AMBIENTAL
CON FUENTE RADIATIVA NO ENCAPSULADA

Marca: _____; modelo: _____; n° de serie: _____				
Identificación de la fuente radiactiva: radioisótopo, referencia y actividad con fecha de verificación. El radioisótopo a utilizar debe ser el mismo y con la misma actividad cada vez que se verifica. Distancia fuente-centro referencia del detector. Patrón de referencia: Valor esperado. Lectura de referencia inicial. Para un monitor de radiación, la única variación serían las unidades de medida. Se pueden usar varios radioisótopos para conocer la respuesta del monitor a diferentes energías. Siempre que se disponga del factor de conversión de cps a Bq/cm ² , se podrán realizar las medidas de contaminación y las verificaciones en esas unidades. Como buena práctica se pueden añadir medidas a distintas distancias y con distintas fuentes.				
Fecha y Operador	Fondo, valor medio (Bq/cm ² -cps)	Lectura, valor medio (Bq/cm ² -cps)	Lectura neta, Ln (Bq/cm ² -cps)	Desviación respecto a lectura de referencia =100(Ln-R) /R (%)
01-05-10	Calibración			
05-05-10 ADG	2	430	428	Lectura de Referencia, R 428
03-11-10 CCD	2	428	426	-0,46
10-05-11 BCD	3	432	429	0,23
24-10-11 CCD	3	436	433	1,16
10-05-12 ABC	2	426	424	-0,93
25-11-12	Calibración			
02-05-13 VBC	3	430	427	Lectura de referencia, R 427
06-05-13 FRG	4	426	422	-1,17

ANEXO VIII

CÁLCULO DE LA EFICIENCIA EN UN MONITOR DE CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL Y DE LA CONVERSIÓN DE CPS A Bq/cm²

Marca: _____; modelo: _____; n° de serie: _____

EFICIENCIA

Identificación de la fuente radiactiva: radioisótopo, referencia y actividad con fecha de verificación.

Distancia fuente-centro referencia del detector.

Se pueden usar varios radioisótopos para conocer la eficiencia del monitor a diferentes energías/radiación.

Cálculo:

$$E_i (\%) = \frac{\bar{X}_i - \bar{X}_f}{A(2\pi)} \times 100$$

E_i : Eficiencia en % del equipo para la fuente de referencia

\bar{X}_i : Media aritmética de la tasa de contaje de la fuente de referencia (cps)

\bar{X}_f : Media aritmética de la tasa de contaje del fondo (cps)

$A(2\pi)$: Tasa de emisión superficial en 2π

Consideraciones:

Cuando $S_d > S_f$ no será necesario hacer ninguna corrección.

Cuando $S_d < S_f$ será necesario hacer la siguiente corrección:

$$E_i (\%) = \frac{\bar{X}_i - \bar{X}_f}{A(2\pi)} \times \frac{S_d}{S_f} \times 100$$

En esta situación, las medidas se realizarán con la fuente centrada en el área de la ventana del detector.

S_d : Superficie del detector en cm²

S_f : Superficie de la fuente en cm²

En caso de utilizar fuentes de $T_{1/2}$ corto será necesario realizar corrección por decaimiento.

Aplicando la fórmula:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

A: Actividad absoluta

A_0 : Actividad inicial de la fuente

λ : Constante de semidesintegración

t: Tiempo transcurrido desde la fecha de calibración de la fuente hasta el momento de su contaje

CONVERSIÓN cps a Bq/cm²

$$\text{Bq/cm}^2 = \frac{X_i - X_f}{EtA}$$

E_t : Eficiencia total en % del equipo para la fuente medida. Sustituir en la fórmula de E_i , el valor $A (2\pi)$ por $A (4\pi)$.
 X_i : Tasa de conteo de la fuente de referencia (cps)
 X_f : Tasa de conteo del fondo (cps)
 A : Área del detector cm^2 .

ANEXO IX

TITULAR	PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN DE RADIOPROTECCIÓN	Referencia Revisión "X"
----------------	--	------------------------------------

ÍNDICE DEL DOCUMENTO

ÍNDICE DE REVISIONES

REVISADO Y APROBADO POR:	
Fecha:	Firma:

ANEXO IX

TITULAR	PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN DE RADIOPROTECCIÓN	Referencia Revisión "X"
---------	--	----------------------------

1. OBJETO

2. ALCANCE/ÁMBITO DE APLICACIÓN

Equipos de medida afectados.

3. RESPONSABILIDADES

3.1 Supervisor

3.2 Operador

4. DESCRIPCIÓN

4.1 Calibración

- Periodicidad.
- Laboratorios/fabricante.
- Fuentes de referencia o calidades de los haces de rayos-X.
- Criterios de aceptación.
- Medidas a adoptar, etc.

4.2 Verificación

- Periodicidad.
- Fuente de referencia.
- Equipo de referencia.
- Descripción del proceso (medios necesarios, inspección visual, pasos de la verificación, obtención y manejo de los resultados, etc.)
- Criterios de aceptación.
- Medidas a adoptar, etc.

5. REGISTROS / MODELO DE TOMA DE DATOS

6. DOCUMENTACIÓN DE REFERENCIA