

PROTOCOLOS DE VERIFICACIÓN Y CALIBRACIÓN DE LOS PÓRTICOS.

(DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS ASOCIADOS)

1. INTRODUCCIÓN.

Para asegurar que los monitores de radiactividad de tipo pÓrtico, instalados en las empresas adheridas al “Protocolo para la vigilancia del contenido radiactivo de los materiales metÁlicos” (en adelante el “Protocolo”), funcionan correctamente y tienen las características de detección apropiadas, en este trabajo se recomienda la realizaci3n de tres “procesos”, que estÁn asociados:

- 1.- A la instalaci3n inicial del equipo, donde se elabora un informe con los datos del equipo.
- 2.- A las verificaciones peri3dicas que aseguran su correcto funcionamiento.
- 3.- A las calibraciones anuales para evaluar su respuesta para muestras de Cs-137 y asegurar que tienen una respuesta apropiada.

Para cada uno de ellos, se ha preparado el oportuno protocolo de ensayo.

Estos procesos son similares a los fijados en un sistema de gesti3n de la calidad, su definici3n tambi3n es sencilla y clara, y ademÁs su ejecuci3n es rÁpida y econ3mica.

Los ensayos definidos en estos procesos permiten obtener los parÁmetros fÍsicos cuantitativos y los parÁmetros lÍmites del pÓrtico aplicando la norma ISO-11929, asociados a las medidas estÁticas y dinÁmicas que realizan los detectores de radiaci3n del pÓrtico.

Los criterios para seleccionar los ensayos se han basado en las recientes normas relacionadas con los pÓrticos instalados en las fronteras ANSI-N.42-35, IEC-62244 y de la guÍa de la IAEA, TS-1-1240, y en el reglamento aprobado en Holanda en 2003, para los pÓrticos instalados para detectar la radiactividad en la chatarra.

Como hay una gran variedad de modelos de pÓrticos, los parÁmetros definidos en estos procesos, como el tiempo de recuento de las detecciones, o la distancia de la trayectoria a la superficie del detector, se pueden variar, siempre que suponga una mejora o una simplificaci3n del proceso, o se ajuste a las recomendaciones particulares del fabricante para esos modelos.

2. PROCESO INICIAL EN LA INSTALACIÓN DE LOS PÓRTICOS.

Se recomienda realizar el proceso inicial durante la instalación del equipo. Éste puede ser realizado por el suministrador y se recogería en un informe inicial de instalación, que ha de entregar al usuario. Igualmente, este informe debe realizarse o complementarse cuando se realice una reparación o modificación que afecten a los resultados de las medidas.

El informe inicial de instalación debe contener los datos y características del sistema que afectan o influyan en su calidad operativa. Este informe, también lo puede realizar el usuario basado en los datos del suministrador, y recoger los resultados y datos necesarios para poder definir y activar los siguientes ensayos que están relacionados con los procesos.

El informe inicial de instalación se puede complementar cuando el sistema tenga una reparación o una modificación que afecte de forma severa a su funcionamiento, y se puede ampliar cuando se cambien, por motivos justificados, los parámetros del sistema o los intervalos de los ensayos de los procesos de verificación y de calibración.

El contenido mínimo del informe inicial ha de ser:

- 1.- Listado de los documentos más importantes asociados al equipo, de los componentes principales que forman parte del sistema de detección y de los accesorios más importantes entregados por el suministrador o añadidos por el usuario. También se recomienda, incluir los datos generales de la obra civil y de los sistemas de protección.
- 2.- Los datos o parámetros que indican las características técnicas, dimensionales y operativas más importantes del pórtico: dimensión de los detectores, altura y separación de los paneles, separación de los sistemas de protección, roderas para definir la trayectoria de los vehículos, listado de los parámetros fijados, etc.
- 3.- Los procesos de verificación y calibración periódica que el suministrador recomienda realizar. Se han de indicar de forma clara si se emplean los procesos de ensayo definidos en este documento, los recomendados por el suministrador, así como las variaciones o ampliaciones que también se desean realizar sobre ellos. Para cada proceso que se defina se ha de fijar el periodo de ejecución recomendado y los condicionantes y objetivos que se han de superar.

3. PROCESO DE VERIFICACIÓN DE LOS PÓRTICOS.

El proceso de verificación incluye los procesos cualitativos y cuantitativos que se han de realizar en los pórticos de forma periódica. Estos procesos los puede realizar el usuario del equipo u otra persona suficientemente cualificada. Su alcance y contenido se habría de incluir en el informe inicial de instalación. Coincidiendo con la instalación el mantenimiento del sistema, debe realizarse una verificación inicial en la que se establezcan los valores de referencia de los parámetros cuantitativos que se han de verificar periódicamente.

Las **Verificaciones Cualitativas** más importantes que se recomienda realizar cada dos semanas, o si se sospecha un mal funcionamiento y al menos una vez al mes, son:

- 1.- Listado de los parámetros operativos del pórtico para verificar que no se han modificado. Cuando se realicen modificaciones se incluye el nuevo listado.
- 2.- Funcionamiento correcto de los sensores de paso del vehículo.
- 3.- Funcionamiento correcto de las alarmas sonoras y luminosas de detección, empleando muestras radiactivas exentas que se aproximan a los detectores, con los sensores activos o inactivos.
- 4.- Fondo radiactivo del equipo cuando no pasan vehículos y no hay vehículos próximos que atenúan el fondo.

Cuando se detecte el funcionamiento incorrecto de algún componente básico se ha de avisar al responsable del equipo y al servicio técnico.

La **Verificación Cuantitativa** que se recomienda realizar mensual, o al menos trimestral, consiste en:

- 1.- Un Ensayo Estático para calcular la eficiencia en la superficie del panel, que consiste en medir el fondo radiactivo y las detecciones estáticas en 30 s, para una muestra de Cs-137 exenta, colocada siempre en un punto central en contacto con la superficie de cada panel. Este proceso se realiza según las instrucciones del Anexo I, aunque se puede sustituir por el recomendado por el fabricante.
- 2.- Con los datos obtenidos para cada panel se cumplimentan los formatos del Anexo III y se calculan con las expresiones indicadas en el Anexo II, las detecciones netas o la eficiencia, como la relación entre las detecciones netas y las emisiones en %.
- 3.- Se ha de verificar que las detecciones netas o la eficiencia no varían, con respecto del valor de la verificación inicial, dentro de un margen recomendado por el fabricante o en su defecto el 10 %. Si se supera el margen de variación, se ha de realizar una revisión del equipo y establecer un nuevo valor de referencia para la eficiencia en la superficie del panel.

Si esta verificación se cumple durante tres meses seguidos, se puede ampliar el periodo de verificación a una frecuencia trimestral.

4. PROCESO DE CALIBRACIÓN DE LOS PÓRTICOS.

El proceso de calibración de los pórticos, consiste en dos ensayos que los puede realizar una persona adecuadamente capacitada y cualificada, empleando una muestra radiactiva calibrada de Cs-137 de 370 kBq. Este proceso de calibración permite asegurar que los detectores del pórtico funcionan dentro de unos parámetros aceptables. Para ello se debe realizar: 1) un ensayo estático y 2) un ensayo dinámico con el objetivo de comprobar que su respuesta dinámica es mejor que el **Valor Guía** de detección recomendado. Este **Valor Guía** se establece en 600 kBq de Cs-137 con una probabilidad de detección del 95%.

Se recomienda realizar estos ensayos una vez al año, o si se ha producido una reparación o modificación que afecte a su respuesta.

Los ensayos recomendados son:

- 1.- En el **Ensayo Estático**, se ha de medir el fondo y las detecciones para la muestra, colocada en el centro de la zona sensible de detección, siguiendo las instrucciones del Anexo I. Con los datos obtenidos para cada detector se cumplimentan los formatos del Anexo III y se calculan con las expresiones indicadas en el Anexo II, los siguientes parámetros:
 - **Eficiencia Estática**: para medidas de 30 s, calculada como la relación entre la tasa de las detecciones netas y la tasa de las emisiones, y expresada en %.
 - **Factor tasa de dosis-actividad**: este factor permite calcular el incremento de la tasa de dosis en la superficie del detector, cuando la muestra está colocada en el centro de la zona sensible del pórtico, expresado en nSv/h/kBq.
 - **Variación de la Eficiencia Estática**: se ha de verificar que la eficiencia estática de cada detector, con respecto del valor de la verificación inicial, se mantiene dentro de un margen recomendado por el fabricante o en su defecto el 10 %. Si se supera este margen de variación, se ha de realizar una revisión del equipo y establecer un nuevo valor de referencia para la eficiencia estática.
- 2.- En el **Ensayo Dinámico**, se pasa andando con la muestra calibrada de Cs-137 por la trayectoria que cruza el centro de la zona sensible de detección, de acuerdo con las instrucciones del Anexo I. Con los resultados obtenidos se cumplimentan los formatos del Anexo III y se calculan con las expresiones indicadas en el Anexo II, los siguientes parámetros:
 - **Eficiencia Dinámica**, calculada como la relación entre la tasa de las detecciones netas, (detecciones máximas durante un segundo, menos el fondo en 30 segundos) y la actividad de la fuente de Cs-137, expresada en %.
 - **Límite de Detección Dinámico**, en kBq, para medidas del fondo realizadas antes de la medida dinámica durante 30 s, medidas dinámicas de la muestra durante 1 s y probabilidades de detección positivas y negativas del 99,9 %.

- **Nivel de Alarma**, en kBq, calculadas con las detecciones dinámicas netas que fijan el nivel de la alarma definido con los parámetros del pórtico.

Con los parámetros calculados, se ha de verificar:

- 1.- Que el Nivel de Alarma es inferior al Valor Guía de detección recomendado de 600 kBq.
- 2.- Que el Límite de Detección Dinámico es inferior al Valor Guía de detección recomendado de 600 kBq.

Se recomienda que el Nivel de Alarma de detección sea igual o ligeramente superior al Límite de Detección Dinámico. Si el Nivel de Alarma de detección es inferior al Límite de Detección Dinámico, la probabilidad de detectar una muestra es inferior al 99,9%, por lo que aumenta la probabilidad de falsas alarmas. No obstante, la instalación puede establecer el Nivel de Alarma de detección por debajo del Límite de Detección Dinámico, si considera que la dinámica de trabajo es compatible con las posibles falsas alarmas.

5. REGISTRO Y MANTENIMIENTO DE DATOS.

Los datos de los ensayos deberán registrarse en los formatos del Anexo III, ya sea en papel o en formato electrónico. La frecuencia del registro será:

- 1.- Verificaciones quincenales o mensuales: deberán registrarse al menos una vez al mes.
- 2.- Verificaciones y calibraciones con un periodo de realización superior al mes, deberán registrarse en cada verificación o calibración.

En ambos casos, el registro de datos irá acompañado cuando corresponda, del tique del equipo.

Los registros y tiques se mantendrán en la instalación durante los periodos siguientes:

- 1.- Verificaciones: al menos durante dos años.
- 2.- Calibraciones: al menos durante cinco años.
- 3.- Informe Inicial y modificaciones: durante toda la vida operativa del equipo.

6. REFERENCIAS.

- 1.- Reglamento sobre la detección de contaminación radiactiva en la chatarra. (Holanda). VROM, 28 abril 2003, N° 81, pag 17.
- 2.- Evaluation and Performance of Radiation Detection Portal Monitors for Use in Homeland Security, ANSI N42.35-2004, New York (2004).
- 3.- Technical and Functional Specifications for Border Monitoring Equipment. Reference Manual, IAEA-TS-1-1240, IAEA, Vienna (2006).
- 4.- Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit, and limits of the confidence interval) for ionizing-radiation measurements — Fundamentals and applications, ISO-DIS-11929, Draft (2006).
- 5.- Radiation protection instrumentation –Installed radiation monitors for the detection of radioactive and special nuclear materials at national borders. IEC-62244 (2006).

ANEXO I

DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

1. INTRODUCCIÓN.

En los ensayos incluidos en estos procesos hay numerosas variantes, cálculos y conceptos. Para realizar estos ensayos, es necesario un técnico que esté adecuadamente cualificado y capacitado en la detección y medida de la radiación ionizante.

En las medidas de verificación cualitativas, que se recomienda realizar cada quincena o cada mes, los resultados se pueden registrar en un cuaderno de mantenimiento.

En las medidas de verificación cuantitativas, que se recomienda realizar cada mes, la muestra se coloca en el centro de la superficie del detector o del panel. Los cálculos se pueden realizar en una hoja Excel que permita simplificar su ejecución.

Cuando las verificaciones cualitativas y cuantitativas son sencillas, también se recomienda realizar ambas simultáneamente cada mes.

En las calibraciones que se recomienda realizar anualmente, en las medidas estáticas la muestra se coloca en el centro de la zona sensible de detección. En las medidas dinámicas la muestra pasa por la trayectoria que cruza el centro de la zona sensible de detección.

La incertidumbre de las detecciones se supone que tienen una distribución de Poisson. La incertidumbre de la muestra es la indicada en el certificado de calibración.

2. VERIFICACIONES CUALITATIVAS.

Se indica a continuación para la comprobación de las alarmas la secuencia a seguir:

- Con la fuente alejada de los detectores, se bloquea primero uno de los haces de proximidad y después de un segundo aproximadamente, se bloquea el otro.
- Una persona, sosteniendo el soporte con la fuente, camina hacia los detectores, atravesándolos en una trayectoria lateral rectilínea lo más cerca posible de un panel, o incluso si la fuente es de poca intensidad, posicionándola en contacto con el panel.
- Después que la fuente haya pasado o estado en contacto con los detectores, desbloquear los haces en el mismo orden en que fueron bloqueados.
- Retirar la fuente.
- Comprobar que se activa la alarma luminosa y sonora y se obtiene el resultado por la impresora.
- Completar el formato del Anexo III tomando los valores indicados en el resultado por impresora tanto de fondo como de lectura.
- El criterio de aceptación es la señalización de la alarma por los detectores del panel más cercano.
- Repetir toda la operación para todos los paneles del pórtico.

3. VERIFICACIONES CUANTITATIVAS.

En las medidas de verificación cuantitativas, que se recomienda realizar mensualmente, la muestra de Cs-137 exenta, se coloca siempre en un punto del centro de la superficie del detector o del panel, marcado previamente para reproducir la medida en las verificaciones sucesivas (Figura 1).

Para obtener la eficiencia estática en la superficie del panel en los puntos seleccionados se realiza la siguiente secuencia:

- Se realiza 1 medida del fondo ambiental de 30 s.
- Se coloca la muestra de Cs-137 en el punto de referencia seleccionado y se realiza 1 medida de 30 s en cada uno de los paneles del pórtico.
- Como el valor del fondo durante el ensayo puede variar, al final del ensayo se aleja la muestra, se realizan una nueva medida del fondo ambiental de 30 s, y si hay variaciones se repite el ensayo.

Se registran los valores en el formato correspondiente del Anexo III.

En cada medida se calcula los valores e incertidumbres de la tasa del fondo, de la tasa neta de las detecciones, y si se conoce la actividad de la muestra, de la eficiencia. Los cálculos se realizan para una medida del fondo de 30 s y una medida de la muestra de 30 s, sin tener en cuenta la incertidumbre de la muestra. En algunos pórticos, que indican las detecciones totales, es más sencillo realizar las detecciones en 100 s. Todos estos cálculos se realizan según las expresiones del Anexo II.



Fig. 1 – Medida de la eficiencia en el centro de la superficie del panel o del detector.

4. CALIBRACIÓN ESTÁTICA.

En las medidas estáticas, realizadas en la calibración, que se recomienda realizar anualmente, se emplea una muestra calibrada y puntual de Cs-137 de 370 kBq. Para realizar el ensayo la muestra se coloca en centro de la zona sensible de detección del pórtico (Figura 2).

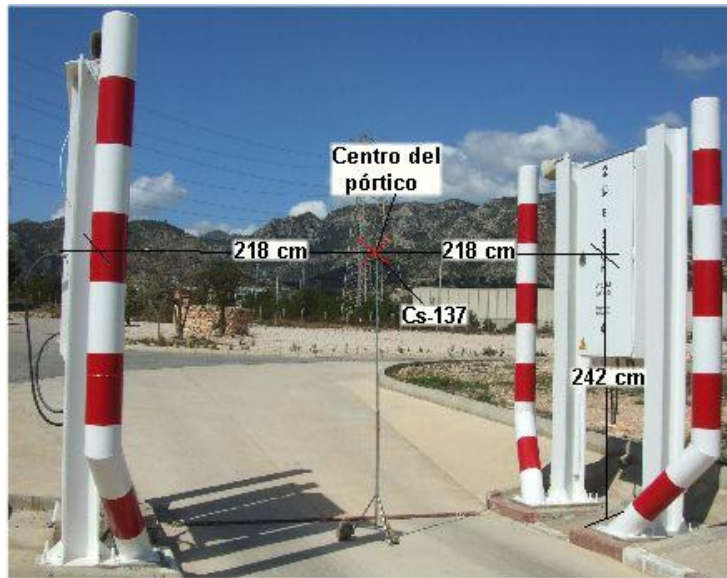


Fig. 2 – Medida de la eficiencia estática en el centro de la zona sensible de detección.

Para obtener la eficiencia estática en el centro de la superficie de cada detector y en el centro de la zona sensible del pórtico, se sigue la secuencia:

- Se aleja la muestra y se realiza una medida del fondo ambiental de 30 s.
- Se coloca la muestra de Cs-137, en el centro del pórtico (figura 2) y se realiza una medida de 30 s. Entre ambas medidas no ha de transcurrir más de 2 minutos.

Se registran los valores en el formato correspondiente del Anexo III. Estos valores se pueden obtener directamente en la pantalla del monitor o de los ficheros grabados con las detecciones en el ordenador del pórtico.

En cada medida se calcula la tasa del fondo y la eficiencia. Las incertidumbres de la tasa del fondo y de la eficiencia se calculan para la incertidumbre asociada a una medida del fondo de 30 s, a una medida de la muestra de 30 s y con la incertidumbre de la fuente de Cs-137, que se obtiene de su certificado de calibración. En algunos pórticos, que indican las detecciones totales, es más sencillo realizar las detecciones en 100 s.

Para asegurar que el fondo es estable, hay que verificar que no hay factores externos que puedan modificarlo como muestras radiactivas, vehículos próximos, lluvia, etc.

5. CALIBRACIÓN DINÁMICA.

Para realizar anualmente la calibración dinámica del pórtico es necesario pasar una muestra de Cs-137 de 370 kBq, andando a una velocidad próxima a 5 km/h, por el centro de la zona sensible del sistema de detección (figura 3). Los datos de la tasa del fondo y de la tasa de las detecciones máximas de cada detector se obtienen del informe de medida que se imprime en la consola del pórtico (tique), durante la alarma o durante el paso de la muestra.

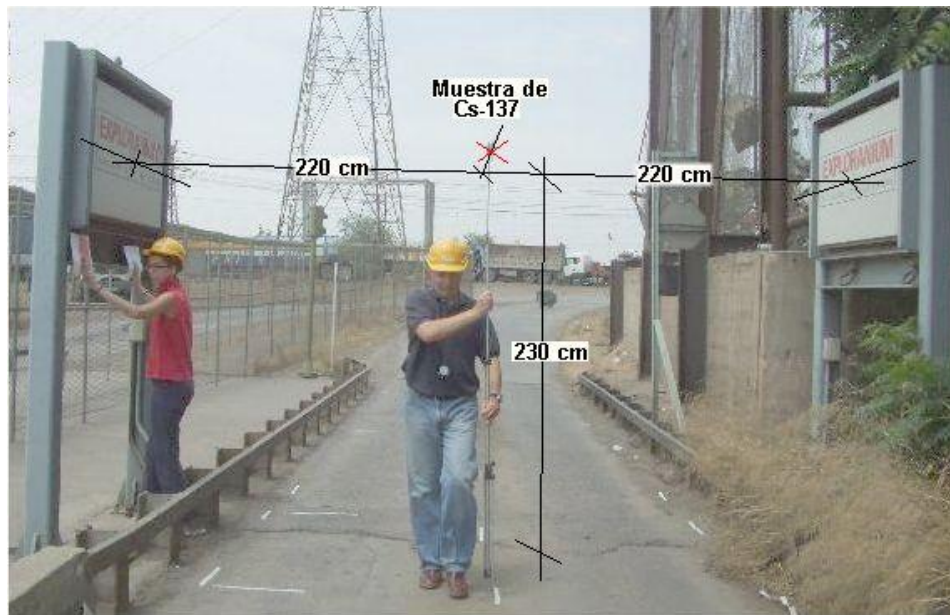


Fig. 3 – Ensayo dinámico del paso de la muestra andando por la trayectoria central.

Para realizar el ensayo dinámico, se sigue la secuencia:

- Se coloca la fuente sobre un soporte a una altura del suelo de manera que quede centrada entre los paneles y con sus emisiones simétricas.
- Con la fuente alejada de los detectores, se bloquea primero uno de los haces de proximidad y después de un segundo aproximadamente, se bloquea el otro.
- Una persona, sosteniendo el soporte camina hacia los detectores, atravesándolos en una trayectoria central rectilínea equidistante de cada panel (figura 3).
 - Cuando en el “tique” que se imprime durante la alarma, sólo se obtienen las detecciones de un panel o de un detector, se puede colocar junto a la muestra un blindaje direccional, para forzar la respuesta del otro panel o detector.
 - Cuando no se activa la alarma, y no hay “tique” durante el paso de la muestra por la trayectoria central, se puede seguir una trayectoria lateral paralela situada a una distancia de 1,5 m del centro del panel o del detector, o emplear una muestra más activa.

ESTUDIO DEL CONTROL DE MATERIAL RADIATIVO CON PÓRTICOS

- Después que la fuente haya pasado entre los detectores, se desbloquean los haces en el mismo orden en que fueron bloqueados.
- Se anula la alarma y se espera alejado del pórtico a más de 20 m para que el equipo realice una nueva medida del fondo ambiental.
- Se repiten 10 veces las medidas con la fuente.

Se recopilan los resultados de la impresora, se archivan los resultados del ensayo dinámico a través del centro del pórtico y se cumplimentan los formatos correspondientes del Anexo III.

En general, en el tique o informe que se imprime para cada detector o panel, se indica la tasa del fondo radiactivo de referencia que emplea cada pórtico para fijar la tasa de las detecciones netas del nivel de alarma, la tasa de las detecciones que activan la alarma y la tasa de las detecciones máximas cuando pasa una muestra. Con estos datos, se calculan los parámetros dinámicos de la respuesta del equipo: Eficiencia Dinámica, Nivel de Alarma y Límite de Detección Dinámico.

Se recomienda obtener entre 4 y 10 informes de paso o de alarma para cada detector o cada panel.

En cada pórtico es necesario conocer la fórmula que se emplea para calcular las detecciones del nivel de la alarma. Esta fórmula permite calcular el fondo de referencia en algunos pórticos, con los datos de las detecciones que activan la alarma y el número de sigmas, y en otros pórticos, definir las fórmulas de sus dos niveles de alarma.

- En cada medida se calcula el valor y la incertidumbre típica de la tasa del fondo, de la tasa neta de las detecciones máximas y de la eficiencia dinámica.
 - La incertidumbre expandida de la eficiencia dinámica, incluye la incertidumbre de las detecciones netas y la incertidumbre de la muestra calibrada.
 - La eficiencia obtenida en las trayectorias laterales, se ha de corregir con la relación entre las distancias al cuadrado de la trayectoria lateral y central.
- Para cada detector o cada panel, y para todos los paneles del pórtico, se calcula el valor medio de la tasa del fondo, de la tasa neta de las detecciones máximas y de la eficiencia dinámica.
 - La incertidumbre de la eficiencia dinámica media, no tiene en cuenta las variaciones debidas a los pequeños desplazamientos de la trayectoria.
- Con los valores de la tasa del fondo, de la eficiencia dinámica y de su incertidumbre se calcula el límite de detección dinámico.
- Con los valores de la tasa del fondo, del número de sigmas de la alarma y de la eficiencia dinámica se calcula el nivel de alarma.

ANEXO II

CÁLCULOS DE LOS PARÁMETROS DE LA VERIFICACIÓN Y CALIBRACIÓN DE LOS PÓRTICOS

1. INTRODUCCION.

En la norma ISO-11929, se indican con ejemplos, como se calculan las detecciones netas y la eficiencia de los detectores, así como sus incertidumbres para las radiaciones ionizantes.

En este trabajo se indican como se realizan los cálculos generales para obtener las detecciones netas y la eficiencia, y sus incertidumbres para cualquier detector de radiación ionizante, empleando las mismas definiciones y los mismos símbolos, que en la norma.

Al aplicar estos cálculos a los pórticos, para obtener las eficiencias estáticas y dinámicas de sus detectores, se han simplificado los cálculos, pero se mantiene el rigor del proceso.

El límite de detección dinámico de los detectores del pórtilco, se obtiene de forma simplificada, para unas condiciones muy concretas, que son muy próximas y menos severas, que las fijadas en la normativa internacional: fondo previo medido en 30 s, medida dinámica de la muestra en 1 s, muestras ideales de Cs-137, trayectoria que pasa por el centro de la zona sensible de detección, factor de atenuación del fondo por la carga del vehículo igual a la unidad, velocidad de la muestra reducida de 5 km/h.

2. DETECCIONES DE LOS DETECTORES.

Los detectores de los pórticos, como la mayoría de los detectores de radiación ionizante, recuentan las detecciones totales, n , durante un tiempo en segundos, t , pero los datos que se presentan en la pantalla de la consola de control o se imprimen en el informe de la alarma indican los resultados de los cálculos parciales que ha realizado el equipo. Normalmente estos resultados se indican en detecciones por segundo o “cps”.

Tomando los datos de las detecciones del fondo o de la muestra que indica el equipo, siempre que el programa del pórtilco no emplee filtros numéricos que modifiquen las detecciones, o los tiempos de medida indicados, y suponiendo que las detecciones tienen una distribución de Poisson para unos recuentos altos, se pueden calcular la tasa de detecciones totales y la tasa de detecciones netas en cps:

- 1.- La **tasa de las detecciones**, r_i , y su incertidumbre típica, $u(r_i)$, para el fondo y para la muestra, cuando se han medido, n_i , detecciones durante un tiempo, t_i , es:

$$r_i = \frac{n_i}{t_i} \quad \text{Ec. 1}$$

$$u(r_i) = \sqrt{\frac{r_i}{t_i}} \quad \text{Ec. 2}$$

- 2.- La **tasa de las detecciones netas**, r_n , en una medida que se ha obtenido con la tasa de detecciones del fondo, r_0 , medidas durante un tiempo t_0 , y la tasa de detecciones de la muestra, r_g , medidas durante un tiempo t_g , es:

$$r_n = \left(\frac{n_g}{t_g} - \frac{n_0}{t_0} \right) = r_g - r_0 \quad \text{Ec. 3}$$

$$u(r_n) = \sqrt{\frac{r_g}{t_g} + \frac{r_0}{t_0}} \quad \text{Ec. 4}$$

3. EFICIENCIA DE LOS DETECTORES.

La eficiencia de los detectores de radiaciones ionizantes mide la relación entre las emisiones y las detecciones, para un isótopo dado, en unas condiciones geométricas definidas.

En los detectores de los pórticos, se ha seleccionado el Cs-137 como el isótopo con una energía más representativa para la posible contaminación en metales.

La muestra de Cs-137 ha de ser puntual y calibrada, con una actividad en Bq, A_C , y una incertidumbre, $I(A_C)=2u(A_C)$. Estos dos valores han de emplearse en el cálculo de la eficiencia y de su incertidumbre.

En los ensayos estáticos, la muestra se coloca en el centro de la superficie del detector y en el centro de la zona sensible de detección del pórtilo.

En las medidas dinámicas, la muestra se desplaza con velocidad constante por la trayectoria que atraviesa el centro de la zona sensible del pórtilo. Para que el ensayo dinámico, sea reproducible y sencillo, la muestra se pasa andando, a una velocidad próxima a 5 km/h, sin que se produzca una atenuación del fondo de los detectores por la carga del vehículo.

En las tablas, se puede obtener la relación entre su actividad y la tasa de dosis para el Cs-137 a una distancia en cm, con el valor de la constante específica, cuyo valor es de 956,2 nSv/cm²/Bq. Para calcular la actividad del Cs-137 en el momento de la medida se emplea su periodo de semidesintegración, que es 30,25 años. También hay que conocer la relación entre la actividad y la tasa de las emisiones es 1 emisión/s/Bq, y tener en cuenta el intervalo de medida de cada detector, que cubre un intervalo para las energías de las emisiones gamma desde 15 o 80 keV, hasta 2,5 o 3 MeV, según el tipo de detector y de su electrónica. En algunos casos el intervalo inferior de detección incluye los rayos X.

Con los datos de las detecciones netas y de la actividad, se puede obtener tanto de la eficiencia de detección de las medidas estáticas como de las medidas dinámicas.

Como en las medidas dinámicas reales el fondo ambiental durante la medida de la muestra, varía con la carga del vehículo que atenúa su valor en un porcentaje hasta del 30 %, y las detecciones netas para la misma muestra, varían con la velocidad del paso de la muestra, para simplificar y hacer reproducibles los ensayos, estos se realizan con muestras puntuales sin blindaje que se pasan andando a una velocidad próxima a 5 km/h.

- 1.- La **eficiencia de detección**, E_P , y su incertidumbre típica, $u(E_P)$, para una muestra calibrada de actividad, A_C , colocada frente al detector en una posición, o cuando pasa por una trayectoria, es:

$$E_P = \frac{r_g - r_0}{A_C} \quad \text{Ec. 5}$$

$$u(E_P) = \sqrt{\frac{1}{A_C^2} \left(\frac{r_g}{t_g} + \frac{r_0}{t_0} \right) + E_P^2 \cdot \frac{u^2(A_C)}{A_C^2}} \quad \text{Ec. 6}$$

- 2.- La **incertidumbre típica de la eficiencia de detección**, $u(E_P)$, cuando se realizan varias medidas, se calcula con las incertidumbres de las medidas individuales. Las variaciones superiores a esta incertidumbre, asociadas a los parámetros geométricos de los ensayos, se consideran despreciables.

- Para evaluar la incertidumbre de la eficiencia dinámica media de varias medidas, $u(\bar{E}_P)$, se recomienda obtener las detecciones del fondo y las detecciones máximas de la muestra, obtenidas con varios informes de alarmas por cada detector.

$$u^2(\bar{E}_P) = \sum_i \frac{u^2(E_{pi})}{n^2} \quad \text{Ec. 7}$$

4. ACTIVIDAD DE UNA MUESTRA.

Cuando se mide una muestra puntual problema de Cs-137, con los mismos detectores y en las mismas condiciones, con los datos de los detectores y de la eficiencia, se puede calcular su actividad, A_M , y su incertidumbre, $u(A_M)$.

- 1.- La **actividad de la muestra**, A_M , y su incertidumbre típica, $u(A_M)$, para una muestra colocada frente al detector en la misma posición es:

$$A_M = \frac{r_g - r_0}{E_P} \quad \text{Ec. 8}$$

$$u(A_M) = \sqrt{\frac{1}{E_P^2} \left(\frac{r_g}{t_g} + \frac{r_0}{t_0} \right) + A_M^2 \cdot \frac{u^2(E_P)}{E_P^2}} \quad \text{Ec. 9}$$

- 2.- La **tasa de dosis de la muestra**, D_M , para una muestra colocada a una distancia, d , indicada en cm, del detector es:

$$D_M = \frac{956,2}{d^2} A_M \quad \text{Ec. 10}$$

5. LÍMITE DE DETECCIÓN.

En la norma ISO-11929, también se indica como se calcula el **límite de detección**, cuando se conocen los valores de la tasa de detecciones del fondo, r_0 , el tiempo de medida del fondo, t_0 , el tiempo de medida de la muestra, t_g , y las probabilidades de obtener una detección cuando no hay muestra activa, $k_{1-\alpha}$, o de no tener una detección cuando hay muestra activa, $k_{1-\beta}$.

El límite de detección estático o dinámico se puede calcular para las detecciones netas de cada detector, para la actividad de una muestra o para el incremento de la tasa de dosis. En todos estos cálculos es necesario indicar la incertidumbre de la medida, como una función continua del valor de esa medida.

En estos cálculos hay que tener en cuenta, que sólo hay referencias de cálculos del límite de detección estático y no hay referencia de ningún cálculo realizado en medidas dinámicas, y que los datos empleados en los programas de algunos pórticos y las funciones o algoritmos que emplean no se conocen con detalle.

- En las medidas dinámicas de los pórticos, el fondo varía con las características del detector, el emplazamiento, las condiciones ambientales y la carga del vehículo, el tiempo de medida del fondo varía entre 10 y 30 s y el tiempo de medida de la muestra varía entre 0,3 y 1 s.
- Las probabilidades para obtener falsos negativos y falsos positivos son superiores a las medidas normales y varían entre el 0,1 % y el 0,01 %.
- Para unificar y simplificar los resultados, los cálculos se realizan tomando:
 - Tiempo de medida del fondo 30 s: $t_0=30$
 - Tiempo de medida de la muestra 1 s: $t_g=1$.
 - Probabilidades para falsos positivos y negativos del 0,1 %: $k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = 3,09$.

Para calcular el límite de detección para el 99,9 % y las condiciones anteriores:

- La incertidumbre del resultado de cada medida, $u(r_n)$, de las detecciones netas, r_n , o de la actividad media de las medidas, A_M , se obtiene como una función continua del propio resultado.

$$u(r_n) = \sqrt{\frac{r_n + r_0}{t_g} + \frac{r_0}{t_0}} \tag{Ec. 11}$$

$$u(A_M) = \sqrt{\frac{1}{E_P^2} \left(\frac{A_M \cdot E_P + r_0}{t_g} + \frac{r_0}{t_0} \right) + A_M^2 \cdot \frac{u^2(E_P)}{E_P^2}} \tag{Ec. 12}$$

- El límite de detección, $y^\#$, se obtiene con la solución de la ecuación:

$$y^\# = k_{1-\alpha} \cdot u(0) + k_{1-\beta} \cdot u(y^\#) = k \cdot (u(0) + u(y^\#)) \tag{Ec. 13}$$

- El **límite de detección**, de las detecciones netas, $r_n^\#$, y de la actividad, $A_M^\#$, es:

$$r_n^\# = k \cdot \left[2 \sqrt{\frac{r_0}{t_g} + \frac{r_0}{t_0} + \frac{k}{t_g}} \right] \quad \text{Ec. 14}$$

$$A_M^\# = \frac{k}{E_P} \cdot \left[2 \sqrt{\frac{r_0}{t_g} + \frac{r_0}{t_0} + \frac{k}{t_g}} \right] / \left(1 - k^2 \frac{u^2(E_P)}{E_P^2} \right) \quad \text{Ec. 15}$$

- El **límite de detección**, de la actividad, $A_M^\#$, cuando $u(E_p)/E_p$ es superior al 10 % es:

$$A_M^\# = \frac{k}{E_P} \cdot \left[2 \sqrt{\frac{r_0}{t_g} + \frac{r_0}{t_0} + \frac{k}{t_g}} \right] / \left(1 - k^2 \frac{u^2(A_C)}{A_C^2} \right) \quad \text{Ec. 16}$$

6. NIVEL DE ALARMA.

El nivel de la alarma de detección de un pórtico, es el número de detecciones que activa su alarma. Normalmente se fija con las detecciones equivalentes al “número de sigmas”, o número que ha de multiplicar a la raíz cuadrada del fondo de referencia. Cuando las detecciones netas son superiores al nivel de alarma se activa la alarma del pórtico. Este valor se puede calcular en cps, con el producto del “número de sigmas” y la raíz del fondo de referencia.

- El **nivel de la alarma de las detecciones** totales, r_g^A , o de las detecciones netas, r_n^A , se calcula con las detecciones del fondo y con el número de “sigmas” o raíz cuadrada del fondo, N_A , con la fórmula:

$$r_g^A = r_0 + N_A \sqrt{r_0} \Rightarrow r_n^A = N_A \sqrt{r_0} \quad \text{Ec. 17}$$

Como se ha medido el valor de la eficiencia dinámica, y se conocen las detecciones correspondientes al nivel de la alarma, se pueden calcular como nivel de alarma de detección de la actividad.

El nivel de alarma de detección de la actividad, es un valor que indica la actividad equivalente de una muestra de Cs-137, que al pasar por la trayectoria que cruza por el centro de la zona sensible de detección, activa su alarma con una probabilidad del 50 %. Como en una medida normal, su incertidumbre permite variar esta probabilidad.

- El **nivel de la alarma de la actividad**, A_M^A , se calcula con el nivel de la alarma de las detecciones netas, r_n^A , y con la eficiencia dinámica de detección, E_C .

$$A_M^A = r_n^A / E_C = N_A \sqrt{r_0} \quad \text{Ec. 18}$$

- El **nivel de la alarma de la tasa de dosis**, D_M^A en nSv/h, en la superficie del detector, se calcula con el nivel de la alarma de la actividad, A_M^A en kBq, y con la distancia entre la trayectoria de la muestra y la superficie del detector, d , en cm.

$$D_M^A = \frac{0,9562}{d^2} A_M^A \quad \text{Ec. 19}$$

ANEXO III

FORMATOS Y EJEMPLOS PARA LA VERIFICACIÓN Y CALIBRACIÓN DE LOS PÓRTICOS

ESTUDIO DEL CONTROL DE MATERIAL RADIACTIVO CON PÓRTICOS

1. VERIFICACIÓN CUALITATIVA Y CUANTITATIVA. REGISTRO DE DATOS.

Se rellenan las celdas amarillas y se bloquea el resto de las celdas.

EMPRESA XX	Proceso de Verificación	Número Protocolo
NOMBRE	Codigo del proceso 1	XX

Datos del Pórtico	Marca : MARCA del PORTICO	Modelo : XX-123 4500
	Situación: BASCULA ENTRADA	Numero : 1234

Fechas del Proceso	F.de medida : 10-dic -2007	Desde Hora : 11:00	Hasta : 13:00
	F.anterior : 12-oct -2007	Fecha Posterior : 9-ene -2008	

Datos de la Muestra	Referencia : 1122	Comentario : Caja de 9,25 kBq de Ene-05		
	Activ. (kBq) : 9.25	Incert. (%) : 5%	Fecha Calibr.: ene-05	
	Actividad hoy: 8.6	Incert. (kBq): 0.4	Dias : 1073	

EMPRESA XX	Verificaciones cualitativas del : 10-dic -2007	Muestra : 1122
Imprimes los parámetros : SI	No se modifican desde : nov-06	
Tiempo de medida del fondo (s) : 40	Alarma cuando no hay vehiculos : NO	
Nº de Sigmas de la alarma 1 : 38	Nº de Sigmas de la alarma 2 : 10	
Funcionan los Sensores : SI	Sensores OS 1 : SI	OS 2 : SI
Se activa la alarma con muestra : SI	Panel o detector D/P 1 : SI	D/P 2 : SI
Se imprime el informe de alarma : SI	Panel o detector D/P 1 : SI	D/P 2 : SI
Comentarios :		

EMPRESA XX	Medida : 10-dic -2007	Mue : 1122	8.6 kBq			
Verificación Cuantitativa del pórtico : 1234		T. Medida : 30 seg.				
Medidas realizadas	D/P 1	D/P 2	D/P 3	D/P 4	MEDIA	Unidad
Fondo Inicial :	3789	3738	3690	3596	3703	cps
Muestra Centro Panel :	5134	5187	5102	5029	5113	cps
Relación entre los Detectores :	105	109	107	105	107	%
Tasa Detecciones Netas :	1345	1449	1412	1433	1410	cps
Incert. T. Detecciones Netas :	34	34	34	34	34	cps
Eficiencia del Panel en % :	15.6	16.8	16.3	16.6	16.3	%
Incert. Efic. Panel en % :	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	%
Datos Medidas Fecha Anterior	12-dic -2007					
Tasa Detecciones Netas :	1509	1544	1545	1554	1538	cps
Eficiencia del Panel en % :	17.4	17.9	17.9	18.0	17.8	%
Variación Inferior al 10 % :	NO	SI	SI	SI		Lógica

Comentarios :	Se ha empleado la muestra de Cs-137 que viene con el equipo
	Es necesario emplear la misma muestra que en la verificación anterior

Datos del Operador	Nombre : ABC	Firma :
	Verificado por: HGJ	Firma :

Tabla 1. Formato del procedimiento de verificación cuantitativa y valor del fondo.

ESTUDIO DEL CONTROL DE MATERIAL RADIOACTIVO CON PÓRTICOS

2. CALIBRACIÓN. REGISTRO DE DATOS.

Se rellenan las celdas amarillas y se bloquea el resto de las celdas.

EMPRESA XX	Proceso de Calibración Estática y Dinámica	Número Protocolo
NOMBRE	Codigo del proceso 2	XX

Datos del Pórtico	Marca :	MARCA del PORTICO	Modelo :	XX-123 4500
	Situación :	BASCULA ENTRADA	Numero :	1234
	Altura :	183 cm	Separación :	440 cm

Datos del Proceso	F.de medida :	13-jul -2006	Desde Hora :	12:30	Hasta :	15:00
	F.anterior :	13-jul -2005	Fecha Posterior :	13-jul -2007		

Datos de la Muestra	Referencia :	182	Comentario :	Muestra Puntual Calibrada		
	Activ. (kBq) :	370	Incert. (%) :	5%	Fecha Calibr.:	abr-05
	Actividad hoy :	359.3	Incert. (kBq) :	18	Días :	468

EMPRESA XX	Portico :	1234	Fecha:	13-jul -2006	Cs-137:	182	359.3 kBq
Medidas estáticas :	T. Medida :	30 s	Distancia del Detector :	220 cm.			
Medidas dinámicas :	Al 1 :	3.8	Al 2 :	12	Sigmas	Dist. de Paso :	220 cm.
1.00	T. Mues. :	1 s	T. Fon:	30 s	Probabilidad :	0.9990	k_s= 3.09

Medidas estáticas		D - A1	D - A2	Pa-A	D - B1	D - B2	Pa-B	MEDIA	Unidad
Detecciones Centro Pórtico :		2202	2199	2201	2122	2028	2075	2138	cps
Fondo de los detectores :		1537	1548	1543	1467	1391	1429	1486	cps
Eficiencia Centro Pórtico :		0.185	0.181	0.183	0.182	0.177	0.180	0.181	%
Incert. Efic. Centro Pórtico :		0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	%

Medidas dinámicas				BG	TH	IN	HI	Netas	Efic.	u(Efic)	Lim. A	Niv. A
Panel	Num	Alar	Hora	cps	cps	cps	cps	cps	%	%	kBq	kBq
A	10	2A	14:18	3100	3770	4050	4370	1270	0.353	0.021	105.1	189.0
	11	2A	14:23	3050	3710	3980	4190	1140	0.317	0.020	116.7	208.9
	12	2A	14:25	2900	3540	3880	4320	1420	0.395	0.021	90.5	163.5
	14	2A	14:26	3150	3820	3560	4240	1090	0.303	0.020	124.5	222.0
	16	2A	14:27	3130	3800	3600	4410	1280	0.356	0.021	104.7	188.5
Valores Medios :				3066	3728	3814	4306	1240	0.345	0.020	107.1	192.5
B	9	2B	13:46	2760	3400	3210	4140	1380	0.384	0.020	90.9	164.1
	10	2B	13:47	2780	3420	3190	4120	1340	0.373	0.020	94.0	169.7
	11	2B	13:48	2810	3450	3290	4390	1580	0.440	0.022	79.7	144.7
	12	2B	13:49	2800	3430	3180	4140	1340	0.373	0.020	94.4	170.3
	13	2B	13:49	2830	3470	3250	4200	1370	0.381	0.021	92.7	167.4
Valores Medios :				2796	3434	3224	4198	1402	0.390	0.021	90.0	162.6
Medias del Pórtico :				2931	3581	3519	4252	1321	0.368	0.021	98.0	176.7

Parámetros Dinámicos :				Pa-A	Pa-B	MEDIA	Unidad
Fondo del Panel :				3066	2796	2931	cps
Efic. Dinámica Centro Pórtico :				0.35	0.39	0.37	%
Incert. Efic. Centro Pórtico :				0.04	0.04	0.04	%
Lim. Detección Dinámico (Act) :				107.1	90.0	98	kBq
Nivel de la Alarma (Act) :				192.5	162.6	177	kBq
Nivel de la Alarma (Dos) :				3.8	3.2	3.5	nSv/h

Comentarios :	Medidas realizadas en los ensayos iniciales.
	Se realizaron antes ensayos el 21-jun-06 y despues el 23-ago-06.
	Se toman los datos de las medidas del 13-jul-06

Datos del Operador	Nombre :	XYZ	Firma :	
	Verificado por:	YUY	Firma :	

Tabla 2. Formato del procedimiento de calibración estática y dinámica.